

- Cap.1. Metoda formărilor joncțiunilor pn
 Cap.2. Procesul de fotolitografie
 Cap.3. Metode de confecționare a circuitelor integrate cu tranzistoare bipolare. Metode de izolare a elementelor
 Cap.4. Construcțiile și calculul elementelor în circuitul cu tranzistor (CI)
 Cap.5. Tehnologia circuitelor integrate hibride (CIH)
 Cap.6. Tehnologia circuitelor VLSI

Cap.1. Metoda formărilor joncțiunilor pn

Metode: - prin difuzie;
 - prin implantare ionică.

Teoria difuziei

Definiție: difuzia reprezintă pătrunderea atomilor unei substanțe în alta substanță datorită mișcării haotico-termice.

În principiu difuzia are loc în toate cele patru stări ale materiei: în solide, lichide, gaze, plasmă.

Procesele difuziei în corpuri solide

Priorități ale difuziei față de alte metode:

- putem obține joncțiuni pn cu suprafața de la un μm^2 până la zeci de cm^2 ;
- joncțiunile pn obținute prin difuzie se caracterizează printr-o înaltă reproductibilitate a parametrilor datorită faptului că putem controla și regla ușor adâncimea joncțiunilor pn precum și concentrația impurităților;
- procesul de difuzie se caracterizează printr-o înaltă productivitate a muncii.

Difuzia poate avea mai multe mecanisme:

I mecanism: atomii de P (fosfor) pot pătrunde între nodurile rețelei cristaline;

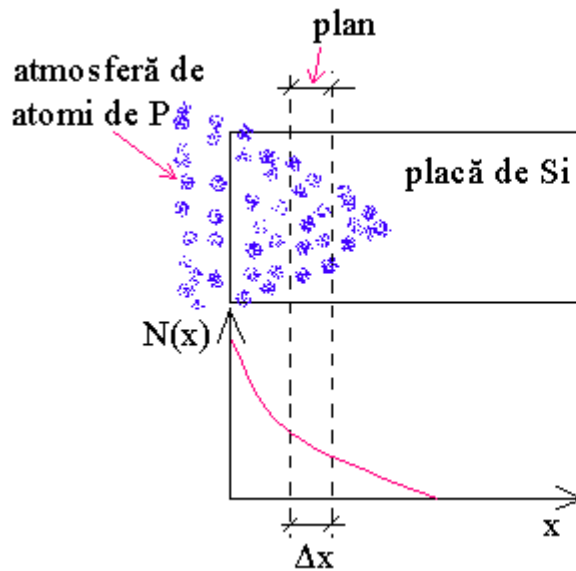
al-II-lea mecanism: difuzia prin locul vacant (loc liber);

al-III-lea mecanism: atomii de impuritate (P) au o energie foarte mare și pot smulge atomii de Si din rețeaua cristalină pe care îi trimite între nodurile rețelei, iar atomii de P ocupă locul atomilor de Si.

Legile difuziei (pt. gaze) formulate de Fick în 1889

Aceste legi descriu procesul difuziei foarte bine și în solide.

De exemplu avem un corp solid (placă de Si):



când încălzim, acești atomi de P pătrund în cristal și concentrația lor este din ce în ce mai mică spre mijlocul plăcii.

unde $N(x)$ reprezintă concentrația impurităților care au intrat (difuzat) în cristal.

I - legea a lui Fick: $\mathbf{F} = -D \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial \mathbf{x}}$ (1) unde F – fluxul (nr. de atomi care pătrund

printr-o unitate de suprafață într-o unitate de timp); $[F]_{SI} = \frac{\text{atomi}}{m^2 \cdot s}$; $\frac{dN}{dx}$ = gradientul

concentrației impurității; $D = \text{ct.} = \text{coeficient de difuzie}$.

Coeficientul de difuzie $D = F$ dacă $\frac{dN}{dx} = 1$.

A II-a lege a lui Fick: $\frac{\partial \mathbf{N}}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \mathbf{N}}{\partial \mathbf{x}^2}$ (2) unde $\frac{\partial N}{\partial t}$ = viteza schimbării

concentrației.

Procesul difuziei pe trei coordonate (trei direcții):

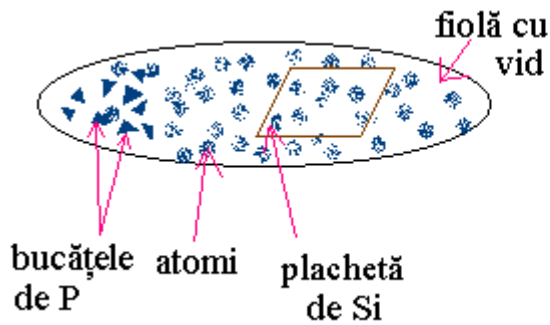
$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \cdot \Delta N \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial z^2} \right)$$

Ecuția poate fi rezolvată numai în cazuri speciale care se întâlnesc și în practică:

- 1) difuzia dintr-o sursă semiinfinită;
- 2) difuzia dintr-o sursă limitată;

Difuzia dintr-o sursă semiinfinită

Fie o plăcuță de Si și o mulțime de atomi de P în vecinătatea ei. În interiorul unei fiole de cuarț (cu vid) se pun bucățele de P și se introduce și plăcuța de Si. Această fiolă este introdusă apoi într-un cuptor la temperatura de 1200°C. Crescând temperatura, în volumul fiolei de cuarț se formează o anumită concentrație de P care este egală cu concentrația vaporilor saturați la temperatura dată.



Dacă o parte din atomii de P au intrat în Si, concentrația se micșorează, dar apoi crește din nou pt. că se vaporizează iar alți atomi din sursă.

P se vaporizează direct din faza S (prin sublimare). O parte din atomii de P vaporizați intră în Si și rezultă $N_{gaz} = ct.$ pt. $0 < t < \infty$, unde t – timpul.

$N_0 = ct.$ = concentrația atomilor la suprafața plachetei, care este constantă pt. $0 < t < \infty$ deoarece atomii pătrund tot mai adânc în placuță.

$N(x,t)$ = concentrația impurităților la o anumită adâncime x după timpul t
 $\Rightarrow N(x,t) = 0$ pt. $x \rightarrow \infty$.

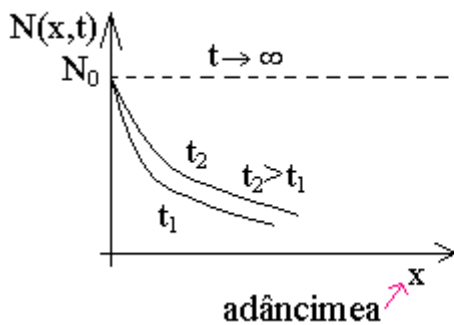
Din toate acestea rezultă că legea a-II-a a lui Fick poate fi soluționată dacă

introducem o variabilă $\lambda = \frac{x}{\sqrt{t}} \Rightarrow N(x,t) = N_0 \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}} e^{-\lambda^2} dx \right)$, unde

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}} e^{-\lambda^2} dx = erf \cdot x, \text{ și se știe că } 1 - erf \cdot x = erfc \cdot x$$

$$\Rightarrow N(x,t) = N_0 \cdot erfc \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}}, \text{ funcția } erfc \in [0,1].$$

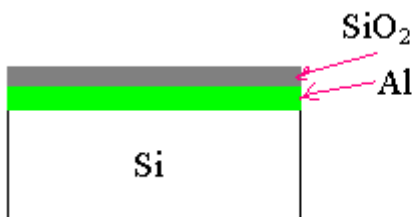
Reprezentarea soluției legii a-II-a a lui Fick pt. condițiile scrise mai sus:



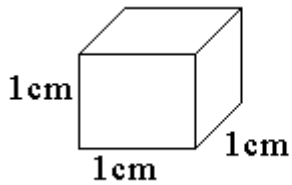
cu cât este mai mare timpul cu atât impuritatea pătrunde mai adânc, iar dacă $t = \infty$ impuritatea pătrunde omogen în întreaga plăcuță

Difuzia dintr-o sursă limitată

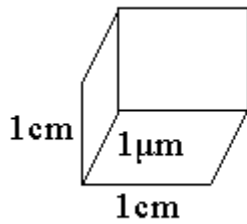
Fie o peliculă de Al de $1\mu m$ la suprafața plachetei de Si. Pt. ca vaporii de Al să nu se evapore ci să intre în material se adaugă o peliculă de SiO_2 .



$T_{topAl} = 660^\circ C$
 $T_{difuzie} > 1000^\circ C$



Obs! În 1cm^3 de material avem $5 \cdot 10^{22}$ atomi. Se calculează ce concentrație de atomi de Al există în acest μm de peliculă:



$1\mu\text{m} = 10^{-4}\text{cm} \Rightarrow 5 \cdot 10^{18}$ atomi de Al pe $1\text{cm}/1\text{cm}/1\mu\text{m}$ (grosimea, înălțimea)

$\Rightarrow Q \cong 5 \cdot 10^{18} \text{at/cm}^2$ (cm^2 – deoarece se consideră grosimea foarte mică și se neglijează) = concentrația inițială a atomilor care se află pe suprafața semiconductoră.

