

Министерство образования и науки РФ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра физической электроники

Т.И. Данилина, В.А. Кагадей, Е.В. Анищенко

ТЕХНОЛОГИЯ КРЕМНИЕВОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Учебное пособие

В-Спектр
Томск, 2011

УДК 621.382.049.77.002 (07)
ББК 32.852
Д 18

Д 18 Данилина Т.И., Кагадей В.А., Анищенко Е.В. Технология кремниевой нанoeлектроники: Учебное пособие. – Томск: В-Спектр, 2011. – 263 с.
ISBN 978-5-91191-203-1

В учебное пособие включено описание новых технологических процессов, которые составляют основу современного производства сверхбольших интегральных схем (СБИС) и других устройств кремниевой нанoeлектроники. К таким процессам относятся субмикронная литография, ионное легирование, ионное и плазмохимическое травление наноструктур, атомно-слоевое и плазмохимическое осаждение металлов и диэлектриков. Изложены технологические маршруты формирования СБИС.

Пособие предназначено для слушателей программы переподготовки в области промышленного производства наногетероструктурных монокристаллических интегральных схем СВЧ-диапазона и дискретных полупроводниковых приборов, а также может быть использовано при подготовке студентов, обучающихся по направлению 210100 «Электроника и нанoeлектроника», 210600 «Нанотехнология», 222900 «Нанотехнология и микросистемная техника».

Учебное пособие будет полезно при подготовке магистров по программам «Твердотельная электроника» и «Наногетероструктурная СВЧ-электроника».

УДК 621.382.049.77.002 (07)
ББК 32.852

ISBN 978-5-91191-203-1

© Данилина Т.И., Кагадей В.А.,
Анищенко Е.В., 2010
© ТУСУР, 2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Введение	6
2. Тенденции развития современной технологии микроэлектроники...	9
2.1. Международная технологическая дорожная карта для полупроводникового производства	9
2.2. Закон Мура и другие тенденции	9
3. Технологические среды	13
3.1. Чистые производственные помещения	13
3.2. Жидкие химические и газообразные среды	19
3.2.1. Очистка газов	19
3.2.2. Очистка воды	22
3.2.3. Газовые разряды	32
4. Геттерирование, очистка и пассивация поверхности полупроводниковых подложек	33
4.1. Геттерирование	33
4.2. Реальная поверхность полупроводников	35
4.3. Очистка криогенными аэрозолями	41
4.4. Механизм очистки с помощью сверхкритических жидкостей (СКЖ)	42
4.5. Сухие методы очистки	45
4.6. Пассивация поверхности	45
5. Субмикронная литография	47
5.1. Основные понятия и тенденции	47
5.2. Иммерсионная литография КУФ-диапазона	54
5.3. Литография ЭУФ-диапазона	56
5.4. Импринтинг	58
5.5. Электронная литография	61
5.6. Технология электронно-лучевой литографии	78
5.7. Ионная литография	93
5.8. Рентгеновская литография	95
6. Ионное легирование полупроводников	97
6.1. Технология ионного легирования	97
6.2. Взаимодействие ионов с твердым телом	99
6.3. Распределение внедренной примеси по глубине	105
6.4. Радиационные дефекты при ионном легировании	111
6.5. Области применения ионного легирования	116
7. Быстрый термический отжиг	129
7.1. История развития импульсного отжига	129
7.2. Методы и оборудование быстрого термического отжига	129
7.3. Быстрый отжиг ионно-легированных слоёв	133

7.4. Быстрые термические обработки при формировании плёнок силицидов металлов, а также плёнок термического оксида кремния или оксинитрида кремния	140
7.5. Новые методы импульсного отжига	142
8. Травление микро- и наноструктур	147
8.1. Классификация методов травления	147
8.2. Жидкостное химическое травление	151
8.3. Физика ионного травления	156
8.4. Разрешающая способность ионно-лучевого травления	164
Маска	166
Подложка	166
8.5. Выбор и обработка маскирующих материалов при ионном травлении	170
8.6. Модель процесса травления материалов энергетическими и химически активными частицами	172
8.7. Методы плазменного травления	178
8.8. Устройства для реализации плазмохимического травления ..	184
9. Осаждение металлов и диэлектриков	187
9.1. Атомно-слоевое химическое осаждение из газовой фазы	187
9.2. Ионное и ионно-плазменное осаждение тонких пленок в технологии интегральных схем	196
9.2.1. Общая характеристика	196
9.2.2. Стимулированное плазмой осаждение тонких слоев диоксида кремния	200
9.2.3. Плазмохимическое осаждение нитрида кремния	206
9.2.4. Ионно-плазменное нанесение тонких пленок нитрида алюминия	208
9.2.5. Плазмохимическое осаждение кремния	210
9.2.6. Стимулированное плазмой осаждение металлов	212
9.2.7. Ионно-стимулированное, ионно-лучевое напыление тонких пленок	214
10. Планаризация рельефа	217
10.1. Основные понятия и тенденции развития	217
10.2. Оборудование химико-механической планаризации	222
10.3. Технология химико-механической планаризации	224
11. Формирование транзисторов в приповерхностных слоях кремния (FEOL)	230
11.1. Основные понятия и тенденции развития	230
11.2. Инженерия канала транзистора	231
11.3. Инженерия затвора транзистора	239
11.4. Технологический маршрут FEOL	241

12. Формирование межэлементных соединений и межуровневой разводки (BEOL)	246
12.1. Основные понятия и тенденции развития	246
12.2. Инженерия межуровневого диэлектрика	248
12.3. Инженерия межуровневой разводки	250
12.4. Технологический маршрут BEOL.....	251
Заключение	260
Список рекомендуемой литературы.....	262

1. Введение

Микроэлектроника является одним из важнейших катализаторов научно-технического прогресса современной цивилизации. Уровень развития и объемы производства ее основных изделий (интегральных микросхем (ИС)) во многом определяют потенциал государства. Анализ тенденций развития мировой микроэлектроники показывает, что ключевой задачей на ближайшее десятилетие является освоение производства ультрабольших интегральных микросхем (УБИС). Количество транзисторов на одном кристалле ИС-микропроцессора за ближайшие 10 лет должно возрасти с $4 \cdot 10^8$ до $3 \cdot 10^9$ штук, а физическая длина затвора транзистора – уменьшиться с 25 до 8 нм.

До недавнего времени рост рабочих частот ИС обеспечивался пропорциональным уменьшением всех размеров транзистора (длины затвора, толщины подзатворного диэлектрика, расстояния истоков – стоков, толщины легированных областей и т.д.), т.е. достигался за счёт масштабирования размеров элементов (рис. 1.1).

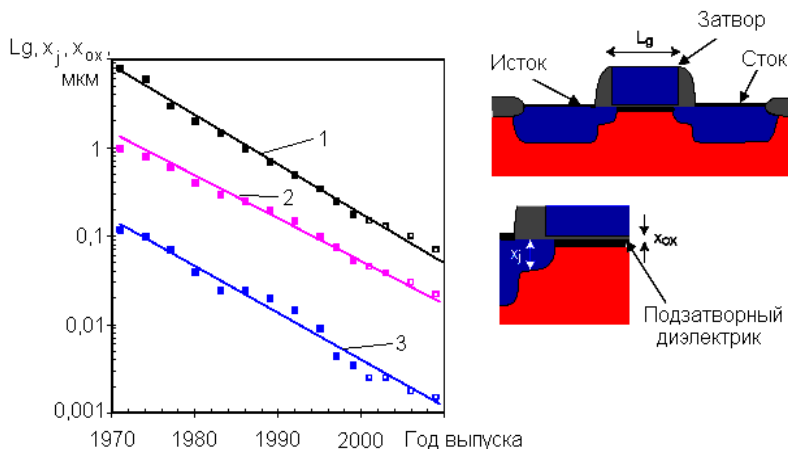


Рис. 1.1. Уменьшение размеров элементов транзисторов в зависимости от года выпуска ИС: 1 – длина затвора, L_g ; 2 – толщина легированных областей, X_j ; 3 – толщина подзатворного диэлектрика X_{ox}

Масштабирование основывалось на идее использования всего тока на передачу (обработку) сигнала, при этом потерями, связанными с утечками, пренебрегали за их малостью. По мере уменьшения размеров эти паразитные потери стали настолько большими (30–40% от потребляемой мощности для процессора, изготовленного по тех-

нологии с 90 нм топологической нормой), что «правило масштабирования» нарушилось.

В связи с этим в настоящее время основные усилия сосредоточены не только на развитии технологий формирования элементов со всё уменьшающимися размерами, но и на нахождении способов устранения конкретных причин, мешающих масштабированию. Среди методов решения проблемы масштабирования следует назвать следующие:

1) использование новых полупроводниковых материалов для формирования канала транзистора (например, напряжённого Si (strained silicon));

2) дополнительное прецизионное ионное легирование истока, стока и области канала транзистора;

3) замена затвора из легированного поликристаллического Si на металлический затвор;

4) применение при формировании подзатворного диэлектрика материалов с высокой диэлектрической проницаемостью ϵ (high- k dielectric);

5) применение при формировании межуровневой изоляции материала с низкой диэлектрической проницаемостью ϵ (low- k dielectric);

6) замена алюминиевых проводников на медную межэлементную и межуровневую разводку.

Технологический маршрут изготовления кремниевых ИС обычно делится на две части. Первая часть маршрута называется front end processing или front end of line (FEOL) и включает процессы изготовления активных приборов (транзисторов). Вторая часть носит название back end processing или back end of line (BEOL) и включает в себя процессы формирования межэлементных соединений и межуровневой разводки. Визуальное представление деления маршрута на процессы FEOL и BEOL показано на рис. 1.2. Согласно этому делению, первые четыре способа решения проблемы масштабирования относятся к процессам FEOL, а оставшиеся два – к процессам BEOL, при этом все они затрагивают базисные этапы формирования кристалла ИС в целом.

В связи с вышесказанным можно констатировать, что в настоящее время большая часть технологического маршрута изготовления ИС подвергается значительной модернизации. С одной стороны, это приводит к потере актуальности учебных пособий, опубликованных до 2000 г., а с другой стороны, ставит задачу по написанию нового руководства.

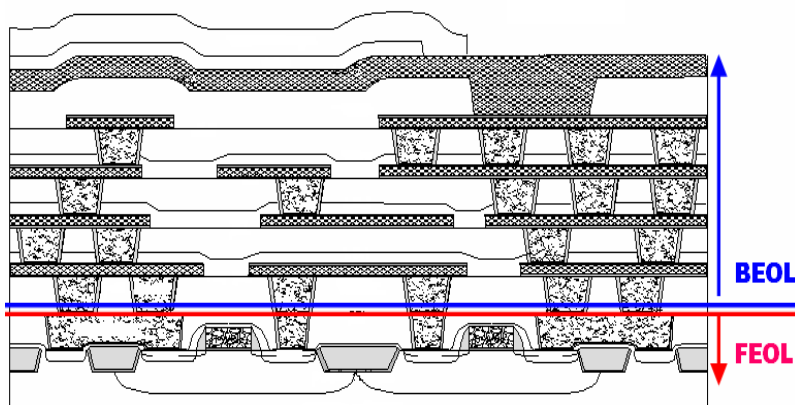


Рис. 1.2. Визуальное представление деления маршрута изготовления ИС на процессы FEOL и BEOL

Настоящее учебное пособие посвящено краткому описанию новых технологий формирования кремниевых СБИС, внедряемых в промышленность в настоящее время. Пособие не преследует цель освещения базовых технологий микроэлектроники, предполагая, что читатели уже знакомы с ними.

Разделы 1, 2, 10, 11, 12 и заключение написаны профессором, д.ф.-м.н. В.А. Кагадеем; 3, 4, 5.5, 5.7, 5.8, 6, 8, 9 – профессором, к.т.н. Т.И. Данилиной; 5.1–5.4, 5.6, 8.2 – Е.В. Анищенко.

2. Тенденции развития современной технологии микроэлектроники

2.1. Международная технологическая дорожная карта для полупроводникового производства

Основным документом, регламентирующим развитие мировой микроэлектронной промышленности, является Международная технологическая дорожная карта для полупроводникового производства (The International Technology Roadmap for Semiconductors¹). Данный документ составляется силами интернационального сообщества экспертов, включающего более 1200 специалистов из США, Японии, Тайваня, Европы и Кореи. Международная технологическая дорожная карта издаётся с 1999 г., обновляется каждый год и содержит информацию по всем аспектам развития производства кремниевых ИС на 15 лет вперёд. Практически это подробнейший план развития отрасли, содержащий главные тенденции, ближайшие и отдалённые задачи, а также нерешённые проблемы по каждому разделу полупроводникового производства.

Важно отметить, что основными целями ITRS являются формирование технических требований к приборам, технологиям и оборудованию, определение потенциальных путей решения имеющихся проблем, а также формирование календарного плана развития полупроводниковой промышленности. Данные цели реализуются с помощью проведения международных форумов, на которых обсуждаются важнейшие вопросы развития отрасли, а также посредством организации кооперации и достижения соглашений между ведущими производителями полупроводниковых приборов и технологического оборудования, между поставщиками материалов и программного обеспечения, а также внутри научного сообщества.

2.2. Закон Мура и другие тенденции

Одна из основных тенденций развития микроэлектронной промышленности была впервые сформулирована ещё в 1965 г. сотрудником компании Intel Гордоном Муром (Gordon Moore). На основе анализа имевшихся в его распоряжении данных он констатировал, что количество транзисторов в ИС за год увеличивается примерно в два

¹ The International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS) // <http://www.itrs.net/>

раза. Эта формулировка получила названия закона Мура. В несколько изменённой форме закон Мура и сегодня определяет развитие микроэлектроники, а ITRS составляется таким образом, чтобы отвечать его положениям.

На рис. 2.1 приведены зависимости количества транзисторов на одном кристалле от года изготовления ИС. Видно, что до 1970 г. закон Мура исполнялся в точности так, как его сформулировал автор. Однако затем произошло снижение темпов интеграции и в настоящее время закон Мура обычно формулируют в следующем виде: «Количество транзисторов на кристалле удваивается каждые 1,5–2 года». Данные, приведённые на рис. 2.1, свидетельствуют о том, что интеграция схем памяти происходит с несколько большими темпами, чем развитие микропроцессорных ИС. Прогноз на будущее предполагает возможность некоторого снижения темпов интеграции ИС памяти, что связано с трудностями, возникающими при масштабировании.

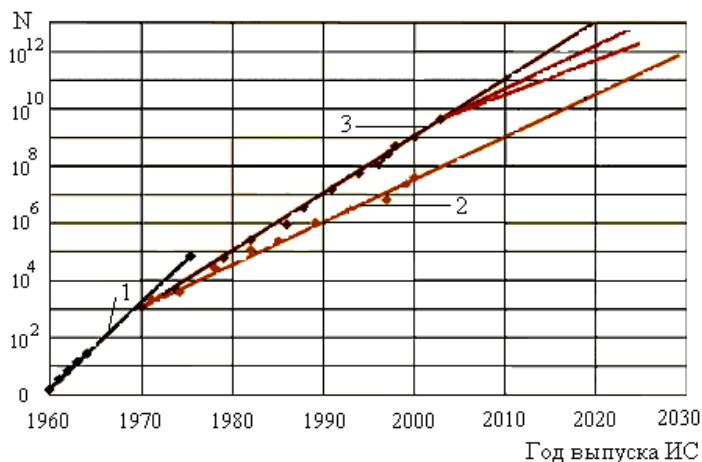


Рис. 2.1. Степень интеграции ИС (количество транзисторов в одной ИС) в зависимости от года их выпуска: 1 – ранняя стадия выпуска ИС (удвоение количества транзисторов каждые 12 мес); 2 – микропроцессоры компании Intel (удвоение каждые 24 мес); 3 – схемы оперативной памяти (удвоение каждые 18 мес)

Вторая тенденция развития микроэлектроники напрямую связана с первой и заключается в непрерывном и пропорциональном уменьшении характерных размеров элементов ИС (см. рис. 1.1). В настоящее время на лабораторных образцах ИС показано, что закон Мура может сохранить своё действие вплоть до 2020 г., когда топологиче-

ская норма для схем памяти достигнет величины 14 нм, а физическая длина затвора для микропроцессорных ИС составит 6 нм.

Непрерывное уменьшение характерных размеров элементов и рост числа транзисторов на кристалле обуславливают ещё одну достаточно очевидную тенденцию – уменьшение стоимости изготовления одного транзистора. Так, за 30 лет, начиная с 1970 г., стоимость изготовления одного транзистора упала на 5 порядков величины и в настоящее время составляет менее 10^{-7} доллара.

Ещё одна чрезвычайно важная тенденция – это увеличение диаметра полупроводниковых пластин, используемых для изготовления ИС. При этом площадь растёт пропорционально увеличению квадрата диаметра и, следуя аналогичной закономерности, увеличивается количество кристаллов ИС (чипов), снимаемых с пластины. Последнее обстоятельство существенно уменьшает себестоимость изготовления одного чипа, что экономически оправдывает переход на больший диаметр пластин, сопровождаемый сменой технологического оборудования. За сравнительно короткий период времени полупроводниковая промышленность освоила технологию изготовления ИС на пластинах диаметром 100 мм (начало выпуска пластин – 1975 г.), 150 мм (начало выпуска пластин – 1983 г.), 200 мм (1987 г.) и в настоящее время работает на пластинах с максимальным диаметром 300 мм (1995 г.). Согласно ITRS переход на пластины кремния диаметром 450 мм начнётся в 2012 г., и пластины данного диаметра будут использоваться вплоть до 2020 г.

Новая тенденция в микроэлектронике, которую необходимо отметить, касается конструирования ИС и заключается в объединении нескольких функционально различных ИС на одном кристалле, что приводит к созданию так называемых «систем на кристалле» (system-on-chip, SoC). Другой вариант интеграции заключается в объединении нескольких различных кристаллов ИС в одном корпусе и создание так называемых «систем в корпусе» (system-in-package, SiP). Такая интеграция позволяет с помощью одного устройства микроэлектроники решать целый комплекс задач. Например, микропроцессоры общего назначения могут соединяться с системами обработки сигналов для приложений беспроводной связи.

Прогресс в микроэлектронной промышленности происходит на фоне непрерывного усложнения технологии производства, удорожания разработки ИС, а также увеличения стоимости технологического оборудования и фабрики в целом. Так, например, если в 1979 г. при производстве схем динамической памяти емкостью 64 Кбит с минимальным размером элементов 3,0 мкм проводилось 100 технологических операций и семь операций литографии, то производство 1-Гбит

схем с минимальным размером элементов 0,13 мкм в 2001 г. потребовало 440 технологических операций и 21 операцию литографии. За 30 лет, начиная с 1970 г., стоимость литографического оборудования выросла на 3 порядка величины. Чуть меньшими темпами происходит рост стоимости создания новой фабрики. Начиная с 1970 г. стоимость фабрики возросла на 2 порядка величины и в настоящее время составляет около 2,5 млрд долларов. Ожидается, что в ближайшем будущем эта цифра может возрасти до 5–10 млрд долларов. Рассмотренные экономические тенденции свидетельствуют о том, что прогресс микроэлектроники лимитируется не только темпами внедрения новых технических решений или технологий, но и в значительной мере экономикой производства.

3. Технологические среды

3.1. Чистые производственные помещения

В производстве СБИС весьма актуальной задачей является проблема создания чистых производственных помещений (ЧПП) с жесткими требованиями:

а) к микроклимату помещений (запыленность воздушной среды, влажность, температура, скорости воздушных потоков, перепад давления в смежных помещениях);

б) к технологическому оборудованию и оснастке (отсутствие вибрации, шума, открытых движущихся частей, использование специальных материалов и др.);

в) к производственному персоналу (одежда, правила поведения в рабочих помещениях).

Понятно, что чистое помещение – это помещение, в котором чисто. Однако в настоящее время этот термин имеет специальное значение. Согласно стандарту ISO 14644-1, разработанному Международной организацией стандартизации (ISO), чистое помещение – это помещение, в котором контролируется концентрация аэрозольных частиц и которое построено и используется так, чтобы свести к минимуму поступление, генерацию и накопление частиц внутри помещения, и в котором, при необходимости, контролируются другие параметры, например температура, влажность и давление. Первые два из трех пунктов определения это и есть, в сущности, ответ на вопрос, что такое чистое помещение. Итак, чистое помещение – это помещение, снижающее до минимума поступление, генерацию и накопление частиц. Это достигается, во-первых, подачей в чистое помещение больших объемов воздуха, фильтруемого высокоэффективными фильтрами. Он подается для разбавления и удаления частиц и бактерий, выделяемых персоналом и технологическим оборудованием, установленным в чистом помещении, а также для того, чтобы создать в помещении барьер от попадания загрязненных воздушных потоков извне. Во-вторых, чистое помещение построено из материалов, которые не генерируют аэрозолей и могут легко очищаться. И, наконец, работающий в чистом помещении персонал носит спецодежду, изолирующую его от окружающей среды и снижающую количество выделяемых персоналом частиц и микроорганизмов. В чистых помещениях могут также контролироваться температура, влажность, уровень шума, освещенность и вибрация.

В табл. 3.1 показаны источники микрозагрязнений в воздухе и характерные для них размеры.

Таблица 3.1

Источники возможных загрязнений ЧПП

Фактор загрязнения	Категория загрязнения	Источник загрязнения	Размеры частиц загрязнения, мкм
1	2	3	4
Динамические факторы	Технический и обслуживающий персонал	Выделение бактерий и вирусов	От 0,01 до 10
		Испарение тела и жировые выделения	От 0,01 до 1
		Использование косметики	От 0,1 до 1
		Шелушение кожи	От 0,1 до 100
		Выпадение волос	100
		Проникновение табачного дыма	От 0,1 до 1
		Использование технологической одежды из пылевыделяющих тканей	От 1 до 10
		Выделение частиц при передвижении	От 1 до 5
	Технологическое оборудование и материалы	Использование пылевыделяющих материалов	До 100
		Генерация частиц внутри производственного оборудования	От 1
Статические факторы		Выделение пыли из вакуумных устройств	От 0,1 до 0,5
		Масляный туман из вакуумного насоса	От 0,01 до 1
		Использование неочищенных инструментов и приспособлений	От 1 до 100
		Использование непротертого технологического оборудования	От 1 до 100
	Транспортировка изделий	Использование загрязненных кассет и других видов тары для хранения и транспортировки изделий	От 0,1
		Выделение пыли от транспортных устройств	От 10
	Манипулирование	Выделение частиц при межоперационной транспортировке	От 1 до 500
		Повреждение деталей при выполнении загрузочных и разгрузочных работ	От 1 до 500

Продолжение табл. 3.1			
1	2	3	4
Статические факторы	Технологическая среда	Малоэффективная очистка подаваемого в ЧПП воздуха	От 0,5
		Попадание в технологический воздух посторонних частиц (генерируемые частицы и т.п.)	От 0,5
	Химические реагенты	Посторонние включения в исходных фоторезистах и реагентах, реактивы	От 0,5
		Коррозия аппаратов, трубопроводов, сосудов, фильтров	От 1,0
	Техническая вода и газы	Неочищенные газы и деионизованная вода	От 0,05

В табл. 3.2 представлена взаимосвязь классов чистоты помещений по ISO 14644-1 с концентрацией аэрозольных частиц и их размеров. Чистота по взвешенным в воздухе частицам обозначается классификационным числом N . Максимальная допустимая концентрация частиц C_n для каждого данного размера частиц D определяется из уравнения

$$C_n = 10^N \cdot \left(\frac{0,1}{D} \right)^{2,08},$$

где N – класс по ISO, не превышающий 9. Допускаются промежуточные классы с минимальным интервалом $0,1N$; D – размер частиц, мкм; $0,1$ – постоянная величина с размерностью мкм.

Таблица 3.2

Классификация чистых помещений и чистых зон по ISO 14644-1

Класс по ISO	Предельно допустимая концентрация частиц (частиц/м ³ воздуха), размер которых равен или превышает указанный в таблице					
	≥0,1 мкм	≥0,2 мкм	≥0,3 мкм	≥0,5 мкм	≥1 мкм	≥5,0 мкм
ISO 1	10	2				
ISO 2	100	24	10	4		
ISO 3	1000	237	102	35	8	
ISO 4	10000	2370	1020	352	83	
ISO 5	100000	23700	10200	3520	832	29
ISO 6	1000000	237000	102000	35200	8320	293
ISO 7				352000	83200	2930
ISO 8				3523000	832000	29300

ISO 9				35200000	8320000	293000
-------	--	--	--	----------	---------	--------

В обозначении класса чистоты конкретного помещения указывается, при каких размерах частиц проведена аттестация помещения. Например, формулировка «Класс 4 ISO» (при 0,2 мкм) относится к воздуху, содержащему не более 2370 частиц/м³ размером 0,2 мкм и не более 83 частиц/м³ размером 1 мкм.

Требования к температуре и влажности ЧПП диктуются параметрами ИС. Колебания температуры изменяют линейные размеры оснастки и обрабатываемых объектов, скорости химических реакций, скорости испарения применяемых материалов, показания контрольно-измерительных приборов и др. Поэтому для каждой чувствительной к колебаниям температуры технологической операции устанавливаются нормы допусков на отклонения от оптимальной температуры воздушной среды.

Влажная среда нежелательна при проведении практически всех технологических операций. Абсорбируясь на различных поверхностях, влага и растворенные в ней вещества приводят к образованию нежелательных окислов и труднорастворимых соединений. При термических обработках на таких поверхностях могут образоваться неровности (эрозия), приводящие к ухудшению параметров ИМС. Влажность воздуха ЧПП стремятся поддерживать минимальной, но не ниже санитарной нормы.

Стандартами установлены следующие допустимые значения точности поддержания температуры воздушной среды: $\pm 0,1$; $\pm 0,2$; $\pm 0,3$; $\pm 0,5$; $\pm 1,0$; $\pm 5,0$ %. Выбор значения точности поддержания температуры осуществляется в зависимости от технологических операций, но значения температуры не должны выходить за пределы 20–24 °С.

Также установлены следующие допустимые значения точности поддержания относительной влажности воздушной среды: ± 3 ; ± 5 ; ± 10 %. Выбор значения точности поддержания относительной влажности осуществляется в зависимости от вида выполняемых в ЧПП операций, но значения относительной влажности не должны превышать 60%.

При выполнении разных операций в одном помещении класс его чистоты устанавливается по наиболее критичному процессу. Не допускается выполнение технологических операций, требующих высшего класса чистоты в помещении низшего класса.

Существуют два основных типа чистых помещений, которые отличаются друг от друга способами обеспечения вентиляции. Это турбулентно вентилируемые чистые помещения и чистые помещения с

однаправленным потоком воздуха. Турбулентно вентилируемые чистые помещения называются еще помещениями с неоднаправленным потоком воздуха. Первоначально чистые помещения с однонаправленным потоком называли чистыми помещениями с «ламинарным потоком». В чистых помещениях с однонаправленным потоком используется гораздо большее количество воздуха, чем в турбулентно вентилируемых чистых помещениях, и они обеспечивают более высокий уровень чистоты.

На рис. 3.1 представлена конструкция чистого помещения, которая была популярна в последние годы.



Рис. 3.1. Чистое помещение с вертикальным однонаправленным потоком воздуха

Однаправленный воздушный поток движется от потолка, состоящего сплошь из высокоэффективных фильтров, вниз через пол чистого помещения. В некоторых проектах возврат воздуха осуществляется через камеры, расположенные под фальшполом, в то время как в других вариантах (см. рис. 3.1) имеются большие подпольные пространства для технического обслуживания. Тип чистого помещения, представленный на рис. 3.1, часто называют ballroom (буквально «танцзал»), поскольку такое чистое помещение представляет собой единый большой объем. Подобное решение типично для помещений площадью более 1000 м². Оно дорогое, но легко адаптируется к новым задачам.

В чистом помещении зального типа потолок из высокоэффективных фильтров снабжает чистым воздухом всю комнату безотносительно к реальным нуждам. Понятно, что воздух лучшего качества необходим там, где находится изделие, а в других местах будет при-

емлем и менее чистый воздух. На базе такой концепции были спроектированы более дешевые чистые помещения, в которых сервисные коридоры, соответствующие более низкому классу чистоты, чередуются в виде «гребенки» с чистыми туннелями более высокого класса, где и происходит работа с продукцией (рис. 3.2).

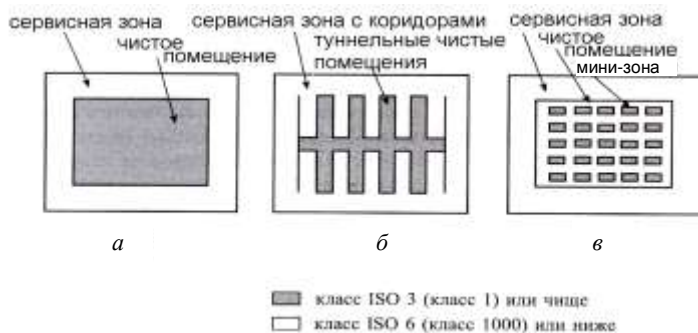


Рис. 3.2. Схематическое изображение чистых помещений трех типов: а – чистое помещение зального типа; б – чистое помещение туннельного типа; в – чистое помещение с мини-зонами

Оборудование встроено в перегородки так, чтобы подвод трубопроводов находился в сервисных коридорах. Обслуживающий персонал может получить доступ к технологическому оборудованию, не входя в чистое помещение, где проводится технологический процесс с участием полупроводниковых пластин. В чистых помещениях зального типа это также возможно, но требует установки дополнительных стеновых перегородок, обеспечивающих выделение чистых туннелей и сервисной зоны. Такие перегородки можно демонтировать и вновь собирать в разных конфигурациях по мере необходимости.

В сервисную зону обычно подается меньшее количество воздуха, и его чистота соответствует более низкому классу. Чистые туннели могут быть спроектированы так, чтобы обеспечить разные классы чистоты. Однонаправленный воздушный поток может идти от потолка или стены, поверхность которых целиком состоит из фильтров; в системах, не требующих самого высокого класса чистоты, фильтры могут не занимать 100% поверхности.

В мини-зонах (см. рис. 3.2, в) для изоляции чувствительного к загрязнениям производственного участка используется физический барьер (как правило, ограждение из стекла, пластиковой пленки и др.). Внутри мини-зоны обеспечивается большее количество воздуха высокого качества, чем в остальном объеме помещения.

Из диаграммы, приведенной на рис. 3.3, видно, что проблема чистых помещений носит комплексный характер.

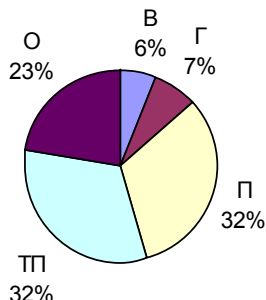


Рис. 3.3. Диаграмма основных источников микрочастиц пыли: П – обслуживающий персонал; ТП – технологический процесс; О – оборудование, оснастка, средства автоматизации; Г – газы и химикаты; В – воздушная среда

Недостаточно создать собственно чистое производственное помещение, которое обеспечивает нужный класс чистоты при отсутствии технологического оборудования и персонала. Нужно одновременно применять оборудование, выделяющее минимум загрязнений или не выделяющее их вообще, одеть людей в «непылящую» одежду, научить их правильно вести себя и т.д. Иначе значительные затраты на создание чистых помещений попросту бессмысленны.

3.2. Жидкие химические и газообразные среды

3.2.1. Очистка газов

В современном производстве СБИС используется более 270 химических веществ в жидком и газообразном состоянии. С уменьшением размеров элементов количество химических веществ становится фактором, определяющим выход годных ИМС (раньше эту роль выполняла фотолитография). Назначение газов в полупроводниковом производстве – создавать при выполнении отдельных операций защитные, восстановительные или окислительные среды.

Наиболее широко используемым газом является азот, который, как правило, применяется в качестве псевдоинертного газа в печах во время отжига. Применяют азот в системах химического осаждения из паровой фазы как инертный наполнитель на финишной стадии процесса. Наконец, азот применяют в качестве среды, свободной от воздуха и частиц, в различном оборудовании, начиная от сложного технологического оборудования до простых шкафов для хранения фотошаблонов или пластин.

Для защитной среды используют также аргон, гелий и сухой воздух. Для восстановления поверхности полупроводника пользуются

водородом. Окислительные среды получают либо парами воды, либо сухим или влажным кислородом.

В табл. 3.3 приведен качественный перечень примесей, присутствие которых в технологических газах создает проблемы при их использовании в полупроводниковом производстве, а также причины этих проблем.

Таблица 3.3

Примеси в газах высокой чистоты и их влияние на полупроводниковое производство

Газ-носитель	Примеси	Влияние примесей
Азот	Кислород	Влияет на управление скоростями роста окисла в печах и нарушает межфазную поверхность. В системах химического осаждения из паровой фазы (CVD – chemical vapour deposition) применяются такие газы, как моносилан, дихлорсилан и фосфин. При контакте с небольшим количеством кислорода первые два образуют диоксин кремния в виде пыли, последний также генерирует загрязнения в виде частиц
Азот	Влага	В печах влага может, также как и в случае с кислородом, существенно влиять на поверхность раздела кремний/оксид кремния. Размер молекулы воды меньше, чем молекулы кислорода, поэтому влага по отношению к межфазной поверхности является более опасным загрязнителем, чем кислород
Азот	Углеводороды	Присутствие углеводородов может иметь два конкретных последствия. Во-первых, при их разложении углерод может попасть в слой оксида, снижая его целостность как изолятора. Во-вторых, при разложении углеводородов может образовываться водяной пар, оказывающий тот же эффект, что и влага в азоте
Кислород	Влага	Как влага в азоте
Кислород	Углеводороды	Как углеводороды в азоте. Кроме того, они взаимодействуют с газами, такими как хлористый водород (который применяют во многих процессах формирования слоя оксида) с образованием нежелательных продуктов
Водород	Кислород	Оказывает отрицательное влияние на скорости образования водяного пара
Водород	Влага	Проблемы незначительны
Водород	Углеводороды	Как углеводороды в кислороде
Аргон	Кислород	Как кислород в азоте

Аргон	Влага	Как влага в азоте
Аргон	Углеводороды	Как углеводороды в азоте

Проведение определенных процессов по очистке газов дает возможность поднять качество газов до категории изделий высокой чистоты, содержащих только несколько ppm (parts per million) примесей. Например, в промышленности полупроводников газы используются такой чистоты, содержание примеси при которой измеряется в ppb (parts per billion), и в особых случаях с чистотой, измеряемой в ppt (parts per trillion). Биллион – это 10^9 , триллион – 10^{12} .

Рынок специальных газов состоит из рынка редких газов и широкого диапазона газов и их смесей для специального применения, где обычные индустриальные газы не могут отвечать всем требованиям. Чтобы поддерживать необходимое качество газа, газ наполняется в баллоны, которые подверглись специальному процессу очистки. Система наполнения и точного дозирования компонентов – необходимые условия для того, чтобы гарантировать необходимые чистоту и состав газа.

Числовая маркировка была введена для облегчения ориентации в качестве (чистоте) газа (табл. 3.4). Число перед запятой определяет число девяток в процентном соотношении чистоты газа, а число после запятой соответствует последней цифре.

Т а б л и ц а 3.4

Числовая маркировка чистоты газов

Обозначение	Чистота газов, %	Остаточные примеси, ppm	Остаточные примеси, %
2.0	99,0	10000	1
3.0	99,9	1000	0,1
3.5	99,95	500	0,05
4.8	99,998	20	0,002
5.0	99,999	10	0,001
5.5	99,9995	5	0,0005
7.0	99,99999	0,1 ppm (100 ppb)	0,00001

Специальные газы высокой чистоты различаются:

- газы с гарантируемым составом;
- газы чистоты до 7.0 (99,99999 %);
- газы, используемые в электронной промышленности;
- особо чистые газы. В технологии СБИС уже требуются газы со степенью очистки до 9.0 (т.е. девять девяток).

Установка очистки азота предназначена для удаления нежелательной влаги и кислорода, и процесс состоит из следующих этапов:

1. Исходный азот поступает в реактор, который работает при температуре окружающей среды. Реактор заполнен никелевым катализатором для удаления кислорода.

2. Затем газ проходит в следующую емкость – адсорбер, заполненный цеолитом, для удаления из газа влаги.

3. Когда одна из двух технологических цепочек исчерпывает свой ресурс, ее отключают на регенерацию.

4. Реактор и адсорбер при регенерации нагревают соответственно до 250 и 350 °С.

5. Азот, выходящий из работающего адсорбера, смешивают с очищенным водородом. Эту смесь пропускают обратным током через отключенный от линии регенерируемый адсорбер, чтобы удалить из него влагу, а затем подают в реактор, где водород реагирует с кислородом на катализаторе, образуя водяной пар. Водяной пар сбрасывается в атмосферу.

Достижимые уровни очистки в таких системах:

Кислород: гарантированно менее 20 ppb.

Влага: менее 20 ppb.

Углеводороды: менее 20 ppb.

Подобные системы очистки газов используются для получения чистых кислорода, аргона, водорода. При очистке кислорода на первой ступени используется платиновый катализатор при температуре 350 °С, в присутствии которого происходит окисление содержащихся в газе углеводородов, при этом образуются углекислый газ и вода. При очистке аргона используется палладиевый катализатор, нагретый до 400 °С. Для водорода существует два основных типа установок. В первом, более простом типе установок, используются адсорбенты, а разделение основано на том, что размер молекулы газа-носителя (водорода) меньше, чем размер всех находящихся в нем примесей. Второй, более сложный тип установок, имеет отдельные аппараты для удаления каждой примеси. Оба типа установок очистки способны производить водород с содержанием примесей (кислорода, влаги и углеводородов) на уровне менее 100 ppb.

В последние годы полупроводниковое производство становится все более сложным с уменьшением размеров и, следовательно, более чувствительным к загрязнениям. Перечень контролируемых примесей продолжает расти, и несомненно, что скоро в него попадут и такие примеси, которые вообще не считались вредными в прошлом.

3.2.2. Очистка воды

При составлении травителей, электролитов и отмывке полупроводниковых пластин и кристаллов используют деионизованную воду. Если в воде присутствуют примеси, то они адсорбируются полупроводником, что ведет к ухудшению электрических характеристик, стабильности параметров и надежности СБИС. В отличие от других химических реактивов, сверхчистая вода применяется на линии обработки пластин практически всюду, и ее доля в общем объеме используемых химикатов составляет более 99,5%.

Загрязнения, которые следует принять во внимание, могут быть сгруппированы в пять основных категорий:

- Ионные.
- Неионные.
- Органические.
- Бактерии (микроорганизмы).
- Растворенные газы.

Ионные загрязнения

Ионные примеси составляют самую большую долю от общего объема всех загрязнений, которые должны быть удалены из исходной воды. Тип примеси и ее концентрация зависят от используемого местного источника воды, однако наиболее часто присутствующие примеси, такие как ионы кальция, натрия, калия, магния, хлориды, сульфаты, карбонаты и бикарбонаты, будут почти наверняка преобладать. Основные методы удаления ионных примесей – это обратный осмос и ионный обмен, и только экономические соображения определяют границы применимости каждого из этих методов.

Эти загрязнения при их присутствии в воде отрицательно влияют на свойства полупроводников и будут почти наверняка приводить к отказам готовых изделий. Единицей измерения содержания ионных примесей является электросопротивление – величина, обратная проводимости; она более удобна для использования при таких низких уровнях загрязнений. Электросопротивление измеряется в МОм·см при температуре 25 °С (это важно, т.к. электросопротивление зави-

сит от температуры). На рис. 3.4 показано соотношение между электросопротивлением и концентрацией в ppm ионных примесей хлорида натрия.

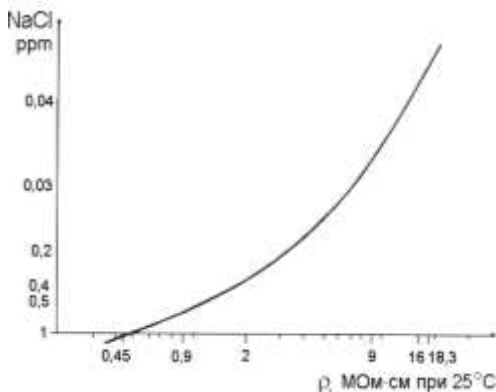


Рис. 3.4. Зависимость электросопротивления сверхчистой воды от концентрации примеси в ppm (NaCl или эквивалент)

Теоретический предел электросопротивления не равен бесконечности, так как молекула воды слабополярна; в действительности его значение составляет 18,27 МОм×см при 25 °С. Современные установки производят сверхчистую воду с электросопротивлением, превышающим 18 МОм×м, что эквивалентно концентрации NaCl менее 0,04 ppm. Существует также ряд ионов, которые являются слабыми; их наличие также будет влиять на выбор конкретной технологии и установки очистки воды.

Неионные загрязнения

Эта группа соединений представляет собой загрязнения, которые либо действительно неионные (т.е. образованы из ковалентно связанных веществ) или настолько слабо ионизированы, что их трудно удалить из воды с использованием стандартных ионообменных смол. Они также могут находиться в форме частиц из нерастворимых веществ, которые содержатся в исходной воде или генерируются в установке в процессе очистки воды, например мелкие фракции ионообменных смол.

Эти загрязнения могут вызвать снижение выхода годной продукции из-за вызванных ими повреждений между последовательными слоями на кремниевой пластине или «коротких замыканий». Содержание неионных загрязнений выражают в количестве частиц с размером, превышающим заданный, в литре воды. Допустимый размер частиц зависит от геометрии изделия (размеров его элементов) и обычно не должен превышать 0,1 мкм.

Органические загрязнения

Количество органических соединений, имеющих в исходной воде, зависит от того, поступает вода из источника с жесткой водой или из поверхностного водоема. Жесткая вода обычно прозрачна, причем общее солесодержание таких вод, как правило, выше 500 ppm. С другой стороны, в поверхностных водоемах обычно образуется «мягкая вода» с общим солесодержанием, не превышающим 100 ppm, но, как правило, сильно загрязненная органическими соединениями, попадающими в воду из почвы.

Содержание органических загрязнений в сверхчистой воде должно быть менее 10 ppb, а предпочтительнее менее – 5 ppb. Непрерывный инструментальный on-line контроль за содержанием органических загрязнений на всех стадиях водоподготовки очень важен для обеспечения раннего выявления проблем и для гарантии соблюдения технических требований к чистоте воды. Содержание органики, выражаемое в единицах концентрации общего органического углерода,

может быть измерено путем его превращения в диоксид углерода с помощью УФ-излучения, химических реактивов или сочетанием того и другого.

Бактерии

Бактерии могут загрязнять полупроводники подобно обычным (неживым) частицам либо оставляя после своего разрушения на поверхности пластины многочисленные пирогены.

Растворенные газы

Наиболее часто встречающиеся растворенные в воде газы – это кислород и диоксид углерода, что зависит от источника воды, ее pH и температуры. Растворенный кислород может быть причиной усиленного окисления поверхности пластин и, если его не удалить, будет определять изменчивость качества воды после финишной очистки. Растворенный диоксид углерода образует в растворе бикарбонат- и карбонат-ионы, равновесие между которыми определяется величиной pH воды.

Оба газа легко удаляются из воды, а используемые для этого методы будут обсуждаться далее. Для достижения приемлемого выхода годных изделий все вышеперечисленные загрязнения должны быть удалены до предельно низких уровней, которые должны тщательно поддерживаться. Допустимый уровень каждого загрязнения постоянно пересматривается (но никогда в сторону увеличения), особенно при уменьшении геометрических размеров полупроводниковых приборов, что, в свою очередь, делает загрязнения все менее терпимыми.

Таблица 3.5 содержит перечень обычных загрязнений и типичные значения уровней загрязнений, подлежащих контролю на современном заводе.

Т а б л и ц а 3.5

Требования к качеству воды после очистки

Параметр	Требования
Сопротивление при $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	$> 18,0\text{ МОм}\cdot\text{см}$
Общее содержание органического углерода	$< 5\text{ ppb}$
Содержание растворенного диоксида кремния	$< 3\text{ ppb}$
Частицы размером более $0,1\text{ мкм}$	$< 100\text{ частиц/л}$
Бактерии	$< 5/\text{л}$
Катионы (Na, K, Ca, Mg, NH_4)	$< 0,1\text{ ppb}$ (каждого)
Анионы (F, Cl, SO_4 , NO_3 , Br, PO_4)	$< 0,1\text{ ppb}$ (каждого)

В табл. 3.6 приведены виды примесей и возможная технология очистки воды.

Существует большой выбор процессов и вариантов предварительной обработки воды, предшествующей ионно-обменным и мембранным методам. Для удаления механических частиц используются фильтры, в том числе с активированным углем.

Т а б л и ц а 3.6

Примеси и методы их удаления

Составляющие	Частицы	Растворенные соли (ионы)	Растворенная органика	Бактерии
Возможная технология очистки	Грубые фильтры	Дистилляция	Акт. уголь	Мембраны
	Песчаные фильтры	Мембраны	Мембраны	УФ-облучение
	Мембраны	Ионный обмен	Нагревание	Химикаты

Для удаления растворенных в воде солей используют следующие методы:

1. Дистилляция (выпаривание) – обеспечивает отделение чистого пара от солей, остающихся в растворе.
2. Замораживание – кристаллы льда практически не содержат примесей, соль остается в растворе.
3. Обратный осмос – «продавливание» молекул воды под влиянием приложенного внешнего давления, превышающего осмотическое давление раствора, через специальную «полупроницаемую» мембрану.

Обычно на практике используют установки обратного осмоса. Если раствор нелетучего компонента (например, хлорида натрия) отделен от чистого растворителя (например, воды) или просто более разбавленного раствора мембраной, которая является проницаемой для растворителя и непроницаемой для данного растворенного компонента, то будет наблюдаться эффект самопроизвольного проникновения растворителя через мембрану в более концентрированный раствор под действием движущей силы, известной как осмотическое давление (рис. 3.5, а). Это перемещение молекул воды, разбавляющих концентрированный водный раствор, будет продолжаться до тех пор, пока возникающее за счет входящего потока избыточное давление в концентрированном растворе не станет равным по своей величине обратноосмотическому давлению, и тогда поток прекратится из-за установившегося по обе стороны мембраны термодинамического равновесия (рис. 3.5, б).

Обратный процесс – опреснение может быть достигнуто путем, представленным на рис. 3.5, в. Так, если со стороны концентрированного раствора приложить давление выше осмотического, то будет

происходить проникание (проникновение) через мембрану чистого растворителя, например воды. Это является основой процесса обратного осмоса (RO – Reverse Osmosis), и на рис. 3.6 представлена простейшая его схема.

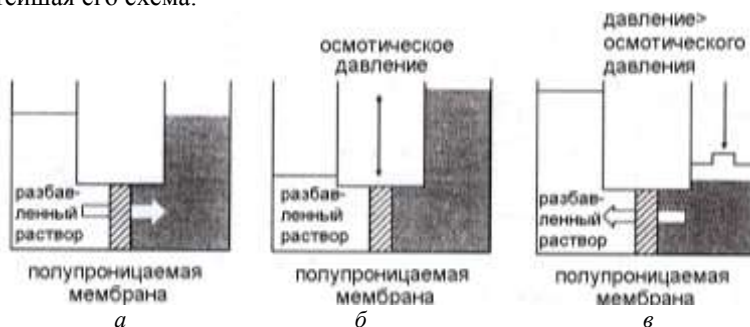


Рис. 3.5. Осмос и обратный осмос

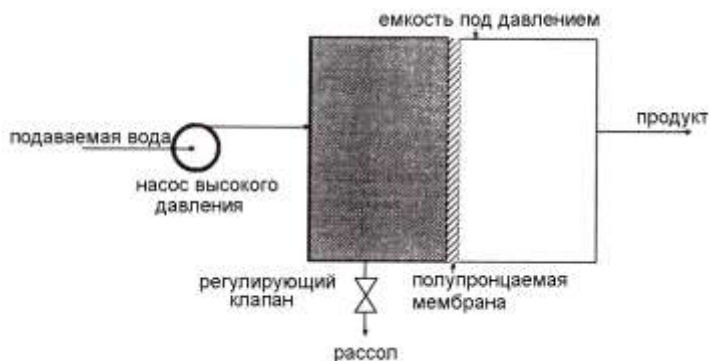


Рис. 3.6. Упрощенное представление обратноосмотической системы

Вода для очистки подается с помощью насоса высокого давления. Солевой концентрат отводится через клапан. Через мембрану должно проникать минимальное количество солей. После мембраны получаем выход полезного продукта.

Для целей опреснения воды были разработаны ацетатцеллюлозные мембраны, в которых применяется очень тонкая плотная оболочка (активный слой) на поверхности пористой подложки. Тонкая пленка (так называемая «асимметричная мембрана») обладала хорошими свойствами до удалению солей и, имея толщину около 1 мкм, могла также обеспечить приемлемый поток воды – пористая подложка обеспечивала механическую поддержку активного или, вернее, селективного слоя без существенного влияния на гидравлическое сопротивление.

тивление мембраны в целом. Асимметричные ацетатцеллюлозные (АЦ) мембраны, как правило, обеспечивают эффективность (селективность) по удалению солей на уровне 92–97% и поток воды 0,4–0,8 м³/м² в день.

Из целого ряда последних исследованных и разработанных материалов наиболее успешной альтернативой ацетатцеллюлозным являются *полиамидные* мембраны. Однако важно помнить, что полиамидные мембраны подвержены необратимому разрушению даже при кратковременном контакте с водой, содержащей хлор. В этом случае исходная вода должна быть эффективно дехлорирована, прежде чем поступит в модуль обратного осмоса.

Многие из недавно разработанных обратноосмотических мембран выпускаются как тонкопленочные «композиционные мембраны». Существенной разницей между такими мембранами и традиционным рядом целлюлозно-ацетатных мембран является то, что последние состоят из рабочего и поддерживающего слоев, получаемых при производстве как единое целое, в то время как в композиционных мембранах эти два слоя водятся на различных стадиях и зачастую состоят из различных полимеров (рис. 3.7). В последнем случае значительно легче обеспечить улучшение характеристик одного слоя без риска снижения характеристик другого слоя. Одной из крайне полезных особенностей конструкции композиционных мембран является возможность создания значительно более тонких активных слоев, чем это возможно на основе асимметричной формы.

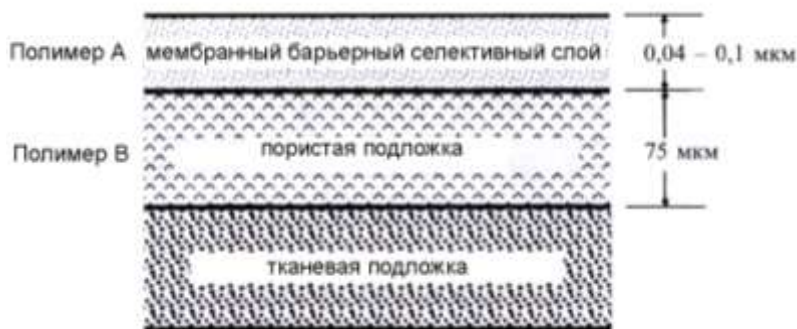
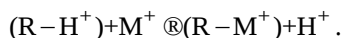


Рис. 3.7. Схематичное представление композиционной мембраны

Современные композиционные мембраны обеспечивают лучшее отделение солей без малейшего снижения потока пропускаемой воды по сравнению с мембранами на основе ацетата целлюлозы. Различные варианты таких тонкопленочных композиционных мембран произво-

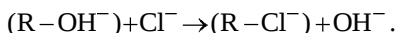
дятся для опреснения морской воды или для обработки слабосоленой воды. Например, для слабосоленой воды RO-мембраны работают при давлении 8 атм, обеспечивая эффективность удаления большинства солей до 98–99%.

Для удаления неорганических примесей используют ионообменные смолы. Все неорганические примеси находятся в воде в виде ионов-катионов Fe^{2+} , Cu^{2+} , Na^+ или анионов NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} и др. Существует два типа смол: катиониты, связывающие катионы, и аниониты, связывающие анионы. Их условные обозначения имеют вид: $\text{R}-\text{H}^+$ и $\text{R}-\text{OH}$ соответственно, где R – органический радикал. Смолы гранулированы в шарики размером 3–5 мм. Первоначально вода поступает в колонку с катионитовой смолой, где происходит связывание положительно заряженных ионов M^+ путем замещения ими протонов, входящих в состав смолы:

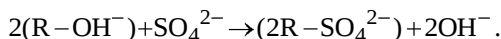


Затем вода поступает во вторую колонку, где происходит связывание отрицательно заряженных ионов I^- путем замещения ими гидроксильной группы, входящей в состав анионита.

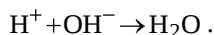
Для одновалентных ионов хлора имеем:



Для двухвалентных ионов:



Протоны и гидроксильные радикалы соединяются в молекулу воды:



Ионообменные системы удаляют из подаваемой воды все виды ионных загрязнений. О чистоте воды судят по величине ее удельного сопротивления. Большей концентрации ионов соответствует меньшее удельное сопротивление.

На рис. 3.8 показано, как меняется сопротивление воды в зависимости от времени промывки пластин.

Сопротивление воды на выходе промывочной камеры тем выше, чем меньше остаточных ионов. Промывку прекращают, когда сопротивление воды на выходе сравняется с сопротивлением на входе камеры.

Методы удаления бактерий подразделяются на следующие виды:

- а) химическое обеззараживание (хлорирование и озонирование);
- б) УФ-облучение;

- в) нагревание;
- г) ультрафильтрация.

Методы удаления органики из воды подразделяются:

- а) на ионный обмен;
- б) обратный осмос и нанофильтрацию;
- в) фильтрацию через активированный уголь;
- г) УФ-облучение.

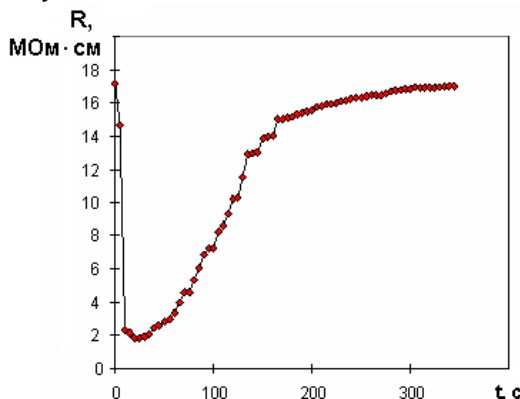


Рис. 3.8. Изменение удельного сопротивления воды в течение промывки

Системы обработки ультрафиолетовым (УФ) излучением

Необходимость удаления бактерий из сверхчистой воды обусловлена возможными повреждениями, которые могут последовать, если они достигнут поверхности пластины. Единичная бактерия может действовать также как частица, создавая неоднородность, которая может повредить последующие слои на пластинах, а если стенка клетки разрушена, то ионные компоненты бактерии могут быть причиной повреждений. Для ограничения роста жизнеспособных бактерий внутри системы финишной («полирующей») стадии очистки в полирующем фильтре смешанного действия (ПФСД), а также внутри системы распределения воды необходимо выбрать тот или иной (определенный) метод (способ) дезинфекции. Однако и нежизнеспособные бактерии содержат такие же количества органики и ионов, что и жизнеспособные бактерии, которые также должны быть удалены из потока очищенной воды. Наиболее часто используемый метод регулирования содержания бактерий – это УФ-облучение с последующей тонкой (субмикронной) фильтрацией. Этот метод, однако, эффективен только против планктонных бактерий, которые переносятся потоком воды, и неэффективен против неподвижных популяций бактерий, которые обитают в смолах, фильтрах, трубах и вентильях. Они могут попадать в больших количествах в основной поток воды вследствие

механических ударов (толчков) ила внезапных изменений скорости потока.

УФ-стерилизатор убивает бактерии путем физического воздействия в отличие от других методов, например хлорирования и озонирования, которые действуют химическим путем. Механизм УФ-облучения – воздействие ультрафиолетового излучения с длиной волны в 254 нм на взвешенные в воде планктонные бактерии. Бактерии, подвергшиеся облучению светом с этой длиной волны, погибают вследствие повреждения их ДНК и, поскольку бактерии остаются целыми (как физическое тело), они легко могут быть удалены фильтром для частиц. Эффективность всей стадии УФ-облучения зависит от типа бактерий, дозы облучения и времени облучения.

Другой метод, использование которого непрерывно расширяется, – озонирование на определенных этапах процесса обработки воды, однако этот метод не имеет широкого применения в распределительном контуре из-за возможного повреждения озоном таких элементов, как уплотнительные и герметизирующие материалы.

Использование УФ-излучения для удаления органических соединений

Большинство установок получения сверхчистой воды сейчас используют УФ-излучение с длиной волны около 185 нм для снижения содержания органических загрязнений. Мощное излучение с такой короткой длиной волны способствует разрушению органики до воды и диоксида углерода. Преобладающим механизмом этого процесса является образование под воздействием УФ-излучения гидроксильных радикалов, которые и разрушают органику.

Кроме того, одновременно при УФ-облучении разрушаются определенные углеродные связи, однако эта стадия более медленная и не является эффективной для всех углеродных связей. УФ-излучатели устанавливают до ионообменных установок, которые легче удаляют продукты окисления органики, чем природные органические соединения.

Финишная фильтрация

Последняя «линия защиты» в системе получения сверхчистой воды – это фильтрация частиц, которые достаточно велики, чтобы повредить полупроводник. Считается, что частица размером, превышающим одну десятую ширины линии, потенциально может вызвать повреждение полупроводникового устройства. Наиболее распространенный тип фильтра для частиц представляет собой корпус из нержавеющей стали, в котором устанавливается патронный фильтр для улавливания частиц размером 0,1 мкм. Фильтры из ацетата целлюлозы в настоящее время уступают место таким материалам, как нейлон, поливинилиденфторид, политетрафторэтилен.

В последние годы для финишной фильтрации получил распространение процесс ультрафильтрации, который способен наряду с дисперсными частицами удалять органические молекулы больших размеров.

3.2.3. Газовые разряды

В интенсивно развивающейся области полупроводниковых технологий широко используются разряженные газы (плазма). Разрежение газа позволяет сохранять исходное состояние поверхности пластин, контролировать скорости химических реакций, создавать условия для генерации плазмы, создавать условия для бесстолкновительного транспорта частиц, формировать потоки пара или газа, создавать механическое усилие (вакуумный прижим).

Энергетические частицы позволяют проводить целый ряд технологических процессов при пониженных температурах и повышенных скоростях. Более того, они позволяют реализовать ряд безальтернативных процессов. Получить энергетические нейтральные частицы достаточно трудно, так как отсутствует эффективный механизм их ускорения. Заряженные частицы, из которых состоит плазма, легко ускоряются в электрическом поле. Энергетические ионы инертных газов используются для ионного травления, ионного распыления (осаждения тонких пленок). Энергетические ионы активных газов используются для реактивного ионного и плазмохимического травления, для плазмохимического осаждения. Газовый разряд является также источником химически активных нейтральных частиц (радикалов) и электромагнитного излучения. Радикалы используются для плазмохимического травления и осаждения, для радикального травления и очистки. Электромагнитное излучение используется для источников света в оптической литографии, для стимуляции химических процессов, в УФ-технологиях.

В микроэлектронике обычно используются высокочастотные разряды, которые делятся на электродные и безэлектродные. Основное преимущество безэлектродных ВЧ-разрядов над электродными – это снижение количества загрязнений, генерируемых электродами. Преимущества ВЧ-разрядов над разрядами постоянного тока: формируется плазма большого объема с высокой однородностью, реализуется более широкий диапазон давлений газа, степени ионизации плазмы, энергии ионов и т.д.

В микроэлектронике обычно используют следующие типы разрядов: магнетронный разряд (постоянного тока и ВЧ), емкостно-связанный ВЧ-разряд (электродный); разряд в условиях электронного циклотронного резонанса; разряд с индуктивно связанной плазмой; разряд на геликоновых волнах. Более подробно использование газо-

вого разряда в технологии СБИС изложено в последующих разделах данного учебного пособия.

4. Геттерирование, очистка и пассивация поверхности полупроводниковых подложек

4.1. Геттерирование

Идеальная поверхность – это абстракция, которая может возникнуть при разделении объема на две части и сохранении структуры и химического состава границ раздела и приповерхностных слоев. Реальная поверхность – это сложное образование, включающее в себя непосредственно поверхность (границу раздела), а также прилегающие и взаимодействующие с ней и между собой слои твердого тела и газа. Реальная поверхность характеризуется наличием большого количества оборванных связей и отличается от идеальной по следующим параметрам:

- 1) наличием адсорбированных и хемосорбированных примесей;
- 2) реконструкцией поверхности (изменением структуры в первых поверхностных слоях).

Приближение к идеальной поверхности – это атомарно-чистая, атомарно-гладкая реконструированная поверхность.

Для многих типов СБИС, в частности для динамических схем памяти с произвольной выборкой, необходимо максимально снизить токи утечки p - n -переходов. Биполярные транзисторы с узкой базовой областью очень чувствительны к наличию преципитатов металлических примесей (в основном элементов переходных групп), которые шунтируют эмиттер и коллектор биполярного транзистора. Преципитат – это трехмерный объект, образующийся при объединении диффузно распределенных атомов примеси. Преципитаты, формируемые указанными примесями, находятся в решетке в виде силицидов, которые по большей части имеют достаточно большую электропроводность. Для удаления этих и других примесей из рабочих областей подложки разработан целый ряд методов, которые объединяют под общим названием «геттерирование».

Геттерирование – термин, принятый для обозначения процессов, которые обеспечивают удаление нежелательных примесей и дефектов. С этой целью проводят предварительное геттерирование примесей в кремниевых подложках перед началом технологических процессов изготовления ИМС. Применение этого метода обеспечивает формирование в подложках стоков точечных дефектов, поглощающих примеси, вводимые в подложки в ходе технологических процессов создания полупроводниковых приборов. Дефекты захватываются

на стоки и образуют неподвижные комплексы дефектов, которые впоследствии не оказывают влияния на работу приборов.

Один из методов удаления нежелательных примесей состоит во введении интенсивных дефектов в нерабочую поверхность подложек (внешнее геттерирование). Для этой цели применяют механическую абразивную обработку. На нерабочей стороне пластины формируют структурно-деформированный слой толщиной 5–10 мкм, который обладает свойствами геттера. Дислокационная структура этого слоя обладает способностью притягивать и удерживать структурные дефекты из объема полупроводникового кристалла. Например, диффузионная длина атомов железа при отжиге в течение 30 мин при температуре 1000 °С составляет 3000 мкм, тогда как толщина подложек – 300 мкм. Будучи захвачены дислокациями на нерабочей стороне подложки, примеси становятся безопасными.

В других методах для геттерирования быстродиффундирующих примесей используются дефекты кристаллической структуры, образующиеся в ходе преципитации кислорода (внутреннее геттерирование). Данные методы предусматривают проведение одного или нескольких циклов термообработки. Сначала с помощью отжига в водороде или в инертной атмосфере производится удаление кислорода из приповерхностных объемов подложки за счет его диффузии и испарения. Это приводит к понижению концентрации кислорода в приповерхностных слоях, где, таким образом, не происходит преципитации, так как устранены условия пересыщения твердого раствора.

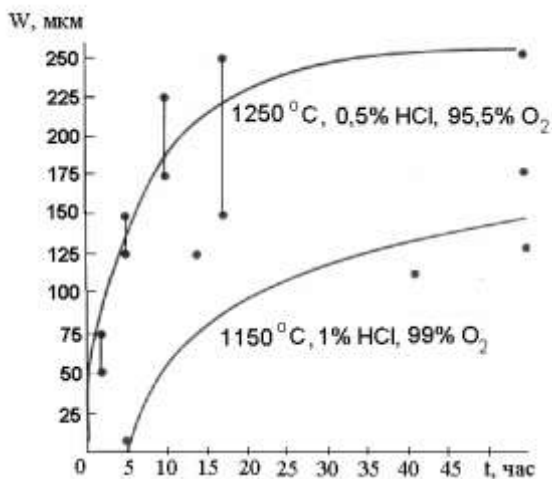


Рис. 4.1. Ширина зоны с пониженной концентрацией дефектов в зависимости от условий проведения отжига

Как видно из рис. 4.1, ширина области W , обедненной атомами кислорода, зависит от времени и температуры термообработки и от растворимости кислорода в кремнии (рис. 4.2). Эта область от 10 до 200 мкм представляет собой зону, свободную от дефектов, которая пригодна для формирования активных областей полупроводниковых приборов. Для облегчения формирования преципитатов и дефектов структуры в объеме подложки можно ввести дополнительные циклы термообработки.

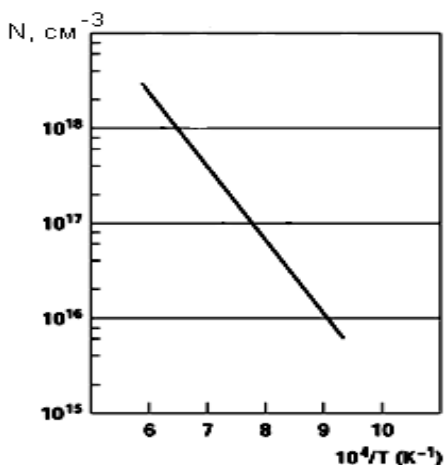


Рис. 4.2. Растворимость кислорода в кремнии

Как внутреннее геттерирование, так и введение интенсивных дефектов в нерабочую сторону подложки успешно используется в технологии СБИС.

4.2. Реальная поверхность полупроводников

В производстве интегральных микросхем важное место занимают операции очистки полупроводниковых пластин. В условиях производства СБИС полупроводниковые пластины соприкасаются с различными средами, и полностью защитить их от адсорбции примесей и получить идеально чистую поверхность практически невозможно. Технологически чистой считается поверхность, концентрация примесей на которой не препятствует воспроизводимому получению заданных значений и стабильности параметров ИМС.

Загрязнения, содержащиеся на поверхности пластин, можно условно подразделить на следующие основные группы.

Твердые включения – загрязнения частицами кремния или другого полупроводникового материала, кварца, абразива пылью, почвой, золой, пеплом и др. Они могут попадать на пластину в процессе ее механической обработки, а также из атмосферы. К этому же типу загрязнений можно отнести отдельные натуральные и синтетические волокна, попадающие на пластины с полировальников, технических тканей и спецодежды.

Пленки собственных оксидов образуются на поверхности пластин при экспонировании на воздухе, имеют характерные толщины в диапазоне от 1–2 нм для Si и несколько больше для GaAs. Для собственного оксида GaAs характерен сложный химический состав, включающий в себя несколько оксидных соединений как As, так и Ga.

Органические пленки образуются на пластинах практически на всех стадиях изготовления приборов. Их образуют масла от машинной обработки, отпечатки пальцев, жиры, воски и смолы, используемые для крепления слитков и пластин при обработке, остатки фоторезистов, поверхностно-активные вещества.

Ионные загрязнения образуются на поверхности после обработки в водных растворах, содержащих диссоциированные на ионы соединения. Так, широко применяемые растворы плавиковой кислоты и щелочей могут загрязнять поверхность ионами фтора, галлия, натрия. Ионные загрязнения могут также возникать на поверхности в результате попадания продуктов дыхания, пота (хлорид натрия).

Атомные загрязнения – это атомы тяжелых металлов (золота, серебра, меди, олова), которые чаще всего остаются на пластинах в результате восстановления из растворов. Металлы могут также вноситься порошками и отходами машинной обработки, пинцетами, частицами металлических банок для хранения и др.

Очистка в полном объеме производится только после конечной операции механической обработки пластин. Процесс очистки должен состоять из последовательных операций, каждая из которых предназначена для удаления одного или нескольких видов загрязнений. Источниками загрязнений могут быть смазки, смазочно-охлаждающие жидкости, абразивные частицы, пыль, остатки щелочей, кислот и солей, а также различные газы.

Источниками загрязнений являются: оборудование, персонал, материалы и сами процессы. В табл. 4.1 приводятся виды загрязнений и их действие на параметры ИМС.

Удаление загрязнений осуществляется путем очистки полупроводниковых пластин разными методами. Классификация методов очистки приводится на рис. 4.3.

Т а б л и ц а 4.1

Действие загрязнений	
Молекулярные загрязнения	Снижение адгезии плёнок. Формирование вредных продуктов разложения. Встраивание дефектов в растущие плёнки
Ионные загрязнения	Диффундируют по поверхности, в объём и накапливаются на границах раздела. Становятся причиной электрических дефектов. Ухудшают качество приборов и процент выхода годных. Становятся причиной возникновения дефектов структуры. Уменьшают напряжение пробоя подзатворного диэлектрика
Атомные загрязнения	Создают поверхностную проводимость. Уменьшают время жизни неосновных носителей заряда. Ухудшают качество приборов и процент выхода годных. Становятся причиной возникновения дефектов структуры. Создают перемычки между проводниками

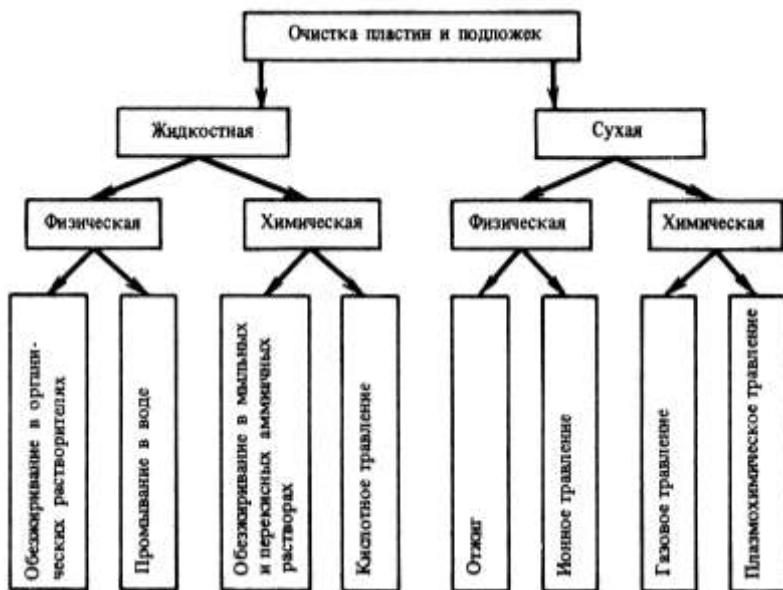


Рис. 4.3. Классификация методов очистки

Твердые частицы, оседающие на поверхности полупроводниковых пластин после резки, шлифования, скрайбирования, удаляют мягкими кистями с помощью моющих средств. Такой способ очистки называется *скруббированием*. Кисти изготовляют из беличьего или колонкового меха, мохера, нейлона и др. Процесс скруббирования происходит следующим образом. На вращающийся рабочий стол помещают кассету с пластинами, подают деионизованную воду и щетками начинают обрабатывать поверхность пластин. Затем подают воду с добавлением моющего вещества, способствующего отделению от поверхности пластин твердых частиц. После обработки раствором моющего вещества снова отмывают поверхности пластин деионизованной водой и сушат пластины центрифугированием.

Недостаток скруббирования заключается в том, что щетки не могут проникать в углубления и неровности микронных размеров. Поэтому наибольшее распространение получил способ очистки, сочетающий отмывку кистями и промывку струей растворителя или деионизованной воды. Давление жидкости в струе регулируется и достигает $3 \cdot 10^7$ Па.

Органические пленки с поверхности пластин удаляют с помощью органических растворителей: трихлорэтилена, хлористого метилена, хладона, толуола, ксилола, метилового, этилового или изопро-

пилового спиртов, ацетона, уайт-спирита и др. Пластины обрабатывают в жидком растворителе либо в его парах. Возможно также сочетание паровой и жидкостной обработок. Часто растворитель доводят до кипения, после чего производят очистку. Широко используют ультразвуковую очистку пластин в органических растворителях. При таком способе очистки в ванну с растворителем помещают излучатели ультразвуковых колебаний, под действием которых в жидкостях образуются мельчайшие пузырьки, обладающие высокой проникающей способностью и способствующие отделению загрязнений от поверхности.

Ввиду токсичности органических растворителей широкое применение находят водные моющие растворы. Растворы щелочей разлагают растительные и животные жиры при 80–100 °С, причем продукты разложения легко растворяются и смываются водой. Минеральные масла удаляют 0,5–1,0%-ми растворами поверхностно-активных веществ.

Атомные и ионные загрязнения, как правило, удаляют промывкой в кислотах и деионизованной воде. Промывка в кислотах позволяет удалить адсорбированные ионы металлов и растворить оксидные пленки на поверхности полупроводников. Чаще всего используют азотную, плавиковую, серную, соляную, уксусную и фосфорную кислоты. Процесс отмывки полупроводниковых пластин деионизованной водой ведут, постоянно измеряя электрическое сопротивление воды. По мере снижения концентрации примесей сопротивление воды постепенно повышается. При установлении постоянного сопротивления воды процесс отмывки считается законченным.

Кроме кислот для удаления ионных загрязнений используют водные растворы, содержащие перекись водорода и аммиак. Обработку такими растворами ведут в течение 10–20 мин при 75–80 °С.

После отмывки пластин в жидкости их необходимо просушить. Обычно после обработки в водных растворах пластины обрабатывают в органических растворителях, которые легче и надежнее очищаются от примесей, чем вода. Поэтому сушку лучше производить после финишной отмывки, например, в ацетоне или этиловом спирте. Сушку нагревом в термостатах или под инфракрасными лампами применяют в том случае, когда к поверхности предъявляют сравнительно низкие требования, так как при испарении с поверхности пластин на них остаются растворенные в жидкости примеси. Более качественную сушку пластин производят центрифугированием или обдувом горячим очищенным газом. В этих случаях значительная часть жидкости сдувается с поверхности пластин вместе с растворенными в ней примесями.

