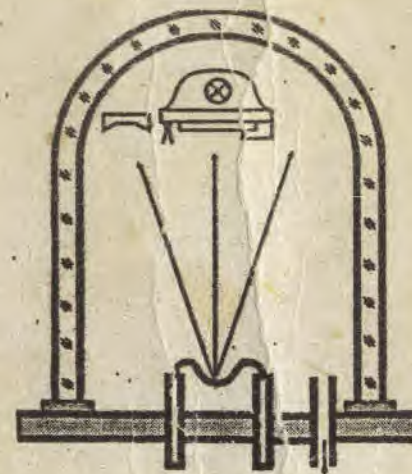


**BAZELE TEHNOLOGICE
ALE MICROELECTRONICII**

Îndrumar de laborator



1998

Îndrumările de față sunt consacrate operațiilor tehnologice principale pentru confecționarea C.I. și sunt destinate studenților de la Facultatea Calculatoare, Informatică și Microelectronică cu specializările 2105.01 Microelectronica și dispozitive cu semiconductori și 2105.02 Electronica medicală.

Lucrarea de laborator nr.1

Studierea proceselor corodării chimice a plachetelor de siliciu

Scopul lucrării: de a face cunoștință de tehnologia prelucrării chimice și de a studia procesele corodării izotrope, selective și locale.

Date teoretice

Corodarea chimică (înlăturarea unui strat superficial al fazei solide (plachetă)) pe larg se folosește în tehnologia dispozitivelor semiconductoare și circuitelor integrate (C. I.). Prelucrarea chimică se face cu scopul corodării izotrope, selective și locale.

Corodarea izotropă este folosită pentru curățarea suprafeței plachetei de oxizi, impurități mecanice sau adsorbite; înlăturarea stratului defect de pe suprafața plachetei, care apare datorită prelucrării mecanice; obținerea anumitei grosimi a materialului semiconductor; schimbarea controlată a proprietăților superficiale (conductibilității și vitezei recombinării superficiale).

Corodarea selectivă este necesară pentru relevarea defectelor structurii cristaline și a p-n joncțiunilor, heterojoncțiunilor și neuniformităților distribuirii impurităților; pregătirea suprafeței cristalului pentru determinarea orientăției cristalului prin metoda optică.

Corodarea locală se folosește pentru obținerea anumitelor configurații pe suprafața cristalului; obținerea reliefului dat pe suprafața plachetelor; obținerea configurației C.I.

Sunt cunoscute două procese principale de prelucrare chimică a suprafeței semiconductorilor:

1) corodarea chimică, când materialul suferă schimbări chimice. Cu toate că în majoritatea cazurilor în calitate de corodanți sunt folosite soluții apoase, totuși la categoria aceasta se aliniază și soluțiile neapoase, sărurile topice și gazele.

2) corodarea electrochimică, când pentru dizolvarea materialului semiconductor în electrolit este necesar ca prin sistemul anod-electrolit-catod să treacă curent electric, care determină decurgerea reacțiilor anodice și catodice.

Există două teorii ale corodării chimice a materialelor semiconductoare: chimică și electrochimică. În corespundere cu prima teorie, procesul de corodare conține două etape: oxidarea și dizolvarea oxidului printr-o reacție chimică. După teoria a doua procesul de corodare are loc datorită mecanismului electrochimic. Suprafața semiconductorului din punct de vedere energetic nu este uniformă, de aceea în microregiunile ei este posibilă parcurgerea reacțiilor electrochimice inverse: anodice - trecerea atomilor semiconductorului în soluție sub formă de ioni și catodice - un oarecare proces de restabilire. Viteza totală a procesului în acest caz este determinată de viteza reacției care este mai mică.

Procesul corodării chimice conține 5 etape:

Elaborare: prof. univ. dr. hab. Viorel Trofim

Referent științific: prof. univ. dr. Ing. Laurensiu Turio, șeful catedrei
Bazele electronicii a Universității Tehnice «G. Asachi», Iași

Recenzenți: dr. Valeriu Dorogan

- 1) difuzia reagenților la suprafața materialului semiconductor;
- 2) adsorbția lor de către suprafața;
- 3) interacțiunea chimică sau electrochimică a reagenților cu suprafața;
- 4) desorbția produselor reacției;
- 5) difuzia lor de la suprafața.

Împul corodării este suma timpurilor de parcurgere a fiecărei din aceste etape. În momentul inițial de timp, după ce are loc contactul fazei solide (placheta) cu faza lichidă (decapantul), concentrația decapantului în tot volumul este aceeași. Însă după un anumit timp o parte a soluției, care se găsește lângă suprafața plachetei, va interacționa cu ea. Concentrația moleculelor decapantului pe suprafața plachetei se va micșora datorită parcurgerii reacției chimice. La suprafața plachetei se formează un strat săracit de molecule ale decapantului C' . Pentru parcurgerea mai departe a reacției chimice este necesar ca din volumul decapantului, unde concentrația C este mai mare ca C' , moleculele să ajungă pe suprafața plachetei. Moleculele din volumul decapantului ajung pe suprafața plachetei datorită procesului de difuzie, viteza căruia este egală:

$$V_d = K_d(C - C'), \quad (1)$$

unde K_d - coeficientul difuziei moleculare în soluție.

În momentul inițial de timp, când concentrația decapantului în tot volumul e aceeași, viteza decapării va fi maximală și egală cu

$$V_p = K_p C \exp(-E/kT), \quad (2)$$

unde K_p - constanta vitezei reacției chimice; C - concentrația moleculelor decapantului; E - energia de activare a reacției de corodare; K - constanta lui Boltzmann; T - temperatura absolută. Dacă suprafața semiconductorului din punct de vedere energetic nu este omogenă, de exemplu are loc ieșirea la suprafață a cîșlocațiilor și a altor defecte, atunci în aceste locuri energia de activare poate fi cu mult mai mică, iar viteza de corodare - cu mult mai mare.

După un anumit interval de timp ambele procese - difuzia reagenților către suprafață și viteza reacției chimice - se vor egala:

$$K_d(C - C') = K_p C \exp(-E/kT). \quad (3)$$

Atunci viteza corodării chimice poate fi determinată din expresia:

$$V = C[K_d K_p \exp(-E/kT)] / [K_d + K_p \exp(-E/kT)]. \quad (4)$$

Caracterul de corodare a semiconductorului depinde de viteza mai mică a etapelor de parcurgere a procesului: difuzia reagenților către suprafață și viteza reacției chimice. Viteza fiecărei din aceste etape se determină prin mărimea vitezei unitare a difuziei (K_d) sau a reacției chimice $K_p \exp(-E/kT)$.

$$\begin{aligned} \text{Dacă} \quad K_d >> K_p \exp(-E/kT), \\ \text{atunci} \quad V &\approx K_p \exp(-E/kT) \cdot C. \end{aligned} \quad (5)$$

În acest caz viteza de corodare e determinată de viteza reacției chimice și depinde de energia de activare a corodării, ceea ce înseamnă că procesul de corodare este selectiv și este folosit la revelarea defectelor structurale pe suprafața semiconductorului.

$$\begin{aligned} \text{Dacă} \quad K_d << K_p \exp(-E/kT), \\ \text{atunci} \quad V &\approx K_d C. \end{aligned} \quad (6)$$

Viteza de corodare în acest caz, într-o măsură mică, depinde de energia de activare și este determinată de procesele de difuzie. Corodarea va fi izotropă și va aduce la polizarea cristalului. Polizarea în acest caz va avea loc în felul următor: dacă pe suprafața plachetei este un strat cu relief, rezultă că grosimea lui lângă ieșituri este mai mică decât grosimea medie, în acest caz reagentul ajunge la ieșituri mai repede și are loc nivelarea lor. Este necesar de menționat că calitatea suprafeței polcite depinde de metoda prelucrării mecanice a suprafeței semiconductorului și de prezența pe ea a diferitelor impurități. De aceea înainte de a începe procesul corodării, este necesar de a curăța suprafața plachetei. Curățarea de obicei se face prin spălarea sau fierbera plachetelor în solvenți organici (acetonă, toluen, spirt izopropilic etc.). Pentru îmbunătățirea procesului de curățare se folosesc băi cu ultrasunete, în care se află solvenții respectivi.

După procesul prelucrării mecanice pe suprafața plachetelor pot fi diferite distorsiuni ale structurii cristaline (gropițe, crăpături, deplasarea atomilor din poziția de echilibru). De aceea suprafața semiconductorului prelucrată mecanic are o viteză de corodare mai mare decât monocristalul ideal. Adâncimea stratului defectat poate fi determinată de dependența vitezei de corodare față de timp la dizolvare în mai multe etape. Procesul determinării adâncimii stratului defect conține următoarele etape:

- 1) măsurarea suprafeței plachetei;
- 2) curățarea de grăsimi a suprafeței plachetei;
- 3) cântărirea plachetei înainte de primul și următorul ciclu de corodare;
- 4) corodarea în soluție a unui strat subțire de material;
- 5) cântărirea plachetei și determinarea pierderii de masă.

Etapele 3-5 se repetă de câteva ori până când se stabilește o viteză constantă a corodării, adică $\Delta P_i/t = \text{const}$, după aceea se construiește dependența $\Delta P_i=f(t)$. Adâncimea stratului defectat (δ) poate fi determinată din relația:

$$d = \Sigma \Delta P_i \cdot 10^4 / S \rho \text{ (}\mu\text{m)}, \quad (7)$$

unde $\Sigma \Delta P_i$ - cantitatea totală a materialului înlăturat până la punctul $\Sigma \Delta P_i / \Delta t = \text{const}$; S - suprafața plăchetei (cm^2), ρ - densitatea materialului (g/cm^3).

Viteza staționară a corodării este determinată din graficul $\Delta P_i=f(t)$, unde $\Delta P_i/\Delta t = \text{const}$, după relația $V = \Delta P_i \cdot 10^4 / S \rho \Delta t \text{ [}\mu\text{m/min]}$ (fig. 1).

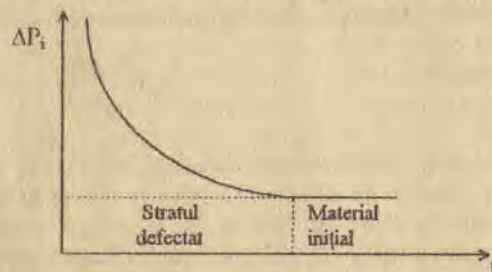
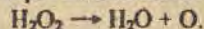


Fig. 1. Dependenta cantității materialului dizolvat față de timp.

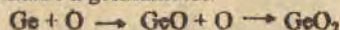
Cea mai simplă lămurire a procesului de corodare o prezintă teoria chimică: decapantul trebuie să conțină doi componenți principali-oxidant, care mai des poate fi H_2O_2 sau HNO_3 și solvent al oxidului, care poate fi acidul fluorhidric (HF) și alții. În corespundere cu această teorie au fost aleși componenții multor corodanți, care sunt folosiți astăzi pe larg, însă cu ajutorul acestei teorii nu se pot explica procesele corodării selective.

Ca excepție trebuie menționat procesul corodării germaniului în H_2O_2 . În acest proces H_2O_2 îndeplinește rolul de oxidant, iar apa ce se conține în H_2O_2 îndeplinește rolul solventului pentru oxid.

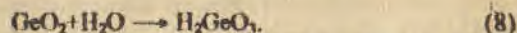
La încălzire H_2O_2 se descompune rapid cu eliminarea oxigenului atomic:



Mai departe are loc procesul de oxidare a germaniului:



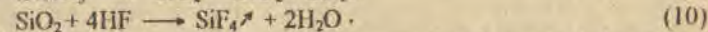
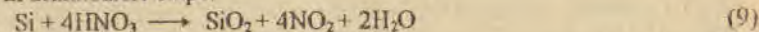
și în a doua etapă bioxidul de germaniu se dizolvă în apă cu formarea acidului metagermanic:



Viteza de corodare depinde de concentrația H_2O_2 în H_2O și atinge o valoare maximă la 14% H_2O_2 . Micșorarea vitezei de corodare la majorarea concentrației H_2O_2

este determinată de ecranarea germaniului de stratul gros GeO_2 și limitele ce apar în etapa dizolvării oxidului (8).

La procesul de polizare a Ge și Si se folosesc amestecuri din acizi azotici și fluorhidrici. Conform teoriei chimice de corodare procesul prelucrării chimice a Si poate fi reprezentat în următoarele etape:



Viteza de corodare a Si în amestecul de HF și HNO_3 este maximă la proporția lor molară 4,5:1. Dependența vitezei corodării de concentrația componenților este prezentată în fig. 2.

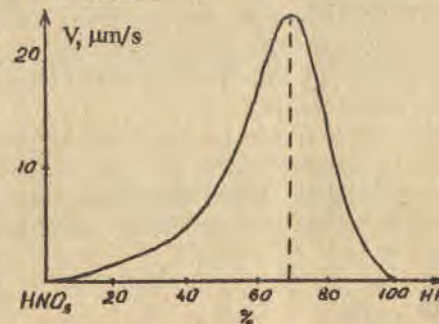


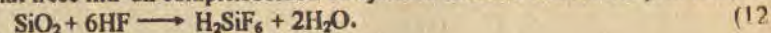
Fig. 2. Dependenta vitezei corodării chimice a siliciului de proporția componenților în corodant.

Viteza și calitatea procesului de corodare poate fi reglată prin introducerea în corodant a diferitelor adaosuri. Inhibitor al reacției poate fi acidul acetic înghețat (CH_3COOH), iar în calitate de catalizator poate fi folosit bromul (Br_2).

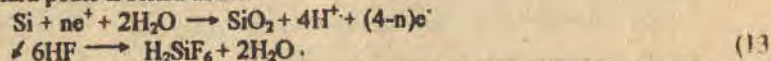
Teoria electrochimică presupune că suprafața semiconductorului este neomogenă din punct de vedere energetic și ca rezultat poate avea loc apariția regiunilor separate de microanodi. Pe regiunile anodice poate avea loc reacția:



Oxidul format trece într-un complex solubil cu ajutorul acidului fluorhidric prin relația:



Reacția sumară poate fi scrisă astfel:



În industria semiconductorilor la corodarea chimică umedă a materialelor sunt folosite soluții apoase ale diferiților reagenți, concentrația cărora are următoarele valori:

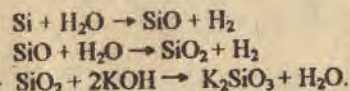
acidul fluorhidric HF	- 49%;
acidul azotic HNO_3	- 70%;

apă oxigenată H_2O_2 - 30%;
 acid clorhidric HCl - 39%;
 acid sulfuric H_2SO_4 - 90%;
 acid acetic CH_3COOH - glacial (fără apă).

Corodarea semiconductorilor monocristalini într-un șir de corodanți are un caracter anizotrop bine exprimat, adică viteza procesului substanțial depinde de orientarea cristalografică a suprafeței plachetei.

Se presupune că anizotropia vitezei de corodare este determinată de anizotropia energiei superficiale a monocristalului, ce duce la dependența absorbției reagenților și energiei de activare a procesului eterogen de dizolvare a semiconductorului față de orientarea cristalografică a suprafeței lui. Anizotropia corodării poate fi întrebuințată în scopurile microelectronicii, însă acest proces poate fi folosit împreună cu procesul corodării locale, întrebuințând anumite măști.

La corodarea anizotropă a siliciului deseori se întrebuințează corodanți pe bază de hidrooxizi ai metalelor alcaline (soluții de 5-30% de KOH sau $NaOH$). În procesul corodării poate fi interpretat ca oxidarea materialului semiconductor și dizolvarea de mai departe a oxidului format. Oxidarea în acest caz are loc datorită apei, care este încălzită:



(14)

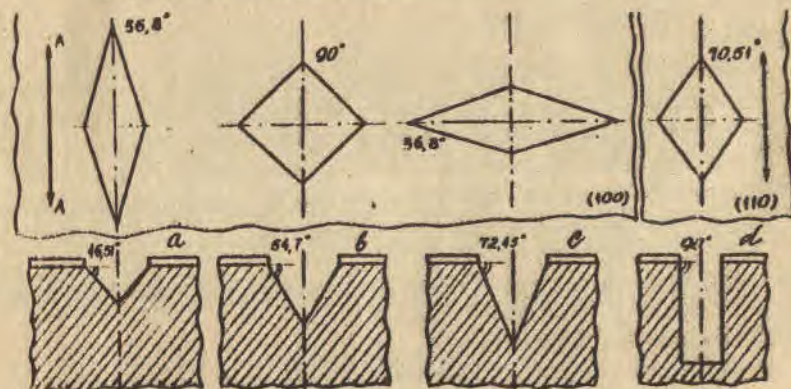


Fig. 3. Secțiunea transversală a adânciturilor corodate și orientarea necesară a măștilor pe suprafața siliciului (100) (a, b, c) și (110) (d).

Avantajul corodării anizotropice față de cea izotropă este lipsa corodării sub marginea măștii. În fig. 3 sunt demonstrate secțiuni transversale ale adânciturilor

corodate și orientarea necesară a marginilor ferestrelor măștii. Direcția AA este perpendiculară la suprafața cristalografică (001).

Revelarea dislocațiilor prin metoda corodării selective este bazată pe aceea că dizolvarea începe mai ușor în locurile de ieșire a dislocațiilor la suprafață. Aici în deosebi se micșorează energia de rupere a atomilor de pe suprafața corpului solid și viteza de corodare în aceste locuri e mai mare. De aceea la finalul corodării în aceste locuri se formează gropițe. Forma gropițelor la bază depinde de orientarea inițială a plachetei. Gropița este prezentă ca o piramidă cu vârful îndreptat în interiorul plachetei. Numărul gropițelor de corodare nu trebuie să depindă de timpul corodării. Însă la majorarea timpului de corodare bazele gropițelor pot să se unească una cu alta. Prin metoda corodării chimice nu pot fi revelate toate felurile de dislocații, dar numai acele care sunt perpendiculare pe suprafață sau sub un unghi mic față de această direcție.

Ordinea îndeplinirii lucrării

Toate lucrările legate de procesul corodării se îndeplinesc în nișa de ventilare, când ventilatorul este conectat. Plachetele de semiconductor nu trebuie atinse cu mâinile. Folosiți-vă de hârtia de filtru și de pensetă.

1. Determinarea adâncimii stratului defectat:

- primiți de la profesor (inginer) două plachete de siliciu;
- determinați aria suprafeței plachetei;
- cântăriți plachetele și determinați masa inițială - P_0 ;
- curățați suprafața plachetelor cu ajutorul unui tampon de vată înmuiat într-un solvent organic;
- turnați într-un pahar fluorplastic (din polietilenă) 20 ml de corodant, iar în altul apă deionizată (distilată);
- scufundați placheta în corodant pe timpul Δt (câteva secunde), iar apoi spălați-o în apă (componenta corodantului și timpul Δt al corodării sunt date de profesor);
- uscați placheta pe hârtie de filtru, cântăriți-o pe cântarul analitic și determinați schimbarea masei ΔP ;
- repețiți operațiile f) și d) de mai multe ori până când $\Delta P/\Delta t = \text{const}$. Rezultatele introduceți-le în tabel;

	1	2	3	4	5	6	7
$\Delta P, g$							
$\Delta t, s$							

- apreciați calitatea suprafeței polizate, măsurând înălțimea neregularităților cu ajutorul microscopului MHH-4.

Corodanții principali pentru Si

Nr. crt.	Componența corodantului. Părți de volum sau de masă	Întrebuințare	T, K	λ za corodării, $\mu\text{m}/\text{min}$.	Calitatea suprafeței, înălțimea neregularităților profilului. Particularități
1.	$\text{HNO}_3:\text{HF}:\text{CH}_3\text{COOH}$ (3:1:1) CP-8	polarizare	293	8	de oglindă 0.08
2.	5:1:1	-	-	5	0.06
3.	10:1:1	-	-	3.5	0.05
4.	4:1:3	polarizare dinamică	-	-	-
5.	(10-45%) KOH	corodare anizotropă	363	25	V(100) V(111)
6.	0.6% $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7:\text{HNO}_3:\text{HF}$ 70:20:30	polarizare, micșorează viteza recombinații superficiale	293	184.5	suprafața netedă V(ptip) V(ntip)
7.	250g KOH:800H ₂ O2:25ml bitanol dublu:0.5Si	corodare anizotropă	293	-	V(100) V(111)
8.	$\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH}$ 3:5:3 (CP-4A)	revelarea joncțiunilor p-n și a dislocațiilor parțiale	293	-	obținerea adânciturilor timpul de corodare 2-3 min
9.	$\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH}$ 25:18:5 cu adăos de 0.1 gr. Br_2 în 10 ml de H_2O	-	293	-	revelarea dislocațiilor pe toate planurile

2. Determinarea densității dislocațiilor:

- a) primiți de la profesor (inginer) două plachete de Si cu orientarea inițială a suprafețelor (111) și (100);
- b) curățați suprafața plachetei (punctul 1.d) și pregătiți paharul cu corodantul dat și cu apă deionizată (distilată);
- c) scufundați placheta în corodant pe câteva secunde, spălați-o cu apă și uscați-o;
- d) cu ajutorul microscopului NU-2E calculați numărul dislocațiilor într-un dreptunghi cu suprafața știută. Această măsurare se face în diferite locuri pe suprafața plachetei;
- e) calculați densitatea dislocațiilor ($N=n/S$), unde n - numărul de dislocații într-o unitate de suprafață $S(\text{cm}^2)$.