Această cantitate de atomi de Al nu se poate vaporiza ci doar intră în interiorul cristalului. Dacă o parte din acești atomi intră în placheta de Si, cantitatea lor scade (concentrația lor) deoarece nu mai vin alți atomi pt. a compensa \Rightarrow pt. a soluționa legea a-II-a a lui Fick trebuie avute în considerație următoarele condiții de limită:

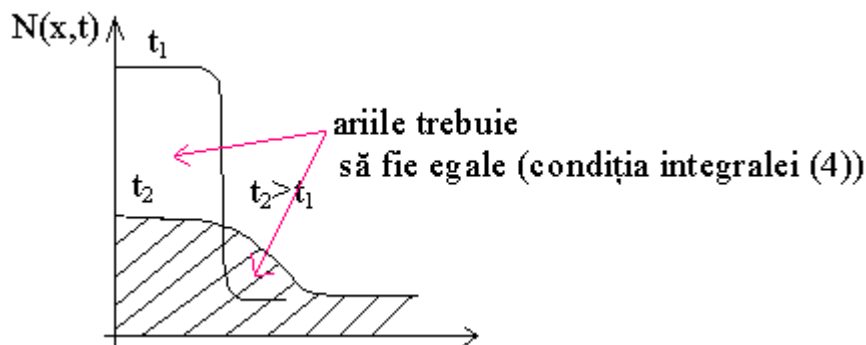
- 1) $N(x,t) = 0$, dacă $t=0$ și $x > 0$;
- 2) $N(x,t) = 0$, dacă $t > 0$ și $x \rightarrow \infty$;
- 3) $\frac{\partial N}{\partial x} = 0$, pt. $x=0$ și $0 < t < \infty$, (gradientul concentrației impurității lipsește la suprafața plachetei);

$$4) \int_0^x N(x,t) dx = Q, \text{ pt. } 0 < x < \infty \text{ și } 0 < t < \infty - \text{legea conservării materiei.}$$

Având în vedere cele patru condiții, legea a-II-a a lui Fick are următoarea soluție:

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

Reprezentarea (concentrației impurităților) soluției legii a-II-a a lui Fick pt. aceste condiții:

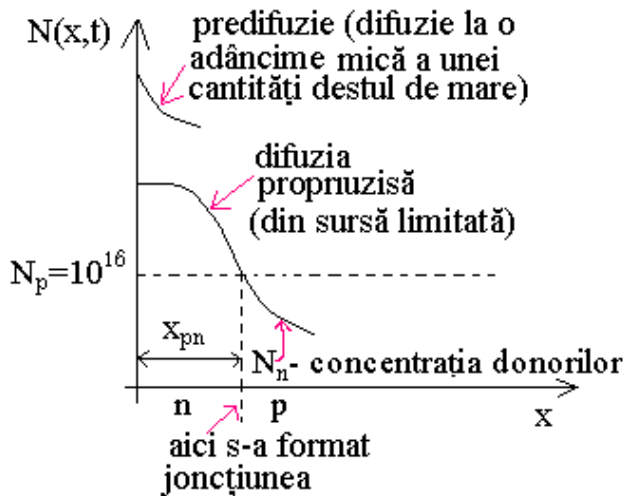


Pe măsură ce are loc difuzia concentrația impurităților la suprafață scade și pe măsură ce timpul crește impuritățile pătrund mai adânc în suprafață.

În practică aceste metode de difuzie se folosesc împreună. De exemplu când facem fotoreceptori pe baza joncțiunilor pn, dacă concentrația pe suprafață este mare are loc absorbția la suprafață mare.

Difuzia are loc în două etape:

- la început se face difuzie la o adâncime foarte mică;



fie o plăcuță de tip p (Si) (dopată cu goluri cu o concentrație $N_p = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) și în interiorul plăcuței vrem să facem o joncțiune pn ce va fi utilizată ca fotoreceptor, de exemplu. Fac difuzie de tip n (cu P) și rezultă un electron liber în cristal la fiecare atom de P, la o adâncime foarte mică. Sursa de impurități se dă la o parte și difuzia are loc din stratul foarte încărcat prin predifuzie \Rightarrow difuzie din sursă limitată.

unde: $N_n = N_p$ s-a format joncțiunea pn și x_{pn} este adâncimea joncțiunii pn.

Această difuzie se folosește pt. formarea bazei tranzistorului bipolar, a joncțiunii colector-bază, a joncțiunii emitor-bază (care are loc într-o singură etapă (din sursă semiinfinită) deoarece se dorește E foarte dopat).

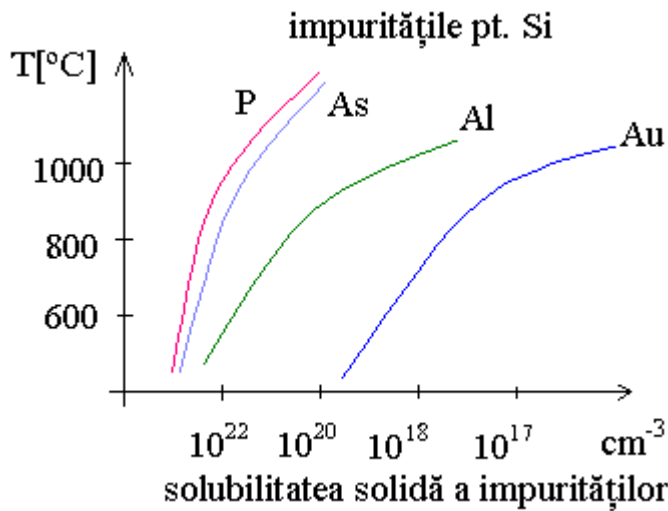
Influența diferiților factori la distribuirea impurităților în procesul difuziei

La distribuția impurităților influențează următorii factori:

- 1) solubilitatea solidă a impurității;
- 2) timpul;
- 3) temperatura procesului;
- 4) desăvârșirea rețelei cristaline.

1) Se numește solubilitate solidă concentrația maximă a impurității care poate intra în cristal fără a se forma faze noi pe suprafața lui.

Obs! Într-un cristal de Si se găsesc atomi a cărei concentrație este $N_{Si} = 5 \cdot 10^{22} \text{ at/cm}^3$. Dacă vom introduce atomi de impuritate care au o concentrație de $5 \cdot 10^{20} \text{ at/cm}^3$ (atomi de P, de ex.) \Rightarrow la 100 atomi de Si de bază îi revine un singur atom de impuritate (1%). Dacă introducem $N_{imp} = 5 \cdot 10^{21} \text{ at/cm}^3 \Rightarrow 10\%$ impurități.

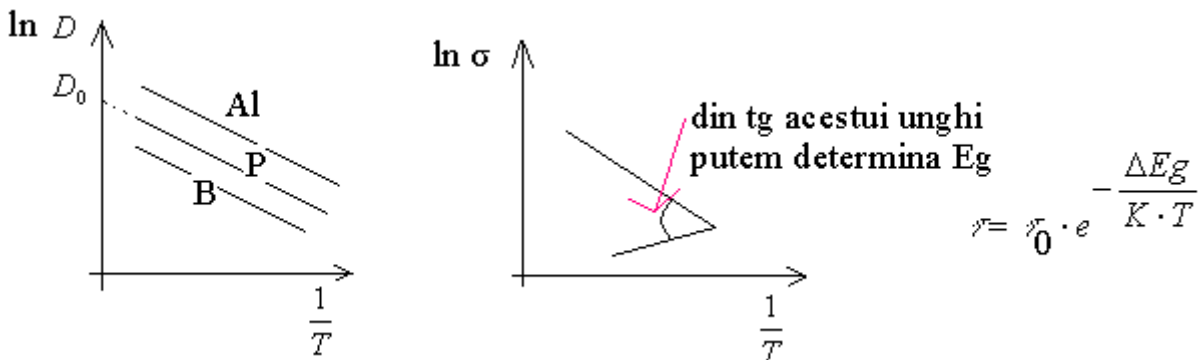


Au are solubilitate mică, însă are un coeficient de difuzie destul de înalt. P are solubilitate ridicată.

2) Timpul – în ambele soluții ale legii lui Fick timpul apare ca un produs între D și t . În principiu pt. ambele tipuri de joncțiuni adâncimea joncțiunii pn este proporțională cu rădăcina pătrată a timpului.

Timpul procesului de difuzie este reglat destul de precis.

3) Temperatura – nu influențează la adâncimea joncțiunii pn, dar ea totuși apare indirect în coeficientul de difuzie D : $D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta H}{R \cdot T}\right)$ unde D_0 este coeficient de difuzie la o temperatură care $\rightarrow \infty$; ΔH - energia de activare a impurității (minimul necesar de energie de care trebuie să dispună impuritățile pt. a putea pătrunde în interiorul cristalului).