Плазменное травление относится к так называемым «сухим» способам очистки, которая переводит поверхностные загрязнения в летучие компоненты.

Важной является операция контроля чистоты поверхности пластин, поскольку только она может показать, насколько эффективны процессы очистки. Основными методами контроля чистоты поверхности являются методы, основанные на изменении ее смачиваемости, микроскопические, фотометрические и спектральные.

При окутании пластины в деионизованную воду или распылении воды на влажную поверхность пластины на загрязненных участках не образуется равномерного слоя воды. Методы, основанные на изменении смачиваемости, просты, наглядны, но недостаточно чувствительны.

Финишная очистка подложек служит для удаления загрязнений непосредственно перед выполнением технологических операций. Цель финишной очистки – получение реально чистой поверхности полупроводника. Очистку проводят промыванием подложек в растворе комплексобразующих реагентов, например $\text{H}_2\text{O} + \text{HCl} +$ оксиэтилендифосфорная кислота.

Хорошие результаты дает также кипячение подложек в растворах кислотно-перекисных ($\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:1:4$) или аммиачно-перекисных ($\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:1:4$). Далее следует промывка в проточной деионизованной воде и сушка. Эффективными для финишной очистки являются обработка ультразвуком и сухие ионно-плазменные и плазмохимические процессы.

Число операций очистки в технологическом маршруте изготовления ИМС резко возрастает по мере уменьшения топологической нормы и составляет 1/3 всех процессов. Также растут требования к эффективности операции очистки и требования к другим ее параметрам.

При жидкостной ультразвуковой очистке используется активация ультразвуком в следующих диапазонах частот:

- 1) 18–120 кГц, типовая частота 40 кГц – это ultrasonic очистка;
- 2) более 400 кГц, типовая частота в диапазоне 850–900 кГц – это megasonic очистка.

Звуковые волны создаются либо магнитострикторами, либо электрострикторами, погружёнными в жидкость.

Механизм действия ultrasonic очистки заключается в образовании кавитационных пузырьков под действием звуковой волны, распространяющейся в жидкости, их схлопывании и формировании высокоэнергетической струи жидкости, воздействующей на поверхность пластины (давление 20 атм). Максимальный размер пузырьков 100 мкм. Их размер и концентрация зависят от многих факторов, в

том числе от мощности и частоты звуковой волны, температуры и вязкости жидкости. Для каждого вещества есть оптимальные условия для ультразвуковой очистки. Вследствие высокого давления, воздействующего на поверхность, возможно её повреждение. Используется для отмывки «голых» пластин.

Механизм действия megasonic очистки не связан с кавитационными пузырьками (они на этой частоте не образуются). Он связан с прямым воздействием волны фронта давления в жидкости на поверхность пластины. При этом давление снижается в 6 раз до 3,3 атм. Используется в современной технологии для очистки полупроводниковых структур.

Даже «мягкая» megasonic очистка может привести к повреждению полупроводниковой структуры. Установлено, что этим методом невозможно чистить пластины с размером топологических элементов менее 100 нм без повреждения. В связи с этим разрабатываются новые методы очистки, в том числе очистка криогенными аэрозолями и в сверхкритической жидкости.

4.3. Очистка криогенными аэрозолями

Сущность механизма очистки заключается в передаче механического импульса от твёрдых аэрозольных частиц частицам загрязнений, преодолении сил адгезии и уносе загрязнений потоком газа. Частицы загрязнений увлекаются потоком газа, текущим вдоль поверхности пластины, и удаляются из рабочей зоны.

Прецизионная смесь аргона и азота охлаждается в теплообменнике с помощью жидкого азота до температуры минус 150 °С и затем, расширяясь в камере обработки, превращается в инертные твёрдые аэрозольные кластеры, которые подаются в камеру. Температуры сжижения Ar минус 189 °С, а N₂ – минус 196 °С. В камере поддерживается пониженное давление, чтобы можно было реализовать адиабатическое расширение газа. Угол падения аэрозольных частиц порядка 45°. Аэрозоль вместе с частицами примесей выносятся из камеры обработки потоком азота, специально подаваемого через отдельное сопло. Кластер – это образование из счётного количества атомов, обычно от нескольких единиц до 1000–10000 атомов. Газовые кластеры подаются в камеру обработки через систему сопел и взаимодействуют с поверхностью пластины без её повреждения, зарядки и травления подложки. Жидкая фаза полностью отсутствует.

Увеличение доли аргона в смеси приводит к формированию кластеров большего размера, которые лучше передают импульс частицам загрязнений, удаляя их. Однако при этом растёт вероятность поврежде-

ния поверхности. Увеличение доли азота приводит к противоположному эффекту. Угол падения аэрозольных частиц также оказывает влияние на эффективность удаления и на вероятность дефектообразования.

Гидрофильной поверхностью считается поверхность, которая хорошо смачивается водой, а гидрофобная поверхность – это поверхность, не смачиваемая водой.

Результаты спектроскопических исследований показали неизменность химического состава структур, обрабатываемых криогенными аэрозолями, по сравнению со стандартными химическими обработками. При этом также увеличивается выход годных приборов (рис. 4.4).



Рис. 4.4. Сравнение эффективности удаления частиц криогенным аэрозолем и стандартной жидкостной очисткой с помощью скруббера на гидрофобной (SiN, SiOC) и гидрофильной (SiO₂) поверхности

Криогенные аэрозоли эффективно удаляют частицы с горизонтальных поверхностей, менее эффективно из отверстий, особенно отверстий малого диаметра, и ещё менее эффективно загрязнения, которые для своего удаления требуют растворения (например, фоторезист или остаточный фоторезист). В связи с этим был разработан новый способ очистки – очистка в сверхкритической жидкости.

4.4. Механизм очистки с помощью сверхкритических жидкостей (СКЖ)

Современные представления трактуют сверхкритическое состояние как наличие свободных молекул и многочисленных слабосвязанных кластеров молекул. Расстояние между присутствующими в сверхкритической фазе частицами (молекулами и кластерами) значительно больше, чем в классической жидкости, но намного меньше, чем в обычных газах. Внутри кластеров молекулы располагаются хаотическим образом, т.е. вовсе не так, как они располагаются в настоящей жидкой фазе данного вещества. Энергия взаимодействия молекул в кластерах очень невелика. В то же время скорости, с которыми отдельные молекулы входят в кластеры и покидают их, очень

высоки. Отсюда вытекает исключительно низкая вязкость и одновременно высокая диффузионная способность сверхкритической среды. Обе характеристики исключительно важны и лежат в основе практического использования вещества в сверхкритическом состоянии. Можно сказать и так: сверхкритические среды – это газы, сжатые до плотностей, приближающихся к плотностям жидкостей.

Так, если в замкнутом объёме находится достаточно большое количество жидкости и паров этой жидкости (например, H_2O) и больше ничего, то нагревание такого сосуда будет приводить к тому, что давление в нём будет расти. Это понятно, так как все большее и большее количество молекул воды будет переходить из жидкой фазы в газовую. Конечный результат может быть двояким: а) если объём сосуда достаточно велик, то вся жидкость постепенно перейдёт в пар и получившийся газ будет подчиняться обычным газовым законам. Если сосуд прозрачен, то можно наблюдать, как уровень жидкости будет постепенно понижаться и в конце концов жидкая фаза исчезнет; б) совсем другая ситуация сложится, если общий объём сосуда мал: граница раздела фаз всё время будет сохраняться на одном и том же уровне. А затем внезапно при достижении T_k и p_k граница раздела исчезнет. При этом можно поставить простой, но очень глубокий вопрос: а какая фаза, собственно, исчезла – жидкая или газообразная? Правильный ответ – обе. Вещество перешло в новое состояние, называемое сверхкритическим. Это не жидкость в обычном понимании, так как свойства вещества в этом состоянии сильно отличаются от его свойств в жидком состоянии. Но это и не газ, так как для газа слишком велика плотность и при этом совершенно не выполняются никакие газовые законы.

Факт существования критической точки позволил понять, почему некоторые газы, например водород, азот, кислород, долгое время не удавалось получить в жидком виде с помощью повышенного давления. Для сжижения какого-либо газа необходимо его вначале охладить до температуры ниже критической. У таких газов, как CO_2 или Cl_2 , критическая температура выше комнатной (31 и 144 °C соответственно), поэтому их можно сжижать при комнатной температуре, только повышая давление. У азота критическая температура много ниже комнатной – минус 239,9 °C. Поэтому необходимо вначале охладить азот ниже критической температуры и затем, повышая давление, достичь области, где возможно существование жидкости.

Сверхкритические жидкости способны растворять твердые вещества, что газам не свойственно. Сверхкритический этанол (при температуре выше 234 °C) очень легко растворяет некоторые неорганические соли (CoCl_2 , KBr , KI). Диоксид углерода, закись азота, эти-

лен и некоторые другие газы в состоянии СКЖ приобретают способность растворять многие органические вещества – камфару, стеариновую кислоту, парафин и нафталин. Свойства сверхкритического CO_2 как растворителя можно регулировать – при повышении давления его растворяющая способность резко увеличивается.

Сверхкритические жидкости – это не только хорошие растворители, но и вещества с высоким коэффициентом диффузии, т.е. они легко проникают в глубинные слои различных твердых и пористых веществ и материалов. Наиболее широко стали применять сверхкритический CO_2 , который оказался растворителем широкого круга органических соединений. Диоксид углерода стал лидером в мире сверхкритических технологий, поскольку обладает целым комплексом преимуществ. Перевести его в сверхкритическое состояние достаточно легко (рис. 4.5). Критическая температура составляет минус 31 °С, а критическое давление – 73,8 атм), кроме того, он не токсичен, не горюч, не взрывоопасен и к тому же дешев и доступен. С точки зрения любого технолога он является идеальным компонентом любого процесса. Особую привлекательность ему придает то, что он является составной частью атмосферного воздуха и, следовательно, не загрязняет окружающую среду. Сверхкритический CO_2 можно считать экологически абсолютно чистым растворителем, который «высыхает», превращаясь в газ и, следовательно, не оставляя следов.

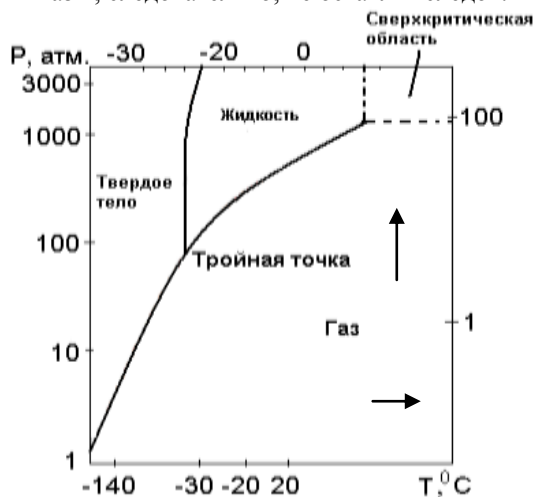


Рис. 4.5. Фазовая диаграмма CO_2

Механизм очистки сверхкритическим CO_2 заключается в следующем: растворение органических загрязнений и воды сверхкритическим CO_2 , текущим вдоль поверхности пластины и затекающим в поры и отверстия малого диаметра, унос загрязнений с потоком CO_2 , увлечение твёрдых частиц загрязнений потоком CO_2 , текущим вдоль поверхности пластины.

Процесс очистки в сверхкритическом CO_2 хорошо совместим с low-k диэлектриками, пористыми диэлектриками, а также с медной и алюминиевой разводками, не приносит дополнительных дефектов и после осушки не остаётся остатков растворителя.

4.5. Сухие методы очистки

Эффективными для финишной очистки являются сухие ионно-плазменные и плазмохимические процессы.

Ионная очистка заключается в бомбардировке подложек ионами инертных газов, что вызывает распыление поверхностных слоев вместе с остаточными загрязнениями. Ее используют для очистки полупроводниковых подложек при получении эпитаксиальных пленок методами вакуумной и молекулярно-лучевой эпитаксии. Сочетается с термообработкой в сверхвысоком вакууме $8 \cdot 10^{-2}$ – $1,3 \cdot 10^{-9}$ Па.

Очистка в тлеющем разряде заключается в бомбардировке заряженными частицами подложки в плазме тлеющего разряда. Эффективность очистки ниже, чем ионной. Для очистки от органических загрязнений эффективно применять плазму, содержащую кислород.

Плазмохимическая очистка происходит вследствие химического взаимодействия загрязнений с ионами и радикалами активных газов с образованием летучих соединений. В установках плазмохимической очистки плазма активного газа образуется в результате безэлектродного высокочастотного разряда. Более подробно эти методы рассмотрены в данном учебном пособии.

Дальнейшее развитие методов очистки с точки зрения роста требований, связанных с уменьшением размера элементов, может пойти по пути разработки методов очистки в химически активных газах. При этом газ должен обладать низкой селективностью по отношению к различного сорта загрязнениям, например очистка в потоке атомарного водорода. Атомарный водород взаимодействует со многими веществами с образованием летучих продуктов реакции, что позволяет его использовать для очистки.

4.6. Пассивация поверхности

Пассивация поверхности – это:

– метод управления электрическими свойствами поверхности, реализуемый с целью уменьшения скорости поверхностной рекомбинации, открепления уровня Ферми и т.д.;

– метод защиты поверхности от воздействия внешних факторов, реализуемый с целью увеличения времени работы полупроводниковых приборов.

Пассивация наиболее востребована в $A^{III}B^V$ микроэлектронике, что связано с высокой плотностью поверхностных состояний и отсутствием качественного собственного диэлектрика. Однако в рамках данного учебного пособия будем рассматривать пассивацию поверхности кремния. Для пассивации оборванных связей на поверхности кремния обычно используют водород и два типа обработки – «мокрую» и «сухую».

Наиболее критическим процессом в производстве СБИС является процесс жидкостной химической подготовки (ЖХП) поверхности подложки. Все процедуры ЖХП состоят из двух этапов обработки поверхности кремния жидкими растворами (RCA):

Первый этап: $H_2O:H_2O_2:NH_4OH$.

Промывка в деионизованной воде.

Второй этап: $H_2O:H_2O_2:HCl$.

Промывка в деионизованной воде.

В настоящее время разработка СБИС с субмикронной топологией выдвигает качественно новые требования к поверхности кремневой подложки: речь теперь идет об атомарно-чистой поверхности кремния. Однако процедура ЖХП поверхности кремния нуждается в улучшении для ее использования в технологии СБИС. Уже известны модификации стандарта RCA: уменьшение концентрации NH_4OH , уменьшение температуры водного раствора, замена второго этапа на водный раствор H_2SO_4 или HF кислоты. Раствор HF все более часто используется для финишной обработки поверхности кремния.

Финишная обработка поверхности кремния в HF привлекла к себе большое внимание как способ пассивации поверхности после ее подготовки для технологии СБИС. Раствор HF удаляет «остаточный» SiO_2 и формирует протонированную поверхность кремния. Протонирование кремния ответственно за ряд замечательных свойств поверхности, возникающих после HF -обработки: поверхность становится гидрофобной и инертной по отношению к окружающей атмосфере в чистых технологических помещениях.

Было обнаружено, что на протонированной поверхности кремния присутствуют три различных типа гидридов: $Si-H$, $Si-H_2$ и $Si-H_3$. Термическая десорбция водорода происходит при 773 К с по-

следующим окислением «голой» поверхности кремния при ее взаимодействии с молекулами воды и кислорода. В присутствии атомарного кислорода окисление пассивированной поверхности кремния происходит уже при 673 К.

Скорость окисления пассивированной поверхности кремния на воздухе и в воде варьируется в широких пределах: от одного монослоя SiO_2 за несколько часов до одного монослоя за несколько месяцев. Сообщается об улучшенной процедуре ЖХП поверхности кремния для технологии СБИС с финишной обработкой в HBF_4 кислоте. Хемосорбция фтора селективно происходит на химически активных местах поверхности кремния, таких как атомные ступеньки или поверхностные дефекты. Было показано, что гладкая протонированная поверхность кремния или же шероховатая протонированная поверхность кремния с достаточным содержанием фтора чрезвычайно стабильна к окислению на воздухе.

К «сухим» методам обработки кремния относятся: обработка в плазме H_2 и обработка в потоке атомарного водорода. Обработка одновременно удаляет собственный оксид и производит пассивацию поверхности атомами водорода. Пассивация поверхности кремния атомарным водородом позволяет сохранять атомарно-чистую слабоокисленную поверхность кремния в течение нескольких часов.

5. Субмикронная литография

5.1. Основные понятия и тенденции

Вплоть до начала 2000-х годов прогресс в микроэлектронной промышленности практически полностью определялся темпами развития литографии. В настоящее время при переходе от одной топологической нормы к другой её роль хоть и слегка уменьшилась, но тем не менее по-прежнему остаётся определяющей. Согласно прогнозам специалистов ведущих фирм-производителей литографического оборудования, вплоть до достижения топологической нормы 45 нм, основным процессом формирования резистивных масок останется проекционная фотолитография.

Основной параметр, характеризующий совершенство и качество фотолитографии, – это воспроизводимое и стабильно получаемое разрешение, или минимальный размер элемента, $b_{\min}$. При этом топологическая норма определяется как полуширина линии и пространства между линиями в регулярных плотноупакованных полосчатых структурах. Естественно, что разрешение для изолированных элемен-

тов (элементы топологического рисунка, расстояние между которыми в несколько раз превышает их характерный размер, например, затворы транзисторов) может быть в 1,4–1,8 раза меньше топологической нормы.

В первом приближении предельное разрешение оптической литографии описывается выражением:

$$b_{\min} = k_1 \lambda / NA, \quad (5.1)$$

где λ – длина волны экспонирующего излучения; NA – числовая апертура проекционных линз, характеризующая способность линз собирать преломлённые лучи света, и определяемая как

$$NA = n \cdot \sin \theta, \quad (5.2)$$

где n – это показатель преломления среды над фоторезистивной маской, а θ – это наибольший угол сбора лучей с поверхности фоторезистивной маски. Если среда – это воздух, то $n = 1$ и, следовательно, максимальное значение NA не может превысить 1. Величина параметра k_1 отражает кумулятивный эффект влияния таких факторов, как способ и характеристики освещения, плотность и тип рисунка на фотошаблоне, толщина, состав и свойства фоторезистивного слоя, наличие антиотражающих покрытий и контрастоусиливающих материалов на поверхности Si пластины. Теория дифракции даёт минимальное значение для $k_1 = 0,25$. Для простых рисунков фотошаблона при низкой плотности линий k_1 может уменьшаться до 0,05 и менее.

Для получения максимальной разрешающей способности $b_{\min}$ необходимо уменьшать длину волны экспонирующего излучения λ , уменьшать параметр k_1 , а также увеличивать числовую апертуру NA . Все эти три возможности активно используются для развития метода проекционной литографии.

Уменьшение величины λ является одним из основных направлений увеличения разрешающей способности. Использование в литографических установках излучения со всё более короткой длиной волны определяется скоростью разработки и внедрения новых источников электромагнитного излучения, а также созданием оптических систем из новых прозрачных для короткого ультрафиолетового (КУФ) излучения материалов.

В первых установках оптической литографии использовались источники немонохроматического излучения на основе ртутных дуговых ламп $\lambda = 436$ нм (g -линия), 405 нм (h -линия), 365 нм (i -линия), ≈ 250 нм (глубокий УФ). Затем были разработаны источники когерентного монохроматического излучения: KrF лазер ($\lambda = 248$ нм, КУФ, $b_{\min} = 350$ –130 нм), ArF лазер ($\lambda = 193$ нм, КУФ, $b_{\min} = 90$ –45 нм (возможно, вплоть до 32 нм)), F₂ лазер ($\lambda = 157$ нм, вакуумный УФ). В

настоящее время заканчиваются разработка и внедрение импульсных источников лазерной плазмы с длиной волны $\lambda \approx 13$ нм (экстремальный УФ (ЭУФ)). Дальнейшая эволюция источников электромагнитного излучения для оптической литографии может пойти по пути использования рентгеновского синхротронного излучения с $\lambda \approx 1$ нм и менее.

Эволюция длины волны экспонирующего излучения, поставленная в соответствие с реализуемой топологической нормой, представлена на рис. 5.1. Видно, что до середины 90-х годов прошлого столетия λ была меньше топологической нормы. Однако затем ситуация изменилась, и λ стала существенно превышать минимальный размер элемента. В настоящее время топологическая норма в три раза меньше длины волны излучения, и в ближайшее время эта разница возрастет вплоть до четырёх раз.

Другой способ улучшения разрешающей способности фотолитографии, согласно выражению (5.1), связан с уменьшением параметра k_1 . Величина k_1 изменилась с 0,8 в 1980 г. до 0,4–0,35 в настоящее время. В ближайшие годы ожидается дальнейшее уменьшение k_1 вплоть до 0,3–0,25. Этот прогресс связан с внедрением:

- внеосевого освещения, когда распределение интенсивности света по сечению пучка неоднородно и имеет специальную форму, получаемую с помощью диафрагм, вырезающих из осевого цилиндрического пучка излучение внеосевых трубчатых (кольцевых в сечении) или квадрупольных (четыре полюса в сечении) пучков;

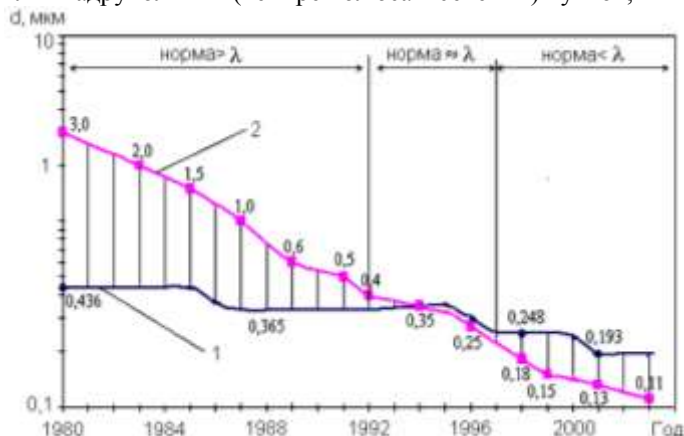


Рис. 5.1. Эволюция длины волны экспонирующего излучения в сравнении с эволюцией топологической нормы:

1 — длина волны; 2 — топологическая норма

■ фазосдвигающих фотошаблонов, когда осуществляется управление не только амплитудой проходящего через шаблон излучения, но и его фазой, что позволяет за счёт интерференции получать лучшее разрешение в резисте (рис. 5.2 и 5.3);

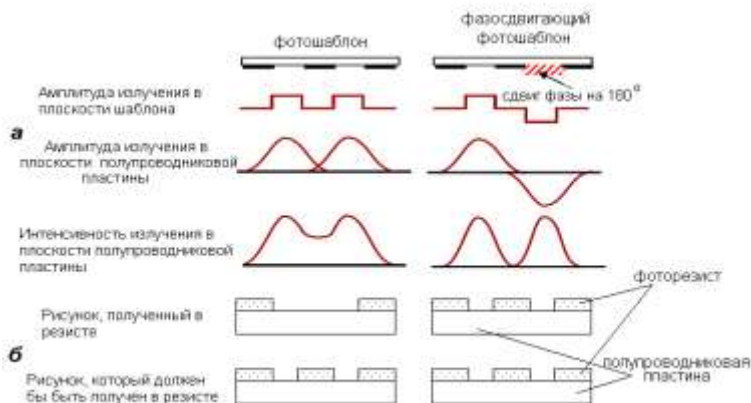


Рис. 5.2. Схема, поясняющая принцип работы фазосдвигающего шаблона: **а** — амплитуда и интенсивность излучения; **б** — рисунок в резисте

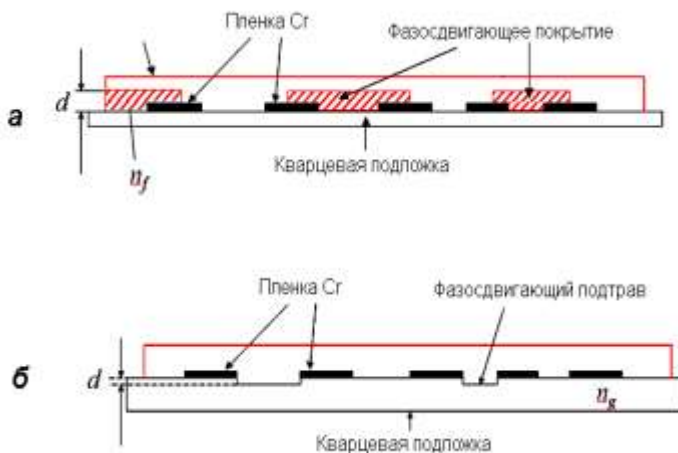


Рис. 5.3. Фазосдвигающие шаблоны: **а** — за счёт осаждения прозрачной плёнки; **б** — за счёт травления материала фотошаблона

- коррекции эффекта близости элементов топологического рисунка на фотошаблоне с помощью дополнительных служебных элементов, повышающих точность передачи рисунка в фоторезистивную маску, нарушенную вследствие влияния дифракции (рис. 5.4);

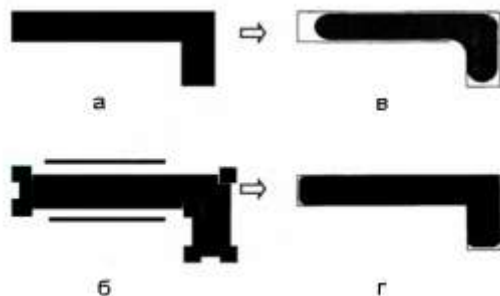


Рис. 5.4. Изображения элементов в фотошаблоне (а, б) и в слое резиста (в, г) без применения элементов коррекции (в) и с их использованием (г)

- пленок контрастоусиливающих материалов, наносимых поверх слоя фоторезиста;
- пленок антиотражающих покрытий, формируемых под слоем фоторезиста, что позволяет уменьшить влияние отраженного от подложки излучения на точность передачи топологического рисунка.

Схема, поясняющая принцип работы фазосдвигающих шаблонов, а также две возможные конструкции шаблонов представлены на рис. 5.2 и 5.3.

В том случае, когда используется обычный фотошаблон, изображение в резисте от одного окна в фотошаблоне будет несколько размытым за счёт дифракции света (см. рис. 5.2, а). В случае двух близкорасположенных окон ситуация усугубляется за счёт сложения амплитуд дифрагированных волн в области между окнами. Интенсивность света на поверхности резиста между двумя окнами становится отличной от нуля, что приводит к засветке резиста в этом месте. В результате в резисте вместо двух линий получится одна более широкая линия (см. рис. 5.2, б). В случае фазосдвигающего шаблона световые волны, проходящие сквозь рядом лежащие окна, за счёт нанесения специального покрытия на область одного из окон имеют противоположные фазы. В результате в пространстве между окнами происходит не сложение, а вычитание амплитуд волн, что и приводит к

росту разрешающей способности и прорисовке в резисте обеих линий (см. рис. 5.2, *а, б*).

Сдвиг фазы световой волны на 180° реализуется за счёт изменения длины её оптического пути. Это может быть осуществлено за счёт осаждения прозрачной плёнки на поверхность одного из двух рядом лежащих окон (см. рис. 5.3, *а*). При этом толщина плёнки выбирается, исходя из выражения

$$d_1 = \lambda / 2 (n_f - 1), \quad (5.3)$$

где d_1 – толщина плёнки; n_f – показатель преломления материала плёнки. Второй способ создания сдвига фазы это травление материала фотошаблона (обычно кварца) внутри одного из двух рядом лежащих окон на глубину, задаваемую следующим выражением:

$$d_2 = \lambda / 2 (n_g - 1), \quad (5.4)$$

где d_2 – глубина травления материала шаблона; n_g – показатель преломления материала шаблона (см. рис. 5.3, *б*).

Как уже упоминалось выше, для коррекции эффекта близости в рисунок фотошаблона приходится вводить дополнительные служебные элементы, которые частично компенсируют влияние дифракции. На рис. 5.4, *а* приведено изображение элемента, которое необходимо получить в слое резиста, а также его изображение в фотошаблоне с корректирующими элементами (рис. 5.4, *б*). Видно, что только для коррекции эффекта близости уже приходится существенным образом усложнять рисунок фотошаблона. Дальнейшее усложнение происходит при добавлении фазосдвигающих элементов.

На рис. 5.5 представлена зависимость роста числа элементов на фотошаблоне от топологической нормы. Данная зависимость имеет ярко выраженный экспоненциальный характер и обусловлена введением дополнительных элементов для коррекции эффекта близости, а также фазосдвигающих элементов.

Ещё одна возможность уменьшения минимального размера элемента, согласно выражению (5.1), может быть связана с ростом вели-

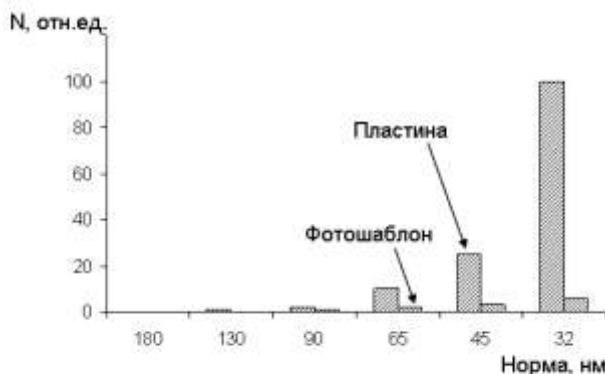


Рис. 5.5. Рост числа элементов на фотошаблоне и на полупроводниковой пластине в зависимости от топологической нормы

чины NA . Из того, что числовая апертура определяется как

$$NA = \frac{r_0}{\sqrt{f^2 + r_0^2}}, \quad (5.5)$$

где r_0 – радиус линзы; f – расстояние от пластины до линзы, следует, что рост NA может быть обеспечен увеличением диаметра линз проекционной системы. Развитие техники в этом направлении привело к тому, что величина NA выросла от 0,5 в 1990 г. до 0,8 в 2004 г. и до $\approx 0,93$ сегодня. Предполагается дальнейший рост NA вплоть до величины, близкой к единице. Однако на пути совершенствования линз встречаются большие трудности. Так, например, длина, диаметр и масса системы проекционных линз, уменьшающих рисунок шаблона, сегодня составляют около 1 м, 0,5 м и 1000 кг соответственно. Понятно, что изготовление таких больших линз сопряжено с определёнными трудностями. Кроме того, темп роста стоимости линз существенно обгоняет темп уменьшения величины $b_{\min}$, так как стоимость растёт пропорционально NA^3 (объёму линзы), а $b_{\min}$ уменьшается пропорционально $1/NA$.

Согласно формуле (5.2) другая возможность для увеличения NA связана с ростом показателя преломления среды, находящейся между последней линзой и полупроводниковой структурой. Данное направление является весьма перспективным в связи с достаточной простотой его реализации и ощутимым эффектом от его использования. Это направление развития называется иммерсионной литографией и будет рассмотрено в следующем разделе.

Кроме разрешающей способности, другим важным параметром фотолитографии является глубина фокуса Δf , т.е. вертикальный размер области вблизи фокальной плоскости выходной проекционной линзы, в которой уменьшенное изображение топологического рисунка фотошаблона еще имеет достаточную четкость для реализации процесса литографии. Глубина фокуса определяется из выражения

$$\Delta f = k_2 \lambda / 2 NA^2, \quad (5.6)$$

где k_2 – экспериментально определяемый коэффициент пропорциональности, примерно равный 0,5. В настоящее время глубина фокуса имеет величину меньше одного микрона, что сравнимо с толщиной плёнки резиста. В связи с этим фокальное изображение шаблона проецируется не на поверхность, а внутрь плёнки резиста на расстояние, равное половине толщины плёнки (рис. 5.6).

Анализ связи между глубиной фокуса и разрешением [формулы (5.1) и (5.6)] показывает, что чем выше разрешение, тем меньше глу-

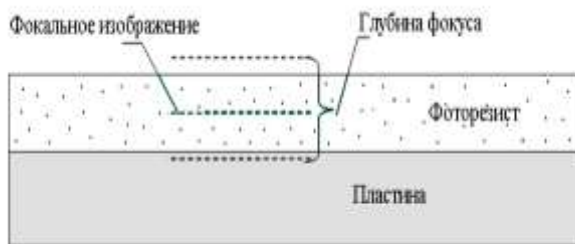


Рис. 5.6. Фокальное изображение рисунка фотошаблона в слое резиста

бина фокуса и тем более жесткие требования предъявляются к точности системы экспонирования, а также к планарности и рельефу поверхности пластины. Поэтому с точки зрения получения приемлемой глубины фокуса выгоднее уменьшать длину волны экспонирующего излучения, чем увеличивать числовую апертуру.

5.2. Иммерсионная литография КУФ-диапазона

Предел разрешения оптической литографии с использованием эксимерного ArF лазера с длиной волны 193 нм при близких к предельным величинам NA и k_1 (0,93 и 0,25 соответственно) согласно формуле (5.1) составляет 52 нм. Эта величина достаточна для реализации ИС с топологической нормой 65 нм. При этом возможность создания ИС с нормой 45 нм находится под сомнением, а для реализации топологической нормы 32 нм необходимо использовать другие технические решения.

Одним из таких решений является иммерсионная литография. Иммерсионная литография позволяет улучшить разрешающую способность за счёт замены воздуха (показатель преломления $n = 1$) в зазоре между крайней проекционной линзой и полупроводниковой пластиной на жидкую среду с $n > 1$. При этом величина $b_{\min}$ согласно выражениям (5.1)–(5.2) уменьшится пропорционально росту значения n . Так, например, при использовании в качестве иммерсионной жидкости деионизованной воды с $n = 1,43662$ ($\lambda = 193$ нм и температура 21,5 °С) предельное значение $b_{\min}$ уменьшится на 44% и составит 36 нм.

На рис. 5.7 приведено схематическое изображение зазора между последней проекционной линзой и полупроводниковой структурой, заполненного иммерсионной жидкостью. Обычно пластина полностью не покрывается слоем жидкости. Жидкость в виде непрерывного потока подаётся и отбирается из той области, которая в настоящий момент экспонируется. Затем пластина перемещается и экспонируется следующая область. Так как скорость сканирования обычно равна 500 мм/с, то длительность контакта иммерсионной жидкости с резистом невелика, что минимизирует вероятность их химического взаимодействия.

В ближайшей перспективе в качестве иммерсионной жидкости предполагается использовать деионизованную воду. Это связано с высокой прозрачностью воды (поглощение света с $\lambda = 193$ нм на пути, равном 6 мм, не превышает 5%), неплохой химической совместимостью воды с фоторезистом, полупроводниковой структурой и с материалом линз. Кроме того, ультрачистая деионизованная вода всегда имеется в больших количествах на любом полупроводниковом производстве.

Дальнейшее уменьшение $b_{\min}$ возможно при использовании других иммерсионных жидкостей (например, органических) с более высоким показателем преломления (вплоть до $n = 1,9$). Сложности на этом пути связаны с тем, что такая жидкость не должна менять своих свойств под действием ультрафиолетового излучения, быть для него

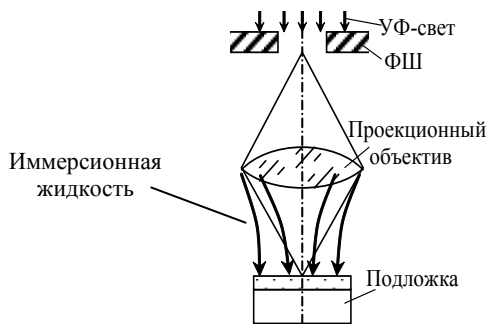


Рис. 5.7. Изображение зазора между проекционной линзой и подложкой, заполненного потоком иммерсионной жидкости; величина зазора около 1 мм

прозрачной, хорошо совместимой с резистом и с линзами, а также иметь низкую стоимость.

5.3. Литография ЭУФ-диапазона

Как уже говорилось выше, вероятность использования оптической литографии для реализации ИС с топологической нормой менее 45 нм и иммерсионной литографии для ИС с топологической нормой менее 32 нм весьма не высока. Следующее поколение методов литографии, которое может прийти на смену традиционной фотолитографии, включает в себя литографию ЭУФ-диапазона, импринтинг, а также электронно-лучевую, рентгеновскую и ионно-лучевую литографии.

В настоящее время литография ЭУФ-диапазона рассматривается как наиболее перспективный метод, который промышленно будет использоваться в компании Intel для реализации топологической нормы 32 нм начиная примерно с 2009 г., и несколько позже будет использоваться в компании IBM для ИС с топологической нормой 22 нм.

Длина волны излучения, используемого в экстремальной литографии, примерно равна 13 нм. Электромагнитное излучение данной длины волны сильно поглощается не только всеми известными твердыми средами, но и газом (воздухом). Поэтому распространение излучения возможно только в вакууме, а для формирования изображения можно использовать только отражательную оптику. На рис. 5.8 представлена схема установки для экстремальной литографии. Установка выполнена на основе одной или нескольких вакуумных камер, внутри которых располагаются источник импульсного излучения с

$\lambda = 13$ нм на основе лазерной плазмы, система зеркал (конденсора) для формирования луча, шаблон отражательного типа, а также системы зеркал для формирования уменьшенного изображения рисунка шаблона на поверхности полупроводниковой пластины. В силу недостаточного совершенства оптических систем числовая апертура установок экстремальной литографии пока не так высока, как у проекционных установок. Однако за счёт использования значительно более короткой длины волны излучения на них удаётся получить более высокое разрешение, чем на установках иммерсионной литографии.

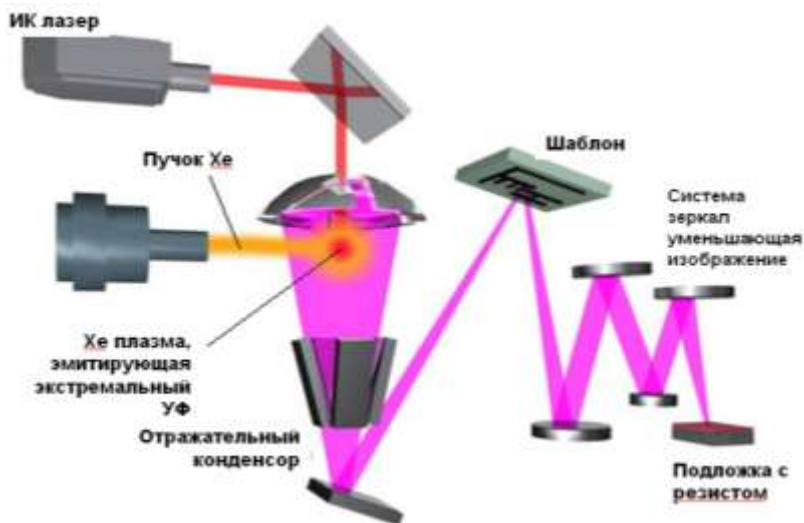


Рис. 5.8. Схема установки для ЭУФ-литографии

Один из вариантов источника излучения на основе лазерной плазмы работает следующим образом. В камеру источника подаётся мишень, которая представляет собой струю, состоящую из капель Хе. Капля Хе сначала нагревается предимпульсом Nd:YAG лазера, а затем с целью образования высокотемпературной лазерной плазмы – мощным сфокусированным импульсом CO₂ лазера. Ксеноновая плазма излучает электромагнитные волны, которые собираются зеркалом и направляются в конденсор.

Оптика установок литографии ЭУФ-диапазона выполнена на основе зеркал, состоящих из большого числа тонких слоёв Мо и Si. Чередующиеся слои материалов с большой и малой удельной плотностью позволяют повысить коэффициент отражения зеркал до $\approx 70\%$.

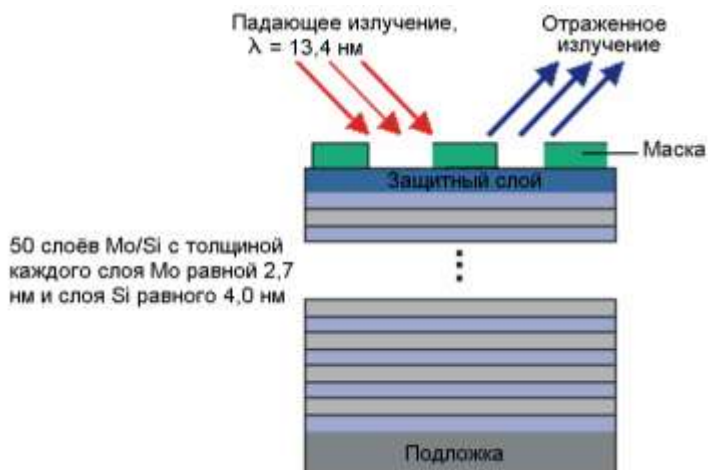


Рис. 5.9. Шаблон отражательного типа для ЭУФ-литографии

Аналогичным образом изготавливаются и отражательные шаблоны (рис. 5.9), при этом на их поверхности наносится топологический рисунок из поглощающего излучение материала.

5.4. Импринтинг

Импринтинг (imprint lithography) – это метод литографии, предполагающий получение рисунка в резисте посредством вдавливания в него штампа, на поверхности которого заранее сформирован необходимый рельефный трёхмерный рисунок. Метод не предполагает использования света для передачи изображения шаблона в рисунок резиста.

Истоки метода импринтинга, в отличие от всех остальных типов литографии, лежат в глубокой древности. Первое упоминание о применении штампа для создания изображения относится к 1041 г., а право первенства принадлежит Китаю. В Европе аналогичный процесс появился в 1436 г. и связан с именем Гуттенберга – изобретателя первого прессы для печатания книг.

Штамп для импринтинга (аналог фотошаблона в оптической литографии) изготавливается из кварцевой пластины с использованием прецизионной электронно-лучевой литографии и реактивного ионного травления. Именно точность изготовления штампа задаёт разрешение рисунка, получаемого в резисте. Разрешение электронно-лучевой литографии может достигать единиц нанометра, поэтому предельное разрешение импринтинга может быть существенно меньше, чем пре-

дел оптической литографии. А так как один штамп используется неоднократно и практически не изнашивается, то достаточно высокие затраты на его изготовление быстро окупятся.

На рис. 5.10 приведена последовательность технологических операций, выполняемых при литографии методом импринтинга. Сначала на поверхность полупроводниковой структуры наносится планаризирующий слой органического вещества и производится взаимная ориентация пластины и штампа (совмещение).

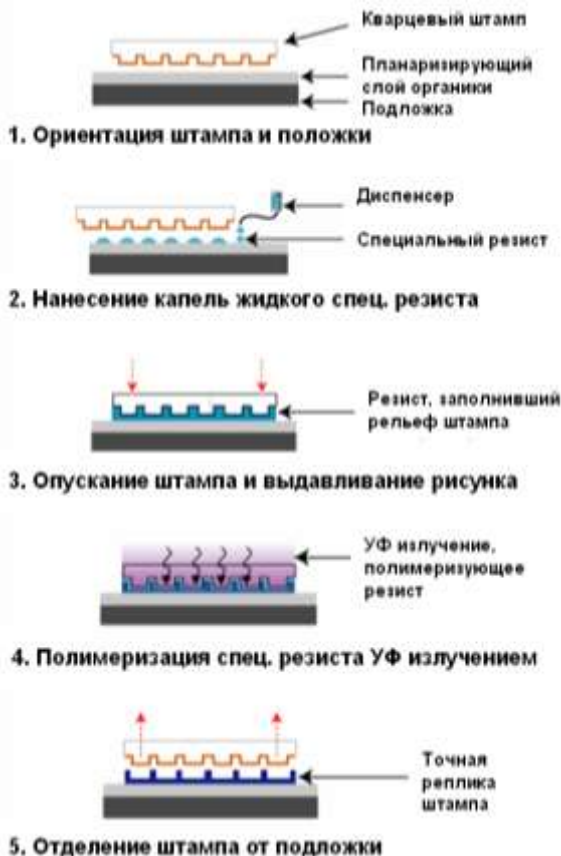


Рис. 5.10. Типовая последовательность технологических операций, выполняемых при литографии методом импринтинга

Затем на поверхность той области, где будет формироваться рисунок, через диспенсер наносится слой специального резиста, производится опускание штампа, выдавливание рисунка в слое резиста и

экспонирование сквозь прозрачный штамп всей поверхности резиста ультрафиолетовым излучением. После окончания фотополимеризации (частичного отверждения) резиста штамп поднимается, а на поверхности пластины остаётся слой с точной репликой штампа. По завершении этой операции формирование резистивной маски на данном участке поверхности пластины заканчивается, производится перемещение пластины и повторение вышеописанных операций до тех пор, пока вся поверхность пластины не будет покрыта резистивной маской с рисунком. Передача полученного рисунка в нижележащие слои происходит сначала с помощью реактивного ионного травления резиста в галогеносодержащей плазме, которое производится вплоть до вскрытия поверхности планаризирующего слоя, а затем с помощью реактивного ионного травления органического слоя в кислородной плазме (рис. 5.11).

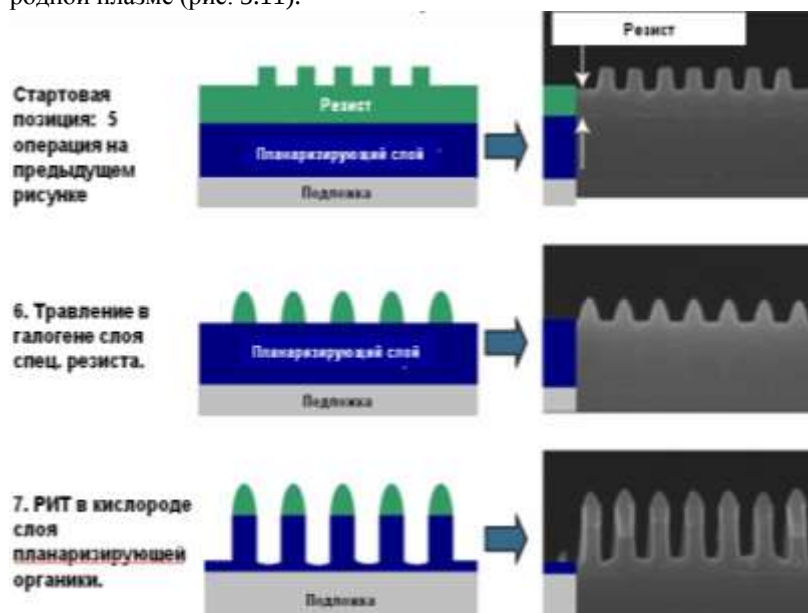


Рис. 5.11. Схема передачи рисунка, полученного в резисте, в нижележащие слои

К преимуществам импринтинга следует отнести:

- низкую стоимость оборудования и технологии, так как не используются дорогая оптика, источники излучения и фотошаблоны;
- возможность перекрытия с помощью одной установки нескольких топологических норм;

- широкий спектр размеров элементов, которые можно реализовать данным методом при полной нечувствительности метода к изменению плотности рисунка;
- достаточную простоту реализации метода, так как нет сложностей, характерных для оптической литографии, например не нужна коррекция эффекта близости;
- высокое разрешение (по крайней мере вплоть до топологической нормы 22 нм);
- возможность реализации позитивного и негативного процессов.

Данные преимущества обуславливают большой интерес к импринтингу и определяют перспективу его скорого внедрения в промышленность.

5.5. Электронная литография

В основе электронолитографии лежит избирательное экспонирование чувствительного маскирующего покрытия (электронорезиста) потоком электронов. При достаточной энергии электронов они способны разрывать межатомные связи электронорезиста и создавать тем самым условия для перестройки структуры.

Длина волны движущегося электрона λ зависит от его энергии

$$\lambda = \hbar / \sqrt{2 \cdot m \cdot e \cdot U_0}, \quad (5.7)$$

где $\hbar$ – постоянная Планка; m , e – масса и заряд электрона; U_0 – ускоряющее напряжение.

Например, при ускоряющем напряжении 15 кВ длина волны составляет 0,01 нм, т.е. более чем на четыре порядка меньше длины волн УФ-излучения. Поэтому явлениями дифракции в электронолитографии можно пренебречь.

Существует две основные возможности использования электронных пучков для облучения поверхности пластины с целью нанесения рисунка. Это одновременное экспонирование всего изображения целиком (*проекционная литография*) и последовательное сканирование отдельных участков рисунка (*сканирующая литография*).

Применение электронно-лучевой литографии (ЭЛЛ) позволяет решить технические (например, повышение разрешающей способности) и экономические (рост выхода годных структур, снижение затрат на изготовление шаблонов) проблемы, сдерживающие прогресс в микроэлектронике. Такие возможности ЭЛЛ обусловлены тем, что она принципиально отличается от фотолитографии – свободна от дифракции и других ограничений, которые действуют в случае исполь-

зования оптических методов. Определенные фундаментальные ограничения существуют и для ЭЛЛ, но пределы разрешающей способности этого метода таковы, что можно на порядок уменьшить минимальную ширину линий. Полное время изготовления шаблона с помощью фотолитографических процессов доходит до 6 недель, что существенно ограничивает освоение производства новых микроэлектронных приборов. Время изготовления шаблонов с помощью ЭЛЛ составляет в зависимости от их сложности от одного до нескольких часов.

Применение электронно-лучевой литографии для изготовления микроэлектронных приборов сводится к созданию маскирующего рельефа резиста на подложке – кремниевой пластине или заготовке шаблона. Этот процесс схематически показан на рис. 5.12.

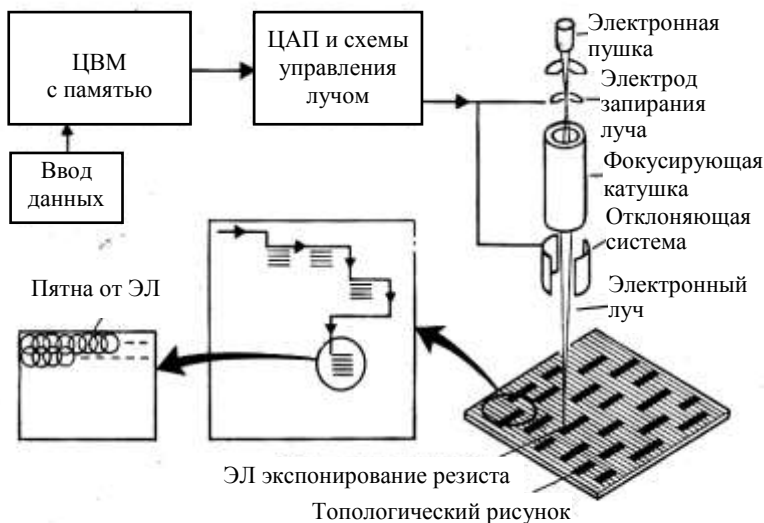


Рис. 5.12. Последовательность операций электронно-лучевой литографии

В основе метода лежит использование остросфокусированного электронного луча, движением которого по поверхности подложки, включением и выключением управляет процессор. Под действием электронного луча происходит экспонирование резиста. Сформированный из резиста рельеф или топологический рисунок и является пригодной для технологических процессов маской. Например, для образования узких металлических линий резист экспонируют элек-

тронным лучом и проявляют. После напыления металла резист растворяют и вместе с ним удаляют излишки металла, оставляя на подложке металлическую линию требуемой ширины. Окна в пленке резиста могут быть использованы для травления подложки ионным пучком или в плазме, а также для селективного ионного внедрения примеси в подложку.

Электронный луч позволяет экспонировать резист на площади 1–40 мм². Чем выше требуется разрешающая способность, тем меньше должно быть поле сканирования. При диаметре электронного луча 0,1 мкм можно сканировать поле с размерами 2×2 мм. Большие поверхности можно экспонировать с той же разрешающей способностью, прецизионно перемещая подложку на заданное расстояние и повторяя экспонирование для образования того же рисунка на новом участке. Скорость перемещения рабочего столика с подложкой составляет 2–5 см/с. Время совмещения луча с уже существующим на пластине рисунком для одного поля сканирования составляет 0,25–1 с.

Типичный метод экспонирования предусматривает несколько проходов (2–5) остросфокусированным электронным лучом, экспонирующим линию шириной 0,5–1 мкм (см. рис. 5.12). Время перемещения луча от одного элемента разложения до другого составляет 4 мкс. Время обратного хода луча также составляет 4 мкс. Размер элемента разложения соответствует размеру электронного луча, т.е. его диаметру или поперечному сечению. Тогда для экспонирования линии длиной l и шириной b потребуется время t , равное

$$t = n \cdot t_{\text{опт}} + \sum t_{\text{д}},$$

где n – полное число приходящихся на данный участок ($l \cdot b$) элементов разложения; $t_{\text{опт}}$ – оптимальное время экспонирования элемента разложения; $\sum t_{\text{д}}$ – время перемещения луча.

Зная топологию СБИС, можно определить время, которое потребуется для обработки одного кристалла. Если неизвестна топология, то можно площадь кристалла при коэффициенте заполнения 50% разделить на площадь элемента разложения и подсчитать число элементов разложения.

Полное время обработки пластины будет складываться из времени обработки всех линий, имеющих на кристалле, и количества кристаллов, которые формируются одновременно на стандартной подложке диаметром 76, 100, 150 или 200 мм. При этом надо учитывать время перехода от одного поля сканирования к другому, т.е. скорость перемещения рабочего столика и время совмещения для каждого поля сканирования.

В электронно-оптической системе ЭЛУ (рис. 5.13) линзы размещены таким образом, чтобы формировать на мишени изображение кроссовера. В идеале кроссовер представляет собой точку. Далее, если линзы не вносят искажений (аббераций), то распределение плотности тока в электронном пятне на мишени будет точно воспроизводить распределение плотности тока в кроссовере. Однако такой идеальный луч не получается. Причиной этого является неравномерное распределение электронов по начальным скоростям и направлениям движения относительно поверхности катода.

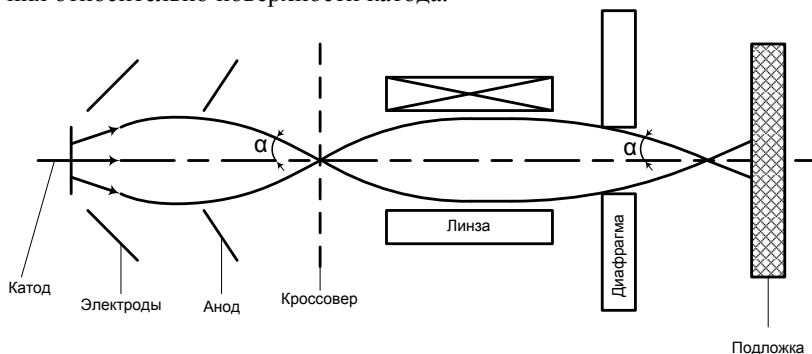


Рис. 5.13. Электронно-оптическая схема ЭЛУ

Эмиттированные электроны движутся не перпендикулярно поверхности катода, а в соответствии с распределением Максвелла по скорости и направлению. При пролете электронов через ускоряющую и фокусирующую системы распределение поперечной составляющей скорости дает гауссовское распределение плотности тока в сфокусированном пятне. Если обозначить полуугол сходимости луча к фокусу через α , то можно получить, что максимально допустимая плотность тока пятна $j_{\max}$ связана с плотностью тока на катоде j_k уравнением

$$j_{\max} = j_k \left(1 + \frac{eU_0}{kT_k} \right) \sin^2 \alpha, \quad (5.8)$$

где U_0 – ускоряющее напряжение на аноде; e – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; T_k – температура катода.

При малых углах схождения α уравнение (5.8) можно записать в следующем виде:

$$j_{\max} = j_k \frac{e \cdot U_0 \cdot \alpha^2}{k \cdot T_k}. \quad (5.9)$$

С другой стороны, $j_{\max} = \frac{4I_0}{\pi d_G^2}$, где I_0 – ток луча, d_G – «гауссовский» диаметр пятна. Таким образом, минимальный диаметр пятна, ограниченный поперечной составляющей тепловой скорости, определяется

$$d_G = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{4k T_k I_0}{\pi e j_k U_0} \right)^{1/2}. \quad (5.10)$$

Из уравнения (5.9) следует необходимость компромисса между $j_{\max}$ у мишени и α . Для уменьшения абберацией линз α желательно сделать малым. Однако это влечет за собой уменьшение $j_{\max}$, если не увеличить j_k и U_0 . Практически повысить можно только j_k , поскольку энергия луча ограничивается дополнительными обстоятельствами. Поэтому в ЭЛУ U_0 лежит в диапазоне 20–40 кВ.

Для описания электронных пушек принято также пользоваться понятием «яркость». По аналогии с обычной оптикой, яркость источника заряженных частиц B определяется плотностью тока, приходящейся на единичный телесный угол, т.е. $B = \frac{j_{\max}}{\pi \alpha^2}$. Если луч проходит за анодом область постоянного потенциала U , то яркость остается постоянной. Другими словами, яркость луча у мишени будет равна его яркости на выходе из пушки. Через параметры пушки с катодами, работающими при токах насыщения, получается

$$B = \frac{1}{\pi} \frac{e j_k \cdot U}{k T_k}. \quad (5.11)$$

Размерность яркости B – [А/см²·ср], где ср – телесный угол стереорадиан.

Таким образом, максимально достижимая яркость луча определяется плотностью тока эмиссии катода j_k , температурой катода T_k и ускоряющим напряжением пушки U . С учетом соотношения для яркости (5.11) получаем выражение для диаметра гауссовского луча:

$$d_G = \frac{1}{\alpha} \cdot \left[\frac{I_0}{3,08 \cdot B} \right]^{1/2}. \quad (5.12)$$

Ток луча для электронной литографии лежит в диапазоне 10^{-6} – 10^{-12} А, а угол схождения α – в диапазоне 10^{-1} – 10^{-4} радиан. Для получения луча с высокой плотностью тока пушка должна обес-

печивать большую яркость. Это означает, что плотность тока у катода (эмиттера) должна быть большой, а площадь эмиттера – малой.

В качестве источников электронов применяют эмиттеры трех типов. Эмиттер из вольфрамовой проволоочки нагревается до температуры примерно 2800–3000 К. При этом возникает термоэмиссия электронов. Плотность тока эмиссии составляет 10 А/см^2 при 3000 К, что соответствует яркости $5 \cdot 10^4 \text{ А/см}^2 \text{Чср}$.

Эмиттер с повышенной яркостью выполняется в виде стержня из гексаборида лантана (LaB_6), конец которого имеет острие с радиусом закругления 1–10 мкм. Типичные эмиссионные характеристики лантановых эмиттеров: плотность тока эмиссии 100 А/см^2 при 2000 К, яркость порядка $10^6 \text{ А/см}^2 \text{Чср}$ при радиусе закругления острия 10 мкм.

К третьему типу источников электронов относятся полевые эмиттеры из вольфрамовых стержней с радиусом закругления 0,1–1,0 мкм. Плотность тока при этом превышает 100 А/см^2 , а яркость достигает $10^8 \text{ А/см}^2 \text{Чср}$. Термополевые эмиттеры могут обеспечить более высокие параметры. Другим важным параметром электронно-лучевых установок является распределение энергий электронов в луче. Большой разброс значений энергии приводит к увеличению размера пятна на мишени вследствие хроматической aberrации в фокусирующих линзах. Разброс энергий для проволоочного вольфрамового катода составляет примерно 1,6–3,0 эВ, для катода из LaB_6 – около 2–3 эВ и для полевых катодов – 0,3–1,0 эВ. Кроме того, разбросы энергий электронов увеличиваются в электронных пучках с большой плотностью тока за счет кулоновского взаимодействия между электронами.

Фокусировка. Проведение ускоренных пучков до объекта обработки требует их фокусировки. Фокусировкой достигаются необходимые размеры зоны обработки и плотности мощности для выполнения операции.

Фокусировку электронных потоков осуществляют с помощью магнитных, реже – электростатических линз. Фокусировка сопровождается появлением различных искажений или aberrаций, которые приводят к возникновению в фокусе линзы электронного пятна вместо точки. **Наименьший** возможный диаметр этого пятна d называется **кružком рассеяния**. Он связан с углом сходимости луча у мишени α соотношением $d \sim C\alpha^n$, $n = 1, 2, 3$.

Рассмотрим виды aberrаций в порядке возрастания их важности.

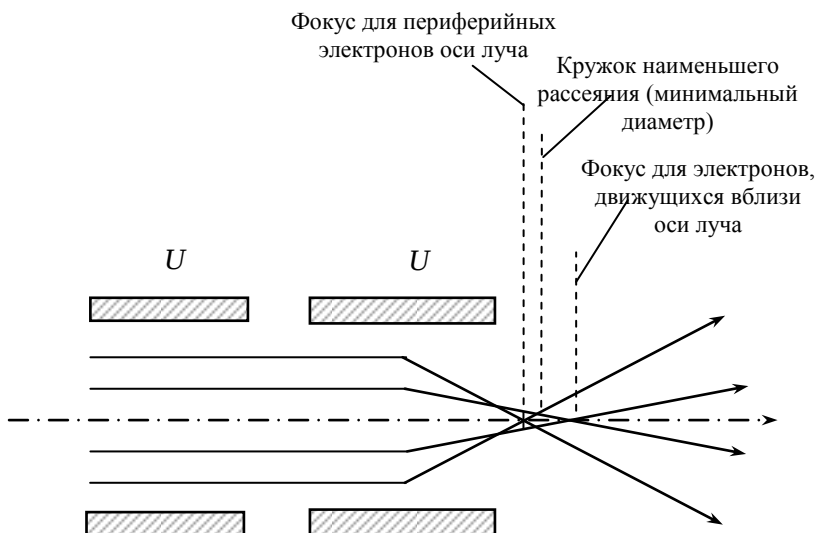


Рис. 5.14. Типичный ход траекторий электронов в линзе, имеющей сферическую aberrацию

Сферическая aberrация связана с фокусирующими полями. Сила фокусирующего поля больше у стенок электрода линзы и уменьшается к оси. Aberrация этого вида приводит к тому, что периферийные электроны фокусируются ближе к линзе, чем осевые (рис. 5.14). Кружок наименьшего рассеяния находится между этими двумя фокусами.

Диаметр кружка наименьшего рассеяния d_s , возникающего вследствие сферической aberrации, равен

$$d_s = \frac{1}{2} C_s \cdot \alpha^3, \quad (5.13)$$

где C_s – коэффициент сферической aberrации, связанный с фокусным расстоянием линзы f соотношением $C_s = K_s f$, где $0,5 < K_s < 1,5$. Надо, чтобы C_s был минимальным или уменьшить α . Этого можно достичь путем вырезания пучка диафрагмой, но при этом уменьшается ток и падает производительность ЭЛУ.

Хроматическая aberrация линзы зависит от скорости частиц, входящих в неё. Частицы с большей скоростью будут сфокусированы в точке, отстоящей от линзы дальше, чем точка, в которой сойдутся частицы с меньшей скоростью (рис. 5.15).

Как и в случае сферической aberrации, возникает кружок наименьшего рассеяния с диаметром

$$d_c = C_c \cdot \alpha \cdot \Delta U / U, \quad (5.14)$$

где $C_c = K_c f$ ($K_c = 0,75 - 1$).

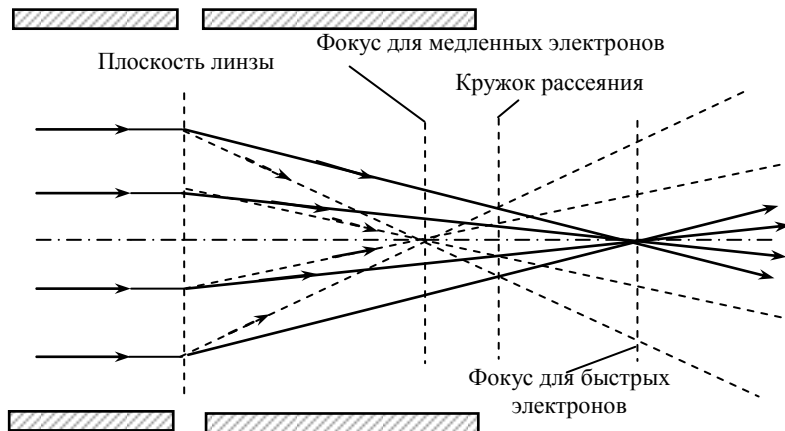


Рис. 5.15. Траектории электронов в линзе с хроматической aberrацией

Величины ΔU и U означают соответственно средний разброс и среднюю энергию электронов, попадающих в линзу. Для уменьшения хроматической aberrации следует стабилизировать ускоряющее напряжение на уровне $\Delta U / U = 10^{-3} - 10^{-5}$. Хроматическая aberrация зависит не только от характеристики линзы, но и от входящих в нее электронов. Даже самой тщательной стабилизацией источников питания устранить разброс скоростей и энергий электронов, обусловленный действием электронной пушки, невозможно.

Характеристики магнитной линзы также зависят от напряженности магнитного поля H и, следовательно, тока возбуждения. Выражение для d_c часто записывают в виде $d_c = C_c \cdot \alpha (2 \Delta H / H - \Delta U / U)$. Равенство показывает, что колебания магнитного поля $\Delta H / H$ и разброс энергий электронов $\Delta U / U$ оказывают противоположное действие на d_c , причем действие первого фактора вдвое сильнее. Необходимо применять магнитные линзы с минимальным значением C_c . Реально минимальные значения C_s и C_c не могут быть получены в одном и том же режиме возбуждения, поэтому становится очевидной необходимость компромисса между рассматриваемыми aberrациями

при конструировании линзы. Сферическая и хроматическая аберрации проявляются слабее в короткофокусных линзах с фокусным расстоянием 10–40 см. Отклоняющая система, переключающая луч по мишени, также искажает форму и размеры пятна.

Дифракция. Проходя через ограничивающую диафрагму (апертуру), луч дифрагирует, образуя пятно диаметром $d_d = 0,6\lambda/\alpha$. Этот эффект сказывается на параметрах лишь тех электронно-лучевых систем, которые обладают самой высокой разрешающей способностью. С учетом уравнения (5.7) для λ и подстановки постоянных получаем

$$d_d = \frac{0,6}{\alpha} \frac{\hbar}{\sqrt{2m \cdot e \cdot U}}. \quad (5.15)$$

Таким образом, минимальный размер электронного луча на мишени d_m зависит от поперечной составляющей тепловой скорости электронов, хроматической и сферической аберраций линз и дифракции луча на ограничивающей диафрагме. Воздействие этих эффектов до определенной степени можно считать статистически независимыми. В этом случае диаметр луча обычно представляют через среднеквадратическую сумму четырех уравнений (5.12)–(5.15):

$$d_m^2 = \frac{1}{\alpha^2} \left[\frac{I_0}{3,08B} + \frac{0,36 \cdot \hbar^2}{2m \cdot e \cdot U} \right] + \alpha^6 \left(\frac{1}{4} C_s^2 \right) + \alpha^2 (C_c \cdot \Delta U / U)^2. \quad (5.16)$$

Наименьший диаметр луча получается при некотором оптимальном значении угла сходимости α . Если пренебречь влиянием хроматической аберрации и дифракции, то диаметр пятна будет определяться лишь тепловыми скоростями электронов и сферической аберрацией. При этих условиях можно найти из (5.16) оптимальный угол сходимости, обеспечивающий наименьший диаметр луча

$$\alpha_{\text{opt}} = \left[\frac{I_0}{2,31 \cdot B \cdot C_s^2} \right]^{1/8}. \quad (5.17)$$

Диаметр пятна при $\alpha = \alpha_{\text{opt}}$ составит

$$d_{\text{min}} = 0,79 \cdot (I_0 / B)^{3/8} \cdot C_s^{1/4}, \quad (5.18)$$

а плотность тока луча

$$j = 1,94 \cdot d_{\text{min}}^{2/3} \cdot B / C_s^{2/3}. \quad (5.19)$$

Электронные резисты – это полимерные материалы с высоким молекулярным весом. При облучении органического полимера электронами в нем происходят поглощение энергии и химические превращения. Поскольку энергия электронов много больше энергии химических связей, изменениям подвергаются все виды химических

связей, т.е. возможно разрушение полимерных цепочек на отдельные звенья или образование новых связей, т.е. полимеризация. Оба этих процесса протекают одновременно, но один из этих процессов для выбранного материала является преобладающим и определяет результирующий эффект. Если полимер полимеризуется при облучении электронами, в нем образуются трехмерные связи, и он становится нерастворимым (негативные электронные резисты).

Известно относительно небольшое число полимеров, облучение которых средними по величине дозами приводит к преобладанию процесса разрыва главных полимерных цепочек и тем самым образованию в облученном материале молекул с меньшей молекулярной массой. Подобрав растворитель, можно удалить облученный полимер. Однако при больших экспозициях снова начинает преобладать процесс полимеризации, и облученный материал становится нерастворимым. Таким образом, при облучении электронами время экспозиции всегда ограничено, если нужно получить позитивное изображение.

Электронные резисты характеризуются величиной, которая носит название чувствительности S

$$S = jt,$$

где j – плотность электронного луча; t – время воздействия луча на резист (время экспонирования).

За пороговую чувствительность электронорезиста $S_{\text{пор}}$ принимается доза облучения, необходимая для начала радиационно-химического превращения. Доза, определяющая стопроцентное преобразование полимера, обозначается через S_0 . Например, чувствительность позитивных резистов на основе полиметилметакрилата типа ПММА при энергии электронного луча 20 кэВ равна $(4-8) \cdot 10^{-5}$ Кл/см².

Для характеристики электронорезистов вводится также понятие контрастности γ , которая определяется как $\gamma = [\lg \cdot (S_0 / S_{\text{пор}})]^{-1}$.

Контрастность служит мерой чувствительности резиста к изменению дозы. Всегда желательно использовать высококонтрастные резисты для обеспечения четкой проработки краев элементов топологии и достижения высокой разрешающей способности. Контрастность негативных резистов составляет 0,9–1,0, а для позитивных – 2–3. Для передачи рисунков с субмикронными элементами требуется $\gamma > 1$.

Параметры позитивного резиста ПММА: молекулярная масса $M = 10^6$; плотность материала $\rho = 1,2$ г/см³; атомный номер $Z = 3, 6$. Чувствительность резиста равна $S_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ Кл/см² при энергии электронов $E_0 = 30$ кэВ, а пороговая чувствительность составляет $S_{\text{пор}} = 10^{-5} - 10^{-7}$ Кл/см² при $E_0 = 20 - 30$ кэВ.

При движении электронов в веществе энергия их непрерывно уменьшается в результате неупругих столкновений, а траектория движения электронов изменяется из-за их упругого рассеяния на атомах. Пусть пленка резиста толщиной h экспонирована электронным лучом диаметром d_M (рис. 5.16).

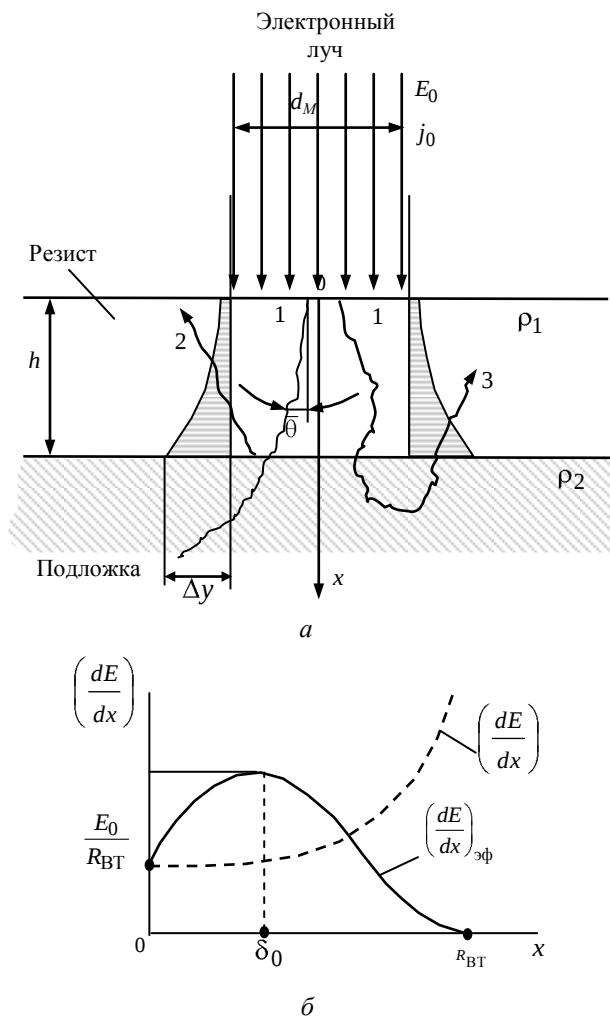


Рис. 5.16. Рассеяние пучка электронов в твердом теле (a) и изменение энергетических потерь по глубине (b)

Электроны, проходя через щель маски, в результате многократных упругих столкновений рассеиваются в резисте на средний угол $\bar{\theta}$ (траектория 1). Так как плотность вещества резиста ρ_1 и плотность подложки ρ_2 различны, то на границе раздела $x=h$ первичные электроны претерпевают неупругое отражение (траектория 2). Прошедшие в подложку электроны рассеиваются в её объеме; часть из них в результате рассеяния на большие углы вернется обратно в объем пленки резиста (траектория 3). Кроме того, в результате торможения первичных электронов в объеме резиста возникают рентгеновское и ультрафиолетовое излучения. Перечисленные эффекты приводят к увеличению ширины экспонированной линии $b_{\max} = d_m + 2\Delta u$, где Δu – суммарное уширение. Надо стремиться уменьшить Δu для получения субмикронных размеров.

Все электронно-лучевые технологические процессы связаны с передачей энергии от электронов обрабатываемому материалу, поэтому наиболее важной характеристикой является выделяемая электронами пучка энергия в единице объема Q (Дж/м³). Объемную удельную энергию Q определяют следующим образом:

$$Q = \frac{dE}{dx} j t \frac{1}{e}, \quad (5.20)$$

где dE/dx – потери энергии электронами; e – заряд электрона.