3. Formarea adânciturilor cu o geometrie dată în plachete de Si(100) și (111) prin metoda corodării anizotropice locale:

- a) primiți de la profesor (inginer) două plachete de Si cu diferite configurații ale ferestrelor în mască (SiO_2 , Al_2O_3 , fotorezist);
- b) îndepliniți punctele 1.e - 1.f (timpul de corodare fiind dat de profesor (inginer));
- c) apreciați calitatea adânciturilor obținute și forma lor cu microscopul NU-2E și determinați adâncimea pătrunderii corodantului sub mască, înălțimea adânciturilor.

Cerinte față de darea de seamă

Darea de seamă trebuie să conțină:

- 1) scopul lucrării;
- 2) scurte date teoretice;
- 3) fișa tehnologică a operațiilor îndeplinite;
- 4) graficul dependenței $\Delta P_s = f(t)$ și calculul adâncimii stratului defectat;
- 5) rezultatul calculării densității dislocațiilor pe plachetele de Si, orientate în direcția (100) și (111);
- 6) forma adânciturilor obținute și descrierea calității lor;
- 7) concluzii.

Întrebări de control

1. Cu ce scop în tehnologia microelectronicii se întrebuințează corodarea izotropă, selectivă și locală?
2. Care sunt etapele principale ale procesului de corodare?
3. Care factori influențează asupra vitezei de corodare a materialului semiconductor?
4. Cum poate fi înmuriată corodarea din punct de vedere a teoriei chimice și electrochimice?
5. Cum se poate determina densitatea dislocațiilor pe suprafața materialului semiconductor?
6. Care sunt reacțiile de corodare ale Si și Ge și particularitățile lor?

Bibliografie

- [1], pag. 17-18; [8], pag. 388-392; [8], pag. 54-67; [12], pag. 42-100.

Cercetarea procesului oxidării termice a siliciului

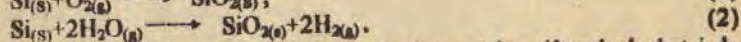
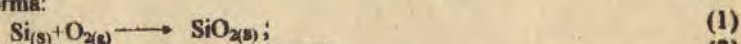
- Scopul lucrării: 1) a lua cunoștință cu construcția instalației de obținere a bioxidului de siliciu (SiO_2);
2) cercetarea influenței diferiților parametri ai procesului tehnologic asupra parametrilor oxidului;
3) cercetarea grosimii și calității stratului de oxid.

Date teoretice

Bioxidul de siliciu crescut prin metoda oxidării termice este unul dintre cele mai folosite materiale la fabricarea circuitelor integrate. El este utilizat pentru mascarea plachete. împotriva impurităților introduse prin difuzie sau implantare, pentru împiedicarea exdifuziei acestor impurități în timpul altor procese termice, ca masă pentru corodarea selectivă a unor straturi, în scopul pasivării și protecției structurilor, ca element constructiv al dispozitivelor MOS, pentru izolarea dielectrică a componentelor între ele și pentru izolarea mai multor nivele de interconexiuni conductive. Bioxidul de siliciu dopat cu P sau B se folosește ca sursă de impurități în procesul difuziei.

Formarea straturilor de oxid poate fi făcută prin mai multe metode: oxidarea termică, anodizarea în electrolit sau plasmă și depunerea din faza de vapori. Oxidul obținut prin oxidarea termică are cele mai bune proprietăți. Structura acestui oxid este amorfă, însă de obicei are o componentă chimică fixă în corespundere cu formula SiO_2 și adeziunea lui către suprafața siliciului este foarte bună.

La baza proceselor oxidării termice stau reacțiile interacțiunii chimice dintre suprafața plachetei de siliciu și oxidant. În calitate de oxidant poate fi folosit oxigenul uscat, oxigenul umed, vaporii de apă. Reacțiile chimice de oxidare pot fi scrise sub forma:



Pe parcursul oxidării interfața Si-SiO₂ se deplasează în adâncul plachetei de siliciu și volumul total crește, ceea ce are ca rezultat ridicarea stratului de oxid deasupra suprafeței inițiale a siliciului, așa cum este arătat în fig. 1. Pe baza densităților și maselor moleculare ale Si și SiO₂, se poate arăta că la creșterea unui strat de oxid cu grosimea X_0 se consumă o grosime a plachetei de Si egală cu $0.45 X_0$.

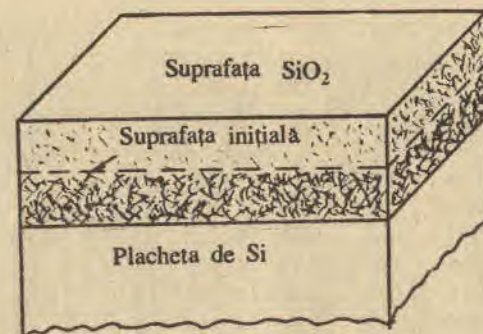


Fig. 1. Creșterea SiO₂.

Prin metode experimentale avansate s-a stabilit că oxidarea evoluează prin difuzia oxidantului prin oxid spre interfața Si-SiO₂ unde are loc reacția de oxidare. Cinetica oxidării termice poate fi ilustrată cu ajutorul modelului fenomenologic, care este valabil pentru temperaturi între 700–1300°C, presiuni parțiale cuprinse între 0.2 și 1 atm. și grosimi de oxid peste 300Å în atmosfera oxigenului și (sau) a vaporilor de apă.

Din analiza cineticii procesului oxidării termice a fost determinată ecuația care descrie acest proces:

$$X_0^2 + A X_0 = Bt, \quad (3)$$

unde A și B - mărimi constante pentru procesul dat;

X_0 - grosimea stratului crescut;

t - timpul procesului.

Soluția ecuației (3), față de X_0 în dependență de timp se scrie:

$$X_0/(A/2) = [(1 + \sqrt{1 + (A^2/4B)t})]^{1/2} - 1. \quad (4)$$

Dacă timpul procesului de oxidare este mare, adică când $t \gg A^2/4B$, atunci

$$X_0^2 = Bt. \quad (5)$$

Ecuația (5) reprezintă legea parabolică, unde B - constanta parabolică a vitezei de oxidare. Alt caz de limită are loc la timpuri mici de parcurgere a procesului, când $t \ll A^2/4B$, atunci:

$$X_0 = (B/A)t. \quad (6)$$

Ecuatia (6) reprezintă legea liniară a procesului de oxidare, unde B/A -constanta liniară a vitezei de oxidare.

Folosind ecuația (4) și datele experimentale ale funcției $X_0=f(t)$ au fost determinate mărimile constantelor (tab. 1).

Tabelul 1

Constantele procesului oxidării termice

Temperatura oxidării °C	O ₂ uscat			O ₂ umed H ₂ O = 95°C			Vapori H ₂ O H ₂ O = 102°C
	A, μm	B, μm/oră	B/A μm/oră	A, μm	B, μm/oră	B/A μm/oră	
1200	0,040	0,045	1,12	0,05	0,720	14,40	0,96
1100	0,090	0,027	0,30	0,11	0,510	4,64	
1000	0,165	0,0117	0,07	0,226	0,287	1,27	0,33
920	0,235	0,0049	0,02	0,50	0,203	0,406	

Din tabel se vede că valoarea absolută a coeficientului A crește la micșorarea temperaturii, iar coeficientul B are un caracter invers. Oxidarea în vapori de apă are cea mai mare viteză, însă calitatea oxidului obținut nu este atât de bună (are o mare cantitate de pori) și un astfel de oxid nu poate fi folosit în calitate de mască în procesele difuziei locale sau în calitate de oxid în tranzistorii M.O.S.

Pentru ca acest oxid să poată fi folosit ca mască, grosimea necesară de 0.6–0.8 μm poate fi obținută la oxidarea în O₂ uscat la temperatura 1000°C într-un interval de timp 20–50 ore. Un asemenea proces de oxidare are o productivitate mică. De aceea în condiții industriale oxidarea va avea loc într-o atmosferă de oxigen uscat aproximativ 10 min. și se obține o peliculă fără defecte, apoi are loc oxidarea în oxigen umed (asfel viteza oxidării se majorează, însă se majorează și numărul defectelor). În ultima etapă oxidarea are loc din nou într-o atmosferă de oxigen uscat și ca rezultat numărul defectelor se va micșora.

Din lucrările experimentale s-a constatat că asupra cineticii procesului oxidării influențează orientarea cristalografică a suprafeței plăchetei de Si. Constanta B/A este legată de cinetica reacției la interfață și depinde de viteza cu care atomii de siliciu sunt încorporați în oxid. Această viteză depinde, la rândul ei, de concentrația la suprafață a atomilor de Si, care este în funcție de orientarea cristalografică. Cum se și așteaptă, constanta B nu depinde de orientare, deoarece B se determină prin etapa difuziei oxidantului în oxidul obținut.

După cum se vede în fig. 2 suprafața Si orientată în planul (111) se oxidează mai rapid decât cea orientată (100). La oxidarea în oxigen uscat datele experimentale arată că constantele vitezei reacției pentru Si orientat în planul (111) de 1.68 ori sunt mai mari decât pentru Si orientat în planul (100) la aceleași condiții de oxidare (fig.

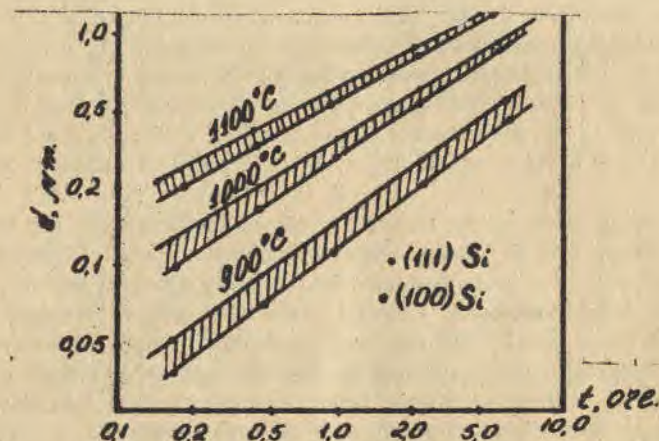


Fig. 2. Dependenta grosimii oxidului de timpul oxidării în oxigen la presiunea parțială a vaporilor H₂O 85 10³ Pa.

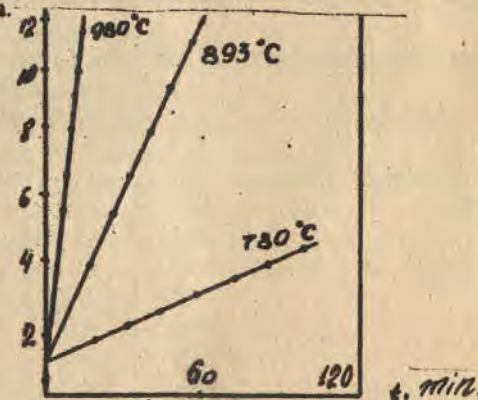


Fig. 3. Dependenta grosimii oxidului de timpul oxidării în oxigen uscat la diferite temperaturi.

O dată cu majorarea gradului de integrare în C.I. cu tranzistoare M.O.S. apare necesitatea de a obține pelicule SiO₂ foarte subțiri (30nm) cu o calitate înaltă și o grosime omogenă. O mare importanță o are prob' na limitării ionilor mobili de Na în straturile de SiO₂, deoarece acești ioni duc la apariția în oxid a așa-numitelor "stări la suprafață" sau "stări rapide".

Pentru înlăturarea acestor stări din oxid, în atmosfera oxidantului se introduc vapori HCl, care interacționează cu Na formând săruri neutre. Rezultatele experimentale pentru oxidarea în oxigen sunt ilustrate în fig. 3.

O mare importanță la folosirea practică a oxidului SiO_2 , o are grosimea acestui strat și calitatea lui. Pentru determinarea grosimii SiO_2 se folosește metoda interferenței, care poate fi îndeplinită cu ajutorul microscopului MHH-4. Metoda determinării grosimii este descrisă în lucrarea de laborator nr. 5. La pregătirea plachetelor de Si cu strat de SiO_2 pentru măsurări, este necesară mascarea unei părți din suprafață cu un lac (XB-784) sau fotorezist cu o rezistență mare la corodare. Uscarea acestui lac are loc într-un termostat ($T=80^\circ\text{C}$, $t=10\text{min.}$). După uscare are loc corodarea SiO_2 într-o soluție $\text{HF} + \text{NH}_4\text{F}$, înlăturarea lacului și măsurarea grosimii.

În condiții industriale se folosește o metodă simplă și rapidă de estimare a grosimii oxidului, care se numește metoda culorilor. O plachetă oxidată privity în lumina albă prezintă o anumită culoare în funcție de grosimea oxidului, datorită interferenței undelor luminoase. Culoarele se repetă în grupe aproximativ identice (corespunzătoare la circa $2500\text{\AA}$), numite ordine de multiplicitate. Pentru a determina ordinul de multiplicitate se poate pune pe suprafața plachetei investigate o picătură de HF, care va ataca rapid oxidul lăsând o urmă circulară formată din inele concentrice ale diferitelor culori, practic apărând toate succesiunile de culori de la oxidul crescut pe plachetă până la siliciu. Dacă de exemplu culoarea roșie în inelele concentrice se repetă de două ori, iar culoarea oxidului este albastră, atunci după datele tabelului 2, grosimea oxidului este egală cu $3000\text{\AA}$.

Tabelul 2
Corespondența între grosimea SiO_2 și culoarea plachetelor oxidate

Culoarea	Grosimea peliculei, $\text{\AA}$			
	ordinul de multiplicitate			
	1	2	3	4
1. "Tan" (culoarea pielii bronzate)	100	-	-	-
2. Cafeniu deschis	300	-	-	-
3. Cafeniu	500	-	-	-
4. Albastru închis	800	-	-	-
5. Violet	1000	2700	4650	6500
6. Albastru	1500	3000	4900	6850
7. Verde	1850	3300	5200	7300
8. Galben	2100	3700	5600	7500
9. Roșie deschisă	2260	4000	6000	-
10. Roșie	2500	4350	6250	-

Pentru obținerea straturilor de SiO_2 prin metoda oxidării termice a siliciului se întrebunțază o instalație specială (fig. 4).

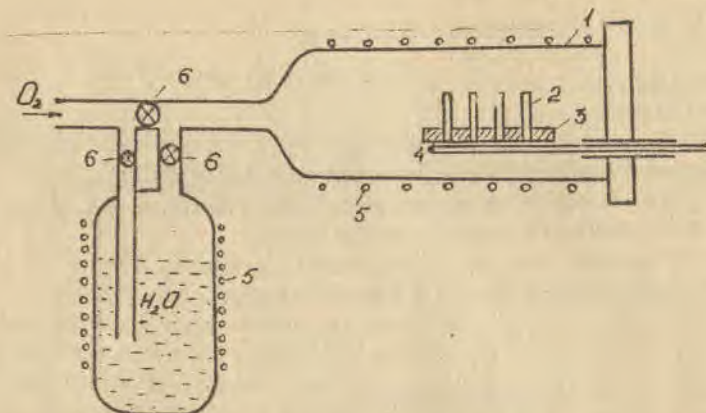


Fig. 4. Instalația pentru oxidarea termică a siliciului:
1-reactor de cuarț; 2-plachete de Si; 3-suport pentru plachete; 4-termocuplu; 5-rezistențe de încălzire; 6-ventile.

La închiderea și deschiderea anumitor ventile 6 plachetele se pot oxida în atmosfera oxigenului uscat, umed sau în vapori de apă.

Ordinea îndeplinirii lucrării

1. Faceți cunoștință cu instrucția de exploatare a instalației comune pentru procesele difuziei, oxidării termice și creșterii epitaxiale.
2. Conectați cuptorul electric și rezistența de încălzire a vasului cu apă. Temperatura necesară în cuptorul electric este indicată de profesor.
3. Curățați câteva plachete de Si, orientate în planurile (111) și (100), prin fierberea lor într-un solvent organic (acetona, toluen, izopropanol).
4. Deschideți anumite ventile 6, pentru a oxida într-un oxidan. dat de profesor.
5. Plachetele purificate așezați-le pe suport și introduceți-le încet în reactor și urmăriți temperatura în reactor.
6. După anumite intervale de timp scoateți din reactor suportul și luați cu penseta câte o plachetă.
7. După terminarea procesului de oxidare scoateți încet suportul din cuptor și luați plachetele rămase.
8. Determinați grosimea oxidului obținut prin metoda interferenței și metoda culorilor.
9. Cercetați calitatea peliculelor de SiO_2 cu ajutorul microscopului NU-2E și determinați densitatea defectelor.

Referatul trebuie să conțină:

- 1) scopul lucrării;
- 2) scurte date teoretice;
- 3) construcția instalației;
- 4) fișa tehnologică a operațiilor îndeplinite;
- 5) calculul teoretic al grosimii SiO_2 prin folosirea formulelor (5), (6) și tab. 1;
- 6) tabelul cu rezultatele experimentale ale grosimii stratului de SiO_2 în dependență de timpul oxidării, măsurate cu ajutorul metodelor folosite;
- 7) compararea rezultatelor teoretice și experimentale ale grosimii SiO_2 ;
- 8) descrierea calității straturilor obținute și densitatea defectelor;
- 9) concluzii.

Întrebări de control

1. Care sunt procesele fizice și chimice ce se folosesc la oxidarea termică a siliciului?
2. Numiți factorii care influențează viteza oxidării termice și calitatea straturilor.
3. Care este ecuația principală a procesului oxidării termice și soluțiile ei?
4. Enumerați particularitățile obținerii straturilor cu o grosime mică.
5. Definiți metodele de măsurare a grosimii straturilor SiO_2 .

Bibliografie

- [3], pag. 225-253; [8], pag. 112-119, 131-135; [14], prima carte, pag. 174-226.

Fabricarea joncțiunilor p-n prin metoda difuziei

Scopul lucrării: a lua cunoștință de metoda difuziei, folosind impurități din starea solidă, pentru obținerea joncțiunilor p-n și de cercetat parametrii straturilor difuzionale și ai joncțiunilor p-n.

Date teoretice

La temperaturi mari atomii rețelei cristaline vibrează în jurul nodurilor rețelei. Atomii care capătă energie suficientă pentru a părăsi nodurile rețelei devin interstițiali și lasă în urmă câte o vacanță. Când un atom de impuritate migrează spre locul vacanței, mecanismul poartă numele de difuzie prin vacanțe sau substituțională. Când un atom de impuritate se deplasează între atomii (nodurile) rețelei, fără să ocupe loc în nod, mecanismul se numește difuzie interstițială. În cazul siliciului, elementele uzuale de dopare din grupele 3 și 5 difuzează substituțional.

Dacă $N(x,t)$ este concentrația locală de impurități presupuse a difuza exclusiv în direcția X, fluxul de impurități F (atomi pe unitatea de arie în unitatea de timp) este proporțional cu gradientul concentrației de impurități, adică:

$$F(x,t) = -D \frac{\partial N(x,t)}{\partial x}, \quad (1)$$

relație care definește constanta de proporționalitate D drept coeficientul de difuzie al impurității respective (exprimat în cm^2/s): Această ecuație de transport este prima lege a lui Fick. Datorită legii conservării, variația în timp a concentrației de impurități trebuie să fie egală cu variația locală a fluxului de difuzie, adică

$$\frac{\partial N(x,t)}{\partial t} = -\frac{\partial F(x,t)}{\partial x}.$$

Substituind (1) în această ecuație de continuitate se obține cea de-a doua lege a lui Fick sau ecuația difuziei sub formă unidimensională:

$$\frac{\partial N(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D \frac{\partial N(x,t)}{\partial x} \right].$$

Dacă D este constant, ipoteză valabilă pentru concentrații mici de impurități, ecuația se scrie:

$$\frac{\partial N(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N(x,t)}{\partial x^2} \quad (2)$$

Coefficientul de difuzie al oricărei impurități exponențial depinde de temperatură:

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-E}{kT}\right), \quad (3)$$

unde D_0 - constantă egală numeric cu coeficientul de difuzie la temperaturi infinit de mari (cm^2/s); E - energia de activare, care se determină ca o oarecare energie, necesară pentru a pătrunde impuritatea în semiconductor (eV); T - temperatura absolută; k - constanta lui Boltzmann.