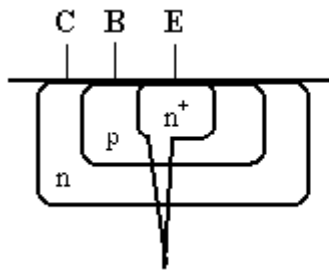


Unghiurile de înclinație a dreptelor e același și ca urmare ΔH este aceeași pt. diferite impurități.

Temperatura este bine stabilizată în tehnologie: la 1200°C și se poate schimba în timp cu $\pm \frac{1}{2}$ °C.

4) Desăvârșirea rețelei cristaline.

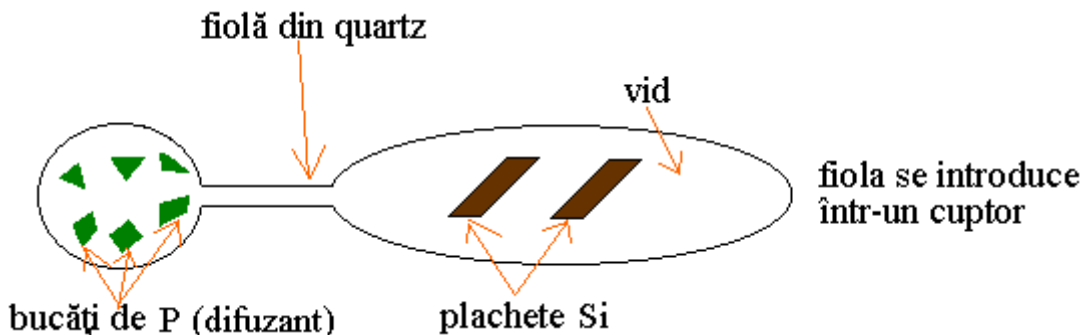
Dacă rețeaua cristalină are multe defecte atunci impuritățile vor pătrunde mai ușor în cristal. S-a făcut un experiment de creștere a cristalelor în spațiul cosmic și s-a obținut un cristal cu rețea perfectă, dar când s-a făcut difuzia a apărut scurt între C și E și ca urmare tranzistorul nu mai funcționa.



un cristal de tip n cu o difuzie în el de tip p și una de tip n⁺

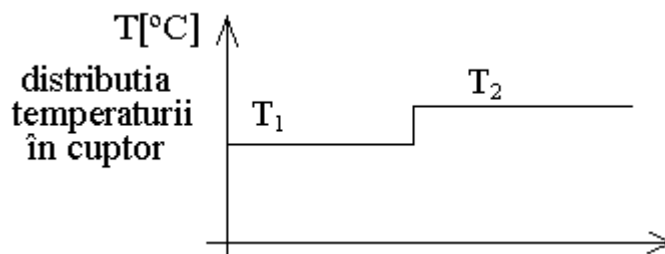
Metode de efectuare a difuziei și difuzanții utilizați

În principiu difuzia poate fi efectuată în sisteme închise și în sisteme deschise.
Difuzia într-un sistem închis:



Se scoate aerul, după care se sudează fiola și se introduce într-un cuptor la o anumită temperatură. P se vaporizează direct din starea S (prin sublimare) și toți atomii difuzanți vor umple întregul volum. Dacă o parte din atomii difuzanți intră în placheta de Si atunci din bucățelele de P se vaporizează alți atomi de P astfel încât concentrația atomilor de P în faza gazoasă să fie constantă \Rightarrow difuzie dintr-o sursă semiinfinită.

Avantaj: putem introduce fiola într-un cuptor cu două nivele de temperatură diferite:



Cu T_1 se reglează presiunea vaporilor saturați \Rightarrow concentrație const. în faza gazoasă.

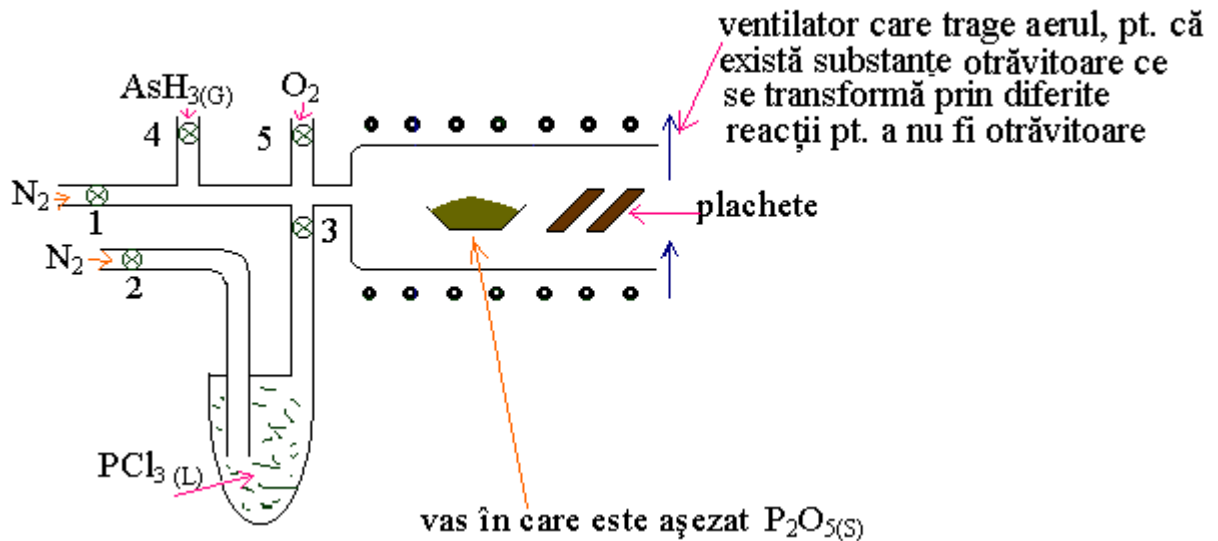
Cu T_2 se reglează lungimea difuziei (adâncimea difuziei și rapiditatea difuziei).

Dezavantaj: pt. a scoate plachetele trebuie să taie fiolele de cuarț care se aruncă și costă foarte mult.

Cuarțul este folosit pt. că poate fi purificat și pt. că suportă temperaturi foarte mari (nu se înmoaie).

Mai des se utilizează în industrie sistemul deschis în flux de N_2 .

Schema cu posibilitatea de a difuza trei tipuri de impuritate (dar nu se folosesc toate odată):



Se poate face difuzie din toate stările de agregare: S (P_2O_5), L (PCl_3), G (AsH_3), dar nu toate odată.

Difuzanți utilizați:

- nu se poate folosi As curat pt. că este otrăvitor sau P curat în calitate de difuzant;
- pt. Si avem difuzanții ce formează condiție:

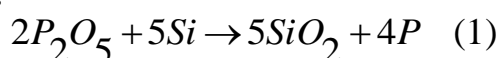
de tip n	de tip p
<u>Lichid</u>	
PCl_3	
$POCl_3$	BBr_3
$AsCl_3$	BCl_3
$SbCl_3$	
<u>Solid</u>	
P_2O_5	B_2O_3
	BN
<u>Gaz</u>	
PH ₃	B_2H_6
AsH ₃	

Este o deosebire între sursele de difuzie S, L, G. Pt. sursa S trebuie un cuptor cu două tipuri de temperatură pt. a regla concentrația care se face închizând și deschizând mai mult sau mai puțin “butelia” de gaz.

Pt. faza L concentrația impurităților se poate regla prin fluxul de N_2 care trece prin vas sau prin încălzirea vasului cu lichid \Rightarrow se mărește concentrația impurităților care ajung în interiorul reactorului.

Cum are loc procesul de difuzie pt. sursa S:

P_2O_5 la încălzire se vaporizează și ajunge pe suprafața plachetei de Si cu care intră în reacție chimică:



SiO_2 conține atomi de P și se poate scrie: $(SiO_2)_x \cdot (P_2O_5)_{1-x}$ care este de fapt o sticlă fosforosilică = PSG (Phosfor Silicon Glass).

Întâi se formează pe suprafața plachetei această sticlă după care difuzia atomilor de P are loc din această sticlă \Rightarrow difuzie din sursă limitată.

Se introduce și O_2 deoarece difuzia nu se poate face de exemplu din PCl_3 curat, deoarece se poate forma o curgere turbulentă a gazului, caz în care concentrația impurităților poate fi mai mare decât solubilitatea solidă și poate duce la eroziunea plachetelor.

$4PCl_3 + 5O_2 \rightarrow 2P_2O_5 + 6Cl_2$ (2), unde P_2O_5 intră în reacție cu Si și formează aceeași sticlă și din gaz;

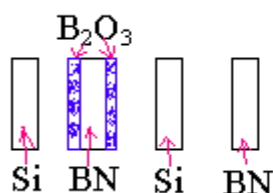
$4AsH_3 + 5O_2 \rightarrow 2As_2O_5 + 6H_2$, unde As_2O_5 reacționează cu Si și formează o sticlă arsenicosilicată;

De ex. avem o sursă de difuzie (foarte utilizat): $4BBr_3 + 3O_2 \rightarrow 2B_2O_3 + 6Br_2$,

unde B_2O_3 în reacție cu Si formează o sticlă borsilicată.