В выражении (5.20) dE/dx и j зависят от координаты x . Так как плотность тока резко падает с ростом глубины, что связано с рассеянием электронов на большие углы (см. рис. 5.16), то плотность энергии также меняется по глубине материала

$$Q(x) = \left(\frac{dE}{dx} \right) j(x) \frac{t}{e}. \quad (5.21)$$

Выражение (5.21) перепишем в таком виде:

$$Q(x) = \left(\frac{dE}{dx} \right) \frac{j(x)}{j_0} \cdot \frac{j_0 t}{e} = \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{эф}} \frac{j_0 t}{e}, \quad (5.22)$$

где $\left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{эф}} = \frac{dE}{dx} \cdot \frac{j(x)}{j_0}$ – эффективные энергетические потери электронов.

Смысл введения эффективных энергетических потерь состоит в упрощении описания задачи взаимодействия электронного луча с веществом. Рассчитать $\left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{эф}}$ можно следующим образом:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{эф}} = \frac{E_0}{R_{\text{В-Т}}} \left(1 - \frac{x}{R_{\text{В-Т}}}\right)^{5/4} \left(3 - 2e^{-\frac{Z+8}{4} \cdot \frac{x}{R_{\text{В-Т}}}}\right), \quad (5.23)$$

где Z – атомный номер атома подложки; $R_{\text{В-Т}}$ – проекционный пробег электронов по формуле Виддингтона-Томсона.

$$R_{\text{В-Т}} = \frac{E_0^2}{(\rho b_1)}, \quad (5.24)$$

где b_1 – экспериментально определенная постоянная, слабо зависящая от Z .

В формуле (5.24) $R_{\text{В-Т}}$ выражено в см; E_0 – в кэВ; ρ – в г/см³; b_1 – в кэВ²·г⁻¹·см². Величина $1/b_1$ при изменении Z от 13 до 79 меняется от $2,1 \cdot 10^{-6}$ до $2,54 \cdot 10^{-6}$ кэВ²·г·см⁻².

Из уравнений (5.22)–(5.23) видно, что $\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{эф}}$ с увеличением x растет быстрее, чем dE/dx , а затем резко падает, стремясь к нулю при $x = R_{\text{В-Т}}$ (см. рис. 5.16). Максимум энергетических потерь электрона приходится на расстояние $x = \delta_0$. Значение $\delta_0/R_{\text{В-Т}}$ в достаточно широком интервале энергий и Z материалов лежит в пределах 0,2–0,3. Величина $dE/dx_{\text{эф}} = E_0/R_{\text{В-Т}}$ при $x=0$. Отношение dE/dx_{max} к dE/dx_0 составляет 1,5–1,7. Кривая распределения по глубине поглощенной веществом объемной энергии $Q(x)$ повторяет зависимость $dE/dx_{\text{эф}}$ от координаты.

На поверхности будем иметь

$$Q_0 = \left(\frac{dE}{dx}\right)_0 \cdot \frac{j_0 t}{e} = \frac{E_0}{R_{\text{В-Т}}} \cdot \frac{S_0}{e} = \frac{\rho b_1}{E_0} \cdot \frac{S_0}{e}, \quad (5.25)$$

где dE/dx_0 – потери энергии электронов при $x=0$; S_0 – доза облучения.

Если известны Q_0 и dE/dx_0 , то можно из (5.25) определить дозу экспонирования

$$S_0 = \frac{Q_0 \cdot e}{dE/dx_0} = j_0 t. \quad (5.26)$$

Задаваясь в (5.26) временем экспонирования, определим требуемую плотность тока луча. Значение Q_0 составляет приблизительно 10^{-1} Дж/см³.

При прохождении электронного луча в резисте толщиной h электроны за счет упругого рассеяния отклоняются от направления первоначального движения в среднем на угол $\bar{\theta}$. Вклад упругого рассеяния Δy_1

$$\Delta y_1 = h \cdot \bar{\theta}.$$

Среднеквадратическое угловое отклонение $\bar{\theta}$ определяется из среднего квадрата угла рассеяния

$$\bar{\theta}^2 = \frac{4 \cdot \pi \cdot N_0 \cdot h \cdot Z^2 \cdot e^4}{m^2 \cdot V_0^4 (4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0)^2} \cdot \ln \frac{4 \cdot \pi \cdot N_0 \cdot h \cdot Z^{4/3} \cdot e^4 \cdot a_0}{V_0^2 \cdot (\hbar')^2 \cdot (4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0)^2},$$

где N_0 – атомная плотность электронорезиста; h – толщина резиста; V_0 – скорость электрона; ε_0 – электрическая постоянная; a_0 – первый радиус Бора; $\hbar'$ – постоянная Планка.

В силу малости угла $\bar{\theta}$ поперечное отклонение электронов прямо пропорционально $h^{3/2}$ и обратно пропорционально скорости электронов, т.е. энергии E_0 . Если бы не было отраженных от подложки электронов, то величина Δy_1 определяла бы разрешающую способность электронной литографии. В этом случае целесообразно было бы увеличивать энергию электронов до 100 кэВ.

Однако реальную разрешающую способность электронной литографии определяют вторичные электроны, отраженные от подложки:

$$\Delta y_{\text{отр}} = h \cdot \sqrt{\frac{E_0 \cdot Q_0 \cdot \eta}{E_h \cdot Q_{\text{пор}}}} - 1,$$

где E_h – энергия электронов, прошедших резист толщиной h ; η – коэффициент неупругого отражения электронов.

Энергия E_h определяется

$$E_h = E_0 \sqrt{1 - \hbar / R_{B-T}}.$$

Коэффициент упругого отражения от подложки равен $\eta = (Z - 8)/(2 \cdot Z)$. Для конкретных материалов, применяемых в микроэлектронике, $\eta \approx 0,2 - 0,4$.

Отношение $Q_0/Q_{\text{пор}}$ для электронных резистов колеблется в пределах 2–8. В дальнейшем приведенные расчетные формулы могут быть использованы для качественной оценки параметров электронной литографии.

В заключение отметим, что рассмотренная упрощенная модель процесса экспонирования электронного резиста служит иллюстрацией взаимосвязи основных параметров процесса нетермического взаимодействия электронного луча с веществом.

Рассмотрим те физические эффекты, которые накладывают ограничения на параметры электронно-лучевой литографии применительно к изготовлению СБИС. Эти ограничения связаны с материалом резиста, электронным лучом и системой управления ЭЛУ.

Попадающий на мишень электронный луч создает заряд, равный произведению тока на время экспонирования. Полезное действие луча на поверхность мишени можно выразить через число электронов, приходящихся на единицу площади, которые необходимы для получения нужного эффекта. Время, необходимое для экспонирования пятна диаметром d лучом с плотностью тока j_0 на поверхности мишени, равно $t = \frac{S_0}{j_0}$. Например, чтобы экспонировать резист с

$S_0 = 8 \cdot 10^{-5}$ Кл/см², требуется $\frac{S_0}{e}$ электронов, т.е. $5 \cdot 10^{14}$ электрон/см². Чем меньше значение S_0 , тем выше чувствительность резиста, т.е. для достижения нужного эффекта в резисте требуется меньшее число электронов. Для резиста с $S_0 = 10^{-7}$ Кл/см² требуется для обработки элемента разложения площадью $A = 0,1 \times 0,1$ см² число электронов $N_e = \frac{S_0 \cdot A}{e}$, т.е. $6 \cdot 10^9$ электронов. Однако, если $A = 0,01 \times 0,01$ мкм², то для того же резиста $N_e \approx 0,6$ электрона.

Для полной уверенности, что резист экспонирован должным образом, минимальное число электронов, которые определенно попадают на данный участок, составляет $N_{\text{min}} = 200$. Поэтому в областях с малыми размерами минимальная ширина линии b_{min} связана с дозой выражением

$$b_{\min}^2 = \frac{N_{\min} \cdot e}{S_0}. \quad (5.27)$$

Выражение (5.27) показывает, что очень чувствительные резисты не пригодны для формирования структур с высокой разрешающей способностью, если только на область с малыми размерами не попадает число электронов, существенно большее минимального.

Помимо ограничений, налагаемых чувствительностью и реальной разрешающей способностью резиста, существует ряд ограничений, связанных с ЭЛУ. Эти ограничения обусловлены характеристиками электронно-оптической системы, а также электронными и механическими взаимодействиями, определяющими плотность и скорость сканирования.

Зависимость плотности тока луча и, следовательно, времени экспонирования от параметров электронно-оптической системы можно получить из уравнения (5.28). При оптимальных параметрах луча

$$t_{\text{опт}} = \frac{S_0}{j_{\text{опт}}} = \frac{S_0 \cdot C_s^{2/3}}{1,94 \cdot d_{\min}^{2/3} \cdot B}. \quad (5.28)$$

Из выражения (5.28) видно, что для получения заданной ширины линии можно уменьшать t , варьируя чувствительность резиста S_0 , яркость источника B или коэффициент сферической аберрации линзы C_s . Время экспонирования больших участков равно $T = n \cdot t$, где n – полное число приходящихся на данный участок элементов разложения.

Таким образом, существуют четыре независимых соотношения, определяющих связь времени экспонирования элемента разложения с параметрами луча или свойствами резиста. Эти соотношения включают основные параметры – плотность тока луча, ширину линий, диаметр луча и чувствительность резиста. Фактически необходимое время экспонирования определяют путем совместного решения этих четырех уравнений. Поскольку уравнения содержат общие параметры, решение можно проиллюстрировать графически (рис. 5.17).

Каждому уравнению отведен один квадрант: квадрант I представляет соотношение $S = j \cdot t$, квадрант II – уравнение (5.27), квадрант III – отношение ширины линии к диаметру пятна, определяемое числом проходов луча для воспроизведения линии, квадрант IV – уравнение (5.18). Совместное решение дает некоторую величину P в квадранте I, означающую время экспонирования для элемента разложения.

Основное преимущество электронно-лучевой литографии состоит в повышении разрешающей способности, однако существуют некоторые другие выигрышные факторы технического и экономического характера. Так, возможно ускорение изготовления шаблонов для фотолитографии с размерами элементов рисунка 1–5 мкм. Цикл изготовления шаблона может составить всего 1–2 дня по сравнению с шестью неделями, которые обычно тратятся на вычерчивание, фотографирование с уменьшением, мультиплицирование и т.д.

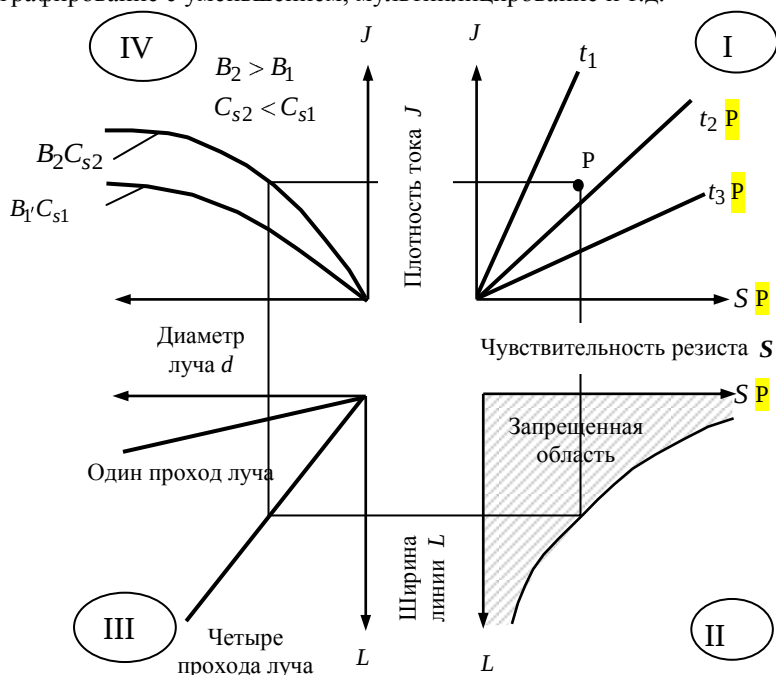


Рис. 5.17. Диаграмма, показывающая влияние различных факторов на время экспонирования

Возможность создавать рисунки с высокой разрешающей способностью методом последовательного электронно-лучевого экспонирования позволяет решить проблемы, обусловленные искривлением (неплоскостностью) пластин. Применение электронно-лучевой литографии позволяет улучшить воспроизводимость ширины линий, точность размещения элементов рисунка и точность совмещения нового рисунка с ранее сформированными на пластине элементами, что весьма важно для увеличения плотности размещения компонентов в

СБИС. Многие из достоинств обусловлены тем, что движение электронного луча программируется и управляется с помощью ЭВМ. Возможность создания топологических рисунков с помощью ЭВМ и изменения их путем простой модификации программ может сделать малосерийное производство интегральных схем более экономичным.

5.6. Технология электронно-лучевой литографии

В настоящее время электронно-лучевая литография широко используется для изготовления фотошаблонов, применяющихся в иммерсионной литографии, импринтинге, ЭУФ-литографии, нанотехнологиях и фундаментальных исследованиях. В связи с возрастающей сложностью изготовления фотошаблонов и как следствие высокой ценой комплекта шаблонов в кремниевой технологии в последнее время значительное внимание уделяется изучению возможности применения электронной литографии для экспонирования непосредственно на полупроводниковой пластине. В технологии GaAs монолитных интегральных схем электронная литография используется для создания наиболее критичных блоков схемы.

Оборудование и способы экспонирования. Возможность получения критичных размеров, точность совмещения топологических слоев, производительность процесса электронно-лучевой литографии главным образом определяются возможностями систем ЭЛ экспонирования. Существует несколько вариантов построения таких систем (рис. 5.18).

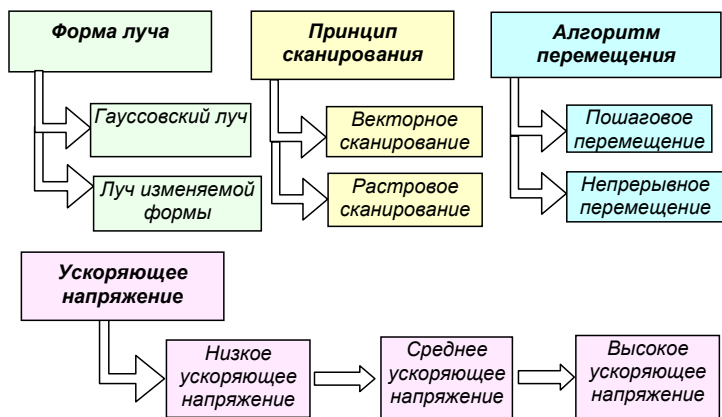


Рис. 5.18. Основные характеристики систем электронно-лучевого экспонирования

В современных установках электронно-лучевой литографии используются два различных способа формирования электронного луча

в электронно-оптической колонне, дающих в результате луч с круглым сечением и гауссовским распределением плотности тока и луч с изменяемой формой сечения (квадратной, прямоугольной) – профилированный луч (рис. 5.19).

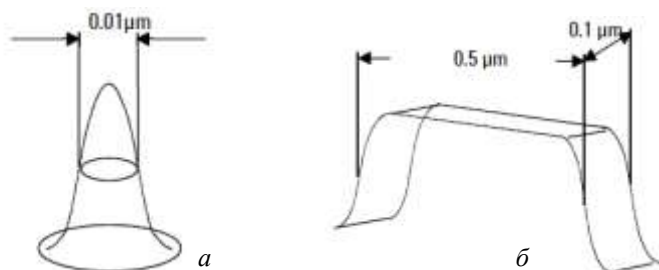


Рис. 5.19. Распределение плотности тока в луче с гауссовским сечением (а) и в профилированном луче (б)

В случае использования луча гауссовской формы экспонирование происходит от точки к точке (рис. 5.20, а). Гауссовы лучи недостаточно интенсивны и требуют перекрытия 4–5 малых пятен для формирования квадрата. Производительность таких установок очень мала. При использовании профилированного луча экспонирование осуществляется «штампами» заданной формы и площади, которые формируются с помощью наложения специальных апертур (рис. 5.20, б). При таком методе первая апертура задает форму луча, и ее изображение проецируется на вторую апертуру. Система отклонения смещает изображение первой апертуры так, что оно лишь частично перекрывается со второй. С помощью апертур различных форм можно получать треугольники, повернутые на 45° прямоугольники и параллелограммы.

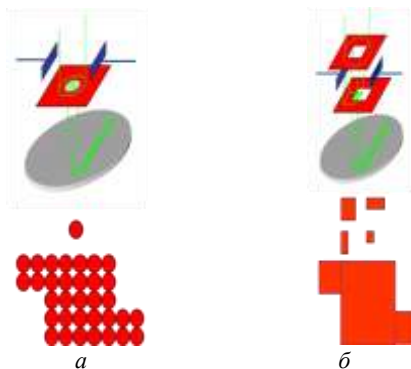


Рис. 5.20. Методы экспонирования резиста с использованием гауссовского луча малого диаметра (а) и луча изменяемой формы (б)

Производительность установок электронно-лучевой литографии, работающих с профилированными пучками, в несколько раз выше по

сравнению с установками, использующими гауссовский пучок, так как за одно и то же время экспонируется большая площадь. Формирование изображения с помощью профилированного луча происходит $\sim 3\text{--}10$ раз быстрее по сравнению с лучом гауссовой формы (при прочих равных условиях). Например, время экспонирования кристалла размером $21,4 \times 21,2 \text{ мм}^2$ с минимальным размером элемента 120 нм при чувствительности резиста 10 мКл/см^2 и экспонируемой площади 0,9% от общей площади пластины на установке с гауссовым лучом составит 60 мин, при использовании установки с профилированным лучом для этого потребуются 10,8 мин.

Производительность установки экспонирования также зависит от типа перемещения столика с пластиной. В большинстве установок стол с пластиной перемещается с остановками, и экспонирование происходит в момент остановки. Затем столик передвигается на расстояние, равное шагу поля сканирования, и начинается экспонирование следующего элемента. Процесс повторяется до тех пор, пока не будет обработана вся площадь пластины или шаблона (рис. 5.21, *а*). Второй алгоритм заключается в непрерывном перемещении стола с пластиной (рис. 5.21, *б*). В процессе перемещения стола электронный луч засвечивает в резисте полосу заданной ширины. При этом сокращается общее время процесса экспонирования.

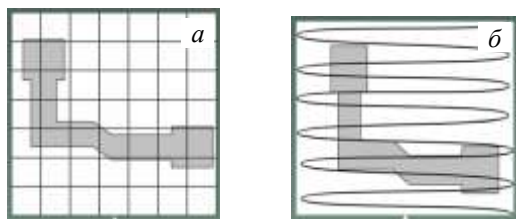


Рис. 5.21. Варианты экспонирования топологических фигур с использованием стола с пошаговым перемещением (*а*) и непрерывно движущегося стола (*б*)

Для формирования топологического рисунка в слое резиста применяется растровое и векторное сканирование. В случае *растрового сканирования* луч сканирует всю площадь, но включается только на тех участках, которые должны быть проэкспонированы (рис. 5.22, *а*).

В процессе *векторного сканирования* луч экспонирует требуемую фигуру, затем скачком перемещается к следующей фигуре (рис. 5.22, *б*). Так как экспонируемая площадь почти всегда меньше половины площади пластины (20% и менее), существенное достоинство векторного метода сканирования в том, что луч перемещается

только по формируемым элементам, сокращая время процесса формирования изображения.

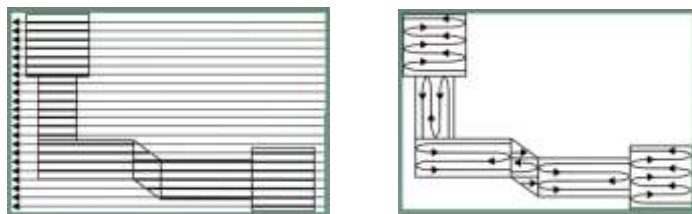


Рис. 5.22. Экспонирование топологического рисунка методами растрового (а) и векторного (б) сканирования

В пределах экспонируемого элемента используются различные варианты перемещения луча (рис. 5.23). Луч может перемещаться построчно, каждый раз возвращаясь в начало ряда, по меандру, по спирали от края к центру или по контуру фигуры, затем двигаясь к центру.

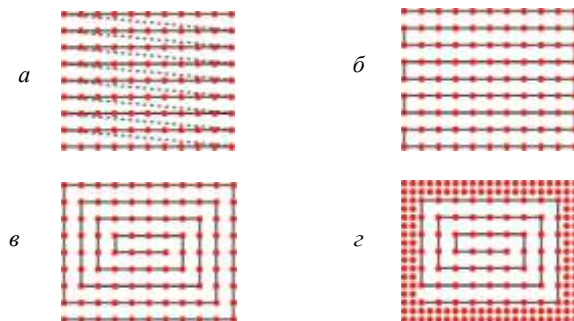


Рис. 5.23. Варианты сканирования экспонируемого элемента топологии: а – построчное сканирование; б – сканирование по меандру; в – сканирование по спирали; г – сканирование по спирали с обходом по контуру

Концепция экспонирования с непрерывно движущимся столом, профилированным лучом и векторным сканированием реализована в установках компании Vistec. Примером установки с гауссовским распределением плотности тока и пошаговым перемещением стола является установка Raith 150^{two} (рис. 5.24).

Подготовка данных. Известно, что экспонирование рисунка осуществляется на подложке электронным лучом, а топология (дизайн) рисунка конвертируется в управляющие сигналы с помощью генератора в установке электронно-лучевой литографии. Каждая

электронно-лучевая установка имеет в своем составе блок ввода топологической информации и блок ее обработки, вырабатывающий команды для управления процессом формирования рисунка. После создания топологии в формате GDSII, DXF или CIF происходит обработка топологической информации в индивидуальный формат данных, распознаваемый электронно-лучевой системой.



Vistec SB250

Ускоряющее напряжение 50 кВ
Плотность тока до 20 А/см²
Профилированный луч
Непрерывное перемещение стола
Векторное сканирование



Raith 150^{two}

Ускоряющее напряжение 100 В-30 кВ
Луч с гауссовским распределением
Диаметр луча ≤ 2 нм при 20 кВ
Плотность тока ≥ 7500 А/см²
Пошаговое перемещение стола
Векторное сканирование

Рис. 5.24. Системы электронно-лучевого экспонирования

Так как размер поля экспонирования в электронно-лучевой системе ограничен, некоторые элементы рисунка могут быть больше, чем поле экспонирования, и должны быть разбиты в соответствии с размером поля. Вся топология разбивается на количество полей экспонирования. Различные системы имеют различные настройки размера поля. Например, для установок компании JEOL специфичны размеры поля 25–1600 мкм и подполя 25–100 мкм при 25 кВ ускоряющего напряжения. Размер поля варьируется в определенном диапазоне. В принципе маленький размер поля используется для получения высокого разрешения, потому что большие поля имеют большие аберрации. Многоугольные фигуры разбиваются на нескольких основных контуров, обычно треугольников, ромбов и трапеций с основаниями,

параллельными оси x (рис. 5.25). Электронный луч сканирует в растровой моде внутри каждой основной фигуры и перемещается в векторной моде из одной базовой фигуры в другую. Если элемент прямоугольной формы, он может быть разделен на прямоугольные формы, меньшие по размеру. Если элемент изогнутой формы, он может быть разделен приблизительно на прямоугольники и трапеции, т.е. на значительно большее количество фрагментов.

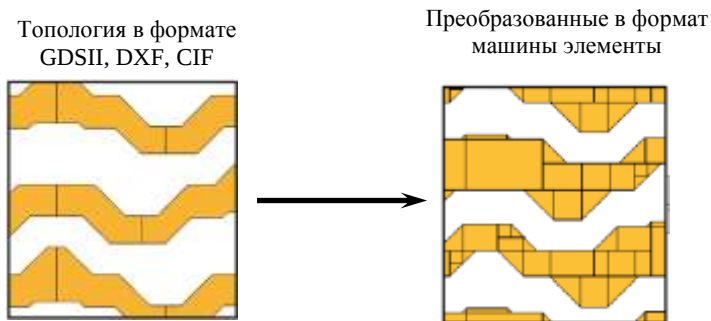


Рис. 5.25. Способ разбиения элементов топологии на фрагменты

Результатом преобразования топологии с помощью специальных программ является массив данных более обширный, но содержащий фигуры только разрешенной формы. Преобразование исходной топологии в рабочую форму требует значительных ресурсов для вычислений, так как окончательный массив данных может иметь очень большой объем.

Взаимодействие электронов с материалом резиста. Эффект близости. У большинства полимерных материалов под действием электронного луча одновременно протекают процессы структурирования, циклизации и деструкции, а также соединения концов полимерных цепей. Однако на основании экспериментальных данных полимерные материалы можно разделить на две группы по типу преобладающего процесса. Критерием может служить теплота полимеризации соответствующего мономера, которая, за небольшим исключением, выше у полимеров, склонных к структурированию.

Существует несколько механизмов передачи энергии среде электронами. Преобладание того или иного механизма определяется, прежде всего, энергией электронов и в меньшей степени свойствами поглощающего материала. Рассеяние электронов ведет к распространению электронного излучения по всем направлениям, следовательно, электронорезист экспонируется в тех местах, куда первоначально

не направлялся поток электронов. Комбинация первичных и обратно-рассеянных электронов дает профиль распределения энергии в резисте.

Энергия, рассеянная в единице объема, зависит от атомного номера элемента, входящего в состав поглощающей среды, толщины подложки и слоя резиста, а также скорости падающих электронов (ускоряющего напряжения). На рис. 5.26 показаны траектории 100 электронов в ПММА, рассчитанные методом Монте-Карло при различном ускоряющем напряжении.

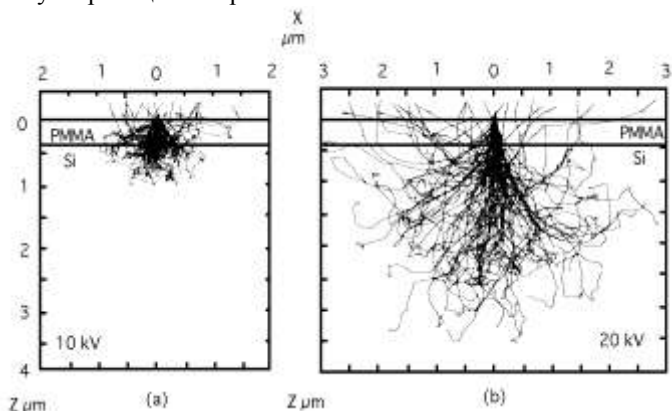


Рис. 5.26. Вычисленные методом Монте-Карло траектории 100 электронов, претерпевших рассеяние в слое резиста ПММА, на кремниевой подложке при ускоряющем напряжении 10 и 20 кВ

На основании этих данных рассчитываются экспозиционные профили в резисте, позволяющие осуществлять выбор оптимальных параметров для получения требуемого размера элементов и толщины рельефа.

Рассеяние первичных электронов главным образом зависит от исходной энергии электронов. Пучок электронов с энергией 50 кэВ имеет меньшее рассеяние (расширение) по сравнению с 20 кэВ. Обратно-рассеянные электроны сначала проникают в подложку, а затем возвращаются в резист. Обратное рассеяние зависит не только от энергии электронов, но и от материала подложки. Электроны, отраженные подложкой, возвращаются в резист и могут передать ему значительное количество энергии. Особенно заметен их вклад на большом расстоянии (несколько микрон от центра луча). Слой резиста поглощает энергию независимо от типа ее источника. В результате полученная резистом доза оказывается пространственно неоднородной, и в слое резиста наблюдаются эффекты близости.

Эффект близости является главным фактором, ограничивающим разрешение метода электронно-лучевой литографии. Эффекты близости приводят к нежелательному экспонированию областей, в которые луч непосредственно не направлялся. В зависимости от отсутствия или наличия близкорасположенных соседних элементов наблюдается соответственно внутренний или внешний эффект близости (рис. 5.27).

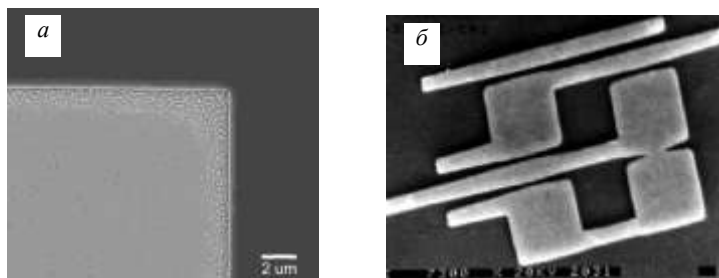


Рис. 5.27. Возникновение внутреннего (а) и внешнего эффектов близости (б)

В центре топологической фигуры большого размера вклад в поглощенную энергию вносит большее число рассеянных электронов. Края и углы топологической фигуры получают другую дозу. Возникновение пространственной неоднородности внутри экспонируемой фигуры называют *внутренним эффектом близости* (см. рис. 5.27, а). Внутренний эффект близости обусловлен снижением вклада в экспозицию обратнорассеянных из глубины подложки электронов.

Отраженные электроны увеличивают также дозу, полученную близкими соседними элементами. В таком случае говорят о *внешнем эффекте близости* (см. рис. 5.27, б).

Расстояния, на которых проявляются эффекты близости, зависят от энергии электронов. В частности, при высокой энергии луча отраженные электроны могут выходить за пределы контура экспонирования на значительное расстояние, порядка величины пробега электрона в подложке. Степень проявления эффекта близости весьма зависит от расстояния между элементами топологии.

Наиболее известный способ компенсации эффекта близости состоит в коррекции дозы экспонирования. Для каждого элемента топологии с помощью программного обеспечения подбирается индивидуальная доза экспонирования, позволяющая обеспечить полное удаление экспонированного резиста, требуемую форму и размер элемента (рис. 5.28).

Электронные резисты. Успешное проведение процесса литографии зависит от уровня культуры производства и совершенства оборуду-

дования, но в значительной степени определяется качеством используемых резистов и пониманием физико-химических процессов, происходящих на каждом этапе технологической обработки резиста.

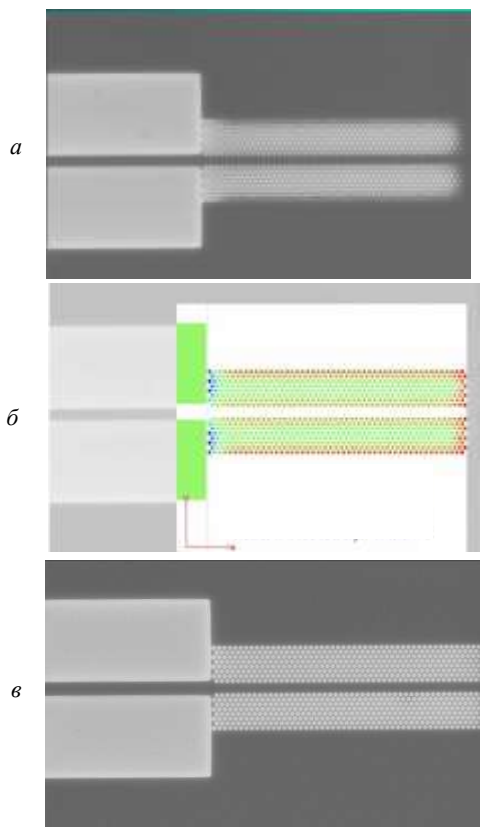


Рис. 5.28. Метод компенсации эффекта близости с коррекцией дозы облучения: *а* – изображение, полученное в резисте без коррекции эффекта близости; *б* – топология с коррекцией дозы для каждого элемента; *в* – изображение, полученное в резисте в результате коррекции эффекта близости

Согласно данным Международной технологической дорожной карты в области полупроводникового производства (<http://www.itrs.net/>) к технологии и материалам литографии предъявляются высокие требования. Часто они противоречивы и определяются спецификой технологии, но можно выделить основные критерии, которым должны соответствовать электронные резисты: высокая чувствительность к электронному лучу, высокая разрешающая способность и контраст-

ность, стойкость в процессах жидкостного и «сухого» травления, хорошая адгезия к поверхности подложки, малая дефектность и неровность края.

В табл. 5.1 и на рис. 5.29 представлены характеристики электронорезистов, используемых для различных технологий микро- и нанoeлектроники. Одним из наиболее распространенных электронорезистов, благодаря высокой разрешающей способности, стабильности и воспроизводимости своих параметров является полиметилметакрилат (ПММА, англ. – PMMA).

Таблица 5.1

Основные используемые электронорезисты

Резист	Тип резиста	Доза, $\mu\text{Кл}/\text{см}^2$ /ускоряющее напряжение, кВ	Разрешение, нм	Контраст	Устойчивость в процессах «сухого» травления	Производитель
PMMA	Позитивный	~200/30	< 10	Низкий	Низкая	Microf Cor Allre
P(MMA-MAA)	Позитивный	~70/30	< 200	Низкий	Низкая	Microf Cor Allre
HSQ	Негативный	500/100	< 10	Низкий	Высокая	Do Cor Cor
ZEP-520	Позитивный	~30/20	< 10	Высокий	Высокая	Zee Chem Co
SAL601	Негативный	3–5/100	< 100	–	Средняя	Ship
UV3	Позитивный	20–30	< 50	–	Высокая	Ship
EBR-9	Позитивный	~10/20	> 200	Низкий	Низкая	Tor Indus

ПММА. Полиметилметакрилат используется в качестве резиста с 1960-х годов благодаря своему главному достоинству – высокой разрешающей способности. В пленках этого резиста были получены размеры менее 20 нм. С появлением техники ультразвука были получены размеры менее 10 нм. Обычно доза экспонирования этого резиста составляет 50–100 $\mu\text{Кл}/\text{см}^2$. При дозе экспонирования в 10 раз выше стандартной дозы ПММА превращается из позитивного резиста в негативный. Контраст ПММА порядка 10. Его чувствительность зависит от относительной молекулярной массы – чем выше относительная молекулярная масса, тем ниже чувствительность. Коммерческие ПММА резисты имеют стандартную молекулярную массу 495 и 950 К. Но могут быть приготовлены растворы с 50, 100, 200 и 2200 К. Хотя низкомолекулярный ПММА имеет большую чувствительность,

его контраст и разрешение ниже. Поэтому литография с высоким разрешением проводится исключительно на 950 К ПММА.

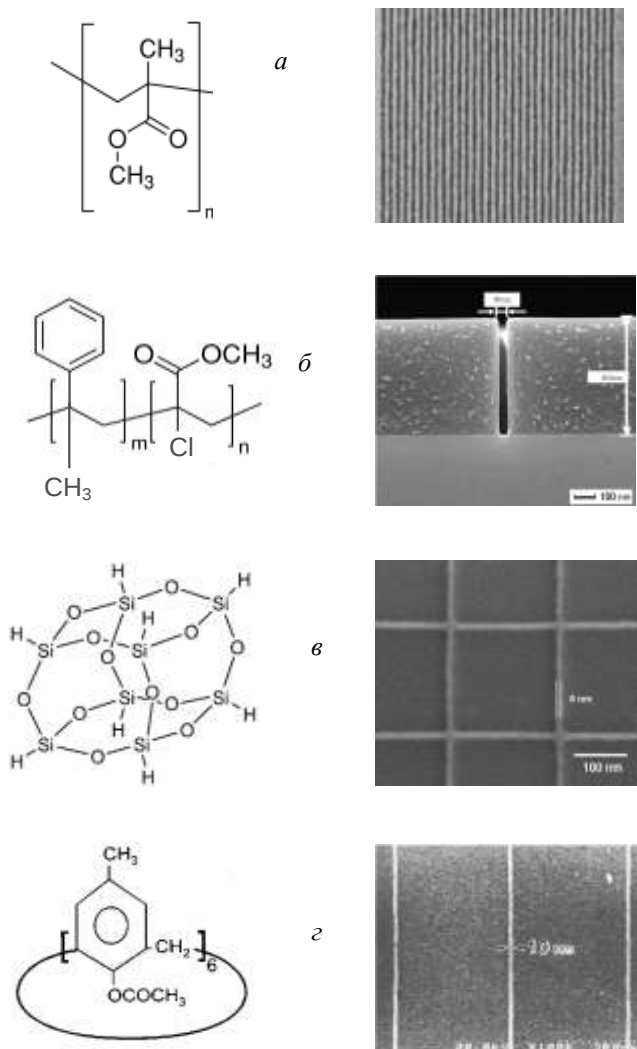


Рис. 5.29. Структурные формулы полимеров и изображения, полученные в пленках электронрезистов на их основе:

a – 950 К ПММА (полиметилметакрилат), минимальный размер 50 нм;
б – ZEP 520 (сополимер метил- α -хлоракрилата с α -метилстиролом), минимальный размер 35 нм; *в* – Fox-12 (hydrogen silsesquioxane), минимальный

размер 8 нм; ε – каликсарен (5,11,17,23,29,35-hexamethyl-37,38,39,40,41,42-hexaacetoxycalixarene), минимальный размер 10 нм

Чувствительность ПММА зависит также от концентрации проявителя. Стандартный проявитель – смесь метилизобутилкетона (МИБК) и изопропилового спирта (ИПС) (1:3). Увеличение концентрации МИБК усиливает чувствительность ПММА, но ухудшает его разрешение. Эффект влияния концентрации проявителя на чувствительность и разрешение продемонстрирован в табл. 5.2.

Таблица 5.2

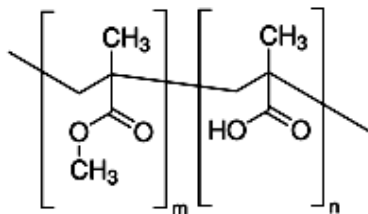
Влияние состава проявителя на литографические характеристики ПММА-резиста

Состав проявителя	Разрешение	Чувствительность
МИБК:ИПС (1:1)	Среднее	Высокая
МИБК:ИПС (1:2)	Высокое	Средняя
МИБК:ИПС (1:3)	Очень высокое	Низкая
МИБК	Низкое	Очень высокая

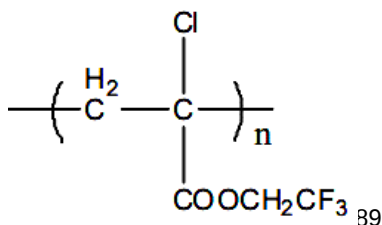
Недостатком ПММА является его невысокая плазмостойкость в процессах сухого травления. Селективность в процессах травления оксида кремния и нитрида кремния 1:1, что позволяет использовать его для травления этих материалов, но преимущественно он используется в процессах взрывной литографии.

Еще одним недостатком ПММА является его невысокая электроночувствительность, поэтому на его основе разработаны и продолжают создаваться резисты с улучшенными свойствами. Химический состав полимера является основным параметром, который в значительной степени определяет чувствительность к ионизирующему излучению.

Например, сополимер метил-метакрилата с метакриловой кислотой (англ. – П(ММА-ММА)), обладает в несколько раз большей электроночувствительностью по сравнению с полиметилметакрилатом.



Большой чувствительностью к электронному лучу обладают резисты на основе полифторалкилметакрилатов, например резист, основанный на принципе химического



усиления EBR-9 poly(2,2,2-trifluoroethyl--chloroacrylate):

ZEP. Вторыми по популярности являются резисты серии ZEP, представляющие собой сополимер метил- α -хлоракрилата с α -метилстиролом. Эти резисты также были разработаны с целью усовершенствования и замены ПММА. Резисты этой серии имеют в 5–10 раз более высокую чувствительность по сравнению с ПММА, при 20 кВ – 20–50 мкКл/см², в 5 раз более устойчивы в процессах «сухого травления», не уступая при этом ПММА в разрешающей способности. Селективность в процессах сухого травления сравнима с большинством новолачных резистов. ZEP-резисты демонстрируют очень высокий контраст (см. рис. 5.29): элементы размером 35 нм получены в электронном резисте ZEP 520 при аспектном соотношении 30:1.

HSQ (hydrogen silsesquioxane) – негативный электронный резист, активно исследуемый и применяющийся в последнее время в области нанотехнологий. Этот резист не разрабатывался как электронный резист, но он чувствителен к электронному лучу, с чувствительностью и контрастом приближенными к ПММА. HSQ представляет собой жидкий оксид, коммерческое название Fox-12. Имеет очень высокое разрешение и высокую плотность, что позволяет работать с пленками толщиной ~25 нм. В процессе экспонирования HSQ превращается в аморфный оксид, являющийся превосходным маскирующим материалом в процессах сухого травления кремния. Хотя HSQ имеет низкую чувствительность, это идеальный резист для формирования наноструктур. В пленках этого резиста были получены минимальные размеры линий 6 нм и достигнут контраст лучше 10.

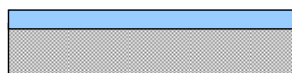
С целью сокращения времени экспонирования электронных резистов многие типы резистов исследуются с целью их применения для электронно-лучевой литографии. В том числе это резисты для ДУФ, химически усиленные резисты, например SAL601, UV3.

Большинство процессов электронно-лучевой литографии проводится с использованием однослойных резистов. Многослойные резисты требуются в следующих ситуациях: формирование отрицательных профилей для «взрывной» литографии, планаризации рельефа поверхности, для достижения высокого разрешения и в специфических случаях, например для формирования в резисте профиля сложной формы. Такие композиции традиционно используются для создания субмикронных *T*-образных затворов в процессе разработки и промышленного производства монолитных интегральных схем на GaAs.

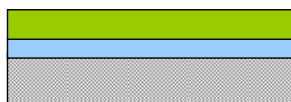
Используя многослойные композиции резистов, состоящие из 2–5 слоев резистов с различной чувствительностью, можно создавать маски сложной формы. Формирование многослойных резистивных

масок с элементами субмикронных размеров для последующего напыления металлов является многостадийным и критичным процессом, для успешного выполнения которого необходим правильный выбор системы резистов, соотношения толщин слоев, режимов нанесения и сушки каждого слоя, а также выбор оптимальных режимов экспонирования и условий процесса проявления, позволяющих получить желаемый профиль.

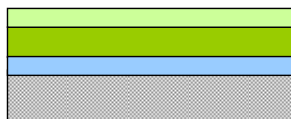
На рис. 5.30 представлена последовательность литографических операций изготовления *T*-образного затвора с применением трехслойной резистивной маски. Резист на основе ПММА с молекулярным весом 950 К используется в качестве нижнего слоя для создания основания затвора, в качестве среднего слоя, определяющего ширину и высоту верхней части затвора, применяется LOR-резист. LOR-резист легко проявляется в водно-щелочных проявителях и не проявляется в обычных проявителях для ПММА, что делает возможным селективное проявление каждого слоя. Этот резист специально разработан и используется в литографии «на взрыв» для получения обратного профиля.



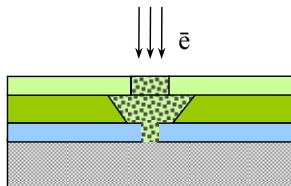
1. Нанесение и сушка ПММА с высокой молекулярной массой



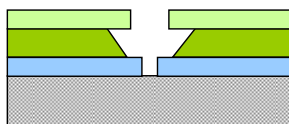
2. Нанесение и сушка LOR



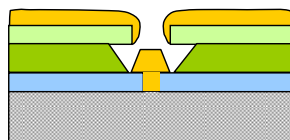
3. Нанесение и сушка ПММА с низкой молекулярной массой



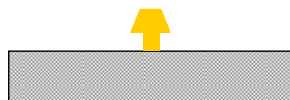
4. Экспонирование резистов



5. Проявление ПММА-резисторов и LOR



6. Напыление металла



7. Удаление резистов в органических растворителях

Рис. 5.30. Последовательность формирования затвора *T*-образной формы в трехслойной резистивной маске

Верхний слой состоит из резиста на основе ПММА с молекулярным весом 495 К. Его назначение – предотвращение «запыления» металлом стенок профиля в резисте, что облегчает процесс последующего удаления резистивной маски.

Создание резистивных масок сложной формы возможно с помощью одновременного или последовательного электронно-лучевого экспонирования нескольких слоев резистов. Топология для экспонирования состоит из трех областей. Центральная часть определяет длину затвора и экспонируется с большей дозой, чем боковые области (рис. 5.31).

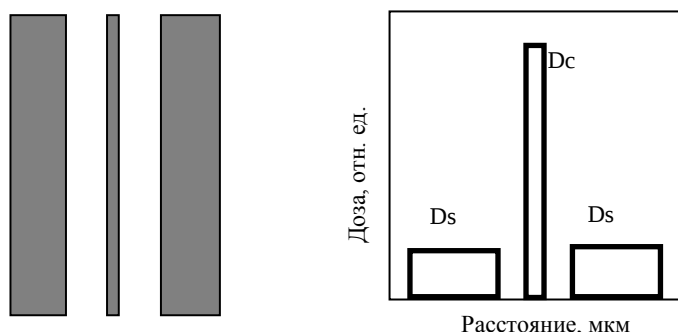


Рис. 5.31. Топология для экспонирования многослойного резиста и распределение дозы экспонирования

Проявители выбираются с учетом химической структуры и чувствительности резистов. Использование различных по чувствительности резистов и различных проявителей позволяет селективно проявлять каждый слой резистивной маски. Проявление многослойной композиции проводится обычно в несколько приемов. Верхний слой ПММА проявляется в смеси метилизобутикетона и изопропилового спирта (МИБК:ИПС), для проявления среднего слоя (LOR) используется коммерческий проявитель MF-319 на основе гидроксида тетраметиламмония. Для проявления нижнего слоя используется смесь МИБК: ИПС.

Такие маски хорошо подходят для последующего формирования металлизации методом «взрывной литографии» и применяются для создания *T*-образных затворов.

На рис. 5.32 представлены профиль резистивной маски и T -образный затвор, полученный с ее использованием.

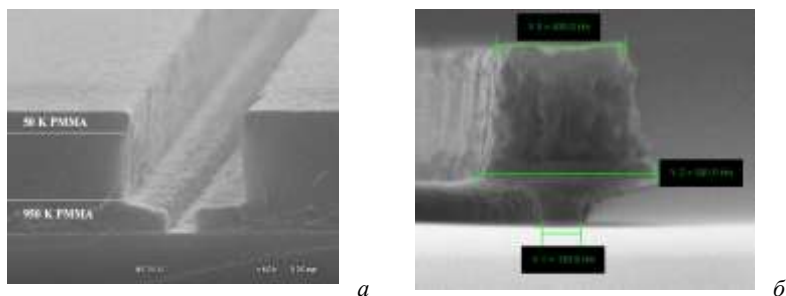


Рис. 5.32. Профиль резистивной маски и затвор, сформированный с помощью «взрывной» литографии в трехслойной резистивной маске

5.7. Ионная литография

Ионные пучки в субмикронной литографии приобретают все большее значение. По сравнению с методами оптической и электронно-лучевой литографии ионно-лучевая литография может обеспечить более высокое разрешение, поскольку ионы обладают большей массой и, следовательно, меньше подвержены явлениям рассеяния. Ионное облучение вызывает значительные химические превращения в резистивных материалах. Суммарные потери энергии на единицу длины свободного пробега для ионов гораздо больше, чем для электронов, поэтому можно ожидать, что чувствительность к ионному облучению, выраженная через количество падающего заряда на единицу площади, будет очень большая. Разрешающая способность также должна быть достаточно высока, так как боковое рассеяние ионного пучка в резистивных пленках гораздо меньше, чем в случае электронов. Малое обратное рассеяние ионов от подложки также способствует повышению разрешающей способности. Моделирование траектории ионов гелия, имплантированных при энергии 60 кэВ в ПММА, показывает расширение ионного пучка на глубине 0,4 мкм порядка 0,1 мкм.

При формировании на поверхности резиста необходимого рисунка с размерами от 0,1 до 1,0 мкм требуется остросфокусированный ионный луч. Для определения минимального диаметра ионного луча на мишени d_m можно воспользоваться соотношением

$$d_m = \left(C_s^{2/3} \cdot \frac{16I_0}{3\pi^2 \cdot B} \right)^{3/8},$$

где B – яркость ионного источника; I_0 – сила тока луча; C_s – коэффициент сферической аберрации фокусирующей системы.

В существующих источниках протонов и ионов гелия яркость невысока $B=10^5-10^6$ А/(см²·ср). При требуемой силе тока ионного луча ($I_0 \approx 10^{-9}-10^{-10}$ А) минимальный размер составляет 3–5 мкм. Значительно лучшие результаты получены для жидкостных источников тяжелых ионов олова и галлия. Для них получена величина яркости $B > 10^{10}$ А/(см²·ср). С помощью таких источников удается сформировать ионный луч, у которого диаметр менее 0,1 мкм.

Ширина экспонируемой области в резисте будет больше минимального диаметра ионного пучка. Выделим основные причины уширения экспонируемой линии. Во-первых, происходит боковое рассеяние при торможении ионов в материале резиста. Во-вторых, при движении ионы пучка выбивают атомы материала резиста, которые, обладая значительной энергией, сталкиваются с молекулами резиста. Этот эффект эквивалентен зарождению кластера радиационных дефектов при движении быстрого иона. Для тяжелых ионов поперечное отклонение ионов на границе подложка – резист зависит только от толщины пленки резиста

$$\Delta y_1 = h \cdot \sqrt{M_2 / 3M_1},$$

где h – толщина резиста; M_1, M_2 – масса иона и атома мишени.

Уширение линии при учете только одного механизма – каскада вторичных соударений – обозначим через Δy_k . Расчеты показывают, что Δy_k также пропорционально толщине резиста. Тогда результирующее уширение экспонируемой линии будет равно

$$\Delta y^2 = \Delta y_1^2 + \Delta y_k^2,$$

$$\Delta y = kh,$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Коэффициент пропорциональности k равен

$$k = \left[M_2 / 3M_1 + \left(8\pi \cdot a^2 \cdot N_0^{2/3} \cdot \frac{Z_1^{2/3} \cdot M_2}{Z_2^{2/3} \cdot M_1} \right)^2 \right]^{1/2},$$

где a – параметр экранирования; N_0 – плотность атомов вещества; Z_1, Z_2 – атомные номера соответственно иона и атома мишени.

Расчеты показывают, что наибольший вклад в уширение пучка дает боковое рассеяние Δu_1 , а вклад Δu_k мал.

5.8. Рентгеновская литография

При рентгенолитографии изображение на полупроводниковую подложку переносится с шаблона, называемого рентгеношаблоном, с помощью мягкого рентгеновского излучения, длина волны которого $\lambda = 0,5 - 2$ нм.

В настоящее время рентгенолитография не нашла широкого применения в серийном производстве полупроводниковых приборов и ИМС из-за сложности технологии и используемого оборудования. Для реализации рентгенолитографии необходимы:

- мощный источник рентгеновского излучения с малой расходимостью пучка;
- рентгеношаблоны, обладающие высокой прочностью, контрастностью и малым температурным коэффициентом линейного расширения;
- рентгенорезисты высокой разрешающей способности и чувствительности.

При экспонировании на специальной рентгеновской установке с вращающейся мишенью (рис. 5.33) вращение мишени обеспечивает

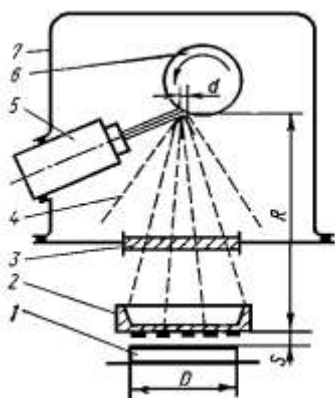


Рис. 5.33. Схема экспонирования на рентгеновской установке с вращающейся мишенью

более эффективное ее охлаждение и позволяет направлять на нее более плотный электронный пучок, что повышает интенсивность рентгеновского излучения и сокращает время экспонирования. Поток электронов из электронной пушки 5 фокусируется на поверхности мишени 6. Рентгеновское излучение 4 выводится через окно 3 вакуумной камеры 7 и проходит через рентгеношаблон 2 на пластину 1, покрытую рентгенорезистом. Экспонирование, таким образом, производится широким расходящимся пучком при неподвижном шаблоне и пластине.

Для предотвращения испарения материала мишени и улучшения усло-

вий теплоотвода вакуумную камеру заполняют гелием ($\sim 1,3$ Па), слабо поглощающим рентгеновское излучение.

Материал и толщина вакуумного окна должны быть подобраны так, чтобы не происходило заметного поглощения рентгеновского излучения. Этому требованию отвечает бериллий толщиной 20–30 мкм и некоторые другие материалы.

В отличие от фотолитографии, где экспонирование производится широкими коллимированными световыми пучками, рентгенолитография не располагает соответствующей «оптикой» и экспонирование на рентгеновских установках приходится выполнять в пучках с большим углом расходимости. При наличии зазора между шаблоном и подложкой это приводит к искажению размеров и смещению элементов рисунка, передаваемого в слой резиста. Максимальное смещение элемента возникает на периферии пластины и равно $\Delta_{\max} = SD/(2R)$. Кроме того, конечные размеры пятна на поверхности мишени из-за низкой степени фокусировки снижают контрастность изображения в слое резиста. Размытость изображения, т.е. ширина зоны полутени по контуру элемента, $\delta = Sd/R$. Удовлетворительные результаты получают при $d \leq 1$ мм, $S \leq 10$ мкм и $R \geq 50$ см.

Плотность потока рентгеновских лучей, падающих на подложку, обратно пропорциональна расстоянию от их источника. Поэтому это расстояние, чтобы уменьшить время экспонирования, с одной стороны, должно быть небольшим, а с другой, для уменьшения размытости изображения из-за расходимости рентгеновского луча, – большим.

6. Ионное легирование полупроводников

6.1. Технология ионного легирования

Ионным легированием (ионной имплантацией) называют процесс внедрения ионов в твердое тело (мишень, подложка) с энергией, достаточной для проникновения в поверхностные слои. Наиболее общим применением ионной имплантации является процесс ионного легирования при изготовлении ИМС. Схема установки показана на рис. 6.1.

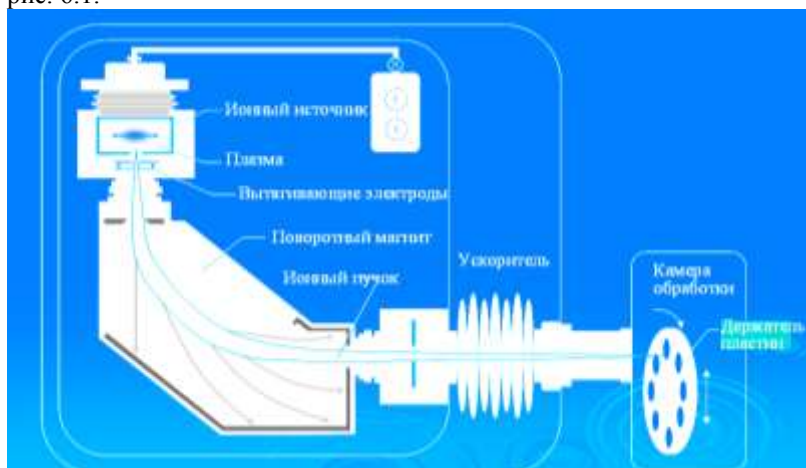


Рис. 6.1. Схема установки ионной имплантации

Состав установки ионной имплантации: ионный источник; экстрактор (вытягивающие электроды); магнитный сепаратор масс (поворотный магнит); ускоряющая система; сканирующая система; камера обработки подложек.

Ионный источник служит для ионизации молекул примеси и формирования ионного пучка. Ионы из ионного источника извлекаются под действием ускоряющего потенциала U . В сепараторе ионы движутся в постоянном магнитном поле. Вектор магнитной индукции направлен перпендикулярно плоскости чертежа. Сила Лоренца искривляет траектории движения ионов по радиусу R :

$$R = \frac{mv}{qB},$$

где m/q – отношение массы иона к его заряду; v – скорость иона; B – величина индукции магнитного поля.

В свою очередь, скорость иона определяется

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}.$$

Таким образом, по радиусу R проходят только ионы примеси определенного сорта (m/q) и с постоянной энергией. Такие ионы облучают мишень (подложку из кремния). Параметры установок ионной имплантации: энергии ионов составляют 50–300 кэВ, а дозы облучения Q – от 10^{13} до 10^{17} ион/см².

Классификация установок (имплантеров) приведена в табл. 6.1.

При определении режимов ионной имплантации основными параметрами являются энергия ускоренных ионов и доза облучения. Ион с зарядом q под действием разности потенциалов U приобретает энергию

$$E_0 = qU.$$

В общем случае заряд иона определяется $q = ne$, где n – кратность ионизации, которая обычно составляет $n=1, 2$ или 3 ; e – заряд электрона.

Таблица 6.1

Классификация имплантеров

Параметр имплантера	Описание
Ток пучка средний	Ток пучка менее 10 мА. Ускоряющее напряжение менее 180 кэВ. Обычно подложка неподвижна, а пучок сканируется (это проще и дешевле)
Ток пучка высокий	Ток пучка 10–25 мА. Высокодозовая имплантация. Ускоряющее напряжение менее 120 кэВ. Подложка сканируется, а пучок неподвижен, так как электрическое поле не полностью проникает в пучок
Ускоряющее напряжение высокое	Ускоряющее напряжение 200–3000 кэВ. Ионы могут проникать в глубокие тренчи, а также через толстый оксид. Возможно формирование глубоких карманов и захороненных слоев
Имплантеры кислорода и водорода	Установки с большим током, используемые для высокодозовой имплантации кислорода или водорода

Для обозначения кратности ионизации применяют знак «+»: $^{31}P^+$, $^{31}P^{++}$, $^{31}P^{+++}$. Цифрой 31 обозначена атомная масса иона фосфора. Иногда для имплантации используют не моноатомные ионы, а молеку-

лярные, например: $^{14}\text{N}_2^+$ – однократно ионизованная молекула азота с атомной массой 14 и молекулярным весом 28 или BF_2^+ – ионизованная трехатомная молекула фторида бора. Молекулярные ионы, внедряясь в кристалл, обычно сразу же распадаются на отдельные атомы. Для подсчета энергии, которой будет обладать каждый атом с массой M_1 , входящий в ускоренный ион с молекулярной массой M_m , используют соотношение

$$E_1 = E_0 \frac{M_1}{M_m}.$$

Доза облучения (D) определяется плотностью ионного тока j и длительностью облучения t : $D = j \cdot t$ [Кл/м²]. Величина D не отражает в явном виде числа примесных ионов, поэтому принято выражать дозу в количестве частиц, внедренных на единицу поверхности:

$$Q = D/q = jt/en \text{ [ион/м}^2\text{]}.$$

6.2. Взаимодействие ионов с твердым телом

При движении ионов в твердом теле (мишени) они теряют свою энергию и изменяют направление движения в результате взаимодействия с кристаллической решеткой. Различают два типа взаимодействий с решеткой – упругие и неупругие столкновения. Упругими (ядерными) столкновениями называются такие, при которых энергия иона передается атомам мишени. Они имеют дискретный характер и сопровождаются значительным рассеянием ионов. Неупругими (электронными) называются столкновения, в которых энергия иона передается электронам. При этом величина переданной энергии относительно мала и торможение иона можно рассматривать как квазинепрерывный процесс. Кроме того, вследствие существенной разницы масс иона и электрона неупругие потери не сопровождаются заметным рассеянием первичных ионов. По этой же причине упругие потери энергии «тяжелых» ионов (масса иона больше массы атома мишени) приводят к сравнительно малым углам рассеяния, и траектория их движения более прямолинейна, чем у легких ионов (масса иона меньше массы атома мишени).

Теряя свою энергию в атомных и электронных столкновениях, ионы замедляются и, наконец, останавливаются внутри мишени, так появляются внедренные ионы. Вследствие того, что число столкновений и энергия, передаваемая при столкновениях, являются переменными величинами, характеризующими случайный процесс, глубина

проникновения ионов не будет одинаковой. Ионы с одинаковой энергией E_0 , массой M_1 и атомным номером Z_1 падают на поверхность подложки и движутся по индивидуальным траекториям, которые показаны для трех ионов на рис. 6.2. Путь, который проходят ионы, называется полным пробегом – R . Ионы после торможения останавливаются в точках, положение которых характеризуется проецированными пробегами R_{p1} , R_{p2} , R_{p3} .

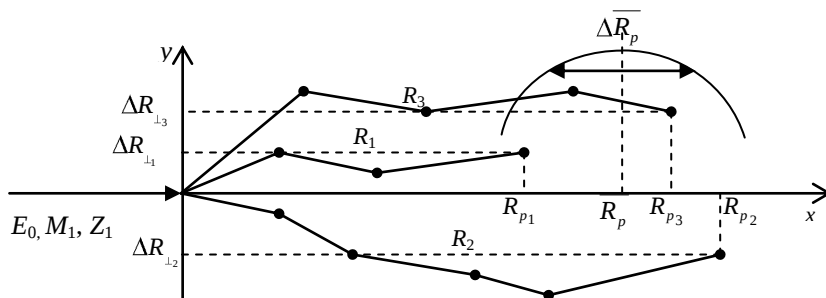


Рис. 6.2. Пробеги ионов в твердом теле

Вследствие случайного характера столкновений пробеги ионов в полупроводниках распределяются по некоторому статистическому закону (закон Гаусса), который характеризуется средним проецированным пробегом $\overline{R_p}$ и среднеквадратичным отклонением $\Delta \overline{R_p}$. На



Рис. 6.3. Траектория ионов бора в кремнии

практике очень важен еще параметр $\Delta R_{\perp}$ – это проекция пробегов на ось y (боковое рассеяние).

Результаты расчетов методом Монте-Карло 128 траекторий ионов бора B^+ (50 кэВ), имплантированных в кремний, представлены на рис. 6.3. Видно, что ионы имеют значительное боковое рассеяние в латеральных направлениях. Это приводит к изменению размеров областей селективной имплантации.

Теория, которая позволяет рассчитать пробеги ионов в твердых телах, была разработана Линдхардом, Шарфом и Шиоттом (ЛШШ). В теорию заложены следующие предположения:

- 1) твердые тела, с которым взаимодействуют ионы, являются однородными, изотропными с неупорядоченным расположением атомов (приближение аморфной мишени);
- 2) упругие и неупругие взаимодействия происходят независимо друг от друга (принцип аддитивности);
- 3) в атомных столкновениях ионы теряют энергию, много меньшую начальной энергии иона, что позволяет применить статистический подход к расчету пробега ионов.

Согласно принципу аддитивности выражение для средней величины потерь энергии одного иона в твердом теле имеет вид

$$\frac{dE}{dx} = \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{я}} + \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{е}} = N_0(S_{\text{я}} + S_{\text{е}}), \quad (6.1)$$

где dE/dx – удельные потери энергии иона на отрезке пути от x до $x+dx$; $S_{\text{я}}, S_{\text{е}}$ – соответственно ядерные и электронные тормозные способности.

$$S_{\text{я}} = \frac{1}{N_0} \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{я}}; \quad S_{\text{е}} = \frac{1}{N_0} \left(\frac{dE}{dx} \right)_{\text{е}}.$$

Физический смысл ядерной $S_{\text{я}}$ и электронной $S_{\text{е}}$ тормозных способностей заключается в том, что они определяют потери энергии иона в ядерных (атомных) и электронных столкновениях соответственно в твердом теле с единичной плотностью атомов при прохождении ионом отрезка пути длиной от x до $x+dx$.

Интегрирование уравнения (6.1) позволяет определить среднюю полную длину пути R иона до полной остановки:

$$\bar{R} = \frac{1}{N_0} \int_0^{E_0} \frac{dE}{S_{\text{я}} + S_{\text{е}}}. \quad (6.2)$$

Из формулы (6.2) следует, что, чем больше потери энергии иона в атомных $S_{\text{я}}$ и электронных $S_{\text{е}}$ столкновениях, тем на меньшую глубину проникает внедренный ион. Справедливо и обратное утверждение. Величины $S_{\text{я}}$ и $S_{\text{е}}$ зависят от энергии иона, атомного номера Z_1 и массы M_1 иона, а также от атомного номера Z_2 и массы M_2 атома мишени. Поэтому вычисления R требуется проводить для каждой комбинации ион–мишень.

ЛШШ упростили эту задачу, введя безразмерные (нормированные) значения энергии ε и пробега ρ :

$$\varepsilon = \frac{aM_2E_0}{Z_1Z_2e^2(M_1+M_2)} = F \cdot E_0, \quad (6.3)$$

где a – параметр экранирования.

Параметр экранирования определяется

$$a = 0,885a_0 \left(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3} \right)^{-1/2}, \quad (6.4)$$

где a_0 – радиус боровской орбиты, равный $0,529 \cdot 10^{-8}$ см.

$$\rho = 4\pi a^2 N_0 R \frac{M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2} = L \cdot R. \quad (6.5)$$

Коэффициенты F и L являются нормированными множителями энергии и пробега соответственно. С учетом этих коэффициентов ядерная и электронная тормозные способности, имеющие уже универсальный характер, примут вид

$$S_{\text{я}}^{\text{H}} = \left(\frac{d\varepsilon}{d\rho} \right)_{\text{я}}; \quad S_{\text{е}}^{\text{H}} = \left(\frac{d\varepsilon}{d\rho} \right)_{\text{е}}.$$

Уравнение (6.1) примет иную форму:

$$\frac{d\varepsilon}{d\rho} = S_{\text{я}}^{\text{H}} + S_{\text{е}}^{\text{H}}. \quad (6.6)$$

Ядерная тормозная способность. В теории ЛШШ получена зависимость нормированной тормозной способности $S_{\text{я}}^{\text{H}}$ от приведенной энергии $\varepsilon^{1/2}$ (рис. 6.4).

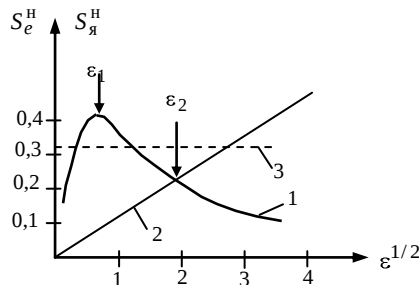


Рис. 6.4. Зависимость тормозных способностей от $\varepsilon^{1/2}$: 1 – ядерная тормозная способность; 2 – электронная тормозная способность; 3 – $S_{\text{я}}^{\text{H}}$

Преимущество введения безразмерных параметров ε и ρ состоит в том, что зависимость $S_{\text{я}}^{\text{H}}$ или $(d\varepsilon/d\rho)_{\text{я}}$ от $\varepsilon^{1/2}$ является универсальной, т.е. применима для любых пар ион–атом. Ядерное торможение при малых энергиях иона возрастает, достигая максимального значения при $\varepsilon_1=0,35$, а затем медленно спадает с ростом энергии, т.к. быстрые частицы имеют меньшее время взаимодействия с центром рассеяния, т.е. поперечное сечение для них уменьшается.

Ядерная тормозная способность $S_{\text{я}}^{\text{H}0}=0,327$ и является своеобразным средним значением для $S_{\text{я}}^{\text{H}}(\varepsilon^{1/2})$ (см. рис. 6.4).

Простая аналитическая аппроксимация найдена Юдиным:

$$\left(\frac{d\varepsilon}{d\rho}\right)_{\text{я}} = A\varepsilon^{1/2}/(B+\varepsilon), \quad (6.7)$$

где $A=0,45$; $B=0,30$.

Переход от нормированной величины ядерной тормозной способности к размерному ее значению осуществляется с помощью соотношения

$$\left(\frac{dE}{dR}\right)_{\text{я}} = \left(\frac{d\varepsilon}{d\rho}\right)_{\text{я}} \frac{E}{\varepsilon} \frac{\rho}{R}. \quad (6.8)$$

Электронная тормозная способность. По теории ЛШШ падающий ион теряет свою энергию как при близких столкновениях с электронами, так и на возбуждение электронного газа в объеме, удаленном от траектории иона. Пока скорость иона меньше скорости электронов, соответствующих энергии Ферми, величина S_e^{H} остается пропорциональной скорости иона или корню квадратному из его энергии

$$S_e^{\text{H}} = k\varepsilon^{1/2}, \quad (6.9)$$

$$\text{где } k = Z_1^{1/6} 0,0793 \frac{Z_1^{1/2} \cdot Z_2^{1/2}}{\left(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3}\right)^{3/4}} \frac{(M_1 + M_2)^{3/2}}{M_1^{3/2} \cdot M_2^{1/2}}.$$

Таким образом, электронное торможение графически можно представить не одной кривой, а семейством прямых, выходящих из начала координат. Наклон прямых к оси $\varepsilon^{1/2}$ определяется множителем k и для ионов, представляющих практический интерес, лежит в диапазоне $k=0,10-0,25$ при $Z_1 > Z_2$, но если ионы легкие и $Z_1 < Z_2$,

то $k > 1$. Если сравнить зависимости S_y^H и S_e^H , то при малых энергиях иона $\varepsilon < \varepsilon_1$ доминируют потери энергии на ядерное торможение, при $\varepsilon \approx \varepsilon_2$ потери энергии на ядерное и электронное столкновения равновалены, а при энергиях $\varepsilon > \varepsilon_2$ доминирует электронное торможение электронов.

Переход от нормированной величины S_e^H к размерному значению осуществляется с помощью соотношения

$$\left(\frac{dE}{dR}\right)_e = \left(\frac{d\varepsilon}{d\rho}\right)_e \frac{E}{\varepsilon} \frac{\rho}{R}. \quad (6.10)$$

Расчеты пробегов в приближении В.В. Юдина выглядят следующим образом:

$$d\rho = \frac{d\varepsilon}{\left(\frac{d\varepsilon}{d\rho}\right)_y + \left(\frac{d\varepsilon}{d\rho}\right)_e}. \quad (6.11)$$

Для ядерных потерь используем приближение (6.7), а для электронных потерь – уравнение (6.9).

Интегрируем уравнение (6.11) и получаем

$$\rho = \frac{2}{k} \varepsilon^{1/2} - \frac{2A}{k^2 \sqrt{A/k + B}} \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon^{1/2}}{\sqrt{A/k + B}}, \quad (6.12)$$

где arctg подставляется в радианах.

Средний полный пробег рассчитывается в соответствии с формулой (6.5): $R = \rho / L$.

Проецированный пробег связан с полным пробегом следующим образом: $\bar{R}_p = R f^{-1}$, где f – корректирующая поправка, обусловленная

ядерными столкновениями $f = 1 + \frac{M_2}{3M_1} \sqrt{\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon}}$, где ε_y – полная энергия, затраченная ионом на упругие столкновения, которую В.В. Юдин аппроксимирует выражением вида

$$\varepsilon_y = \frac{A}{k} \ln \left(1 + \frac{\varepsilon}{\sqrt{A/k + B}} \right).$$

6.3. Распределение внедренной примеси по глубине

В результате торможения ионов в материале мишени они останавливаются на определенных глубинах, изменяя первоначальные свойства вещества. В полупроводниковой технологии ионная имплантация обладает рядом преимуществ по сравнению с термическим диффузионным методом введения примесей. Внедряя ионы III и V групп в монокристалл Si, можно получить p - n - и n - p -переходы в любом месте на любой площади. Сначала на кремниевой пластине формируется защитная маска с помощью фотолитографии, затем осуществляется локальная имплантация примесей в полупроводник (рис. 6.5). В качестве маски чаще всего используются слои SiO_2 с толщиной, большей, чем пробег ионов в SiO_2 .

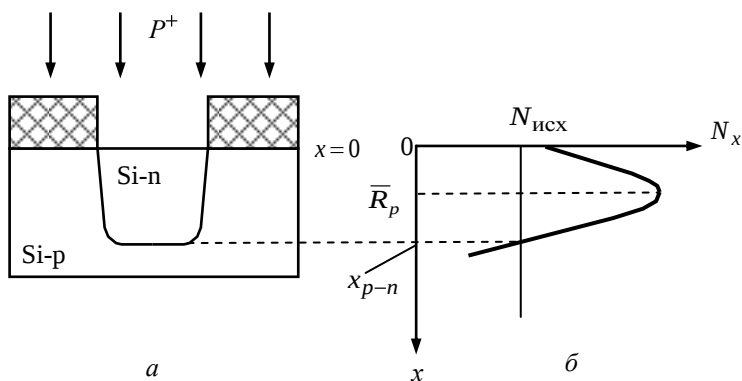


Рис. 6.5. Пример ионной имплантации фосфора в кремний p -типа

Для аморфных мишеней распределение пробегов приблизительно гауссово и поэтому может быть охарактеризовано среднеквадратичным отклонением $\bar{R}_p^2 = \frac{\bar{R}_p^2}{2\pi}$.

Зная величины $\bar{R}_p$ и $\Delta\bar{R}_p$, распределение внедренной примеси по глубине $N(x)$ вычисляется с помощью выражения

$$N(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta\bar{R}_p} \cdot \exp \left[-\frac{(x - \bar{R}_p)^2}{2 \cdot \Delta\bar{R}_p^2} \right], \quad (6.13)$$

где x – расстояние от поверхности вглубь полупроводника в направлении падения ионов. Максимальная концентрация внедренной примеси равна $N_{\max} = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta \bar{R}_p}$ и располагается на глубине $\bar{R}_p$.

Концентрация спадает и уменьшается в 2, 10 и 100 раз по отношению к $N_{\max}$ соответственно на глубинах $x_2 = \bar{R}_p \pm 1,2\Delta \bar{R}_p$; $x_{10} = \bar{R}_p \pm 2\Delta \bar{R}_p$; $x_{100} = \bar{R}_p \pm 3\Delta \bar{R}_p$.