Dependența coeficientului de difuzie al impurităților în Si și GaAs în funcție de temperatură este prezentată în fig. 1. Energia de activare pentru impuritățile de dopare uzuale în Si are valori între 3.5 și 4 eV.

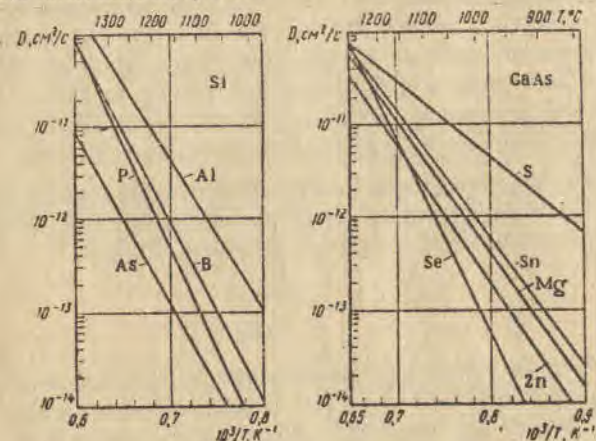


Fig. 1. Coeficientul de difuzie în Si (a) și GaAs (b) al impurităților în funcție de temperatură.

Ecuția (2) poate fi rezolvată pentru diferite seturi de condiții inițiale și limită simple, care corespund însă destul de bine unor situații practice importante.

Un interes de mare importanță practică o au două cazuri de efectuare a proceselor de difuzie:

- 1) difuzia dintr-o sursă semiinfinită (constantă) de impurități;
- 2) difuzia dintr-o sursă limitată de impurități.

Difuzia dintr-o sursă semiinfinită se folosește mai des la fabricarea C.I. ca prima etapă a difuziei, care are scopul de a introduce în semiconductor o anumită cantitate de impurități la o adâncime mică. Această etapă se numește des predifuzie sau depunere de impurități.

Dacă în timpul procesului de depunere concentrația la suprafață N_0 este menținută constantă, condițiile de limită pentru ecuația (2) sunt:

$$N(0, t) = N_0;$$

$$\text{și } N(\infty, t) = 0;$$

(4)

iar condiția inițială este

$$N(x, 0) = 0,$$

unde t - timpul procesului (s); N_0 - concentrația impurităților la suprafață (cm^{-3}).

Valoarea maximă a concentrației N_0 la o temperatură dată poate fi egală cu solubilitatea solidă a acestei impurități în semiconductorul dat (fig. 2).

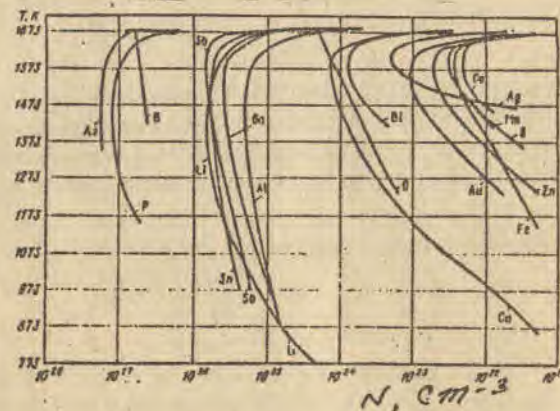


Fig. 2. Dependența solubilității solide a impurităților în Si ca funcție de temperatură.

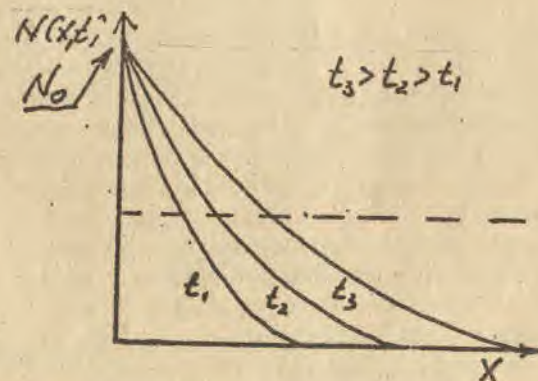


Fig. 3. Distribuția concentrației impurităților în funcție de adâncimea (x) pentru trei valori ale timpului de depunere.

Soluția ecuației (2) cu condițiile (4) este:

$$N(x, t) = N_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right), \quad (5)$$

unde erfc este funcția complementară de eroare. Parametrul cheie al procesului este $\sqrt{Dt}$, care poartă numele de lungime de difuzie. Profilele de impurități, care rezultă din diferiți timpi de depunere, sunt ilustrate în fig. 3.

Cantița totală de atomi a impurității pe o unitate de arie, introdusă în semiconductor după un proces de depunere $Q(\text{at/cm})$, rezultă din integrarea relației (5):

$$Q = \int_0^{\infty} N(x, t) dx = \frac{2}{\sqrt{\pi}} N_0 \sqrt{Dt} \approx 1.1 N_0 \sqrt{Dt}. \quad (6)$$

Difuzia dintr-o sursă limitată de impurități se realizează în acel caz, când pe suprafața semiconductorului la adâncime mică este formată o regiune, care conține impurități Q (pe o unitate de suprafață). Cantitatea aceasta de atomi nu se evaporă de pe suprafața semiconductorului și are loc procesul difuziei numai în interiorul cristalului.

Condițiile de limită și inițiale în acest caz pot fi scrise:

$$\begin{aligned} \partial N(x, t) / \partial x &= 0, \text{ pentru } x = 0; 0 < t < \infty; \\ N(x, t) &= 0, \text{ pentru } x \rightarrow \infty; t > 0; \\ N(x, t) &= 0, \text{ pentru } x > 0; t = 0; \\ \int_0^{\infty} N(x, t) dx &= Q, \text{ pentru } 0 \leq t \leq \infty. \end{aligned} \quad (7)$$

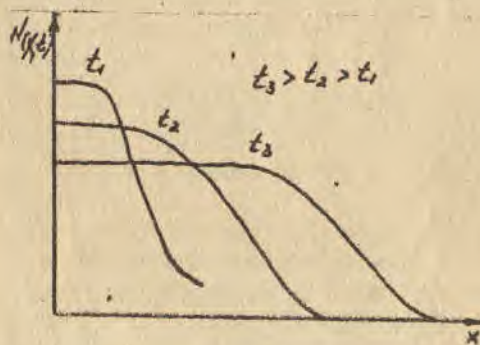


Fig. 3. Distribuția concentrației impurităților în funcție de distanță pentru trei valori ale timpului de difuzie (difuzia propriu-zisă).

Soluția legii a doua a lui Fick, care satisface condițiile de mai sus, este o curbă Gauss, exprimată de:

$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right), \quad (8)$$

iar profilul concentrației impurităților este reprezentat în fig. 4. Difuzia propriu-zisă se face într-o atmosferă de oxigen. Oxidul format (SiO_2) înlătură vaporizarea impurităților de pe suprafața siliciului.

La formarea joncțiunilor p-n concentrația acceptorilor (donorilor) pe suprafața semiconductorului trebuie să fie mai mare decât concentrația donorilor (acceptorilor) materialului inițial.

Joncțiunea p-n se formează la adâncimea x_j , unde are loc condiția:

$$N_a(x_j, t) = N_d, \quad (9)$$

unde $N_a(x, t)$ - concentrația impurităților de tip - p, care trece prin difuzie în materialul inițial cu concentrația donorilor - N_d .

Problemele de bază în tehnologia formării joncțiunilor p-n sunt: calculul adâncimii joncțiunii p-n (x_j) în dependență de timpul procesului de difuzie și temperatură; calculul timpului necesar pentru obținerea anumitelor adâncimi ale joncțiunii p-n în dependență de temperatura procesului. Toate aceste calcule pot fi făcute folosind ecuațiile (5) și (8).

Metodele de efectuare a procesului de difuzie

În calitate de sursă a impurității în procesele de difuzie poate fi folosit un element chimic sau mai des un compus al lui, care conține impuritatea dată. Impuritățile folosite la temperatura camerei pot fi în stare solidă, lichidă sau gazoasă. În tab. 1 sunt prezentate caracteristicile celor mai răspândite impurități, care sunt folosite la efectuarea joncțiunilor p-n în Si.

În practică o întrebare mai mare o au două metode de efectuare a difuziei: difuzia într-un volum închis sau deschis.

La realizarea difuziei într-un volum închis plachetele de semiconductor și difuzantul în stare solidă se introduc într-o fiolă de cuarț, care, după ce este vidată, se fixează în palierul cuptorului, temperatura căruia poate fi între 700°C și 1200°C . În dependență de temperatura cuptorului, difuzantul formează o anumită presiune a vaporilor saturați în interiorul fiolei. Schimbând temperatura procesului de difuzie, putem schimba concentrația impurității N_0 pe suprafața semiconductorului. Pentru un asemenea proces de difuzie se folosesc mai des cuptoare cu două regiuni de temperatură. În prima regiune se introduce difuzantul, iar într-a doua se introduc plachetele de semiconductor. Reglând temperatura primei regiuni putem regla concentrația superficială a impurității, iar pentru regiunea a doua putem regla viteza procesului de difuzie.

Tabelul 1

Caracteristica difuzanților răspândiți pentru Si.

Difuzantul	Starea la temperatura camerei	Temperatura sursei ($^{\circ}\text{C}$)	Caracteristica
Oxidul de bor B_2O_3	solidă	600-1200	Purifică tubul, se reglează concentrația impurității greu
Bromidul de bor BBr_3	lichidă	10-30	Nu purifică tubul, reglare ușoară a concentrației, care depinde mult de geometria instalației.
Nitrura de bor BN	solidă	1100-1200	Se reglează greu concentrația, nu este otrăvitor.
Ditoranul B_2H_6	gazoasă	de cameră	La fel ca și la bromid, însă este foarte otrăvitor.
Oxichlorură de fosfor POCl_3	lichidă	2-40	Reglare satisfăcătoare, însă concentrația depinde foarte mult de geometria sistemului.
Pentaoxidul de fosfor P_2O_5	solidă	200-300	Este foarte sensibil la vapori de apă, este greu de obținut concentrații mici.
Fosfin PH_3	gazoasă	de cameră	Reglarea precisă, însă este otrăvitor și inflamabil.

În prezent acest sistem este mai puțin utilizat, deoarece conține o serie de neajunsuri:

- nu se poate realiza difuzii la temperaturi foarte mari, deoarece fiola de cuarț se înmoaie;
- are loc fenomenul de evaporare în vid a impurităților care sunt în placheta de semiconductor;
- procesul de difuzie este costisitor, deoarece consumă mult cuarț;
- nu pot fi folosite surse de impurități în starea lichidă sau gazoasă.

Metoda difuziei într-un tub deschis se deosebește prin aceea că la realizarea ei pot fi folosite toate tipurile de difuzanți și în afară de aceasta are o reproductibilitate și productivitate mai mare. În fig. 5 este prezentată schema instalației pentru realizarea difuziei într-un tub deschis, în care este folosită sursa de impurități din starea lichidă.

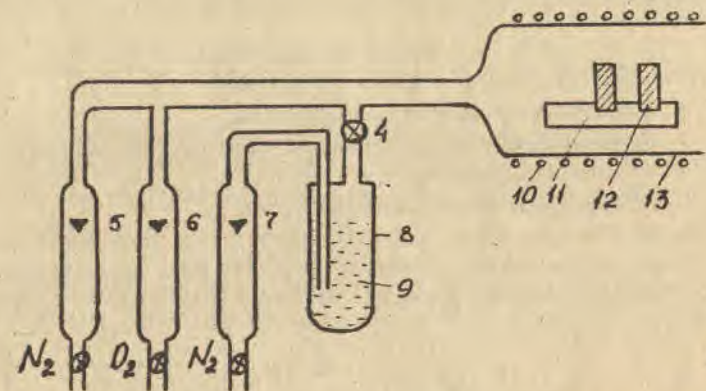
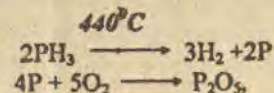


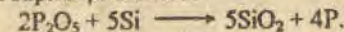
Fig. 5. Schema principală a instalației pentru realizarea difuziei în tub de cuarț deschis cu sursă de difuzant din starea lichidă: 1, 2, 3, 4 - ventile; 5, 6, 7 - reometre; 8 - barboter; 9 - sursa de impuritate lichidă; 10 - captorul electric; 11 - suportul plachetelor; 12 - plachetele de semiconductor; 13 - tubul din sticlă de cuarț.

Pentru transportarea vaporilor difuzantului în regiunea difuziei se utilizează argonul sau azotul, care trece deasupra lichidului sau prin interiorul lui. La o anumită viteză a gazului transportor concentrația difuzantului depinde de temperatura sursei. În instalație este prevăzută introducerea oxigenului simultan cu transportarea difuzantului, care aduce la oxidarea plachetelor de siliciu în timpul procesului. Creșterea în procesul difuziei a sticlei, care conține impuritatea dată, apără suprafața siliciului de eroziune (din cauza vaporizării) și de reacții chimice, care pot avea loc pe suprafața siliciului.

Utilizarea surselor gazoase permite foarte ușor reglarea concentrației impurităților în regiunea difuziei. De exemplu pentru difuzia P se utilizează fosfin gazos PH_3 în formă de amestec (98.7%Ar + 1.3% PH_3). În tubul de difuzie, o dată cu acest compus gazos, se introduce și o mică cantitate de oxigen. Se presupune că în tubul de oxidare au loc următoarele reacții:



iar la suprafața siliciului



Deoarece sursa locală de difuzant este P_2O_5 , rezultă că la suprafața siliciului se va forma o sticlă fosfatică, care reprezintă sursa de impuritate.

Analiza straturilor difuzate

Parametrii principali ai straturilor difuzate sunt:

- concentrația impurităților la suprafață, N_0 ;
- distribuția spațială a difuzantului $N(x,t)$ pe direcția de difuzie;
- adâncimea joncțiunilor p-n, x_j ;
- rezistența superficială a straturilor difuzate, ρ_s .

Adâncimea straturilor difuzate, x_j , poate fi măsurată cu ajutorul șlifului semisferic (fig. 6). Pentru aceasta o bilă cu diametrul $D=20-150$ mm., în prezența pastei de diamant, se rotește pe suprafața plachetei, realizând o scobitură de formă sferică.

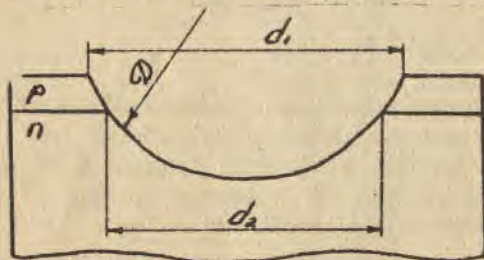


Fig. 6. Realizarea scobiturii sferice pentru măsurarea adâncimii joncțiunii p-n.

Pentru determinarea adâncimii joncțiunii p-n (regiunii de separare a straturilor difuzate și plăchetei inițiale) se utilizează colorarea chimică. De exemplu, la prelucrarea scobiturii în soluție de 20 părți de greutate HF și 100 părți greutate $CuSO_4$ se acoperă cu Cu regiunea n. La prelucrarea în acid fluorhidric cu adaosul 0.1% HNO_3 se întunecă regiunea p. După colorare în microscopul optic se poate vedea clar circumferințe concentrice. Măsurând cu microscopul diametrul d_1 și diametrul frontierei de jos d_2 , adâncimea joncțiunii p-n poate fi determinată din relația:

$$x_j = (d_1^2 - d_2^2) / 4D. \quad (10)$$

Eroarea de determinare x_j nu este mai mare decât 2%.

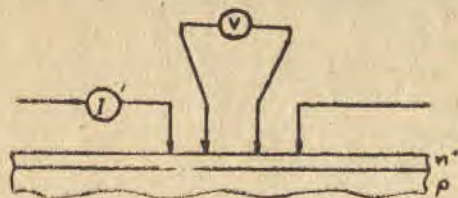


Fig. 7. Determinarea rezistenței specifice prin metoda cu 4 sonde.

Rezistența specifică de volum a straturilor p poate fi măsurată cu ajutorul instalației cu 4 sonde (fig. 7), care exclude influența rezistenței contactelor la precizia măsurării. Curentul I trece prin două sonde exterioare și duce la o cădere de tensiune între sondele interioare.

Valoarea medie a rezistenței specifice de volum se determină din expresia:

$$\rho = 4.53 U \cdot x_j / I, \quad (11)$$

unde ρ se măsoară în $\Omega \cdot \text{cm}$; U - V; I - A; x_j - cm.

În tehnologia C.I. se folosește mai des termenul - rezistența superficială a straturilor ρ_s , care reprezintă rezistența straturilor cu o geometrie pătrată și se măsoară în Ω pe pătrat:

$$\rho_s = \rho / x_j = 4.53 U / I \quad [\Omega / \square]. \quad (12)$$

Expresiile (11) și (12) sunt valabile, dacă distanța dintre sonde este cu mult mai mare decât grosimea straturilor difuzionice (epitaxiale), fapt ce des se întâmplă în practică.

Ordinea îndeplinirii lucrării

1. Studiați schema principală a instalației pentru realizarea difuziei (fig. 8).

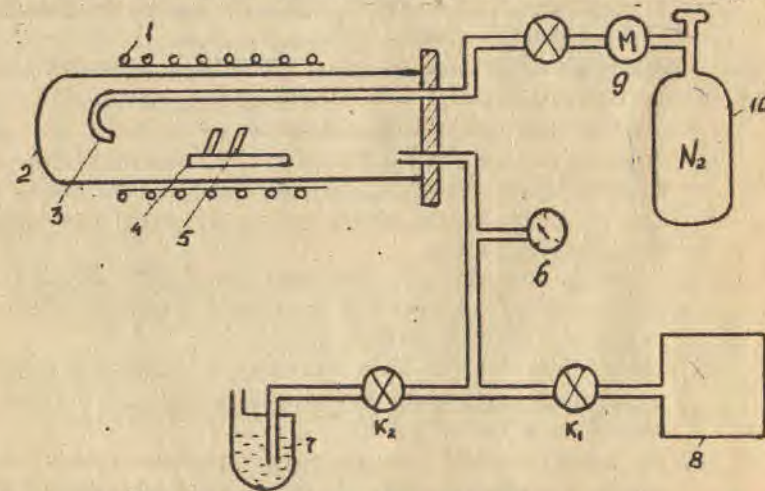


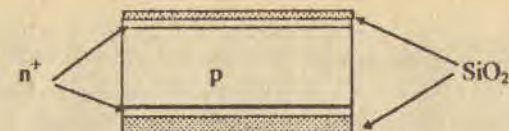
Fig. 8. Schema instalației pentru realizarea difuziei din sursă solidă de impurități: 1-cuptorul electric; 2-reactorul de cuarț; 3-tub pentru introducerea gazului în reactor; 4- suportul pentru plăchete; 5-plăchetele; 6-manometru; 7-barboter; 8-pompă mecanică; K1, K2, K3-ventile; 9-manometru; 10-butelie de azot.

2. Conectați cuptorul electric (timp de 3 min. temperatura în cuptor va fi egală cu 1050°C).
3. Primiți de la profesor (inginer) plăchete din Si dopate cu bor (tip-n) cu rezistivitatea specifică de $10 \Omega \cdot \text{cm}$ ($N_A = 1.2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$).