BN – este solid și are $T_{top}=3000^\circ C$ (însă la $1250^\circ C$ începe să se topească sticla de cuarț) și pt. aceasta se realizează astfel:

- lângă o plăcuță de Si se pune o plăcuță de BN:



plăcuța de BN se transformă în B_2O_3 în prezența O_2 ce are o $T_{top}=600^\circ C$ ce se folosește apoi în industrie pt. difuzie.

Metoda implantării ionice

Priorități ale metodei:

- posibilitatea de a implanta orice element din tabelul lui Mendeleev în orice semiconductor;
- implantarea poate avea loc la temperaturi joase, chiar la temperatura camerei;
- în metoda implantării ionice avem ioni care au o energie și capătă o viteză cu ajutorul căreia intră în interiorul cristalului;
- putem forma joncțiuni pn reproductibile până la 100% cu o concentrație controlată pe toate cele trei axe (x, y, z);
- procesul are loc în vid destul de înalt, ceea ce nu duce la purificarea plachetelor;
- durata procesului de implantare este până la câteva minute, dar putem face și implantare locală.

Neajunsuri: ionul accelerat nimerind pe suprafața cristalului poate duce la defectarea rețelei cristaline până la amorfizarea suprafeței. Pt. a lecuia aceste defecte se face un tratament termic la $t=600-700^\circ C$ timp de o oră.

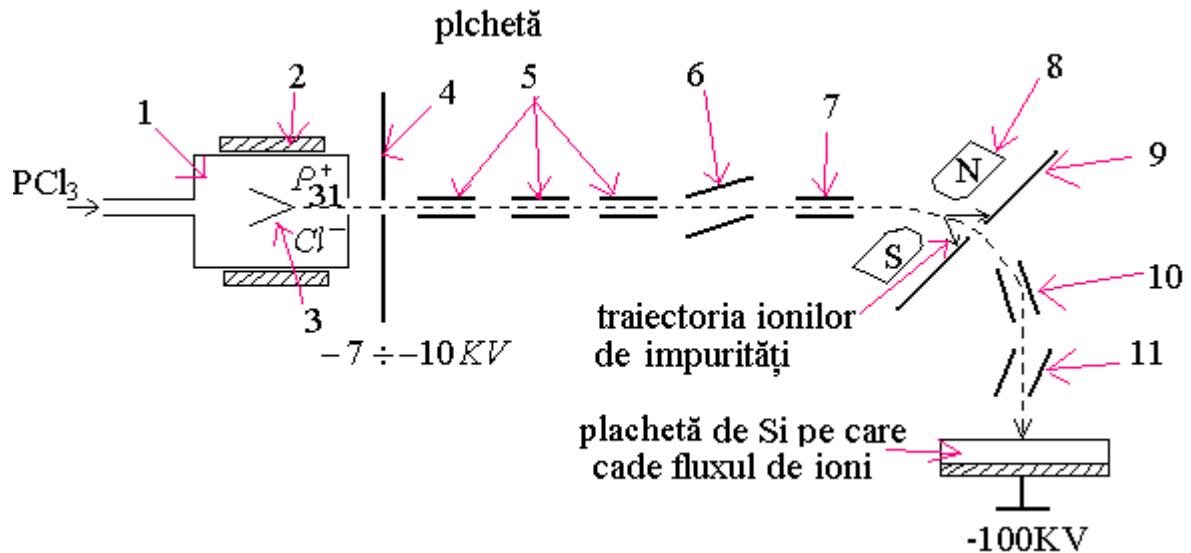
Energia oricărei particule încărcate poate fi:

$$E = q \cdot U \text{ [J], [eV]}, \text{ unde } q\text{-încărcătura ionului (pozitivă)};$$

Avem de ex. ioni: P_{31}^+ - are o încărcătură pozitivă $\Rightarrow q=1$ sau P_{31}^{++} - este lipsit de 2 electroni (are două încărcături pozitive $\Rightarrow q=2 \Rightarrow$ energia acestui ion este de două ori mai mare la același potențial), N^+ - un atom de azot încărcat pozitiv.

Dacă un astfel de ion ar nimeri pe suprafața plachetei acesta s-ar putea ciocni de nucleul atomilor, de moleculele cristalului de pe suprafața plachetei. Aceste ciocniri pot fi elastice sau plastice.

Construcția instalației implantării ionice și principiul de funcționare



Tot sistemul este în vid.

1 – sursa de ioni; 2 – bobine electromagnetice; 3 – filament termoelectronic; 4 – electrod de tragere a ionilor din sursă (diafragmă); 5 – lentile electrostatice pt. focalizarea fluxului de ioni; 6, 7, 10, 11 – plăci pt. reglarea fluxului de ioni pe axa x și pe axa y (se utilizează pt. a scana pe suprafața plachetei); 8 – separator magnetic; 9 – diafragmă.

Putem pune un gaz care se vaporizează și ajunge în interiorul filamentului care se încălzește și emană niște electroni care nimerind în câmpul electromagnetic (2) se vor mișca pe o traiectorie sub formă de spirală și ca urmare crește probabilitatea de a se ciocni cu moleculele de PCl_3 . Cu ajutorul bobinelor are loc separarea ionilor P_{31}^+ și Cl^- .

Cu -7 la (4) se vor extrage doar încărcăturile pozitive (ionii de P) cu ajutorul diafragmei (4). Separatorul magnetic face ca particula extrasă să se miște pe o circumferință care are

o forță centripetă: $\frac{m \cdot v^2}{r} = e \cdot B \cdot v \Rightarrow r = \frac{m \cdot v}{e \cdot B}$, unde r – raza de mișcare, m – masa, v –

viteza, care este dată de potențialul de accelerare, B – intensitatea câmpului magnetic, e – electronul propriuzis.

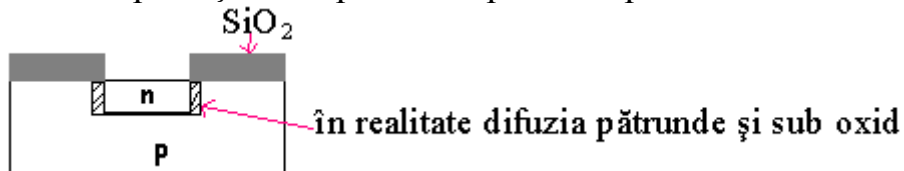
Dacă $e=ct.$, $B=ct.$, $v=ct.$, $\Rightarrow r \propto m$ ca urmare particulele cu rază mai mică vor avea și masa mai mică și cele cu rază mai mare vor fi separate de diafragmă (9) \Rightarrow separăm ionii după masă și se elimină și impuritățile.

Dând un anumit potențial pe plăcile 10 și 11 se poate scana placheta de Si.

Priorități ale metodei: se pot realiza direct circuite integrate.

Difuzia locală – e un proces izotrop.

Avem o plăcuță de Si pe care depunem o peliculă de SiO_2 .



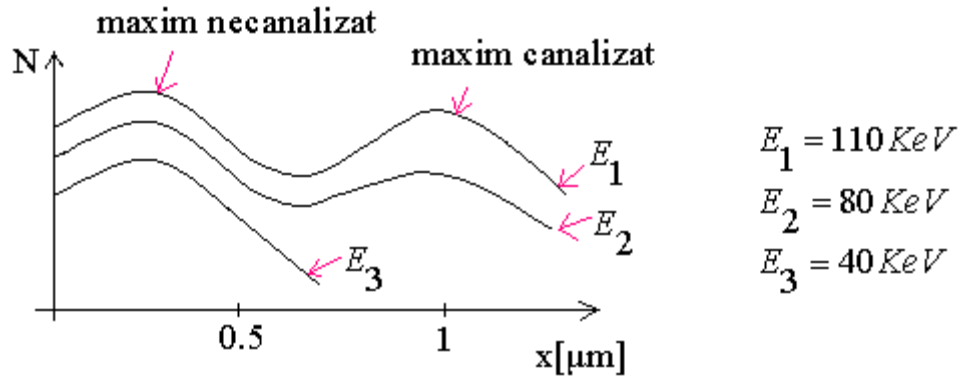
La implantarea ionică, ionii cad pe verticală (perpendicular) și joncțiunea pn se realizează exact fără a se pătrunde sub oxid.

Distribuirea ionilor implantați pe adâncimea plachetei

Factori ce influențează distribuția ionilor:

- 1 – energia ionului;
- 2 – orientarea plachetei;
- 3 – temperatura plachetei la implantare;
- 4 – doza (nr. de ioni care cade pe o unitate de suprafață).