Глубина залегания p - n -перехода определяется из уравнения (6.13) для концентрации $N(x)$, равной исходной концентрации $N_{\text{исх}}$ в той области полупроводника, куда ведется имплантация. Решая это уравнение, получим

$$x_{p-n} = \bar{R}_p \pm \Delta \bar{R}_p \cdot \sqrt{2 \cdot \ln \cdot \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta \bar{R}_p \cdot N_{\text{исх}}}}. \quad (6.14)$$

Боковое рассеяние. Наряду с $\bar{R}_p$ и $\Delta \bar{R}_p$ существует также другая величина, имеющая важное значение для практических применений ионного легирования, – боковое рассеяние $\Delta R_{\perp}$, т.е. рассеяние, которое претерпевают падающие ионы от направления x . Для расчета этой величины при $M_2/M_1 \ll 1$ можно воспользоваться простым выражением

$$\Delta R_{\perp} = \bar{R}_p \cdot \sqrt{\frac{M_2}{3 \cdot M_1}}.$$

Значения бокового рассеяния $\Delta R_{\perp}$ несколько выше, чем $\Delta \bar{R}_p$. Однако они значительно меньше боковой диффузии, которая имеет порядок глубины диффузии, перпендикулярной к поверхности. В том случае, когда имплантацию проводят через прямоугольное окно в маске размером $2a \times 2b$, профиль описывается формулой

$$N(x, y, z) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta \bar{R}_p} \cdot \left(\exp \left[-\frac{x - \bar{R}_p^2}{2 \cdot \Delta \bar{R}_p^2} \right] \right) \times \\ \times \frac{1}{4} \left(\operatorname{erfc} \frac{y-a}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_{\perp}} - \operatorname{erfc} \frac{y+a}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_{\perp}} \right) \times \left(\operatorname{erfc} \frac{z-b}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_{\perp}} - \operatorname{erfc} \frac{z+b}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_{\perp}} \right), \quad (6.15)$$

где символом erfc обозначена функция дополнения интеграла ошибок до единицы. Концентрация легирующей примеси на краю маски па-

дает, и при $a, b \gg \bar{R}_p$ имеем $N = 1/2 N_{\max}$. Если в толстом маскирующем слое (толщина маски $\gg \bar{R}_p + 2\Delta\bar{R}_p$) открыто окно шириной $2a$ по координате y и длиной много больше этой ширины, то профиль имплантированных ионов описывается формулой

$$N(x, y) = \frac{N(x)}{2} \cdot \left[\operatorname{erfc} \frac{y-a}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_{\perp}} - \operatorname{erfc} \frac{y+a}{\sqrt{2} \cdot \Delta R_{\perp}} \right], \quad (6.16)$$

где $N(x)$ – распределение по глубине подложки на большом расстоянии от края маски.

Распределение примеси при ионном легировании в двухслойные мишени. В технологии ионного легирования часто используют имплантацию примеси в полупроводники с предварительно нанесенным на его поверхность маскирующим слоем, например: двуокиси кремния SiO_2 , окиси алюминия Al_2O_3 , нитрида кремния Si_3N_4 , а также тонких напыленных металлических пленок.

При построения профиля в двухслойных структурах исходят из гауссовского распределения пробегов ионов в обеих составляющих мишени. Пусть известны порознь пробеги $\bar{R}_{p1}$ и $\Delta\bar{R}_{p1}$ в маскирующем слое толщиной d_1 и пробеги $\bar{R}_{p2}$ и $\Delta\bar{R}_{p2}$ в полупроводнике. Распределения концентрации примеси в маскирующем слое $N_1(x)$ и в полупроводнике $N_2(x)$ определяются следующими выражениями:

$$N_1(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta\bar{R}_{p1}} \cdot \exp \left[-\frac{(x - \bar{R}_{p1})^2}{2 \cdot \Delta\bar{R}_{p1}^2} \right], \quad 0 \leq x \leq d_1;$$

$$N_2(x) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \Delta\bar{R}_{p2}} \cdot \exp \left[-\frac{(x + (d_1 - \bar{R}_{p1}) \cdot \Delta\bar{R}_{p2} / \Delta\bar{R}_{p1})^2}{2 \cdot \Delta\bar{R}_{p2}^2} \right], \quad x \geq d_1.$$

Распределение примеси с учетом эффекта распыления полупроводника в процессе легирования. При легировании материалов большими дозами наблюдается эффект распыления поверхности мишени ионами, что ведет к изменению профиля распределения имплантированной примеси. Основным параметром, характеризующим процесс распыления, является коэффициент распыления K , т.е. число атомов, выбиваемых одним падающим ионом. Толщина распыленного слоя материала мишени равна

$$h = \frac{Q \cdot K}{N_0}, \text{ м,}$$

где K – коэффициент распыления, ат./ион; Q – доза облучения, ион/м²; N_0 – плотность атомов в мишени, ат/м³.

Профиль легирования с учетом распыления определяется теперь выражением

$$N(x) = \frac{N_0}{2K} \cdot \left(\operatorname{erf} \frac{x - \bar{R}_p + (Q \cdot K / N_0)}{\sqrt{2} \cdot \Delta \bar{R}_p} - \operatorname{erf} \frac{x - \bar{R}_p}{\sqrt{2} \cdot \Delta \bar{R}_p} \right), \quad (6.17)$$

где erf – функция ошибок.

Между нею и дополнительной функцией ошибок erfc существует зависимость

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x).$$

Насыщение профиля легирования происходит при равенстве чисел внедренных ионів и распыленных с поверхности мишени атомов. В этом случае распределение внедряемых ионів по глубине описывается выражением

$$N(x) = \frac{N_0}{2K} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x - \bar{R}_p}{\sqrt{2} \cdot \Delta \bar{R}_p} \right).$$

Максимум концентрации внедренных ионів теперь находится на поверхности мишени ($x=0$). Максимальное значение концентрации определяется выражением

$$N(x) = \frac{N_0}{2K} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{-\bar{R}_p}{\sqrt{2} \cdot \Delta \bar{R}_p} \right).$$

Эта максимальная концентрация не зависит от дозы имплантации Q , а определяется в основном отношением атомной плотности материала N_0 к коэффициенту распыления K .

Эффект каналирования

Рассмотренная теория ЛШШ описывает пробеги ионів в аморфных мишенях. В то же время полупроводники являются монокристаллическими веществами, т.е. имеют упорядоченное расположение атомов, характеризуемое кристаллографическими направлениями и плоскостями (рис. 6.6). Ионы, двигаясь вдоль кристаллографических направлений, например вдоль $\langle 100 \rangle$ в решетке алмаза, проникают глубже в кристалл, чем это следует из теории ЛШШ (эффект каналирования). В этих каналах ионы практически не испытывают атомных

столкновений, и их торможение обусловлено главным образом электронными столкновениями, т.е. пробег иона пропорционален $E_0^{1/2}$.

Линдхард рассмотрел задачу определения критического угла $\varphi_{кр}$, под которым ион может войти в канал и при дальнейшем движении не покинет его. Если угол падения ионного пучка относительно канала будет больше $\varphi_{кр}$, то ионы не будут захватываться в канал, и монокристаллическую мишень можно рассматривать как аморфную.

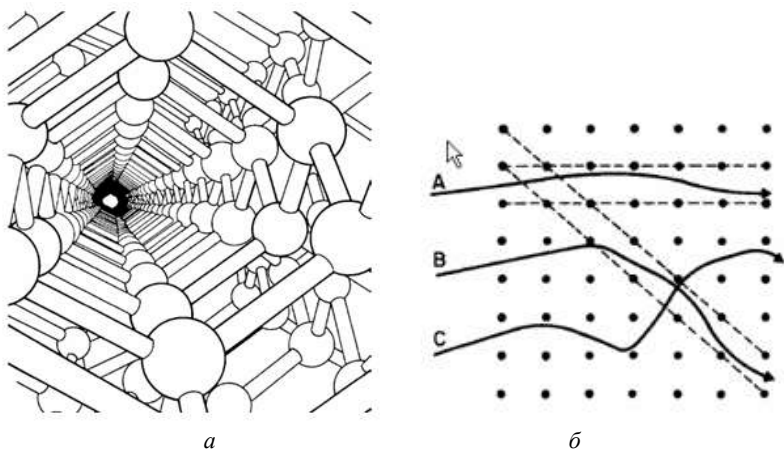


Рис. 6.6. Схема эффекта каналирования: *а* – кристаллическая структура типа алмаза в направлении 110; *б* – различные варианты каналирования

Критический угол Линдхард определяет в зависимости от энергии иона следующим образом:

а) для больших энергий ионов $E_0 > E_{кр}$

$$\varphi_{кр} = \left(\frac{e^2 Z_1 Z_2}{2\pi\epsilon_0 E_0 d_{hkl}} \right)^{1/2}.$$

Критическая энергия определяется выражением

$$E_{кр} = \frac{e^2 Z_1 Z_2 d_{hkl}}{2\pi\epsilon_0 E_0 a},$$

где d_{hkl} – расстояние между атомами в ряде направления с индексами h, k, l ; a – радиус экранирования атома Томаса–Ферми;

б) для энергий ионов, меньших $E_{кр}$, имеем

$$\Phi_{\text{кр}} = \left[\left(\frac{e^2 Z_1 Z_2}{2\pi \epsilon_0 E_0 d_{hkl}} \right)^{1/2} \frac{Ca}{\sqrt{2} d_{hkl}} \right]^{1/2},$$

где $C \approx \sqrt{3}$.

Как видно из формул, критический угол по мере уменьшения энергии ионов E_0 и увеличения атомных номеров иона и атома мишени возрастает и, следовательно, каналирование облегчается. Критический угол каналирования зависит также от кристаллографического направления канала. В табл. 6.2 приведены значения d_{hkl} для алмазной решетки в зависимости от постоянной решетки A для направлений с малыми индексами. Для алмаза $A=3,57 \text{ \AA}$, для кремния – $A=5,43 \text{ \AA}$, для германия – $A=5,66 \text{ \AA}$.

Таблица 6.2

Геометрические размеры линейных каналов

Вид канала	100	110	111	(100)	(110)	(111)
d_{hkl}	A	$A \frac{\sqrt{2}}{2}$	$A \frac{\sqrt{3}}{4} \quad 3A \frac{\sqrt{3}}{4}$	$A\sqrt{2}$	$A\sqrt[4]{2}$	$A\sqrt[4]{3}$

Падающие ионы можно разделить на три группы:

1) группа А – это те частицы, которые входят в канал под углами $\varphi < \varphi_{\text{кр}}$, поэтому они имеют большую вероятность остаться в нем в течение всего процесса замедления;

2) группа В – это те частицы, которые с самого начала движутся в каналах с большой амплитудой осцилляций. Для таких частиц велика вероятность рассеяния с отклонением от первоначального направления, т.е. велика вероятность деканалирования, поэтому они не проникают так глубоко, как частицы группы С;

3) группа С – это те частицы, которые входят в канал под большими углами $\varphi > \varphi_{\text{кр}}$ и не будут отклоняться атомной цепочкой к центру канала, т.е. они не чувствуют кристалличности, и распределение их пробегов будет такое же, как в аморфных материалах.

Для большинства кристаллов большую роль играет эффект деканалирования, поэтому большая часть ионов останавливается в области В.

Степень деканалирования зависит от многих факторов, таких, как температура мишени, поверхностные загрязнения, небольшая разориентировка или расходимость ионного пучка. Даже если вначале имеется совершенный монокристалл, то с увеличением количества

внедренных ионов при их столкновении с атомами мишени образуются дефекты решетки и из-за этих дефектов падающие ионы отклоняются от направления каналирования. Тип распределения будет зависеть от количества внедряемых ионов. Все это затрудняет аналитические расчеты. Экспериментальные данные подтверждают наличие эффекта каналирования.

Из экспериментальных зависимостей следует, что углы много меньше критического заметно видоизменяют профиль. Пробег иона при каналировании втрое больше, чем его проецированный пробег $\bar{R}_p$ в аморфной мишени.

6.4. Радиационные дефекты при ионном легировании

Ион, проникающий в мишень, теряет свою энергию в атомных и электронных столкновениях. Если распределение пробегов и глубина проникновения ионов существенным образом определяются упругими и неупругими столкновениями с атомами и электронами мишени, то только столкновения с атомами сопровождаются передачей атомам мишени энергии. В кристаллической мишени каждый атом решетки имеет определенную энергию связи, поэтому если ион сообщает атому энергию, большую пороговой энергии смещения атома из узла решетки $E_{см}$, то он покинет узел. В результате образуется свободный узел – вакансия и атом в междоузлии, получившие название радиационных дефектов (РД). Этот атом можно рассматривать как вторичную бомбардирующую частицу, которая до полной остановки будет достаточно энергично взаимодействовать с атомами решетки, создавая таким образом новые вторичные дефекты. Следовательно, образование РД – многоступенчатый процесс, в котором ион играет роль первичной частицы, вызывающей нарушение структуры. Следствием этого процесса является то, что вдоль трека иона, который можно представить как ствол дерева, образуются ветви, состоящие из смещенных атомов, созданных вторичными частицами. Все «дерево» занимает ограниченную область в мишени, для качественного описания которой применяется термин «область разупорядочения» (ОР).

Размеры и характер ОР зависят от массы и энергии бомбардирующего иона, от массы атомов мишени и величины переданной им энергии, а также температуры мишени. В общем случае ОР состоят из простых дефектов, а также более сложных дефектов, представляющих собой комплексы простых дефектов. Тип и концентрация дефектов в ОР в основном определяются величиной удельных упругих потерь энергии на единицу длины траектории иона, дозой имплантации

и материалом мишени. Сложные дефекты, например, могут возникать непосредственно при имплантации, если происходит практически одновременно смещение большого числа атомов в малой области кристалла, т.е. при больших упругих потерях энергии иона. Этот процесс характерен для имплантации тяжелых ионов (масса иона больше массы атома мишени). Для легких ионов (масса иона меньше массы атома мишени) доминирующим типом дефектов будут простые. Но и в этом случае при внедрении большого числа ионов за счет перекрытия отдельных ОР концентрация дефектов в них будет возрастать с образованием сложных дефектов. Если доза имплантации превысит некоторую критическую, то образуется аморфный слой. Существует предположение, что вещество переходит в аморфное состояние при достижении определенной критической концентрации дефектов, которая по разным оценкам составляет порядка 20% от полного числа атомов вещества в единице объема.

Для определения числа атомов, смещаемых имплантируемым ионом, воспользуемся теорией Кинчина и Пиза. Кинчин и Пиз ввели понятие характеристической энергии E_c , ниже которой число смещенных атомов примерно равно

$$\bar{N}_{\text{см}} = 0,42 \frac{E_{\text{я}}}{E_{\text{см}}}, \quad (6.18)$$

где $E_{\text{я}}$ – энергия иона, расходуемая в ядерных столкновениях атомов мишени; $E_{\text{см}} = 9,4$ эВ для GaAs и 14,7 эВ для Si.

В.В. Юдин дает следующее выражение для расчета $E_{\text{я}}$:

$$E_{\text{я}} = \frac{A}{kF} \ln \left[1 + \frac{FE_0}{A/k + B} \right].$$

Если энергия иона $E_0 > E_c$, то потери энергии на возбуждение электронов и колебания атомов в решетке преобладают над ядерными потерями. В этом случае общее число смещенных атомов примерно равно

$$\bar{N}_{\text{см}} = \frac{10^{-3}(E_0 - E_c) + 0,5E_c}{E_{\text{см}}}. \quad (6.19)$$

$$\text{Здесь } E_c = \frac{(A - kB)^2}{k^2 F}.$$

Для инженерных расчетов характеристическая энергия E_c может быть определена как энергия, при которой ядерная тормозная способность $S_{\text{я}}$ равна электронной тормозной способности S_e .

Формулы (6.18) и (6.19) определяют число смещенных атомов, создаваемых одним ионом. При не слишком больших дозах Q общее количество дефектов будет равно $\bar{N}_{\text{см}}Q$.

Распределение концентрации дефектов по глубине $N_D(x)$ в первом приближении, также как и распределение концентрации внедренных ионов, описывается нормальным законом

$$N_D(x) = \frac{\bar{N}_{\text{см}}Q}{\sqrt{2\pi\Delta\bar{R}_{pD}}} \exp \left[-\frac{x - \bar{R}_{pD}}{2 \cdot \Delta\bar{R}_{pD}^2} \right]. \quad (6.20)$$

Моменты первого и второго порядка распределения дефектов пропорциональны соответствующим моментам распределения внедренной примеси

$$\begin{aligned} \bar{R}_{pD} &= C_1 \bar{R}_p; \\ \Delta\bar{R}_{pD} &= C_2 \Delta\bar{R}_p, \end{aligned}$$

где коэффициенты C_1 и C_2 зависят от отношения массы иона M_1 к массе атома M_2 мишени (табл. 6.3).

Таблица 6.3

Значения коэффициентов C_1, C_2 в зависимости от M_1/M_2

M_1/M_2	1/10	1/4	1/2	1	2	4	10
C_1	0,82	0,85	0,83	0,80	0,81	0,87	0,93
C_2	2,24	1,58	1,20	0,95	0,88	0,82	0,77

Из приведенных данных видно, что $\bar{R}_{pD} < \bar{R}_p, \bar{R}$, т.е. максимум распределения концентрации дефектов располагается ближе к поверхности по сравнению с максимумом распределения концентрации внедренной примеси. Момент второго порядка распределения дефектов может быть как больше (легкие ионы), так и меньше (тяжелые ионы) величины $\Delta\bar{R}_p$ внедренной примеси.

Интегрирование выражения (6.20) при введении ряда допущений дает концентрацию дефектов в слое внедрения

$$N_D = \frac{N_{\text{см}}Q}{\bar{R}_p}. \quad (6.21)$$

С учетом (5.18), приняв $E_{\text{я}} \approx S_{\text{я}}\bar{R}_p$, выражение (6.21) запишется в виде

$$\bar{N}_D = 0,42 \frac{S_{\text{я}} Q}{E_{\text{см}}}. \quad (6.22)$$

Концентрация дефектов в слое внедрения тем больше, чем больше потери энергии на ядерное торможение и больше доза имплантации.

При некоторой дозе имплантации Q_A концентрация смещенных атомов (дефектов) $\bar{N}_D$ будет соизмерима с плотностью атомов в полупроводнике, т.е. практически все атомы мишени при внедрении ионов смещаются из регулярных положений. Доза, при которой достигается это условие, получила название дозы образования сплошного аморфного слоя (доза аморфизации).

$$Q_A = \frac{N_0 E_{\text{см}}}{S_{\text{я}}}. \quad (6.23)$$

Для того чтобы отжечь вносимые имплантацией радиационные нарушения, необходима последующая термообработка. Кроме того, внедренные ионы после имплантации электрически не активны и для их активации требуется отжиг. Необходимая для этого температура, например для кремния, может достигать до 1000 °С. В процессе отжига (обычно длительность отжига составляет от 10 мин до часа) может происходить термическая диффузия внедренной примеси. Влияние отжига на распределение внедренной примеси описывается уравнением

$$N(x,t) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot (\Delta \bar{R}_p^2 + 2Dt)^{1/2}} \cdot \exp \left[-\frac{x - \bar{R}_p^2}{2 \cdot \Delta \bar{R}_p^2 + 4Dt} \right], \quad (6.24)$$

где D – коэффициент диффузии примеси, соответствующей по значению коэффициенту диффузии при традиционном диффузионном процессе; t – время диффузии.

Коэффициент диффузии рассчитывается по уравнению

$$D = D_0 \exp(-\Delta E/kT), \quad (6.25)$$

где D_0 – постоянная, численно равная коэффициенту диффузии при бесконечно большой температуре; ΔE – энергия активации диффузии; k – постоянная Больцмана; T – температура диффузии.

Отжиг – это операция термообработки, необходимая для активации примеси и восстановления кристаллической решетки.

Используют следующие способы: термический, лазерный, эл./пучок. При термическом отжиге нагревается без разрушения весь образец. Например, Ge нагревается до 300 °С в течение 30–40 мин. При таких режимах решетка вещества успевает восстановиться в ре-

зультате диффузии. Диффузионная длина, т.е. среднее расстояние, которое пройдет частица за время t в результате диффузии, $l_d = \sqrt{Dt}$. При коэффициенте диффузии атомов в кристалле $D = 10^{-12}$ см²/с и времени отжига 30 мин получается $l_d = 4 \cdot 10^{-5}$ см = 0,4 мкм, что соответствует примерно среднему размеру кластера. В этом случае рекристаллизация решетки осуществляется достаточно эффективно.

При лазерном отжиге сфокусированным лучом при длительности импульса (30–100) нс нагреву подвергается только легированная область материала. Механизм лазерного отжига нельзя объяснить только процессами диффузии, т.к. за время $\tau = 100$ нс диффузионная длина при $D = 10^{-11}$ см²/с составляет $3 \cdot 10^{-10}$ см = $3 \cdot 10^{-6}$ мкм. Наиболее приемлемые объяснения заключаются в том, что в зоне воздействия лазерного луча происходит плавление материала. Время пребывания в расплавленном состоянии 10^{-8} – 10^{-7} с. Затем наступает кристаллизация вещества при очень быстром остывании (10^{-8} – 10^9 град/с). Электронно-лучевой метод по своему механизму близок к лазерному.

При низкотемпературном отжиге диффузионными процессами можно пренебречь, например для Si при $T < 1000$ °C. Отжиг образцов, проводимый после имплантации, ведет к восстановлению кристаллической решетки, а также способствует переходу внедренных атомов в узловые положения, где они проявляют донорные или акцепторные свойства. Электрическая активация большинства внедренных примесей начинается при температурах выше 300 °C. Отжиг при 400–500 °C присутствие кластеров и неполное восстановление решетки определяют низкое значение подвижности носителей и сильную температурную зависимость концентрации доноров и акцепторов в слое. После отжига при 500 °C несмотря на распад большей части кластеров и нарушений, в слое еще остаются компенсирующие дефекты и глубокие уровни, что слабо сказывается на величине подвижности, но заметно уменьшает концентрацию носителей заряда.

Если внедрение проведено с большими дозами при таких условиях, что облученная область стала аморфной, то при 500–650 °C происходит резкое возрастание количества носителей заряда. Эта стадия электрической активации примесей совпадает с отжигом аморфизированного слоя и объясняется его эпитаксиальной рекристаллизацией.

Высокотемпературный отжиг сопровождается диффузионной разгонкой примеси и увеличением глубины залегания p - n -переходов. Качество отжига ИЛС характеризует коэффициент использования примеси f :

$$f = \frac{N_{\text{акт}}}{Q},$$

где $N_{\text{акт}}$ – активная примесь; Q – доза легирования.

При имплантации фосфора подвижность носителей заряда восстанавливается практически уже при 600 °С. Для «горячей» имплантации – при 500 °С. Рост дозы $Q > Q_{\text{кр}}$ сопровождается уменьшением коэффициента использования f . С увеличением T_0 f растет и при $T_0 > 900$ °С практически не зависит от условий облучения («горячее», «комнатное»). Однако при такой температуре становится уже заметным расплывание профиля внедренной примеси из-за диффузии.

6.5. Области применения ионного легирования

Основные направления применения ионного легирования в производстве ИМС: введение легирующих примесей, получение различных профилей, синтез материалов и др. Одна из уникальных возможностей метода ионной имплантации состоит в легировании мишени с помощью атомов отдачи, что позволяет создавать сверхтонкие сильнолегированные слои, необходимые для многих типов полупроводниковых приборов СВЧ-диапазона.

Одно из первых практических применений технологии ионной имплантации связано с МДП-транзисторами. Структура МДП-транзистора показана на рис. 6.7.

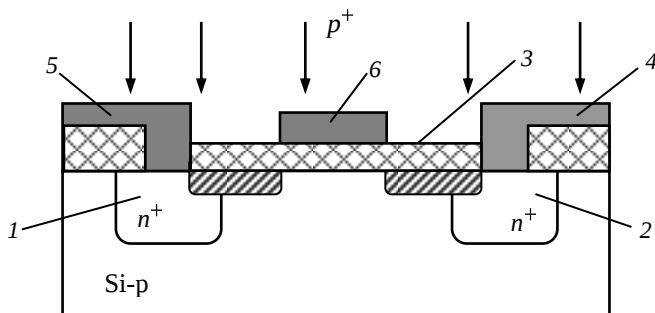


Рис. 6.7. Структура МДП-транзистора: 1, 2 – области истока и стока; 3 – подзатворный диэлектрик; 4, 5 – электроды; 6 – затвор

Техмаршрут изготовления МДП-транзисторов с применением ионной имплантации следующий.

Области истока и стока получены диффузией. После окисления и фотолитографии вскрывают окно для выращивания подзатворного

диэлектрика. Затем проводят фотолитографию и вскрывают окна под контакты к областям истока и стока. Напылив слой алюминия и вы-
полнив фотолитографию, создают электроды стока, истока и затвор.

Следующим этапом является создание самосогласованного затвора путем имплантации фосфора. Затвор играет роль маски, которая обеспечивает его самосовмещение, необходимое для точного примыкания области затвора к контактам истока и стока. В результате самосовмещения снижается паразитная емкость между затвором и стоком, что улучшает характеристики транзистора.

Ионная имплантация на операции самосовмещения осуществляется через тонкий слой подзатворного диэлектрика, например SiO_2 . Поэтому для построения профиля распределения внедренной примеси следует воспользоваться методикой, изложенной в 6.3.

При формировании СБИС на биполярных транзисторах базу и эмиттер формируют с помощью ионной имплантации. Для получения резкого p - n -перехода эмиттер легируют ионами мышьяка, а базу – ионами бора. Коллектор получают или в эпитаксиальном слое или за счет диффузии соответствующей примеси.

В качестве резисторов для СБИС используются легированные слои с высокой однородностью поверхностного сопротивления. Получить поверхностно-однородный слой с малой концентрацией примесей методом диффузии довольно трудно. Речь идет о величине сопротивления выше 200 Ом/□. Если, например, необходимо получить сопротивление 20 кОм в виде слоя с сопротивлением 200 Ом/□, то потребуется площадь кристалла порядка 10^{-2} мм², что гораздо больше, чем площадь, занимаемая диодами и транзисторами. Если же использовать ионное легирование, то можно довольно легко получить высокоомный слой. В результате легирования кремния ионами фосфора P^+ получают резистор в n -слое, а ионами бора B^+ – в p -слое. Легирование производится через пленку SiO_2 толщиной порядка 0,1 мкм. После легирования производится отжиг пластин в атмосфере азота. Изменением дозы облучения и температуры отжига управляют поверхностным сопротивлением резистивного слоя от 10 Ом/□ до 100 кОм/□. Эта технология изготовления резисторов совместима с технологией изготовления биполярных транзисторов. Формирование резисторов часто производят одновременно с формированием базовой области. Конфигурация задается с помощью фотолитографии. На месте удаленного слоя SiO_2 выращивают новый окисел толщиной 0,1 мкм, через который внедряют ионы бора. Далее получают контакты к легированной области. Распределение концентрации примеси в легированной области рассчитывается без отжига по уравнению (6.13), а с отжигом – по уравнению (6.24).

Получение сверхмелких p - n -переходов

Преимущества ионной имплантации проявляются в возможности создания очень мелких p - n -переходов для СБИС. Требования формирования n^+ слоев для СБИС, залегающих на небольшой глубине, можно удовлетворить с помощью процесса ионной имплантации мышьяка. Ионы мышьяка имеют малый проецированный пробег, например, при энергии 50 кэВ он составляет 0,03 мкм. Внедрение тяжелых

ионов приводит к образованию аморфного слоя, так что для получения легированных слоев без заметной диффузии примесных атомов используют низкотемпературный отжиг при температурах ниже 900 °С.

Решение проблемы с имплантацией бора на небольшую глубину облегчается использованием ионизированных молекул фторида бора BF_2 . Диссоциация молекулы BF_2 при первом ядерном столкновении приводит к образованию низкоэнергетических ионов бора

$$E_B = \left(\frac{M_B}{M_{\text{BF}_2}} \right) \cdot E_0 = \left(\frac{11}{49} \right) \cdot E_0.$$

При первичной энергии ионов $E_0 = 50$ кэВ ионы бора будут иметь энергию 11,2 кэВ и соответственно проецированный пробег 0,03 мкм.

Для создания сверхтонких сильнолегированных слоев используют уникальную возможность легирования полупроводника атомами отдачи. На поверхность кремния наносят тонкий слой легирующего материала, например алюминия. Этот слой бомбардируют пучком ионов алюминия или кремния. Толщина слоя алюминия не должна превышать величину $\bar{R}_p + \Delta\bar{R}_p$. Атомы отдачи алюминия (смещенные атомы) перемещаются из пленки в кремний, где образуется слой с максимальной концентрацией атомов у границы Si–Al и спадающий до глубины 0,005–0,1 мкм. При оптимальном подборе толщины пленки, типа и энергии легирующих ионов можно получить выход первичных атомов отдачи до 10 на один внедренный ион. Для получения сильнолегированного слоя с концентрацией $5 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-3}$ и толщиной 10^{-6} см (1 мкм) требуется доза облучения $5 \cdot 10^{21} \cdot 10^{-6} / 10 = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. На практике дозу выбирают несколько больше расчетной.

Низкоэнергетическая имплантация и формирование сверхмелких переходов

Формирование сверхмелких (менее 50 нм) имплантированных слоев является одной из главных и наиболее интересных задач в области ионного легирования Si.

Формирование сверхмелких переходов лимитируется:

– глубиной пробега ионов в полупроводниковом материале (энергией и массой ионов, эффектом каналирования ионов);

– глубиной диффузии примеси при термообработке, необходимой для активации примеси и отжига имплантационных дефектов (кратковременно ускоренной диффузией примеси).

Методы решения задачи:

- Имплантация.
- Уменьшение энергии ионов.
- Увеличение массы ионов (молекулярные ионы, кластерные ионы).
- Предварительная аморфизация приповерхностного слоя, имплантацией нелегирующей примеси (например, Si^+ или Ge^+ для Si).

Предварительная аморфизация выполняется имплантацией ионов Si^+ или Ge^+ , которые не являются мелкими примесями и не изменяют концентрацию носителей заряда. Эффект предварительной аморфизации заключается в уменьшении глубины залегания примеси после имплантации, а также после активационного отжига.

Возможность увеличения массы ионов бора за счет использования борсодержащих ионов видна из дорожной карты, представленной в табл. 6.4. В таблице приведены данные по топологическим нормам (НР), x_{p-n} и энергиям.

Таблица 6.4

Энергия имплантации различного типа борсодержащих ионов (РАI – предварительная имплантация ионов Si или Ge для аморфизации приповерхностного слоя)

Ион	НР 65 нм $x_{p-n} = 15$ нм	НР 45 нм $x_{p-n} = 9,5$ нм	НР 4 нм $x_{p-n} = 5,5$ нм
B_{11}	200 эВ	< 100 эВ	< 50 эВ
$\text{РАI}+\text{B}_{11}$	500 эВ	250 эВ	< 125 эВ
BF_2	880 эВ	200 эВ	< 100 эВ
$\text{РАI}+\text{BF}_2$	2,2 кэВ	1,5 кэВ	< 750 эВ
$\text{B}_{10}\text{H}_{14}$	2–5 кэВ	1–2 кэВ	> 500 эВ
$\text{РАI}+\text{B}_{10}\text{H}_{14}$	5 кэВ	2,5 кэВ	> 1,2 кэВ
$\text{B}_{18}\text{H}_{22}$	>5 кэВ	2–4 кэВ	> 1,5 кэВ

Например, для получения $x_{p-n} = 15$ нм для ионов BF_2 требуется энергия 880 эВ, а с аморфизацией – 2,2 кэВ.

Сравнение имплантации моноионов и кластерных ионов, представлено на рис. 6.8. Кластерные ионы имеют большую общую энергию, большую массу, но меньшую энергию на один ион и, как результат, значительно меньшую глубину имплантации.

Профили распределения бора, полученные при имплантации газовых кластеров B_2H_6 и Ag с энергиями в диапазоне 5–20 кэВ, достигнут уровень концентрации $2 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}$ при уменьшенной дозе имплантации, равной $2 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$.

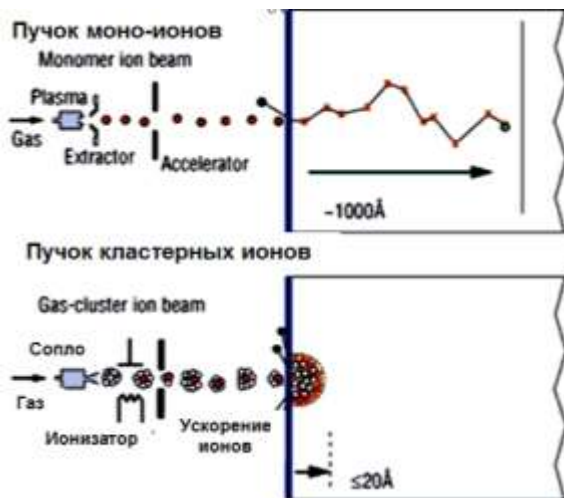


Рис. 6.8. Траектории моно- и кластерных ионов

Наклонная ионная имплантация

При внедрении ускоренных ионов в полубесконечную подложку под углом θ к нормам максимум распределения смещается к поверхности. При этом в значение среднеквадратичного отклонения ΔR вносит вклад как ΔR , так и среднеквадратичное поперечное отклонение $\Delta R_{\perp}$. В результате распределение примеси $N x$ по нормам к поверхности при наклонной имплантации имеет вид:

$$N x = \frac{\theta}{\sqrt{2\pi}\Delta R} \exp\left(-\frac{x - R_p \cos\theta}{2\Delta R^2}\right),$$

где $\Delta R^2 = \Delta R_p^2 \cos^2\theta + \frac{1}{2}\Delta R_{\perp}^2 \sin^2\theta$.

При увеличении угла θ глубина залегания x_{p-n} уменьшается не значительно.

Однако наклонная имплантация представляет большой интерес для легирования сложных профилей, например при изготовлении тренч-конденсаторов. Конструкция тренч-конденсатора показана на рис. 6.9.

Для изготовления конденсатора производится глубокое анизотропное травление канавки (тренч). Наклонная имплантация n^+ примеси позволяет получить сильнолегированный слой кремния по всей поверхности канавки (рис. 6.10).

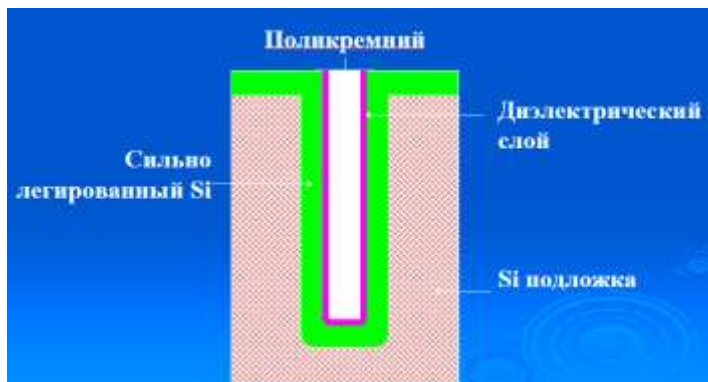


Рис. 6.9. Конструкция тренч-конденсатора

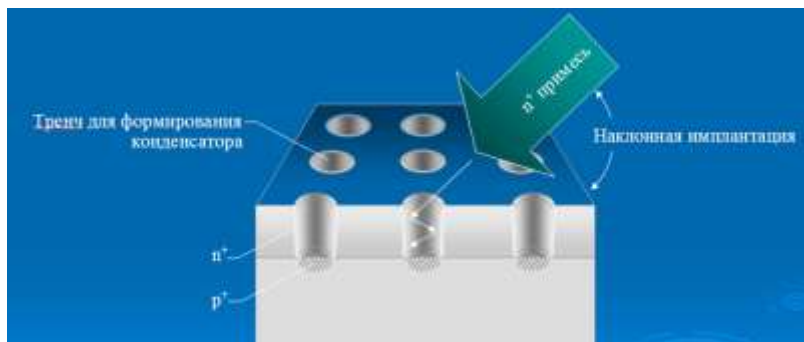


Рис. 6.10. Наклонная имплантация тренч-конденсатора

С целью получения диэлектрического слоя производится термическое окисление кремния до образования SiO_2 . Канавка заполняется слоем поликремния, который является второй обкладкой конденсатора. Тренч-конденсаторы используются в ИС оперативной памяти для хранения информации в виде заряда конденсатора.

Плазменно-иммерсионная ионная имплантация (ПИИИ)

Традиционные методы ионной имплантации становятся малопродуктивными в диапазоне энергий ионов ниже 5 кэВ, что связано с неизбежным падением тока пучка, формируемого ионной оптикой. Использование оксидных и резистивных масок для дополнительного торможения высокоэнергетических ионов при ультрамелком легировании поверхностных областей кремния существенно усложняет технологию.

Применение известных подходов к формированию мелких сильнолегированных областей не предпочтительно из-за ряда причин.

В частности, источник, нанесенный в виде тонкой пленки на поверхность кремния, не обеспечивает нужной воспроизводимости параметров прибора. Лазерное легирование в принципе позволяет получать суб-50 нм, *p-n*-переходы без генерации дефектов, однако из-за малости лазерного пятна этот метод не удовлетворяет требованиям производительности. Применение традиционных имплантеров позволяет обеспечить набор необходимой дозы (-10^{15} см^{-2}) и приемлемо низкое сопротивление мелкого *p-n*-перехода, однако традиционные имплантеры очень дороги и не обеспечивают желаемой низкой стоимости обработки пластин. В промышленном имплантере Eaton GSD снижение энергии от 10 до 2 кВ для имплантации В вызывает снижение ионного тока с 5 до 1 мА. С увеличением диаметра пластин (до 300 мм, например) производительность традиционных имплантеров становится неудовлетворительной из-за малости площади сечения пучка.

Альтернативным способом ультрамелкого легирования, позволяющим разрешить эту проблему, является метод широкоапертурной плазменно-иммерсионной ионной имплантации (ПИИИ). В отличие от традиционных имплантеров, иммерсионный режим дает сокращение времени набора дозы в десятки раз с возможностью прецизионной регулировки энергии ионов в суб-1 кэВ диапазоне. В то же время отсутствие сепарации ионов по массам предъявляет повышенные требования к разработке конкретных процессов имплантации.

Применения ПИИИ:

- Получение сверхмелких ионно-легированных слоев.
- Ионное легирование стенок и для тренчей для создания конденсаторов в ИС оперативной памяти.
- Синтез структур кремний на диэлектрике: Simox и Smart Cut технологии.

Эти так называемые плазменные иммерсионные ионные имплантеры (ПИ³) универсальны и предназначены для имплантации в пластины диаметром 200–300 мм с равномерностью 98–99%, могут быть рассчитаны на большие токи (например, 1 мА/см^2), высокие скорости набора дозы и широкий диапазон энергий ионов 100 эВ – 100 кэВ. ПИ³ могут быть включены в состав кластерных установок, что существенно отличает их от традиционных имплантеров – «установок-монстров». Физический принцип, заложенный в ПИ³, иллюстрируется на рис. 6.11.

Подложкодержатель с пластиной погружен в равномерную плазму. Так как подложка обычно содержит диэлектрические слои, для смещения подложек используется импульсный источник напряжения. Когда импульс напряжения поступает на подложку, ионы, ускоренные в ОПЗ, внедряются в подложку. Их энергия определяется падением в ОПЗ.

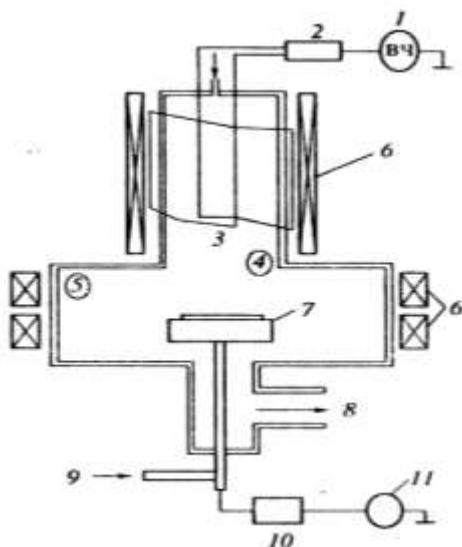


Рис. 6.11. Геликонный источник плотной плазмы: 1 – генератор ВЧ-мощности; 2 – согласующая цепь; 3 – антенна; 4 – зона источника плазмы; 5 – зона реактора; 6 – соленоиды; 7 – подложкодержатель; 8 – откачка; 9 – ввод для охлаждающих газов; 10 – согласующая цепь; 11 – генератор ВЧ-мощности для смещения подложки

При амплитуде импульса 100 кВ ширина ОПЗ достигает 10 см. Обычно ПИ³ работают при низких давлениях 10^{-2} – 10^{-1} Па, чтобы уменьшить число столкновений между ускоренными ионами и нейтральными частицами в ОПЗ. Плазма окружает мишень сложной формы и в случае, если длина Дебая для плазмы меньше характерного размера неоднородности на мишени, то все поверхности 3D-мишени подвергаются имплантации (рис. 6.12). Характерная длина Дебая – это доли миллиметра – сантиметры.



Рис. 6.12. Распределение потенциала в области пространственного заряда

Нейтрализация наведенного в течение действия импульса положительного заряда электронами плазмы достигается при длительно-

сти импульса порядка 1 мкс и частоте их повторения порядка 1 кГц. Нейтрализация положительного заряда важна для исключения возможности создания встроенных зарядов в тонком подзатворном диэлектрике МДП-транзистора. ПИ³ имеют уникальные преимущества перед традиционными имплантерами, так как способны обеспечивать высокую скорость набора дозы при очень низких энергиях вплоть до 100 эВ. Высокая плотность тока, достижимая в ПИ³, позволяет значительно быстрее, чем с традиционными имплантерами, формировать так называемые структуры КНИ (кремний-на-изоляторе).

Имплантация супермелкозалегающих p - n -переходов

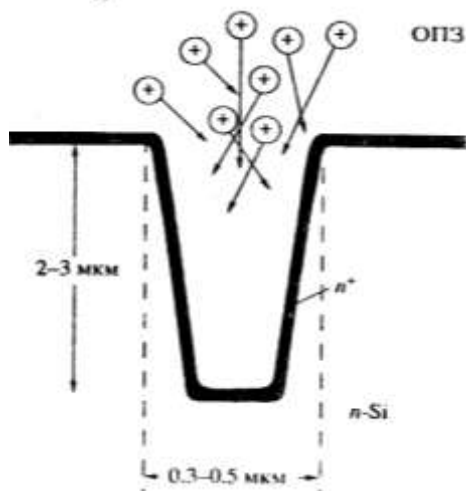
В глубокой субмикронной технологии КМОП УБИС малым размерам в плоскости кристалла должны соответствовать супермелкие p - n -переходы стоков и истоков. Так, для минимального топологического размера 0,1 мкм глубина залегания p - n -переходов стока и истока должна быть меньше 0,05 мкм (суб-50 нм p - n -переходы), формирование которых становится трудной проблемой из-за необходимости удовлетворить жестким требованиям к токам утечки, сопротивлению и их воспроизводимости. Другая часть проблемы – радиационные повреждения подложки и тонкого подзатворного диэлектрика, которые могут частично сохраняться и после быстрого отжига дефектов. Остаточные радиационные повреждения кремния стимулируют и без того высокую диффузионную способность атомов В в Si при формировании суб-50 нм p^+ -областей. Суб-50 нм p - n -переходы могут быть сформированы применением ПИ³ в два этапа: 1) плазмы SiF₄ (SiF_{x=1,2,3}, Si, F) для формирования аморфизованного слоя вблизи поверхности Si и 2) имплантация В из плазмы BF₃ (BF₃, BF, В, F). Оба этапа реализуются в одном и том же ПИ³. Этап аморфизации исключает возможность каналирования атомов В и замедляет диффузию атомов В в течение последующего быстрого отжига для активации примеси. При имплантации с ускоряющим напряжением 1 кВ из плазмы BF₃ и с последующим двухстадийным отжигом (800 °С, 5 с и 1050 °С, 10 с) реализованы легированные бором p^+ - n -переходы с глубиной залегания 40 нм.

Конформное легирование в глубоких «тренчах»

В современных УБИС ДОЗУ размер элемента памяти, содержащего МДП-транзистор и конденсатор, достигается малым благодаря тому, что конденсатор формируется в глубоком «тренче», который реализуется анизотропным плазмохимическим травлением с последующим окислением и заполнением, например сильнолегированным поликремнием. Чтобы обеспечить хороший оптический контакт к «внешней» обкладке конденсатора, стенки тренча должны быть сильнолегированными с высокой комфортностью. Применение для этих целей традиционного имплантера требует длительной имплантации с

изменением *in situ* угла наклона вращающейся пластины. Правильный выбор давления и ускоряющего напряжения в ПИ³ позволяет обеспечить необходимое угловое распределение ионов и успешно реализовать комфортное легирование стенок и дна «тrenchа» с аспектным отношением порядка 10, например с размерами, показанными на рис. 6.13.

Рис. 6.13. Конформное легирование глубоких trenchей: оптимальный выбор рабочего давления в ПИ³ позволяет оптимизировать распределение ионов по углам таким образом, что стенки trenchа легируются в равной степени с дном «trenchа» и поверхностью пластины



Синтез «скрытых» (подповерхностных) слоев диэлектриков и других материалов

Методом имплантации возможно формирование:

- «скрытых» слоев диэлектриков, например SiO_2 , для формирования КНИ-структур;
- «скрытых» слоев силицидов с металлической проводимостью, например слоев CoSi_2 для транзисторов с металлической базой;
- «скрытых» слоев GeSi в Si для гетеропереходных биполярных транзисторов с GeSi – базой.

Одной из наиболее продвинутых технологий является технология формирования методом имплантации кислорода КНИ-структур типа «кремний – двуокись кремния – кремний». В этой технологии необходимо обеспечить высокие дозы кислорода, превышающие 10^{17} см^{-2} , и высокие температуры при последующем отжиге для обеспечения твердофазной реакции образования слоя SiO_2 (SIMOX).

Применение ПИ³ для формирования КНИ-структур позволило сократить время набора дозы (на два порядка величины по сравнению с применением традиционных имплантеров) и существенно снизить стоимость технологии. При этом ускоряющие напряжения превышали 80 кВ, давление избиралось ниже 10^{-1} Па, время имплантации для

набора дозы $3 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$ – меньше 3 мин для ПИ³ в Беркли. В зависимости от соотношения ионов O_2^+ и O^+ в потоке на подложку получались слои различного качества: островковые или сплошные слои SiO_2 (для соотношения $I_{\text{O}_2^+}/I_{\text{O}^+} \approx 9/1$), или двойные скрытые слои $\text{Si-SiO}_2\text{-Si-SiO}_2\text{-Si}$ (для $I_{\text{O}_2^+}/I_{\text{O}^+} \approx 1:2$). Сплошные слои реализованы при ускоряющем напряжении 60 кВ и температуре отжига 1270 °С.

SIMOX (Separation by Implantation of Oxygen – разделение (слоёв) с помощью имплантации кислорода) – это метод создания КНИ-структуры, в котором захороненный слой SiO_2 формируется с помощью высокодозовой имплантации ионов кислорода в кремний (рис. 6.14, а), и последующего высокотемпературного отжига имплантированной структуры, приводящего к диффузии кислорода в область с максимальной концентрацией кислорода и дефектов ($\approx R_p$) и формированию сплошного слоя диэлектрика (рис. 6.14, б). При этом верхний отсечённый слой Si остаётся практически свободным от кислорода и радиационных дефектов, а его толщина задаётся энергией ионов кислорода.

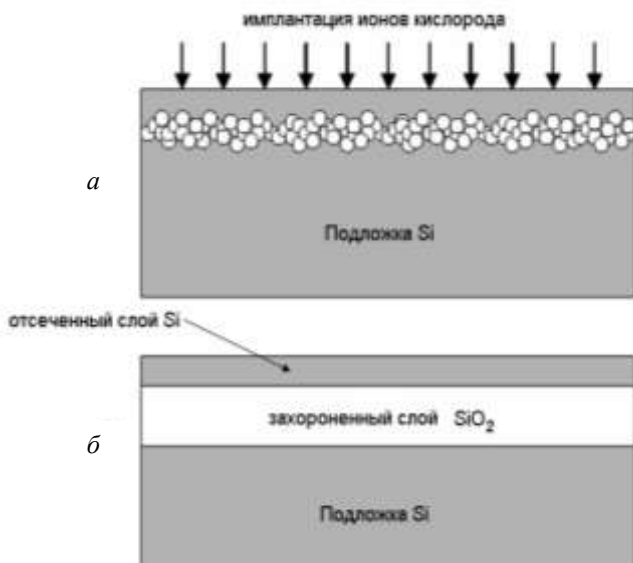


Рис. 6.14. Схематическое изображение поперечного сечения КНИ-структуры, получаемой методом SIMOX: после имплантации ионов кислорода (доза имплантации более $4 \times 10^{17} \text{ см}^{-2}$, энергия ионов более 100 кэВ) (а) и после высокотемпературного отжига имплантированной пластины ($T \leq 1405 \text{ °C}$, длительность – десятки минут) (б)

В методе Smart Cut™ процесс расщепления пластины происходит по слою микропузырьков водорода.

Процесс формирования слоя микропузырьков водорода, с помощью которого и происходит отделение тонкого приповерхностного слоя Si от всей остальной пластины, показан на рис. 6.15. Сначала в пластину имплантируются ионы водорода с заданной дозой (более $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$) и энергией (десятки кэВ). Затем в процессе нагрева происходит диффузия атомов водорода в область с максимальной концентрацией радиационных дефектов, где они собираются в пузырьки молекулярного водорода. Пузырьки растут в размере и постепенно образуют сплошной слой. При достижении определённой температуры (времени отжига) давление в пузырьках превышает критическое значение и происходит расщепление пластины на две части.

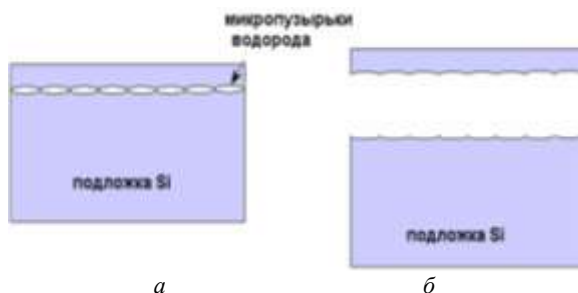


Рис. 6.15. Расщепление пластины методом Smart Cut™: формирование слоя микропузырьков водорода (а), отделение тонкого приповерхностного слоя Si от всей остальной пластины (б)

Доза имплантации выбирается минимально достаточной для формирования слоя микропузырьков и расщепления пластины. Превышение этого минимального значения дозы вредно, так как может привести к росту концентрации имплантационных дефектов в отсечённом слое. Глубина, на которой образуется слой микропузырьков, определяется положением максимумов распределений концентрации дефектов и водорода по толщине кремния. Следовательно, выбором энергии ионов можно задавать толщину отсечённого слоя Si. Такой способ задания толщины отсечённого слоя, в отличие от классического бондинга, позволяет более воспроизводимо получать сверхтонкие слои Si.

Технология Smart Cut™ успешно применяется не только для формирования КНИ-структур, но и для создания слоёв SiGe, GaAs, SiC, Ge, GaN на различного рода твёрдых и даже мягких изолирующих подложках.

В современном методе Smart Cut для легирования водородом используется плазменная иммерсионная имплантация.

В Институте физики полупроводников СО РАН методом водородного отслаивания и переноса пленки кремния на окисленную подложку Dele-Cut были получены подложки толщиной отсеченного слоя кремния 630 нм, толщиной скрытого диэлектрика 250–450 нм. Отсеченный слой КНИ-структур легировался бором либо фосфором до концентраций $1 \cdot 10^{16}$ – $2 \cdot 10^{19}$ см⁻³ и утончался путем многократного окисления при температурах 900–1000 °С до толщины 100–400 и 8–40 нм. Возможность получения практически любых комбинаций толщин слоя кремния и скрытого оксида – одно из достоинств метода Dele-Cut.

7. Быстрый термический отжиг

7.1. История развития импульсного отжига

Импульсный наносекундный лазерный отжиг, протекающий с образованием жидкой фазы в приповерхностном слое полупроводниковой структуры, был открыт группой советских учёных под руководством И.Б. Хайбулина и стал интенсивно исследоваться начиная с 1974 г. Интенсивные исследования по импульсному отжигу полупроводников показали, что данный метод имеет ряд уникальных достоинств перед традиционным длительным печным отжигом. Был также установлен и ряд недостатков импульсного отжига, основным из которых являются высокий градиент температур и, как следствие, большие механические напряжения и высокое содержание дефектов в полупроводниковой пластине.

Выход из сложившейся ситуации был найден в начале восьмидесятых годов, когда специалистами фирмы Sony было предложено удлинить длительность термообработки вплоть до единиц – десятков секунд и проводить изотермический отжиг в твердой фазе при небольших длительностях термообработки, при которых не происходит существенного диффузионного перераспределения легирующих примесей. Начиная с этого времени быстрые термические обработки полупроводниковых структур прошли большой путь от идеи и лабораторных исследований до широкого промышленного применения.

В настоящее время отжиг с характерной длительностью в единицы секунд, вследствие большого диффузионного перераспределения имплантированной примеси, уже не обеспечивает получение сверхмелких ИЛС (толщина слоя 10–20 нм). В связи с этим активно развиваются и внедряются в производство отжиги с длительностью в диапазоне от долей секунд до микросекунд. При этом отжиг имплантированного слоя по-прежнему происходит в твёрдой фазе. Как весьма недалёкая перспектива рассматривается возможность возврата к импульсному лазерному отжигу в наносекундном диапазоне длительностей с плавлением сверхтонкого приповерхностного слоя кремния.

7.2. Методы и оборудование быстрого термического отжига

Перечень термических процессов, используемых в технологическом маршруте изготовления ИС, достаточно широк, среди наиболее важных из них необходимо отметить отжиг ионно-легированных слоёв (ИЛС), формирование плёнок силицидов металлов, отжиг омических контактов и металлизации, формирование плёнок термического оксида кремния, нитрида и оксинитрида кремния.

Ещё совсем недавно большинство термических операций выполнялось в печи, которая представляла собой кварцевую трубу, вокруг которой был расположен нагреватель, а кассета с пластинами вдвигалась в зону нагрева и после выдержки в течение нескольких минут – десятков минут извлекалась наружу. В связи с уменьшением топологической нормы применение печного отжига стало невозможным, так как при длительных высокотемпературных обработках происходит сильное перераспределение легирующей примеси.

Быстрый термический отжиг (БТО) – это процесс поштучной термообработки полупроводниковых пластин, протекающий в диапазоне длительностей отжига от единиц до десятков секунд, при этом максимальная температура отжига задаётся в диапазоне от 300 до 1400 °С, а скорость нагрева – в пределах от 50 до 300 град/с. Характерной особенностью БТО является использование для нагрева мощного источника некогерентного электромагнитного излучения – обычно галогеновых ламп накаливания.

Известны две основные конструкции реактора установок быстрого отжига. В первом варианте конструкции используются длинные цилиндрические галогеновые лампы, расположенные рядами с обеих сторон полупроводниковой пластины таким образом, чтобы обеспечивать максимальную однородность нагрева (рис. 7.1).

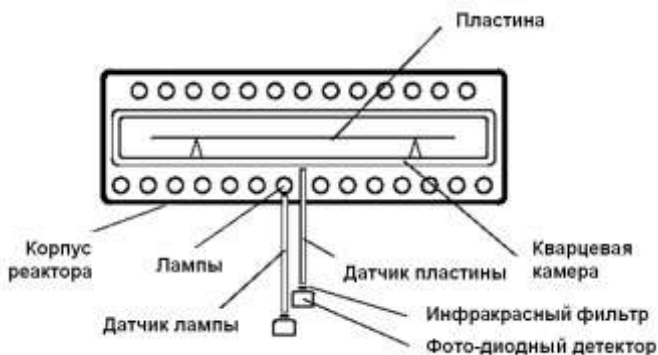


Рис. 7.1. Система БТО: лампы накаливания с горизонтальным расположением нитей

Во втором случае лампы имеют меньшую длину и установлены вертикально с одной стороны от пластины (рис. 7.2). При этом лампы разбиты на группы, электропитание которых осуществляется от отдельных источников, а контроль температуры реализуется в нескольких зонах. Это позволяет более эффективно, чем в первом случае, управлять распределением температуры по площади пластины, доби-

ваясь высокой однородности термообработки. В связи с этим в настоящее время установки второго типа нашли более широкое применение, чем установки первого типа.

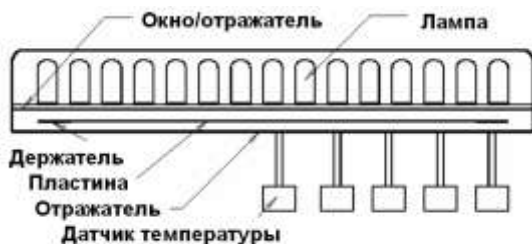


Рис. 7.2. Система БТО: лампы накаливания с вертикальным расположением нитей

БТО проводится либо в атмосфере сверхчистых инертных газов, либо в вакууме. Поэтому реактор, в котором производится отжиг, выполняется герметично, а установка БТО имеет сложную газовую систему. Держатель пластины в реакторе выполнен таким образом, чтобы минимизировать теплоотвод и обеспечить однородный нагрев пластины. Для роста пропускной способности установка обычно оборудуется автоматом загрузки и выгрузки пластин из кассеты в кассету.

Основными параметрами процесса БТО являются:

- время отжига (t , с)
- время нагрева до максимальной температуры (t_1 , с);
- скорость нагрева до максимальной температуры (dT/dt , $^{\circ}\text{C}/\text{с}$);
- время выдержки при максимальной температуре (τ , с);
- максимальная температура (T_{max} , $^{\circ}\text{C}$);
- скорость охлаждения (dT/dt , $^{\circ}\text{C}/\text{с}$);
- однородность распределения температуры по поверхности пластины;
- плотность мощности падающего излучения (W , $\text{Вт}/\text{см}^{-2}$).

Для быстрого отжига используются два режима нагрева пластины. Первый режим характеризуется постоянной величиной плотности мощности падающего излучения W в течение всего времени отжига и простотой с точки зрения его реализации. Полагая, что вся подводимая к пластине энергия излучения расходуется на нагрев и тепловое излучение пластины, время t_1 , необходимое для достижения образцом температуры T_{max} , определяется из соотношения

$$t_1 = \rho C_p \delta \{ \ln[(T_{\text{max}} + T)(T_{\text{max}} - T_0)] - \ln[(T_{\text{max}} - T)(T_{\text{max}} + T_0)] + 2[\arctg(T/T_{\text{max}}) \arctg(T_0/T_{\text{max}})] \} / 8\varepsilon\sigma (T_{\text{max}})^3, \quad (7.1)$$

где T_0 и $T_{\max} = [(W + 2\varepsilon\sigma T_0^4)/2\varepsilon\sigma]^{1/4}$ – начальная и установившаяся температуры соответственно; C_p и ρ – удельная теплоемкость и плотность кремния; δ и ε – толщина и излучательная способность нагреваемой пластины; σ – постоянная Стефана – Больцмана; W – плотность мощности излучения. На рис. 7.3 представлены типичные кривые нагрева полупроводниковой пластины, рассчитанные по формуле (7.1). Видно, что значение $T_{\max}$ определяется только величиной плотности мощности падающего излучения. В результате величина t_1 и скорость нагрева до максимальной температуры изменяются при вариации величины $T_{\max}$, что не всегда удобно с технологической точки зрения.

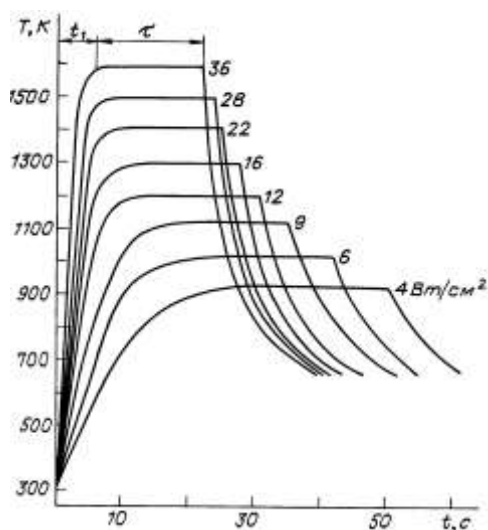


Рис. 7.3. Зависимости температуры пластины от времени нагрева для различных значений мощности падающего излучения

Второй режим нагрева более сложен при его аппаратной реализации, однако даёт большие технологические возможности, что обусловило его широкое применение. Метод характеризуется тем, что независимо задаётся как скорость нагрева до максимальной температуры, так и сама максимальная температура. В этом случае управление величиной W в каждый момент времени осуществляется компьютером по сигналу обратной связи с системы термопар или пирометра.

Охлаждение пластин происходит самопроизвольно при выключении источника нагрева за счёт излучения и передачи тепла рабочему газу. Последний механизм охлаждения позволяет в некоторых

пределах регулировать её скорость за счёт правильного выбора типа охлаждающего газа (теплопроводности газа), а также изменения скорости продувки газа через реактор.

Типичный процесс отжига протекает полностью в автоматическом режиме и выглядит следующим образом. Пластина из загрузочной кассеты с помощью робота-загрузчика перемещается в шлюзовую камеру, из которой откачивается или вытесняется инертным газом воздух. Затем пластина передаётся в реактор, где располагается на специальном держателе. Реактор продувается газом, после чего выставляется рабочий расход процессного газа и производится нагрев пластины по предварительно выбранной программе. После этого пластина в течение некоторого времени охлаждается в реакторе, а затем через шлюзовую камеру передаётся в приёмную кассету, а процесс полностью повторяется со следующей пластиной.

7.3. Быстрый отжиг ионно-легированных слоёв

Термообработка ионно-легированных слоёв производится с целью отжига имплантационных дефектов и активации имплантированной примеси.

Полное устранение дефектов структуры в имплантированном слое – это одно из наиболее важных требований к процессу отжига. С другой стороны, необходима реализация такого режима термообработки, который бы обеспечил наибольшую активацию примеси при минимальном ее перераспределении. С помощью БТО можно добиться одновременного выполнения всех этих требований, что выгодно отличает БТО от традиционного печного отжига.

Наиболее важными параметрами ИЛС, характеризующими качество выполнения отжига, являются:

- слоевое сопротивление (ρ , Ом / $\square$);
- однородность распределения ρ по поверхности пластины;
- степень активации примеси, т.е. отношение слевой концентрации активной примеси ($n_{\text{акт}}$, см⁻²) к её полной слевой концентрации (n , см⁻²);
- подвижность носителей заряда (μ , см² В⁻¹ с⁻¹);
- толщина легированного слоя (x , нм);
- глубина диффузионного перераспределения примеси (Δx , нм);
- концентрация и местоположение точечных и структурных дефектов.

Рассмотрим подробнее явления, происходящие при отжиге ИЛС кремния.

Отжиг имплантационных дефектов. Главной движущей силой перестройки структуры в имплантированных слоях при термообработке является стремление системы к термодинамическому равновесию путем последовательного перехода в состояния с более низкой свободной энергией.

С точки зрения имплантации и последующего отжига различают ИЛС, которые после имплантации имеют разупорядоченный приповерхностный слой (слой с высокой концентрацией точечных дефектов) и ИЛС с аморфным приповерхностным слоем. Разупорядоченный слой характерен для случая имплантации лёгких ионов или малых доз легирования. Аморфный слой возникает в случае имплантации тяжёлых ионов (As^+ , Sb^+) в больших дозах. Отжиг этих двух типов ИЛС протекает по различным механизмам и характеризуется различными типами дефектов, остающимися в слое после отжига. В случае разупорядоченных слоев устранение дефектов структуры в процессе отжига представляет большие трудности, чем устранение сплошных аморфных слоев.

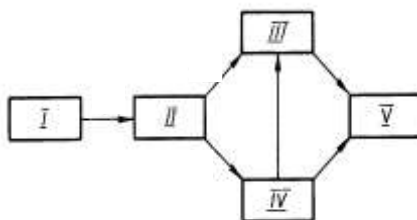
Существуют два типичных спектра дефектов, остающихся в ИЛС после отжига. Первый соответствует дефектам только дислокационной природы. Второй включает в себя более сильные неоднородности (микродвойники, преципитаты, включения), так называемые «большие нерегулярности структуры». Зарождение дислокаций происходит в кристаллическом материале, а образование больших нерегулярностей структуры происходит при кристаллизации аморфизованных слоев на границе раздела кристалл – аморфный слой или в аморфной фазе.

Аннигиляция первичных дефектов при отжиге разупорядоченных слоев кремния протекает посредством объёмной рекомбинации радиационных дефектов и их аннигиляции на поверхности. В результате отжига формируется широкий спектр вторичных структурно-морфологических дефектов. При этом состав дислокационного ансамбля зависит от многих факторов, включающих энергию, дозу имплантации и условия отжига. Обычно выделяют три различающихся своей морфологией типа дефектов. Это дислокационные петли, стержнеобразные дефекты, упорядоченные и неупорядоченные дислокационные сетки. Схема развития дислокационной структуры в разупорядоченных кристаллических слоях Si представлена на рис. 7.4. Образования сеток не происходит в ситуации, когда концентрация дислокационных петель и стержнеобразных дефектов является низкой или процессы сокращения дефектов при высокотемпературном отжиге доминируют над процессами их роста. Пик концентрации зародившихся вторичных дефектов наблюдается в области максимума рас-

пределения радиационных повреждений или на глубинах, соответствующих среднему проецированному пробегу внедряемой примеси. Качественно оба эффекта объясняются просто. В области пика повреждений генерируется максимальное количество точечных дефектов и их комплексов, что означает наличие наиболее благоприятных условий для образования стабильных зародышей дислокаций и их последующего роста. Если на процессы зарождения и развития скоплений активно влияет внедренная примесь, то локализация вторичных дефектов отражает ее распределение.

Рис. 7.4. Общая схема развития дислокационной структуры в имплантированном Si;

I – точечные дефекты,
II – скопления точечных дефектов, III – дислокационные петли, IV – стержнеобразные дефекты, V – дислокационные сетки



Аморфизованные ионной имплантацией слои кремния претерпевают заметную кристаллизацию в твердой фазе при температуре более 450 °С. Наличие монокристаллической подложки означает возможность реализации двух механизмов кристаллизации: 1) эпитаксиального роста на границе раздела слоя с подложкой; 2) зарождения и развития беспорядочно ориентированных кристаллов внутри аморфного слоя. Реализация того или иного механизма определяется в конечном итоге режимом отжига, типом и концентрацией внедренной примеси и др. Практическое значение имеет отжиг в режиме эпитаксиального роста.

Кристаллизация на (100) ориентированных Si подложках осуществляется путем движения межфазной границы аморфный слой – кристалл к поверхности с постоянной скоростью $V_{кр}$. На межфазной границе происходит аннигиляция большинства имплантационных дефектов, а зависимость $V_{кр}$ от температуры подчиняется простому экспоненциальному закону

$$V_{кр} = V_0 \exp(-E_{кр}/kT_s), \quad (7.2)$$

где V_0 – предэкспоненциальный множитель; $E_{кр}$ – энергия активации кристаллизации; k – постоянная Больцмана; T_s – температура кристаллизации. Аналогичная зависимость наблюдается и для ориентации (011) и в начальный период кристаллизации на (111) подложках. Величина энергии активации процесса не зависит от ориентации и составляет величину $E_{кр} \cong 2,7$ эВ. В то же время скорость эпитаксиальной кристаллизации демонстрирует сильную зависимость от ори-

ентации подложки. В частности, $V_{кр}$ для (100) приблизительно в 25 раз превышает $V_{кр}$ для (111) ориентированных слоев. Скорость твердофазной кристаллизации сильно зависит от концентрации и типа имплантированной примеси. Общим свойством элементов III и V групп является способность увеличивать $V_{кр}$, если их концентрация не превышает 1 ат. %. Малорастворимые элементы других групп обладают свойством значительно замедлять эпитаксиальную кристаллизацию. Фронт кристаллизации обычно является планарным и имеет небольшие выпуклости высотой примерно 0,5–1 нм. Эти осцилляции отражают геометрическую форму поверхности раздела кристалл – аморфный слой после имплантации.

Интересным представляется вопрос локализации дислокаций после отжига аморфных ИЛС. В этом случае зарождение вторичных дефектов происходит в узких по сравнению с размером поврежденной области зонах: на границе раздела кристалл – аморфный слой, а также в слоях, где концентрация атомов легирующей примеси превышает предел ее равновесной растворимости в кремнии. При значительных примесных пересыщениях наряду с дислокационными петлями в этих слоях наблюдаются примесные преципитаты.

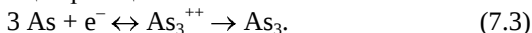
Активация и деактивация имплантированной примеси. Во время БТО аморфных слоев кремния твердофазная кристаллизация происходит очень быстро и заканчивается еще на стадии нагрева до максимальной температуры. При этом считается, что после прохождения фронта кристаллизации вся примесь электрически активна и находится в замещающем положении (т.е. в узлах кристаллической решетки кремния). При достаточно больших дозах имплантации концентрация электрически активных атомов примеси может значительно превысить равновесный предел её электрической активации для данной температуры. Однако при продолжающемся нагреве или увеличении времени отжига происходит деактивация примеси. Снижение концентрации электрически активных атомов происходит вплоть до достижения ею значения, соответствующего равновесному пределу электрической активации. При этом конечное значение концентрации электрически активных атомов определяется только температурой отжига. В связи с этим правильный выбор температуры и длительности отжига во многом определяет конечные электрические параметры ИЛС.

При отжиге разупорядоченных слоёв активация примеси происходит посредством её диффузионных скачков по кристаллу до момента попадания в свободный узел решетки. Активация примеси тесно связана с кинетикой отжига точечных дефектов, которые во многом контролируют скорость диффузионного перемещения примеси. Реализация активации примеси по данному механизму приводит к тому,

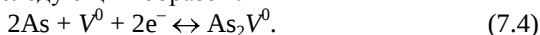
что процесс отжига разупорядоченных ИЛС обычно требует большего времени, чем отжиг аморфных ИЛС.

Деактивация примеси происходит при повышенной температуре посредством образования электрически неактивных комплексов примесь–дефект, преципитацией примеси или смещением её из точного замещающего положения в узле кристаллической решётки кремния.

Существует достаточно много моделей неактивного комплекса примесь–дефект. Трехатомный комплекс As, превращающийся в нейтральный дефект при комнатной температуре, может образовываться в соответствии со следующей реакцией:



Реакция образования двухатомного комплекса As с нейтральной вакансией V^0 выглядит следующим образом:



Аналогичные процессы кластерообразования существуют и для других легирующих примесей: P, Sb и B.

Процесс деактивации легирующей примеси обратим. Так если вслед за низкотемпературной обработкой, приводящей к деактивации примеси, провести отжиг с более высокой температурой, то наблюдается реактивация примеси.

Диффузия имплантированной примеси. Традиционно диффузия примеси в полупроводниках описывается посредством взаимодействия её с точечными дефектами (вакансиями V и собственными междоузельными атомами I , находящимися в различных зарядовых состояниях) в виде пар дефект–примесь. Рассматривая диффузию атомов примеси в ИЛС, необходимо учитывать влияние на нее большого количества факторов. Остановимся на некоторых из них.

Известно, что примеси III и V групп образуют в кремнии растворы замещения и диффундируют быстрее атомов кремния. Так как все эти примеси обладают высокой электрической активностью, то при достаточно высоких концентрациях они сдвигают положение уровня Ферми в кремнии и, следовательно, изменяют равновесную концентрацию точечных дефектов каждого из заряженных состояний. Поэтому наличие примесных атомов в кремнии при концентрациях, превышающих собственную концентрацию носителей, n_i , при температуре диффузии, приводит к увеличению коэффициента диффузии. Кроме того, если концентрация примеси превышает несколько единиц на 10^{20} см^{-3} , то модель пар дефект–примесь становится несправедливой, поскольку в этом случае, например Е-центр в процессе его диффузии, уже нельзя рассматривать как изолированный объект. При таких концентрациях образуется «бесконечный» перколяционный кластер примесных атомов, находящихся в положении пятого ближайшего соседа по всей решетке кремния, поэтому в процессе диф-

фузии Е-центра вакансии может взаимодействовать с чужой примесью. Вследствие этого возрастает эффективная концентрация вакансий и их подвижность, вызывая, в свою очередь, увеличение коэффициента диффузии. Данное явление принято называть концентрационно-ускоренной диффузией.

Как уже отмечалось выше, при высоких концентрациях примеси возможны ее преципитация и кластерообразование. Существование в ИЛС электрически неактивных и неподвижных кластеров оказывает сильное влияние на диффузию примеси. Так, замедление диффузии в области больших концентраций приводит к образованию характерных перегибов на профилях распределения концентрации примеси по глубине. Поэтому в моделях диффузии учитывается кинетика образования и распада примесных кластеров.

Кроме того, при рассмотрении диффузии приходится учитывать и некоторые другие факторы, как-то: наличие или отсутствие аморфизации, температуру имплантации, условия отжига и др. Многие из этих факторов действуют одновременно, и выделить долю воздействия каждого из них бывает достаточно трудно.