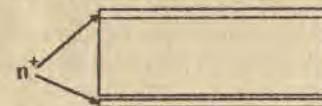
4. Determinați cu ajutorul termosondei tipul de conductibilitate a plăchetei și observați dacă este de tipul "p".
5. Cu ajutorul caracteriografului IIIXT desenați caracteristica V-A.
6. Purificați suprafața plăchetei cu ajutorul unui tampon de vată înmuiat în acetonă, toluen sau propanol.
7. Creșteți pe suprafața plăchetei un strat de SiO_2 , utilizând oxidarea anodică. Pentru aceasta sunt necesare îndeplinirea următoarelor operații:
 - fixați placeta pe suprafața electrodului (anod) și introduceți placeta în electrolit cu următoarea componență:
 $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{CH}_2\text{OH}-\text{CH}_2\text{OH}:\text{H}_2\text{O}$ (6:6:2);
 - conectați electrozii la blocul de alimentare. Densitatea curentului prin electrolit va fi aprox. de $1\text{A}/\text{dm}^2$, timp de 30 min. La trecerea curentului prin electrolit ioni PO_4^{3-} se mișcă spre placetă (anod) și are loc reacția de oxidare a Si. Oxidul (SiO_2) crescut conține atomi de fosfor care ne vor servi ca sursă de impuritate. La catod, ce poate fi confecționat din platina, grafit, Si , se îndreaptă ioni H^+ ;
 - după oxidarea plăchetei, acestea se vor spăla cu apă distilată și vor fi curățate cu toluen.
8. Așezați plăchetele oxidate pe suport și introduceți suportul în reactorul 2 (fig. 8), apoi ermetizați reactorul și efectuați următoarele operații:
 - controlați dacă toate ventilele sunt închise;
 - deschideți reductorul buteliei de azot și fixați presiunea la aprox. 0 atm.;
 - deschideți ventilul K1 și conectați pompa mecanică (8), care va evacua aerul din reactor, urmăriți poziția acului manometrului (6), el trebuind să se deplaseze spre stânga.

Inchidem ventilul K1, deconectăm pompa (8). În cazul acesta se interzice deschiderea ventilului K2, deoarece în acest caz glicerina din barboterul (7) va pătrunde în reactor;

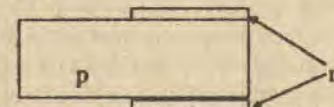
 - deschideți ușor ventilul K3 și introduceți în reactor azot urmărind în același timp poziția acului de la manometru până când ne arată că în manometru nu mai este azot N_2 ;
 - deschidem ventilul K2 la maxim și reglăm presiunea azotului, reglarea făcându-se urmărind numărul de bule ce ies din barboter (5 bule pe sec.);
 - introducem ușor reactorul în cuptor la temperatura $T=1050^\circ\text{C}$ și se ține un anumit timp (dat de profesor);
 - scoateți ușor reactorul din cuptor și așteptați până se răcește ($T=50^\circ\text{C}$);
 - închideți ventilele K2 și K3;
 - scoateți plăchetele din reactor pe care sunt următoarele straturi:



9. Corodați în HF stratul SiO_2 rămas și spălați plăchetele:



10. Cu ajutorul corodantului $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH}$ (1:3:1), corodați stratul n pe o jumătate de placetă.



11. Desenați cu ajutorul caracteriografului caracteristica V-A pe suprafața stratului n^+ .
12. Măsurati cu ajutorul termosondei tipul de conductibilitate obținut.
13. Măsurati U și I și calculați la instalația cu patru sonde rezistența specifică ρ_s (cu ajutorul formulei 12).
14. Calculați adâncimea joncțiunii n^+-p .

Cerințe față de referat

Referatul trebuie să conțină:

- 1) scopul lucrării;
- 2) scurte date teoretice;
- 3) calculul adâncimii joncțiunii p-n și a timpului;
- 4) grosimea stratului difuzant și calculele rezistențelor specifice și superficiale;
- 5) materialele folosite și fișa tehnologică a operațiilor independente.

Întrebări de control

1. Care este sensul fizic al legilor lui Fick?
2. Care sunt particularitățile realizării procesului de difuzie dintr-o sursă semiinfinită (constantă) și limitată?
3. Care este distribuția concentrației impurităților?
4. Care sunt particularitățile metodelor de realizare a difuziei cu difuzor și surse de impurități?
5. Care sunt parametrii straturilor difuzante și cum pot fi măsurați (calculați)?

Bibliografie

Creșterea straturilor dopate de GaAs prin metoda epitaxiei din fază lichidă (E.F.L.)

Scopul lucrării: de a lua cunoștință de schema aparatului E.F.L., efectuarea calculului tehnologic și a operațiilor de pregătire pentru procesul E.F.L., creșterea straturilor dopate de GaAs și determinarea parametrilor.

Date teoretice

Prin epitaxie se înțelege procesul fizico-chimic de creștere a stratului monocristalin pe suprafața substratului monocristalin astfel ca structura cristalină a stratului crescut să fie o continuare a structurii cristaline a substratului; termenul de epitaxie provine de la cuvintele grecești (EPI), care înseamnă «pe» și «taxis», care înseamnă «aranjare». Deosebim termenii izoepitaxie și heteroepitaxie. În cazul izoepitaxiei componența chimică a stratului și substratului, practic nu se deosebesc. Deosebirile pot fi în tipul sau concentrația impurităților în strat și substrat (de exemplu, pe substratul p GaAs se crește un strat n GaAs). În cazul heteroepitaxiei componența chimică a stratului și substratului se deosebesc (de exemplu pe suprafața substratului n GaAs se crește un strat epitaxial p $Al_xGa_{1-x}As$).

În prezent pentru creșterea epitaxială sunt folosite un șir de metode, dintre care cele mai răspândite sunt:

- epitaxia din fază gazoasă;
- epitaxia din fază lichidă;
- epitaxia cu fascicul molecular.

Să examinăm pe scurt esența procesului E.F.L. Pentru realizarea procesului, substratul monocristalin se aduce în contact cu o topitură - soluție saturată, (care conține materialul semiconductor, din care va crește stratul dizolvat într-un metal cu punct de topire coborât) în starea echilibrului termodinamic. Forța motoare a acestui proces de creștere este determinată de suprasaturare care se obține în faza lichidă. Suprasaturarea poate fi obținută datorită răcirii sistemului, creării unui gradient de concentrație sau de temperatură, răcirii suprafeței de creștere prin intermediul efectului Peltier și în sfârșit pe contul electromigrației. Pentru a înțelege procesele care decurg în faza lichidă în timpul E.F.L. să examinăm diagrama ipotetică de stare a metalului A, care joacă rolul de dizolvant (solvent) și semiconductorul B - substanța dizolvată. Dacă topitura cu componența x_1 (fig. 1) se aduce în contact cu placheta de semiconductor A, aflată la aceeași temperatură T_1 și temperatura sistemului crește la T_2 , atunci după un anumit moment de timp placheta B se va dizolva până la formarea soluției - topituri cu componența x_2 . Răcirea ulterioară a sistemului de la T_2 la T_1 duce la suprasaturare și, ca rezultat, la creșterea stratului substanței B din soluția B în metalul A. După îndeplinirea acestor condiții de alegere a solventului A și a

materialului pentru substrat B, rezultatul procesului va fi depunerea stratului epitaxial B pe suprafața substratului din același material.

Masa majoritară a topituri-soluție o constituie solventul, de aceea componența stratului cristalizat se deosebește radical de componența fazei lichide și condiția necesară de cristalizare o constituie difuzia particulelor substanței, care se cristalizează în regiunea cristalizării.

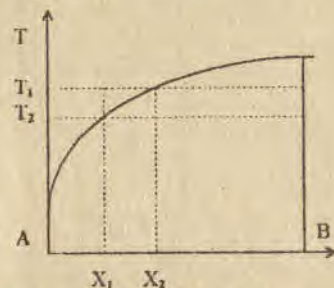


Fig. 1. Diagrama de stare a metalului A și a semiconductorului B.

Procesul de creștere în E.F.L., când lipsește amestecarea forțată a topituri, poate fi împărțit în următoarele etape:

- transportul substanței cristalizante prin convecție din volumul soluției-topituri către frontiera stratului difuzional;
- difuzia acestei substanțe la frontiera de separare substrat - topitură și difuzia solventului de la frontiera de separare;
- precipitarea substanței și creșterea stratului epitaxial;
- dispararea căldurii de cristalizare.

Solventul trebuie să satisfacă următoarele cerințe:

- să fie ușor fuzibil, pentru a fi ușor decontat de pe suprafața stratului crescut;
- să posede o presiune mică a vaporilor saturați la temperatura de creștere, ca să nu-și micșoreze masa în timpul procesului;
- solubilitatea materialului semiconductor trebuie să fie mare pentru a obține straturi epitaxiale la temperaturi joase;
- trebuie să fie neutru în materialul semiconductor sau să asigure doparea stratului epitaxial până la concentrația dată.

Folosind în calitate de solvenți, metalele ușor fuzibile (Ga, In, Pb, Sn, Bi) limita inferioară a temperaturii de creștere se determină nu numai prin temperatura de trecere a solventului din faza solidă în faza lichidă, dar și de valoarea solubilității materialului dizolvat.

La creșterea straturilor epitaxiale de GaAs prin metoda E.F.L. în calitate de solvent este folosit mai des Ga. Determinarea cantității necesare de As pentru obținerea unei soluții-topituri saturate la o temperatură dată de desfășurare a procesului se efectuează din curbele de solubilitate a arseniului de Ga în diferiți solvenți (fig. 2).

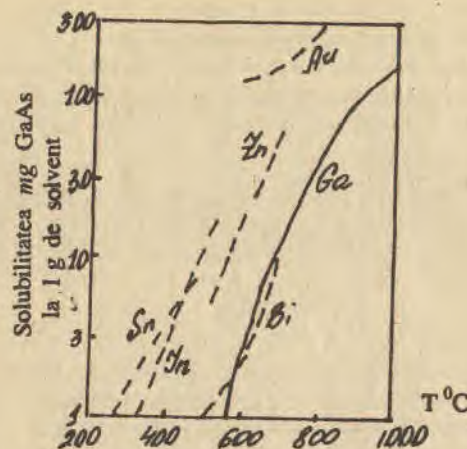


Fig. 2. Solubilitatea GaAs în topituri ale diferitelor metale.

E.F.L. se deosebește de alte variante de cristalizare din soluții-topituri prin prezența substratului monocristalin pe care se cristalizează o parte de material aflat în solvent. În primul moment după începerea cristalizării, procesul E.F.L. este definit de caracterul echilibrului de fază la frontiera de separare substrat-solvent și de cinetica reacției la suprafața de depunere a atomilor materialului care se cristalizează.

Substratul exercită o influență numai asupra primului strat crescut cu o grosime, ordinul căreia este de câteva constante ale rețelei cristaline a materialului cristalizat. Creșterea în continuare are loc pe stratul epitaxial, însă o parte din parametrii substratului determină proprietățile întregului strat epitaxial (de exemplu, orientarea substratului, care, ca regulă, se păstrează la stratul crescut).

Este stabilit că la procesul E.F.L. al compuşilor A^3B^5 din soluții, creșterea în procesul E.F.L. are loc pe fețe de două tipuri: singulare (111) și nesingulare (100). Pe suprafețele nesingulare atomii se aranjează în mod întâmplător și viteza de creștere inițial depinde de schimbarea energiei libere superficiale la ordonarea atomilor în fețe. Această schimbare se descrie prin relația:

$$\Delta G = RT \ln(1 + \sigma), \quad (1)$$

unde R - constanta universală a gazelor (egală cu $8.34 \text{ J/mol} \cdot \text{grad}$); T - temperatura absolută; σ - suprasaturarea relativă (adică raportul diferenței concentrației materialului dat în solvent C și concentrației în stare de echilibru C_e către mărimea C_e), $\sigma = (C - C_e)/C_e$. Să observăm că mărimea $1 + \sigma = C/C_e$ nu depinde de felul unităților de măsură, în care sunt exprimate mărimile C și C_e . În practica creșterii epitaxiale σ deseori este exprimată în procente. În cazul de față este mai ușor de utilizat mărimea ΔT - supraîncălzirea soluției, care arată cu cât temperatura reală a soluției este mai mică decât temperatura de echilibru T_e la care $C = C_e$. Mărimile ΔT și ΔG sunt legate prin relația:

$$\Delta G = \Delta H / (\Delta T / T_e), \quad (2)$$

unde ΔH - entalpia de dizolvare.

Mecanismul de depunere a substanței pe fețele singulare e mult mai complicat. În acest caz atomii nu pot adera la orice punct al suprafeței, însă alipirea sistematică a mai multor atomi (pe fețele regulate) sau depunerea atomilor în anumite regiuni (în cazul fezelor cu dislocații elicoidale) conduce la o dependență a vitezei de creștere diferită de cea liniară.

Să examinăm în sfârșit doparea straturilor epitaxiale crescute prin metoda E.F.L. Doparea în acest caz se realizează pe două căi. Dacă impuritatea are o presiune mare a vaporilor saturați la temperatura inițială de creștere epitaxială (ex: Cd, Zn, S, Se, Te), atunci doparea poate fi realizată din faza gazoasă plasând impuritatea într-o secțiune separată a nacelei din grafit. Dacă însă impuritatea are o presiune mică a vaporilor saturați (Ge, Sn), atunci această impuritate poate fi introdusă direct în faza lichidă.

S-a determinat că coeficientul efectiv de distribuire a impurității K este egală aproximativ cu:

$$\ln K = \ln K_0 + B \cdot V, \quad (3)$$

unde K_0 - valoarea lui K la viteza de creștere $V=0$ (ea depinde de temperatură), B - un parametru oarecare, care caracterizează sistemul dat.

Coeficientul de distribuire K se determină ca raportul dintre concentrația impurității în cristal (C_s) și concentrația ei în solvent (C_l), adică:

$$K = C_s / C_l. \quad (4)$$

Cu toate acestea pentru majoritatea impurităților mărirea vitezei de creștere este însoțită de mărirea coeficientului de distribuire, de aceea o creștere mai lentă duce la creșterea straturilor mai pure.

Pentru obținerea straturilor de GaAs, dopate cu Ge sau Sn până la o anumită concentrație a purtătorilor de sarcină, putem folosi datele experimentale expuse în fig. 3. Presupunem că avem nevoie de a obține straturi epitaxiale de arseniură de galiu, dopate cu Sn, la temperatura inițială de creștere epitaxială de 800°C cu concentrația purtătorilor (electroni) - 10^{18} cm^{-3} . Atunci masa necesară a Sn, care trebuie introdusă în faza lichidă, se determină prin expresia:

$$P_{Sn} = P_{Ga} \frac{A_{Sn}}{A_{Ga}} \cdot X_{Sn}, \quad (5)$$

unde P_{Ga} - masa galiului (solventului);

A_{Sn} - masa atomică a Sn;

A_{Ga} - masa atomică a Ga.

Dacă masa solventului este 1000 mg, atunci utilizând datele din fig. 3 determinăm:

$$P_{Sn} = 1000 \frac{118.7}{69.7} \cdot 0.1 \approx 170 \text{ mg}$$

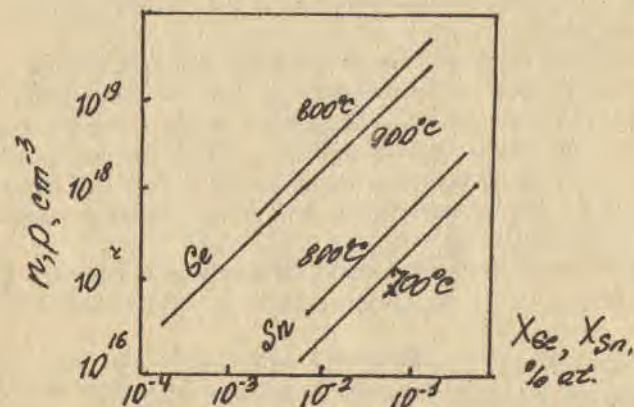


Fig. 3. Dependenta concentratiei purtatorilor de sarcina in GaAs la temperatura camerei fata de partea atomica (x) a Ce și Sn în faza lichida la diferite temperaturi initiale ale procesului de crestere epitaxiala.

Schema instalatiei pentru procesul E.F.L.

Cresterea straturilor epitaxiale de GaAs prin metoda E.F.L. se face într-un reactor de cuarț într-un flux de hidrogen purificat (fig. 4).

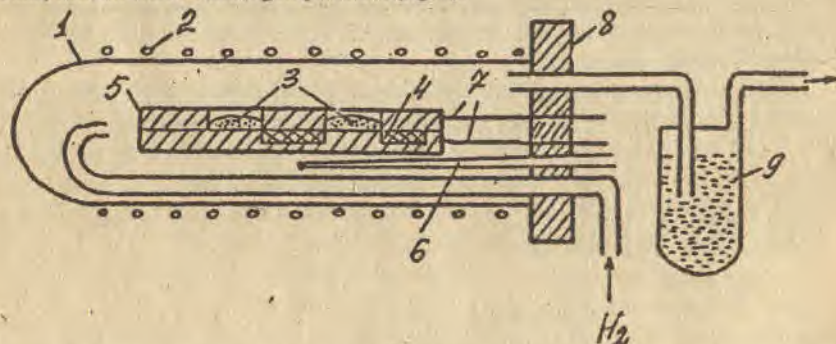


Fig. 4. Schema-bloc a instalatiei E.F.L.: 1-reactor de cuarț; 2-cuptor electric; 5-nelă din grafit; 6-termocuplu; 7-tije din moli bden; 8-capac orb; 9-burboter.

Regimul termic de crestere a straturilor epitaxiale este determinat în fig. 5, care conține în cele mai dese cazuri 4 etape:

- 1) încălzirea instalatiei până la temperatura de începere a creșterii epitaxiale;
- 2) menținerea soluției-topituri la temperatura dată cu scopul omogenizării ei;
- 3) umezirea substratului cu soluție-topitură saturată și ridicarea temperaturii sistemului cu scopul dizolvării parțiale a substratului;
- 4) creșterea epitaxială a stratului prin răcirea instalatiei cu viteză dată și decantarea de pe suprafața substratului.

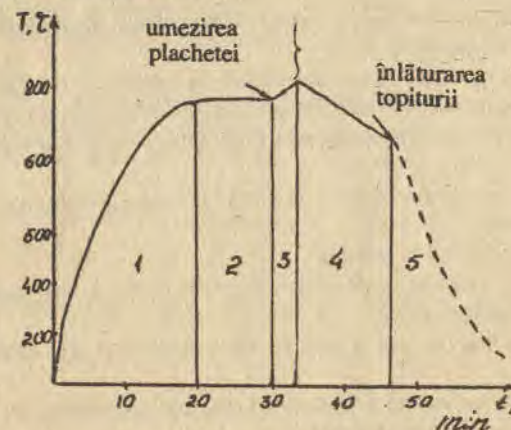


Fig. 5. Regimul termic de crestere a straturilor epitaxiale prin metoda E.F.L.

Ordinea îndeplinirii lucrării

1. Faceți cunoștință cu instrucția generală de exploatare a instalatiei oxidării termice, difuziei și E.F.L.
2. Conectați cuptorul electric și aduceți-l la temperatura de lucru dată de profesor.
3. Curățați suprafața substratului GaAs cu ajutorul unei bucați de vată îmbibată cu solvent organic (acetona, toluen, spirt izopropilic) și puneți-o pe hârtie de filtru.
4. În corespondență cu temperatura de începere a creșterii epitaxiale dată, cantitatea solventului și concentrația necesară a impurităților în stratul epitaxial, calculați după formula (5), folosind date din fig. 3, cantitatea necesară de impurități.
5. Folosind datele din fig. 2 determinați cantitatea necesară de Ga's pur pentru saturarea cu As a fazei lichide.
6. Cântăriți pe cântarul analitic cantitățile necesare de Ga, GaAs și impurități.
7. Fixați substratul de GaAs în corespondență cu locul în nacela de grafit.
8. Instalați pe casetă tije de moli bden și verificați mișcarea substratului, apoi încărcăți în casetă solventul (Ga), GaAs și impuritate dopantă.
9. Plasați încet caseta în reactor și închideți-l ermetic lent înșurubând piulițele pe diagonală.