1 - Energia ionului – date experimentale pt. o plachetă de Si cu orientarea (100) la temperatura camerei pt. diferite energii ale ionului:

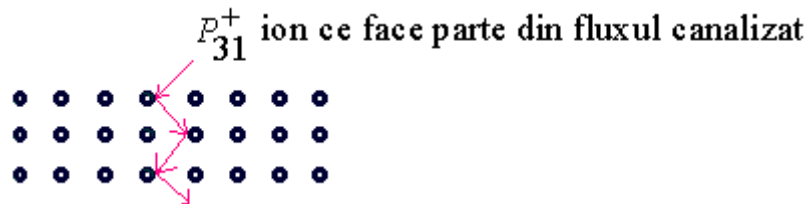


energia scade la $E_2 \Rightarrow$ al doilea maxim scade;
 energia scade la $E_3 \Rightarrow$ al doilea maxim nu se mai vede.

De ce există două maxime? Lindarhu a interpretat graficul astfel: ionii care cad pe suprafața plachetei de Si sunt împărțiți în două grupe:

- 1) ionii care nimerind pe suprafața plachetei pierd “memoria” direcției de mișcare și se absorb în stratul superficial;
- 2) ionii care se canalizează (formează un flux canalizat).

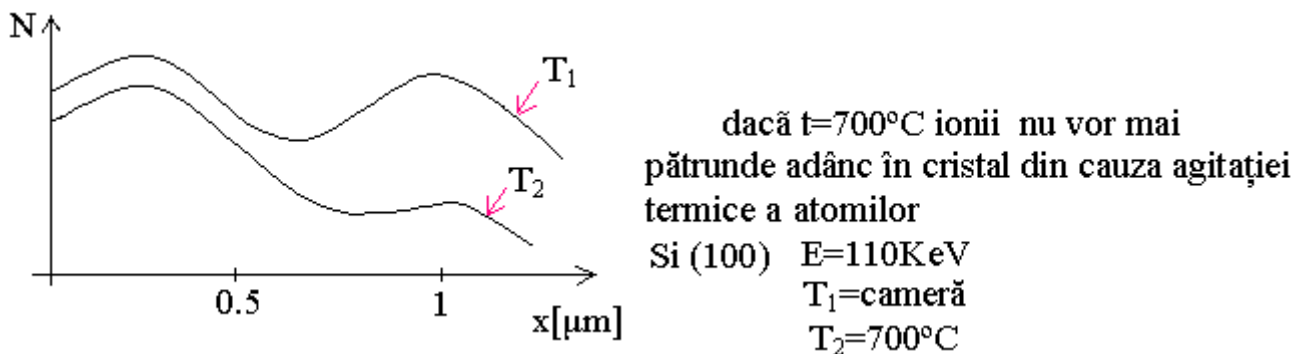
De ex. avem structura rețelei cristaline pe care cade un ion sub un unghi nu foarte mare și pătrunde în interior ciocnindu-se de ioni, pătrunzând foarte adânc în cristal.



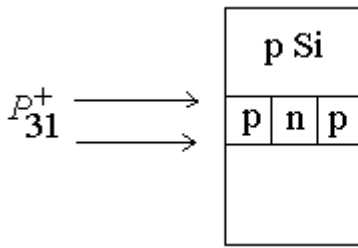
Din teoria lui Lindarhu: distribuția totală a ionilor reprezintă superpoziția a două fluxuri canalizat și necanalizat.

2 – Orientarea plachetei: la (111) avem maxim – densitatea de atomi este maximă.

3 – Influența temperaturii:



4 – Doza: dacă cad mulți ioni pe suprafața plachetei, aceștia se ciocnesc între ei și nu pătrund foarte adânc (se absorb la suprafață).



Dacă se mărește energia ionului până la $E=1\text{MeV}$, toți ionii vor fi într-o suprafață scufundată adânc în plachetă și astfel se poate forma o structură pnp. Aceasta se utilizează în tehnologia VLSI.

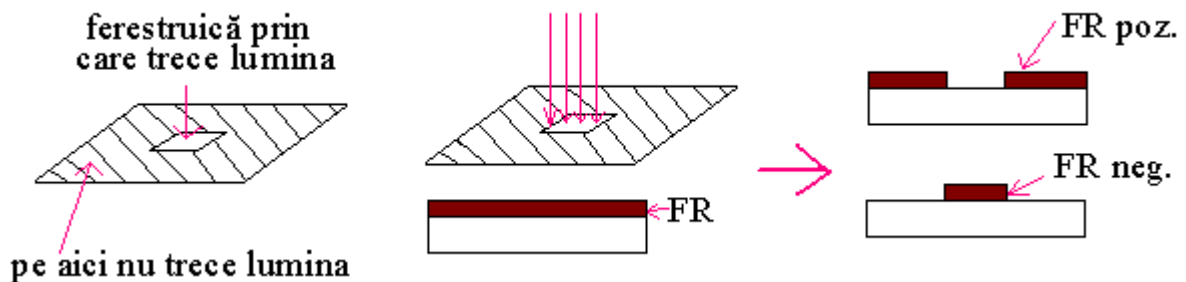
Cap.2 Fotolitografia la producerea dispozitivelor semiconductoare și a circuitelor integrate

Fotolitografia conține un șir de operații tehnologice îndeplinite consecutiv, care duc la formarea topologiei circuitului integrat. Pt. a efectua acest proces se utilizează un fotorezist, care este format dintr-o substanță polimeră (organică) sensibilă la razele UV și un solvent în care acesta se dizolvă.

Fotoreziștii se împart în două categorii:

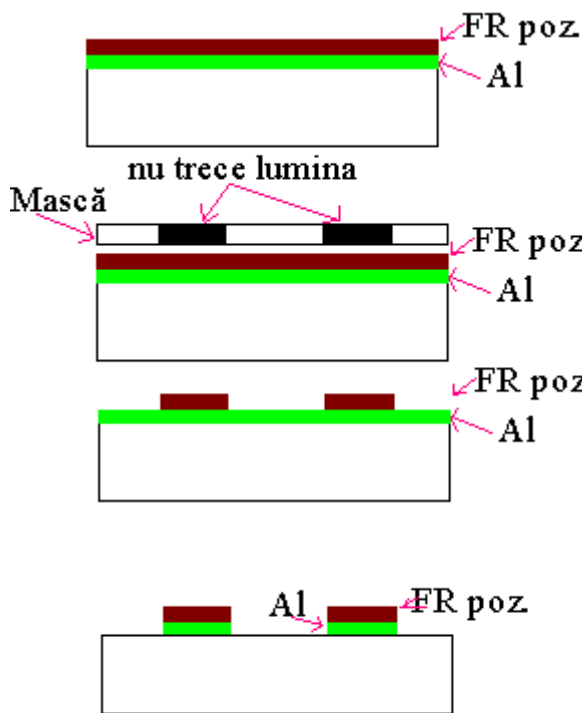
- pozitivi (FR pozitiv);
- negativi (FR negativ).

Pt. a îndeplini procesul de fotolitografie sunt necesare fotomăști. O fotomască arată astfel:



Dacă avem o plachetă de Si pe care am depus fotorezist și punem o mască pe suprafața plachetei și iluminăm placheta, în cazul fotorezistului pozitiv are loc absorbția razelor UV care duce la producerea reacției fotochimice datorită căreia are loc distrugerea legăturilor dintre moleculele fotorezistului, iar în cazul celui negativ are loc majorarea legăturilor dintre aceste molecule.

Operațiile de bază ale procesului de fotolitografie pot fi:



1) avem placheta de Si și pe suprafața ei depunem o pelicula de Al. Peste acest Al vom depune FR poz.

2) expunerea FR – lui

3) corodare

Al de sub FR rămâne protejat

Al se corodează în H_3PO_4

3) Spălare.

După ce FR și-a îndeplinit funcțiile se îndepărtează de pe suprafața peliculei, deoarece la realizarea difuziei, la $1200^\circ C$, prin interiorul plachetei, dacă avem FR pe suprafața peliculei de SiO_2 acesta se carbonizează.

În producerea C.I. se folosește un anumit nr. de fotomăști. Pt. a confecționa cele mai simple C.I. ne trebuie un set de 7 fotomăști. Deoarece acest proces conține 10 operații tehnologice, se poate ajunge la 100-200 de operații tehnologice și ca urmare ne trebuie un timp foarte lung.

Criteria de apreciere a fotomăștilor

1 – Sensibilitatea FR – lui: a)integrală, b) spectrală;

2 – Durabilitatea la acțiunea chimicalelor;

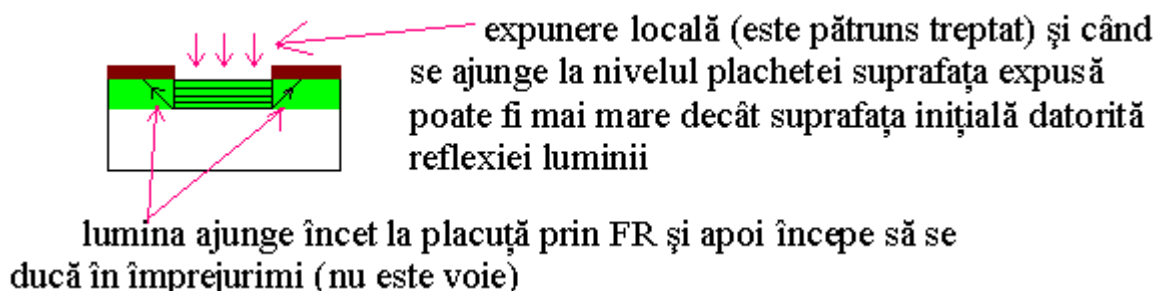
3 – Rezoluția FR – lui.