Известно, что сурьма диффундирует в кремнии преимущественно по вакансиям. В диффузии фосфора и бора, наоборот, преобладает влияние междоузлий. Мышьяк занимает промежуточное положение. Корректный подход требует включения в рассмотрение диффузию примеси посредством ее взаимодействия со всеми типами точечных дефектов. Тогда в общем виде коэффициент диффузии $D^S(n)$ будет зависеть от членов, учитывающих наличие в кремнии нейтральных, одно- и двухзаряженных собственных междоузлий и вакансий (I^+ , I^0 , I^- , V^+ , V^0 , V^- , V^-):

$$D^S(n) = (D_{I0}^S + D_{V0}^S) + \\ + \{D_{I+}^S [{}^{eq}C_{I+}(n) / {}^{eq}C_{I+}(n_i)] + D_{V+}^S [{}^{eq}C_{V+}(n) / {}^{eq}C_{V+}(n_i)]\} + \\ + \{D_{I-}^S [{}^{eq}C_{I-}(n) / {}^{eq}C_{I-}(n_i)] + D_{V-}^S [{}^{eq}C_{V-}(n) / {}^{eq}C_{V-}(n_i)]\} + \\ + \{D_{I=}^S [{}^{eq}C_{I=}(n) / {}^{eq}C_{I=}(n_i)] + D_{V=}^S [{}^{eq}C_{V=}(n) / {}^{eq}C_{V=}(n_i)]\}, \quad (7.5)$$

где D_{I0}^S , D_{V0}^S , D_{I+}^S , D_{V+}^S , D_{I-}^S , D_{V-}^S , $D_{I=}^S$, $D_{V=}^S$ – коэффициенты диффузии примеси, соответствующие определенным типам дефектов; ${}^{eq}C_{I+}$, ${}^{eq}C_{V+}$, ${}^{eq}C_{I-}$, ${}^{eq}C_{V-}$, ${}^{eq}C_{I=}$, ${}^{eq}C_{V=}$ – термически равновесные концентрации точечных дефектов в различных зарядовых состояниях r в условиях примесной n и собственной n_i проводимости. Учитывая, что

$${}^{eq}C_{Ir}(n) / {}^{eq}C_{Ir}(n_i) = (n / n_i)^{-r}, \\ {}^{eq}C_{Vr}(n) / {}^{eq}C_{Vr}(n_i) = (n / n_i)^{-r}, \quad (7.6)$$

уравнение (7.5) упрощается до следующего вида:

$$D^S(n) = (D_{I0}^S + D_{V0}^S) + (D_{I+}^S + D_{V+}^S) (n / n_i) + \\ + (D_{I-}^S + D_{V-}^S) (n / n_i) + (D_{I=}^S + D_{V=}^S) (n / n_i)^2. \quad (7.7)$$

При этом включение в систему диффузионных уравнений членов, описывающих кинетику поведения точечных дефектов (их гене-

рацию и аннигиляцию), кинетику формирования и распада кластеров атомов примеси, позволяет описывать диффузию примеси в различных условиях: при наличии неравновесной концентрации точечных дефектов, ответственных за «аномальную» диффузию примеси в случае аморфного приповерхностного слоя; в случае разупорядоченного приповерхностного слоя, а также при отсутствии неравновесной концентрации дефектов в слое.

Явление кратковременно ускоренной диффузии примеси.

Явление кратковременно ускоренной диффузии было обнаружено в начале 80-х годов. Оно заключается в том, что в первые моменты БТО ИЛС скорость диффузии легирующей примеси намного больше, чем это должно быть при данной температуре и концентрации примеси. С течением времени коэффициент диффузии уменьшается вплоть до стандартных значений. Понимание механизма этого явления, а также поиск путей минимизации его влияния очень важны с точки зрения формирования сверхмелких ИЛС.

Протекание явления кратковременно ускоренной диффузии зависит от многих факторов, определяющих параметры процесса имплантации (температура имплантации, наличие или отсутствие аморфизации приповерхностного слоя, локализация аморфного слоя, сорт, доза, энергия внедряемых ионов), а также температуры и времени отжига, скорости нагрева до максимальной температуры и многого другого.

В общем случае описание явления кратковременно ускоренной диффузии примеси выглядит следующим образом. В результате процесса имплантации в приповерхностном слое образуется большое количество точечных дефектов (разупорядоченный слой). Наличие неравновесной концентрации точечных дефектов, в частности собственных междоузельных атомов и их кластеров, является ответственным за реализацию механизма кратковременно ускоренной диффузии примеси в ИЛС. Кратковременное увеличение коэффициента диффузии атомов P, As, Sb и В связано с высвобождением собственных междоузельных атомов при нагреве, образованием пар дефект–примесь и ускоренной их диффузией. Ускоренная диффузия продолжается до тех пор, пока концентрация собственных междоузельных атомов не достигнет равновесного значения за счет аннигиляции дефектов на стоках. Такими стоками служат поверхность кристалла, дислокации и объемная рекомбинация. После окончания ускоренного этапа диффузия продолжается с коэффициентом, определяемым только температурой отжига и концентрацией примеси.

Для аморфных слоёв кремния, имплантированных ионами P^+ , As^+ , Sb^+ , также наблюдается явление ускоренной диффузии. В этом случае при прохождении фронта твердофазной кристаллизации про-

исходит захват собственных междоузельных атомов, которые остаются в кристаллизованном слое и при дальнейшем нагреве высвобождаются, что и приводит к ускорению диффузии. Конечный эффект кратковременно ускоренной диффузии заключается либо в ускоренной преципитации примеси, либо быстром перераспределении примеси в ИЛС. Это перераспределение примеси может происходить как по направлению к поверхности кремния, так и вглубь него.

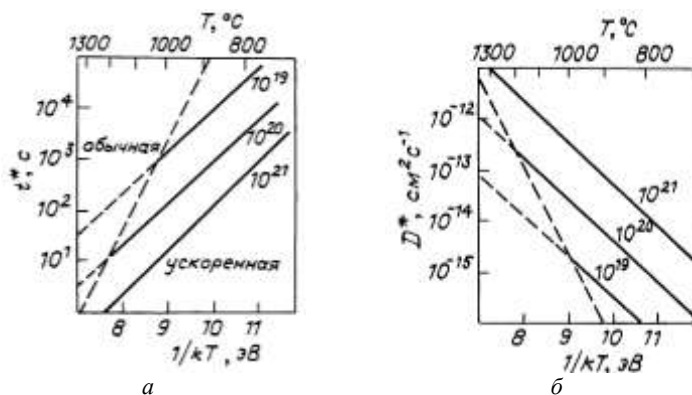


Рис. 7.5. Зависимость длительности (а) и коэффициента (б) кратковременно ускоренной диффузии от температуры отжига и концентрации легирующей примеси

На рис. 7.5 представлены зависимости коэффициента диффузии и времени существования ускоренной диффузии от температуры отжига. Видно, что с ростом температуры увеличивается коэффициент диффузии и уменьшается ее длительность.

7.4. Быстрые термические обработки при формировании плёнок силицидов металлов, а также плёнок термического оксида кремния или оксинитрида кремния

БТО активно используются не только для отжига ИЛС, но и для выполнения ряда других операций. Хорошая воспроизводимость результата термообработки, высокая управляемость процесса, а также возможность его выполнения в активной газовой среде (кислород, азот, аммиак) послужили дополнительными аргументами «за» БТО. Рассмотрим два характерных современных применений быстрого отжига.

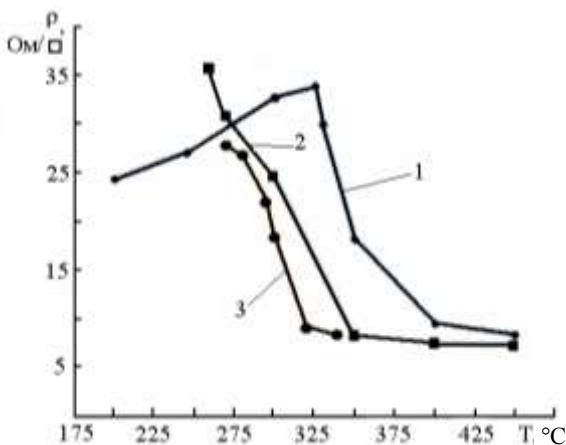
Задача по формированию сверхтонких (1,2–5 нм) плёнок подзатворного диэлектрика (SO_2 или SiON) возникла в связи с быстрым масштабированием размеров транзистора. Получение таких тонких плёнок при термическом окислении кремния в печи практически не-

возможно вследствие большой длительности и инерционности процесса. Сокращение времени окисления с помощью быстрого нагрева позволяет получать, а главное более точно контролировать и воспроизводить толщину сверхтонких плёнок. Процесс формирования плёнки диоксида кремния проводится аналогично процессу отжига ИЛС, но в реакторе, наполненном кислородом. Проводя дополнительную нитридацию сформированной плёнки SiO_2 в атмосфере азота или аммиака, можно получить плёнку SiON , применение которой позволяет существенно уменьшить токи утечки и повысить безотказность работы транзистора. В процессе термообработки атомы азота проникают в плёнку SiO_2 , образуя оксинитрид. Характерная температура нитридтации лежит в диапазоне 900–1100 °С.

Задача по формированию NiSi омических контактов к стоковым и истоковым областям возникла также в связи с быстрым уменьшением размеров транзисторов. Силицид никеля, по сравнению с силицидом кобальта, позволяет получить пониженное слоевое и контактное сопротивление, уменьшить глубину проникновения контакта вглубь кремния, а также снизить температуру силицидообразования вплоть до 400–450 °С. Формирование NiSi производится в течение термообработки плёнки Ni толщиной ≈ 10 нм, осаждённой на чистую поверхность кремния. При нагреве происходит диффузия и химическое взаимодействие исходных элементов (Si и Ni) с образованием NiSi , при этом расходуется часть кремния, а контакт проникает вглубь кристалла. На рис. 7.6 приведены зависимости слоевого сопротивления плёнки NiSi в зависимости от температуры отжига при его различной длительности. Видно, что с уменьшением длительности отжига для достижения минимального сопротивления требуется всё большая температура.

Рис. 7.6. Зависимость слоевого сопротивления плёнки NiSi от температуры отжига:

1 – длительность выдержки при максимальной температуре 0 с;
2 – 30 с; 3 – 60 с;
толщина исходной плёнки Ni 10 нм, кап-сулирующая плёнка из TiN



7.5. Новые методы импульсного отжига

В зависимости от вида профиля распределения температуры по глубине нагреваемой пластины различают три характерных режима отжига: адиабатический, режим теплового потока и изотермический режим. Профиль распределения температуры по глубине пластины устанавливается из теплового баланса между энергией, вложенной в пластину из внешнего источника, и потерями энергии на излучение, теплопроводность и конвекцию. Толщина слоя, в котором происходит поглощение мощности, вкладываемой в пластину, зависит от длины волны электромагнитного излучения, материала полупроводниковой пластины и материала плёнок, нанесённых на поверхность структуры. Излучение ультрафиолетового диапазона длин волн поглощается в очень тонких слоях (единицы – десятки нанометров). Поглощение инфракрасного излучения происходит в более толстых слоях кремния.

Адиабатический режим характеризуется чрезвычайно малой длительностью импульса излучения (наносекунды – микросекунды). Нагрев приповерхностного слоя, в котором происходит поглощение энергии излучения, происходит быстрее, чем распространение тепла вглубь пластины. В результате нагревается только тонкий приповерхностный слой, весь остальной объём пластины остаётся холодным (рис. 7.7, *а*).

Режим теплового потока характеризуется более длинным импульсом излучения (миллисекунды). Скорость нагрева приповерхностного слоя и скорость распространения тепла имеют сравнимые значения. В результате нагреваются более глубокие слои материала, однако распределение температуры по глубине пластины остаётся неоднородным с максимумом на поверхности (рис. 7.7, *б*).

Длительность излучения при изотермическом режиме превышает одну секунду. Нагрев приповерхностного слоя, в котором поглощается энергия, происходит медленнее, чем распространение тепла вглубь пластины. Как результат, вся толщина пластины прогревается однородно (рис. 7.7, *в*). БТО всегда производится в изотермическом режиме и характеризуется минимальными механическими напряжениями, вызванными температурными градиентами.

Основное направление развития импульсных методов отжига – это уменьшение «теплового бюджета» (thermal budget), т.е. интегральной величины, одновременно учитывающей температуру и длительность отжига. При этом отсчёт температуры начинается с величины, при которой скорость стимулированных теплом процессов становится отличной от нуля (рис. 7.8). Минимизация «теплового бюджета» позволяет уменьшить перераспределение примеси при отжиге

ИЛС, а также минимизировать развитие других нежелательных процессов в Si структуре, стимулируемых нагревом.

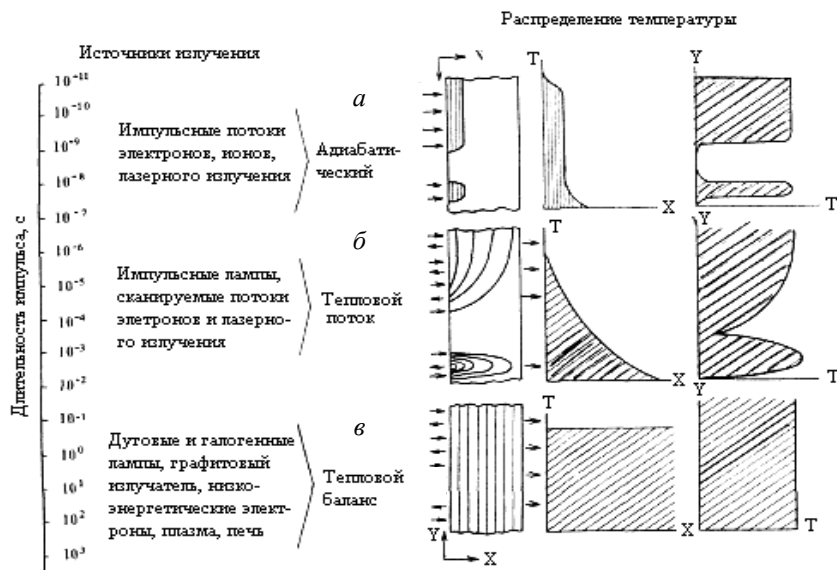


Рис. 7.7. Режимы импульсной термообработки полупроводниковых структур и распределения температуры в пластине по двум осям при неоднородном вдоль оси Y источнике тепла

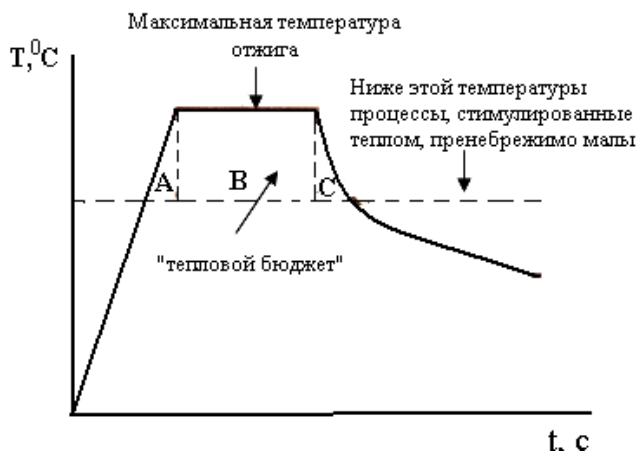


Рис. 7.8. Зависимость температуры Si пластины от времени отжига, демонстрирующая понятие «теплового бюджета»

С точки зрения минимизации «теплового бюджета» необходимо снижать максимальную температуру отжига и время выдержки при максимальной температуре, а также увеличивать скорость нагрева и скорость охлаждения. Новые разрабатываемые сегодня методы отжига как раз и направлены на удовлетворение этих требований. Рассмотрим некоторые из них.

1. Отжиг в пиковом режиме (spike annealing) близок к классическому БТО, однако время выдержки при максимальной температуре τ равно нулю. Кривая нагрева пластины в случае пикового приведена на рис. 7.9, *а*, отжиг обычно протекает в изотермическом режиме.

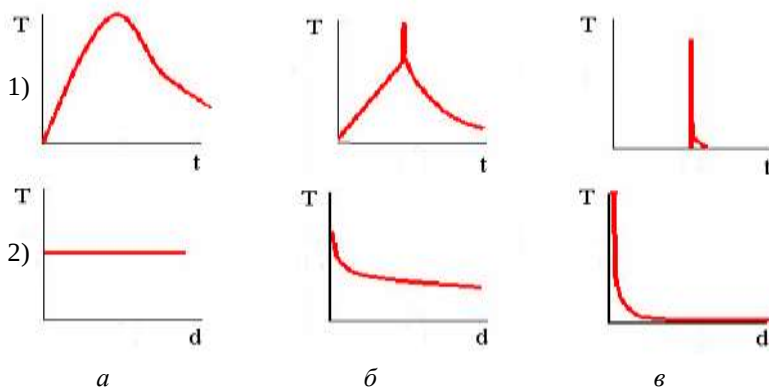


Рис. 7.9. Температурно-временные зависимости (1) и распределение температуры по глубине пластины Si (2) для различных методов импульсного отжига; *а* – пиковый отжиг; *б* – отжиг вспышкой; *в* – лазерный отжиг

2. Отжиг вспышкой (flash annealing) выполняется посредством предварительного нагрева пластины до некоторой фоновой температуры (максимум до 600 °C), например, с помощью галогеновых или дуговых ламп, и затем производится быстрый нагрев до нужной температуры с помощью импульсной дуговой лампы, при этом длительность вспышки лампы составляет миллисекунды. Кривая нагрева пластины в случае отжига вспышкой приведена на рис. 7.9, *б*. Отжиг на стадии предварительного нагрева протекает в изотермическом режиме, а на стадии вспышки – в режиме теплового потока. Предварительный нагрев позволяет уменьшить температурные градиенты и минимизировать мощность лампы-вспышки.

3. Лазерный отжиг (laser thermal processing) производится импульсом лазерного излучения с длительностью в диапазоне от нано-

секунд до микросекунд (см. рис. 7.9, в). Термообработка протекает в адиабатическом режиме через плавление тонкого приповерхностного слоя кремния с последующей жидкофазной кристаллизацией расплава. Кристаллизация начинается на границе раздела расплав – твердое тело, а фронт кристаллизации движется по направлению к поверхности. Для того чтобы реализовать данный режим нагрева, необходимо обеспечить выполнение несколько условий, к которым следует отнести малую длительность импульса (наносекунды – микросекунды), достаточную плотность энергии в импульсе ($0,5\text{--}2 \text{ Дж/см}^2$), небольшую глубину поглощения излучения в нагреваемом материале ($1\text{--}10 \text{ нм}$). Выполнение последнего требования возможно только при использовании коротковолнового ультрафиолетового излучения. Размер луча в плоскости пластины обычно равен размеру кристалла ИС и за один импульс производится отжиг одного чипа. На рис. 7.10 представлены изображения поперечных сечений образцов Si после имплантации, приведшей к аморфизации приповерхностного слоя, и после лазерного отжига. Видно, что отжиг позволяет получить полностью бездефектный слой кремния.

К достоинствам лазерного отжига можно отнести:

- возможность получения ультрамелких переходов, так как в случае жидкофазной кристаллизации толщина легированного слоя определяется толщиной расплава и, следовательно, длиной волны и энергией излучения;
- возможность получения концентрации активной примеси выше предела равновесной электрической растворимости и, как следствие, получения ИЛС с низким слоевым сопротивлением;
- возможность получения слоёв с низким содержанием остаточных имплантационных дефектов, так как в процессе плавления они все исчезают.

Среди недостатков метода отметим следующие:

- высокие механические напряжения между нагретыми и более холодными участками пластины, что характерно как для латеральных направлений, так и для вертикального направления;
- возможность захвата дефектов на границе между расплавом и твердым телом и появления остаточных дефектов в ИЛС.

В настоящее время лазерный отжиг рассматривается как весьма перспективный с точки зрения получения сверхмелких ИЛС с низким удельным сопротивлением.

4. Лазерный отжиг в условиях, когда не происходит плавления приповерхностного слоя и отжиг протекает в твердой фазе (laser thermal annealing), также производится лучом лазера, но луч при этом непрерывно сканируется по поверхности пластины.

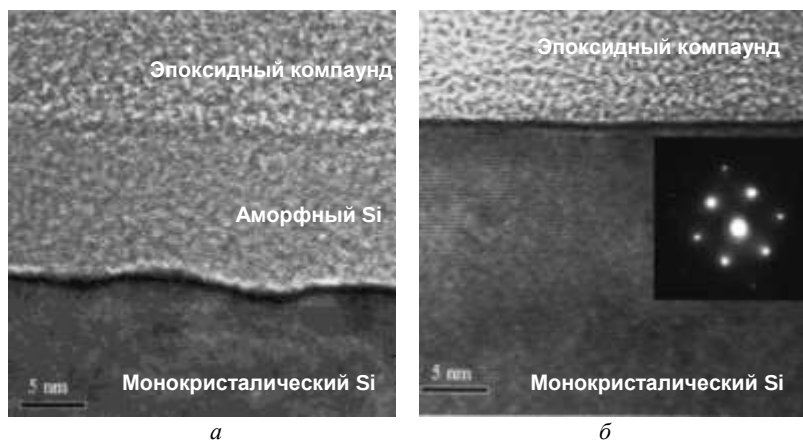


Рис. 7.10. Микроскопические изображения поперечных сечений образцов Si после имплантации ионов Ge с энергией 5 кэВ (а), и после лазерного отжига (б)

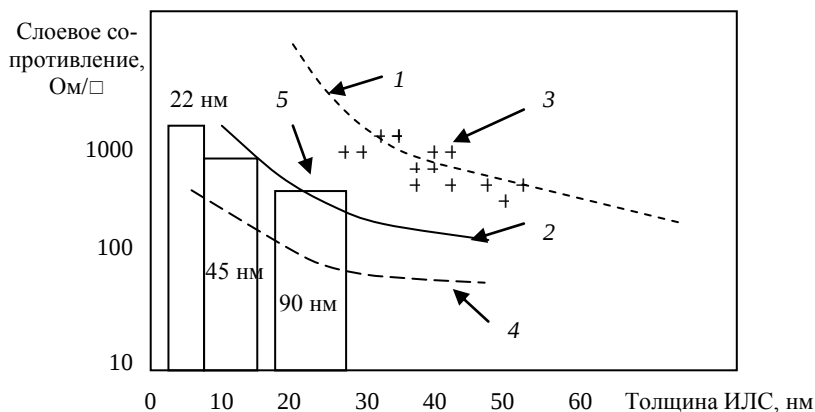


Рис. 7.11. Слоеое сопротивление и толщина ИЛС в соответствии с технологическими требованиями для различных топологических норм и различных методов импульсного отжига: 1 – БТО; 2 – пиковый отжиг; 3 – отжиг вспышкой; 4 – лазерный отжиг; 5 – требования ITRS для различных топологических норм

Сравнительный анализ результатов отжига ИЛС различными методами, представленный на рис. 7.11, свидетельствует о том, что с уменьшением длительности отжига становится возможным получение всё более мелких ИЛС, а также ИЛС с меньшим слоевым сопротивлением.

8. Травление микро- и наноструктур

8.1. Классификация методов травления

Травление используется для переноса рисунка фоторезистивной маски в нижележащий слой материала посредством его селективного удаления.

Травление является наиболее ответственным этапом литографического процесса, поскольку перенос изображения в подложку имеет необратимый характер. В микроэлектронике травлению подвергают полупроводниковые материалы Si, GaAs, InP, металлы Cu, Al, Cr, Ni, Ti, Au, W и др., диэлектрики SiO₂, Si₃N₄. В кремниевой технологии травление применяется в основном для формирования диффузионных масок в слое оксида кремния и для удаления материала через окна в диэлектрике при изготовлении металлических контактов, удаления собственного оксида.

Жидкостное травление – это процесс удаления вещества, реализуемый с помощью гетерогенных химических реакций на границе раздела двух фаз – жидкости и твердого тела. Жидкостное травление может происходить как в водных, так и неводных растворах. В области, подвергаемой травлению, вещество химически преобразуется в растворимое состояние. Основное условие, которое при этом должно соблюдаться, – достаточная легкость образования и удаления с поверхности продуктов взаимодействия.

Вакуумно-плазменные (сухие) методы травления подразделяются на три основных вида в зависимости от физико-химического механизма взаимодействия с поверхностью обрабатываемого материала.

– Ионное травление обусловлено удалением поверхностных слоев материалов в результате физического распыления высокоэнергетическими ионами инертных газов. Если обрабатываемый материал помещен на электродах или держателях, соприкасающихся с плазмой разряда, то травление в таких условиях называют ионно-плазменным. Если материал помещен в вакуумную зону обработки, отделенную от области плазмы, то травление в этих условиях называют ионно-лучевым.

– Плазмохимическое травление обусловлено удалением поверхностных слоев материала в результате химических реакций между химически активными частицами (ХАЧ), к которым относятся свободные атомы и радикалы, и поверхностными атомами материалов. Если обрабатываемый материал находится в области плазмы разряда, то травление называют плазменным. В этом случае химические реакции травления на поверхности материала будут активироваться низ-

коэнергетическими электронной и ионной бомбардировками, а также фотонной бомбардировкой. Если же материал находится в вакуумной зоне обработки, обычно называемой в этом случае реакционной зоной, отделенной от области плазмы, то травление производят ХАЧ без активации электронной и ионной бомбардировками, а в ряде случаев и при отсутствии воздействия фотонов. Такое травление называют радикальным.

– Ионно-химическое, или реактивное ионное, травление представляет собой процесс, при котором поверхностные слои материала удаляются в результате как физического распыления энергетическими ионами, так и химических реакций между ХАЧ и поверхностными атомами материала. Если обрабатываемый материал находится в области плазмы, то травление в этих условиях называют реактивным ионно-плазменным. Если травление происходит, когда материал находится в вакуумной зоне обработки, отделенной от области плазмы, то процесс травления называют реактивным ионно-лучевым. В этом случае поверхность материала подвергается воздействию только молекулярных или атомарных ионов, которые при ударной диссоциации или нейтрализации могут образовывать ХАЧ.

Классификация методов вакуумно-плазменного травления и их основные параметры приведены на рис. 8.1.

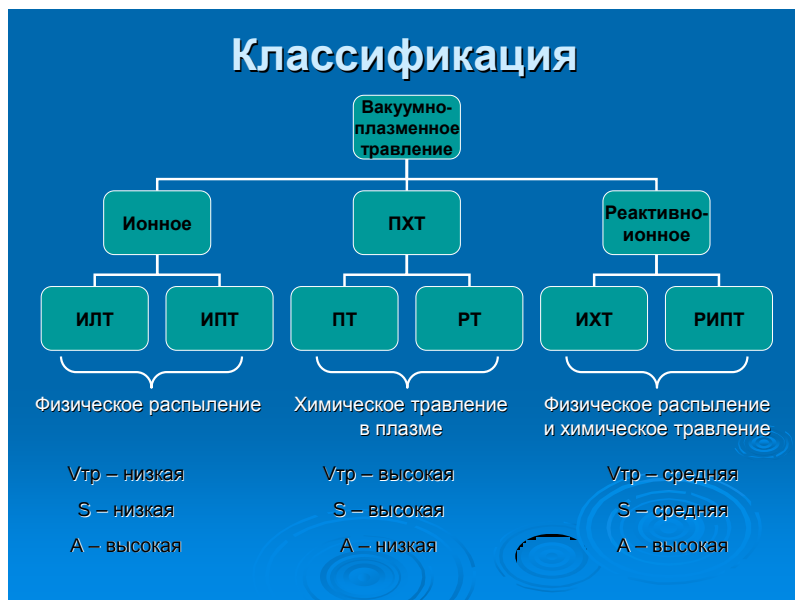


Рис. 8.1. Классификация методов травления

Процессы травления характеризуются следующими основными параметрами:

– Скорость травления $V_{\text{тр}}$ определяется толщиной слоя d , удаляемого за время t :

$$V_{\text{тр}} = d / t.$$

– Селективность травления – это отношение скорости травления подложки (рабочего слоя) $V_{\text{тр.п}}$ к скорости травления резистивной маски $V_{\text{тр.м}}$:

$$S = V_{\text{тр.п}} / V_{\text{тр.м}}.$$

– Анизотропия травления – это отношение скорости травления в вертикальном направлении к скорости травления в горизонтальной (боковом) направлении:

$$A = V_{\text{в}} / V_{\text{г}}.$$

Разрешение, достигаемое в результате процесса травления, является критерием качества переноса рисунка и определяется двумя параметрами. Первый из них – смещение 2δ , равное разности горизонтальных размеров рисунка травления пленки b и рисунка маски $b_{\text{м}}$ (рис. 8.2). Второй критерий – допуск, который является мерой статистического распределения величин смещения δ и характеризует однородность травления в горизонтальной плоскости.

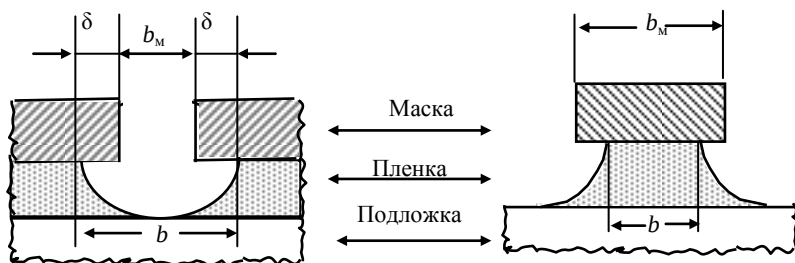


Рис. 8.2. Боковой подтрав пленки под маску на границе маска–пленка

Процесс травления с нулевым смещением обеспечивает формирование вертикального профиля края элемента, совпадающего с краем маски (рис. 8.3, а). В этом случае травления в горизонтальном направлении не происходит, и рисунок переносится с идеальной точностью, что соответствует экстремальной ситуации идеально-анизотропного травления. При равенстве вертикальной и горизонтальной скоростей травления, т.е. когда скорость травления не зависит от направления, к концу процесса формируется профиль края, имеющий

контур четверти окружности (рис. 8.3, б). В этом случае, т.е. при изотропном травлении, смещение равно удвоенной толщине пленки, подвергавшейся травлению, т.е. $\delta = d$. Любой профиль края элемента, формируемый к концу травления, который соответствует ситуации, промежуточной между теми, что показаны на рис. 8.2, образуется вследствие анизотропии скорости травления. Степень (показатель) анизотропии A можно определить как $A = V_v / V_g$, где V_v, V_g – вертикальная и горизонтальная скорости травления соответственно.

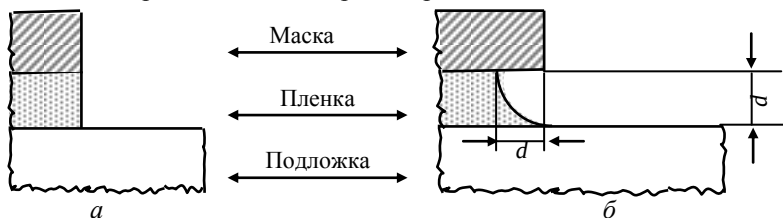


Рис. 8.3. Идеальные профили травления для полностью анизотропного (а) и изотропного (б) травления

Выражая степень анизотропии через параметры элемента, формируемого к концу процесса травления, можно записать: $A = d / \delta$, где d – толщина слоя травления; δ – величина бокового подтравливания материала под край маски.

Для изотропного жидкостного химического травления, когда травитель не воздействует на фоторезистивную маску и нет перегрева слоя рабочего материала, $\delta = d$ и $A = 1$. При всех остальных условиях $A < 1$. Если в маске получена линия шириной 0,2 мкм, то в пленке рабочего материала толщиной 1 мкм нельзя получить разрешение, характеризуемое минимальной шириной линии $b_{\min}$, менее 2,2 мкм при $A = 1$.

Таким образом, для освоения области субмикронных размеров основной задачей становится повышение разрешающей способности процессов травления, для чего в первую очередь необходима высокая степень их анизотропии. Действительно, для $b_m = 0,2$ мкм и $d = 1$ мкм при $A = 10$ можно получить минимальный размер $b_{\min} = 0,4$ мкм, а при $A = 100$ – $b_{\min} = 0,22$ мкм. В данном случае подразумевается, что подложка и маска не травятся. На практике такое случается редко, особенно при использовании ионно-плазменных методов сухого травления. Чаще всего материалы, контактирующие с травителем, характеризуются конечными значениями скорости травления. Следовательно, важным параметром переноса изображений в технологии

СБИС является селективностью (избирательностью) травления, определяемая как отношение скоростей травления различных материалов. Селективность по отношению к материалу резиста необходимо учитывать при контроле размеров формируемых элементов. Селективность по отношению к материалу подложки определяет качество и процент выхода годных приборов. Кроме высокого показателя анизотропии и высокой селективности, при травлении должны быть обеспечены хорошая воспроизводимость по скоростям травления, высокая равномерность, низкий уровень загрязнения поверхности материала, малые искажения получаемого рельефа и др. Сравнение методов травления по основным параметрам приведено на рис. 8.1.

8.2. Жидкостное химическое травление

Этот метод основан на удалении вещества за счет химических реакций на границе раздела жидкость – твердое тело.

Кинетика процессов травления. Типичный процесс травления включает в себя следующую последовательность реакций:

- диффузия реагента к поверхности твердой фазы;
- адсорбция реагента;
- поверхностная реакция;
- десорбция продуктов взаимодействия;
- диффузия продуктов реакции от поверхности.

Скорость суммарного процесса зависит от наиболее медленной (контролирующей стадии). Различают два основных типа реакций – диффузионно-контролируемые и ограниченные скоростью реакции. При умеренных температурах скорость травления определяется стадией химического взаимодействия, реже – процессом диффузии. Адсорбция и десорбция характеризуются малыми энергиями активации, протекают (сравнительно с другими этапами) быстро и поэтому лишь изредка лимитируют процесс. В случае диффузионно-контролируемого процесса характерными являются следующие признаки:

- 1) энергия активации зависит от вязкости травителя и составляет 1–6 ккал/моль;
- 2) скорость реакции увеличивается при перемешивании реагентов;
- 3) все материалы независимо от ориентации кристаллических плоскостей травятся с одинаковой скоростью (скорость реакции не зависит от структуры поверхности);
- 4) энергия активации при перемешивании растет.

Согласно закону Фика скорость диффузии определяется выражением

$$V_{\text{дифф}} = -\frac{DS(C-C')}{\delta},$$

где D – коэффициент диффузии; S – поверхность фронта диффузии; δ – толщина диффузионного слоя; C и C' – концентрации вещества в объеме и в приповерхностном слое. В начальный момент C и C' равны и диффузия не происходит. Потребление травителя снижает C' , и скорость диффузии возрастает. Через некоторое время, если устанавливается стационарный процесс, скорость диффузии достигает определенной величины и больше не изменяется. Диффузионный контроль наблюдается для растворов травителей с низкими концентрациями реагентов, при высоких температурах или при процессах, сопровождающихся образованием плохо растворимых продуктов. Незначительное влияние температуры на скорость диффузии связано с небольшой энергией активации.

Характерными признаками процессов, контролируемых скоростью химической реакции, являются:

- 1) зависимость скорости реакции от концентрации травителя;
- 2) отсутствие зависимости скорости от перемешивания;
- 3) энергия активации составляет 8–20 ккал/моль.

Скорость поверхностной реакции может быть определена из соотношения

$$V = kC \exp(-\Delta E_a / RT),$$

где C – концентрация травителя в приповерхностном слое; k – константа скорости реакции; T – температура; ΔE_a – энергия активации.

Энергия активации поверхностной реакции зависит от структуры и состояния поверхности материала. На более шероховатых поверхностях травление протекает с меньшей энергией активации. Посторонние атомы, дислокации и другие дефекты структуры могут повышать или понижать энергию активации растворения.

Результат жидкостного травления также во многом определяется предысторией маски фоторезиста, его адгезией к подложке, геометрией элементов.

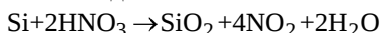
Состав травителей. Химическое травление полупроводников основано на окислении поверхности травителем и последующем удалении образовавшихся продуктов. Неокисляющие травители на большинство полупроводниковых материалов не действуют. В состав травителей обычно включают: 1) растворитель, который является средой для образования гомогенной системы; 2) окислители, которые образуют оксиды или другие продукты окисления на поверхности полупроводника; 3) комплексообразователи, которые растворяют продукт окисления и удаляют его с поверхности; 4) ускорители.

тели или замедлители первых двух реакций, если они протекают с такой скоростью, что ими трудно управлять; 5) специальные добавки, сообщающие травителю селективные свойства.

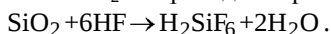
Как правило, в состав травителей входит окислитель (HNO_3 , H_2O_2 , NaOCl , Br_2 , $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ и др.), необходимый для разрыва ковалентных связей полупроводникового материала, и растворитель, легко растворяющий продукты реакции. Под действием этих веществ такие полупроводники, как Ge, Si, GaAs, InP, переходят в раствор или образуют поверхностные оксидные пленки.

В качестве растворителей используют водные растворы неорганических кислот, щелочей или различные органические среды: спирты, эфиры, карбоновые кислоты. С одной стороны, растворитель регулирует скорость диффузионного процесса. С другой стороны, он влияет на силу растворенных электролитов и их окислительную способность. Для управления вязкостью травителей иногда в них вводят добавки глицерина или ледяной уксусной кислоты.

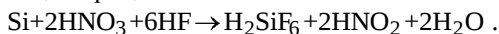
Роль комплексообразователей, способствующих образованию хорошо растворимых продуктов реакции, чаще всего играют ионы фтора, гидроксила или анионы различных органических кислот (лимонной, щавелевой, янтарной). Например, процесс травления Si в травителе HF/HNO_3 включает стадию окисления:



и последующее травление SiO_2 с переходом в растворимое состояние:



Суммарная реакция процесса:



Таким образом, для растворения каждого атома кремния требуются 2 молекулы окислителя HNO_3 и 6 молекул комплексообразователя HF.

Составы применяемых травителей в большинстве своем подобраны эмпирически. В зависимости от задач травления, требований к состоянию поверхности выбирают те или иные сочетания компонентов. Варьируя не только состав, но и продолжительность процесса, температурные условия, используя перемешивание, можно подобрать для каждого случая оптимальные условия. Для удаления тонких слоев материала используют разбавленные растворы травителей, чтобы иметь возможность контролировать скорость реакции и снизить подтравливание под слой фоторезиста.

Жидкостное травление металлов включает в себя многие электрохимические процессы. Химическая реакция вызывает протекание тока, причем металл является анодом:



Большинство металлов покрыто естественным оксидом, для удаления которого добавляется вспомогательный травитель. В растворе происходит катодное восстановление окисляющего агента.

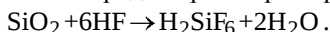
В табл. 8.1 представлены составы некоторых травителей, применяемых для травления металлов.

Таблица 8.1

Составы травителей, применяемые в кремниевой технологии для травления металлов

Металл	Формула	Скорость травления, Å/мин
Титан (Ti)	HF 0,5% раствор	500; 20 °C
Титан-вольфрам (Ti-W)	H ₂ O ₂ , 30%	200–1000; 20–60 °C
Медь (Cu)	H ₂ SO ₄ : H ₂ O ₂ : DI 1:1:100 H ₃ PO ₄ : H ₂ O ₂ : DI 1:1:50	> 3000; 20 °C 3000; 20 °C
Хром (Cr)	(NH ₄) ₂ Ce (NO ₃) ₆	250; 20 °C
Никель (Ni)	H ₂ SO ₄ :HNO ₃ :DI 3:1:1	2000; 20 °C

В случае травления неорганических оксидов реакции протекают по механизму замещения (кислотно-основные). Химия травления одного из распространенных диэлектриков SiO₂ включает воздействие фторидных групп на связи Si–O. Для травления используют буферный раствор, в состав которого входит плавиковая кислота HF и фторид аммония NH₄F (англ. BOE – Buffered Oxide Etchant). Основной частицей в буферном растворе является HF₂[–]. В процессе реакции атомы фтора замещают кислород и в растворе образуются ионы SiF₆[–]:



Так как в процессе реакции HF расходуется, скорость реакции со временем уменьшается. Чтобы поддерживать концентрацию кислоты постоянной, в раствор добавляют NH₄F, который диссоциирует в растворе с образованием молекул HF, поддерживая постоянной pH раствора:



Способы приготовления травителей. При подборе состава травителей и выборе оптимальной концентрации компонентов следует обращать особое внимание на чистоту применяемых кислот и других химических реагентов. Все реактивы должны иметь высокую степень чистоты, гарантируемую производителем, так как примеси, имеющиеся в исходных реагентах, из которых готовят растворы травителей, могут легко адсорбироваться на чистой поверхности полупроводников. В соответствии с международными стандартами в зависимости

от сложности технологии различают следующие степени чистоты (puri-fication grades) реактивов для микроэлектронной промышленности:

- MOS (metal oxide semiconductor): концентрация примесей ионов металлов (на элемент) 100 ppb, концентрация частиц < 1000/ml;
- VLSI (very large scale integration): концентрация примесей ионов металлов (на элемент) 10–50 ppb, концентрация частиц <250/ml;
- ULSI (ultra large scale integration): концентрация примесей ионов металлов (на элемент) 10 ppb, концентрация частиц <30...100/ml;
- SLSI (super large scale integration): концентрация примесей ионов металлов (на элемент) 1 ppb, концентрация частиц < 30...100/ml.

В соответствии с классификацией, принятой в России, различают особо чистые вещества (осч), химически чистые (хч), чистые для анализа (чда). Чистота химических реактивов в России регламентируется Государственными стандартами (ГОСТ) и техническими условиями (ТУ).

В процессе приготовления травителя следует обращать внимание на температуру исходных кислот, температуру травителя после приготовления, на стабильность и время выдержки раствора, которое необходимо после смешения кислот, прежде всего для создания постоянной температуры и установления химического равновесия в растворе. Во многих случаях следует поддерживать температуру 293 ± 3 К.

Необходимо контролировать стабильность травителей в процессе травления. В условиях производства экспериментально определяют «емкость» или коэффициент полезного использования травителя – максимальное количество пластин полупроводника, которое можно обработать в заданном объеме травителя без существенного изменения его свойств. Для этого следует предварительно установить зависимость скорости травления и качества поверхности после травления от количества ранее растворенного полупроводника в данном объеме травителя. В некоторых случаях допускается корректировка состава травителя, например добавлением окислителя или растворителя.

Способы травления.

Жидкостное травление обычно осуществляется в ваннах (групповая обработка) или в установках поштучной обработки пластин. В последнем случае распыление травителя сочетается с вращением пластины при обработке. Использование данного способа травления стало актуальным и экономически обоснованным при переходе к пластинам диаметром 200 и 300 мм и уменьшении минимальных размеров топологии. Преимуществом такого способа травления является возможность последовательного проведения операций травления, отмывки и сушки пластин на одной позиции проработки элементов субмикронных размеров.

Основным условием получения воспроизводимых результатов при травлении является контроль параметров процесса жидкостного травления. К ним относятся: толщина травимого слоя, температура и время обработки. Продукты травления контролировать сложно, поэтому контролируются обычно состав травителя и скорость удаления материала.

К достоинствам жидкостного травления относятся отсутствие генерации структурных дефектов, существенного изменения электронных свойств поверхности, большой выбор химических реагентов, высокая селективность и производительность процесса.

Обычное жидкостное травление имеет изотропный характер (коэффициент анизотропии $A = 0$) и в случае формирования субмикронных структур не позволяет получить профиль травления с вертикальными стенками и сохранить размеры изображения в допустимых пределах. Этих недостатков можно избежать, используя методы сухого травления. Сухое травление дает возможность проводить травление подложки анизотропно и с высокой точностью.

8.3. Физика ионного травления

Поскольку ионное травление (ИТ) определяется чисто физическим процессом передачи импульса, скорость травления в первом приближении может быть связана с двумя факторами: плотностью ионного тока на подложку, зависящей от конструкции ионного источника, и количеством удаленных атомов на один падающий ион. Коэффициент распыления – число удаляемых атомов на один падающий ион – зависит прежде всего от энергии и атомной массы иона, энергии сублимации материала, подвергающегося травлению, и угла падения ионного пучка. В соответствии с определением коэффициент распыления K записывается $K = N_a / N_{\text{и}}$, где N_a – число выбитых (распыленных) атомов материала; $N_{\text{и}}$ – число ионов, бомбардирующих материал.

Движущийся на мишень (катод) ион с энергией E_0 и массой M_1 передает энергию атомам решетки в серии последовательных столкновений. Если при столкновении атому мишени массой M_2 передается энергия, превосходящая энергию связи атомов в решетке (энергию смещения) $E_{\text{см}}$, он покидает свое равновесное положение, превращаясь в первично смещенный атом. Смещенный атом в свою очередь сталкивается с окружающими атомами решетки, производя вторичные смещения. Этот процесс длится до тех пор, пока энергия атома не уменьшится до уровня, ниже которого передача энергии, боль-

шей $E_{\text{см}}$, становится невозможной. Атомы продолжают сталкиваться, но уже не смещают другие атомы. Они замедляются до энергии сублимации $E_{\text{суб}}$ и принимают участие в тепловом движении атомов решетки. Максимальная энергия, которую ион может передать атому при лобовом соударении, равна $E_{\text{max}} = \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2} \cdot E_0$.

Смещенный атом характеризуется средней энергией $E_{\text{ср}}$, величина которой зависит от вида взаимодействия. Если смещенный атом получит энергию больше $E_{\text{см}}$ и импульс энергии будет направлен в сторону поверхности, то он может покинуть эту поверхность и стать распыленным атомом. Энергию смещения можно оценить, зная энергию сублимации для материала мишени. При сублимации происходит удаление атомов с поверхности, где действует только половина связей. Для удаления атома из объема мишени уже необходима энергия $2E_{\text{суб}}$. При столкновении атом не только выбивается из занимаемого положения, но и внедряется в решетку, смещая другие атомы. Для осуществления такого процесса необходима энергия не меньше $4E_{\text{суб}}$. Следовательно, процесс выбивания атомов из объема и их выброс в вакуум будет иметь место, если смещенные атомы получают энергию, равную или более $4E_{\text{суб}}$, т.е. $E_{\text{см}} = 4E_{\text{суб}}$. Вылет атомов из мишени в вакуум зависит как от энергии, так и от импульса, полученного им от иона или от быстрых смещенных атомов. Действительно, атом, который получил импульс, направленный внутрь мишени, не сможет вылететь из вещества. Конечно, если в результате соударения с другими атомами он получит импульс, направленный к поверхности, и сохранит при своем движении к ней достаточную энергию, то такой атом вылетит из вещества.

Ионное травление материала начинается, когда энергия ионов превысит некоторую величину $E_{\text{п}}$, получившую название пороговой энергии распыления. При энергии иона $E_0 > E_{\text{п}}$ они передают атомам энергию, большую, чем энергия смещения атомов в материале $E_{\text{см}}$. Поэтому ИТ всегда сопровождается нарушениями структуры поверхностных слоев материала и созданием в них междуузельных атомов и вакансий. Если для материала известно $E_{\text{см}}$, то легко определить пороговую энергию распыления:

$$E_{\text{п}} = \frac{(M_1 + M_2)^2}{4M_1M_2} \cdot E_{\text{см}}.$$

В диапазоне энергий $E_0 < E_n$ ионы не производят распыления материала. Если на поверхности материала присутствуют адсорбированные инородные частицы и химические соединения, то в результате ионной бомбардировки происходят их десорбция и химические превращения. Так, при ионно-химическом травлении имеют место химические реакции между ХАЧ и поверхностными атомами материала. При росте энергии ионов интенсивность процесса физического распыления увеличивается. С увеличением длительности ионной бомбардировки (дозы ионного облучения) поверхностные слои монокристаллов превращаются вначале в поликристаллические, а затем в аморфные.

Толщина нарушенного слоя материала приблизительно равна удвоенной средней глубине проникновения ионов в материал и возрастает с увеличением дозы облучения.

При ионном травлении материалов микроэлементных структур используется диапазон энергий ионов (0,5–5,0) кэВ. При энергии $E_0 < 0,5$ кэВ скорости процесса ИТ очень малы для практического использования. Верхняя граница диапазона связана с допустимым уровнем радиационного повреждения обрабатываемых структур и стойкостью используемых маскирующих материалов. Для правильного выбора технологических режимов необходимо знать такие характеристики распыляемых частиц, как угловое распределение, распределение по энергиям, средняя скорость и средняя энергия распыленных атомов. Для поликристаллических материалов угловое распределение распыляемых атомов в первом приближении описывается законом косинуса при нормальном падении бомбардирующих ионов с энергией в диапазоне 1–10 кэВ. При наклонных углах падения ионов частицы материала преимущественно распыляются в направлении зеркального отражения ионов.

Одну из наиболее плодотворных теорий ионного распыления, хотя и не очень строгую, предложил Пиз. Столкновения, приводящие к распылению, удобно разделить по их энергии на три категории. Когда энергия иона невелика – $E_0 < E_A$, он не может проникнуть сквозь электронную оболочку атома, и столкновения можно рассматривать как соударения абсолютно упругих твердых шаров. При больших энергиях – $E_0 > E_B$ – бомбардирующий ион свободно проходит сквозь электронную оболочку атома и смещает ядро (неэкранированные кулоновские столкновения). При средних энергиях $E_A < E_0 < E_B$ происходят экранированные кулоновские соударения ядер. Значения предельных энергий определяются

$$E_A = 2E_R Z_1 Z_2 (Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2} \cdot \frac{M_1 + M_2}{M_2},$$

где $E_R = 13,5$ эВ – энергия связи электрона в атоме водорода (энергия Ридберга).

$$E_B = 4E_R^2 Z_1^2 \cdot Z_2^2 (Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3}) \cdot \frac{M_1}{M_2 E_{cm}}.$$

Коэффициент распыления в теории Пиза определяется

$$K = \sigma_p N_0^{2/3} \cdot \frac{E_{cp}}{4E_{cm}} \left[1 + \left(\frac{\lg E_{cp} / E_{cyб}}{\lg 2} \right)^{1/2} \right],$$

где σ_p – поперечное сечение столкновения иона с атомами твердого тела, при котором атому передается энергия, превышающая E_{cm} ; N_0 – атомная плотность распыляемого материала.

Величины σ_p и E_{cp} зависят от типа соударений. В области неэкранированных кулоновских столкновений, когда $E_0 > E_B$, имеем

$$\sigma_p = 4\pi a_0^2 Z_1^2 \cdot Z_2^2 \cdot E_R^2 \left(1 - \frac{E_{cm}}{E_{max}} \right) \cdot \frac{M_1}{M_2 \cdot E_0 \cdot E_{cm}},$$

где a_0 – первый боровский радиус атома водорода;

$$E_{cp} = \frac{E_{max} \cdot E_{cm}}{E_{max} - E_{cm}} \cdot \ln \frac{E_{max}}{E_{cm}}.$$

В области экранированных кулоновских столкновений при $E_A < E_0 < E_B$

$$\sigma_p = \pi a^2, \quad E_{cp} = E_{cm} \frac{E_B}{E} \cdot \ln \left(1 + \frac{4E_0^2}{E_A^2} \right).$$

Радиус экранирования ядра орбитальными электронами a определяется соотношением

$$a = \frac{0,885a_0}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}}.$$

В области столкновений атомов типа твердых шаров $E_0 < E_A$

общее поперечное сечение столкновения $\sigma_T = \pi a^2 \frac{E_A}{2,72E_0}$, тогда

$$\sigma_p = \left(1 - \frac{E_{cm}}{E_{max}} \right) \cdot \sigma_T; \quad E_{cp} = \frac{1}{2}(E_{max} + E_{cm}).$$

Расчет коэффициента распыления по теории Пиза дает наиболее точный результат для области больших энергий – $E_0 > E_B$. Расчетные зависимости K от энергии ионов качественно согласуются с экспериментальными в широком диапазоне энергий ионов и отношений M_1/M_2 . Но теоретически вычисленные значения коэффициента распыления оказываются в большинстве случаев в 1,5 раза больше экспериментальных значений.

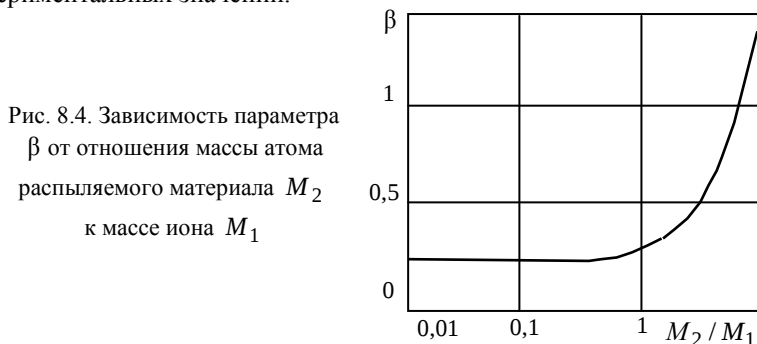


Рис. 8.4. Зависимость параметра β от отношения массы атома распыляемого материала M_2 к массе иона M_1

Наиболее строгая и законченная теория катодного распыления аморфных и поликристаллических материалов разработана Зигмундом. Согласно этой теории при бомбардировке мишеней ионами по нормали к поверхности в области энергий E_0 меньше критической E^* коэффициент распыления прямо пропорционально зависит от энергии

$$K = \frac{3\beta \cdot M_1 M_2 E_0}{\pi^2 (M_1 + M_2)^2 \cdot 2E_{\text{суб}}}, \quad (8.1)$$

где β – безразмерный параметр, зависящий от отношения M_2/M_1 (рис. 8.4).

Величина критической энергии E^* определяется

$$E^* = 515 a^2 Z_1 \cdot Z_2 \cdot \frac{M_1 + M_2}{M_2}, \text{ Дж.}$$

В области энергий $E_0 > E^*$ коэффициент распыления рассчитывается

$$K = 4,2 \cdot 10^{18} \frac{\sum_{\text{я}}(E)}{2E_{\text{суб}}}, \quad (8.2)$$

где $\sum_{\text{я}}(E)$ – ядерное тормозное сечение ионов.

Эта величина определяется следующим образом:

$$\sum_{\text{я}}(E) = \frac{Z_1 Z_2 e^2 \cdot a \cdot M_1}{(M_1 + M_2) \cdot \varepsilon_0} \cdot \sigma_{\text{я}}(\varepsilon),$$

где ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; $\sigma_{\text{я}}(\varepsilon)$ – приведенные тормозные сечения, значения которых зависят от приведенной энергии ионов ε (табл. 8.2). Приведенная энергия рассчитывается

$$\varepsilon = \frac{4\pi \varepsilon_0 M_2 a E_0}{(M_1 + M_2) Z_1 Z_2 \cdot e^2}.$$

Таблица 8.2

Значения приведенного ядерного тормозного сечения ионов $\sigma_{\text{я}}$

ε	$\sigma_{\text{я}}$	ε	$\sigma_{\text{я}}$
0,002	0,120	0,4	0,405
0,004	0,154	1,0	0,356
0,01	0,211	2,0	0,291
0,02	0,261	4,0	0,214
0,04	0,311	10	0,128
0,1	0,372	20	0,0813
0,2	0,403	40	0,0493

Значения коэффициентов распыления материалов ионами инертных газов определяют следующие основные факторы. Коэффициент распыления растет прямо пропорционально с увеличением энергии ионов до величины критической энергии E^* , которая лежит в диапазоне (0,3–0,5) кэВ. При энергии ионов $E_0 > E^*$ рост K материалов с увеличением энергии ионов замедляется. Коэффициент распыления материалов возрастает с увеличением массы и атомного номера бомбардирующих ионов M_1 и Z_1 в области энергий, используемых для ионного травления. С ростом угла падения ионов на поверхность распыляемого материала α от 0 (отсчет ведется от нормали к поверхности) до 50–70° наблюдается увеличение коэффициента распыления материалов. Зависимость K от α в этой области можно оценить по формуле

$$K(\alpha) = K(0) / \cos \alpha, \quad (8.3)$$

где $K(0)$ – коэффициент распыления при нормальном падении ионов.

Зависимость (8.3) легко объяснить, исходя из механизма физического распыления. Коэффициент распыления при нормальном падении ионов прямо пропорционален энергии, рассеиваемой в поверхно-

стном слое материала, в пределах которого упругие столкновения с атомами будут приводить к распылению. При угле падения α длина пробега ионов, а следовательно, и число столкновений в этом поверхностном слое будут в $1/\cos\alpha$ раз больше. Увеличение угла падения от $50-70$ до 90° приводит к уменьшению коэффициента распыления до нуля из-за отражения ионов от поверхности материала.

Для количественной характеристики процесса ИТ материалов удобно пользоваться понятием скорости травления, определяемой по толщине поверхностного слоя материала, удаляемого в единицу времени. Согласно определению скорость травления $V_{\text{тр}}$ можно записать как $V_{\text{тр}} = d/t$, где d – глубина травления материала (толщина удаленного слоя); t – время травления. Количественно скорость травления определяется коэффициентом распыления K , количеством бомбардирующих ионов $N_{\text{и}}$ и атомной плотностью материала мишени N_0 :

$$V_{\text{тр}} = \frac{N_{\text{и}} K}{N_0}.$$

Величина $N_{\text{и}}$ зависит от плотности ионного тока в ионном пучке j , поступающем на мишень (обрабатываемую подложку):

$$N_{\text{и}} = j/ne.$$

Коэффициент распыления рассчитывается по теории Пиза или Зигмунда. Тогда скорость травления $V_{\text{тр}} = jK/N_0 ne$.

При наклонном падении ионов на поверхность распыляемого материала скорость ионного травления определяется как

$$V_{\text{тр}}(\alpha) = j \propto K(\alpha)/N_0 ne, \quad (8.4)$$

где $K(\alpha)$ – коэффициент распыления при угле падения ионов α ; $j(\alpha)$ – плотность ионного тока, зависящая от α .

Отсюда следует, что зависимость $V_{\text{тр}}$ от α определяется зависимостями j и K от α . Это иллюстрируется рис. 8.5.

Если плотность тока от угла зависит как $j(\alpha) = j \cos\alpha$, а коэффициент распыления увеличивается с ростом α в некоторой области в соответствии с формулой (8.3), то в этой области скорость травления не зависит от α (рис. 8.5: золото, тантал при α до 50°). Скорость травления алюминия, арсенида галлия, фоторезиста значительно увеличивается с ростом угла падения ионов от 0 до $40-50^\circ$, что означает более резкую зависимость их коэффициента распыления от α , чем по формуле (8.3), или предполагает другую зависимость j от α .

Примеры профилей ионного травления показаны на рис. 8.6. Скорость травления пленок золота составляла 200 нм/мин, пленок

платины – 100 нм/мин. Селективность к резисту была (1,5–5):1 (к Al или Ti > 20:1), однородность: $\pm 5\%$.

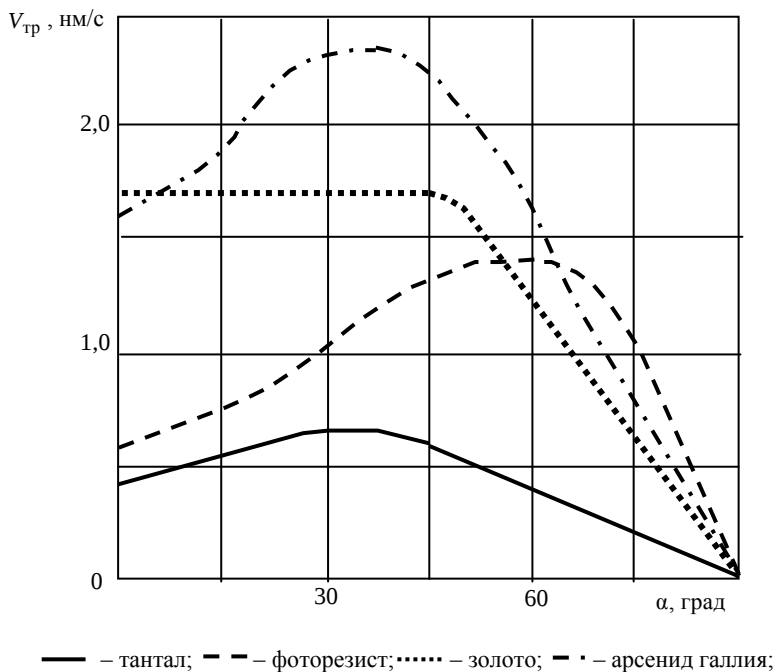


Рис. 8.5. Зависимость скорости ионного травления материалов при $j = 1 \text{ mA/cm}^2$ от угла падения ионов аргона с энергией 0,5 кэВ

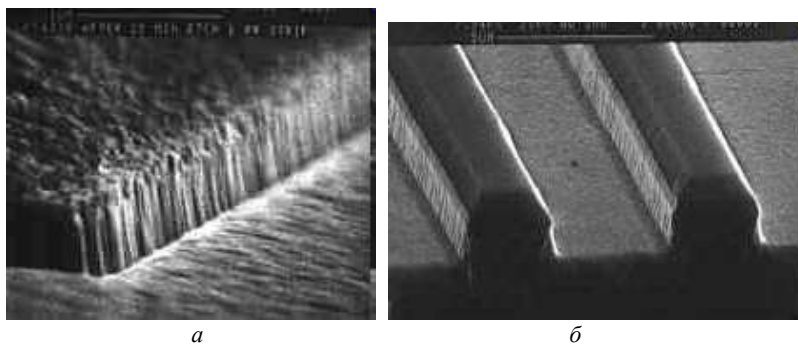


Рис. 8.6. Примеры профилей ионного травления:
a – глубина травления Au 0,5 мкм; *б* – глубина травления Pt 2 мкм

8.4. Разрешающая способность ионно-лучевого травления

Основной причиной применения ионно-лучевого травления является его высокая разрешающая способность, достигаемая за счет затеняющего действия маски, обеспечивающей анизотропное травление без подтравливания материала под маской. Топография получаемого профиля при ионно-лучевом травлении рабочего материала (подложки) через проявленную защитную маску определяется зависимостью скорости травления от угла падения ионов, переосаждением распыляемого материала и отражением ионов при больших углах падения. В первую очередь рассмотрим процесс ионного травления, не учитывая переосаждение материала и отражение ионов. Часто считается, что ионное травление точно воспроизводит на подложке любой рисунок защитной маски. Однако это справедливо только до определенного момента травления. Даже при вертикальных боковых стенках профиля маски ее верхние углы имеют некоторое закругление из-за условий экспонирования и проявления. Поэтому ионы бомбардируют эти участки под углом $\alpha > 0^\circ$, что приводит к увеличенной скорости травления этих участков и образованию граней на боковых стенках маски (рис. 8.7, а). Эти грани образуют с направлением ионного пучка угол $\alpha_{\max}$, соответствующий максимальной скорости ионного травления или максимальному коэффициенту распыления маски (рис. 8.7, б). Поскольку эти грани травятся быстрее, чем поверхности, перпендикулярные к направлению ионного пучка, то они развиваются на всю боковую поверхность маски и пересекают плоскость подложки (рис. 8.7, в). Дальнейшее травление этих граней будет приводить к обнажению первоначально маскированных участков подложки и изменению боковых размеров, а также формы вытравливаемого профиля (рис. 8.7, г).

На рис. 8.8 показаны основные элементы профиля ионного травления подложки и защитной маски. Боковой уход размеров вытравливаемого в подложке профиля δ геометрически связан с глубиной травления боковой стенки маски $d_m(\alpha)$ соотношением

$$\delta = d_m(\alpha) / \sin \alpha. \quad (8.5)$$

Глубины травления наклонной и горизонтальной поверхностей маски соотносятся так же, как скорости их травления, и, следовательно, определяются как

$$\frac{d_m(\alpha)}{d_m(0)} = \frac{V_{\text{тр.м}}(\alpha)}{V_{\text{тр.м}}(0)} = \frac{K_m(\alpha)}{K_m(0)} \cos \alpha, \quad (8.6)$$

где $V_{\text{тр.м}}(\alpha)$, $V_{\text{тр.м}}(0)$ – скорости травления маски соответственно при угле наклона маски α и на горизонтальной поверхности; $K_{\text{м}}(\alpha)$, $K_{\text{м}}(0)$ – коэффициенты распыления маски соответственно при угле α и на горизонтальной поверхности.

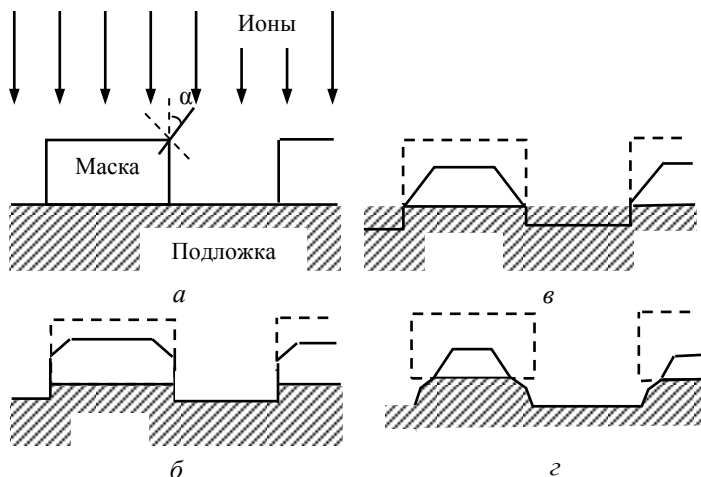


Рис. 8.7. Стадии ионного травления через защитную маску: *а* – профиль маски и подложки до ионного травления; *б* – начало образования граней на маске; *в* – грани маски достигли начальной плоскости подложки; *г* – изменение формы и размеров вытравливаемого в подложке профиля

Подставляя $d_{\text{м}}(\alpha)$ из (8.6) в (8.5), легко получить

$$\delta = d_{\text{м}}(0) \frac{K_{\text{м}}(\alpha) \cdot \cos \alpha}{K_{\text{м}}(0) \cdot \sin \alpha}.$$

Учтем, что $d_{\text{п}}(0)/d_{\text{м}}(0) = K_{\text{п}}(0)/K_{\text{м}}(0)$ и $\text{tg} \varphi = d_{\text{п}}(0)/\delta$, тогда

$$\delta = d_{\text{п}}(0) \frac{K_{\text{м}}(\alpha)}{K_{\text{п}}(0)} \cdot \frac{1}{\text{tg} \alpha}; \quad \text{tg} \varphi = \frac{K_{\text{п}}(0)}{K_{\text{м}}(\alpha)} \text{tg} \alpha, \quad (8.7)$$

где $K_{\text{п}}(0)$ – коэффициент распыления подложки на горизонтальной поверхности.

Если для коэффициента распыления маски материала справедливо выражение $K(\alpha) = K(0)/\cos \alpha$, то формула (8.7) принимает вид

$$\delta = d_{\text{п}}(0) \frac{K_{\text{м}}(0)}{K_{\text{п}}(0)} \cdot \frac{1}{\sin \alpha}, \quad \text{tg} \varphi = \frac{K_{\text{п}}(0)}{K_{\text{м}}(0)} \sin \alpha. \quad (8.8)$$

Из формул (8.7), (8.8) следует, что для получения минимального бокового ухода размеров и максимальной крутизны вытравливаемого профиля необходимы маски с более низким коэффициентом распыления и вертикальными боковыми стенками. Уменьшение ширины маски легко определить из геометрических построений и вышеприведенных формул:

$$\Delta b = d_m(0) \left[\frac{K_m(\alpha)}{K_m(0)} \right] \cdot \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (8.9)$$

Коэффициент распыления имеет наибольшее значение при угле $\alpha_{\max}$. В процессе травления угол края маски становится равным $\alpha_{\max}$, и этот наклон затем передается нижележащей подложке или тонкой пленке, подвергающейся травлению. По этой причине большинство структур, полученных ионным травлением, имеет наклонные стенки с углом $\varphi = \alpha$. Тогда разрешающая способность травления подложки может быть определена по той же формуле (8.9), что и для маски. Для уменьшения Δb необходимо применять маски с очень малой скоростью травления, чтобы $d_m(0)$ было мало и отношение $K_m(\alpha)/K_m(0)$ – близким к единице. Фоторезист, наиболее широко используемый в качестве маскирующего материала при жидкостном и плазменном травлении, не вполне пригоден для ионно-лучевого

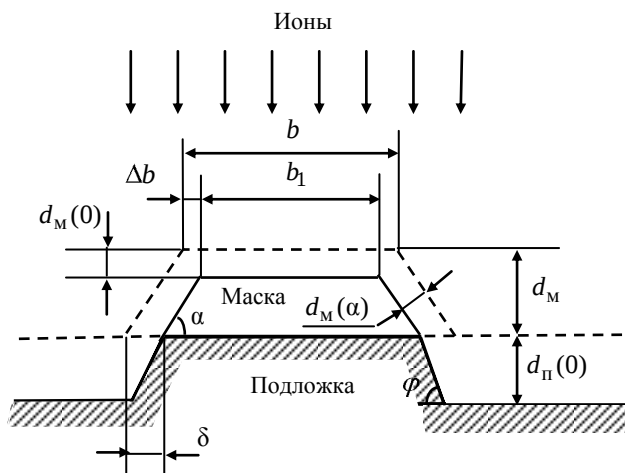


Рис. 8.8. Основные элементы профиля маски и подложки при ИТ

травления. Основное ограничение для его применения связано с высокой скоростью травления.

Кроме того, необходимо предусматривать специальные меры для предотвращения нагрева поверхности подложки выше 423 К, чтобы избежать размягчения резиста. С помощью маски из резиста можно произвести травление на глубину до нескольких микрон. Для глубокого ионно-лучевого травления следует использовать маски из металлов (титана или тантала) или диэлектриков (нитрида кремния или оксида алюминия), имеющих очень низкие скорости травления.

Согласно определению можно записать выражения анизотропии травления подложки $A_{\text{П}}$, маски $A_{\text{М}}$ и селективности травления подложки относительно маски $S_{\text{ПМ}}$:

$$A_{\text{П}} = V_{\text{тр.п}}(0)/V_{\text{тр.п}}(90);$$

$$A_{\text{М}} = V_{\text{тр.м}}(0)/V_{\text{тр.м}}(90);$$

$$S_{\text{ПМ}} = V_{\text{тр.п}}(0)/V_{\text{тр.м}}(0),$$

где $V_{\text{тр.п}}(0)$, $V_{\text{тр.м}}(0)$, $V_{\text{тр.п}}(90)$, $V_{\text{тр.м}}(90)$ – скорости травления подложки и маски в нормальном и тангенциальном (боковом) направлениях (угол отсчитывается от нормали к поверхности).

Вначале рассмотрим случай (рис. 8.9), когда скорость бокового травления маски $V_{\text{тр.м}}(90)$ меньше, чем скорость бокового травления подложки $V_{\text{тр.п}}(90)$. Аналитически это может быть записано в виде $S_{\text{ПМ}} \geq A_{\text{П}} / A_{\text{М}}$.

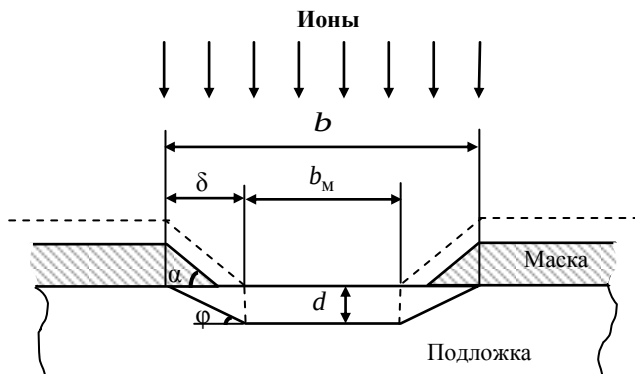


Рис. 8.9. Основные элементы профиля маски и подложки для случая $V_{\text{тр.м}}(90) < V_{\text{тр.п}}(90)$

Это обычно наблюдается при реактивном ионно-лучевом травлении материала подложки через неорганические защитные маски, которые не травятся образующимися химически активными частицами (например, травление SiO_2 через алюминиевую маску в CF_4). Профиль травления элемента в подложке при условии $S_{\text{пм}} > A_{\text{п}}/A_{\text{м}}$ не зависит от угла наклона края элемента в маске и определяется целым рядом параметров процесса реактивного ионно-лучевого травления (см. рис. 8.9):

$$\operatorname{tg} \varphi = d / \delta = A_{\text{п}}; \quad \delta = d / A_{\text{п}}; \quad b = b_{\text{м}} + 2d / A_{\text{п}}. \quad (8.10)$$

Из соотношения (8.10) можно легко оценить анизотропию процесса травления, которая необходима для получения требуемого разрешения в материале подложки.

Однако наиболее часто при реактивном ионно-лучевом травлении используются органические маски из фоторезистов, для которых скорость бокового травления маски больше, чем подложки (рис. 8.10) $S_{\text{пм}} \leq A_{\text{п}}/A_{\text{м}}$. Это условие имеет место при $V_{\text{тр.м}}(\alpha) > V_{\text{тр.п}}(\alpha)$ и соответствует случаю, который был рассмотрен на рис. 8.7.