10. Deschideți robinetele respective, conectați pompa cu vid preliminar și evacuați reactorul.
11. Deschideți supapa de admisie a hidrogenului și conectați sistemul de încălzire pentru purificarea hidrogenului.
12. Turnați azot lichid în vasul Dewar pentru condensarea vaporilor de apă, care se conțin în hidrogen.
13. Închideți robinetele de evacuare ale reactorului și deschideți robinetele de admisie ale hidrogenului în reactor observând evacuarea hidrogenului prin barboter.
14. Realizați încă o dată punctele 10-13.
15. Lent (împreună cu inginerul) introduceți reactorul în cuptor și urmăriți indicațiile voltmetrului conectat la termocuplu.
16. Mențineți regimul de temperatură în corespondență cu intervalele de timp (fig. 5) și notați dependența temperaturii în funcție de timp. Mișcând tija de molibden, executați operațiile de umezire și la terminarea procesului deconectați topitura de pe stratul crescut.
17. Deconectați cuptorul și sub supravegherea inginerului extrageți lent (timp de 10 min.) reactorul din cuptor.
18. Conectați ventilatorul de răcire a reactorului.
19. După răcirea reactorului, închideți supapa de admisie a hidrogenului, desșurubați piulițele și scoateți din reactor caseta.
20. Turnați pe o hârtie de filtru Ga uzat și scoateți din casetă substratul epitaxial cu stratul epitaxial crescut.
21. Vizual determinați calitatea stratului epitaxial (prezența picăturilor de Ga pe suprafață, suprafața de tip oglindă, defectele).
22. Știrbiți o regiune mică de substrat, prelucrând-o în corodant selectiv (1 min.) pentru a dezvolta frontiera de separare substrat-strat și spălați substratul în apă distilată.
23. Măsurați grosimea stratului epitaxial cu ajutorul microscopului NU-2E.
24. Măsurați prin metoda a 4 sonde rezistivitatea stratului.
25. Folosind valoarea aproximativă a mobilității purtătorilor de sarcină, calculați concentrația lor și comparați-o cu cea dată.
26. Fabricați contacte la joncțiunea p-n obținute cu ajutorul nichelării chimice, coaceți contactele la temperatura 400°C timp de 1 oră și examinați caracteristica V-A.

Cerințele față de darea de seamă

Darea de seamă trebuie să conțină:

- 1) scopul lucrării;
- 2) scurte noțiuni teoretice;
- 3) construcția instalației;
- 4) fișa tehnologică a consecutivității operațiilor îndeplinite;
- 5) datele calculate ale cantității de GaAs pentru saturarea fazei lichide la temperatura dată și cantitatea impurității pentru doparea stratului epitaxial până la concentrația dată;

- 6) aprecierea calității stratului obținut și a grosimii lui;
- 7) datele măsurărilor și concentrației purtătorilor de sarcină;
- 8) metoda de obținere a contactului;
- 9) aspectul caracteristicii V-A a joncțiunii p-n obținute;
- 10) concluzii.

Întrebări de control

1. Care este esența procesului E.F.L.?
2. Numiți particularitățile creșterii stratului pe fețele singulare și nesingulare ale cristalului.
3. Care factori influențează la grosimea stratului crescut?
4. Prin ce căi se poate realiza doparea straturilor epitaxiale?
5. Cum se poate determina cantitatea necesară de GaAs pentru saturarea fazei lichide?
6. Cum se determină cantitatea de impuritate, introdusă în faza lichidă?

Bibliografie

[4], pag. 9-150; [9], pag. 9-112; [15], pag. 4-21; [17], pag. 17-30; 130-159.

Depunerea straturilor metalice prin evaporarea termică în vid

- Scopul lucrării: 1) de a studia construcția instalației de depunere termică în vid, metodele de obținere și măsurare a vidului;
2) de însușit practic metoda de depunere a straturilor metalice prin vaporizarea termică în vid și de controlat parametrii straturilor depuse.

Date teoretice

În circuite integrate (C.I.), straturile metalice sunt necesare pentru a asigura interconectarea dispozitivelor, pentru a forma electrozi de poartă sau pentru a micșora rezistența unor trasee din alte materiale, sau să formeze contacte ohmice, bariere Schottky.

Straturile metalice folosite în circuitele integrate, trebuie să îndeplinească următoarele cerințe:

- 1) să fie capabile să transporte curenți cât mai mari fără să-și modifice proprietățile fizice;
- 2) să poată fi depuse ușor la temperaturi joase, deoarece metalizarea este unul din ultimele procese ale fluxului de fabricare a circuitelor;
- 3) să poată fi ușor gravate cu rezoluție bună, fără ca aceasta să afecteze substratul;
- 4) să suporte fără defecte cicluri termice pe durata de viață a circuitului;
- 5) să poată fi ușor conectate la terminalele capsulei;
- 6) să aibă o mare aderență față de semiconductor și alte pelicule (de ex. SiO_2), utilizate în C.I.;
- 7) la folosirea stratului metalic în calitate de contact trebuie să aibă o C.V.A. liniară într-un domeniu mare de variație a curentului.

În prezent nici unul din materialele folosite nu corespund pe deplin cerințelor menționate. Astfel de metale cum sunt Au, Ag, Al posedă o rezistență superficială mică, însă aurul curat are o aderență mică cu Si și SiO_2 , de aceea înainte de vaporizarea stratului de aur se depune un strat subțire (40-100 nm) de Ni sau Cr, care posedă o aderență mai bună. Straturile de Ag sunt supuse procesului de electroliză a atomilor. În calitate de pelicule metalice în CI cu tranzistori bipolari (T.B.) și metal-oxid-semiconductor (M.O.S.), mai mare întrebuințare o are Al. Straturile de Al au următoarele priorități: preț de cost mic, pot fi depuse ușor și procesul de fotolitografie are o rezoluție înaltă, corodanții pentru Al (H_3PO_4 , NaOH ș. a.) practic nu interacționează cu Si și SiO_2 și formează contacte ohmice cu siliciul n+ și p-tip; sudarea cu ultrasunet asigură o cuplare trainică între firul de Al și substratul; Al e destul de elastic, de aceea suportă variațiile ciclice de temperatură.

Cu toate acestea straturile de Al posedă și unele neajunsuri. Printre acestea: cele mai importante sunt legate de conformitatea straturilor depuse de electromigrare, de rezistență mecanică și de coroziune.

La fabricarea circuitelor integrate pe scară mare pe baza tranzistorilor M.O.S. în calitate de poartă se folosește polisiliiciul. Pot fi folosite și alte materiale, însă faptul că ele sunt complicate la formarea geometriei tranzistorului limitează aplicația lor în astfel de circuite. Aceste materiale sunt: TiSi_2 , MoSi_2 , WSi_2 . Rezistența electrică a straturilor greu fuzibile e cu două ordine mai mică decât rezistența electrică a polisiliiciului ($\rho = 5 \cdot 10^{-5}$ Ohm-cm), însă e de câteva ori mai mare decât rezistența stratului de Al. Avantajul acestor compoziții constă în lipsa electromigrației și în posibilitatea corodării uscate în atmosfera de gaze, care conțin fluor (CF_4 , SF_6).

Este cunoscut faptul că rezistența unei pelicule conductoare de secțiune dreptunghiulară este:

$$R = \rho \cdot l / (h \cdot b), \quad (1)$$

unde ρ - rezistivitatea volumică a stratului (Ohm-cm);

l, b, h - lungimea, lățimea și grosimea respectivă a peliculei (cm).

Deoarece grosimea peliculei în limitele întregului circuit, elaborat pe suprafața unui substrat, are una și aceeași valoare, expresia (1) poate fi modificată:

$$R = \rho_s / b = \rho_s K_f, \quad (2)$$

unde ρ_s - rezistivitatea superficială cu grosimea dată și se exprimă în $\Omega/\square$ pe patrat (Ohm/ $\square$). $R = \rho_s$, dacă l = b (patratul în acest caz are dimensiuni convenționale). Raportul $K_f = l/b$ determină numărul de patrate cu latura b, înscrise pe lungimea l.

Trebuie de avut în vedere că mărimea ρ_s a materialului dat depinde substanțial de grosimea peliculei și structura ei. La grosimi mici $\leq 100-300$ Å, pelicula nu are o structură compactă, fiind formată din insulițe separate. Conductibilitatea în insulițele izolate se înfăptuiește datorită efectului tunel sau emisiei termoelectronice a purtătorilor de sarcină. Rezistivitatea volumică a acestor pelicule e considerabil mărită, datorită micșorării parcursului liber al electronilor, condiționat de dispersia electronilor la interfața insulițelor. La o grosime mare a peliculelor (>1000 Å) rezistivitatea ei nu se deosebește de proprietățile materialului analog la nivel microscopic.

În așa mod proprietățile electrofizice ale straturilor subțiri sunt determinate de compoziția și structura lor. Structura peliculei depinde de proprietățile metalului și regimului de vaporizare (temperatura și viteza de evaporare, presiunea vaporilor) și de regimul de condensare (presiunea gazelor reziduale, temperatura și materialul suportului, în aceeași măsură și de calitatea prelucrării suprafeței lui).

Condensarea peliculelor pe suprafața suportului include următoarele etape:

- 1) nucleația grăuncioarelor: pe suprafața suportului apar grăuncioare mici (0.5 nm) distribuite static;

- 2) creșterea grăuncioarelor: grăuncioarele cresc în diametru și formează insule, care des se transformă în cristalite;
- 3) unirea insulelor: interconexiunile insulare formează o mreajă, care conține canale goale;
- 4) umplerea canalelor.

Să examinăm influența vitezei de depunere a particulelor evaporate, a presiunii gazelor reziduale, a temperaturii și a materialului pentru substrat, asupra procesului de formare a peliculei și asupra rezistivității ei.

În condiții obișnuite de evaporare termică în vid temperatura substanței condensate (T_c), care este determinată prin temperatura de vaporizare a substanței, este cu mult mai mare decât temperatura substratului (T_s). În acest caz particulele, ajungând pe suprafața substratului, de obicei sunt captate de el și se deplasează pe suprafața lui ca un gaz bidimensional până când își pierde energia de prisoș și se condensează. Ca urmare a diferenței mari de temperatură $T_c \gg T_s$, chiar și grupările mici de particule într-un timp scurt transmit substratului energia de prisoș și se condensează. În rezultat pelicula are o structură formată din grăuncioare mici. Schimbarea vitezei de evaporare (condensare) influențează puțin la caracterul de cristalizare a peliculei și rezistivitatea ei.

O influență mai substanțială în acest caz o are presiunea gazelor reziduale în interiorul sistemului cu vid ce conține gaze active (O , O_2).

La evaporare cu o viteză mică și la o presiune înaltă a gazelor reziduale, particulele substanței vaporizate au o probabilitate mare de a reacționa cu atmosfera din interiorul camerei și pe suprafața substratului se depune o peliculă metalică ce conține oxizi, ceea ce duce la mărirea rezistivității peliculei. Vitezele mari de evaporare (condensare) micșorează probabilitatea de interacțiune și conductibilitatea peliculei se mărește.

Mărirea temperaturii substratului duce la formarea peliculei cu grăuncioare mari deoarece în cazul dat particula nimerind la suprafața substratului mai încet își transmite energia sa excesivă, are posibilitatea de a migra mai mult timp pe suprafața substratului, până ce își găsește o legătură mai puternică cu germenele format, ce duce la micșorarea rezistivității peliculei.

La evaporarea într-un sistem închis particulele care se evaporă și se condensează stabilesc un echilibru dinamic, căruia îi corespunde o presiune de echilibru a vaporilor (vapori saturați). Presiunea vaporilor saturați depinde de temperatura:

$$P = BT^{-1/2} \exp\left(\frac{-C}{T}\right), \quad (3)$$

unde B și C sunt constante, valoarea cărora variază pentru diferite materiale. Temperatura, la care presiunea vaporilor saturați deasupra vaporizatorului este egală $P = 1.33 \text{ Pa}$ ($10^{-2} \text{ mm col. Hg}$), se numește temperatură convențională de evaporare a substanței - T_v .

Viteza evaporării substanței V_{vap} se determină prin cantitatea de particule, care abandonează într-o unitate de timp de pe o unitate de suprafață a vaporizatorului. Din teoria cinetică a gazelor știm că viteza de vaporizare ($\text{g/cm}^2 \cdot \text{s}$) poate fi descrisă cu ajutorul formulei Langmuir:

$$V_{\text{vap}} \approx 5.83 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{\mu}{T_v}}, \quad (4)$$

unde μ - masa moleculară relativă a substanței; T_v - temperatura absolută de vaporizare.

Folosind datele din tabelul 1 putem calcula viteza de vaporizare.

Valorile temperaturilor de topire, vaporizare și a densităților unor materiale folosite des în microelectronică

Tabelul 1

Elementul	Masa moleculară, unități relative sau masa atomilor	Temperatura de topire, °C	Temperatura de vaporizare (la presiunea vaporilor 1.33 Pa), °C	Densitatea, g/cm^3
Al	27.0	660	966	2.70
W	183.85	3410	3309	19.3
Fe	55.85	1539	1447	7.87
Au	196.96	1063	1465	19.3
Cu	63.55	1083	1273	8.92
Mo	95.94	2622	2533	10.2
Ni	58.7	1455	1510	8.96
Pb	106.4	1552	1536	12.16
Pt	195.1	1769	2090	21.45
Ag	107.87	961	1047	10.5
Ta	180.95	2996	3070	16.6
Cr	52.0	1900	1205	7.19

Către vaporizatorii folosiți la depunerea peliculelor metalice sunt înaintate un șir de cerințe;

- materialul vaporizatorului trebuie să se umezească bine de materialul care se vaporizează pentru a asigura un contact termic sigur;
- materialul vaporizatorului nu trebuie să interacționeze chimic cu substanța care se vaporizează.

Vaporizatorii pot fi fabricați din sârmă sau panglică. În majoritatea cazurilor pentru acest scop se folosește W, Mo, Ta. După modul de încălzire vaporizatorii pot fi cu încălzire directă sau indirectă.

Pentru un vaporizator punctiform grosimea peliculei depuse poate fi calculată după formula:

$$h = \frac{m \cos \varphi}{4\pi\gamma r^2}, \quad (5)$$

unde m - masa substanței vaporizate; γ - densitatea substanței (de obicei este egală cu densitatea materialului masiv); φ - unghiul dintre direcția fluxului de vapori ai substanței evaporate și normală către substrat; r - distanța dintre vaporizator și substrat (fig. 1).

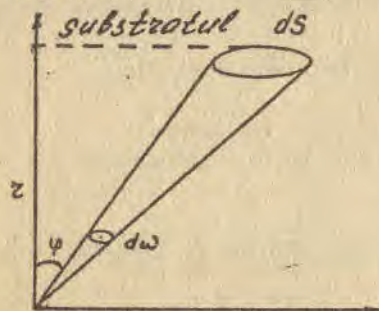


Fig. 1. Vaporizarea dintr-un vaporizator punctiform.

După cum se vede din formula (5) și fig. 1 vaporizarea dintr-un vaporizator punctiform aduce la neomogenități în grosimea peliculei pe lungimea substratului. Pentru îmbunătățirea omogenității grosimii peliculei în practică se folosesc fixatori de strat de formă sferică, care se rotesc în timpul procesului de vaporizare.

Un criteriu de bază, care determină calitatea metalizării este aderența. Prin aderență înțelegem forța de legătură a peliculei cu substratul (N/m^2). La adeziune în straturile peliculare metal-metal, metal-dielectric, metal-semiconductor influențează procesele interdifuziei componentelor în timpul prelucrării termice (sinterizării).

Insuficiența purității suprafeței substratului (prezența păturilor de grăsime) substanțial micșorează durabilitatea legăturii peliculei cu substratul. Temperatura

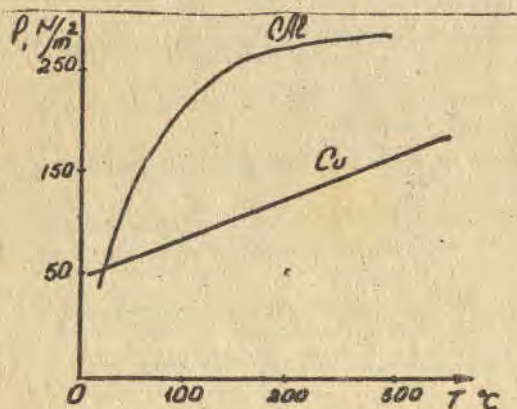


Fig. 2. Influența temperaturii substratului asupra adeziunii peliculelor metalice pe suprafața SiO_2 .

substratului exercită o influență mare asupra adeziunii multor metale. O dată cu creșterea temperaturii substratului din siliciu oxidat, aderența peliculei ca regulă crește (fig. 2).

În lucrarea de laborator obținerea peliculelor de aluminiu se face la instalația de evaporare termică în vid (BYII-4), volumul de lucru al căreia prezintă un clopot de sticlă, care permite vizualizarea procesului de evaporare (fig. 4).

La măsurarea grosimii peliculei depuse adesea se folosește interferometria cu multe raze. Această metodă dă rezultate satisfăcătoare la măsurarea grosimilor mai mari de 50 nm. Înainte de măsurare pe suprafața peliculei se face o zgârietură. Ajustând corect microscopul în câmpul de vedere în același timp trebuie să se observe suprafața cercetată și fișele de interferență, curbate în locurile unde se află zgârietura sau treptă; totodată fișele trebuie să fie orientate perpendicular direcției, așa cum e arătat în fig. 3.

Pentru determinarea grosimii peliculei h se măsoară cu ajutorul micrometrului ocular distanța x dintre două fâșii (de ex. de culoare roșie) și mărimea deplasării Δx a acestei fâșii la granița de separare peliculă-substrat. Mărimile x și Δx sunt măsurate în diviziuni relative. Grosimea peliculei se determină prin formula:

$$h = 0.27 \Delta x / x \text{ (nm)}. \quad (6)$$

Ordinea îndeplinirii lucrării

1. Calculați după formula (4) viteza de vaporizare a materialului dat de profesor.
2. Calculați după formula (5) grosimea așteptată a stratului depus, când cunoaștem cantitatea materialului inițial din vaporizator m .
3. Studiați descrierea și instrucțiunea de exploatare a instalației BYII-4 și a microscopului МИИ - 4.

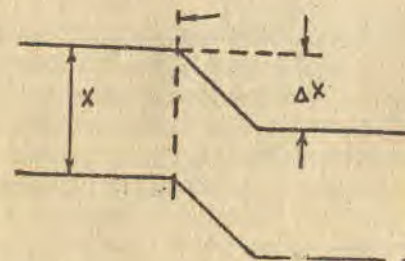


Fig. 3. Metoda de măsurare a grosimii peliculei.

4. Conectați alimentarea instalației și pompa vid preliminar apăsând butoanele "СЕТЬ" și "ФН" respectiv.

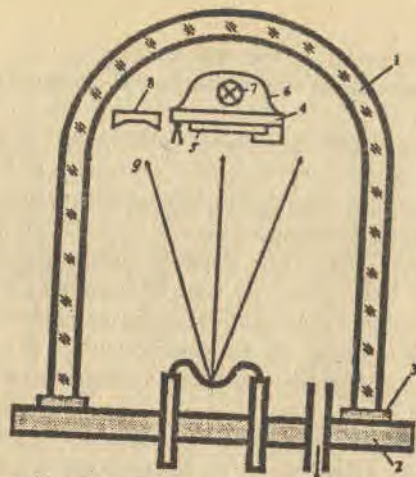


Fig. 4. Echipamentul tehnologic interior al instalației de depunere în vid:

1 - clopot de sticlă; 2 - plită de bază; 3 - garnitura de etanșare; 4 - fixator de substrat; 5 - substrat; 6 - ecran; 7 - tub halogenic pentru încălzirea substratului; 8 - traductor al grosimii peliculei depuse; 9 - termocuplu pentru măsurarea temperaturii substratului.

5. Deschideți robinetul de apă pentru răcirea pompei cu vid înalt. Închideți supapa de vid înalt (levierul din stânga cu indicator) și conectați pompa de difuzie apăsând pe butoanele "BB" și "DH". Timpul de ieșire a pompei de difuzie în regim de lucru este de 25-30 min.
6. Curățați substratul inițial cu ajutorul toluenului sau acetonei și fixați-l în fixatorul de substrat.
7. Cântăriți pe cântarul analitic cantitatea de substanță dată și plasați-o în vaporizator, neatingând mecanic vaporizatorul pentru a-l proteja de distrugerii.
8. Instalați termocuplul, controlați încălzirea substratului și măsurați distanța r dintre vaporizator și substrat.
9. Instalați clopotul și închideți supapa de umplere cu aer a clopotului (în stânga deasupra supapei de vid înalt), conectați butonul "IIB". În volumul de lucru al instalației se va obține vid preliminar. În timpul pomparei determinați dependența presiunii în volumul de lucru față de timp. Controlul presiunii reziduale efectuați-l cu ajutorul traductorului cu termocuplu (ПМТ-4М).
10. Peste 5-7 minute după atingerea vidului de 6.6 Pa ($5 \cdot 10^{-2}$ mm col Hg), apăsați butonul "BB", deschideți supapa de vid înalt și continuați determinarea dependenței $P(t)$. Măsurarea presiunii mai joase de 10^{-4} mm col Hg efectuați-o cu ajutorul traductorului ПМИ-2.
11. Apăsați butonul "Нагреватель, Охладитель" și cu mânerul autotransformatorului fixați tensiunea necesară pentru încălzirea substratului până la temperatura dată. Pentru determinarea temperaturii folosiți curba gradată a termocuplului și datele milivoltmetrului (la stânga instalației).