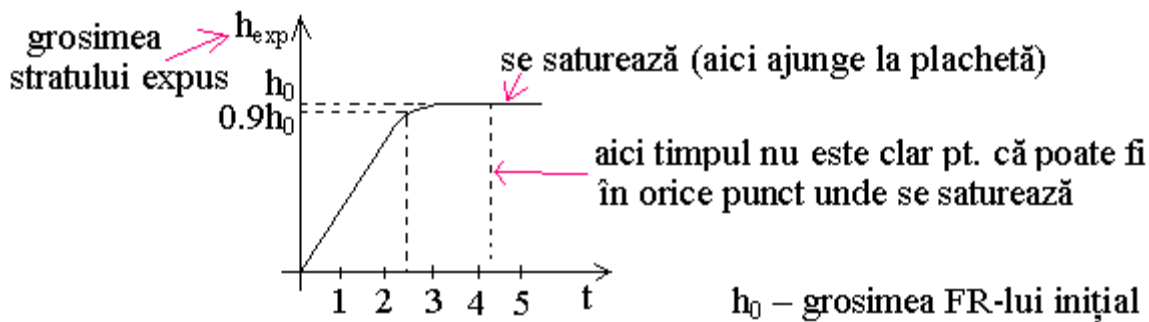
1-a) Sensibilitatea integrală: $S = \frac{1}{E \cdot t} = \frac{1}{H}$, unde E-intensitatea luminii, t-timpul de

expunere, H-expoziția.

Dacă $E=ct.$ $\Rightarrow S$ este o mărime inversă timpului.

Problema principală în fotolitografie este de a determina timpul optim pt. expunerea la lumină:

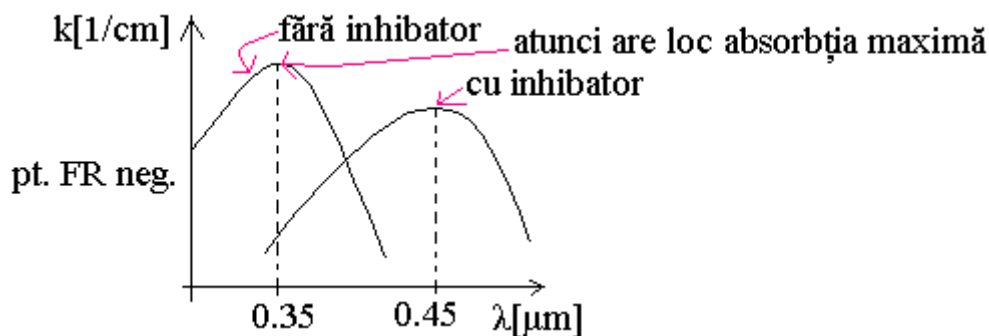




Se măsoară timpul necesar pt. a ajunge la $0.9h_0$, după care se află pt. h_0 .

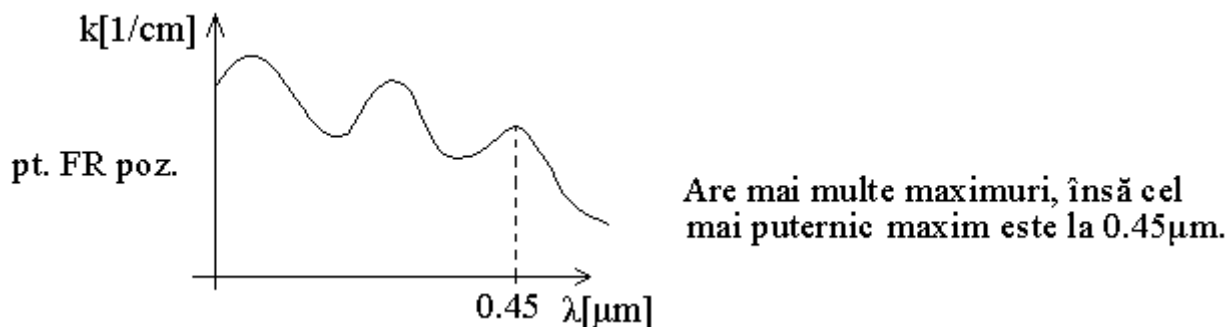
În industrie se pun mai multe plăcuțe cu același FR, cu aceeași grosime, ce se expun perioade diferite de timp și se găsește cea mai clară imagine care e dată de timpul cel mai optim.

1-b) Sensibilitatea integrală: cum depinde coeficientul de absorbție (k) a luminii față de lungimea de undă (λ):



La baza FR neg. stă un polimer numit polivinilfinomat.

Datorită faptului că absorbția maximă are loc la $\lambda=0.35\mu\text{m}$ trebuie folosită o mască din sticlă de cuarț, pt. că numai aceasta dă drumul la raze UV cu o λ așa de mică. De aceea în FR se adaugă o substanță numită inhibitor care schimbă regiunea spectrală și duce λ la $0.45\mu\text{m}$ și la care se poate folosi sticla specială numită K08 (pt. mască).

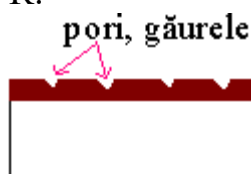


2 – Durabilitatea chimică a FR – lor

Nu există un criteriu absolut pt. determinarea durabilității. Se pot însă observa. FR trebuie să fie inert la acțiunea HF, H₃PO₄.

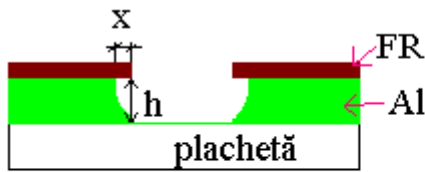
Criterii de durabilitate:

- FR se dizolvă în corodant total sau parțial \Rightarrow FR nu poate fi folosit.;
- corodarea locală a FR:



Sub acțiunea corodantului în unele locuri rămân niște găuri. Aceste găuri apar datorită unor molecule polimerizate în FR – ul inițial sau în acele locuri au fost niște fire de praf. De aceea procesul trebuie să aibă loc în locuri lipsite de praf.

- când facem corodarea, sub FR a pătruns corodantul și a distrus din pelicula de Al.



Pt. aceasta trebuie luat în vedere următoarele lucruri: ferestrele trebuie formate mai mici pt. că ele oricum se mai măresc.

$$k = \frac{x}{h}$$

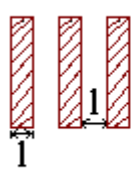
când $x=h \Rightarrow k=100\%$ = coeficient de corodare laterală

Aceasta depinde de tipul de FR.

3 – Rezoluția FR

Nr. maxim de linii care poate fi format pe suprafața FR – lui pe o unitate de lungime. Lățimea liniilor trebuie să fie egală cu depărtarea dintre dânssele.

linii de FR



pot fi linii:



sau

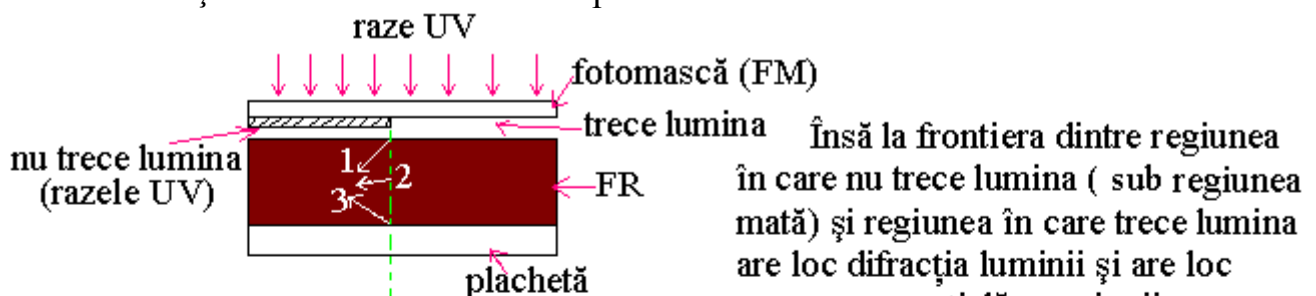


au rezoluția cea mai mare

$$R = \frac{1000}{2l} \text{ [linii/mm]} \quad \text{unde } l = [\mu\text{m}]$$

Mecanismul de absorbție a luminii

Se dorește ca raza de lumină să exponeze FR vertical.