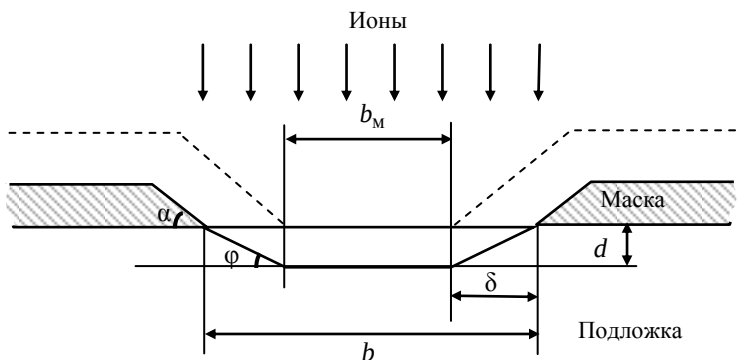


Рис. 8.10. Основные элементы профиля маски и подложки для $S_{\text{пм}} < A_{\text{п}}/A_{\text{м}}$

При выполнении этого условия параметры профиля элемента в подложке будут зависеть от угла наклона края элемента в маске α и рассчитываются по формулам

$$\operatorname{tg} \varphi = \left[\frac{V_{\text{тр.п}}(0)}{V_{\text{тр.м}}(\alpha)} \right] \cdot \sin \alpha; \quad \delta = d \left[\frac{V_{\text{тр.м}}(\alpha)}{V_{\text{тр.п}}(0)} \right] \cdot \frac{1}{\sin \alpha}, \quad (8.11)$$

и тогда

$$b = b_M + 2d \left[\frac{V_{\text{тр.м}}(\alpha)}{V_{\text{тр.п}}(0)} \right] \frac{1}{\sin \alpha}. \quad (8.12)$$

Наибольшее отношение скоростей травления различных материалов составляет 20. Такие материалы, как Ti и Al, имеют низкие скорости травления в чистом аргоне, к тому же эти значения могут быть уменьшены еще в 3–10 раз напуском в ионный пучок кислорода с парциальным давлением 10^{-2} Па. Для создания элементов в многослойных структурах на основе пленок титана, платины и золота часто используется двухстадийное травление. Верхние слои золота и платины обрабатываются через маску из фоторезиста пучком ионов чистого аргона. При добавлении кислорода пленка титана срабатывает как защитный слой. Быстрое удаление титана плазменным или жидкостным травлением завершает получение элементов с хорошим разрешением.

В процессе реактивного ионно-лучевого травления ионы падают нормально, т.е. $\alpha = 0$, и тогда зависимость скорости травления материалов от угла падения ионов с достаточной степенью точности может быть описана формулой

$$V_{\text{тр}}(\alpha) = V_{\text{тр}}(0) \cos \alpha. \quad (8.13)$$

Подставляя для материала маски выражение (8.13) в формулы (8.11), (8.12) и заменяя отношение скоростей селективностью, можно получить

$$\text{tg} \varphi = S_{\text{пм}} \text{tg} \alpha; \quad \delta = (d / S_{\text{пм}})(1 / \text{tg} \alpha); \quad (8.14)$$

$$b = b_M + (2d / S_{\text{пм}})(1 / \text{tg} \alpha). \quad (8.15)$$

Из соотношения (8.15) легко оценить угол наклона края элемента в маске, который необходим для получения требуемого разрешения в подложке при заданной селективности травления. Выражения (8.10) и (8.14), (8.15) связывают в общем виде геометрические параметры профиля элемента, получаемого в подложке реактивным ионно-лучевым травлением, с учетом наклона края элемента в маске с анизотропностью и селективностью процесса травления. Высокий показатель анизотропии травления процессов реактивного ионно-лучевого травления ($A = 10\text{--}100$) позволяет получать в слоях рабочих материалов элементы субмикронных размеров, вплоть до 0,1 мкм. Из вакуумно-плазменных процессов травления только процессы ионно-лучевого травления обладают такой же разрешающей способностью.

8.5. Выбор и обработка маскирующих материалов при ионном травлении

Для качественной передачи изображения на подложку при ионном травлении маска должна удовлетворять следующим требованиям: быть высокоразрешающей и иметь угол наклона боковых стенок как можно ближе к 90° , быть стойкой к воздействию ионной бомбардировки и температуры, иметь минимальную скорость травления по отношению к скорости травления материала подложки. Для получения высокого разрешения отношение толщины маски к толщине рабочего материала должно быть как можно меньше, так как разрешение маски увеличивается с уменьшением ее толщины, а разрешение в рабочем материале улучшается из-за ослабления эффектов переосаждения. При малых толщинах маски еще больше повышаются требования к ее стойкости и низкой скорости ионного травления. Действительно, селективность ионного травления определяется отношением коэффициентов распыления маски K_M и подложки K_P , поэтому через маску толщиной d_M можно протравить подложку на глубину

$$d_P = d_M \frac{K_P}{K_M}.$$

По виду используемых материалов маски подразделяются на три класса: маски из пленок органических полимерных материалов (ОПМ); маски из пленок различных металлов и маски из пленок неорганических или диэлектрических материалов (углерода, двуокиси и нитрида кремния и др.).

Скорости травления ОПМ обычно сравнимы со скоростями травления материалов подложек (рабочих материалов), поэтому отношение $V_{тр.м}/V_{тр.п}$ близко к единице. Поэтому глубина травления материалов подложек d_P близка к толщине ОПМ d_M , которая лежит в диапазоне 0,5–1,5 мкм. При ионном травлении с использованием ОПМ для масок возникает три проблемы. Первая связана с необходимостью поддерживать в распылительной камере низкий уровень давления химически активных газов (O_2 , H_2 , паров воды), которые резко увеличивают скорости травления ОПМ. Для обеспечения стабильной и низкой скорости ионного травления парциальные давления химически активных газов не должны превышать 10^{-4} Па. Вторая проблема связана с низкой термостойкостью ОПМ, которая ограничивает плотность мощности ионного тока на мишени и требует эффективно-го охлаждения подвергаемых травлению образцов. ОПМ не выдерживают длительного воздействия температур выше 423–473 К. Третья

проблема связана с удалением остатков ОПМ после травления. В результате ионной бомбардировки ОПМ полимеризуются, что затрудняет удаление фоторезиста в обычных растворителях.

В качестве металлических масок обычно используются пленки титана, хрома, ванадия, молибдена, тантала и алюминия, скорость травления которых уменьшается при добавлении к инертному газу небольшого количества кислорода. Через металлические маски можно проводить глубокое травление подложек из материалов, скорость травления которых незначительно уменьшается в присутствии кислорода (кремния, двуокиси кремния, меди, серебра и др.) или совсем не уменьшается (золота, платины и др.). В табл. 8.2 приведены значения скоростей травления большого количества материалов, полученные в следующих условиях: энергия ионов аргона 1,0 кэВ, плотность тока $1,0 \text{ мА/см}^2$, давление остаточных газов в камере травления $6,6 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$.

Таблица 8.2

**Скорость травления различных материалов
под действием пучка ионов аргона**

Распыляемый материал	Скорость травления, нм/мин	Распыляемый материал	Скорость травления, нм/мин
Кремний	36	Алюминий	44,4
Арсенид галлия	260	Цирконий	32
SiO ₂ (термический)	42	Ниобий	30
SiO ₂ (напыленный)	38	Железо	32
Фоторезист KTFR	39	Оксид железа	66
Фоторезист AZ1350	60	Молибден	40
Электронный резист ПММА	84	Титан	20
Серебро	200	Хром	20
Золото	160	Оксид алюминия	13

Из табл. 8.2 видно, что скорости травления большинства металлов лежат в диапазоне 20–40 нм/мин, что сравнимо со скоростями травления кремния, двуокиси кремния и фоторезистов. При переходе от чистых металлов (алюминия, железа) к их оксидам скорость травления уменьшается, что подтверждает возможность использования металлических масок при травлении в присутствии кислорода.

В качестве металлической маски можно использовать пленки углерода (графита), который имеет самый низкий из всех материалов коэффициент распыления в чистом аргоне.

8.6. Модель процесса травления материалов энергетическими и химически активными частицами

Вакуумно-плазменное травление осуществляется в неравновесной низкотемпературной газоразрядной плазме низкого давления, в которой средняя энергия электронов значительно (в 10–100 раз) превышает энергию ионов, атомов, молекул и радикалов. Отсутствие термического равновесия между электронами и тяжелыми частицами позволяет получить плазму, температура молекул которой близка к температуре окружающей среды, а электроны обладают энергией, достаточной для возбуждения диссоциации и ионизации молекул. Именно это свойство электронов дает процессам, происходящим в низкотемпературной плазме, основное преимущество: выход продуктов реакций значительно больше термодинамически равновесного, рассчитанного только исходя из температуры газа. Например, в плазме тлеющего разряда при давлении 100 Па и средней температуре молекул газа около 800 К степень диссоциации водорода может достигать стандартных значений, близких к единице, тогда как равновесная степень диссоциации молекул водорода при 800 К составляет около 10^{-10} . Средние энергии электронов в плазме разрядов, используемых для реализации процессов вакуумно-плазменного травления, составляют 1–10 эВ, плотности электронов – 10^9 – 10^{12} см⁻³, тогда как энергии молекул газа 0,05–0,1 эВ, а плотности при давлениях 0,1–500 Па составляют 10^{13} – 10^{17} см⁻³.

В низкотемпературной газоразрядной плазме низкого давления происходят возбуждение и ионизация молекул рабочего газа, а также их диссоциация на свободные атомы и радикалы. Принципиально любая из этих частиц – возбужденная молекула, ион, свободный атом или радикал – может являться химически активной частицей, участвующей в первичной элементарной реакции. За первичной реакцией могут последовать, в зависимости от условий, вторичные реакции, которые могут происходить не только в плазме, но и в газовой фазе вне плазмы, а также на стенках реакционных камер. Химические процессы, происходящие в плазме, обычно очень сложны и включают большое количество элементарных реакций и взаимодействий: между электронами и молекулами, электронами и радикалами, электронами и ионами, ионами и молекулами, ионами и ионами. Таким образом, в низкотемпературной и газоразрядной плазме концентрация ХАЧ (свободных атомов и радикалов) определяется не термодинамическим равновесием, а стационарным состоянием, возникающим вследствие конкуренции различных процессов образования (генерации) и гибели (рекомбинации) ХАЧ.

В основе процессов радикального травления лежат гетерогенные химические реакции, происходящие на границе твердой и газообразной фаз между ХАЧ (свободными атомами и радикалами), образующимися при диссоциации молекул рабочего газа в низкотемпературной плазме газовых разрядов, и активными центрами обрабатываемого материала, представляющими собой поверхностные атомы со свободными валентностями. В результате реакций образуются стабильные, летучие при температуре процесса продукты реакции, которые десорбируются с обрабатываемой поверхности, переходят в газовую фазу и откачиваются вакуумным насосом. При плазменном травлении на эти реакции оказывают влияние электронная и низкоэнергетическая ионная бомбардировки, а при ионно-химическом травлении – еще и физическое распыление, которое в некоторых случаях может стать основным механизмом удаления материала.

Процессы плазмохимического травления (ПХТ) и ионно-химического травления (ИХТ) являются гетерогенными и многостадийными. В их механизме можно выделить следующие стадии: доставка молекул рабочего газа в зону плазмы газового разряда; превращение молекул рабочего газа в энергетические и химически активные частицы в плазме газового разряда; доставка энергетических и химически активных частиц к поверхности обрабатываемого материала; взаимодействие энергетических и химически активных частиц с поверхностью обрабатываемого материала; отвод продуктов взаимодействия от поверхности обрабатываемого материала.

Доставка молекул рабочего газа в зону плазмы газового разряда и к поверхности обрабатываемого материала

Важным вопросом при ПХТ и ИХТ материалов является влияние состава рабочего (плазмообразующего, реакционного) газа на процесс травления. Необходимость травления широкого ассортимента материалов, применяемых в микроэлектронике, вызвала появление большого количества разнообразных по составу рабочих газов – как однокомпонентных, так и многокомпонентных.

В основном для ПХТ и ИХТ используются галогеносодержащие соединения, а также их смеси с кислородом, водородом, парами воды, азотом или инертными газами. При удалении (травлении) органических материалов, например остатков фоторезистивных масок, в качестве рабочих газов используются кислород и его смеси с азотом и инертными газами. Из галогеносодержащих газов наибольшее применение нашел четырехфтористый углерод $\text{CF}_4/10^9\text{--}10^{12} \text{ см}^{-3}$.

В зависимости от вида используемого разряда и конструкции реактора потока рабочего газа составляют от 1 до $100 \text{ см}^{-3}/\text{мин}$. Очень

редко в специальных процессах и исследованиях газовые потоки могут достигать $1000 \text{ см}^{-3}/\text{мин}$.

На зависимости скорости травления материала от расхода рабочего газа при постоянных уровне мощности разряда и давлении должен наблюдаться максимум. Увеличение расхода рабочего газа вначале способствует эффективной доставке его молекул в зону плазмы и последующей доставке ХАЧ к поверхности обрабатываемого материала, что увеличивает скорость травления. При дальнейшем увеличении расхода газа наступает такой момент, когда ХАЧ будут уноситься потоком газа и откачиваться из реактора, не успев вступить в реакцию с обрабатываемым материалом. Следовательно, скорость травления будет уменьшаться при больших расходах рабочего газа (рис. 8.11).

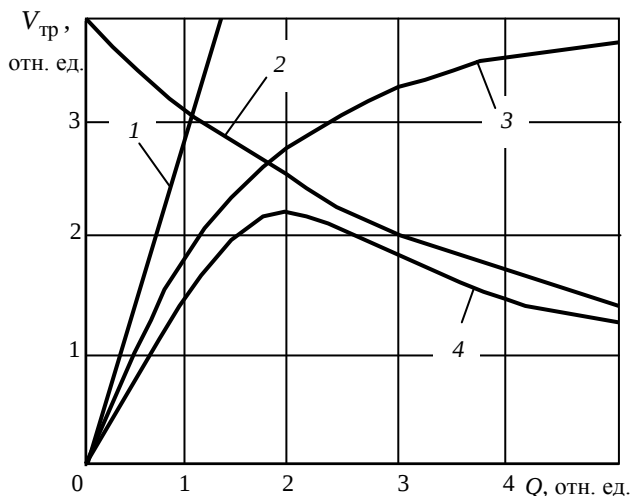


Рис. 8.11. Зависимость скорости травления материалов ХАЧ от расхода рабочего газа при воздействии различных факторов: 1 – при полном использовании ХАЧ для травления; 2 – при откачке ХАЧ насосом; 3 – при недостатке ХАЧ для травления; 4 – результирующая

При травлении материалов с использованием ХАЧ всегда следует выбирать оптимальный расход рабочего газа через реактор, чтобы, с одной стороны, не ограничивать скорость травления материалов недостатком ХАЧ, а с другой стороны, чтобы бесполезно не откачивать непрореагировавшие ХАЧ насосом.

Взаимодействие энергетических и химически активных частиц с поверхностью обрабатываемого материала

Взаимодействие ХАЧ с активными центрами материала включает в себя хемосорбцию свободных атомов и радикалов на свободных центрах, химическую реакцию и последующую десорбцию образующихся продуктов реакции с поверхности материала. Необходимым условием травления материала ХАЧ является возможность образования летучих и стабильных при температуре процесса $T_{\text{пр}}$ (температуре поверхности материала в процессе травления) продуктов реакции. Термин «летучий» означает, что при температуре процесса $T_{\text{пр}}$ давление паров образующихся продуктов реакции должно быть достаточно высоким, чтобы эти продукты испарялись с поверхности материала. Процессы ПХТ и ИХТ являются низкотемпературными, и $T_{\text{пр}}$ не превышает 673 К, а при использовании электронно-резистивных или фоторезистивных масок ее стабилизируют на уровне 373–423 К. По соотношению температуры процессов $T_{\text{пр}}$ и температуры испарения $T_{\text{исп}}$ образующихся продуктов реакции можно выделить три основных условия травления материалов:

1) $T_{\text{пр}} \ll T_{\text{исп}}$. В этом случае невозможно травление материала ХАЧ данного вида в системах ПХТ, так как в результате реакции на поверхности материала образуется нелетучее соединение, которое маскирует материал. Например, алюминий нельзя травить атомами фтора, потому что в результате реакции образуется фторид алюминия с $T_{\text{исп}} = 1529$ К. По аналогичной причине атомами фтора не травятся никель, хром, железо, медь, магний, свинец. В системах ИХТ, где наряду с химическим воздействием поверхность обрабатываемого материала подвергается энергетической ионной бомбардировке, возможно травление материалов путем распыления, даже если образуются продукты с $T_{\text{исп}} \gg T_{\text{пр}}$. Если коэффициент распыления образующегося продукта реакции будет выше коэффициента распыления исходного материала, то скорость ИХТ будет больше скорости ИТ;

2) $T_{\text{пр}} \approx T_{\text{исп}}$. Если образуются стабильные продукты реакции, возможно травление материала ХАЧ в системах ПХТ. Однако низкая скорость удаления образующихся продуктов реакции способствует тому, что процесс травления протекает в кинетической области (т.е. ограничен стадией химической реакции). С увеличением температуры процесса $T_{\text{пр}}$ скорость травления материала должна возрастать. Ионная бомбардировка будет оказывать сильное влияние на скорость

травления материала. Если образующиеся продукты реакции нестабильны (разлагаются), то травление таких материалов в системах ПХТ невозможно. В системах ИХТ такие материалы можно травить распылением. Например, золото не травится в CF_4 в системах ПХТ, а в системах ИХТ хорошо травится;

3) $T_{\text{пр}} \gg T_{\text{исп}}$. Травление материалов в любых системах ПХТ и ИХТ осуществляется, в основном, в результате химических реакций. Высокие скорости химических реакций приводят к тому, что процессы травления материалов протекают в диффузионной области. Небольшие изменения температуры процесса и ионная бомбардировка, если она не способствует повышению эффективной скорости доставки реагента, мало влияют на скорость травления материалов. Скорость и равномерность процесса травления материалов ХАЧ в диффузионной области определяются уровнем и распределением концентрации ХАЧ у поверхности материала, а в кинетической области – уровнем и распределением температуры и концентрации активных центров на поверхности материала (поверхностных атомов со свободными валентностями).

Концентрация активных центров в материале и на его поверхности зависит как от природы и кристаллографической структуры материала, так и от внешних воздействий (температуры, ионизирующего облучения, изотермического отжига и др.). Концентрация таких центров возрастает с повышением температуры и может быть как увеличена предварительным ионизирующим облучением, так и уменьшена изотермическим отжигом. Если образец материала, предназначенного для травления, находится при постоянной температуре и не подвергается (и ранее не подвергался) локальным или неравномерным внешним воздействиям, то активные центры равномерно распределены по всей его поверхности, и в кинетической области обеспечивается равномерное травление образца. Если поверхность материала подвергается в процессе травления (или предварительно подвергалась) локальному ионизирующему облучению (электронными, ионными пучками, световыми, рентгеновскими, гамма-лучами и т.д.), то концентрация активных центров на облученных участках будет выше, чем на необлученных, и в кинетической области обеспечивается ускоренное травление облученных участков.

Стадия взаимодействия ХАЧ с активными центрами материала состоит из трех подстадий: хемосорбции ХАЧ на активных центрах, химической реакции и десорбции образующихся продуктов реакции. Если процесс травления материала протекает в кинетической области, то любая из этих подстадий может быть лимитирующей. При травле-

нии двуокиси нитрида и карбида кремния свободными атомами фтора лимитирующей стадией является десорбция продуктов реакции. При облучении поверхности электронным или ионным пучком скорость травления этих материалов резко возрастала вследствие стимулирования процесса десорбции продуктов реакции.

При плазменном и ионно-химическом травлении поверхность материала подвергается воздействию электронной и (или) ионной бомбардировки. Под действием бомбардировки:

- 1) происходит диссоциация адсорбированных молекул рабочих газов и радикалов типа CF_x и CCl_x (где $x = 1, 2, 3$) с образованием свободных атомов галогенов и углерода;
- 2) увеличивается скорость десорбции молекул продуктов реакций;
- 3) происходит физическое распыление материала, промежуточных продуктов реакций и малолетучих соединений;
- 4) образуются новые активные центры на поверхности материала.

Вышеперечисленные факторы увеличивают скорость травления материалов при плазменном и ионно-химическом травлении по сравнению с радикальным травлением. Отметим, что процессы физического распыления материала и удаления материала вследствие химических реакций в процессах ионно-химического травления складываются неаддитивно, т.е. суммарная скорость травления материала в результате двух процессов намного больше суммы скоростей травления материала в каждом процессе.

Характеристики процесса травления во фторуглеродных газах существенно зависят от относительного содержания фтора и углерода. В настоящее время фторуглеродные газы характеризуются величиной F/C , например для CF_4 величина $F/C = 4$. С уменьшением отношения F/C снижается скорость травления материалов с одновременным повышением селективности травления кислородосодержащих соединений относительно бескислородосодержащих, например SiO_2 относительно Si и Si_3N_4 . В плазме рабочих газов, имеющих одинаковое отношение F/C , но разный состав, например C_3F_8 и смесь $\text{CF}_4:\text{C}_2\text{F}_4=1:1$, наблюдаются качественно подобные масс-спектры и характеристики травления материалов. При уменьшении отношения F/C возрастает количество ненасыщенных фторуглеродных частиц (частиц, у которых атомы углерода имеют свободные валентности или двойные и тройные связи), которые способны полимеризоваться.

Добавка кислорода (до 20–40%) при травлении материалов в плазме фторуглеродных газов увеличивает выход свободных атомов

фтора и скорость травления. Атомы водорода интенсивно реагируют с атомами фтора в плазме разряда, формируя очень стабильные молекулы HF. Поэтому добавка водорода в плазму фторуглеродных газов уменьшает концентрацию атомов фтора, а следовательно, увеличивает концентрации ненасыщенных частиц, которые проявляют склонность к полимеризации на поверхностях. Соответствующей добавкой водорода можно вызвать осаждение полимерных пленок на поверхности в плазме CF_4 или C_2F_6 . Уменьшение отношения F/C с добавкой водорода в плазму фторуглеродных газов приводит к уменьшению абсолютных скоростей травления материалов. Однако небольшие (до 30%) добавки водорода, резко уменьшающие скорость травления кремния, не оказывают заметного влияния на скорость травления SiO_2 , так как выделяющийся при ее травлении кислород связывает атомы водорода, препятствуя его реакции со фтором, а также удаляет полимерные пленки с поверхности. Аналогичное влияние на скорость и селективность травления материалов оказывает использование в качестве рабочих газов соединений, содержащих водород, таких как CHF_3 , CH_2F_2 и др. Добавление азота в плазму галогеносодержащих газов не оказывает заметного влияния на процесс травления материалов, поэтому азот может быть использован как газ-разбавитель.

8.7. Методы плазменного травления

В методе ионно-лучевого травления источником ионов обычно является разряд постоянного тока, причем область разряда физически отделена от подложки системой сеток (электродов), на которые подаются потенциалы для извлечения ионов аргона из разряда (рис. 8.12, а).

Для обеспечения используемых на практике плотностей тока пучка требуется прикладывать напряжение (сообщать ионам энергию) свыше 500 В. Угол падения ионов на подложку можно регулировать наклоном подложкодержателя. Для нейтрализации ионного пучка на его пути размещается разогреваемая нить накала, инжектирующая в пучок электроны низких энергий. Процесс проводят в реакторе при низком давлении газа – 10^{-3} – 10^{-2} Па.

Травление в плазме осуществляется в плазмохимическом реакторе диодного типа. Различают плазменное и реактивное ионное травление. В первом случае подложка размещается на заземленном электроде, во втором – на ВЧ-электроде, на который подается потенциал от источника ВЧ-напряжения с частотой 13,56 МГц (рис. 8.12, б). Реактор откачивается до исходных давлений порядка 10^{-3} – 10^{-4} Па,

а типичные давления при напуске рабочего газа равны 1,33–13,3 Па. Во втором случае заземленным электродом является корпус реактора, площадь которого существенно превышает площадь ВЧ-электрода. При этом потенциал автосмещения на ВЧ-электроде пропорционален величине $(S_0/S_{ВЧ})^N V_{ВЧ}$, где S_0 и $S_{ВЧ}$ – площади заземленного и ВЧ-электродов, а $V_{ВЧ}$ – амплитуда ВЧ-напряжения, обычно $N=1-4$. Как следствие, при плазменном травлении энергии ионов всегда невелики, и реализуется изотропное травление. Такие реакторы используются соответственно для снятия резиста, очистки поверхности и других подобных операций.

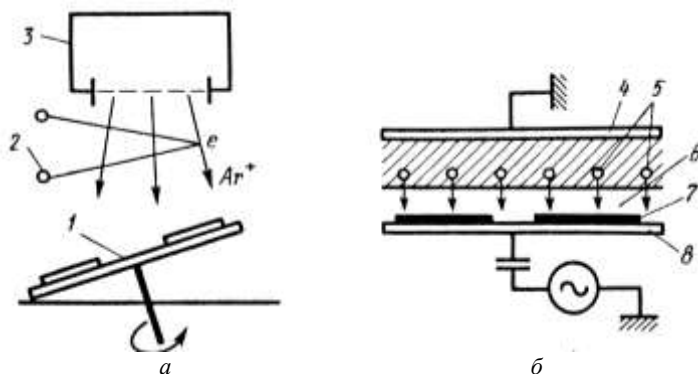


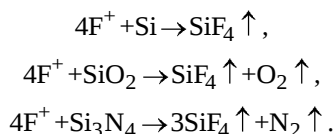
Рис. 8.12. Схемы ионно-лучевого (а) и ионно-плазменного высокочастотного (б) травления: 1 – подложкодержатель; 2 – эмиттер электронов (нейтрализатор); 3 – источник ионов; 4 – анод; 5 – ионы; 6 – ионная оболочка катода; 7 – подложка; 8 – катод

Если отношение площади поверхности катода $S_{ВЧ}$ к заземленной поверхности S_0 достаточно мало, то наибольшее падение напряжения осуществляется на ионной оболочке катода. Направление вектора электрического поля в районе ионной оболочки перпендикулярно поверхности катода, поэтому ионы падают на поверхность под прямым углом, и, следовательно, степень анизотропии травления достаточно высокая.

Реактивное ионное травление отличается от ионного тем, что технологический слой, нанесенный на подложку, бомбардируется ионами химически активных газов O_2 , N_2 или галогенов. Реактивное ионное травление подразделяется на реактивное ионно-лучевое (РИЛТ) и реактивное ионно-плазменное (РИПТ) травление. Реактивное ионно-лучевое травление выполняют пучком ионов химически

активных газов, вытягиваемых из источника ионов (см. рис. 8.12, а). Системы РИПТ аналогичны системам с асимметричными электродами (см. рис. 8.12, б).

Процессы реактивного ионного травления основаны на химическом разрушении технологического слоя, нанесенного на подложки, ионами и радикалами активных газов, образующихся в газоразрядной плазме. В качестве рабочего газа используют такие галогеносодержащие газы, как CF_4 , C_3F_8 , CHF_3 и CCl_3 , радикалы которых активно участвуют в процессе травления. Под воздействием ВЧ-плазмы образуется при возбуждении разряда в CF_4 атомарный фтор, вступающий в реакцию с пленкой кремния, его окиси или нитрида с образованием летучего соединения фторида кремния:



Реактивное ионное травление может протекать при хаотическом воздействии активных частиц, но лучше, чтобы они имели направленное движение, при котором процесс становится анизотропным. Чтобы происходило анизотропное травление, давление в реакторе должно быть не более 10 Па. Реактивное ионно-лучевое травление проводят при низком давлении – 0,1–1 Па.

В методах РИЛТ и РИПТ травление обусловлено сочетанием физического (бомбардировка) и химического (активный газ) воздействий. В методе РИЛТ преобладает механизм распыления материала под действием высокоэнергичных ионов, имеющих направленное движение, что обеспечивает анизотропность травления. В методе РИПТ преобладает химическое взаимодействие ионов и радикалов с поверхностью травимого слоя, что обеспечивает большую скорость травления, но процесс приближается к изотропному.

В качестве примера рассмотрены процессы травления кремния, на поверхность которого падали независимые пучки Ar^+ (450 эВ) и XeFe_2 . Скорости травления, измеренные независимо для каждого пучка, оказались относительно низкими. Ионы Ar^+ осуществляют травление за счет физического распыления; травящее действие молекул XeFe_2 обеспечивается их диссоциацией на поверхности SiC образованием десорбируемого Xe и двух атомов F. Атомы F вступают в реакцию с Si, в результате которых образуются летучие фториды кремния. Скорость травления, измеренная при одновременном

падении обоих пучков на Si, оказалась существенно выше (в восемь раз), чем сумма независимых скоростей, что является проявлением стимулирующего эффекта ионного облучения.

Основными параметрами процесса травления являются рабочее давление газа p , его состав, мощность ВЧ-источника W и расход рабочих газов Q . Состав рабочего газа определяет скорость травления и селективность. Скорость травления Si и SiO₂ в плазме CF₄ относительно низкая (порядка 100 нм/мин). При добавлении в рабочий газ кислорода скорость травления как Si, так и SiO₂ резко возрастает. Максимальная скорость травления достигается для Si при добавлении 12% O₂, для SiO₂ – при добавлении 20% O₂. При дальнейшем повышении концентрации O₂ скорость травления понижается, причем для Si в большей степени, чем для SiO₂. Поэтому плазма CF₄–O₂ характеризуется высокой селективностью травления Si по отношению к SiO₂.

При добавлении в плазму CF₄ водорода наблюдаются следующие явления. В процессе реактивного ионного травления при относительно низком давлении скорость травления SiO₂ почти постоянна для добавок H₂, не превышающих 40%, в то время как скорость травления Si монотонно уменьшается почти до нуля при концентрации H₂ ≥ 40%. При реактивном ионном травлении в плазме CF₄–H₂ достигается селективность травления SiO₂:Si порядка 40:1. Добавки водорода свыше 40% приводят к нежелательному образованию полимеров на поверхности SiO₂.

Понижение давления газа p и повышение мощности разряда W приводят к увеличению средней энергии электронов и энергии падающих на подвергаемую травлению поверхность ионов. Повышение мощности вызывает повышение количества радикалов и ионов в плазме, что увеличивает скорость травления. Кроме того, в процессах ионно-стимулированного травления можно повысить степень анизотропии за счет уменьшения давления газа или увеличения мощности разряда.

Скорость потока рабочего газа Q определяет максимально возможный приток к подложке реакционноспособных компонентов. При обычных условиях протекания процесса скорость Q оказывает незначительные воздействия на скорость травления. Это явление прояв-

ляется при экстремальных условиях, когда либо Q мала и скорость травления лимитируется доставкой травителя к подложке, либо скорость травления столь велика, что унос газовым потоком становится доминирующим механизмом потерь активных компонентов. Возможность реализации последней ситуации зависит от скорости откачки вязкости рабочего газа и вида материалов, находящихся внутри реактора.

При реактивном ионном травлении иногда наблюдается уменьшение скорости травления при увеличении суммарной площади поверхности, подвергаемой травлению. Это явление известно как загрузочный эффект.

Варьируя основные параметры процесса P , W и Q , можно реализовать следующие механизмы травления (рис. 8.13):

- ионно-лучевое физическое или химическое (в зависимости от сорта ионов) распыление (рис. 8.13, *а*);
- изотропное химическое травление главным образом, нейтральными химически активными частицами (рис. 8.13, *б*);
- ионно-стимулированное травление энергетическими ионами и химически активными нейтрами (рис. 8.13, *в*);

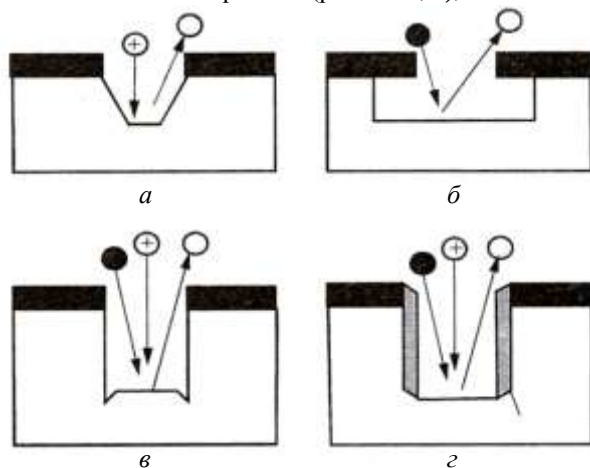


Рис. 8.13. Формы канавок в результате травления:

- а* – физическое или химическое распыление; *б* – химическое изотропное травление; *в* – стимулированное энергетическими ионами травление; *г* – ионно-стимулированное травление с участием ингибитора;

⊕ – ион; ● – нейтральная химически активная частица; ○ – летучие продукты

– ионно-стимулированное травление с участием пассивирующих частиц-ингибиторов, высаживаемых на поверхность из плазмы, что достигается соответствующим подбором состава газов (рис. 8.13, з).

В этом случае энергии ионов не столь велики, как в первых двух. Частицы ингибитора защищают стенки канавки от воздействия изотропных химически активных частиц, что повышает анизотропность процесса травления.

Методы плазменного травления наиболее широко используются в микро- и нанотехнологии для травления двуокиси кремния и нитрида кремния, поликристаллического кремния, силицидов тугоплавких металлов, алюминия и др. Типичные значения скорости травления и селективности приведены в табл. 8.3.

Таблица 8.3

**Скорость травления и селективность для некоторых процессов
сухого травления**

Материал, подвергаемый травлению (М)	Газ	Скорость травления, нм/мин	Селективность		
			М/резист	М/Si	М/SiO ₂
Al, Al-Si, Al-Cu	BCl ₃ +Cl ₂	50	5–8	3–5	20–25
Поликристаллический кремний	Cl ₂	50–80	5	–	25–30
SiO ₂	CF ₄ +H ₂	50	5	20	
ФСС	CF ₄ +H ₂	80	8	32	

При травлении затворов из поликристаллического кремния требуется высокая степень анизотропии, так как длина затвора – критический размер, определяющий длину канала МПД-транзистора. Для анизотропного травления Si наиболее широко применяются газы и газовые смеси, содержащие хлор. Использование плазмы Cl₂ и Cl₂-Ag в процессе реактивного ионного травления нелегированного кремния обеспечивает высокую степень анизотропии. Сильнолегированный ($\geq 10^{20} \text{ см}^{-3}$) материал *n*-типа при аналогичных условиях подтравливается в горизонтальном направлении. При плазменном травлении осуществляется боковое травление в плазме Cl₂ как легированного, так и нелегированного материала, причем скорость травления сильнолегированного поликристаллического кремния *n*-типа на порядок выше, чем нелегированного материала или материала *p*-типа.

Для травления алюминиевых сплавов (Al-Si, Al-Cu), применяемых в технологии СБИС, предпочтительно использование хлоросодержащих газов, таких как CCl₄, BCl₃, SiCl₄ или смесей этих

газов с Cl_2 . Поверхность свежесажженного Al , не покрытая окислом Al_2O_3 , вступает в реакции с Cl и Cl_2 с образованием летучего соединения $\text{Al}-\text{Cl}_3$ даже в отсутствие плазмы. Однако алюминий, как правило, покрыт тонкой ≈ 3 нм пленкой естественного окисла, не реагирующего ни с Cl , ни с Cl_2 . Этот окисел необходимо удалять до начала травления посредством либо распыления, либо химического восстановления. Такие газы, как BCl_3 и CCl_4 , при диссоциации в плазме образуют радикалы, способные восстанавливать тонкие пленки окисла.

Анизотропное травление обеспечивается в режимах как реактивного ионного, так и плазменного травления. Сплавы Al-Cu $\leq 4\%$ Cu значительно хуже подаются травлению, поскольку медь не образует летучих галогенидов. После реактивного травления таких сплавов часто наблюдаются остаточные соединения, содержащие медь. Для удаления остаточных соединений применяют высокоэнергетические ионы или жидкостное химическое травление.

Основными преимуществами «сухих» методов обработки при фотолитографии являются возможности удаления фоторезистивной маски после травления в едином технологическом цикле, а также очистка подложек от остатков фоторезиста и других загрязнений. Для удаления фоторезиста используют плазму кислорода. Ионы кислорода при температуре подложки $150\text{--}200^\circ\text{C}$ активно окисляют слой фоторезиста, в результате чего образуются летучие соединения CO_2 , NO_2 , H_2O и др. Скорость удаления слоя ФР зависит от давления кислорода, ВЧ-мощности и лежит в пределах $0,05\text{--}0,3$ мкм/мин.

Разработанные процессы ионно-плазменного травления позволяют травить большинство материалов, используемых в процессах микро- и нанотехнологии с требуемой селективностью и анизотропией. Улучшение селективности и контроля профиля травления становится особенно важным по мере дальнейшего уменьшения размеров схемных элементов.

Для нанометрового разрешения при нанометровой толщине потребуются новые резисты с нулевой скоростью травления, необходимой для ограничения изменения размеров при обработке до значений, меньших толщины экспонированного слоя резиста. С этой точки зрения следующим поколением резистов для реактивно-ионного травления будут неорганические маска и металлоорганические резисты.

8.8. Устройства для реализации плазмохимического травления

Для реализации ПХТ используются диодные ВЧ-реакторы с расположением подложки на заземленном или на ВЧ-электроде, рассмотренные в предыдущем разделе. Недостатком таких реакторов является расположение подложки непосредственно в зоне плазмы, что не позволяет отдельно регулировать параметры плазмы и энергию бомбардирующих поверхность ионов.

Дальнейшим шагом в технике ПХТ является использование индуктивно связанной плазмы (ИСП) и плазмы с электронно-циклотронным резонансом (ЭЦР). Схемы устройств показаны на рис. 8.14.

В ЭЦР-реакторе ввод СВЧ-энергии в плазму осуществляется через волновод. СВЧ-плазма при ЭЦР на частоте 2,45 ГГц удерживается магнитным полем в центральной части реактора, не соприкасаясь со стенками камеры. Ионы извлекаются из плазмы на подложку, на которую подается ВЧ-потенциал 13,56 МГц. Аналогичные процессы имеют место в ИСП-реакторах, в которых ВЧ подается на катушку-индуктор. За счет протекания тока по катушке возникает продольное магнитное поле, удерживающее плазму в центре реактора.

В данных устройствах в связи с тем, что для поддержания газового разряда и задания потенциала рабочего электрода используются различные ВЧ-источники, реализуется независимая регулировка степени ионизации плазмы и энергии бомбардирующих поверхность ионов. При этом имеет место высокая степень диссоциации газа, а также ионизации плазмы (10^{11} – 10^{13} см⁻³), низкое рабочее давление газа (10^{-1} –50 Па) и низкая температура ионов (менее 10 эВ).

Для реализации процессов травления в субмикронной технологии в лабораториях ФТИАН разработаны плазмохимические установки с широкоапертурным источником плотной плазмы. Сам источник плотной плазмы рассмотрен в настоящем учебном пособии. Для травления материалов используется ВЧ-индуктивный источник с магнитным удержанием плазмы со следующими характеристиками:

- генератор 13,56 МГц до 3 кВт;
- диапазон рабочих давлений ($1 \cdot 10^{-2}$ –1) Па;
- рабочие газы: H₂, He, Ar, C_xF_y, SF₆, O₂, BF₃;
- плотность плазмы (разряд в аргоне): $3 \cdot 10^{12}$ см⁻³ при $5 \cdot 10^{-1}$ Па.

В источнике достигнута высокая плотность плазмы и высокая радиальная однородность, низкая температура электронов. На рис. 8.15 показан пример травления кремния на установке с источником плотной плазмы.

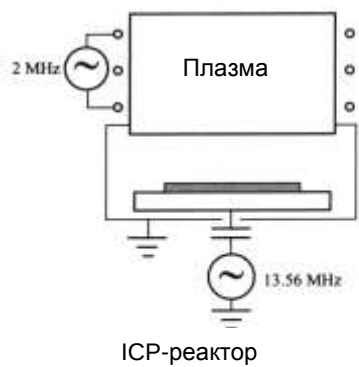
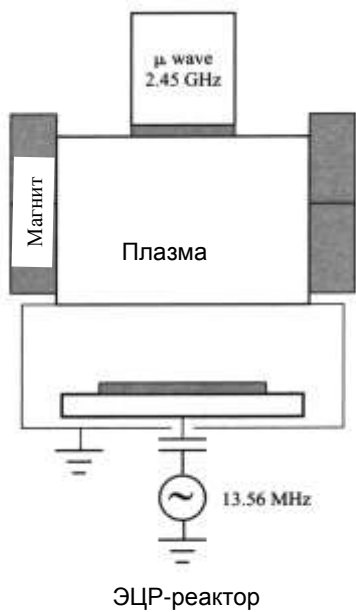


Рис. 8.14. Схемы ЭЦР- и ICP-реакторов

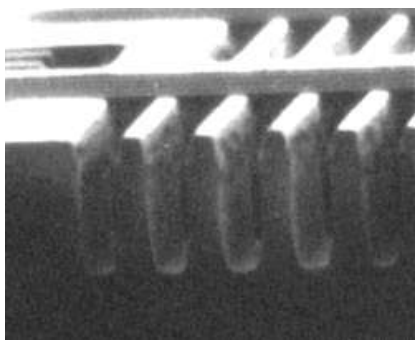


Рис. 8.15. Тренчи в кремнии шириной 0,5 мкм

На этой же установке были получены щели шириной 82,6 и 40 нм.

9. Осаждение металлов и диэлектриков

9.1. Атомно-слоевое химическое осаждение из газовой фазы

Атомно-слоевое химическое осаждение из газовой фазы (АС ХОГФ) с дискретной подачей реагентов или, другими словами, осаждение атомарных слоёв (atomic layer deposition, ALD) является одним из вариантов метода химического осаждения из газовой фазы. В процессе АС ХОГФ реализуются дискретные самоостанавливающиеся химические реакции молекул одного периодически подаваемого реагента с адсорбированным на поверхности подложки слоем другого периодически подаваемого реагента. В промежутках времени между подачами реагентов происходит продувка инертным газом или откачка реактора с целью удаления реагентов и/или продуктов реакций.

Впервые процесс АС ХОГФ был предложен в 1974 г. Т. Сантолой (Tuomo Suntola) с коллегами для улучшения качества плёнок ZnS, используемых для электролюминесцентных дисплеев. Первый американский патент по данной тематике был заявлен в 1977 г.

Основной характеристикой АС ХОГФ является толщина плёнки, получаемая на подложке за один цикл осаждения, включающий подачу первого реагента и его удаление, а также подачу второго реагента и его удаление вместе с продуктами реакции. Типичные скорости осаждения составляют 0,01–1,0 нм/цикл при длительности цикла осаждения от 1 до 60 с. Таким образом, плёнки в процессе АС ХОГФ наносятся послойно, а толщина плёнки легко и очень точно задаётся и контролируется по количеству циклов осаждения.

Время цикла осаждения зависит от скорости насыщения поверхности подложки реагентами (скорости создания сплошного адсорбированного монослоя), объёма и конструкции реактора, а также длительности цикла откачки или продувки реактора. В ряде случаев с целью уменьшения длительности цикла продувка реализуется при давлении инертного газа, более высоком, чем давление процессных газов. Такой процесс называется импульсным слоевым ХОГФ (ИС ХОГФ) и характеризуется повышенной в несколько раз скоростью осаждения. Механизмы осаждения при этом остаются неизменными.

Вследствие того, что реагенты подаются и удаляются из реактора дискретно, химические реакции могут происходить только на поверхности твёрдого тела. Отсутствие реакций в газовой фазе исключает возможность формирования пылевых частиц в объёме реактора, что в ряде случаев наблюдается при росте плёнок методом классического ХОГФ.

К достоинствам метода АС ХОГФ можно отнести:

- высокую стехиометричность состава осаждаемой плёнки по всей площади полупроводниковой структуры;
- конформность покрытия ступенек, в том числе и с большим аспектным соотношением;
- возможность контролируемого роста сверхтонких плёнок посредством счёта числа циклов (числа моноатомных слоёв);
- возможность реализации низкотемпературного и плазмостимулированного процессов осаждения, в том числе и на «чувствительные» подложки;
- бездефектное осаждение (нет проколов и пылевых частиц), так как нет газофазных реакций;
- широкий диапазон осаждаемых материалов (оксиды: HfO_2 , Al_2O_3 , Ta_2O_5 , TiO_2 , La_2O_3 , SiO_2 , нитриды: TiN , TaN , AlN , GaN , Si_3N_4 , металлы: Ru , Cu , W , Mo , Ru и др.).

Очевидным недостатком технологии АС ХОГФ является низкая скорость осаждения – порядка одного монослоя за секунду. В результате данный метод сложно использовать для осаждения толстых плёнок (более 50 нм), а перспектива его применения открывается, начиная с технологий с топологической нормой 65 нм и менее.

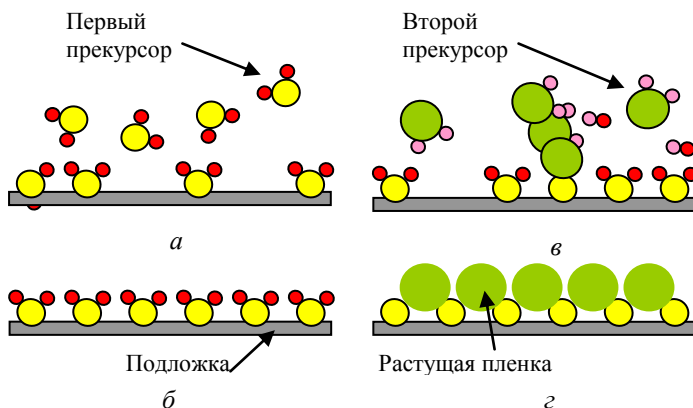


Рис. 9.1. Атомно-слоевое химическое осаждение из газовой фазы: основные этапы процесса

Этапы АС ХОГФ. Типовой процесс АС ХОГФ включает четыре основных последовательно реализуемых этапа (рис. 9.1):

- импульсный напуск в вакуумную камеру первого прекурсора (реагента), его адсорбция, хемосорбция и образование монослоя, при этом процесс адсорбции останавливается после полного покрытия поверхности (самоостанавливающийся процесс адсорбции) (рис. 9.1, а);

- удаление остатков прекурсора (рис. 9.1, б);
- импульсный напуск второго прекурсора, его адсорбция и вступление в поверхностную химическую реакцию, в результате которой на поверхности остаётся один монослой осаждаемой плёнки (рис. 9.1, в);
- удаление остатков второго прекурсора и продуктов реакции (рис. 9.1, г).

Затем процесс повторяется.

На рис. 9.2 представлена зависимость толщины осаждённого за один цикл слоя от длительности экспозиции подложки в атмосфере прекурсора TiCl_4 . Видно, что, начиная с 20 мс, толщина адсорбированного слоя достигает предельного значения и дальнейшее увеличение времени экспозиции не ведёт к её росту. То есть после образования первого полного монослоя адсорбата образование второго монослоя становится практически невозможным, так как процессы десорбции преобладают над процессами адсорбции. За счёт самоостанавливающегося процесса адсорбции и некоторого перезаэкспонирования поверхности в среде прекурсора гарантируется создание сплошного монослоя адсорбата на всех (вертикальных, горизонтальных и наклонных) поверхностях полупроводниковой структуры. При подаче второго реагента в химическую реакцию может вступить только монокатомный адсорбированный слой первого прекурсора, что обеспечивает самоостанавливающийся процесс роста осаждаемой плёнки и, как следствие, высочайшую его однородность и конформность.

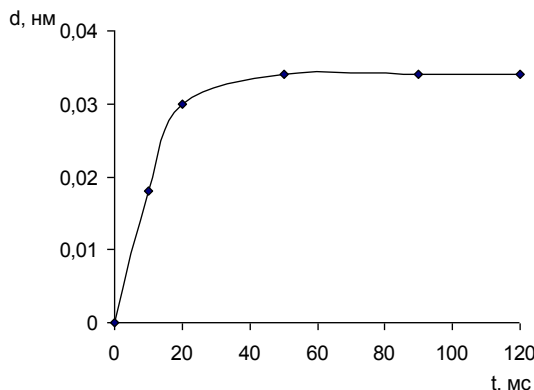
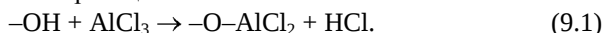


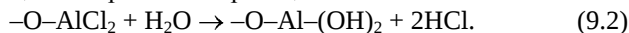
Рис. 9.2. Зависимость толщины слоя адсорбата, осаждённого за один цикл напуска газа, от длительности экспозиции

Рассмотрим подробнее технологию осаждения плёнки Al_2O_3 с использованием следующих исходных реагентов: AlCl_3 и H_2O . Молекула воды используется в качестве окислителя для атома Al, который доставляется на поверхность с помощью летучего соединения хлори-

да алюминия. На первом шаге производится импульсный напуск паров H_2O в камеру установки. Характерное время напуска составляет доли секунды. В результате самоостанавливающегося процесса на поверхности полупроводниковой структуры формируется монослой адсорбированных $-\text{OH}$ -групп. Затем на втором шаге избыточные пары H_2O удаляются из камеры посредством её продувки инертным газом или откачки. На следующем шаге производится импульсный напуск второго прекурсора (AlCl_3), приводящий к реализации следующей поверхностной реакции:

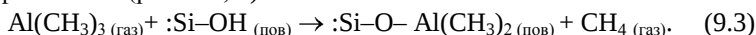


Затем путём продувки инертным газом выполняется удаление избыточного AlCl_3 , а также летучих продуктов реакции. На пятом шаге опять импульсно напускаются пары H_2O , в результате чего происходит следующая поверхностная реакция:

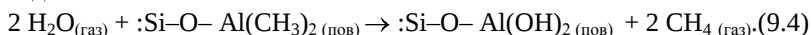


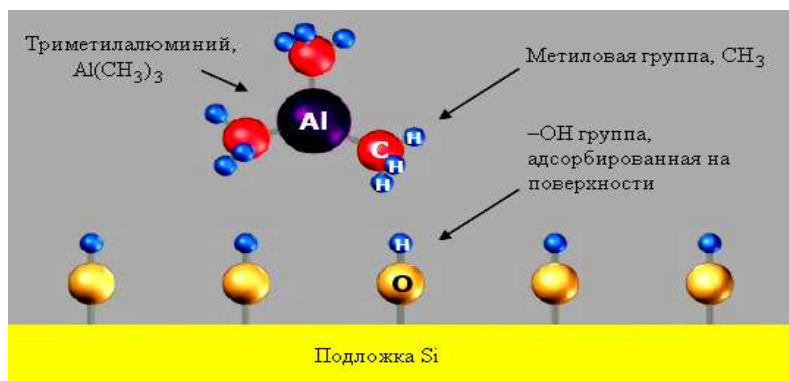
Затем производится последовательный повтор операций, начиная со второго шага и заканчивая пятым шагом. Так слой за слоем производится рост плёнки Al_2O_3 .

Аналогичный механизм роста плёнки реализуется при её осаждении из других исходных реагентов, например из газовой системы ТМА/ H_2O (рис. 9.3), где ТМА – металлоорганическое соединение триметилалюминий, $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$. После напуска и удаления паров воды на поверхности Si формируется монослой адсорбированных Si-OH -групп, а в камеру производится импульсный напуск ТМА (рис. 9.3, а). ТМА реагирует с адсорбированными гидроксильными группами, в результате чего образуется находящийся в сорбированном состоянии радикал DMA (диметилалюминий, $\text{Al}(\text{CH}_3)_2$), и находящийся в газовой фазе метан (рис. 9.3, б):

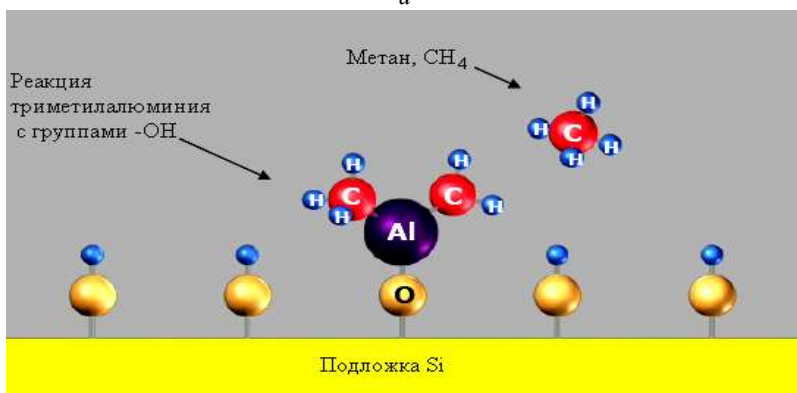


Таким образом, из одной молекулы ТМА образуется один радикал DMA, а поверхность после напуска второго реагента насыщается радикалами DMA. Последующая продувка аргоном удаляет из газовой фазы избыточное количество молекул ТМА, а также продукта реакции – метана (рис. 9.3, в). На следующем шаге в реактор опять напускаются пары воды (рис. 9.3, г). Молекулы воды реагируют с метиловыми группами (CH_3), формируя кислородные мостики между атомами алюминия (Al-O-Al), а также гидроксильные группы, прикрепленные к атомам Al . Летучим продуктом реакции является опять метан (рис. 9.3, д). Данную реакцию можно представить в следующем виде:

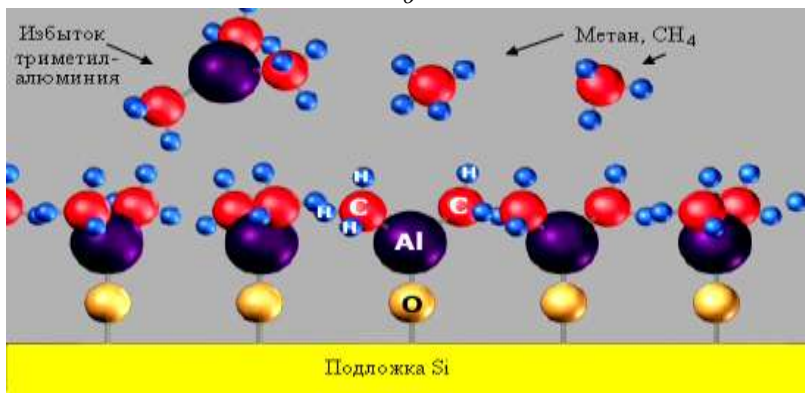




a

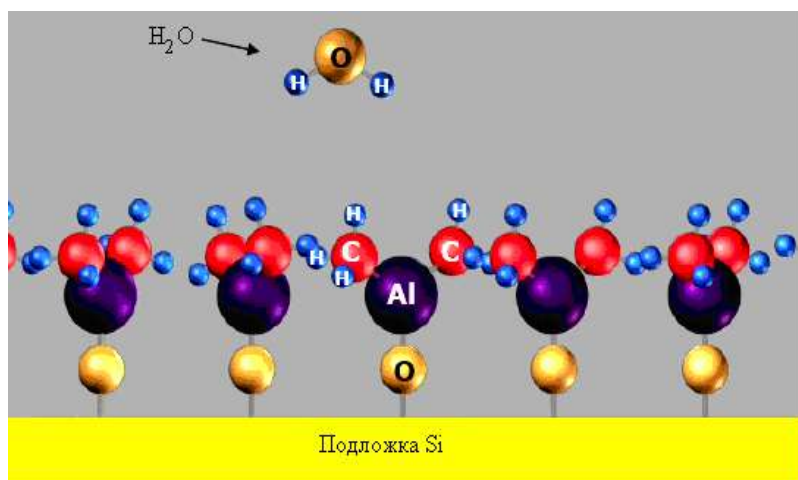


б

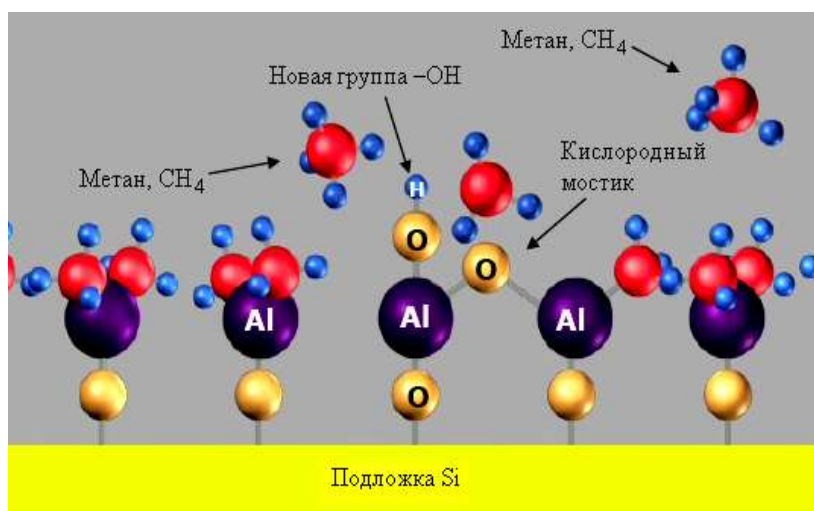


в

Рис. 9.3 (начало). Последовательность роста плёнки Al_2O_3 методом АС ХОГФ с использованием в качестве прекурсоров $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$ и H_2O (а, б, в)

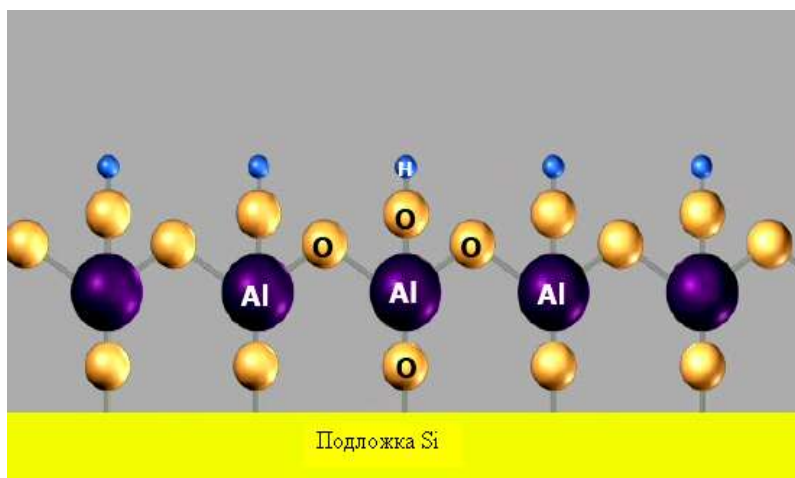


z

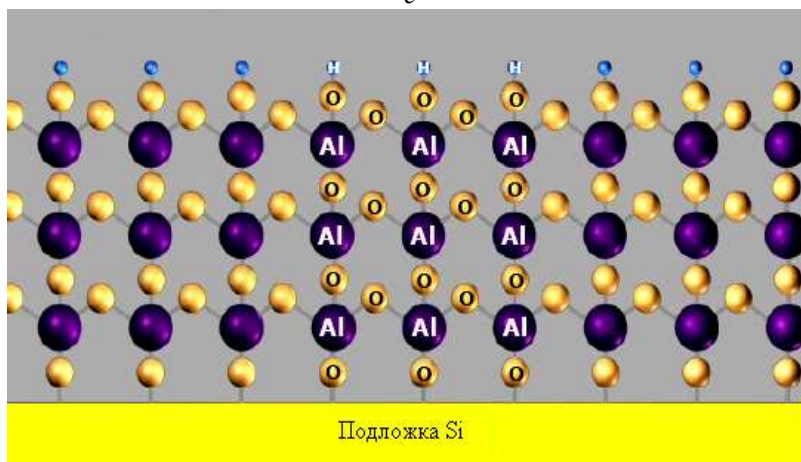


d

Рис. 9.3 (продолжение). Последовательность роста плёнки Al_2O_3 методом АС ХОГФ с использованием в качестве прекурсоров $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$ и H_2O (z, d)



e



ж

Рис. 9.3 (окончание). Последовательность роста плёнки Al_2O_3 методом АС ХОГФ с использованием в качестве прекурсоров $\text{Al}(\text{CH}_3)_3$ и H_2O (*e*, *ж*)

Поверхностная реакция продолжается до тех пор, пока не про-реагируют все метиловые группы, а верхний монослой вещества не будет иметь вид, изображённый на (рис. 9.3, *e*). Затем из реактора удаляются избыточные пары воды и CH_4 , в результате система приходит в состояние, аналогичное исходному: поверхность оканчивается $-\text{OH}$ -группами, которые правда связаны уже не с атомами Si, а с атомами Al. После выполнения всех этих операций на поверхности

сформирован первый монослой плёнки толщиной примерно 0,1 нм. Затем весь цикл повторяется снова и снова, что приводит к наращиванию плёнки Al_2O_3 (рис. 9.3, ж).

Реакторы для АС ХОГФ. Известны четыре основных типа реакторов для реализации процесса АС ХОГФ: реактор закрытого типа, реактор открытого типа, реактор полужакрытого типа, реактор полуоткрытого типа. На рис. 9.4 представлена схема наиболее часто используемой установки с реактором закрытого типа, там же приведена схема газовой системы установки и диаграмма дискретного напуска реагентов и продувки реактора, а также напуска балластного газа. Установка (рис. 9.4, а) состоит из источников реагентов с контролируемой температурой, которые отделены от реактора импульсными клапанами напуска газов. Реагенты поступают в реактор по трубам, которые в зависимости от типа используемых реагентов могут иметь либо комнатную, либо повышенную температуру. Нагрев трубопровода необходим для того, чтобы предотвратить конденсацию слаболетучего при комнатной температуре реагента на стенки газовой магистрали. Пластины Si располагаются в центре реактора, который нагревается до температуры, необходимой для осуществления поверхностных химических реакций. Используемые газы откачиваются с другого конца реактора и утилизируются.

Более подробная газовая схема установки приведена на рис. 9.4, б. Видно, что установка имеет дополнительную газовую магистраль для импульсной продувки и подачи балластного газа. Подача на выход установки балластного инертного газа необходима, для того чтобы система удаления газов имела газовую нагрузку в течение всего времени своей работы, в том числе и в те моменты времени, когда закрыта подача реагентов и не производится продувка реактора (на рис. 9.4, в).

Рассмотрим временную диаграмму работы газовой системы более подробно (рис. 9.4, г). После осуществления «нулевого» цикла – продувки реактора, осуществляется первый цикл, в течение которого производится подача хемосорбирующегося на поверхности подложки реагента. Его длительность подбирается так, чтобы полностью завершилась хемосорбция молекул реагента на всех активных центрах адсорбции поверхности подложки. Показателем правильности выбранной длительности служит независимость толщины получаемой плёнки за цикл осаждения от длительности первого цикла. В течение первого цикла на выходе из реактора производится напуск балластного газа.

Время следующего цикла продувки инертным газом выбирается из условия полного удаления первого реагента из реактора. Показателем правильности выбора длительности этого цикла служит отсутст-

вие реакций между реагентами в газовой фазе и осаждения пылевых частиц после подачи второго реагента. В течение второго цикла напуск балластного газа не производится, так как система удаления газов нагружена на реактор.

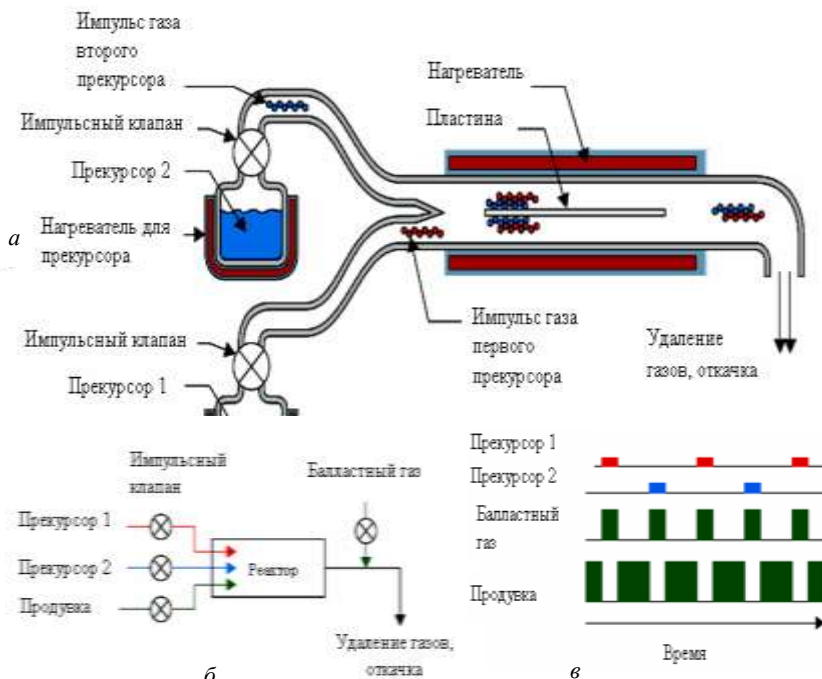


Рис. 9.4. Схемы реактора закрытого типа для АС ХОГФ (а), газовой системы (б), а также временная диаграмма работы газовой системы (в)

Длительность третьего цикла (цикла напуска второго реагента) выбирается из условия достижения максимальной толщины получаемой плёнки. Показателем правильности выбранной длительности служит независимость толщины получаемой плёнки за цикл осаждения от длительности второго цикла. В течение третьего цикла опять производится напуск балластного газа.

Длительность четвёртого цикла (продувки инертным газом) выбирается из того же условия, что и длительность второго цикла.

Применение АС ХОГФ. Метод АС ХОГФ перспективен для получения плёнок подзатворного диэлектрика с высокой диэлектрической проницаемостью ϵ (high-k dielectric), плёнок диэлектрика в транш-конденсаторах ИС памяти, создания барьерных плёнок при

формировании медной разводки, а также осаждения различных типов плёнок на пористые диэлектрики с низкой диэлектрической проницаемостью (low-k dielectric). Наиболее часто используют следующие диэлектрические плёнки: Al_2O_3 (рис. 9.5), HfO_2 или ZrO_2 . При этом применяют следующие прекурсоры: $\text{Al}(\text{CH}_3)_3/\text{H}_2\text{O}$ или $\text{Al}(\text{CH}_3)_3/\text{O}_3$ для роста плёнки Al_2O_3 ; $\text{HfCl}_4/\text{H}_2\text{O}$ или $\text{ТЕМАН}/\text{H}_2\text{O}$ для роста плёнки HfO_2 ; $\text{ZrCl}_4/\text{H}_2\text{O}$ для роста плёнки ZrO_2 . Для создания барьерных плёнок исследуются возможности применения плёнок WN , TaN , WNC , Ru и Ir .

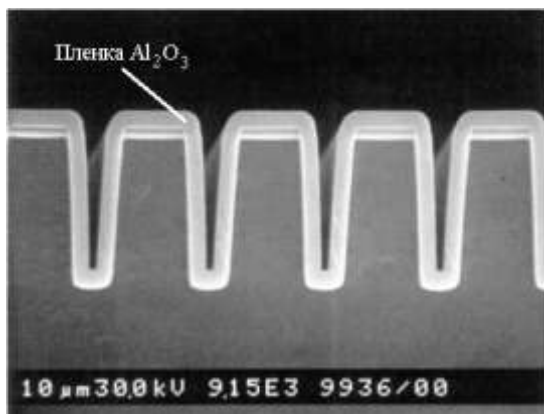


Рис. 9.5. Микроскопическое изображение поперечного сечения структуры Si, в которой сформированы канавки с высоким аспектным отношением и на поверхность которой методом АСХОГФ осаждена плёнка Al_2O_3 . Видна высокая конформность покрытия плёнкой всех поверхностей структуры

9.2. Ионное и ионно-плазменное осаждение тонких пленок в технологии интегральных схем

9.2.1. Общая характеристика

В настоящее время различают несколько методов ионного и ионно-плазменного нанесения тонких пленок:

- ионно-плазменное нанесение тонких пленок, основанное на применении электрического разряда в атмосфере инертного газа, при котором мишень и подложка играют роль электродов;
- реактивное ионно-плазменное нанесение тонких пленок, основанное на химическом взаимодействии распыляемых из мишени атомов с активным газом, введенным в виде добавки к инертному газу;
- плазмохимическое нанесение тонких пленок, основанное на использовании эффектов ускорения химических реакций в поле плазмы тлеющего разряда;

- ионное и ионно-лучевое нанесение тонких пленок путем осаждения инжектируемых источником ионов на подложку;
- плазменно-дуговое нанесение тонких пленок, основанное на использовании плазмы электродугового разряда.

В технологии полупроводниковых ИС в зависимости от назначения требуется формировать пленки следующих типов:

1) металлизующее контактное покрытие, которое должно иметь низкие собственные механические напряжения, воспроизводимую технологию осаждения, высоту потенциального барьера на кремнии *n*- и *p*-типов не более 0,5 эВ, должно быть металлургически стабильно, обладать низким сопротивлением контактов и хорошей совместимостью с вышележащим изолирующим слоем и межслойной изоляцией;

2) металлизующее покрытие затвора. Оно должно отличаться более высокой проводимостью, чем сильнолегированный поликремний, иметь воспроизводимое напряжение плоских зон в контакте с тонким затворным оксидом, не должно реагировать с затворным оксидом;

3) межэлементная изоляция. Изолирующие пленки должны легко связываться с поверхностью, противостоять электромиграции и коррозии, эффективно покрывать ступенчатый рельеф, типичный для структур после химической и плазменной обработки, и в то же время должны позволять вести контролируемое травление узких линий (с шириной менее 0,5 мкм);

4) диэлектрические материалы для защиты и пассивации кристалла. Они должны иметь низкие собственные механические напряжения, малую плотность проколов, хорошее покрытие ступенчатого рельефа, управляемую скорость травления;

5) металлизация для присоединения кристалла. Пленка для контактов должна обладать высокой надежностью и возможностью производства ультразвуковой микросварки золотых и алюминиевых выводов.

Кроме этих тонких слоев, в технологии полупроводниковых ИС получили применение и тонкие пленки из материалов со специальными свойствами, основанными на использовании оптических, магнитных, акустооптических, сверхпроводящих и других эффектов.

Ионно-плазменное нанесение включает в себя процессы создания пленок в вакууме на полупроводниковых и диэлектрических подложках, в которых необходимый для получения пленки материал переводится из твердой в газовую фазу распылением мишени энергетическими ионами инертных газов. При этом источником энергетических ионов является низкотемпературная плазма. Распыленные энер-

гетическими ионами частицы (атомы и ионы), осаждаясь на поверхность подложки, формируют пленку материала.

Из табл. 9.1 следует, что распыленные ионами атомы попадают на подложку с энергией, которая существенно превышает энергию атомов при термическом испарении. Следовательно, энергия распыленных атомов достаточна, чтобы на поверхности подложки вызвать десорбцию слабоадсорбированных молекул газов и тем самым осуществить частичное обезгаживание поверхности. Некоторая часть распыленных атомов, обладающих высокой энергией (50–100 эВ), способна распылить подложку, тем самым создавая центры зародышеобразования. При ионном распылении зародыши равномерно распределены по поверхности и их распределение мало зависит от состояния поверхности. Образование зародышей и рост покрытий при ионном распылении осуществляется более или менее одинаково, как и при термическом испарении. Однако следует отметить две особенности ионно-распыленных покрытий:

- благодаря равномерному распределению и большой плотности зародышей сплошной слой образуется при меньшей толщине покрытия поверхности;

- вследствие большой плотности зародышеобразования зерна (кристаллиты) в распыленных покрытиях, как правило, меньше, чем в термически напыленных пленках.

Т а б л и ц а 9.1

Энергия и скорость распыляемых частиц

Материал мишени	Энергия атомов при выходе из мишени, эВ	Средняя скорость распыленных атомов, км/с	Наиболее вероятная энергия атомов в потоке, эВ
Au	21	4,7	2,5
Be	7	11	6,3
Al	9	9,3	3,5
Si	10	8	2,6
Ti	13,6	7,4	4
V	11	6,5	2,5
Cr	13,2	7,1	3,4
Co	12	6,4	3,2
Ni	17,5	7,5	2,8
Cu	9,2	5,4	1,8
Mo	22	6,5	4,8
Ag	33,5	6	7,8
Ta	34,5	6	7,8
W	39,5	6,4	9,6

Считается, что благодаря этим особенностям пленки, полученные ионным распылением, имеют лучшую адгезию к подложке, чем покрытия, полученные термическим испарением. В реактивном ионно-лучевом и реактивном ионно-плазменном нанесении пленок используется эффект повышения химической активности молекул реактивного газа в разряде и эффект энергетической активации поверхности.

Под ионным осаждением понимают процесс осаждения пленок в вакууме, при котором конденсация материала на подложке осуществляется из потока низкоэнергетических ионов, при этом процесс осаждения сопровождается ионной активацией поверхности подложки и растущей пленки. Метод ионного осаждения является совокупностью двух методов: ионно-лучевого распыления и термического испарения. Как правило, осуществление метода происходит в три стадии:

- термическое испарение осаждаемого материала с помощью резистивного, лазерного или электронно-лучевого нагрева;
- ионизация испаренных атомов материала с помощью неоднородного электрического поля, лазерного луча или высокоэнергетического пучка электронов;
- фокусировка ионов в пучок необходимой конфигурации и их последующая транспортировка на подложку.

Метод позволяет изменять в широких пределах такие параметры ионного потока, как энергия ионов, их плотность и соотношение в потоке ионов и нейтральных атомов. Главной отличительной особенностью процесса ионного осаждения является то, что он осуществляется в условиях высокого вакуума порядка 10^{-5} – 10^{-6} Па. Это приводит к существенному улучшению качества пленок и уменьшению вероятности захвата растущей пленкой остаточных газов. Конденсирующий материал более равномерно распределяется по подложке, происходит сглаживание поверхности пленки и увеличение ее плотности. Так, плотность танталовых пленок, полученных ионным осаждением, на 10% выше, чем распыленных ионно-плазменным методом. Кроме того, при одновременной или чередующейся с процессом конденсации ионной бомбардировке происходит уменьшение эффекта затенения.