12. Când temperatura substratului ajunge la 150-200 °C și vidul în volumul de lucru (10^{-4} - 10^{-5} mm col Hg), apăsați butonul "Исн" și cu ajutorul mânerului autotransformatorului "Пер. напряжения" de la punctul de comandă din dreapta măriți continuu curentul de încălzire a vaporizatorului până la valoarea necesară. Determinați timpul vaporizării totale din vaporizator.
13. La terminarea procesului deconectați vaporizatorul (în ordine inversă), încălzitorul substratului și deconectați butonul "DH".
14. Determinați experimental viteza de condensare a peliculei și comparați-o cu valoarea ei teoretică.
15. Măsurați grosimea peliculei depuse cu microscopul МИИ-4 și distribuția grosimii peliculei pe lungimea substratului.
16. Măsurați rezistența superficială a peliculei prin metoda cu 4 sonde.
17. Cu ajutorul bandei adezive controlați calitativ adeziunea peliculei pe substrat, lipind banda pe peliculă și trăgând-o de pe suprafața ei.

Cerințe față de darea de seamă

Darea de seamă trebuie să conțină:

- 1) scopul lucrării;
- 2) scurte date teoretice;
- 3) rezultatele experimentale în formă de tabele și grafice

$$P=f(t), p_r=f(l), d=f(l),$$

unde l - lungimea substratului;

- 4) ecuațiile inițiale și rezultatele calculate ale vitezei de vaporizare (comparați cu valoarea experimentală) și a grosimii peliculei depuse (comparați cu valoarea experimentală);
- 5) rezultatul controlului adeziunii peliculei;
- 6) concluzii.

Întrebări de control

1. Numiți cerințele înaintate față de metalizarea C.I.
2. Ce materiale se folosesc pentru metalizarea C.I. Avantajele și dezavantajele Al.
3. Care este rezistivitatea specifică de suprafață a peliculelor.
4. Numiți etapele de formare a structurii peliculelor metalice și influența parametrilor procesului tehnologic asupra parametrilor peliculelor depuse.
5. Definiți metodele de măsurare a parametrilor peliculelor metalice.

Bibliografie

[3], pag. 323-343; [13], pag. 99-114; [14], cartea II, pag. 62-109.

Cercetarea procesului de finisare a configurațiilor geometrice la fabricarea circuitelor integrate prin metoda fotolitografiei

Scopul lucrării: studierea procesului formării configurațiilor circuitelor integrate prin metoda de profilare a stratului superficial pe placheta de Si, determinarea rezoluției fotorezistului și a procesului de litografie în total. De făcut cunoștință cu echipamentul tehnologic și materialele necesare pentru realizarea acestui proces.

Date teoretice

Litografie se numește procesul de transpunere (transfer) a configurațiilor geometrice, care sunt pe mască, pe suprafața plachetelor și reprezintă o succesiune de procese fizico-chimice. Procesul de litografie conține următoarele operații tehnologice, îndeplinite consecutiv (fig. 1).

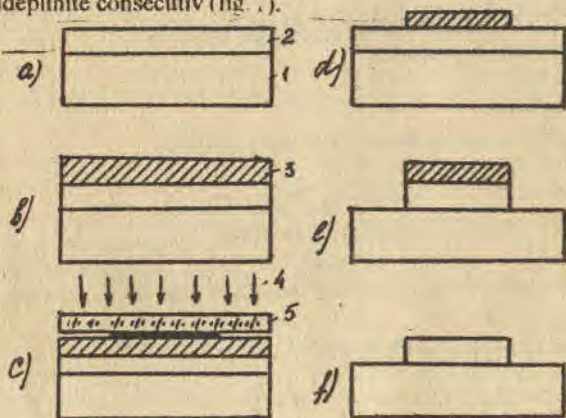


Fig. 1. Reprezentarea schematică a proceselor de transfer a configurațiilor prin litografie: a - placheta inițială (1) cu strat de oxid sau metal (2); b - stratul de fotorezist (3) depus și uscat; c - realizarea procesului de aliniere - expunere cu lumină ultravioletă (4) prin masca (5); d - dezvoltarea fotorezistului (este arătat procesul de dezvoltare la folosirea fotorezistului pozitiv); e - coacerea stratului de fotorezist și corodarea stratului superficial neapărat de fotorezist; f - înlăturarea stratului de fotorezist.

Cum se vede din fig. 1 scopul principal al fotorezistului este formarea sectoarelor locale pe suprafața stratului, care dă posibilitate de a coroda selectiv acest strat (sectoarele pe suprafața cărora a rămas fotorezist nu se corodează). Fotoreziștii se prepară din compuși organici și reprezintă un lichid cu o anumită viscozitate. Se

întrebuințează două tipuri de fotoreziști: pozitiv și negativ. La fotorezistul pozitiv sectoarele, care au fost expuse cu lumina ultravioletă, se dizolvă în dezvoltant datorită distrugerii legăturilor dintre moleculele polimerului în timpul expunerii. În fotoreziștii negativi sectoarele expuse nu se dizolvă în dezvoltant, fiindcă fotonii absorbiți duc la mărirea legăturilor dintre moleculele polimerului.

Toți fotoreziștii se caracterizează cu ajutorul următoarelor proprietăți: fotosensibilitatea - este capacitatea fotorezistului de a-și schimba proprietățile sub acțiunea fluxului de lumină. Fotosensibilitatea fotorezistului $S = 1/Et = 1/I$ (E - iluminarea energetică, W/cm^2 ; t - timpul iradierii, s ; I - expoziția $W/cm^2 \cdot s$). O mare parte din fotoreziști sunt fotosensibili la lumina ultravioletă, adică la lungimile de undă între 300 și 500 nm.

Rezoluția este o măsură a dimensiunilor minime ce pot fi transformate în mod reproductibil în rezist. Rezoluția reprezintă numărul maximal de linii, lățimea cărora este egală cu distanța dintre ele, care pot fi transferate în stratul de fotorezist, adică $R = 1000/2l$ lin/mm, unde l este lățimea liniei (intervalul dintre ele), μm .

Rezoluția rezistului (R_r) de obicei este mai mare decât rezoluția globală a procesului de litografie (R_l). Desigur rezoluția globală a procesului litografic este determinată de rezoluția sistemului de aliniere și a rezistului folosit.

O mare importanță la micșorarea R_l o are pătrunderea luminii sub zonele opace ale măștii prin difracție și pătrunderea dezvoltantului sub stratul de fotorezist.

Rezistența la corodare reprezintă proprietățile fotorezistului de a nu se dizolva în acizi și baze în timpul procesului de corodare selectivă a stratului respectiv. Rezistența la corodare depinde atât de proprietățile fotorezistului cât și de procesul de prelucrare (temperatura și timpul de uscare a stratului de fotorezist, temperatura și timpul de corodare a măștii din fotorezist). Corodantul folosit la formarea geometriei elementelor în stratul dat trebuie să fie selectiv, adică să nu dizolve fotorezistul, placheta sau alte straturi, care se află sub stratul dat.

Operațiile principale ale procesului de litografie sunt:

1. Pregătirea prealabilă a suprafeței plachetei înainte de etalarea stratului de fotorezist. Această operație are o mare influență asupra calității fotorezistului depus și adeziunea lui pe suprafața plachetei. Pentru acest scop se folosește degreasarea plachetei sau prelucrarea ei în plasmă. Degreasarea se îndeplinește prin fierberea plachetelor într-un solvent organic sau curățarea lor în vaporii acestui solvent. Rezultate mai bune se obțin prin prelucrarea în plasmă (purificare uscată).
2. Etalarea fotorezistului se execută automat la o instalație de etalare (spinner) prevăzută cu un suport rotativ pe care plachetele sunt transportate una câte una și fixate prin secțiune cu vid. După fixarea unei plachete se picură pe suprafața ei o cantitate (de exemplu circa 3 ml pentru o plachetă de 75 mm) de fotorezist și apoi suportul împreună cu placheta sunt rotite accelerat până la atingerea unei viteze de rotație 3000-5000 rotații/min., care este menținută câteva zeci de secunde. Grosimea

stratului de fotorezist rezultat în urma centrifugării este invers proporțională cu viscozitatea fotorezistului și aproximativ invers proporțională cu pătratul rotației plăchetei. Valorile tipice sunt cuprinse între $0.45 + 2.0 \mu\text{m}$. Uniformitatea stratului etalat depinde de gradul de planeitate al plăchetei, de relieful existent pe suprafață și de accelerația unghiulară a suportului. Operația de etalare este cea mai critică din punct de vedere al contaminării cu particule străine, deoarece în acest punct fotorezistul este vâscos (lipicios) și reține orice particulă din aer, care ajunge pe plăcheta etalată.

3. Uscarea stratului de fotorezist are scopul de a elimina solventul din fotorezist și a mări aderența la substrat. Acest tratament se execută uzual în cuptoare cu bandă transportoare, cu încălzire cu raze infraroșii ($\lambda \geq 3 \mu\text{m}$), la temperaturi între 80 și 100°C, timp de 10-15 min. Temperaturi de uscare prea mici pot duce la pierderea aderenței fotorezistului, iar temperaturi prea mari duc la pierderea fotosensibilității.

1. Alinierea și expunerea plăchetelor se realizează cu echipamente speciale (mașini de aliniere). Alinierea poate fi făcută manual (sub microscop), operatorul deplasând masca față de plăchetă cu ajutorul unor manipuloare extrem de fine, până când anumite semne de aliniere, existente pe toate măștile unui circuit, sunt corect poziționate sau automat cu ajutorul unor semne speciale iluminate cu o rază laser, a cărei reflexie este măsurată cu un fotodetector. După aliniere are loc expunerea cu lumină ultravioletă colimată produsă de o lampă cu vapori de mercur. Energia de expunere (produsul dintre intensitatea luminii incidente și timpul de expunere) depinde de grosimea stratului și de caracteristicile fotorezistului, de natura substratului, de caracteristicile developantului și condițiile de developare, de caracteristicile măștii și de configurațiile geometrice de pe mască.

5. Procesul de developare al fotorezistului constă în dizolvarea sectoarelor iluminate (pentru pozitiv) și neiluminate (pentru negativ). La developarea fotorezistilor negativi se întrebuintează același solvent organic (acetonă, toluen), care a fost folosit la fabricarea lui. Developarea fotorezistilor pozitivi se face în soluții slabe (0.5%, NaOH, KOH).

6. Operația imediat următoare developării este controlul. Plăchetele developate sunt inspectate vizual sub microscop în totalitate (control 100%), urmărindu-se controlul dimensional de aliniere și de defecte. Se determină rezoluția fotorezistului cu ajutorul elementelor de testare, care sunt pe suprafața fiecărei măști.

7. Plăchetele care trec de controlul post-developare sunt supuse unui nou tratament termic de post-coacere într-un cuptor identic celui utilizat pentru uscare. Temperatura tipică este în gama 120-180 °C, iar timpul de procesare 10-30 min. Scopul acestei operații este majorarea adeziunii stratului de fotorezist pe plăchetă și rezistenței la corodare. Temperaturi prea mari ale tratamentului conduc însă la dificultăți de înlăturare ulterioară a fotorezistului și la probleme de control dimensional datorită curgerii sau contracției polimerului (peste 180 °C).

8. Gravura (corodarea) stratului de la suprafața plăchetelor are loc numai în zonele neprotejate cu fotorezist într-un corodant la care plăcheta și fotorezistul trebuie să fie rezistente. La formarea geometriei elementelor în straturile de SiO_2 se utilizează

acidul fluorhidric. Corodarea are loc în corespundere cu reacția $\text{SiO}_2 + 4\text{HF} = \text{SiF}_4 + \text{H}_2\text{O}$. Eliminarea gazului SiF_4 poate aduce la dezlipirea stratului de fotorezist și pătrunderea corodantului sub strat, fapt ce mărește dimensiunile zonelor corodate. Pentru înlăturarea acestor bule de gaz în acidul fluorhidric se adaugă fluorid de amoniu (NH_4F) și ca rezultat în corodant se ivesc noi atomi de F, care duc la formarea compusului solid SiF_6 . Pentru fiecare strat supus prelucrării prin metoda fotolitografiei este ales un anumit corodant.

9. După ce fotorezistul și-a îndeplinit scopul (a transferat configurația măștii pe plăchetă), masca de fotorezist este îndepărtată prin imersie într-un agent de îndepărtare sau în plasma de oxigen. La îndepărtarea fotorezistului pozitiv se folosește dimetil formamid, dioxan și altele. Înlăturarea poate fi îndeplinită și cu ajutorul acizilor oxizi (acid azotic, acid sulfuric la fierbere sau acid sulfuric și apă oxigenată la 120 °C).

După un control final al plăchetelor, procesul de fotolitografie standard este terminat.

Ordinea îndeplinirii lucrării

1. Curățați în nișa de ventilație suprafața plăchetelor de Si pe care sunt depuse straturi de SiO_2 sau Al în solvenți organici (acetonă, toluen, izopropanol) și puneți plăcheta pe o hârtie de filtru.

2. Deplasați plăcheta curățată pe măsura rotundă a centrifugii, conectați pompa cu vid preliminar, conectați centrifuga și depuneți pe suprafața plăchetei câteva picături de fotorezist (ФП-383), după 30s. deconectați centrifuga apoi pompa cu vid și luați plăcheta.

3. Controlați vizual cu ajutorul microscopului МБС-9 calitatea stratului de fotorezist și caracterizați defectele observate.

4. Uscăți stratul de fotorezist în termostat ($T=90^\circ\text{C}$, $t=15$ min.) sau în instalația cu încălzire în infraroșu.

5. Îndepliniți operația de aliniere-expunere cu instalația ЭМ-576 А:

a) conectați instalația apăsând butonul "Вкл", care se află în partea de sus a blocului de alimentare și deschideți robinetul cu apă pentru răcirea lampei cu vapori de mercur ЛПИИ-350.

b) conectați în partea de jos a blocului de alimentare butonul "Гилья" și apăsați 3-5 s. butonul "Поджиг" (lampa ЛПИИ-350 va fi gata pentru lucru peste 10 min.);

c) fixați durata expunerii (după indicațiile profesorului);

d) conectați pompa cu vid prealabil și compresorul, instalați mânerul "Илльон" în poziție verticală, iar mânerul "Ламповодержатель" în poziție orizontală.

- e) deplasați placheta pe măsuta rotundă a instalației;
 - f) fixați masea în suport în așa fel ca desenul de pe ea să fie în contact cu placheta;
 - g) apăsați butonul "Цикл с калибровки", care se află la pupitrul de comandă. După îndeplinirea operațiilor automat se va aprinde indicatorul "Совмещение";
 - h) îndepliniți operația de aliniere a măștii pe suprafața plachetei cu ajutorul manipulatorilor pe osiile "X și Y" rotind măsuta în jurul osicii sale. După îndeplinirea acestei operații instalați mărul "Шаблонодержатель" în poziție verticală;
 - i) apăsați tasta de comandă "Контакт", masa va fi în contact cu placheta și se va aprinde indicatorul "Экспонирование". După terminarea automată a procesului de expunere îndreptați mânerul "Шаблонодержатель" în stânga în poziție orizontală. Deconectați pompa cu vid și compresorul, luați cu ajutorul pensetei placheta expusă;
6. Îndepliniți operația "developare". Cu acest scop deplasați placheta într-un vas cu soluție de 0.5% KOH, amestecând soluția prin mișcarea vasului până când se va vedea clar imaginea. Scoateți placheta din soluție cu penseta și deplasați-o pe rând în două vase cu apă deionizată. Apoi uscați placheta cu ajutorul centrifugii și deplasați-o pe o hârtie de filtru.
7. Cu ajutorul microscopului МИИ-4 măsurați grosimea stratului de fotorezist în diferite puncte pe suprafața plachetei.
8. Determinați cu ajutorul microscopului (NU-2E sau ММУ-3) rezoluția fotorezistului observând pe elementele de testare liniile clar developate.
9. Introduceți placheta în termostat ($T=120\text{ }^{\circ}\text{C}$) sau pe transportorul instalației de coacere a fotorezistului cu infraroșu. Timpul operației -10 -15 min.
10. Corodați zonele neprotejate cu fotorezist într-un corodant dat.
11. Înlăturați stratul de fotorezist prin fierberea plachetei în dimetilformamid și spălați-o în apă deionizată pe rând în două vase.
12. Determinați rezoluția globală a procesului fotolitografic (în corespundere cu punctul 8).
13. Determinați calitatea procesului de litografie prin compararea imaginii obținute cu cea care este pe mască.

Cerințe față de referat

Referatul trebuie să conțină:

- 1) scopul lucrării;
- 2) scurte date teoretice;
- 3) fișa tehnologică a operațiilor îndeplinite;
- 4) rezoluția stratului de fotorezist;
- 5) grosimea stratului de fotorezist în diferite puncte pe placheta rotundă;
- 6) rezoluția pe stratul de fotorezist;
- 7) rezoluția globală a procesului de fotolitografie;

- 8) calitatea îndeplinirii procesului de fotolitografie;
- 9) concluzii.

Întrebări de control

1. Ce numim fotorezist și câte tipuri de fotoreziști cunoaștem?
2. Care sunt etapele procesului de fotolitografie?
3. Prin ce parametri se caracterizează fotoreziștii?
4. Care este consecutivitatea îndeplinirii procesului de fotolitografie?
5. Ce factori exteriori influențează calitatea procesului?

Bibliografie

[3], pag. 348-367; [11], partea I, pag. 466-530; [14] partea I, pag. 354-373.

Tehnologia obținerii contactelor metal-semiconductor și proprietățile lor

Scopul lucrării: de făcut cunoștință cu metoda de obținere a contactelor metal-semiconductor și de studiat dependența caracteristicilor de calitate a prelucrării semiconductorului și de proprietățile materialelor contactate.

Date teoretice

În tehnologia dispozitivelor semiconductoare și circuitelor integrate pe larg sunt utilizate contactele metal-semiconductor (M.S.). Contactul M.S. poate îndeplini un rol pasiv, ca contact ohmic sau activ, când la frontiera de separare în anumite condiții de prelucrare se formează o barieră de potențial, numită de obicei bariera Schottky. Contactele M.S. sunt folosite pe larg la redresarea curentului și în calitate de elemente de bază în instalațiile de frecvență înaltă; totodată aceste contacte sunt folosite și pentru cercetarea parametrilor fizici fundamentali ai materialelor semiconductoare. Aceste contacte se folosesc ca porți în tranzistorii cu efect de câmp și în calitate de sursă și drenă în tranzistorii M.O.S. ca fotosensori și celule solare.

Potrivit modelului Schottky proprietățile barierelor pe baza contactului M.S. sunt determinate prin diferența dintre lucrul de ieșire a metalului φ_m și afinitatea electronică χ_s și lucrul de ieșire φ_s a semiconductorului. În fig.1 și 2 sunt arătate diagramele energetice așteptate pentru contactele M.S. tip - n și p. În particular, spre exemplu, în fig.1b înălțimea barierei care exclude trecerea electronilor din semiconductor tip n în metal este $(\varphi_m - \varphi_s)$, iar înălțimea barierei pentru fluxul invers de electroni din metal în semiconductor este egală cu $(\varphi_m - \chi_s)$. Dacă aplicăm contactului o tensiune directă de la o sursă exterioară V_a în așa fel, încît potențialul semiconductorului să fie negativ față de potențialul metalului, atunci bariera pentru curentul direct va fi $q(V_a - V_b)$. Însă înălțimea barierei pentru curentul invers $(\varphi_m - \chi_s)$ rămâne relativ independentă de tensiunea aplicată sau de nivelul de dopare a semiconductorului. De aceea înălțimea barierei pentru contactul M.S. în cazul dat vom numi mărimea $V_b = (\varphi_m - \chi_s)$.

Comparând fig.1b și d observăm că în cazul semiconductorului de tip - n contactul este redresor, dacă $\varphi_m > \varphi_s$, și ohmic, dacă $\varphi_m < \varphi_s$. Se presupune că pentru semiconductorul tip - p e justă afirmarea inversă (fig. 2). Însă datele experimentale pentru majoritatea semiconductorilor de tip-n nu confirmă acest simplu model, în care nu sunt luate în considerare stările la suprafața de separare. Dacă pe suprafața semiconductorului de tip-n sunt stări superficiale, atunci bariera energetică pentru ieșirea electronilor se va schimba: la curbarea benzilor în sus se va mări, la curbarea benzilor în jos - se va micșora.