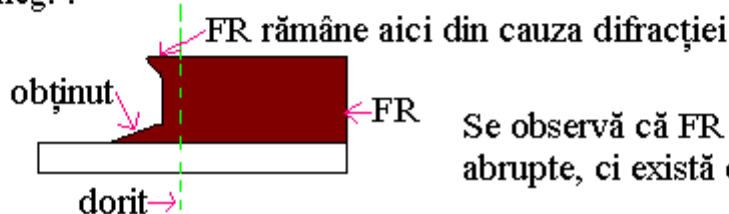


Însă la frontiera dintre regiunea în care nu trece lumina (sub regiunea mată) și regiunea în care trece lumina are loc difracția luminii și are loc expunerea parțială a regiunii care se află sub regiunea mată \Rightarrow direcția 1.

FR este un lichid neomogen și în el are loc procesul de disipare a luminii: o parte din lumină poate pătrunde și în direcția 2. Acest proces este destul de slab.

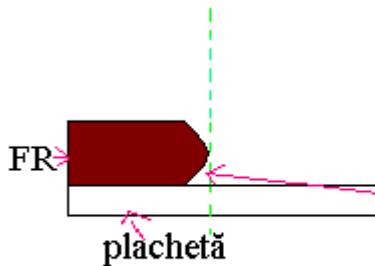
Mai are loc reflexia luminii de la suprafața plachetei în interiorul FR – lui (cel mai principal proces) direcția 3.

În cazul FR neg. :



Se observă că FR rămas nu are granițe foarte abrupte, ci există o trecere lină.

La FR poz. :



Influențează mult corodarea pe direcția 3. Acest neajuns poate fi înlăturat prin apăsarea FR – lui sau după expunere prin corodare, corodantul nu poate înlătura tot FR expus. Dacă grosimea FR – lui este de $1\mu\text{m}$, atunci regiunea este mult mai mică. Difuzia va fi limitată și ca urmare va rămâne necorodată, deoarece corodantul nu poate să pătrundă.

FR poz. Are un contrast mai înalt decât cel negativ.

În industrie se folosește cel mai mult FR poz. Pt. că sunt stabili în acizi (nu se corodează în acizi). În cazul în care folosim corodarea în baze se folosesc FR neg.

Rezoluția FR – lui este: $R = \frac{1000}{2l} = \frac{1000}{2 \cdot 1} = 500 \frac{\text{linii}}{\text{mm}}$, $l=1\mu\text{m}$;

Cel mai bun FR poz. are R în jur de 450, însă pt. o linie de $1\mu\text{m}$ nu se prea poate face.

Operațiile principale ale procesului de fotolitografie

Cuprinde următoarele operații principale:

- 1) formarea peliculei de FR: - purificarea plachetei;
- depunerea peliculei de FR;
- uscarea peliculei.
- 2) formarea imaginii: - alinierea și expunerea FR – lui;
- dezvoltarea FR – lui;
- tratamentul termic.
- 3) transferul imaginii pe suprafața plachetei: - corodarea peliculei neprotejate de FR;
- înlăturarea FR – lui.

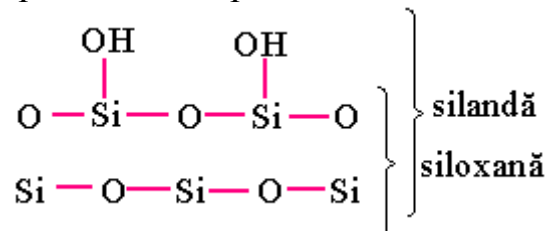
1) Formarea peliculei de FR:

a) Purificarea plachetei: nu trebuie să fie praf, pete de grăsimi pe plachetă.

Purificarea se realizează cu diferite soluții organice: acetona pt. îndepărtarea grăsimii; dacă există materie metalică se introduce în HCl pt. a le îndepărta.

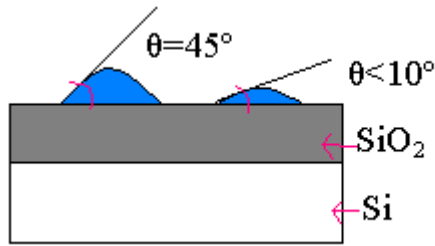
Particularitățile peliculei de SiO_2 din punct de vedere al procesului de fotolitografie.

S-a observat experimental că pelicula de SiO_2 formată pe plachetă are o combinație:



Pe suprafața peliculei de SiO_2 , numită siloxană, litografia se poate face destul de bine. Dar această suprafață are contact cu atmosfera și absoarbe grupări de OH, în acest caz suprafața de SiO_2 se numește silandă, iar litografia nu este bună pt. că suprafața se umezește cu HCl (corodant) și acesta pătrunde foarte adânc în FR. În acest caz pe suprafața plachetei cu OH se adaugă o picătură de H_2O deionizată, care umezește suprafața

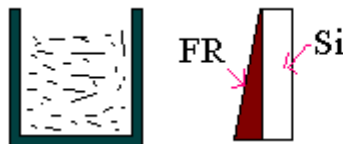
plachetei în așa fel încât formează un unghi de umezire de 45° . În principiu litografia va avea succes.



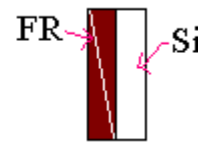
Dacă unghiul $\theta < 10^\circ$, atunci litografia nu este bună și se va face un tratament termic în O_2 uscat la $t=1200^\circ C$ timp de 1h. Dacă acest unghi $\theta > 24^\circ$, atunci putem face litografia.

b) Depunerea peliculei de FR

I – metodă: avem un vas cu fotorezist lichid în care se introduce placheta de mai multe ori, după care se pune la uscat vertical și vom avea o astfel de aranjare a FR – lui:

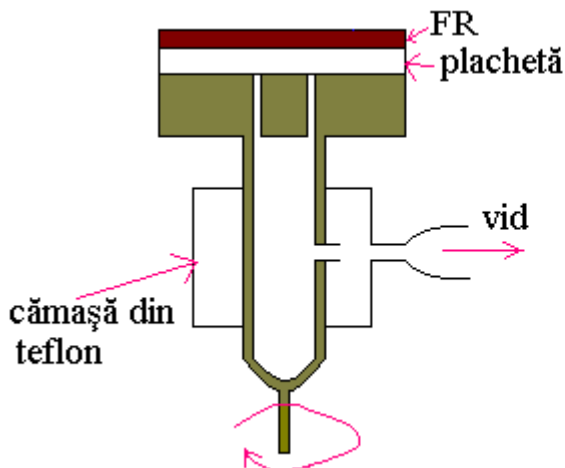


După uscare se repetă procedeul, dar cu placheta întoarsă invers.



II – metodă: depunere cu ajutorul pulverizatorului. Se poate folosi pt. depunere pe suprafețe mari, dar se utilizează foarte puțin deoarece uleiul din pompe poate ajunge în FR. În general se folosește aer curat în pompe.

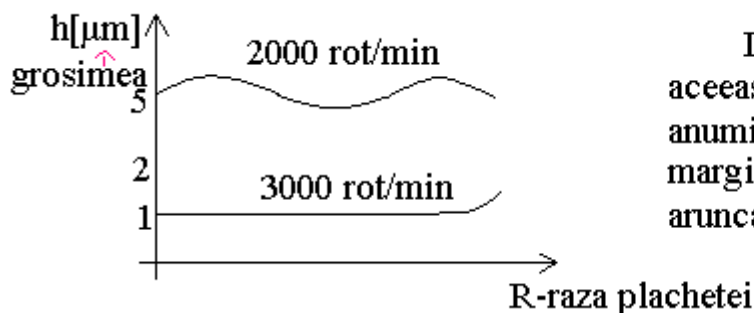
III – metodă: depunere cu ajutorul centrifugăi (cea mai utilizată):



Placheta este prinsă cu ajutorul vidului și ea stă acolo și la 8000 de rotații. FR se depune astfel: se picură FR în timpul rotațiilor în mijlocul plachetei și datorită forței centrifuge se împrăștie pe toată suprafața plachetei uniform. Stratul de FR astfel depus are proprietatea de a fi alunecos (nu dă voie să iasă aerul).

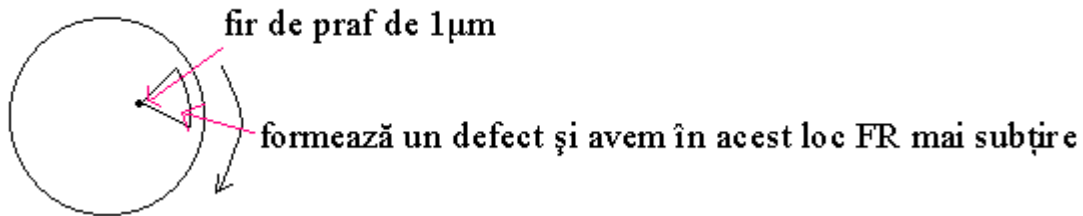
Grosimea stratului de FR depinde de:

- vâscozitatea FR – lui: cu cât este mai vâscos cu atât se va depune mai rău;
- viteza de rotație.