Плазменно-дуговое напыление используется в электронной промышленности при изготовлении эмиссионных, антиэмиссионных, геттерных, поглощающих СВЧ-энергию и электроизоляционных покрытий. В настоящее время разработано большое число конструкций электродуговых нагревателей газа. Наиболее простой вариант представляет дуговой электрический разряд, горящий между двумя торцевыми электродами, обдуваемый газом в осевом или перпендикулярном направлении. В этом случае за разрядом образуется плазменная

струя с высокой температурой. Для получения газовых потоков с высокой среднemasсовой температурой необходимо подвести газ в плазмотроне так, чтобы основная часть его взаимодействовала с дуговым разрядом. Электродуговые плазмотроны позволяют получить следующие параметры плазменных струй: скорость нагретого газа на выходе из плазмотрона от 10 м/с до 1 км/с; максимальная температура на оси струи от 10^4 до $5 \cdot 10^4$ К при работе на одноатомных газах и $5 \cdot 10^3$ К при работе на двухатомных газах (азот, водород). Таким образом, подавая в струю газа порошкообразный материал, возможно за короткое время довести его до плавления и в виде капельной фазы транспортировать на подложку. Существует проблема плавной подачи порошка в газовую струю. Высокий градиент температур плазменного факела приводит к неравномерному плавлению частиц в центре и на периферии струи, что особенно заметно для порошков с различными транспортными свойствами. Последние определяются формой и размером зерен, насыпной массой, теплоемкостью материала, а также наличием адсорбированной влаги и другими факторами.

Типовой технологический процесс изготовления плазменно-дуговых покрытий состоит из следующих операций: выбора напыляемого материала; ситового анализа порошка; обезгаживания порошка в вакууме; подготовки поверхности подложки под напыление; напыления и финишной обработки покрытия (термической или механической). Наибольшее распространение плазмодуговые процессы получили при распылении диборида циркония, титана и гидрида титана на сетки мощных генераторных ламп.

9.2.2. Стимулированное плазмой осаждение тонких слоев диоксида кремния

Прежде чем перейти к рассмотрению процессов плазмохимического осаждения пленок материалов, целесообразно рассмотреть специфику воздействия плазменного разряда на химические реакции. Обычно выделяют три эффекта воздействия плазмы низкого давления на процессы осаждения слоев из газовой фазы:

1) кинетический эффект. Под этим термином подразумевается увеличение скорости протекания реакций. При этом с термодинамической точки зрения протекание реакции в данных условиях возможно и без плазмы, но скорость осаждения чрезвычайно мала для практического использования. Воздействие плазмы открывает возможность для новых реакций, в которых участвуют радикалы, ионы и электроны. Разряд с низкой плотностью тока, ≤ 1 мА/см², обычно достаточен для значительного увеличения скорости реакции;

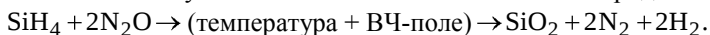
2) термодинамический эффект. В интенсивном плазменном разряде с плотностью тока ≥ 100 мА/см² преобладают обратные реакции с участием радикалов, присутствующих в газовой смеси. В результате этих реакций в системе устанавливается уникальное химическое равновесие, не имеющее аналогов при обычном химическом осаждении слоев. При введении плазменного возбуждения реагентов равновесие системы сдвигается и слои осаждаются при меньших температурах;

3) эффект воздействия плазмы на структуру материала. При осаждении тонких слоев в плазме подложки могут находиться либо под потенциалом, близким к потенциалу плазмы, либо при большом отрицательном смещении.

Рассмотрим эти случаи. При отрицательном потенциале подложки 5–20 В относительно плазмы поверхность подложки подвергается бомбардировке медленными электронами и ионами с энергиями соударения в несколько электронвольт, что ниже порога распыления. В ходе поглощения энергии поверхностью растущего слоя и ее перераспределения в материале образуются термодинамически стабильные структуры, обладающие большой плотностью, сжимающими напряжениями, малым размером зерен, улучшенной адгезией.

В случае, когда подложка находится при большом отрицательном смещении относительно плазмы, поверхность растущего слоя бомбардируется ионами с энергией 100 эВ и более. В результате такого взаимодействия образуются нестабильные структурные фазы. Таким образом, воздействие плазмы на химическую реакцию состоит, с одной стороны, в ее ускорении, а с другой – во влиянии на структуру образующегося слоя материала. Влияние плазмы на протекание процессов осаждения тонких слоев сводится не только к изменению механизмов протекания химических реакций в газовой фазе и на поверхности подложек, но и к изменению тех характеристик процесса, которые «отвечают» за профили концентрации реакционных частиц в объеме реактора, за равномерность и дефектность осаждаемых слоев.

В качестве исходных реагентов при получении диоксида кремния обычно используются силан и закись азота или кислород:



В качестве источника кремния может служить также тетрахлорсилан, тетраэтоксисилан, а в качестве окислителя – диоксид углерода. Однако применение этих реагентов ограничено необходимостью более высоких температур для получения качественных пленок и возможностью загрязнения пленок хлором и углеродом.

Осаждение диоксида кремния обычно проводится в системах с внутренними плоскопараллельными электродами. Как правило, они

представляют вакуумную камеру с плоскими электродами, между которыми поддерживается ВЧ-разряд (рис. 9.6).

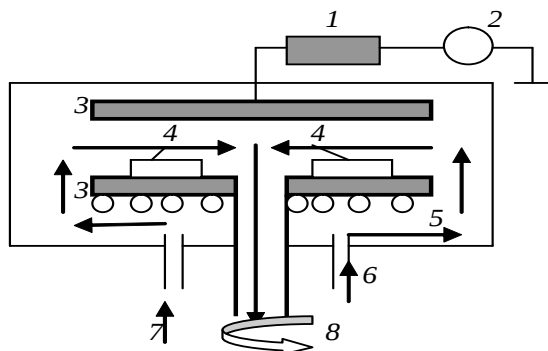


Рис. 9.6. Схема устройства с плоскопараллельными электродами для плазмохимического осаждения пленок

Диаметр электродов в промышленных установках составляет 40–60 см, а расстояние между ними – 5–10 см. Эта конструкция включает в себя электроды 3, радиально к центру направленные потоки газов 6, 7, горизонтальное размещение пластин на нижнем заземленном и подогреваемом электроде 5. При движении газовой смеси к центру электрода концентрация химически активной компоненты в ней уменьшается, а концентрация продуктов реакции возрастает, что, казалось бы, должно привести к низкой равномерности осаждаемых слоев. Однако надо учитывать, что плотность электронов обычно увеличивается к центру системы, так как на периферии сказывается их диффузия на стенку, и скорость протекания газа растет по мере приближения к расположенному в центре электрода откачному отверстию, так как сечение потока уменьшается. Поэтому правильным выбором условий процесса можно уравновесить противоположные эффекты и оптимизировать равномерность.

Для согласования ВЧ-цепи (13,5 МГц) между источником питания 2 и электродом 3 помещается устройство согласования 1. Как правило, оно представляет собой катушку индуктивности, шунтирующую на землю электрод, к которому подводится ВЧ-мощность, и таким образом предотвращающую его отрицательное самосмещение, так что среднее значение потенциала на обоих электродах оказывается примерно равным. Стенки реактора могут быть кварцевыми или покрытыми слоем изолятора, чтобы, находясь под плавающим потенциалом по отношению к плазме, не подвергаться ионной бомбардировке и распылению. Обычно к электродам прикладывается разность

потенциалов в несколько сотен вольт, что достаточно для получения в разряде электронов с энергией 1–10 эВ, необходимой для того, чтобы вызвать диссоциацию и ионизацию большинства газовых молекул, участвующих в процессах осаждения. Плотность свободных электронов и положительных ионов составляет 10^9 – 10^{12} см⁻³. Поскольку подвижность электронов в 1000 раз выше подвижности ионов, любая поверхность, помещенная в плазму, получает большой отрицательный заряд и приобретает отрицательный потенциал по отношению к плазме. При высокочастотном разряде в симметричной системе, когда потенциалы электродов примерно равны, поток частиц через темное приэлектродное пространство примерно одинаков и состоит из электронов, положительных ионов, нейтральных и возбужденных атомов и молекул, радикалов и фотонов. При указанном выше уровне энергии электронов их средняя температура составляет 10^4 – 10^5 К, тогда как температура подложки и газа лежит в пределах 500–700 К.

Основными факторами, влияющими на скорость осаждения и равномерность пленки, являются ВЧ-мощность, расход газа и давление в камере (рис. 9.7).

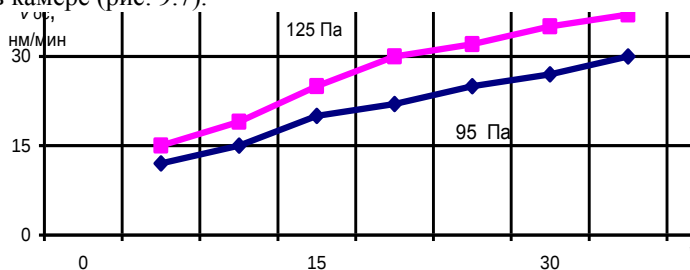


Рис. 9.7. Влияние ВЧ-мощности на скорость осаждения диоксида кремния в разряде из смеси силана, закиси азота, кислорода и аргона

Установлено влияние мощности разряда на скорость осаждения пленки SiO₂ из смеси силана SiH₄, закиси азота N₂O, кислорода O₂ с небольшим количеством аргона в качестве газоносителя при двух значениях давления газовой смеси в камере – 95 и 125 Па. Расход газа составлял: SiH₄ – 70, N₂O – 2500, O₂ – 14, Ar – 100 см³/мин. Температура подложки – 650 К. В качестве основного окислителя использовалась закись азота, препятствующая зародышеобразованию в газовой фазе. При работе только с N₂O скорость осаждения SiO₂ в конце реактора выше, чем в начале. Кислород же, наоборот, обеспечивает более высокую скорость в начале реактора. Таким образом,

подбором отношения N_2O / O_2 можно добиться равномерной скорости осаждения по всей длине рабочей зоны. Скорость осаждения почти линейно возрастает с увеличением мощности, потребляемой разрядом. Понижение давления при сохранении расхода газа повлечет уменьшение скорости осаждения.

Степень стехиометричности и плотность пленок диоксида кремния могут быть оценены по ИК-спектрам и изменению коэффициента преломления. На показатель преломления существенное значение оказывает отношение N_2O / SiH_4 . При меньших значениях отношения показатель преломления увеличивается из-за захвата большого количества азота и образования обогащенной кремнием пленки. Значение показателя менее 1,5 может быть достигнуто при величине отношения более 55, но равномерность толщины пленки по длине продольного реактора при таких соотношениях реагентов снижается. Пленки диоксида кремния с близким к стехиометрии составом и показателем преломления 1,46 могут быть получены в плазме из смеси силана с кислородом. При этом необходимы низкая температура осаждения, низкий уровень мощности и высокий расход газа-носителя для предотвращения образования частиц в газовой фазе и их высаживания на подложках. В оксидных пленках, осажденных в плазме, содержится также 5–10% водорода в виде SiH , $SiOH$ и H_2O . Концентрация водорода сильно зависит от температуры осаждения, причем большей температуре соответствует меньшая концентрация водорода.

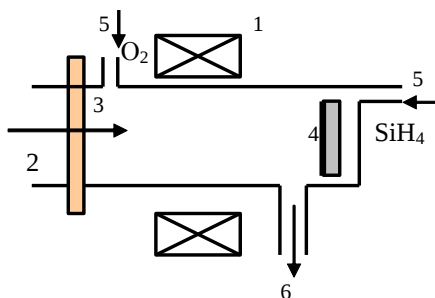
В большинстве случаев пленки диоксида кремния на кремниевых и арсенид-галлиевых подложках испытывают при комнатной температуре напряжения сжатия. Величины напряжения, достигающие $4-10^8$ Н/м², зависят, главным образом, от температуры подложки и скорости осаждения.

Электрические свойства пленок, такие как напряжение пробоя и величина диэлектрической проницаемости, также зависят от условий осаждения. В пленках толщиной 120 нм, полученных при температуре 300–525 К, напряженность поля пробоя составляет $(4-8) \cdot 10^6$ В/см. В зависимости от величины соотношения N_2O / SiH_4 диэлектрическая проницаемость на частоте 1 кГц изменялась от 4 до 10, причем значения 4–5 получаются для пленок без избыточного содержания кремния. Плотность поверхностного заряда для нанесенных в плазме оксидных пленок обычно высока ($\geq 10^{12}$ см⁻²·эВ⁻¹), что, вероятно, связано с воздействием ионизирующего излучения в процессе осаждения. Для уменьшения плотности поверхностных состояний после осаждения применяют отжиг в смеси азота с водородом при температуре 625 К.

Перекрытие ступенек рельефа, достигаемое с помощью плазменных пленок диоксида кремния, может изменяться от удовлетворительного до совершенно неприемлемого. Как показал анализ степени перекрытия при различной топологии рельефа, хорошее перекрытие возникает при равномерной концентрации реагентов на поверхности, устанавливающейся за счет быстрой миграции адсорбированных частиц, тогда как плохое перекрытие связывается с отсутствием существенной миграции этих частиц. В общем, для целого ряда применений в технологии ИС степень перекрытия можно рассматривать как удовлетворительную. Кроме того, она превосходит перекрытие, характерное для других низкотемпературных.

Уменьшение толщины слоев и улучшение их качества возможно достичь путем использования электронного циклотронного резонанса (ЭЦР) плазменных источников. Основным узлом камеры для получения тонких пленок диоксида кремния является герметичный цилиндрический СВЧ-резонатор (рис. 9.8), одновременно выполняющий функции плазмохимического реактора. Ввод СВЧ-энергии в резонатор осуществляется через волновод, отделенный от реактора прозрачным для СВЧ-излучения кварцевым окном. СВЧ-плазма образуется в центральной части реактора и практически не соприкасается с его стенками и кварцевым окном.

Рис. 9.8. Схема ЭЦР плазменной камеры для осаждения тонких пленок SiO_2 : 1 – электромагнит; 2 – ввод СВЧ-энергии; 3 – кварцевое окно; 4 – подложка с подложкодержателем; 5 – напуск газов; 6 – вакуумная откачка

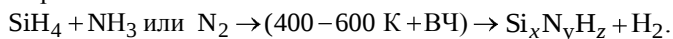


Камера может быть вакуумирована при использовании турбомолекулярного насоса до $1,3 \cdot 10^{-4}$ Па. Тонкие пленки SiO_2 осаждались при давлении 0,13–0,26 Па, скорости общего газового потока $30 \text{ см}^3/\text{мин}$ и поглощаемой мощности 8 Вт ($0,24 \text{ Вт}/\text{см}^2$) при ЭЦР на частоте 2,45 ГГц. Температура подложки в процессе роста поддерживалась порядка 625 К. Кислород применяется в качестве окислителя. Перемещающая электромагнит вдоль реактора, возможно локализовать плазменное облако и создать таким образом либо обычный вариант плазмохимического осаждения, либо внезарядовый вариант. В обычном режиме SiH_4 и кислород непосредственно возбуждаются СВЧ-

плазмой. Во внезарядовом варианте SiH_4 вводится в кислородную плазму. Возбужденный кислород выносится из области плазмы и смешивается с SiH_4 , в результате чего протекает химическое паровое осаждение на нагретой поверхности.

9.2.3. Плазмохимическое осаждение нитрида кремния

Для осаждения нитрида кремния Si_3N_4 в тлеющем ВЧ-разряде обычно используются те же реакторы, что и для получения диоксида кремния. Преимущественно используются исходные реагенты в виде силана SiH_4 и аммиака NH_3 или азота N_2 , и реакция протекает следующим образом:



Когда в качестве источника азота используют молекулярный азот, то из-за его значительно меньшей скорости диссоциации по сравнению с SiH_4 нужен больший избыток азота ($\text{N}_2/\text{SiH}_4 \geq 10^2 - 10^3$), чтобы избежать образования обогащенной кремнием пленки. Аммиак, напротив, может диссоциировать многоступенчато с потреблением малой энергии, что обеспечивает формирование пленки активным азотом. Поэтому отношение NH_3/SiH_4 может быть существенно ниже и находиться в диапазоне 5–20. В табл. 9.2 приведены значения энергии ионизации и энергии диссоциации для некоторых реакций, протекание которых в тлеющем разряде сопровождается образованием нитрида кремния.

Таблица 9.2

Энергия ионизации и энергия связи в некоторых реакциях, возможных при образовании нитрида кремния

Процесс ионизации	Энергия, эВ	Процесс диссоциации	Энергия, эВ
$\text{SiH}_4 \rightarrow \text{SiH}_3^+ + \text{H} + \text{e}$	12,2	$\text{SiH}_4 \rightarrow \text{SiH}_3^+ + \text{H}$	4,07
$\text{SiH}_4 \rightarrow \text{SiH}_3^+ + \text{H}_2 + \text{e}$	12,2	$\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + \text{H}$	3,09
$\text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_3^+ + \text{e}$	10,2	$\text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_2 + \text{H}$	4,76
$\text{NH}_2 \rightarrow \text{NH}_2^+ + \text{e}$	11,4	$\text{NH}_2 \rightarrow \text{NH} + \text{H}$	3,9
$\text{NH} \rightarrow \text{NH}^+ + \text{e}$	13,1	$\text{NH} \rightarrow \text{N} + \text{H}$	3,42
$\text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2^+ + \text{e}$	15,57	$\text{N}_2 \rightarrow \text{N}$	9,83

Благодаря низкой энергии диссоциации NH_3 составом осаждаемых слоев можно управлять в широком диапазоне параметров про-

цесса. Обогащенные кремнием слои, как правило, менее плотные и содержат большое количество дефектов, таких, как Si-оборванные связи, Si-Si-связи, группы Si-H. Эти дефекты образуют локализованные состояния в запрещенной зоне и играют роль ловушечных или рекомбинационных центров в нитриде кремния. Все это приводит к ухудшению диэлектрических свойств, т.е. увеличению токов утечки, уменьшению напряжения пробоя, ухудшению зарядовых характеристик, а также к сдвигу края оптического поглощения в слоях нитрида кремния в область больших длин волн. Плазмохимический нитрид кремния содержит большое количество водорода (10–40%), образующего связи Si-H и N-H, что существенно изменяет свойства пленок. При более высокой концентрации водорода уменьшаются плотность и коэффициент преломления пленок, при этом увеличивается скорость их травления в жидкостных травителях. Ухудшаются термическая стабильность, а также другие электрофизические свойства. Отжиг при температуре 870–970 К приводит к разрыву водородных связей, однако при этом возможно образование в пленке микроскопических пузырьков и пор, вызванных накоплением водорода.

В пленках нитрида кремния, полученных плазмохимическим осаждением, обнаруживается значительное количество кислорода, связанного с кремнием. Как оказалось, оно равно 2 ат.% в пленках, осажденных при температуре 525 К, и 13 ат.% при температуре осаждения 373 К. Присутствие кислорода подтверждается также меньшей величиной показателя преломления пленок нитрида кремния, полученных при меньшей температуре, но при одинаковом соотношении реагентов. При значении отношения NH_3/SiH_4 , равном 10, показатель преломления пленок, осажденных при 650 К, равен 2,00, а при 570 К – 1,95.

Плотность поверхностных состояний на границе нитрид кремния – кремний увеличивается в диапазоне $(1-7) \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ с ростом потока силана, с уменьшением температуры осаждения, мощности и определяется числом свободных связей кремния. Распределение плотности поверхностных состояний по энергии имеет максимум при 0,86 эВ или на 0,2–0,3 эВ ниже дна проводимости. Напряженность электрического поля пробоя пленок нитрида кремния достигает 10^7 В/см , а диэлектрическая проницаемость лежит в диапазоне от 6 до 9. Хотя пленки нитрида кремния достаточно проницаемы для Na^+ и других примесей, они широко применяются в качестве пассивирующих слоев, особенно в приборах с пластмассовой герметизацией. Низкая температура осаждения, хорошие диэлектрические и механические характеристики делают их пригодными для применения в ка-

честве межслойного диэлектрика. Однако использование нитрида кремния и диоксида кремния, полученных в ВЧ-плазме, на активной области ИС не практикуется из-за связанного с плазменным нанесением увеличением встроенного заряда и других побочных явлений, происходящих под действием ионной, электронной и фотонной бомбардировки.

Одним из путей улучшения характеристик пленок нитрида кремния является использование СВЧ-плазмы, возбужденной методом электронного циклотронного резонанса. Схема источника СВЧ-плазмы (ЭЦРП) описана в предыдущем подразделе. При получении нитрида кремния азот подавался в плазменную камеру, а силан SiH_4 – в камеру осаждения. Диапазон рабочих давлений 10^{-1} – 10^{-3} Па. Напряженность магнитного поля уменьшается от камеры к подложке, что образует расходящийся поток заряженных частиц. Благодаря большой подвижности электроны отрицательно заряжают подложку, которая электрически изолирована от камеры с плазмой. Под действием разности потенциалов между образцом и зоной плазмы происходит ускорение ионов до энергии 20–50 эВ, что способствует увеличению скорости осаждения и улучшению качества слоев. При подаче на подложку смещения можно получить полностью планарную поверхность и уменьшить длительность процесса планаризации при различных отношениях толщины проводящего слоя к зазору между проводниками.

9.2.4. Ионно-плазменное нанесение тонких пленок нитрида алюминия

Применение тонких слоев нитрида алюминия для пассивации и маскирования поверхности ИС обуславливает интерес к разработке и совершенствованию методов их получения. Большой интерес представляет применение нитрида алюминия в структурах полупроводник-нитрид алюминия-полупроводник на основе кремния и арсенида галлия или карбида кремния, которые являются альтернативой структурам типа кремний-на-сапфире (КНС-структуры), а также могут быть использованы для создания многоуровневых БИС и в оптоэлектронных устройствах.

Среди вакуумных методов наибольший интерес представляет способ планарного ВЧ-магнетронного распыления, как наиболее эффективный и универсальный. Скорость роста слоев зависит от ВЧ-мощности и давления реакционных газов. При температуре осаждения 625 К скорость роста достигает 5 мкм/ч. Для повышения эффек-

тивности и улучшения однородности толщины слоев по подложке предложены новые варианты распылительных устройств, например ионно-распылительный. Рабочая камера с противоположно расположенными мишенями предусматривает использование двух мишеней из алюминия, расположенных на расстоянии 100 мм одна от другой (рис. 9.9). Распыление ведут при давлении 1,0–2,6 Па со скоростью осаждения на подложку, размещенную вблизи зоны тлеющего разряда, 1,6–13,0 нм/мин, температура кремниевых подложек 300–823 К. В результате получаются пленки с размером зерна 400 нм. Для формирования гладких слоев высокого качества распыленные частицы должны были достигать подложки при некоторой оптимальной энергии, позволяющей им свободно мигрировать по поверхности растущего слоя. Но при бомбардировке поверхности частицами с большой энергией происходит аморфизация осаждаемых слоев. Поэтому рекомендуется проводить осаждение либо в ВЧ-разряде с большой скоростью, либо на постоянном токе, но при очень малой скорости. Полученные магнетронным распылением слои даже при относительно низких температурах имеют высокий уровень внутренних механических напряжений. Вероятно, причиной возникновения этих напряжений является электронно-ионная бомбардировка растущего слоя.

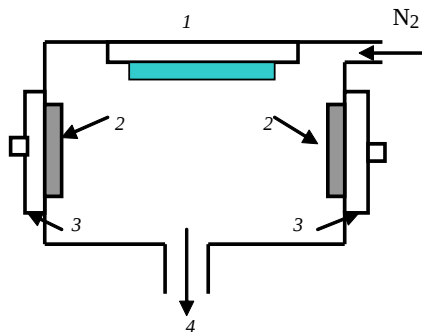


Рис. 9.9. Схема ВЧ-магнетронной распылительной установки с двумя противоположно расположенными мишенями:
1 – подложкодержатель с подложкой и нагревателем;
2 – мишени из алюминия;
3 – ВЧ-магнетроны; 4 – откачка

Ионно-плазменные методы позволяют получить чрезвычайно однородные по толщине зеркально-гладкие слои и обрабатывать подложки в полунепрерывном процессе партиями даже из нетугоплавких материалов, например арсенида галлия, алюминия, стекла, полимеров и др.

В то же время при использовании этих методов скорость осаждения была относительно низкая, технологический цикл продолжительный, и кроме того, наблюдалось нарушение стехиометрии состава для низкотемпературного осаждения.

9.2.5. Плазмохимическое осаждение кремния

С помощью плазмохимического осаждения могут быть получены эпитаксиальные слои кремния, аморфный (аморфизированный или, как его обозначают, α -Si) кремний, поликристаллический или микрокристаллический кремний. Последний тип структуры представляет собой микрокристаллы, включенные в аморфную матрицу. Основное влияние на структуру слоев оказывает температура их получения. Условно эту температуру можно разделить следующим образом: эпитаксиальные слои растут при температуре выше ~ 1025 К, поликристаллические – 725 – 1025 К, микрокристаллические – 470 – 770 К, аморфные – при температуре ниже 470 К. Кроме температуры, на структуру осажденных слоев влияют состав газовой фазы, уровень ВЧ-мощности, ионная бомбардировка поверхности растущего слоя. Основным исходным реагентом для получения слоев поликремния и аморфного кремния с помощью плазмохимического осаждения является моносилан или его смесь с фосфином или арсином. Кроме того, использовались дихлорсилан и смесь дихлорсилан-фосфин-аргон. Поликристаллические слои получают при достаточно высоких температурах осаждения, что накладывает определенные ограничения на тип используемого оборудования. Для этих целей применяют главным образом многоеlectродные реакторы с «горячими стенками», в которых осуществляется интенсивный нагрев корпуса реактора с помощью галогенных ламп или резистивных нагревателей (рис. 9.10).

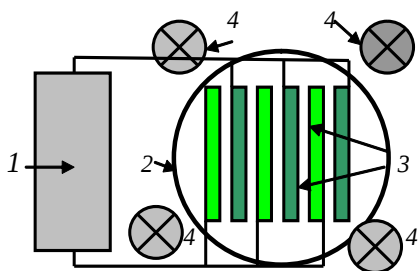


Рис. 9.10. Схема реактора для плазмохимического осаждения с плоскими параллельными электродами, продольным протоком газа и «горячими стенками»: 1 – ВЧ-генератор с согласующим устройством; 2 – реактор; 3 – электроды; 4 – галогенные лампы

Галогенные лампы 4 размещаются снаружи цилиндрического реактора 2, ВЧ-мощность подается к секционной электродной системе 3, состоящей из чередующихся плоских параллельных электродов, причем на каждом втором электроде располагаются подлежащие нанесению полупроводниковые подложки. Поток рабочего газа в данном типе реактора вводится таким образом, чтобы обеспечивалось

его продольное ламинарное течение относительно поверхности полупроводниковых пластин.

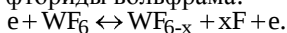
Слои аморфного кремния, используемые для изготовления солнечных элементов, получают при очень низких температурах (325–470 К). Такие слои содержат очень большое количество водорода (до 50%), которое зависит от температуры осаждения. В технологии создания солнечных элементов обычно используют слои с содержанием водорода 10–25 ат.% (α -Si-H). При низких температурах осаждения водород благоприятствует зарождению микрокристаллитов. Поэтому ключевым фактором начального роста микрокристаллов является отношение концентрации радикалов H^*/SiH^* в плазме моносилаана.

Аналогичное влияние на снижение температуры фазового перехода оказывают фосфин или диборан, присутствующие в газовой смеси. Известны определенные пределы плотности мощности, выше которых осажденные слои кремния будут поликристаллическими, а ниже – аморфными. С увеличением плотности мощности возрастает также доля микрокристаллитов в слое кремния. Важную роль играет ионная бомбардировка поверхности слоя в образовании микрокристаллической структуры.

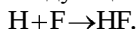
Дальнейшее развитие технологии осаждения α -Si-H из газовой фазы с активацией в плазме базируется на использовании частот СВЧ-диапазона, обеспечивающих технику осаждения в условиях электронного циклотронного резонанса (ЭЦР). В отличие от ВЧ-разряда, ЭЦР обеспечивает большие возможности воздействия на характеристики плазмы рабочих газов. Основное достоинство метода ЭЦР – расширение технологических возможностей, например резкое повышение скорости осаждения α -Si-H без предварительного прогрева подложек с сохранением высоких электрофизических характеристик слоев, что обусловлено снижением уровня высокоэнергетических частиц, бомбардирующих растущую поверхность более чем на порядок. Осуществление ионизации газа СВЧ-излучением в магнитном поле позволяет активно воздействовать на параметры плазмы, а следовательно, и на процесс осаждения α -Si-H. В условиях ЭЦР возможно осуществлять ионизацию газа, начиная с минимального давления $1,33 \cdot 10^{-4}$ Па и доведя его до атмосферного, управлять температурой электронов и ионов, а также областями их локализации. Это достигается путем изменения степени неоднородности постоянного магнитного поля вдоль резонатора. В области низких давлений могут быть достигнуты как высокая степень ионизации газа, так и ограничение поперечного ухода частиц из разряда.

9.2.6. Стимулированное плазмой осаждение металлов

Сравнительно чистые пленки вольфрама, осажденные в тлеющем ВЧ-разряде в атмосфере из смеси гексафторида вольфрама WF_6 и водорода H_2 , получены в реакторе с параллельными электродами и радиальным протеканием газа при общем давлении 25 Па. Чистый WF_6 непригоден для использования в стимулированных плазмой процессах осаждения вольфрама из-за того, что при температуре подложки выше ~ 360 К преобладает травление, а не осаждение слоя. Это наблюдение соответствует указаниям о том, что атомы фтора являются основными травящими агентами вольфрама. Действительно, в результате соударения с электроном генерируются атомы фтора и неперелетные фториды вольфрама:



Если атомы фтора не связываются, то происходит травление вольфрама. Введение водорода подавляет травление пленки вследствие взаимодействия водорода с фтором, которое может протекать несколькими путями, причем все они допустимы с термодинамической точки зрения. Например, атомы водорода, полученные в результате диссоциации молекул при столкновении с электронами, могут реагировать с атомами фтора следующим образом



Добавление водорода позволяет использовать повышенную температуру подложки, что обеспечивает получение гладких пленок вольфрама без сквозных проколов.

После соответствующей подготовки поверхности и выбора условий процесса осаждения как при атмосферном, так и при пониженном давлении можно произвести осаждение пленки вольфрама селективно на кремний, тогда как на расположенный рядом слой диоксида кремния вольфрам осаждаться не будет. Селективное осаждение может оказаться невозможным в реакторе с параллельными электродами из-за ионной бомбардировки, производящей нарушение поверхности, в результате которого центры адсорбции возникают и на диоксиде кремния.

Локальное осаждение пленок вольфрама может осуществляться тремя способами восстановления гексафторида вольфрама: кремнием – $2WF_6 + Si \rightarrow 2W + 3SiF_4$; водородом – $2WF_6 + H_2 \rightarrow W + 6HF$; силаном – $WF_6 + 4SiH_4 \rightarrow 3W + 4SiF_4 + 2HF + 7H_2$. Первая реакция является самоограничивающейся. При толщине пленки вольфрама 10–15 нм лимитируется доставка кремния через образовавшуюся пленку и дальнейший рост вольфрама осуществляется по второй реакции.

Исследование поперечного сечения пленок вольфрама, осажденных в стимулированном плазмой процессе, позволило установить, что пленка имеет столбчатую структуру и совпадает со структурой пленок, полученных другими методами. Причем образование столбчатых зерен происходит при росте как на аморфной (термический диоксид кремния), так и на кристаллической (сапфир) подложке. Величина удельного сопротивления пленки вольфрама непосредственно после процесса осаждения зависит от соотношения H_2 / WF_6 . По-видимому, при увеличении концентрации водорода происходит более интенсивное связывание фтора и, следовательно, уменьшается его захват осаждающейся пленкой. Однако практически для всех условий осаждения кратковременная термообработка пленок при температуре 1225 К приводит к снижению удельного сопротивления пленок до 8 мкОм·см, что близко к сопротивлению массивного вольфрама (5,3 мкОм·см).

Пленки молибдена осаждали из смеси гексафторида молибдена MoF_6 или пентахлорида молибдена MoCl_5 с водородом, причем во всех случаях чистота пленок и их удельное сопротивление сильно зависят от применяемых рабочих газов. Осаждение молибдена в ВЧ-разряде из MoF_6 и H_2 при температуре выше 470 К приводит к получению пористых пленок, легко окисляющихся при отношении $\text{H}_2 / \text{MoF}_6$ меньше 4. Однако при отношении $\text{H}_2 / \text{MoF}_6$, равном 7, получают гладкие стабильные пленки молибдена. Но эти пленки недостаточно чистые, основной примесью является фтор. Это обусловлено образованием из MoF_6 устойчивого твердого вещества MoF_3 . Это вещество не восстанавливается водородом и не переводится в неперелетные фториды при температуре ниже 670 К. Чтобы избежать образования стабильного MoF_3 , применяют при осаждении в ВЧ-разряде смесь MoCl_5 и H_2 при давлении 130 Па и температуре подложки 450–700 К. При использовании MoCl_5 вследствие его низкой летучести требуется подогрев как реактора, так и подводящих коммуникаций. Эта мера позволяет не допустить конденсации пентахлорида молибдена.

Если в разряд, содержащий галоидные или карбонильные соединения переходных металлов, добавить кремнийсодержащее вещество (обычно силан), то в получаемой пленке будут содержаться переходный металл и кремний. Силициды вольфрама ($\text{W}_x\text{Si}_{1-x}$) могут быть осаждены также из смеси WF_6 и SiH_4 . Поскольку в разряде имеется

водород, необходимый для связывания фтора, осаждение пленки превалирует над травлением. И действительно, пленка образуется легко и быстро. Скорость ее осаждения превышает 0,05 мкм/мин, что на порядок выше, чем скорость осаждения вольфрама. Такое ускорение процесса может быть связано с усилением зародышеобразования в присутствии кремния на поверхности вольфрамовой пленки. Изменение соотношения MF_6/SiH_4 в смеси изменяет и соотношение элементов в пленке. Удельное сопротивление пленки зависит от содержания в ней вольфрама. Большое содержание кремния приводит к получению пленок с сопротивлением, близким к поликремнию. И наоборот, пленки, содержащие почти чистый вольфрам, характеризуются низким сопротивлением. В любом случае сопротивление пленок силицидов вольфрама, полученных стимулированным плазмой осаждением, близко к сопротивлению этих пленок, полученных распылением. Как и в случае пленок вольфрама, осажденных в плазме, сопротивление пленок $\text{W}_x\text{Si}_{1-x}$ снижается при последующих за осаждением термообработках, что, по-видимому, связано с выделением из пленки фтора.

9.2.7. Ионно-стимулированное, ионно-лучевое напыление тонких пленок

Во многих случаях традиционные методы испарения или распыления не позволяют получить тонкие слои с требуемыми свойствами, что оправдывает применение более сложных физических методов, в частности, с использованием пучков частиц. Основным отличием физических методов от «хаотических» процессов, к которым относятся испарение и распыление, является возможность контроля кинетических свойств частиц, падающих на подложку, и варьирования в широких пределах кинетической энергии и угла падения частиц. Для устранения зарядки образца при осаждении с помощью ионных пучков диэлектрических слоев или при осаждении на изолирующие подложки обычно вместо ионных использовались плазменные пучки.

Необходимым условием осаждения пленок с помощью пучков частиц является их низкая энергия, такая, чтобы вероятность прилипания была бы равна единице, а распыление подложки и растущего слоя пренебрежимо мало. Эта методика удобна для контролируемого осаждения бинарных соединений в процессе ионного перемешивания осажденных частиц. Энергия частиц в подобном процессе выбирается таким образом, чтобы получить равные единицы вероятности прилипания и однородные концентрации. Современные источники плаз-

менных пучков позволяют получать чрезвычайно однородные пучки нейтральных частиц с кинетическими энергиями от нескольких десятков до тысяч электронвольт, при которых имеет место значительное перемешивание атомов за счет диффузии на границе раздела. Вследствие нейтральности плазменного пучка в процессе роста слоев не изменяются условия осаждения проводящих пленок на диэлектрические подложки и диэлектрических пленок на проводящие подложки, чем определяется высокая степень контроля в плазменном осаждении первичным пучком. Другим достоинством этого метода является возможность формирования сложных соединений за счет взаимодействия осаждаемых частиц с атомами подложки. Например, при бомбардировке поверхности Al пучком плазмы Ag-N с энергией 480 эВ получена фаза AlN. Это означает, что необходимая для реакции энтальпия поставляется за счет кинетической энергии ионов плазмы.

Хотя частицы, используемые для выращивания пленок, могут быть доставлены на подложку различными способами, включая испарение и просто воздействие газовой среды, наибольшую гибкость процесса обеспечивают системы с двумя и более пучками (рис. 9.11).

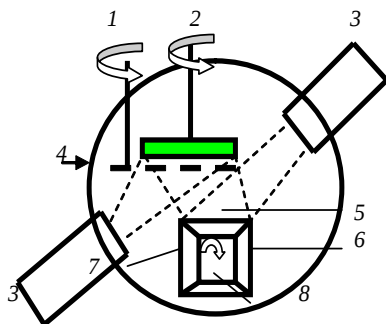


Рис. 9.11. Схема устройства для осаждения тонких пленок с двумя ионными источниками: 1 – заслонка; 2 – привод вращения подложкодержателя; 3 – источники ионов; 4 – вакуумная камера; 5, 6, 7, 8 – сменные мишени из SiO_2 , TiO_2 , Ti и Si соответственно

В состав двухпучковой системы входят источник первичных ионов для распыления одной или нескольких мишеней и второй ионный источник, направленный на подложку с растущей пленкой. С помощью источников создаются независимые пучки различных ионов с контролируемой энергией для бомбардировки мишени и подложки под различными углами. При наличии механического управления мишенью или подложкой в системе можно реализовать практически любые геометрические условия для бомбардировки. Системы с двумя пучками используются для осаждения пленок сложных соединений, образующих твердые покрытия или защитные слои. Например, для осаждения пленок AlN контролируемого состава применялось

распыление мишени из Al ионами Ag^+ с энергией 1500 эВ в сочетании с воздействием на подложку пучка ионов N^+ с энергиями 100–500 эВ. Стехиометрические пленки AlN получены при отношении скоростей поступления N и Al не менее 1. Избыточные частицы азота выбрасываются из растущей пленки, как только она становится стехиометрической. Бомбардировка подложки Ta в атмосфере O_2 ионами аргона Ag с энергией 2 кэВ стимулирует реакцию между адсорбированными O_2 и Ta, что позволяет получить тонкие пленки со стехиометрией, близкой к равновесной фазе Ta_2O_5 .

Наряду с частицами малых энергий, пучки быстрых частиц играют важную роль в изготовлении тонких пленок. Последние могут использоваться как для легирования слоев путем ионной имплантации, так и для перемешивания границы раздела пленки и подложки или отдельных слоев.

Специалистами фирмы «Лейбольд» (ФРГ) для получения тонких многослойных оптических покрытий используются как методы ионного распыления в присутствии второго источника, так и методы электронно-лучевого испарения с ионной поддержкой (рис. 9.12). Многослойные оптические покрытия Ta_2O_5 - SiO_2 - TiO_2 - SiO_2 широко используются для лазерной оптики в качестве зеркал, широкополосных и узкополосных фильтров. Основными характеристиками этих покрытий являются коэффициент поглощения и коэффициент отражения в рабочем диапазоне длин волн. Для этого требуются мелкозернистые, ровные и гладкие пленки. Наиболее успешные результаты получены при использовании ионно-лучевого распыления мишеней в присутствии вторичного ионного пучка, причем первичный ионный пучок состоит из ионов аргона, а вторичный – из ионов кислорода.

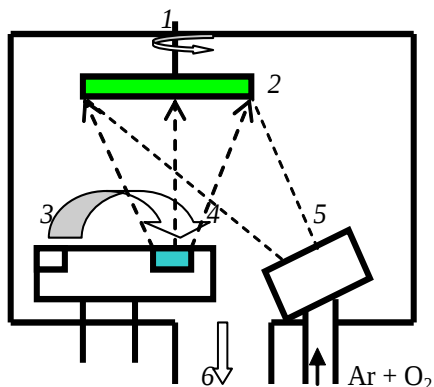


Рис. 9.12. Схема установки электронно-лучевого испарения с дополнительной ионной бомбардировкой мишени: 1 – привод вращения подложкодержателя; 2 – подложка с подложкодержателем; 3 – электронная пушка; 4 – тигель с испаряемым веществом; 5 – ионный источник; 6 – откачка

10. Планаризация рельефа

10.1. Основные понятия и тенденции развития

С ростом степени интеграции ИС резко повышаются требования к планарности поверхности полупроводниковых структур на всех стадиях технологического маршрута изготовления микросхем. Дело в том, что на рельефной поверхности затруднено проведение литографических процессов с требуемой точностью воспроизведения геометрических размеров формируемых рисунков, так как глубина фокуса современных проекционных систем близка или даже меньше, чем возможная высота рельефа на полупроводниковой структуре. Рост количества слоёв межуровневой разводки приводит к тому, что если не предпринимать специальных мер, то, начиная с третьего слоя, становится проблематичным проводить литографический процесс и формировать следующий слой разводки. Для преодоления данной проблемы была разработана специальная процедура – планаризация рельефа.

Планаризация – это процесс, используемый при изготовлении ИС и предназначенный для уменьшения перепада высоты между низшими и высшими точками рельефа на полупроводниковой пластине вплоть до получения полностью плоской поверхности по всей её площади.

Известно достаточно большое количество методов планаризации рельефа. Среди наиболее популярных из них следует назвать следующие:

- планаризация оплавлением бор-фосфорсиликатного стекла;
- планаризация нанесением плёнки органического диэлектрика методом центрифугирования;
- планаризация травлением жертвенного слоя (обычно резиста);
- планаризация селективным химическим осаждением вольфрама из газовой фазы;
- планаризация «оплавлением» металлической плёнки (Al).

Применение в качестве межслоевого диэлектрика плёнки легкоплавкого бор-фосфорсиликатного стекла позволяет планаризовать поверхность полупроводниковой структуры посредством её термообработки, выполняемой после осаждения плёнки на развитый рельеф. Нагрев приводит к размягчению стекла, его вязкому течению и выравниванию рельефа. Пример планаризации с помощью оплавления бор-фосфорсиликатного стекла приведён на рис. 10.1.

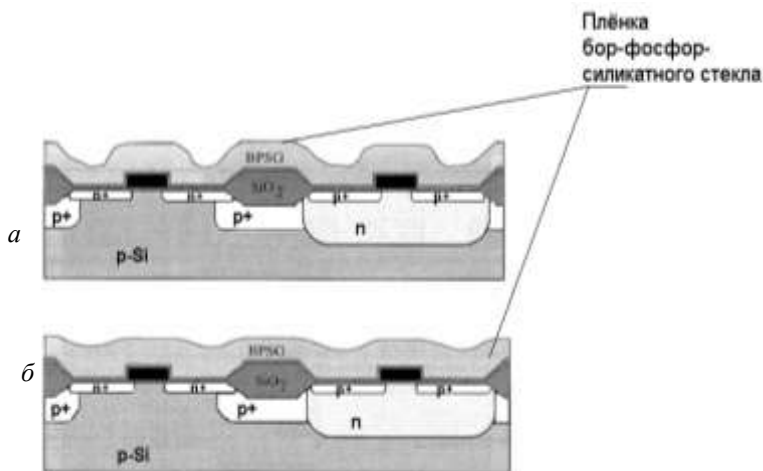


Рис. 10.1. Планаризация полупроводниковой структуры с помощью оплавления слоя бор-фосфорсиликатного стекла, осадённого на рельефную поверхность: *а* – до планаризации; *б* – после планаризации

При планаризации с помощью органического диэлектрика на поверхность планаризируемой структуры методом центрифугирования наносится плёнка жидкого (вязкого) диэлектрика. Выбором вязкости исходного вещества или/и скорости вращения центрифуги добиваются относительно плоской поверхности плёнки после нанесения. Последующая термообработка приводит к отверждению плёнки, и она становится подобной SiO_2 . В качестве такой плёнки можно использовать диэлектрики с низкой диэлектрической проницаемостью.

Пример планаризации травлением жертвенного слоя резиста представлен на рис. 10.2. Суть способа заключается в том, что на поверхность наносится слой резиста такой толщины, чтобы его поверхность получалась практически ровной и покрывала все выступы рельефа, затем поверхность структуры подвергается травлению вплоть до полного удаления резиста из наиболее «низких» мест. После нанесения резиста его толщина по площади пластины различна, в результате травление лежащих под резистом «высоких» областей начинается раньше, чем травление «низких», что и ведёт к планаризации рельефа.

Планаризация селективным химическим осаждением вольфрама из газовой фазы и планаризация оплавлением плёнки Al не являются универсальными методами и применяются только в некоторых частных случаях. Суть первого метода заключается в том, что в плёнке SiO_2 вскрываются окна вплоть до поверхности кремния. Скорость

осаждения вольфрама на поверхность Si много больше, чем на поверхность SiO₂, в результате происходит селективное зарастивание окон и планаризация рельефа (см. рис. 10.3).

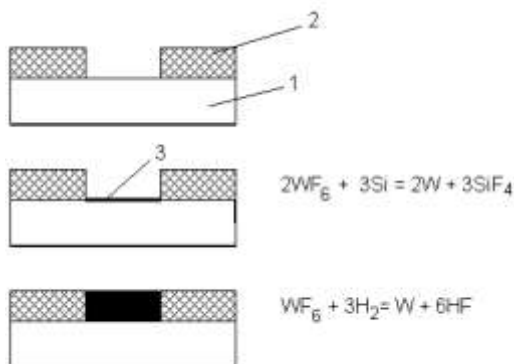


Рис. 10.2. Планаризация полупроводниковой структуры травлением жертвенного слоя резиста, нанесённого на рельефную поверхность:
а – до планаризации; б – после планаризации

Второй способ, также как и первый, позволяет одновременно создать элемент межуровневого соединения и планаризовать поверхность. Полупроводниковая структура со вскрытыми окнами и с осаждённой плёнкой Al подвергается термообработке, в результате которой, как и в случае с бор-фосфорсиликатным стеклом, происходит планаризация поверхности плёнки (рис. 10.4).

Рис. 10.3. Планаризация полупроводниковой структуры селективным химическим осаждением вольфрама из газовой фазы (WF₆), производимая в окна SiO₂:

1 – кремниевая пластина;
2 – SiO₂; 3 – W; до планаризации (а), начальная стадия осаждения W (б), после планаризации (в)



В настоящее время все рассмотренные выше методы используются только при изготовлении ИС малой степени интеграции. При изготовлении современных СБИС для планаризации используется

только один метод – химико-механическая полировка (chemical-mechanical polishing, CMP).

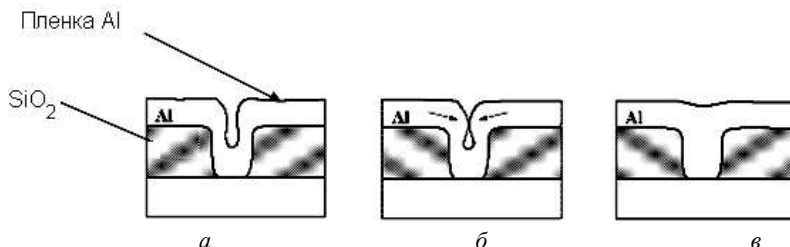


Рис. 10.4. Планаризация полупроводниковой структуры оплавлением плёнки Al, осаждённой на рельефную поверхность. Температура термообработки 400–450 °С; до планаризации (а), начальная стадия планаризации (б), после планаризации (в)

Химико-механическая полировка или планаризация (ХМП) – это процесс удаления материала с исходно рельефной поверхности полупроводниковой структуры, выполняемый при одновременном воздействии как абразива, так и химических реагентов и приводящий к утонению полируемого слоя и получению плоской поверхности. Химико-механическая планаризация (chemical mechanical planarization) выполняется для плёнок межуровневых диэлектриков, для слоёв металлов межуровневой и межэлементной разводки, формируемых по дамасскому или двойному дамасскому процессу, а также при формировании межэлементной изоляции с помощью мелких канавок (shallow trench isolation).

Химико-механическая полировка была изобретена в 1983 г. в компании IBM, но до 1988 г. все исследования носили закрытый характер и проводились либо внутри IBM, либо совместно с ограниченным кругом партнёров. В 1989 г. IBM впервые публикует статью в открытой печати, в которой дискутируются вопросы химико-механической полировки SiO₂. С тех пор данная технология прошла большой путь от лабораторных исследований до широкого промышленного внедрения.

Рассмотрим основные закономерности и параметры, связанные с планаризацией рельефа. Высота рельефа, которая получается при конформном осаждении тонкой плёнки на поверхность предыдущего слоя с уже сформированным рельефом, зависит от геометрических размеров окон в сформированном слое. В тех местах, где размер окон в плоскости подложки много больше толщины плёнки, при нанесении последующего слоя получаемый рельеф практически повторяет ис-

ходный рельеф. Однако в тех местах, где размер окна меньше или сравним с толщиной плёнки, высота рельефа после нанесения последующего слоя становится меньше её исходной величины (рис. 10.5). В результате топография рельефа до и после осаждения слоя может достаточно сильно отличаться.



Рис. 10.5. Конформное осаждение плёнки на рельефную поверхность с исходно различным размером окон: 1 – исходный слой с окнами; 2 – осажденный слой

Более подробная схема и классификация типов рельефов, получаемых после осаждения слоя или после выполнения планаризации поверхности, представлена на рис. 10.6.

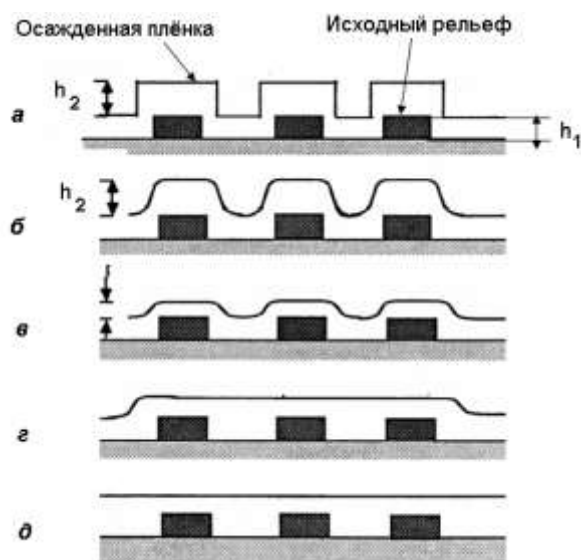


Рис. 10.6. Классификация типов рельефов, получаемых после осаждения слоя на рельефную поверхность или после выполнения планаризации рельефной поверхности

При конформном осаждении плёнки на рельефную поверхность возможно получение четырёх различных ситуаций:

- покрытие без планаризации (рис. 10.6, а), когда рельеф верхнего слоя в точности повторяет рельеф нижнего слоя, т.е. высота ступеньки нижнего слоя h_1 равна высоте ступеньки верхнего слоя h_2 ;
- покрытие без планаризации, $h_1 = h_2$, но со сглаженными краями (рис. 10.6, б);
- покрытие со сглаживанием и частичной планаризацией, $h_1 > h_2$ (рис. 10.6, в);
- локальная планаризация, когда плоские поверхности получаются на локальных участках пластины, например на участках с окнами малых размеров, но перепад высот между этими плоскими участками остаётся (рис. 10.6, г).

Последний тип планаризации рельефа можно получить не только при конформном осаждении, но и при планаризации рельефа методом химико-механической полировки. Однако идеальная топография поверхности (плоская поверхность по всей площади пластины) получается только после глобальной планаризации, которая реализуется с помощью химико-механической полировки (рис. 10.6, д).

10.2. Оборудование химико-механической планаризации

Упрощённая схема установки для реализации процесса химико-механической полировки представлена на рис. 10.7.

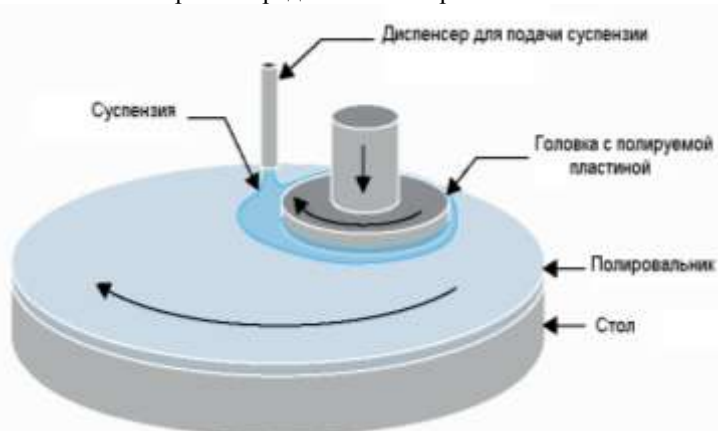


Рис. 10.7. Упрощённая схема установки химико-механической полировки, кондиционер не показан

Основой служит вращающийся стол, на поверхность которого прикреплён полировальный диск, изготовленный из достаточно мягких синтетических материалов с развитой пористой поверхностью (на-

пример, из полиуретана) толщиной 1–3 мм. К поверхности стола с контролируемым усилием прижимается полируемая полупроводниковая пластина, закреплённая с помощью плёнки-носителя во вращающемся вокруг собственной оси держателе (головке). При этом сам держатель пластины может либо оставаться неподвижным, либо совершать орбитальные вращательные, или возвратно-поступательные движения по поверхности полировальника (рис. 10.8). На поверхность полировальника через специальный дозатор подаётся жидкое рабочее вещество (суспензия). Суспензия включает в свой состав жидкий химический реагент (например, щёлочь для ХМП SiO_2) и абразивный порошок с нужным размером твёрдых частиц.



Рис. 10.8. Кинематические схемы движения головки с полируемой пластиной: *а* – орбитально-вращательное движение; *б* – возвратно-поступательное движение

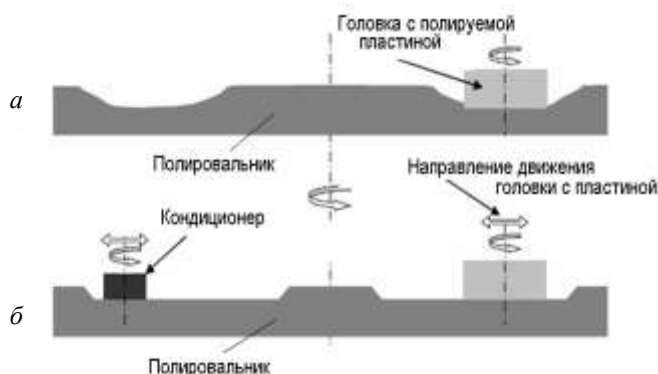


Рис. 10.9. Схема, поясняющая работу кондиционера: *а* – состояние поверхности полировальника в момент окончания полировки пластины; *б* – после кондиционирования поверхности полировальника перед полировкой следующей пластины

Кроме того, в состав установки входит кондиционер (вращающийся алмазный абразивный диск), предназначенный для выравнивания поверхности полировальника. Неравномерный износ поверхности полировальника происходит во время полировки пластины, и перед каждым новым процессом планаризации необходимо планаризировать его поверхность. Данная операция называется кондиционированием и выполняется посредством удаления части толщины полировальника абразивом кондиционера (рис. 10.9). Износ полировальника происходит достаточно быстро, и после планаризации 100–1000 пластин (в зависимости от мягкости полировальника) его необходимо менять.

Основными контролируемыми параметрами, определяющими конечный результат процесса ХМП, являются: сила прижима пластины к полировальнику, температура стола, скорость вращения стола, скорость вращения головки, расход суспензии, pH суспензии, состав суспензии, температура суспензии, химический состав и размер абразивных частиц и др.

10.3. Технология химико-механической планаризации

Технология химико-механической планаризации включает в себя последовательность нескольких операций. Первой выполняется непосредственно сама ХМП, затем проводится отмывка отполированной пластины от остатков суспензии и продуктов полировки и после этого производится контроль качества выполнения как операции планаризации, так и операции очистки поверхности.

Химико-механическая полировка. При ХМП одновременно протекает два процесса: химическая реакция между активным реагентом, содержащимся в суспензии, и материалом планаризируемого слоя (например, SiO_2), а также механическое удаление продуктов реакции и материала планаризируемого слоя абразивными частицами, взвешенными в суспензии. Наличие в суспензии химически активных реагентов приводит к «размягчению» приповерхностного слоя, в результате чего облегчается его механическое удаление абразивом и увеличивается скорость и качество полировки.

Рассмотрим ХМП слоя диоксида кремния. Основу суспензии с $\text{pH} \approx 11$ в этом случае составляют: щёлочь (например, KOH), абразивный порошок на основе оксида кремния (размер частиц 10–3000 нм, типичный размер 160 нм) и вода. Взаимодействие химически активных частиц (ионов гидроксила) с SiO_2 приводит к образованию гидроксида кремния $\text{Si}(\text{OH})_4$, который легко удаляется абразивом. Течение суспензии и движение пластины по полировальнику обеспечива-

ют непрерывную подачу свежих реагентов к полируемой поверхности, а также удаление продуктов химических реакций и полировки. Аналогичные процессы протекают и при полировке других материалов, например слоёв меди, алюминия, вольфрама или нитрида тантала, однако при этом для получения суспензии с pH от 1,5 до 4 используются другие исходные вещества. В качестве абразива обычно применяется порошок окиси алюминия (размер частиц 100–2000 нм), а в качестве химического реагента – различные варианты окислителей: H_2O_2 , FeNO_3 или KIO_3 .

В общем случае состав суспензии и количество процессов ХМП, используемых для планаризации одного слоя, зависят от материала полируемого слоя (SiO_2 , диэлектрик с низким ϵ , металлы или их нитриды), а также от толщины слоя, которую необходимо удалить, и степени шероховатости поверхности, которую необходимо получить по окончании процесса. Количество процессов ХМП, используемых при изготовлении ИС, растёт с увеличением количества слоёв межуровневой разводки. Так, например, если в 1994 г. среднее количество операций ХМП не превышало трёх, то их количество в 1997 г. уже равнялось 9, причём 5 из них были ХМП диэлектрика, а 4 – ХМП металлов.

Согласно первоначальной модели, разработанной Престоном (F.W. Preston), скорость удаления материала полируемого слоя описывается уравнением, которое является эмпирическим выражением и имеет следующий вид:

$$MRR = \Delta h / \Delta t = K_p P_w V_r, \quad (10.1)$$

где MRR – скорость удаления материала (м с^{-1}), Δh – изменение средней толщины полируемого слоя (м), Δt – время процесса (с), K_p – константа Престона (Па^{-1}), P_w – давление, приложенное к пластине (Па), V_r – скорость движения пластины относительно полировальника (м с^{-1}). С увеличением давления, приложенного к пластине, и скорости её движения происходит рост скорости удаления материала. Влияние состава суспензии, температуры и других параметров процесса учитывается эмпирическим коэффициентом K_p , который определяется для каждой совокупности параметров процесса ХМП.

В более поздней модели, разработанной Жао и Ши, была получена более точная зависимость MRR от P_w , которая записывается в виде:

$$MRR = K(V_r) (P_w^{2/3} - P_{\text{lim}}^{2/3}), \quad (10.2)$$

где $K(V_r)$ – константа, зависящая от скорости движения пластины относительно полировальника; P_{lim} – предельное давление, ниже которого удаление материала не осуществляется. Обе эти модели описы-

вают лишь наиболее общие закономерности и не могут быть использованы, например, для оценки неравномерности распределения величины *MRR* по площади пластины, вызванной неоднородным приложением давления к пластине или влиянием плотности рисунка.

Типичные значения скорости удаления материала, которые используются на практике, превышают 170 нм/мин и 250 нм/мин для SiO₂ и W соответственно.

Очистка поверхности пластины. На поверхности полупроводниковой структуры после ХМП остаётся большое количество всевозможных загрязнений, это остатки абразивных частиц (SiO₂, Al₂O₃), остатки химических веществ из суспензии (анионы SiO₃²⁻, WO₄²⁻, IO₃²⁻, ПАВ и др.), щелочные металлы (ионы K⁺ или Na⁺), металлы (ионы Fe³⁺), остатки от полировальника (полимеры), а также остатки от кондиционера (алмаз). Для удаления этих загрязнений и получения абсолютно чистой поверхности, пригодной для осаждения очередного слоя, производится очистка поверхности. Очистка должна удовлетворять целому комплексу требований, среди которых следует назвать следующие: высокая скорость процесса и его воспроизводимость, отсутствие привносимых дефектов, неизменность планарности и шероховатости поверхности, полное отсутствие загрязняющих остатков и их переосаждения, низкая стоимость оборудования.

Данному комплексу требований отвечают два наиболее популярных метода очистки. Это механическое скруббирование (с или без химических реагентов, с или без активации ультразвуком), а также мокрая химическая очистка (с или без активации ультразвуком). К достоинствам метода механического скруббирования можно отнести возможность очистки обеих сторон и торцов пластины, высокую эффективность очистки щётками, возможность очистки пластин с рельефной поверхностью, совместимость процесса с «мокрой» химической очисткой. Однако метод обладает и рядом недостатков, которые необходимо учитывать при его использовании, это:

- возможность повреждения пластины при механическом контакте щётки с поверхностью структуры;
- возможность задержки частиц в щётке и их переосаждения на поверхность пластины;
- возможность влияния электростатической зарядки на силу адгезии частиц к щётке или пластине;
- сложность очистки отверстий с большим аспектным соотношением;
- возможность разрушения щётки и образования полимерных частиц.

К достоинствам метода химической очистки следует отнести то, что загрязнения в результате химических реакций легко растворяются и удаляются с поверхности, а дополнительная ультразвуковая активация позволяет эффективно удалять частицы с поверхности пластины. Кроме того, метод характеризуется низкой стоимостью и высокой производительностью процесса. Недостатки метода заключаются в том, что для каждого материала полируемого слоя необходимо использовать свой набор реактивов (нет универсального реактива), а также в том, что возможно накопление частиц в ванне обработки и повреждение элементов ИС вследствие кавитации при плохо контролируемой ультразвуковой активации процесса.

Контроль качества выполнения химико-механической планаризации. Контроль качества выполнения как операции полировки, так и операции очистки поверхности производится по следующей совокупности параметров:

- толщина удаленного слоя (толщина оставшегося слоя);
- неоднородность распределения толщины оставшегося слоя по площади пластины (within-wafer-non-uniformity, WWNU);
- длина планаризации (планарность поверхности пластины и кристалла, а также воспроизводимость планарности от кристалла к кристаллу);
- наличие углублений на планаризованной поверхности;
- наличие мест эрозии на планаризованной поверхности;
- наличие углублений контактных столбиков (plug recess);
- шероховатость поверхности;
- плотность дефектов;
- чистота поверхности.

Неоднородность распределения толщины оставшегося слоя является одним из основных параметров, характеризующих качество выполнения операции ХМП, и появляется вследствие существования неравномерности распределения величины MRR по площади пластины. Величина WWNU определяется как отношение среднеквадратичного отклонения толщины оставшегося слоя к средней толщине этого слоя и для типичного процесса ХМП не должна превышать 5%.

Длина планаризации является другим важным параметром. По своей сути, длина планаризации – это расстояние, на котором в результате полировки происходит изменение высоты рельефа (например, так, как это показано на рис. 10.10). Причина того, что планаризация может быть не полной (длина планаризации не равна бесконечности), связана, с одной стороны, с различной плотностью рисунка рельефа, а с другой стороны, с мягкостью полировальника.

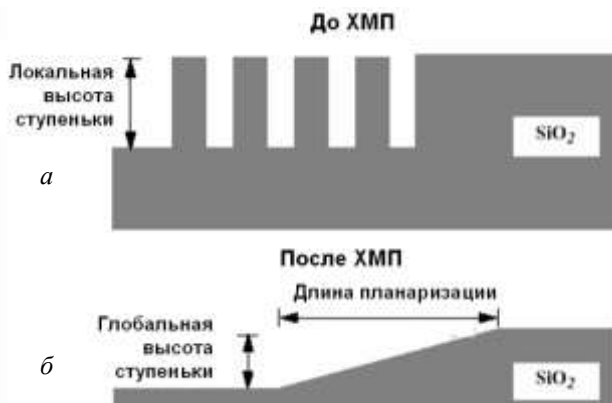


Рис. 10.10. Изображения рельефной поверхности до (а) и после (б) планаризации, демонстрирующие понятие длины планаризации

Различают два характерных вида планаризации рельефа. Глобальная планаризация реализуется в случае, когда по всей площади пластины наблюдается однородное распределение толщины оставшегося слоя. Для локальной планаризации характерно наличие участков с плоской поверхностью различной высоты и участков, на которых происходит изменение высоты рельефа.

Примеры химико-механической планаризации. На рис. 10.11 и рис. 10.12 представлена последовательность операций при планаризации SiO_2 , а также при 2- и 3-шаговой планаризации меди и тантала (нитрида тантала) с двумя и тремя типами суспензии соответственно.

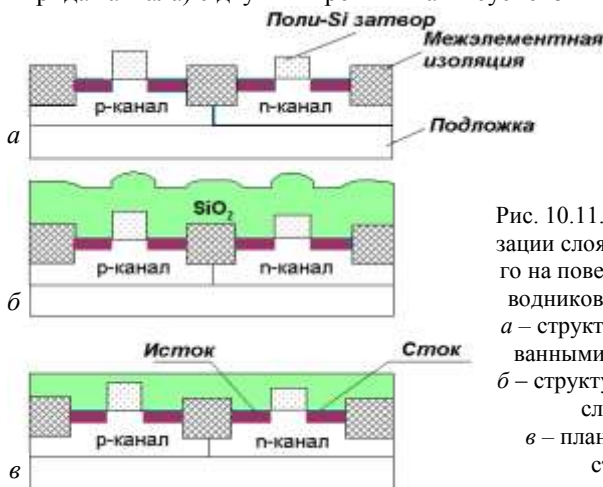


Рис. 10.11. Пример планаризации слоя SiO_2 , осаждённого на поверхность полупроводниковой Si-структуры: а – структура со сформированными транзисторами; б – структура с осаждённым слоем SiO_2 ; в – планаризированная структура

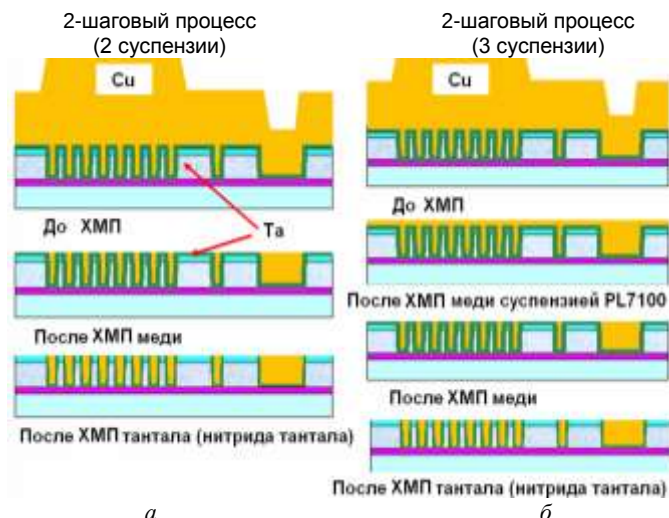


Рис. 10.12. Пример планаризации слоя SiO_2 , осаждённого на поверхность полупроводниковой Si-структуры:

а – структура со сформированными транзисторами;
б – структура с осаждённым слоем SiO_2 ; *в* – планаризированная структура

Двухшаговая планаризация металлических слоёв (два типа суспензии) используется для селективного удаления слоя меди и подслоя тантала (нитрида тантала). Трёхшаговый процесс характеризуется большой скоростью удаления меди на первом этапе (используется более грубый абразив), прецизионным удалением оставшегося слоя Cu на втором этапе (мелкий абразив) и прецизионным удалением слоя тантала (нитрида тантала) на третьем шаге.

11. Формирование транзисторов в приповерхностных слоях кремния (FEOL)

11.1. Основные понятия и тенденции развития

Уменьшение топологических размеров транзистора на 30% приводит к двукратному увеличению плотности их размещения на кристалле и к росту быстродействия примерно на 50%. Безусловно, интересен ответ на вопрос – когда же будет достигнут предел масштабирования транзистора и что нужно сделать для того, чтобы преодолеть этот предел? Оказывается, уже сегодня правило пропорционального масштабирования не выполняется. В основном это связано с тем, что с уменьшением размеров элементов транзистора и толщины подзатворного диэлектрика существенно возрастают ток транзистора в выключенном состоянии, I_{off} и ток утечки. Это приводит к росту активных потерь в транзисторе и к резкому увеличению количества выделяемого тепла. При этом в связи с всё уменьшающейся площадью транзистора становится всё более трудно отвести и рассеять это тепло. Один из выходов из сложившейся ситуации, который активно используется на практике, – это уменьшение напряжения питания ИС. Однако этого оказывается недостаточно, и для решения проблем, возникающих при масштабировании, привлекается множество других способов. Эти способы в основном связаны с изменением конструкции и технологии изготовления транзисторов. В связи с этим становится понятным, что та часть технологического маршрута, которая связана с изготовлением активных элементов, чрезвычайно важна и постоянно нуждается в модернизации.

Как уже говорилось во введении, весь процесс производства кристалла ИС условно делится на две примерно равные по длительности части. Первая часть называется *front end processing* или *front end of line* (FEOL) и включает процессы, выполняемые до разделительной линии, показанной на рис. 1.2. Все эти технологические операции связаны с изготовлением транзисторов, диодов, других активных или пассивных элементов, формируемых в приповерхностном слое кремниевой пластины, а также с созданием межэлементной разводки по слою диэлектрика, осаждённому на кремний. Среди наиболее важных технологических операций, используемых в этой части маршрута изготовления ИС, можно назвать следующие:

- эпитаксиальное наращивание слоёв, в том числе селективное эпитаксиальное наращивание гетероструктур;
- оптическая проекционная литография;

- ионное легирование, которое используется, начиная с формирования сверхглубоких «карманов», и, заканчивая приготовлением сверхмелких слоёв;

- быстрый термический отжиг, в том числе и в реактивной среде;
- формирование слоя подзатворного диэлектрика, посредством термического окисления Si (возможно с последующей его нитридацией) и/или осаждения сверхтонких слоёв диэлектрика;

- осаждение слоёв сильнолегированного поликремния;
- осаждение слоёв металлов, их силицидов или нитридов;
- осаждение слоёв диэлектриков;
- травление металлов и диэлектриков.

В связи с проблемами масштабирования часть этих технологических операций модернизируется или заменяется другими. Аналогичные действия выполняются и с материалами, используемыми для изготовления элементов ИС. Рассмотрим некоторые из подходов, призванных решить проблемы масштабирования, более подробно.

11.2. Инженерия канала транзистора

Структуры кремний-на-изоляторе. Как уже отмечалось выше, ток в выключённом состоянии транзистора экспоненциально растёт по мере масштабирования размеров элементов микросхем. По данным компании Intel, с уменьшением длины канала с 0,5 до 0,07 мкм (при переходе к технологии с топологической нормой 0,13 мкм) ток I_{off} увеличился на четыре порядка величины – с менее чем 1 пА/мкм до ~10 нА/мкм. При переходе к 65-нм технологии (длина затвора 30 нм) величина I_{off} возрастет еще на порядок. В результате рассеиваемая мощность процессора с 1 млрд транзисторов будет на два порядка выше, чем у процессора со 100 млн транзисторов. Один из перспективных путей решения проблемы роста I_{off} , жизнеспособность которого доказана практикой, – это переход на подложки типа кремний-на-изоляторе (КНИ). В этом случае тонкий приповерхностный слой Si, в котором формируются все элементы ИС, отсечён от подложки слоем диэлектрика (рис. 11.1). В результате предотвращается растекание тока по объёму кремния и уменьшается величина тока в выключенном состоянии. На подложках данного типа компания IBM уже несколько лет производит процессоры семейства PowerPC.

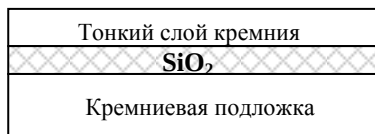


Рис. 11.1. Поперечное сечение одного из вариантов структуры типа кремний-на-изоляторе

Более того, реализация ИС на КНИ-структурах решает целый ряд других проблем, которые по важности ничуть не уступают проблеме подавления I_{off} . Так, за счёт уменьшения паразитных ёмкостей стока и истока увеличивается рабочая частота транзистора (рис. 11.2), существенно упрощается технология изоляции отдельных транзисторов от подложки и друг от друга, повышается радиационная стойкость ИС. В силу всех этих причин структуры КНИ уже в ближайшее время станут доминирующими при изготовлении целого ряда микросхем.

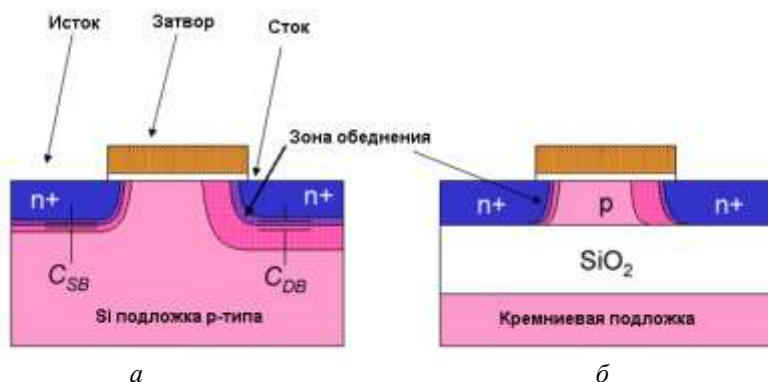


Рис. 11.2. Паразитные ёмкости стока и истока для транзистора, сформированного на подложке «объёмного» кремния (а) и на структуре кремний-на-изоляторе (б)

Данные, приведённые на рис. 11.3, демонстрируют тенденции замены обычных подложек «объёмного» Si на подложки КНИ. Видно, что скоро традиционные подложки из «объёмного» кремния уже не будут удовлетворять требованиям закона Мура. Использование КНИ-структур в течение 2000–2010 гг. позволяет не только отвечать требованиям закона Мура, но и несколько превышать их. Согласно прогнозу, вплоть до 2015 г. потенциала, заложенного в КНИ-структуры, будет достаточно для выполнения закона Мура.