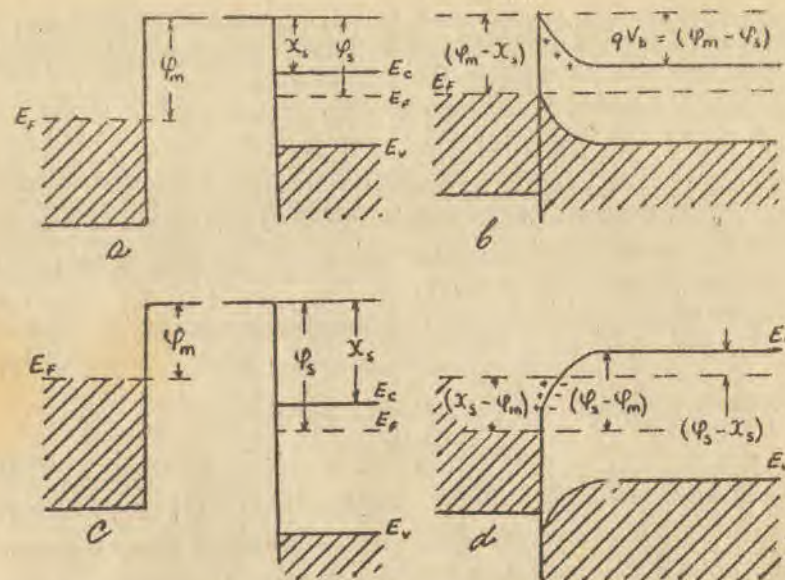


Fig. 1. Diagrama nivelurilor energetice ale contactelor metal - semiconductor - tip - n: a, b - pentru $\varphi_m > \varphi_s$; c, d - pentru $\varphi_m < \varphi_s$. Contactul b posedă proprietăți redresoare, iar contactul d - este ohmic.

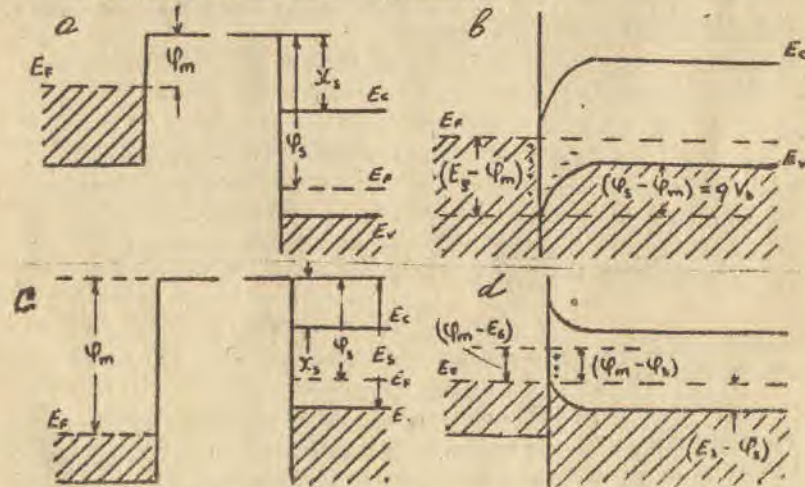


Fig. 2. Diagrama nivelurilor energetice ale contactelor metal - semiconductor - tip - p: a, b - pentru $\varphi_m > \varphi_s$; c, d - pentru $\varphi_m < \varphi_s$. Contactul b posedă proprietăți redresoare, iar contactul d - este ohmic.

Curbarea benzilor în sus invocă stări acceptoare, pe când stările donoare duc la curbarea benzilor în jos. În felul acesta prezența stărilor superficiale în semiconductor considerabil schimbă valoarea diferenței de potențial la contact.

Ecuația VA a barierei Schottky se descrie prin expresia:

$$j = AT^2 e^{-\frac{qV_D}{kT}} \left(e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1 \right) = j_0 \left(e^{\frac{qV_D}{kT}} - 1 \right), \quad (1)$$

unde j - densitatea curentului prin bariera Schottky, când ultima se află sub potențialul V_D ; $j_0 = AT^2 e^{-\frac{qV_D}{kT}}$ - curentul de saturație; k - constanta Boltzmann; A - constanta Richardson; T - temperatura absolută.

Înălțimea barierei de potențial poate fi determinată din expresia:

$$V_D = \frac{kT}{q} \ln(AT^2/j_0). \quad (2)$$

Constanta Richardson poate fi determinată din expresia:

$$A = \frac{4\pi q m_n^* k^2}{h^3}, \quad (3)$$

unde m_n^* - masa efectivă a electronilor, h - constanta Planck. Pentru electronii liberi $A = 120 A/(cm^2 K^2)$. În câmpurile cu $E = 10^4 - 10^5 V/cm$ valoarea A pentru Si de tip-n constituie $110 A/(cm^2 K^2)$, iar pentru Si de tip-p $A = 30 A/(cm^2 K^2)$.

Extrapolarea dependenței densității curentului de tensiune până la axa ordonatelor (cum e arătat în fig. 3) dă mărimea curentului de saturație j_0 . După formula (2) se poate calcula înălțimea barierei Schottky. Înălțimea barierei poate fi determinată din dependența $1/C_2 = f(U_D)$. Înălțimea barierei este egală cu valoarea U_D în punctul de întretăiere a dreptei cu abscisa.

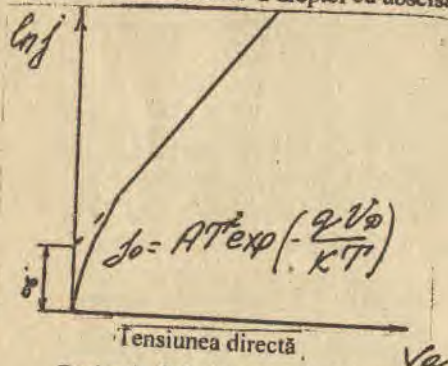


Fig. 3. C.V.A. a contactului M.S. (ramură directă) construită în scara semilogaritmică.

Barierile Schottky pot fi obținute pe baza semiconductorilor cu o rezistență mărită, unde lățimea stratului de sarcină spațială e destul de mare. Într-un material puternic dopat, lățimea stratului de sarcină spațială este foarte mică și purtătorii de sarcină îl străpung.

Toate aceste cauze duc la aceea că C.V.A. reală a barierei Schottky deosebește de cea calculată teoretic. De aceea C.V.A. a diodei Schottky de obicei se scrie sub forma:

$$j = j_0 \left(e^{\frac{qV_D}{mAT}} - 1 \right), \quad (4)$$

unde m - coeficient de neidealitate. De obicei $1.01 \leq m \leq 1.1$.

Dioda Schottky prezintă o structură simplă M.S., suprafața căreia e limitată de un strat de oxid depus deasupra semiconductorului de-a lungul periferiei contactului (fig. 4). Pentru crearea diodelor Schottky pot fi utilizate diferite metale Al, Au (cu substrat de Ti sau Pt), Mo, W, V, Pt. În tabelul 1 sunt date valorile înălțimii barierei de potențial pentru contactele dintre Si cu diferite metale, obținute prin anumite prelucrări tehnologice ale suprafeței semiconductorului.

Înălțimea barierei metal - Si

Tabelul 1

Semiconductorul	Prelucrarea suprafeței	Metalul	Înălțimea barierei
n Si	curățare chimică	Au	0.79
p Si	curățare chimică	Au	0.25
n Si	curățare chimică	Mo	0.56 - 0.59
n Si	curățare chimică	W	0.65 - 0.67
n Si	corodare uscată	Pt Si	0.85
p Si	corodare uscată	Pt Si	0.20

Metalele sunt depuse pe suprafața Si de obicei prin metoda vaporizării termice în vid. Vaporizarea metalelor greu fuzibile se realizează cu ajutorul pulverizării catodice sau cu fascicul de electroni. Suprafața contactului este determinată de dimensiunea ferestrei în SiO_2 , formată cu ajutorul fotolitografiei.

În ultimul timp s-au răspândit barierele Schottky pe baza silicidelor metalelor greu fuzibile așa ca Pt, Ta, Mo, Ti ș. a. Silicidele se formează datorită interacțiunii acestor metale cu Si și prezintă o soluție solidă metal-siliciu, componența de fază a căreia depinde de regimul prelucrării termice. O întrebuințare deosebit de largă au primit-o silicidele Pt și Ti.

Pentru obținerea silicidului Pt (PtSi) se realizează prelucrarea termică la o temperatură de $650-700^\circ C$. Deasupra Pt Si poate fi depus un strat de Al sau Au. Acest strat de metal practic nu influențează asupra potențialului de contact.

Un șir de parametri constructivi (grosimea stratului intermediar de oxid, starea suprafeței, concentrația impurităților în placheta inițială, suprafața contactului M.S. ș. a.) exercită o influență considerabilă asupra caracteristicilor electrofizice ale diodelor Schottky în primul rând asupra înălțimii barierei de contact, coeficientului de neidealitate, curentului de saturație și tensiunii de străpungere.

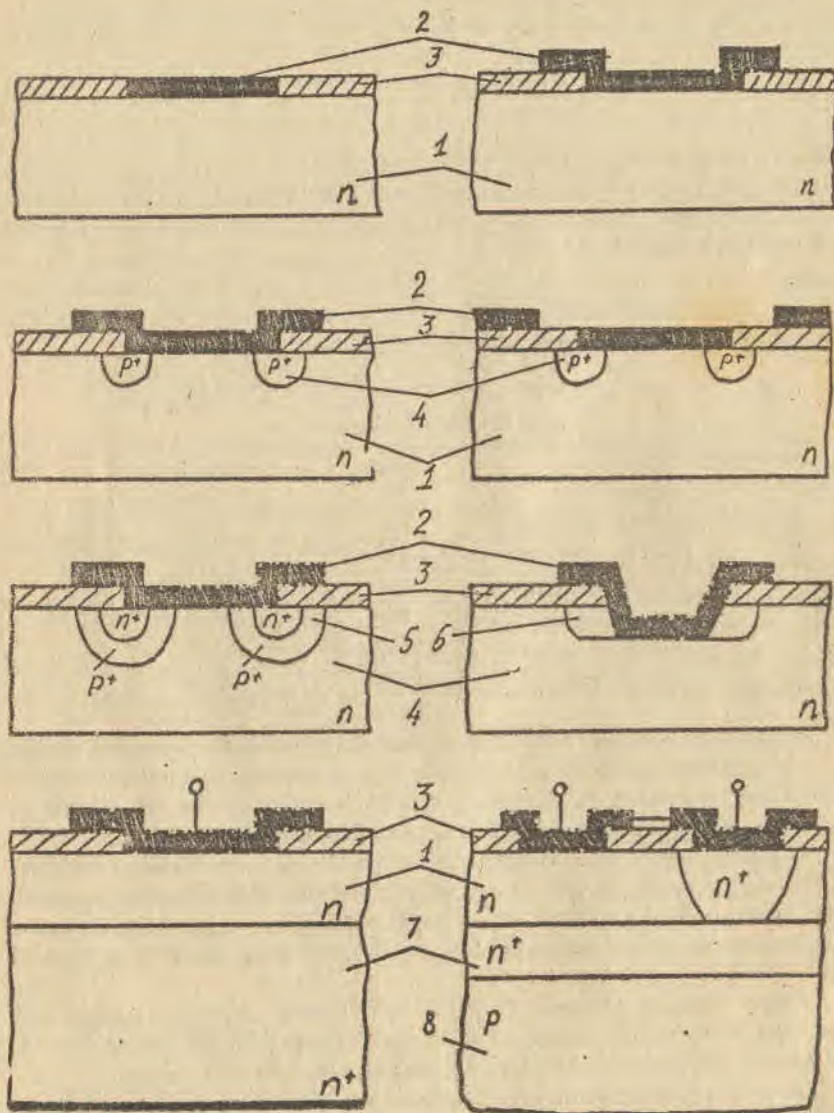


Fig. 4. Construcțiile diodelor Schottky:

1-placheta de Si sau substrat epitaxial tip-n; 2-metal; 3-oxidul protector;
4-inel de protecție tip-p; 5-inel de protecție dublu p⁺-n⁺; 6-fantă aeriană;
7-stratul îngropat - n⁺; 8-placheta tip-p.

De obicei la crearea diodelor Schottky pe baza siliciului de tip-n și Γ concentrația impurităților în plachetă trebuie să fie egală cu $5 \cdot 10^{15} \dots 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

Suprafața de contact nu influențează asupra mărimii barierei de potențial. Însă, dacă înălțimea barierei se determină după mărimea densității curentului, suprafața de contact se va lua în considerare neapărat. Creșterea suprafeței de contact de la 10 până la 10000 m² duce la schimbarea C.V.A. a barierei Schottky. Se micșorează valoarea curentului la tensiunea dată și panta ramurii directe ca consecință a schimbării rezistenței consecutive.

Pentru majoritatea diodelor Schottky componența principală a curentului o constituie curentul de scurgere spre periferiile contactului. Concomitent tensiunea de străpungere este foarte joasă. Pentru înlăturarea acestor neajunsuri sunt elaborate un șir de construcții ale diodelor Schottky, care folosesc o metalizare lărgită (fig. 4b), inele de protecție (fig. 4c,d,e) și electrozi suplimentari (fig. 4f). Inelele de protecție prezintă o regiune de tip-p cu difuzie adâncă în semiconductor de tip-n pentru ca tensiunea de străpungere a joncțiunii p-n să fie mai mare comparativ cu cea a diodei Schottky.

Prin contact ohmic se înțelege contactul care posedă o C.V.A. liniară și simetrică, adică contactul care nu posedă nici o barieră de potențial (asimetrie) și respectiv nu influențează asupra caracteristicii dispozitivului.

Contactele ohmice în C.I. trebuie să îndeplinească următoarele cerințe:

- 1) contactul trebuie să fie neredresor, adică rezistența lui nu trebuie să depindă de direcția de curgere a curentului;
- 2) contactul trebuie să fie liniar, adică rezistența nu trebuie să depindă de mărimea curentului;
- 3) rezistența contactului trebuie să fie minimă;
- 4) contactul trebuie să fie neinjector;
- 5) valorile coeficienților dilatării termice (C.D.T.) a materialelor contactate trebuie să fie aproape egale după valoare, iar conductibilitatea termică a contactului trebuie să fie mare;
- 6) materialele contactului trebuie să reprezinte un sistem metalurgic echilibrat, adică să nu interacționeze reciproc;
- 7) materialul conductorului trebuie să aibă o adeziune bună cu semiconductorul și dielectricul și nu trebuie să pătrundă adânc în semiconductor, deoarece în tranzistoarele moderne adâncimea joncțiunii p-n poate avea doar 0.2 - 0.5 μm ;
- 8) pentru materialul conductorului trebuie să existe un corodant care nu interacționează cu Si și SiO₂.

Contactele ohmice sunt elemente necesare pentru orice dispozitiv semiconductor, deoarece ele realizează legătura electrică a elementelor atât între ele, cât și cu terminalele exterioare.

Contactul ohmic se caracterizează prin valoarea rezistenței de contact R_c , care depinde de tipul metalului și rezistența semiconductorului. Pentru siliciu de tip-n este dedus raportul empiric:

$$\rho_s = \mu \rho_{s_0}, \quad (5)$$

unde $\mu = 3.3$ și $b = 1.3$ pentru multe metale.

La doparea suplimentară a semiconductorului când sub contact se crează un strat subțire dopat puternic cu rezistența superficială ρ_s , rezistența totală a contactului poate fi descrisă prin formula:

$$R = \frac{\rho_s}{ab} \left[a k \operatorname{cth}(ak) \right] = \frac{\rho_s a}{b} \left[\frac{\operatorname{cth}(ak)}{ak} \right], \quad (6)$$

unde a, b - lățimea și lungimea contactului respectiv

Cerințele față de proprietățile fizico-chimice ale contactelor pot fi satisfăcute relativ greu din cauza contradicțiilor: contactul trebuie să fie durabil, însă să nu pătrundă adânc în semiconductor, adeziunea bună cu oxidul contrazice cerinței interacțiunii slabe dintre materiale. Satisfacerea acestor cerințe folosind un singur metal e imposibilă. Însă Al e cel mai potrivit metal pentru acest scop.

O metodă dintre cele mai efective și des folosite la îmbunătățirea calității contactelor ohmice pe Si tip-n o constituie doparea suplimentară a regiunii sub contact. Contactul cu această regiune are o rezistență mică, iar injecția purtătorilor minoritari e limitată de concentrația înaltă a impurităților (purtătorilor majoritari). Pentru crearea contactului ohmic cu Si tip-n de obicei se întrebuintează difuzia P sau As. Pe lângă aceasta, doparea contactului sub colector se efectuează simultan cu procesul formării regiunii emitorului. Adâncimea regiunii impurificate de tip-n⁺ constituie circa (0.3...0.5 μm). Când avem adâncimea - n⁺ mai mică 0.1...0.2 μm, adâncimea pătrunderii reciproce a Al și Si în regiunea contactului e comparabilă cu adâncimea emitorului și la variații minime ale temperaturii sau ale timpului de coacere Al poate străbate joncțiunea emitoare, denaturând profilul impurităților în emitor și baza tranzistorului. Această pătrundere a Al duce la micșorarea densității curentului din emitor (aliajul Al și Si în acest caz nu este efectiv).

Pentru crearea contactelor nu prea adânci este necesar de folosit Ti sau Pt. Platina are o adeziune mică față de Si, însă la încălzirea ei până la 600-700°C se obține aliajul PtSi. Deasupra lui se depune Al sau Au. Mărimea rezistenței de contact în asemenea caz nu depinde de metalul depus ulterior și se determină numai de valoarea barierei de potențial la frontiera PtSi - Si.

Până la vaporizarea Pt este necesar de înlăturat de pe suprafața Si din ferestrele de contact rămășițele oxidului, fiindcă Pt spre deosebire de Al nu interacționează cu SiO₂ și nu-l regenerează. Pentru micșorarea rezistenței de contact se poate apela la o încălzire suplimentară într-o atmosferă de H₂ la temperatura 450°C în decurs de 15-20 min. Proprietăți analogice posedă silicidele de Pd și Ti. Titanul este un metal greu fuzibil, care interacționează foarte bine cu oxigenul, posedă o adeziune mărită cu Si, SiO₂ și straturi tipice sticlei. Titanul, depus pe SiO₂ la temperatura de 400-450°C, reacționează cu el regenerând oxidul:



Bioxidul de titan posedă o conductibilitate bună, de aceea rezistența contactului este mică. La aer Ti se oxidează repede, fapt care îngreunează contactarea

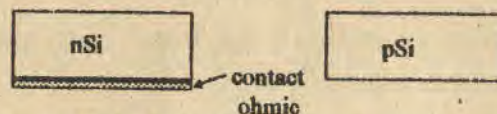
cu el a terminalului electric, de aceea deasupra Ti se depune un strat al unui alt metal Au, Ag, Ni. Titanul e foarte comod de utilizat în calitate de substrat la formarea contactelor răspândite pe suprafața SiO₂ (traseurile în C.I.), deoarece se formează o adeziune puternică între metal și SiO₂.

În afară de Ti mai putem folosi Nb, Ta, Cr, Mo. Cromul și molibdenul formează contacte rezistente la temperaturi înalte și se deosebesc prin pătrunderea slabă în Si. Pentru aceasta pe Si se vaporizează o peliculă de Cr cu grosimea aproape de 100 nm, apoi o altă peliculă de Au cu grosimea 300 nm. Structura este supusă prelucrării termice la temperatura 900°C, în rezultatul căreia are loc pătrunderea cromului în Si.

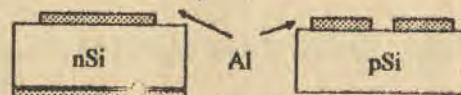
Rezultate bune putem obține la crearea contactelor ohmice cu ajutorul peliculelor de siliciu policristalin (polisiliciu). Pentru aceasta în regiunea de contact se formează insule de polisiliciu puternic dopate. Peliculele dopate de polisiliciu pot servi drept surse de difuzie ale impurităților și formează joncțiuni mărunte (0.1...0.3 μm) de tipul n⁺-n, iar însuși polisiliciul e terminal de la aceste contacte.

Ordinea îndeplinirii lucrării

1. Primiți de la profesor (inginer) două plachete de Si:
-tip-n (КЭФ-4.5) cu contactul ohmic depus inițial pe partea opusă;
-tip-p (КДБ-10).