Для производства КНИ-структур используют четыре основные технологии: технологию кремний-на-сапфире (КНС), SIMOX, бондинг, а также одну из разновидностей бондинга – технологию Smart Cut™.

Технология КНС предполагает эпитаксиальное наращивание слоёв кремния на поверхности диэлектрической сапфировой подложки. Структуры КНС имеют достаточно высокую стоимость, что во

многом связано с большой исходной ценой монокристаллических сапфировых подложек.

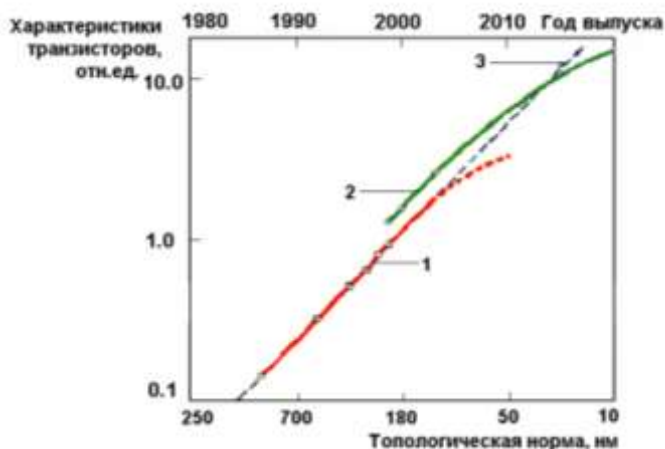


Рис. 11.3. Сравнительный анализ относительных технических характеристик транзисторов с различной топологической нормой, полученных на подложках «объемного» кремния (1) и на структурах кремний-на-изоляторе (2), с требованиями закона Мура (3)

Впервые возможность синтеза SiO_2 посредством имплантации ионов кислорода в кремний была показана Вантанаби и Тои (Wantanabei и Tooi) в 1963 г. В 1982 г. компанией NTT была впервые продемонстрирована схема статической памяти ёмкостью 1 кБ, сделанная на SIMOX-подложке. Первый коммерческий сервер AS/400, в котором использовался микропроцессор на основе SIMOX-структуры, был выпущен в продажу компанией IBM в 2000 г. Основные тенденции развития данной технологии связаны с уменьшением толщины отсечённого слоя кремния от 100 нм в 2000 г. до 15–75 нм в 2010 г. и улучшением абсолютной величины однородности этого слоя по толщине от $\pm 7,5$ нм (2000 г.) до ± 1 нм (2010 г.).

Бондинг (bonding) – это метод формирования КНИ-структуры посредством твердофазного диффузионного сращивания двух различным образом приготовленных кремниевых пластин. Суть метода заключается в следующем. Пластина *A* (рис. 11.4) со стоп-слоем для травления и пластина *B* со слоем термического оксида складываются лицевыми поверхностями друг к другу и сжимаются так, чтобы в дальнейшем они удерживались силами Ван-дер-Ваальса. Затем пластины подвергаются термообработке при приложении дополнительного усилия сжатия, в результате чего происходит их твердофазное

сращивание. Пластина *A* со своей обратной стороны стравливается до стоп-слоя и полируется. В результате получается КНИ-структура, у которой тонкий слой Si располагается над слоем диэлектрика. Если стоп-слой заранее сформировать невозможно, то пластина *A* может быть утонена с помощью шлифовки и последующей полировки.

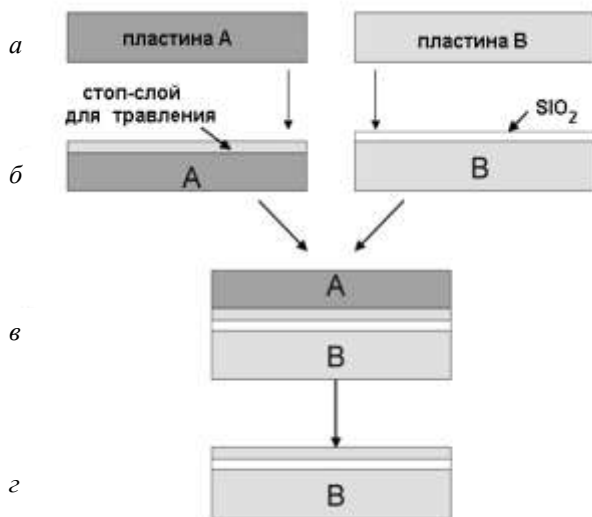


Рис. 11.4. Последовательность операций изготовления КНИ-структуры методом бондинга: исходные кремниевые пластины *A* и *B* (*а*), после формирования на пластине *A* стоп-слоя и слоя SiO_2 на пластине *B* (*б*), после соединения и диффузионного сращивания пластин (*в*), готовая КНИ-структура после удаления пластины *A* до стоп-слоя (*г*)

Для успешной реализации технологии бондинга необходимо выполнение нескольких условий – отсутствие на поверхности пластин химических загрязнений и пылевых частиц, а также высокая плоскостность обеих пластин. Наличие частиц или неплоскостность приводят к появлению локальных мест, где между сложенными пластинами образуются зазоры и не происходит сращивание. В результате после изготовления ИС и разделения пластины на кристаллы некоторые чипы могут расслоиться, что приведёт к уменьшению процента выхода годных кристаллов. Недостатком бондинга является то, что на пластине *A* необходимо удалять слой, практически равный её толщине, оставляя очень тонкую плёнку Si, что на практике достаточно сложно реализовать. При этом из всей пластины *A* используется только её малая часть, весь остальной материал полностью теряется и не может

вторично использоваться. Для преодоления этих недостатков М. Бруелом (М. Bruel) была предложена технология Smart Cut™.

Отличие метода Smart Cut™ от классического бондинга заключается в том, что после срачивания пластин вместо операции травления или шлифовки пластины *A* проводится её расщепление по слою микропузырьков водорода, сформированных в ней на заданной глубине посредством высокотоковой ионной имплантации ионов водорода с последующим отжигом (рис. 11.5). При этом отщёпленная толстая часть пластины *A* вторично используется в качестве новой пластины *A* для создания следующей КНИ структуры.

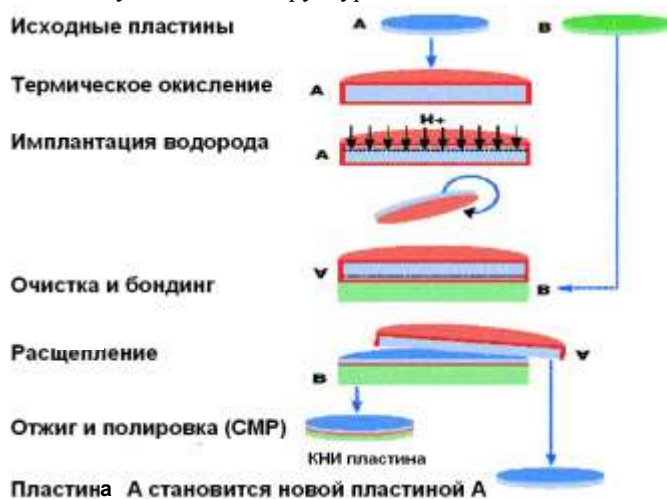


Рис. 11.5. Последовательность операций изготовления КНИ-структуры методом Smart Cut™

В дальнейшем с целью получения гладкой поверхности производится либо полировка поверхности отсечённого слоя, либо её травление до заранее сформированного стоп-слоя.

Новые типы транзисторов, которые становятся возможным формировать на КНИ-подложках, показаны на рис. 11.6. Первый тип транзистора – это прибор с частично обедненным каналом и тонким слоем Si, который очень похож на классический транзистор (рис. 11.6, *a*). Второй тип – это транзистор с полным обеднением и ультратонким слоем Si (рис. 11.6, *б*). Для достижения полного обеднения используются два затвора, один из которых расположен сверху, а другой снизу канала. Дальнейшее развитие этого транзистора за-

ключается в дальнейшем утонении канала и уменьшении длины затвора (рис. 11.6, в). Возможные варианты развития идеи двухзатворного транзистора (так называемые FinFET транзисторы) представлены на рис. 11.6, з и д. Это двухзатворный транзистор, но с затворами, расположенными не по вертикали, а по горизонтали (рис. 11.6, з), а также трёхзатворный (рис. 11.6, д) и даже четырёхзатворный транзисторы (на рисунке не показан). К достоинству транзисторов данного типа можно отнести увеличенный в 2–4 раза ток (в зависимости от числа затворов), а к недостатку – пропорционально увеличенную ёмкость затвора.

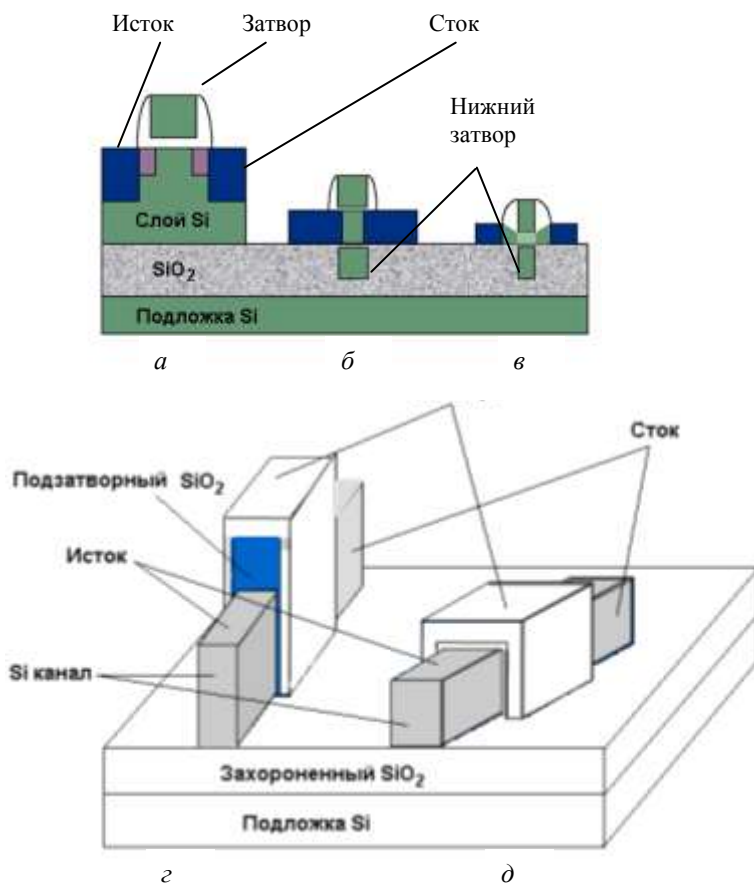


Рис. 11.6. Новые типы транзисторов, которые могут изготавливаться на КНИ-подложках

Транзисторы с каналом на основе напряжённого кремния или SiGe. Быстродействие транзистора определяется граничной частотой f_t , которая в общем случае прямо пропорциональна подвижности носителей заряда и обратно пропорциональна длине канала транзистора:

$$f_t = \mu / L_k, \quad (11.1)$$

где μ – подвижность носителей заряда в канале транзистора; L_k – длина затвора транзистора. Согласно (11.1) для увеличения быстродействия необходимо уменьшать L_k или/и увеличивать μ . Способ, который традиционно используется для удовлетворения требованиям закона Мура, – это уменьшение длины затвора. Другая возможность увеличения быстродействия открывается, если традиционно используемый материал канала (кремний), заменить материалом с более высокой подвижностью носителей. Сегодня такой подход к решению проблемы масштабирования реализован для транзисторов различного типа проводимости. Так, найдены материалы канала, которые позволяют увеличить подвижность, как электронов, так и дырок в каналах n - и p -типа проводимости, соответственно. Среди этих материалов наибольшую практическую значимость имеют напряжённый кремний (strained silicon) и SiGe.

Напряжённый Si – это слой кремния, находящийся под большим растягивающим или сжимающим механическим напряжением. Введение напряжения в материал приводит к изменению параметра решётки Si и энергетической зоны структуры, уменьшению рассеяния носителей и/или их эффективной массы. Все эти изменения ведут к росту подвижности носителей заряда.

Различают два основных случая приложения механического напряжения к слою Si: одноосное и двухосное напряжение. В первом случае растягивающее или сжимающее напряжение действует только вдоль одной оси, которая сонаправлена с направлением движения носителей в канале. При этом если слой Si n -типа проводимости подвергнуть растягивающему напряжению, то можно увеличить подвижность электронов, а если к p -слою приложить сжимающее напряжение, то можно увеличить подвижность дырок. Введение растягивающего напряжения в канал обычно производится с помощью нанесения на поверхность транзистора слоя Si_3N_4 , имеющего напряжение нужного знака (рис. 11.7, *a*). Величина механического напряжения в плёнке слоя Si_3N_4 задаётся правильным выбором метода и режима её осаждения. Сжимающее напряжение в канал вводится с помощью селективного гетероэпитаксиального наращивания слоёв $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ в областях стока и истока транзистора. В результате того, что $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$

имеет большую постоянную решётки, чем Si, канал транзистора подвергается сжимающим напряжениям (рис. 11.7, б).

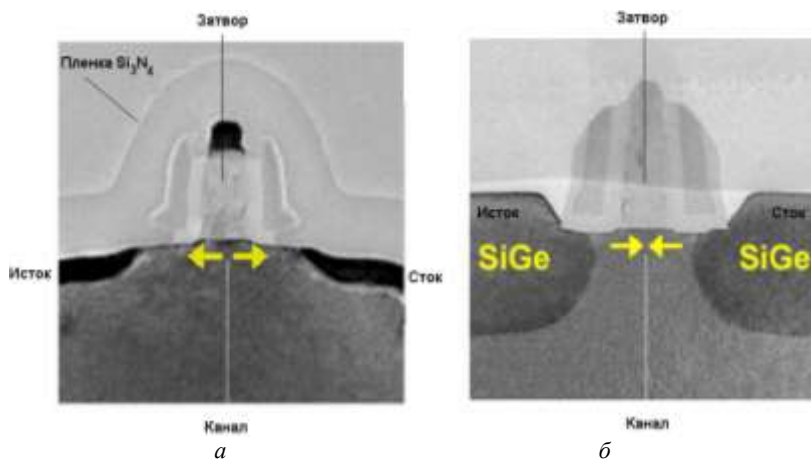


Рис. 11.7. Изображение поперечного сечения транзистора, к каналу которого приложено одноосное растягивающее напряжение, создаваемое плёнкой Si_3N_4 (а), и одноосное сжимающее напряжение, создаваемое SiGe областями истока и стока транзистора (б)

В случае двухосного напряжения силы, действующие на решётку кремния, лежат в плоскости пластины, но направлены во взаимно перпендикулярных направлениях вдоль оси X и Y . Введение двухосного растягивающего напряжения в слой кремния производится посредством гетероэпитаксиального наращивания слоя кремния на предварительно выращенный слой $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ (рис. 11.8, а). При этом опять же вследствие того, что постоянная решётки у $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ на 1% больше, чем у Si, на решётку вышележащего слоя Si в плоскости роста действуют растягивающие силы (рис. 11.8, б). В случае двухосного растяжения увеличивается подвижность как электронов, так и дырок, поэтому этот способ в общем случае применим к транзисторам обоих типов проводимости. Величина растягивающего напряжения в слое Si и, следовательно, приращение подвижности носителей растут с увеличением содержания Ge в плёнке $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$.

Эффект влияния механических напряжений на электрические характеристики полупроводников был обнаружен в начале 50-х годов прошлого столетия. Компания IBM впервые предложила использовать двухосно напряжённый слой Si для улучшения параметров МОП-транзисторов. Позднее для этих же целей компанией Intel было

предложено применять одноосно напряженные слои Si. В настоящее время обе технологии хорошо разработаны и нашли практическое применение.

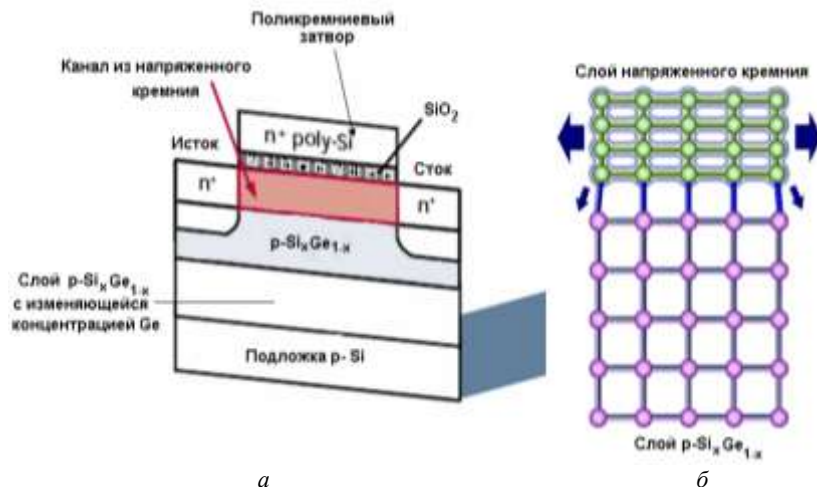


Рис. 11.8. Схематическое изображение поперечного сечения транзистора, к каналу которого приложено двухосное растягивающее напряжение, создаваемое нижележащей плёнкой $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ (а) и поатомное изображение границы раздела плёнок $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}/\text{Si}$, демонстрирующее причины возникновения механического напряжения в канале транзистора (б)

Другая возможность повысить подвижность носителей в канале — это использовать в качестве материала канала слой SiGe или Ge, для которых характерна более высокая подвижность электронов, чем для Si. Как дальнейшая перспектива рассматривается возможность создания канала из материалов с ещё большей подвижностью электронов, например из GaAs. Недостаток этих методов, по сравнению с напряжённым Si, связан с тем, что в этом случае подзатворный диэлектрик необходимо создавать не на «родном» кремнии, а на поверхности материалов, имеющих собственный оксид плохого качества. Это создаёт серьезные проблемы с величиной плотности поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик/полупроводник, а также множество технологических проблем.

11.3. Инженерия затвора транзистора

При масштабировании транзистора толщина подзатворного диэлектрика должна падать пропорционально уменьшению длины кана-

ла (см. рис. 1.1). Как уже говорилось выше, это сопровождается сильным увеличением тока утечки затвора, а также уменьшением напряжения пробоя. Более того, существует физическое ограничение на минимальную толщину подзатворного диэлектрика, которое близко к 1–1,2 нм (нескольким монослоям молекул SiO_2). При меньшей толщине сложно получить однородную по толщине плёнку диэлектрика без проколов. Поэтому толщина плёнки должна оставаться на технологически приемлемом уровне 1–4 нм.

Наиболее приемлемое из возможных решений данных проблем – это замена материала подзатворного диэлектрика с традиционного SiO_2 на диэлектрик с более высокой диэлектрической проницаемостью ϵ (high-k dielectric). Обоснование этой идеи следует из простейшей формулы емкости плоского конденсатора

$$C = \epsilon S / d, \quad (11.2)$$

где S – площадь затвора; d – толщина подзатворного диэлектрика. Для того чтобы при увеличении толщины d сохранялась емкость затвора, необходимо увеличивать значение ϵ . К настоящему времени в качестве материала для такой замены исследовано большое количество самых разнообразных веществ: Si_3N_4 , Al_2O_3 , ZrSi_xO_y , ZrAl_xO_y , ZrN_xO_y , ZrO_2 , HfO_2 , La_2O_3 , Pr_2O_3 , Gd_2O_3 , Y_2O_3 . Наиболее перспективным из них считается оксид гафния, HfO_2 ($\epsilon = 22\text{--}30$), что связано с его высокой термостабильностью, большой шириной запрещенной зоны и неплохой совместимостью с традиционными процессами FEOL. Исследования показали, что толщина HfO_2 -диэлектрика может быть в $\epsilon_{\text{HfO}_2} / \epsilon_{\text{SiO}_2} = 5,6\text{--}7,7$ раз больше, чем SiO_2 ($\epsilon = 3,9$), при том же значении тока утечки. Для технологии с топологической нормой 65 нм толщина подзатворного диэлектрика из HfO_2 составит ~ 4 нм, что вполне приемлемо со всех точек зрения. Ключевые задачи, которые потребуют решения при освоении этой технологии, – обеспечение приемлемых плотности состояний на границе раздела, плотности дефектов, стабильности и стойкости к воздействию горячих носителей. Для решения ряда из этих задач предложено использовать промежуточный вариант и создавать двухслойный диэлектрик – сначала на поверхности канала формируется «родной» оксид кремния с минимально возможной толщиной, а затем на его поверхность осаждается более толстый слой HfO_2 .

Другой материал для замены диоксида кремния, а также технологию его создания предложили разработчики фирмы NEC. В конце 2002 г. они разработали технологию азотирования диоксида кремния и получения из него оксинитрида (SiO_xN_y). При толщине затворного диэлектрика 1,5 нм им удалось на два порядка уменьшить ток утечки и на порядок повысить безотказность прибора. В соответствии с ITRS

эти значения приемлемы для высокопроизводительных устройств, к быстройдействию которых предъявляются повышенные требования.

Затвор транзистора обычно выполняют из сильнолегированного поликремния с контактом из силицида металла. При этом толщина обедненной области, формируемой у границы раздела затвора и подзатворного диэлектрика при подаче смещения, приблизительно равна 0,5–1 нм. А поскольку эта область включена последовательно с затворным оксидом, толщина ее возрастает, что приводит к уменьшению тока канала. Уменьшить толщину обедненной области и изменить ситуацию к лучшему можно, если затвор из поликремния заменить затвором из металла. Помимо прочего, это приведет к уменьшению сопротивления затвора, что полезно для роста быстрогодействия транзистора, а также полностью исключит возможность проникновения бора из материала канала в материал затвора.

Для успешного развития такого подхода необходимо подобрать металл, который был бы совместим с технологией FEOL и был бы согласован по значению работы выхода с каналами *n*- и *p*-типа проводимости. Возможны два решения последней проблемы: использовать для транзисторов обоих типов один и тот же металл со средним значением ширины запрещенной зоны или два различных оптимизированных по своим характеристикам металла (например, TaSiN и TiN для *n*- и *p*-канальных транзисторов соответственно). В первом случае процесс формирования транзисторных структур упрощается, но, как правило, параметры транзисторов несколько хуже, чем во втором случае.

Другими проблемами, требующими решения, является обеспечение совместимости материалов затвора и затворного диэлектрика, а также разработка и внедрение всех операций формирования металлического электрода в обычный технологический процесс изготовления ИС. Использование металлического затвора при производстве ИС планируется начиная с 2008 г.

11.4. Технологический маршрут FEOL

В заключение рассмотрим типовой упрощенный маршрут изготовления К-МОП ИС с карманами *n*-типа на стадии FEOL. На рис. 11.9 приведены этапы реализации маршрута, причём как вид сверху, соответствующий топологиям литографических шаблонов (несколько шаблонов наложены друг на друга), так и конечное трёхмерное изображение поперечного сечения структуры.

Для изготовления структуры используется подложка Si *p*-типа проводимости с концентрацией примеси на уровне 10^{16} см^{-3} . Сначала на всей поверхности выращивается слой толстого оксида Si ($d =$

= 500 нм) и с помощью первой литографии вскрываются окна над областями будущих карманов n -типа (рис. 11.9, *а*). Затем, используя рисунок в плёнке SiO_2 как маску, проводится имплантация ионов, дающих n -тип проводимости. Так как карман должен быть достаточно глубоким, то обычно используют лёгкие ионы фосфора. После формирования n -карманов можно полагать, что площадки для формирования транзисторов с каналами n - и p -типа проводимости привязаны по всей площади пластины. В течение следующей операции опять производится рост толстой пленки SiO_2 вокруг активных областей будущих транзисторов, а затем рост тонкого оксидного слоя ($d = 2,5$ нм) подзатворного диэлектрика на поверхности активных областей. Вслед за этим методом осаждения из газовой фазы производится осаждение плёнки легированного поликремния толщиной 300 нм, в которой методами литографии и сухого плазменного травления формируется рисунок будущих затворов с межсоединениями.

Затем, используя две различного вида маски, производится имплантация n^+ - и p^+ -областей истоков и стоков транзисторов (рис. 11.9, *б*). При этом поликремниевый затвор используется как маска, которая позволяет очень точно расположить области истока и стока относительно затвора. Такой метод создания областей истоков и стоков называется технологией самосовмещения. Данная технология позволяет обеспечивать большую точность позиционирования истока, затвора и стока друг относительно друга, чем это может позволить используемая для этого литографическая техника. Так как затем к созданным на этом этапе областям будут формироваться омические контакты, то используются достаточно большие дозы имплантации с тем, чтобы концентрация носителей заряда в них была существенно больше 10^{18} см^{-3} . При таких уровнях легирования контакт металл/Si является омическим в независимости от типа металла, что несколько упрощает дальнейшую технологию формирования омических контактов.

В течение следующей операции на всю поверхность пластины методом осаждения из газовой фазы наносится пассивирующая плёнка SiO_2 ($d = 500$ нм), которая защищает все элементы транзисторов от возможного загрязнения (рис. 11.9, *в*). С помощью литографии с последующим травлением вскрываются окна до поверхности Si (или поликремния) с тем, чтобы на следующем шаге организовать оставшиеся межсоединения между элементами. Для этого на всю поверхность наносится проводящая плёнка, в которой с помощью литографического процесса с последующим травлением формируется рисунок межэлементной разводки (рис. 11.9, *з*).

Формирование данного рисунка происходит уже по достаточно развитому рельефу, поэтому ко всем операциям на данном шаге предъявляются повышенные требования. Так как формируемые межсоединения создают электрические связи между ближайшими элементами, то их часто называют локальными межсоединениями (local interconnect), и это самый первый уровень соединений.

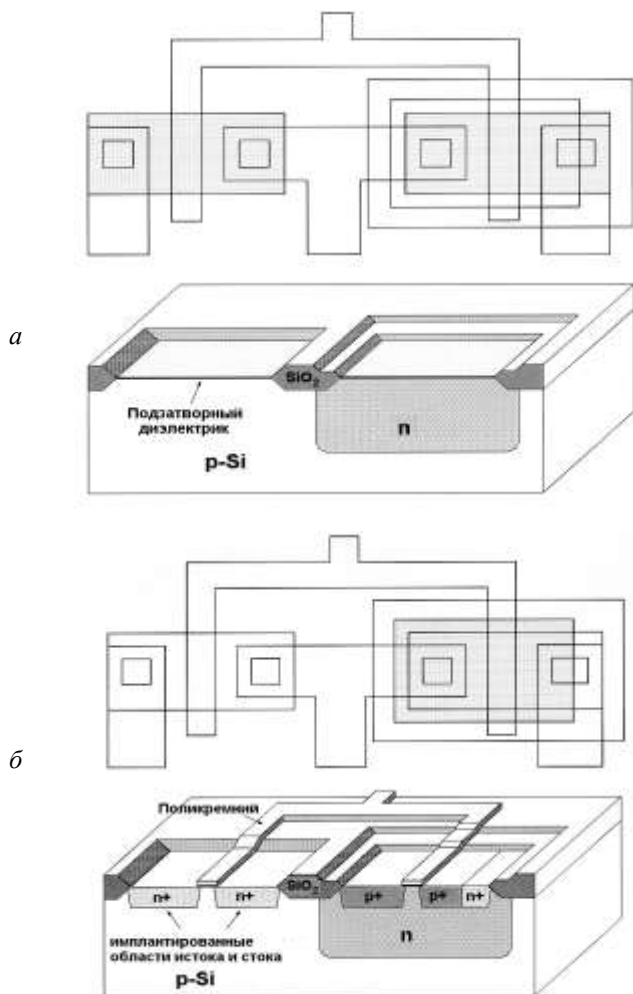


Рис. 11.9 (начало). Последовательность изготовления комплементарной МОП ИС с карманом *n*-типа проводимости

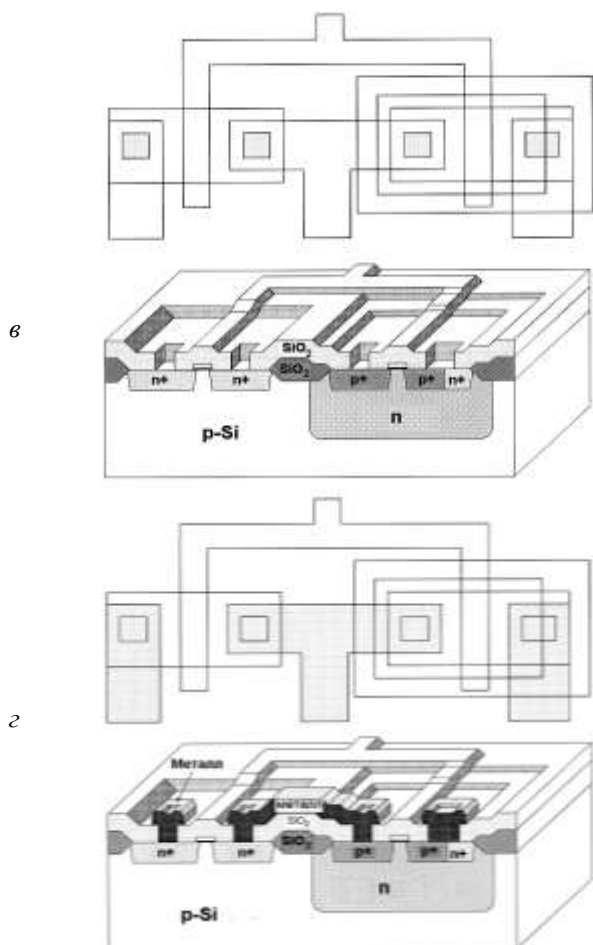


Рис. 11.9 (продолжение) Последовательность изготовления комплементарной МОП ИС с карманом n -типа проводимости

В качестве материала для этих целей используют либо легированный поликремний, либо металлы. Преимущества поликремния в том, что он, в отличие от металлов, очень стабилен и не реагирует с окружающими материалами. Металлические проводники нуждаются в дополнительной защите, которая делается с помощью формирования ниже- или вышележащих адгезионных, барьерных и/или капсулирующих слоёв из нитридов металлов (например, TiN).

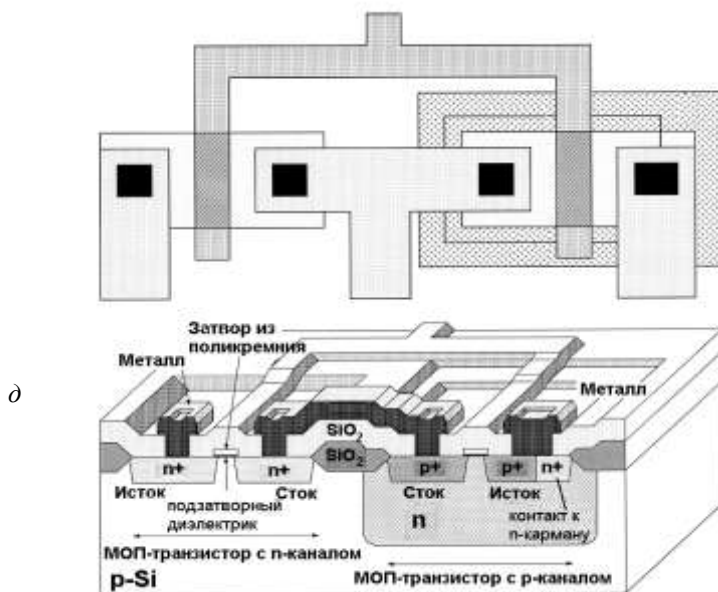


Рис. 11.9 (окончание). Последовательность изготовления комплементарной МОП ИС с карманом n -типа проводимости

Введение такого рода дополнительных операций значительно удорожает процесс производства ИС. Недостатком поликремния является то, что, в отличие от металлов, он имеет высокое сопротивление. С учётом всех этих факторов и принимается решение о выборе материала для локальных межсоединений.

Изображение участка ИС по завершении вышерассмотренных шагов приведено на рис. 11.9, д. Последняя операция, которая обычно выполняется — это осаждение на всю поверхность слоя SiO_2 ($d = 500$ нм), который защищает её от воздействия атмосферы при возможном межоперационном хранении структуры на этапе перехода от процессов FEOL к процессам BEOL.

Рассмотренный упрощённый маршрут создания К-МОП ИС на этапе FEOL состоит из 7 литографий и включает в себя 34 основные технологические операции.

12. Формирование межэлементных соединений и межуровневой разводки (BEOL)

12.1. Основные понятия и тенденции развития

Одна из основных тенденций развития микроэлектроники, описываемая законом Мура, – это увеличение количества транзисторов, входящих в кристалл ИС. Рост числа транзисторов приводит к увеличению количества слоёв межуровневой разводки, необходимых для обеспечения соединений между всеми элементами ИС. Так, если микропроцессор компании AMD 1991 г. выпуска (Am386, 33,40 МГц), выполненный с топологической нормой 1 мкм, имел два уровня разводки, то процессор этой же компании, но уже 2002 г. выпуска (Opteron/Athlon 64,2 ГГц), выполненный с топологической нормой 0,13 мкм, имел уже 9 уровней разводки. Согласно данным ITRS в микросхемах, выполненных по 65-нм технологии, будут использоваться не менее 10 уровней металлизации, шаг локальных токопроводящих линий составит 150 нм, а длина межсоединений достигнет $11 \text{ км}\cdot\text{см}^{-2}$.

Другая важная тенденция, также подчиняющаяся закону Мура, – это рост быстродействия ИС или уменьшение времени задержки сигнала. Суммарная задержка распространения сигнала в ИС складывается из значений задержки на транзисторах (времени переключения), задержки на проводниках разводки ИС. Задержка переключения логического МОП-транзистора зависит от сопротивления канала и общей емкости транзистора, образуемой емкостью затвора и паразитными емкостями *p-n*-переходов сток–подложка и исток–подложка (на их долю приходится ~50% общего значения емкости). Таким образом, для снижения времени задержки необходимо уменьшать сопротивление канала, емкости переходов и емкость затвора. Снижение ёмкостей может быть достигнуто путем уменьшения концентрации легирующей примеси подложки и за счет уменьшения толщины подзатворного диэлектрика. Все эти усовершенствования производятся в рамках процессов FEOL.

По мере уменьшения минимальных размеров элементов ИС увеличиваются емкостные связи между слоями межуровневой разводки (уровнями металлизации), а также между линиями металлизации и проводящими полупроводниковыми (активными) слоями, растёт сопротивление проводников, что приводит к росту RC цепи и увеличению задержки распространения сигнала. При этом внедрение улучшений на стадии FEOL идёт опережающими темпами по отношению

к стадии формирования межуровневой разводки. Этот факт отражают данные рис. 12.1, где видно, что задержка сигнала на глобальной (межуровневой) разводке растёт по мере уменьшения топологической нормы, а задержка сигнала на локальной разводке (разводка первого уровня, выполняемая на стадии FEOL) и на транзисторе показывает противоположную тенденцию – падает с уменьшением топологической нормы.

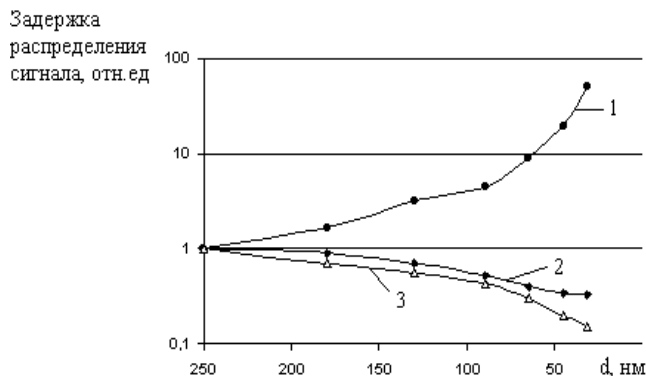


Рис. 12.1. Задержка распространения сигнала в различных элементах ИС в зависимости от топологической нормы:

1 – глобальная разводка; 2 – локальная разводка; 3 – транзистор

Настоящая глава посвящена второй части маршрута изготовления ИС, которая называется back end processing или back end of line (BEOL). BEOL выполняется вслед за FEOL и включает технологические операции, выполняемые выше разделительной линии, показанной на рис. 1.2. Все эти операции связаны с изготовлением межэлементной и межуровневой разводки, а также с формированием контактных площадок для выводов ИС. Среди наиболее важных технологических операций, используемых в этой части маршрута изготовления ИС, можно назвать следующие:

- осаждение слоёв межуровневого диэлектрика;
- оптическая проекционная литография;
- травление диэлектриков с целью вскрытия окон;
- рост металлических столбиков с целью организации межуровневых соединений;
- осаждение металлических слоёв с целью организации соединений в одном уровне;
- планаризация диэлектрических и металлических слоёв.

В связи с ростом задержки распространения сигнала на глобальной разводке, которая ограничивает рост быстродействия ИС в целом, на стадии BEOL приложены и продолжают прилагаться большие усилия, направленные на преодоление данных проблем. Ряд технических и технологических решений, внедряемых сегодня в производство ИС, рассмотрены ниже.

Чтобы ещё раз подчеркнуть растущую важность технологий BEOL, приведём следующие данные. При топологической норме 0,5 мкм для формирования металлизации требовалось вдвое меньше операций, чем для изготовления транзисторов. При норме 0,25 мкм число этих операций сравнялось, при норме 0,13 мкм для формирования металлизации требовалось уже в 1,4 раза больше операций, чем для создания транзисторов, а при норме 65 нм число операций BEOL окажется вдвое больше, чем количество операций FEOL.

12.2. Инженерия межуровневого диэлектрика

Основное решение, которое используется для уменьшения емкостей межуровневой разводки, – это уменьшение диэлектрической проницаемости диэлектрика ϵ , используемого для межуровневой изоляции. Согласно формуле плоского конденсатора (11.2) емкость прямо пропорциональна величине ϵ , поэтому замена традиционного SiO_2 ($\epsilon = 3,9$) на материал с более низкой диэлектрической постоянной уменьшит ёмкость пропорционально падению величины ϵ . К настоящему времени был исследован большой спектр различного типа диэлектрических материалов с $\epsilon < 3,9$, в том числе материалы, наносимые методом осаждения из газовой фазы: диоксид кремния, легированный углеродом SiOC ($\epsilon = 3\text{--}2,5$), диоксид кремния легированный фтором SiOF ($\epsilon = 3,8\text{--}3,4$), алмазоподобный углерод ($\epsilon = 2,8\text{--}3,0$) и CF ($\epsilon = 2,3\text{--}2,7$), а также материалы, наносимые методом центрифугирования: составной органический/неорганический материал Black Diamond компании Applied Materials ($\epsilon = 2,7$), тефлон ($\epsilon = 1,9$), SiLK фирмы Dow Chemical ($\epsilon = 2,6$), пористый SiLK ($\epsilon = 1,5$), парилен ($\epsilon = 2,6$), пористый парилен ($\epsilon = 1,8$), пористый диоксид кремния ($\epsilon = 2\text{--}1,1$) и др. Выбор материала, пригодного для его использования в ИС, определяется не только величиной ϵ , но и целой группой других требований, среди которых большое значение имеют совместимость диэлектрика с процессами BEOL, его стабильность, отсутствие взаимодействия с металлами, а также их нитридами и т.д.

Уменьшение величины ϵ возможно не только с помощью изменения химического состава диэлектрика, но и посредством введения в

него пор, причём рост пористости вещества ведёт к пропорциональному уменьшению величины ϵ . Механизм, ответственный за данную закономерность, достаточно прост. Введение в материал пор приводит к замене вещества с высоким ϵ на воздух – газовую среду, имеющую величину ϵ , близкую к единице. Из данных, приведённых выше, видно, что пористые материалы имеют существенно более низкие значения ϵ , чем их непористые аналоги.

Предельным случаем уменьшения величины диэлектрической постоянной является её уменьшение до единицы. Реализовать такое низкое значение ϵ возможно, если в качестве материала межуровневого диэлектрика использовать воздух, т.е. формировать так называемые воздушные мосты. Технология воздушных мостов хорошо развита и используется в СВЧ ИС малой степени интеграции на основе GaAs. Рассмотрим один из простейших вариантов создания воздушных мостов (рис. 12.2). Сначала на поверхность методом центрифугирования наносится слой полиимида (диэлектрического органического вещества, отверждающегося при термообработке), в котором с помощью литографии с последующим травлением вскрываются окна. Затем конформно наносится толстый слой металла и производится полное удаление полиимида. В результате получаются мосты из металла, отделённые от нижележащей поверхности прослойкой воздуха. При очевидном достоинстве воздушных мостов, связанном с достижением минимально возможной величины ϵ , их серьёзным недостатком является низкая прочность конструкции и, как следствие, возможность межуровневого замыкания при деформации моста.

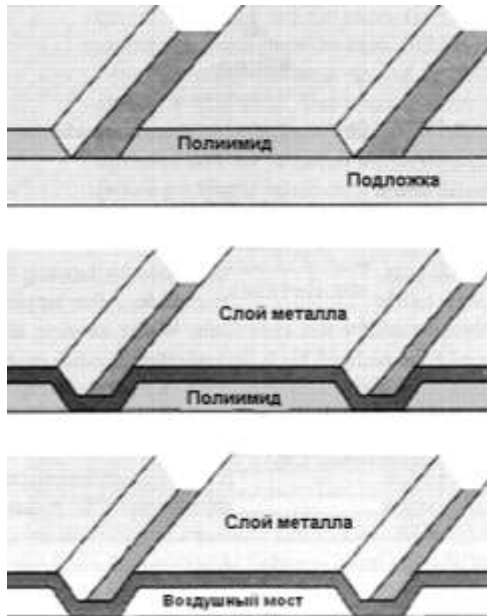


Рис. 12.2. Последовательность операций изготовления воздушных мостов

12.3. Инженерия межуровневой разводки

Для уменьшения RC цепей интегральных схем необходимо не только уменьшать ёмкость, но и сопротивление проводников. Последняя задача становится особенно актуальной в связи с тенденцией уменьшения напряжения питания ИС до 0,5 В и роста потребляемой мощности микропроцессора до 250 Вт. Это ведёт к тому, что в 2011 г. ток потребления одного микропроцессора может возрасти вплоть до 400 А. Адаптация современных систем металлизации к таким большим токам является сложной задачей.

Одно из решений этой проблемы – это переход от алюминиевой металлизации с удельным сопротивлением $\rho = 3,0$ мкОм·см к медной металлизации с $\rho = 1,65$ мкОм·см. В настоящее время большинство современных ИС выпускается с медной металлизацией. Переход на медную металлизацию разводки потребовал существенного изменения технологии её создания, что во многом связано с меньшей химической стабильностью Cu по сравнению с Al, а также плохой адгезией слоёв меди к большинству материалов. Всё это потребовало перед осаждением слоя меди формировать адгезионный и барьерный слои, чтобы улучшить адгезию и предотвратить деградацию проводников из-за взаимодействия с окружающими материалами. Зато тот факт, что Cu можно наносить электролитическим осаждением, позволил заменить магнетронное распыление Al на электролитическое осаждение Cu. В результате процесс нанесения медной металлизации состоит как минимум из трёх шагов: осаждение адгезионного и барьерного слоя (например, TaN), осаждение затравочного слоя Cu и затем электролитического осаждения толстого слоя Cu.

Однако и применение медной разводки также имеет ограничения. Уменьшение размеров элементов ИС приводит и к уменьшению размеров проводящих дорожек. При этом, начиная примерно с ширины дорожки проводника в 150 нм, происходит значительный рост удельного сопротивления медных проводников, о чём свидетельствуют данные, приведённые на рис. 12.3. Рост сопротивления связан с дополнительным рассеянием электронов на границах зёрен, а также на границах раздела проводник/диэлектрик. Вклад данных механизмов рассеяния растёт в связи с тем, что размеры зёрен становятся сравнимыми с размерами дорожек проводника и сильно увеличивается соотношение площади поверхности проводника к его объёму. Так при уменьшении топологической нормы с 90 до 65 нм сечение проводника будет уменьшено на 50%, что при одной и той же длине приведёт к росту его сопротивления в 2 раза. Выход из создавшейся си-

туации можно найти путем увеличения размера зёрен меди и уменьшения шероховатости границ раздела металл/диэлектрик.

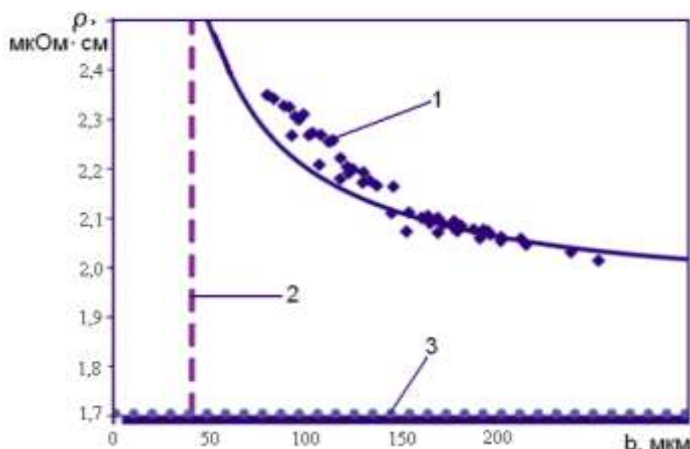


Рис. 12.3. Удельное сопротивление медных проводников в зависимости от ширины проводящей дорожки: 1 – удельное сопротивление медных проводников; 2 – длина свободного пробега электрона; 3 – удельное сопротивление объемного материала (Cu)

Кроме того, с ростом рабочей частоты ИС начинает работать скин-эффект, действие которого приводит к перераспределению плотности тока в сечении проводника в сторону её увеличения в приповерхностных областях и уменьшения в центре проводника. В результате происходит уменьшение эффективного сечения проводника (сечения, используемого для переноса тока), что уменьшает величину тока, который можно пропустить через проводник заданного сечения.

12.4. Технологический маршрут BEOL

Рассмотрим типовой упрощённый маршрут изготовления ИС на стадии BEOL с вертикальными соединениями на основе вольфрамовых перемычек (пробок) и с алюминиевой разводкой в каждом уровне межсоединений.

Исходная структура после окончания процессов FEOL имеет один уровень локальной разводки (рис. 12.4, а), на который на первом этапе методом химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ) наносится первый слой межуровневого диэлектрика на основе SiO_2 (ILD1) толщиной 1 мкм. Затем диэлектрик подвергается химико-механической полировке, в процессе которой удаляется 0,1 мкм SiO_2 .

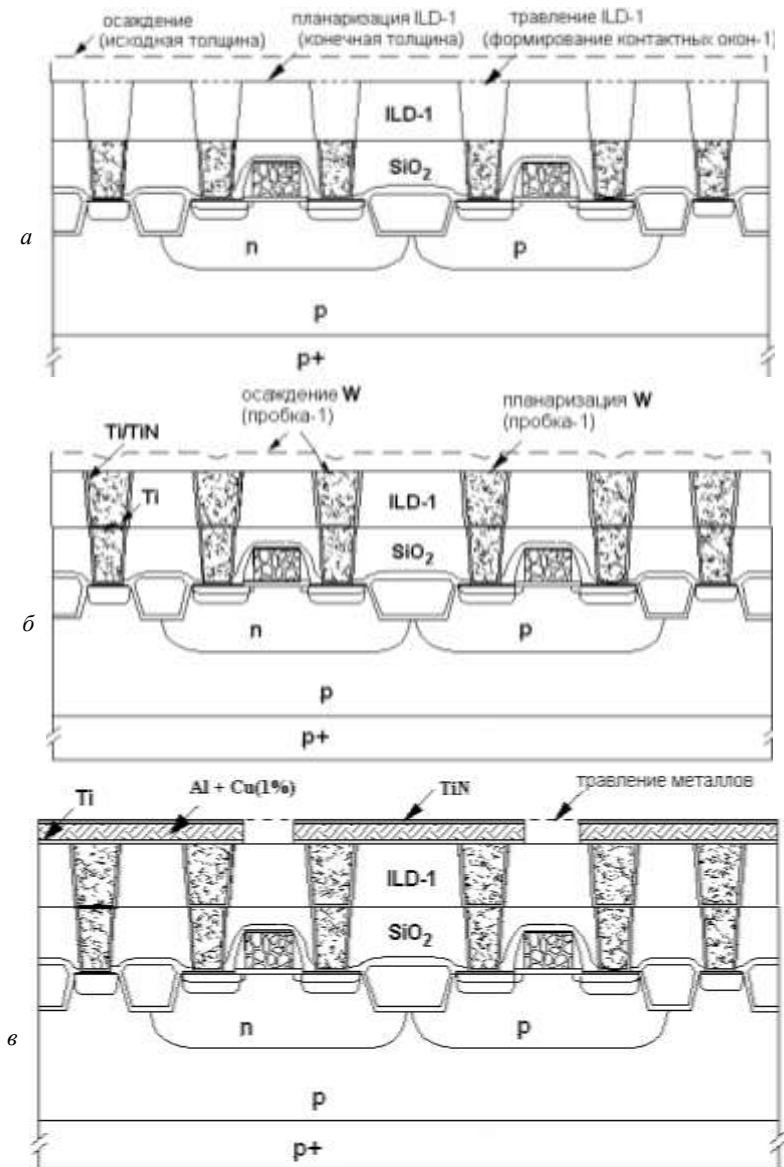


Рис. 12.4 (начало). Маршрут изготовления ИС на стадии BEOL с вертикальными соединениями на основе вольфрамовых перемычек и с алюминиевой разводкой в каждом уровне горизонтальных межсоединений

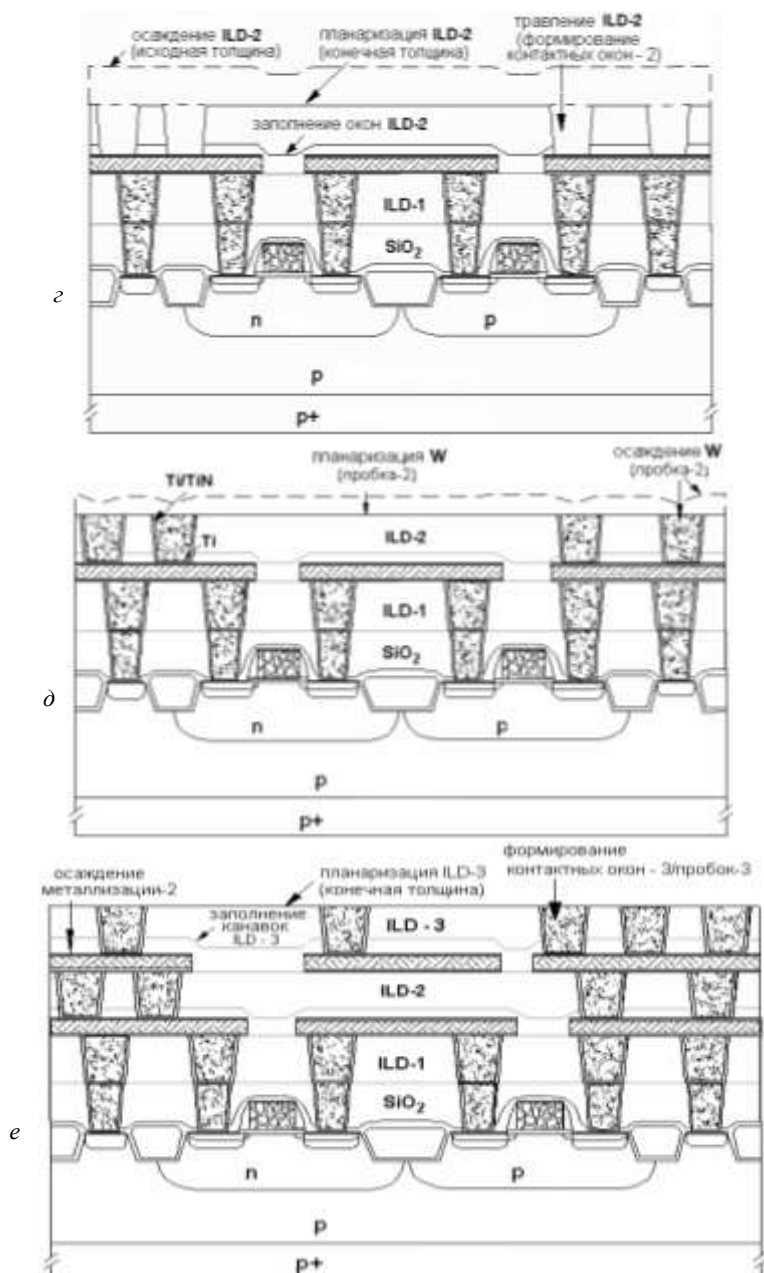


Рис. 12.4 (продолжение)

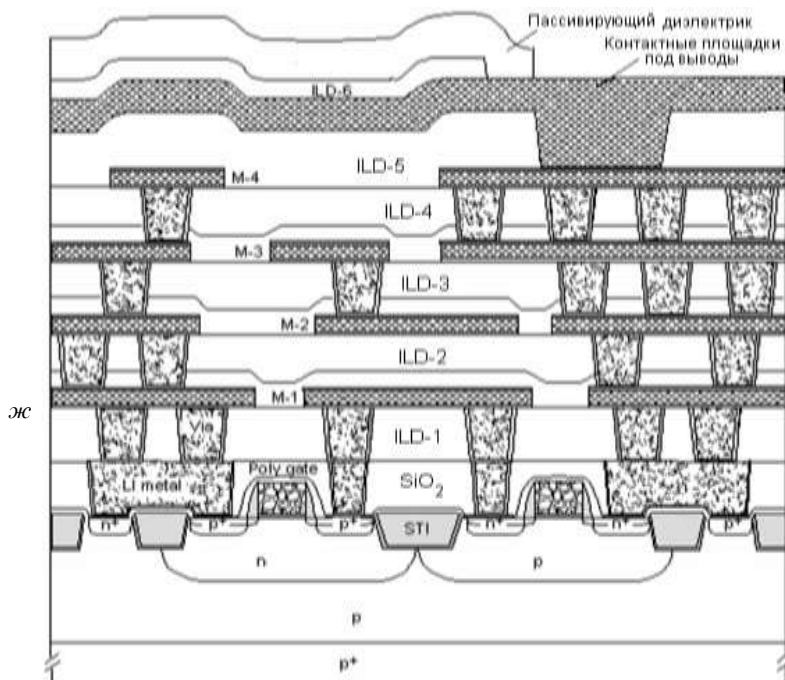


Рис. 12.4 (окончание)

После этого в диэлектрике, используя литографию и реактивно-ионное травление, вскрываются контактные окна (via hole) до уровня локальной разводки.

Процесс формирования вертикальных межуровневых соединений (металлических пробок) представлен на рис. 12.4, б. На втором этапе технологического маршрута на дно и стенки контактных окон методом магнетронного распыления производится осаждение адгезионной плёнки Ti толщиной 5 нм, а методом ХОГФ – нанесение плёнки TiN (20 нм), служащей диффузионным барьером. Затем с помощью селективного осаждения из газовой фазы производится заращивание контактных окон вольфрамовыми пробками (plug) и химико-механическая полировка вольфрама до получения гладкой поверхности.

На третьем этапе производится формирование Al межсоединений в первом уровне (рис. 12.4, в). В качестве материала используется сплав Al с небольшим содержанием Cu и/или Si. Лигатура позволяет уменьшить электромиграцию Al при плотности тока более 5 MA cm^{-2} . Вначале на поверхность оксида методом магнетронного распыления

осаждается адгезионная плёнка Ti, затем с помощью этого же метода наносится металлизация разводки Al (1–3% Cu, 200 нм), и вслед за этим – плёнка TiN (50 нм, магнетронное распыление), которая служит антиотражающим покрытием для последующей фотолитографии. После этого с помощью литографии и плазменного травления трех слоёв металлов формируется рисунок межэлементных соединений.

На четвёртом этапе начинается формирование следующего межуровневого соединения. Второй раз создаются контактные окна, связывающие первый и второй уровни разводки (рис. 12.4, з). Этап начинается с нанесения методом плазмохимического осаждения слоя SiO₂ толщиной 300 нм. Плазмохимическое осаждение из плазмы высокой плотности используется для того, чтобы избежать образования пустот в слое диэлектрика при заполнении промежутков между Al-проводниками. Затем с помощью плазмохимического осаждения производится нанесение толстого слоя SiO₂, который призван предотвратить возможность коротких замыканий между слоями металла, и затем химико-механическая полировка диэлектрика. После этого с помощью литографии и плазменного травления диэлектрика формируются контактные окна.

На следующем этапе (рис. 12.4, д) полностью повторяются все процессы, которые были использованы на втором этапе для получения W пробок (вертикальных соединений между уровнями металлизации), а также все процессы, которые были использованы на третьем этапе для получения Al-соединений в пределах второго уровня разводки (рис. 12.4, е). В результате полностью формируется второй уровень разводки. Далее все процессы повторяются для формирования следующих уровней разводки.

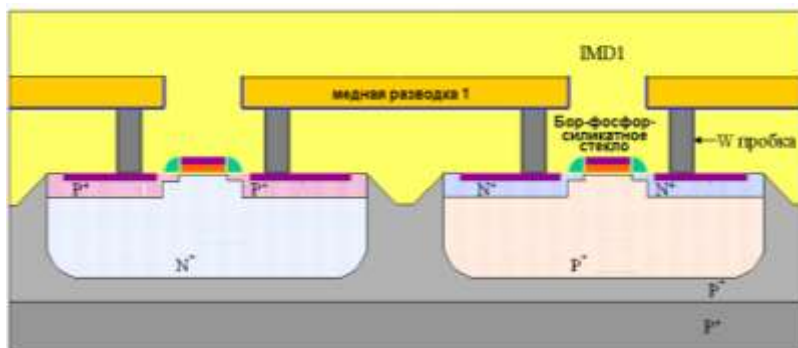
На последнем этапе формируется металлизация контактных площадок для последующего электрического соединения ИС с внешними выводами корпуса и производится окончательная пассивация поверхности для предотвращения влияния атмосферы на элементы ИС (рис. 12.4, ж).

Для формирования медной межуровневой разводки обычно используется двойной дамасский процесс (dual damascene process). Основное отличие двойного дамасского процесса от технологии создания межуровневой разводки, рассмотренной выше, заключается в том, что в традиционном способе для формирования одного уровня металлизации используется одна операция травления диэлектрика и одна операция травления металла, а в дамасском процессе используются две операции травления диэлектрика и ни одной операции травления металла. При этом металлизацию осаждают на диэлектрик, состоящий из двух последовательно осаждённых слоёв. В нижнем слое

вскрыты окна для межуровневого вертикального соединения, а в верхнем – вытравлены канавки с рисунком горизонтальных соединений.

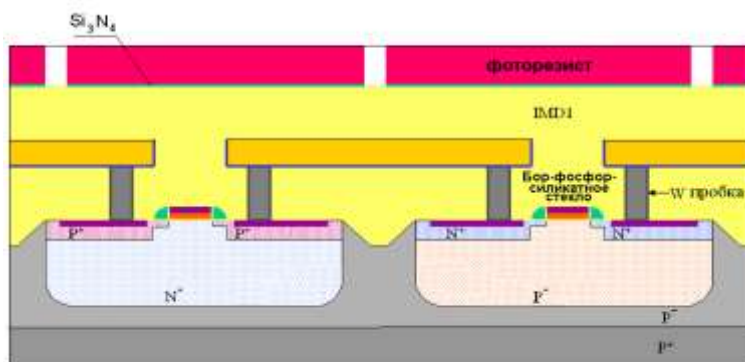
Рассмотрим двойной дамасский процесс более подробно. На завершающем этапе FEOL на основе вертикальных соединений из вольфрамовых пробок и горизонтальных соединений из меди была создана локальная разводка. Затем уже в рамках процесса BEOL на поверхность полупроводниковой структуры осаждается первый слой межуровневого диэлектрика (IMD1, SiO_2), который подвергается планаризации (рис. 12.5, *а*). После этого методом химического осаждения из газовой фазы производится осаждение тонкого слоя Si_3N_4 (25 нм), который затем будет служить стоп-слоем при вскрытии окон (vias) в SiO_2 . С помощью фотолитографии и последующего травления в слое Si_3N_4 формируется рисунок будущих межуровневых соединений (рис. 12.5, *б*) и затем удаляется резист.

На следующем этапе (рис. 12.5, *в*) методом ХОГФ осаждается слой SiO_2 , толщина которого должна быть равна толщине медных проводников горизонтальной разводки данного уровня, проводится фотолитография, в течение которой на поверхности формируется резистивная маска с рисунком, соответствующим рисунку горизонтальной разводки (trenches). Затем методом реактивного ионного травления производится одновременное травление обоих слоёв SiO_2 , причём для травления верхнего слоя используется фоторезистивная маска, а для травления нижнего – маска, сформированная в слое Si_3N_4 (рис. 12.5, *г*). После этого удаляется резист, и на все вертикальные и горизонтальные поверхности осаждается тонкий барьерный слой TaN, который призван предотвратить взаимодействие Cu с диэлектриком.

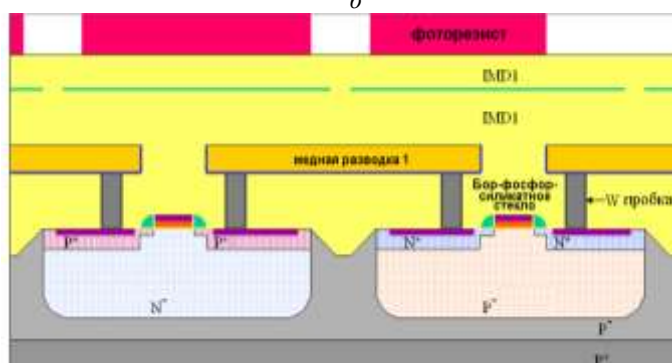


а

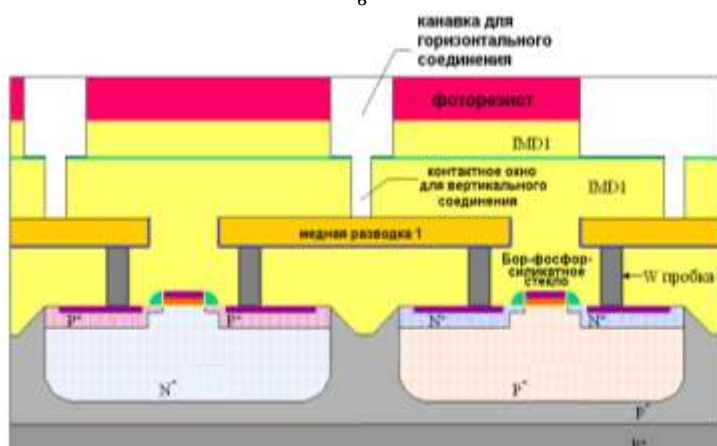
Рис. 12.5 (начало). Маршрут изготовления ИС на стадии BEOL с медной межуровневой разводкой по двойному дамасскому процессу



б

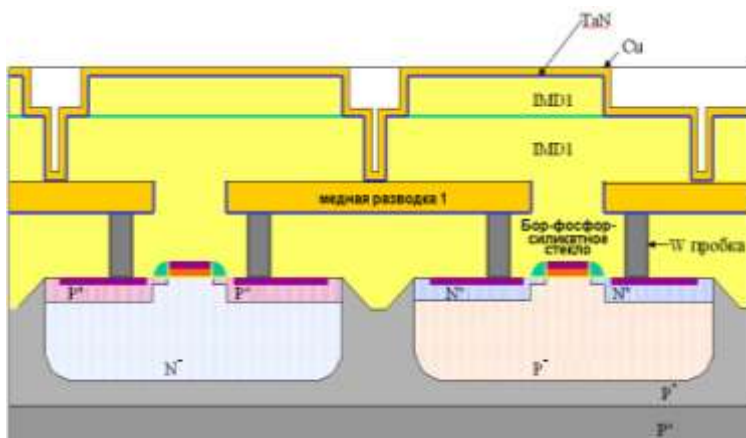


в

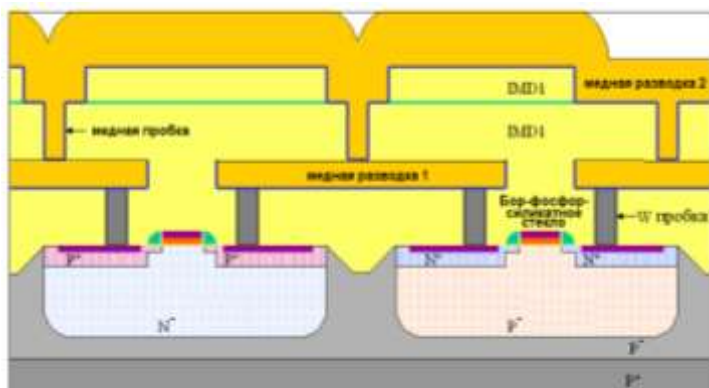


г

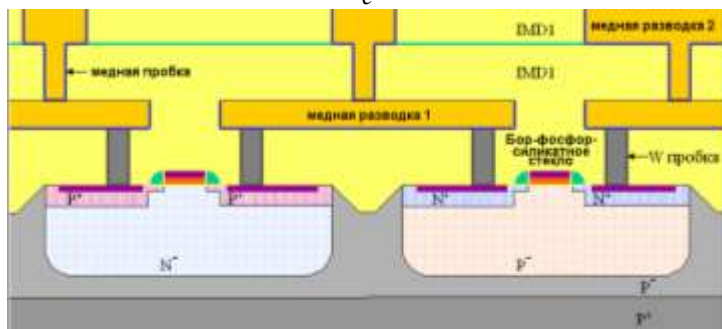
Рис. 12.5 (продолжение)



д



е



ж

Рис. 12.5 (окончание). Маршрут изготовления ИС на стадии BEOL с медной межуровневой разводкой по двойному дамасскому процессу

Затем поверх барьерного слоя методом ХОГФ наносится тонкий затравочный слой (seed layer) меди (рис. 12.5, *д*), на который в течение следующей операции из раствора электролитическим способом осаждается толстый слой Cu , который полностью заращивает все окна, вскрытые в слоях SiO_2 , формируя тем самым как вертикальные, так и горизонтальные соединения (рис. 12.5, *е*). После этого для уменьшения удельного сопротивления меди производится отжиг, который приводит к росту поликристаллических зёрен и уменьшению рассеяния носителей заряда. На завершающем этапе производится химико-механическая планаризация Cu и TaN , в результате которой удаляется все слои, расположенные выше поверхности плёнки SiO_2 .

Конечное состояние полупроводниковой структуры после формирования первого слоя межуровневой разводки в процессе BEOL представлено на рис. 12.5, *ж*. Для формирования последующих слоёв разводки все вышеописанные операции повторяются, при этом в целях минимизации индуктивной связи между проводниками, расположенными в разных уровнях, проводники соседних уровней располагают преимущественно перпендикулярно друг другу.

Заключение

Рассмотрим вопрос о том, как долго будет продолжаться наблюдающийся в течение последних 35–40 лет прогресс в микроэлектронике, связанный с быстрым ростом степени интеграции ИС и уменьшением размеров транзисторов. Или, говоря другими словами, как долго ещё будет выполняться закон Мура.

Согласно мнению экспертов, закон Мура может прекратить своё действие в связи с несколькими основными, видными уже сегодня, проблемами. Первая проблема классически формулируется следующим образом: рано или поздно усложнение микроэлектронной продукции приведёт к исчерпанию возможностей существующих технологий и принципиальному изменению производственного процесса, а также механизмов функционирования самой электроники. В связи с этим особый интерес представляет ответ на вопрос, как долго будет продолжаться эра МОП-транзисторов и при какой длине затвора транзистор будет ещё сохранять свою работоспособность? Согласно ITRS редакции 2006 г., транзистор данного типа будет функционировать вплоть до длины затвора 5–6 нм. Дальнейший прогресс может идти по пути перехода от МОП-транзистора к приборам, имеющим или другую конструкцию, и/или другой физический принцип функционирования, т.е. к квантовым приборам нанoeлектроники.

Вторая проблема связана с ростом общего энергопотребления ИС, а также с увеличением доли энергии, непроизводительно расходуемой на нагрев чипа. Чем больше элементов содержит чип, тем мощнее должен быть источник питания. Чем меньше размеры элементов ИС, тем больше паразитные утечки тока. А это означает, что через транзистор идет ток, даже если он отключен. Частичное решение этой проблемы возможно при внедрении активного менеджмента электропитания ИС. Например, если чип или часть электрической схемы чипа в течение некоторого времени не задействованы или исполняют лишь незначительные функции, то электропитание этого чипа (части чипа) либо полностью, либо частично отключается. Подобное управление электроэнергией предполагает введение дополнительных функций для ИС, что, в свою очередь, может привести к дальнейшему их усложнению. Тем не менее внедрение этой идеи, вероятно, сможет помочь продлить действие закона Мура.

Ещё одна проблема связана с тем, что сопротивление между элементами ИС падает из-за слишком маленьких зазоров между ними. Блуждающие электроны нарушают лежащий в основе всех вычислительных операций бинарный принцип, согласно которому передача некоторого количества электричества соответствует единице, а

её отсутствие – нулю. В результате возникают погрешности в вычислениях. На языке специалистов этот эффект называется тепловым шумом Джонсона. Чем больше степень интеграции ИС и меньше количество электричества, которое используется для передачи единицы информации, тем мощнее шум. Пагубность этого явления заключается в том, что она может выражаться в случайных сбоях, зарегистрировать которые крайне сложно.

Преодоление вышеупомянутых проблем, а также проблем, рассмотренных в данном учебном пособии, является актуальной задачей для учёных и специалистов, работающих в микроэлектронной промышленности и смежных к ней областях. Эффективное решение этих задач может привести к ситуации, когда производительность микропроцессоров перекроет потребности разработчиков программного обеспечения и прикладных применений и дальнейшее повышение быстродействия и сложности устройств окажется невостребованным, а следовательно, и экономически невыгодным.

Список рекомендуемой литературы

1. The International Technology Roadmap for Semiconductors, <http://www.itrs.net/>
2. Уайт В. Технология чистых помещений. – М.: Клинрум, 2002. – 304 с.
3. Проектирование чистых помещений: пер. с англ.; под ред. В. Уайта. Клинрум, 2004. – 360 с.
4. Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology / Ed. Robert Doering, Yoshio Nishi. Second Edition: CRC Press, 2008.
5. Handbook of Semiconductor Interconnection Technology / Ed. Geraldine C. Schwartz, Kris V. Srikrishnan. Second Edition, CRC Press, 2006.
6. Plasma Processing of Semiconductors / Ed. P.F. Williams. – N.Y: Kluwer Academic Publishers, 1997.
7. Таруи Я. Основы технологии СБИС: пер. с яп.; под ред. В.Г. Ржанова. – М.: Радио и связь, 1985. – 479 с.
8. Красников Г. Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов: в 2 кн. / Г.Я. Красников. – М.: Техносфера, 2002.
9. Мейер Дж. Ионное легирование полупроводников (кремний и германий): пер. с англ. / Дж. Мейер, Л. Эрикссон, Дж. Дэвис. – М.: Мир, 1973. – 296 с.
10. Риссел Х. Ионная имплантация / Х. Риссел, И. Руге. – М.: Наука, 1983. – 360 с.
11. Технология СБИС / Под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986. – Т. 1. – 404 с.; Т. 2. – 453 с.
12. Броудай И. Физические основы микротехнологии: пер. с англ. И. Броудай, Дж. Мерей. – М.: Мир, 1985. – 494 с.
13. Моделирование процессов внедрения и перераспределения примесей при ионной имплантации / В.В. Асессоров и др. – Воронеж: Воронежский гос. ун-т, 2004 г. – 202 с.
14. Арсенид галлия в микроэлектронике: пер. с англ.; под ред. Н. Айнспрука, У. Уиссмана. – М.: Мир, 1988. – 555 с.
15. Моро У. Микролитография: Принципы, методы, материалы. – Ч. 2. – М.: Мир, 1990.
16. Плазменная технология в производстве СБИС: пер. с англ.; под ред. Н. Айнспрука и Д. Брауна. – М.: Мир, 1987. – 469 с.
17. Данилина Т.И. Ионно-плазменные технологии в производстве СБИС / Т. И. Данилина, С. В. Смирнов. – Томск: Том. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2000. – 140 с.

18. Мьюарка Ш. Силициды для СБИС / Ш. Мьюарка. – М.: Мир, 1986. – 95 с.
19. Электронно-лучевая технология в изготовлении микроэлектронных приборов: пер. с англ.; под ред. Ф.П. Пресса / Под ред. Дж.Р. Брюэра. – М.: Радио и связь, 1984. – 336 с.
20. Rai-Choudry P. Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication, Vol. 1: Microlithography, SPIE, 1997.
21. <http://iopscience.iop.org/0034-4885>. Reports on Progress in Physics. 1985. Vol. 48. – P. 795–851.
22. <http://www.cnf.cornell.edu/spiebook/toc.htm>
23. Micro-Nanofabrication: Technologies and Applications. – Cui Zheng, 2005.

Учебное издание

*Тамара Ивановна Данилина,
Валерий Алексеевич Казадей,
Екатерина Валентиновна Анищенко*

ТЕХНОЛОГИЯ КРЕМНИЕВОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Учебное пособие

Корректор – В.Г. Лихачева
Верстка В.М. Бочкаревой

Издательство «В-Спектр»
Подписано к печати 25.03.2011.
Формат 60×84¹/₁₆. Печать трафаретная.
Печ. л. 16,7. Тираж 100 экз. Заказ 18.

Тираж отпечатан в издательстве «В-Спектр»
ИНН/КПП 7017129340/701701001
634055, г. Томск, пр. Академический, 13-24. Тел. 49-09-91.
E-mail: bvm@sibmail.com