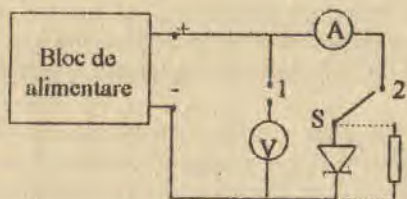
2. Purificați suprafețele plachetelor în solvenți organici (acetonă, toluen); spălați-le în apă distilată și uscată;
3. Depuneți prin vaporizare termică în vid la instalația ВУП-4, folosind măști speciale, o peliculă metalică din Al.



Pelicula metalică din Al formează cu nSi bariera Schottky, iar cu pSi - contact ohmic.

4. Desenați cu ajutorul caracteristicii ITHXT caracteristicile V-A ale structurilor obținute (fără a ține cont de o scară anumită).
5. Realizați tratamentul termic al contactelor la temperatura $T = 400^\circ\text{C}$, $t = 1-2$ min în corespondență cu pag. 8 din lucrarea de laborator nr. 3).
6. După tratamentul termic, desenați din nou caracteristicile V-A și comparați-le cu caracteristicile din pag. 4.

7. Efectuați măsurările caracteristicilor V-A (pe punte) a probelor cu diodă Schottky și a contactelor ohmice cu ajutorul instalației, schema principală a acesteia fiind desenată mai jos. Contactarea la probe se face cu ajutorul sondelor.



În poziția 1 a întrerupătorului S se măsoară căderea de tensiune pe probă; în poziția 2- intensitatea curentului. Măsurările se încep cu tensiunea pe sarcină 0.05V. Variați tensiunea cu 0.05V și măsurați curentul prin sarcină. Rezultatele vor fi introduse într-un tabel de forma de mai jos, separat pentru dioda Schottky și contactul ohmic.

U(V)	
I(A)	

8. Pentru dioda Schottky construiți caracteristica $\ln j[A/cm^2] = f(U)$; din caracteristică determinați I_0 (în corespundere cu fig. 3). Folosind formula (2) determinați înălțimea barierei de potențial.

9. Pentru contactul ohmic construiți caracteristica V-A pozitive și negative aplicate pe contact. Determinați rezistența contactului: $R = \frac{\Delta U}{\Delta I}$.

Cerințe față de referat

Referatul trebuie să conțină:

- 1) scopul lucrării;
- 2) scurte date din teorie;
- 3) ecuațiile inițiale și rezultatu' calculului înălțimii barierei de potențial a contactului Al-S' (tip-n);
- 4) rezultatele experimentale în formă de tabele și grafice C.V.A. a diodelor Schottky (de diferite construcții) și C.V.A. a contactelor ohmice;
- 5) materialele folosite și fișa tehnologică a operațiilor tehnologice;
- 6) concluzii.

Întrebări de control

1. Ce deosebire trebuie să fie între lucrul de ieșire al metalului și cel al semiconductorului pentru obținerea unui contact M.S. cu proprietăți redresoare și liniare?
2. Desenați diagramele energetice ale contactelor M.S.
3. Cum se determină înălțimea barierei Schottky după C.V.A. a diodei?
4. În ce constă avantajele silicidelor de metale în comparație cu Al la formarea barierei Schottky?
5. Cum influențează suprafața contactului asupra C.V.A. a diodelor Schottky?
6. Cum influențează concentrația impurităților în Si la caracteristicile barierei Schottky?
7. Prin ce se deosebesc caracteristicile diodelor Schottky de contactele ohmice?
8. Cum se poate determina rezistența contactului ohmic?
9. Cum poate fi produs un contact ohmic dintre Al și Si (tip-n)?
10. Cum pot fi produse contactele ohmice cu ajutorul silicidelor de metale și a siliciului policristalin? Care sunt avantajele?

Bibliografie

- [3], pag. 333-345;
[5], cartea 1, pag. 257-321; [10], pag. 189-230.

Studierea construcției și a topologiei circuitelor integrate monolite (C.I.M.)

Scopul lucrării: Studierea construcției componentelor și a topologiei C.I.M. (tranzistoare, diode, rezistoare, interconexiunile dintre ele, suprafețele de contact, întretăierile între traseele conductoare) și a tipurilor de capsule.

Date teoretice

C.I.M. numim acele circuite, care pot îndeplini anumite funcții de transformare și prelucrare a semnalelor și au o densitate mare a componentelor electronice interconectate între ele, care din punct de vedere al cerințelor față de încercare și exploatare sunt considerate unice. C.I.M. reprezintă un cristal de siliciu, în volumul și pe suprafața cărui sunt formate componente active (tranzistoare, diode) și pasive (rezistoare, condensatoare, interconexiuni) conectate electric între ele în corespundere cu schema principală. După tipul tranzistoarelor utilizate, aceste circuite pot fi împărțite în circuite integrate cu tranzistori bipolari și circuite integrate cu tranzistori M.O.S. (Metal-Oxid-Semiconductor). Ca regulă componentele circuitelor monolite bipolare pot fi izolate față de placheta din semiconductor și între ele, cu ajutorul p-n joncțiunilor conectate invers, dielectricilor și combinării lor. Mai des se folosește izolarea cu ajutorul p-n joncțiunii. În circuitele integrate M.O.S. sunt utilizați tranzistori cu efect de câmp cu poartă izolată. Tranzistorii M.O.S. pot avea canal indus sau inițial cu conductibilitatea p sau n. Dacă în circuit sunt folosiți simultan tranzistori M.O.S. cu canale n și p, atunci aceste circuite se numesc complementare (C.M.O.S.). Tranzistorii cu canal indus în circuite integrate pot să nu fie izolați de rezistența mari a canalului. Însă izolarea laterală cu dielectrici se utilizează pentru a micșora interacțiunile parazitare dintre tranzistori.

Izolarea cu ajutorul p-n joncțiunii se folosește și la circuitele C.M.O.S. pentru izolarea tranzistoarelor cu o conductibilitate a canalului față de tranzistorii cu conductibilitate inversă.

Cel mai compus component al C.I.M., din punct de vedere al tehnologiei de fabricare, este tranzistorul. De aceea fluxul tehnologic al operațiilor îndeplinite este făcut în așa mod pentru a fabrica tranzistori de calitate înaltă, iar celelalte componente sunt fabricate o dată cu fabricarea tranzistorului.

În fig. 1 este reprezentată schema principală a unui amplificator elementar și realizarea ei într-un C.I.M., la care izolarea componentelor se face prin joncțiune p-n. După cum se vede din fig. 1, dacă la placheta de tipul p se conectează un potențial negativ, atunci joncțiunea p-n (placheta-colectorul) este conectată invers. La conectarea inversă joncțiunea p-n are o mare rezistență care și izolează componentele circuitului. Din această figură observăm că condensatorul este fabricat pe baza p-n joncțiunii (baza-colector). Condensatorul poate fi format la fel cu joncțiunea n-p

(emitor-bază), care se deosebește de cel reprezentat în fig. 1 printr-o valoare mai mare a capacității specifice, însă dispune de o tensiune de lucru mai mică $\approx 7V$.

Configurațiile topologice ale condensatoarelor sunt reprezentate în fig. 2.

Cu scopul majorării capacității specifice a condensatorului uneori difuzia n^+ se face în așa mod ca regiunea n^+ să fie în contact cu regiunea n. Suma capacităților a doi condensatori conectați paralel, care au una și aceeași regiune p, este mai mare decât capacitatea fiecăreia.

Rezistoarele C.I.M. se caracterizează prin următorii parametri: valoarea nominală a rezistorului, puterea de disipație, precizia fabricării și coeficientul de temperatură. Rezistorul poate fi fabricat pe baza oricărei regiuni a tranzistorului. Având în vedere că regiunea emitorului are cea mai mare concentrație a impurităților, rezistorii fabricați în această regiune au o mică valoare a rezistenței specifice și a coeficientului de temperatură.

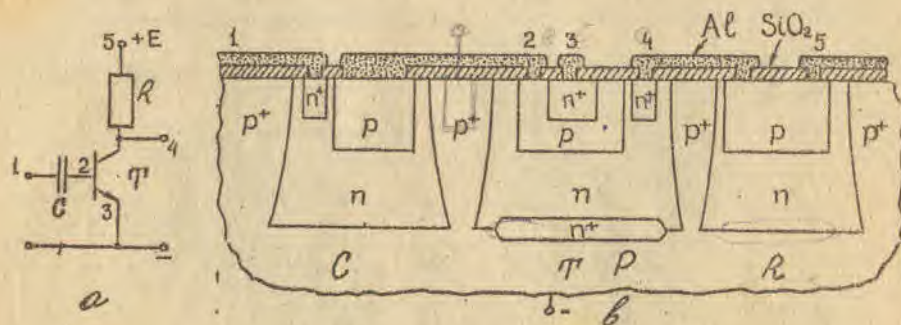


Fig. 1. Schema principală (a) și C.I.M. în secțiune (b), componentele cărora sunt izolate una de alta și de plachetă prin joncțiunea p-n conectată invers.

Dacă este necesar de obținut rezistori cu valori nominale mari, care vor ocupa o mică suprafață, se poate folosi regiunea colectorului, însă această regiune având o mică concentrație a impurităților se deosebește printr-o mare valoare a coeficientului de temperatură. De aceea pentru fabricarea rezistoarelor difuzate mai des se utilizează regiunea bazei tranzistorului, care în mediu satisface cerințele de mai sus. Configurațiile rezistoarelor C.I.M. sunt prezentate în fig. 3.

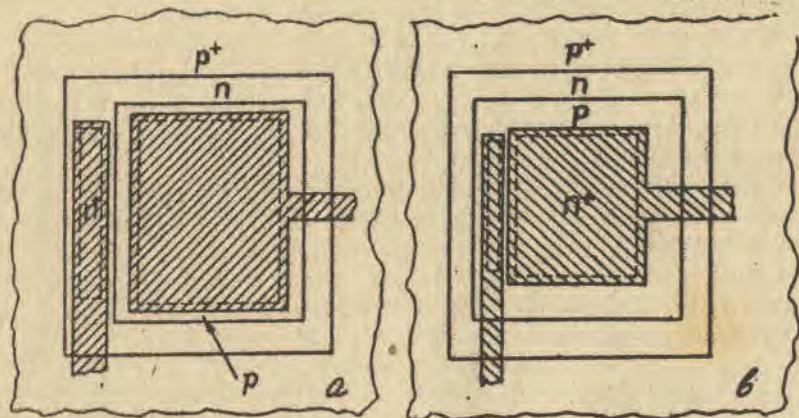


Fig. 2. Topologia condensatoarelor C.I.M.: a) Cb-s; b) Ce-b; linia punctată arată fereastra de contact a condensatoarelor.

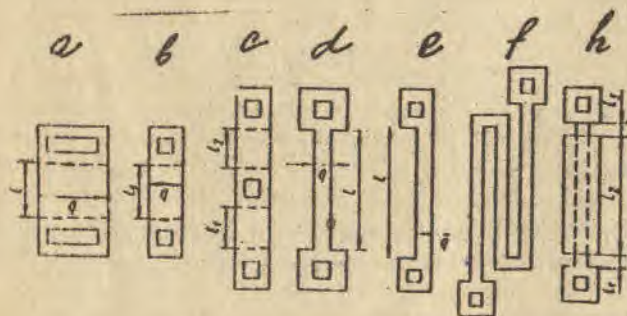


Fig. 3. Configurațiile rezistoarelor difuzate în C.I.M.

Rezistoarele de valori mici nominale (zeci de Ohmi) au și un mic raport l/b (fig. 3a). Rezistoarele cu rezistență între sute de Ohmi și unități de kOhmi au forma prezentată în fig. 3b,c. Topologia prezentată în fig. 3d,e se folosește la fabricarea rezistoarelor cu o valoare mare (până la 20 kOhm). Însă mai mare rezistență (până la 60 kOhm) o are forma de tip "meandru" (fig. 3f) sau rezistorul "ciupit" (fig. 3h). Valoarea maximă a rezistoarelor ciupite poate fi între 200 și 300 kOhm, când au o configurație dreptunghiulară $\rho_s = 2,5 \text{ kOhm}/\square$.

Toate tipurile de rezistoare ciupite au toleranțe largi - de la 50% până la 100%. Variațiile de temperatură și tensiunea de polarizare sunt mari.

Cea mai utilizată topologie a tranzistoarelor este arătată în fig. 4. Pentru construcția asimetrică curentul colectorului trece spre emitor numai într-o direcție (fig. 4a).

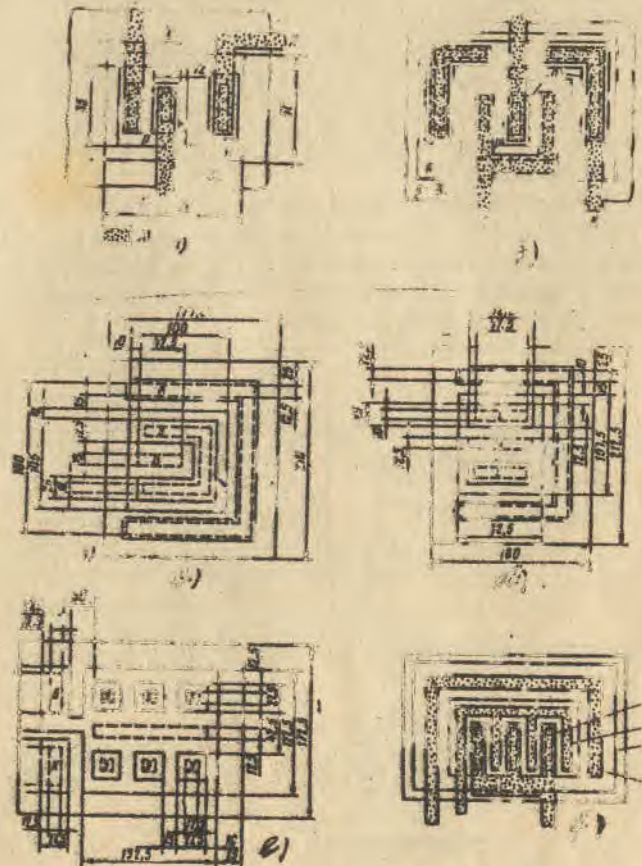


Fig. 4. Topologia tranzistorilor bipolari: a - asimetrică; b - simetrică; c - cu suprafață mărită a regiunii de conectare către colector; d, e - tranzistoare multiemitor; f - construcția tranzistorului de putere înaltă.

La construcția simetrică (fig. 4b) curentul colectorului trece spre emitor din trei părți și rezistența colectorului este de trei ori mai mică decât la construcția asimetrică. Dacă este necesar de a micșora esențial rezistența colectorului, atunci se folosesc

tranzistoare cu suprafață mărită a regiunii de contact la colector (fig. 4c,d,f). Tranzistoarele multiemitor (fig. 4d,f) se utilizează la intrarea circuitelor T.T.L. Topologia tranzistorului cu putere mare ($25 < p < 250$ mW) (fig. 4f) este elaborată în așa fel ca raportul perimetrului emitorului față de suprafața lui să fie cât mai mare. Aceasta mărește esențial regiunea activă a tranzistorului și mărește curentul de lucru ($200-300$ A/cm²) fără majorarea suprafeței întregii structuri. Contactele emitorului și ale bazei sunt alături. Astfel de tranzistori sunt utilizați la ieșirea circuitelor când sunt necesare puteri mari.

Suprafețele de contact ale C.I.M. cu terminalele capsulei, ca și alte componente integrate, sunt izolate de plachetă cu ajutorul difuziei de izolare de tipul - p⁺ (fig. 5a,b). Aceasta este necesar pentru a înlătura scurtcircuitul dintre suprafața de contact și plachetă în cazul dacă oxidul se distruge în timpul conectării cu ajutorul termocompresiei sau ultrasunetului.

Dacă în C.I.M. sunt conductori care se întretaie, atunci unul din ei poate trece pe suprafața rezistorului. Însă, dacă nu există posibilitatea de a proceda în așa mod, se folosește o punte de conexiune difuzionică (fig. 6). În acest caz unul dintre conductori se află pe suprafața oxidului, iar altul trece pe sub dânsul prin stratul n⁺, care este format simultan cu fabricarea emitorului.

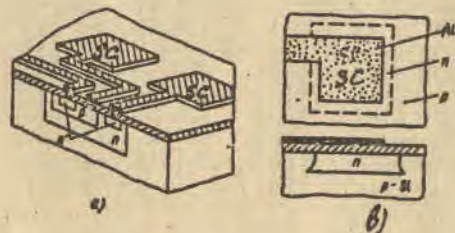


Fig. 5. Construcția suprafeței de contact: a - topologia; b - vedere în secțiune.

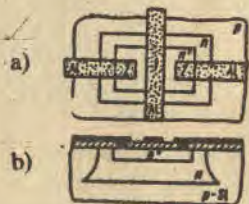


Fig. 6. Construcția punții de conexiune: a - topologie; b - vedere în secțiune.

Ordinea îndeplinirii lucrării

1. Primiți de la profesor (inginer) un C.I.M.
2. Studiați tipul capsulei, metoda de montare a cipului în capsulă și conectarea suprafețelor de contact cu terminalele capsulei.
3. Studiați cu ajutorul microscopului NU-2E sau MMY-3 topologia C.I.M. sau a unei secțiuni (în corespundere cu cerințele profesorului).
4. Desenați topologia C.I.M. Pe desen trebuie să se observe toate liniile, care caracterizează construcția componentelor (regiunea izolată, regiunile n,p,n⁺, ferestrele de contact, interconexiunile metalice).
5. În corespundere cu desenul topologic desenați schema principală a C.I.M. sau a unei secțiuni.

Conținutul referatului

Referatul trebuie să conțină:

- 1) scopul lucrării;
- 2) scurte date teoretice;
- 3) particularitățile construcției capsulei;
- 4) desenul topologic al C.I.M.;
- 5) schema principală a circuitului în corespundere cu topologia;
- 6) concluzii.

Întrebări de control

1. Numiți particularitățile construcției tranzistoarelor, rezistoarelor, condensatoarelor și suprafețelor de contact în C.I.M. cu tranzistori bipolari.
2. Cum se îndeplinește puntea de conexiune în C.I.M.?
3. Care sunt metodele de izolare ale componentelor C.I.M.?
4. Care sunt tipurile capsulelor C.I.M. și metodele de conectare a suprafețelor de contact C.I.M. cu bornele capsulei?

Bibliografie

- [3], pag. 175-224;
[6], pag. 32-48;
[7], pag. 11-89.

Bibliografie

1. Antonescu S., Ionașcu G., Pârcălaboiu A. "Tehnologia structurilor micromecanice". - București, Editura Tehnică, 1995.
2. "Materiale pentru electronică". Sub red. Prof. Dr. Ing. M. Cătuneanu - București, Editura didactică și pedagogică, 1982.
3. Radu M. Bârsan. "Fizica și tehnologia circuitelor M.O.S. integrate pe scară mare". - București, Editura Academiei Republicii România, 1989.
4. Андреев В. М., Долгинов Л.М., Третьяков Д.Н. "Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов". Под ред. Академика Ж.И. Алферова. - М.; Советское радио, 1974.
5. Зи С. "Физика полупроводниковых приборов. - М.; Мир, Т.1, 1984.
6. Коледов Л.А. "Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок". - М.; Радио и связь, 1989.
7. "Конструкция и технология микросхем". Под ред. Л.А. Коледова. - М.; Высшая школа, 1984.
8. Курносоев А.И., Юдин В.В. "Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем - М.; Высшая школа, 1986.
9. "Материалы для оптоэлектроники". Под ред. Е.И. Гиваризова, С.И. Горина. - М.; Мир, 1976.
10. Милнс А., Фойхтн Д. "Гетеропереходы и переходы метал - полупроводник". - М.; Мир, 1985.
11. Моро У. "Микролитография. Принципы, методы, материалы". В двух частях. - М.; Мир, 1990.
12. Пичутин И.Г., Таиров Ю.М. "Технология полупроводниковых приборов". - М.; Высшая школа, 1984.
13. Розанов А.Н. "Вакуумная техника". - М.; Высшая школа, 1990.
14. "Технология СБИС" В двух книгах. Под ред. Зи С. - М.; Мир, 1986.

15. Трофим В.Г., Чумак В.А. "Оптоэлектронные фотопреобразователи излучения на основе гетеропереходов $Al_xGa_{1-x}As-GaAs$ ". Штиинца; Кишинев, 1987.
16. Черняев В.Н. "Технология производства интегральных микросхем". - М.; Радио и связь, 1987.
17. Черняев В.Н., Кожитов Л.В. "Технология эпитаксиальных слоев арсенида галлия и приборы на их основе".
18. Чистяков Ю., Райнова Ю.П. "Физика. Химические основы технологии микроэлектроники. - М.; Металлургия, 1979.