De la 3000 rot/min în sus FR are una și aceeași grosime și numai la margine are o anumită îngroșare, pt. că fluidul fiind la margine acesta se usucă și nu mai poate fi aruncat.

În FR depus pot apare defecte sub formă de comete, pt. că poate exista un fir de praf și în timpul rotirii forțele acționează asupra firului de praf și astfel grosimea FR – lui este mai mică.

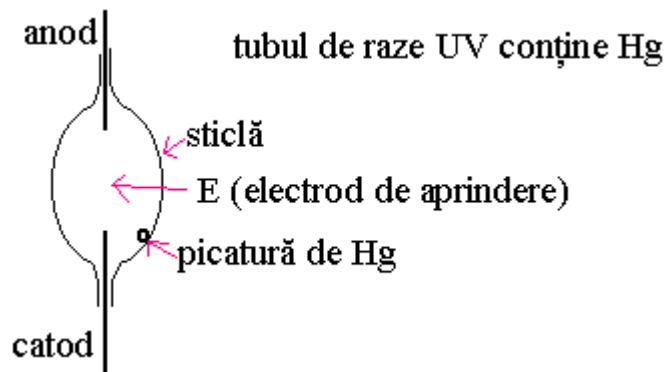


Marginea îngroșată poate zgârâia, defecta masca, pt. că aceasta este în contact cu FR – ul. Pt. a elimina acest neajuns se micșorează viteza de rotație, după ce s-a depus FR – ul, și se picură un solvent pe regiunea respectivă pt. a îndepărta FR – ul.

c) **Uscarea stratului de FR:** se face cu scopul înlăturării solventului din FR, altfel când punem masca acesta se lipește.

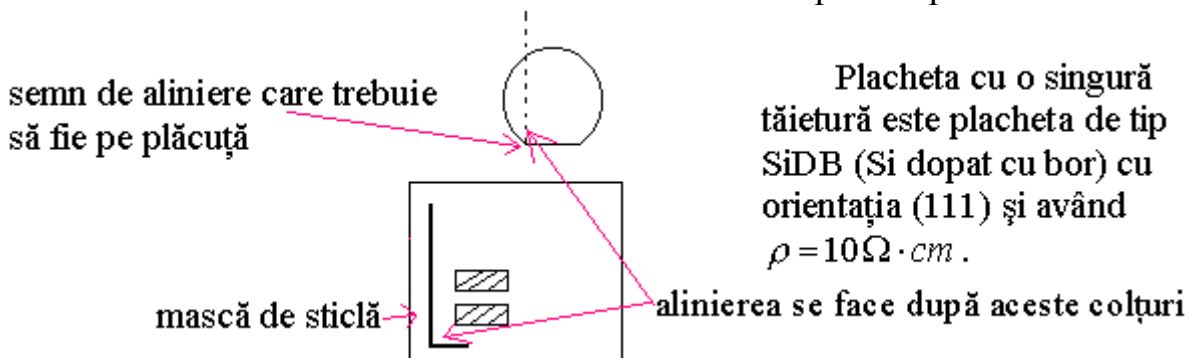
2) Formarea imaginii

Pt. expunare se folosește o sursă de UV.



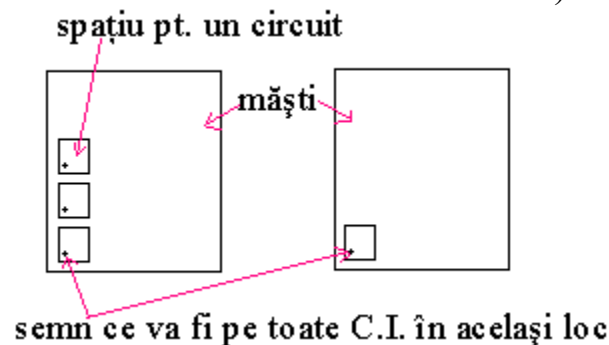
a) **Alinierea** se poate face prin două metode:

A) alinierea cu folosirea tăieturii de la baza plachetei. Toate plachetele care se folosesc în industrie au o tăietură la bază pt. a se putea deosebi.

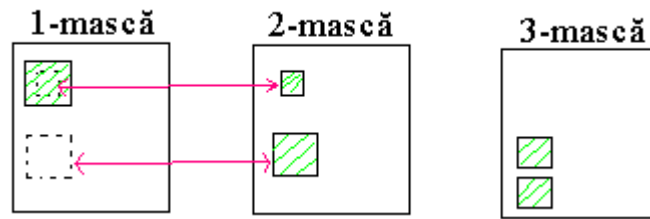


Apoi se face în tot setul de măști semne de aliniere (sub ele rămâne oxid).

B) folosind alte tipuri de semne de aliniere (liniile semnelor de aliniere trebuie să fie mai mici decât orice semn al circuitului).



Aceste semne însă în timp datorită corodării se defectează câteodată. Ca urmare s-au introdus alte semne de aliniere.



După folosirea primei măști trebuie să se pună a doua, iar pătratul mic să intre în cel mare inițial (dat de prima mască). Următoarea mască va avea un pătrățel mai jos care se va alinia după celelalte de mai sus.

b) **Exponarea:** constă în iluminarea suprafeței FR – lui prin masca dată. Timpul de iluminare se determină experimental.

c) **Developarea FR – lui:**

- pt. FR poz. developarea are loc în soluții lichide, slabe: 0.5%KOH, NaOH;
- pt. FR neg se folosește același solvent care intră în componența FR – lui inițial: acetonă, toluenă.

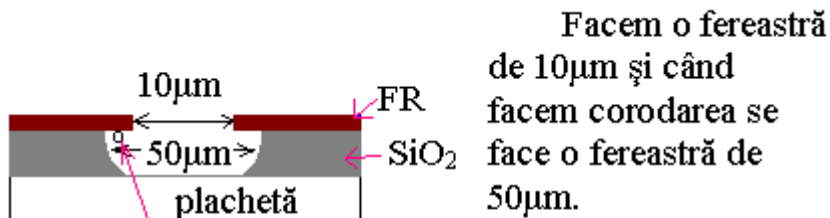
d) **Tratamentul termic** ca și uscarea se face cu raze IR. Este necesar pt. creșterea adeziunii peliculei la plachetă. Tratamentul termic nu se face în cuptoare electrice, deoarece s-ar crea un strat la suprafață care apoi s-ar crăpa. Razele IR pătrund în tot FR – ul și-l usucă uniform.

3) Transferul imaginii pe suprafața plachetei

SiO₂ se poate coroda în HF:

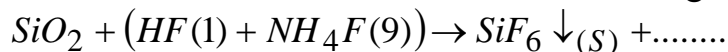


În 1957 s-a stabilit că pelicula de SiO₂ protejează placheta de ionii difuzați.



Facem o fereastră de 10µm și când facem corodarea se face o fereastră de 50µm.
 bulă de SiF₄ care ridică și dezlipeste FR – ul
 ⇒ se face corodare sub FR deoarece corodantul pătrunde în interior datorită bulei de SiF₄.

Ca urmare în corodantul de SiO₂ se mai adaugă și NH₄F:



SiF₆ este un solid ce cade la fundul vasului și sîși schimbă valența de la 4 la 6 și nu mai ridică FR – ul și fereastra este mult mai mică (eventual poate ajunge la 1µm).

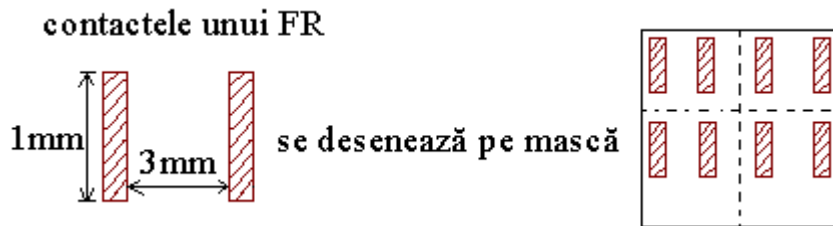
Pt. corodarea unei pelicule de Au se folosește HNO₃ și HCl în amestec.

După ce s-a făcut corodarea, adică s-a transferat imaginea, se va înlătura FR – ul (și cel neg. și cel poz. se înlătură cu H₂SO₄). FR – ul poz. se mai înlătură cu dimetilformonid, precum și cel poz. și cel neg. se mai înlătură prin fierberea în soluții de 10% baze.

Caracteristicile fotomăștilor (FM) și metodele de confecționare

Cea mai simplă mască este formată pe baza fotoplachetelor și se caracterizează printr-o rezoluție înaltă și un contrast destul de perfect.

De ex. pt. formarea contactelor unui FR – le desenăm de 10 ori mai mari și le fotografiem astfel încât desenul să fie micșorat de 10 ori:



Aceste fotomăști nu sunt încă durabile.

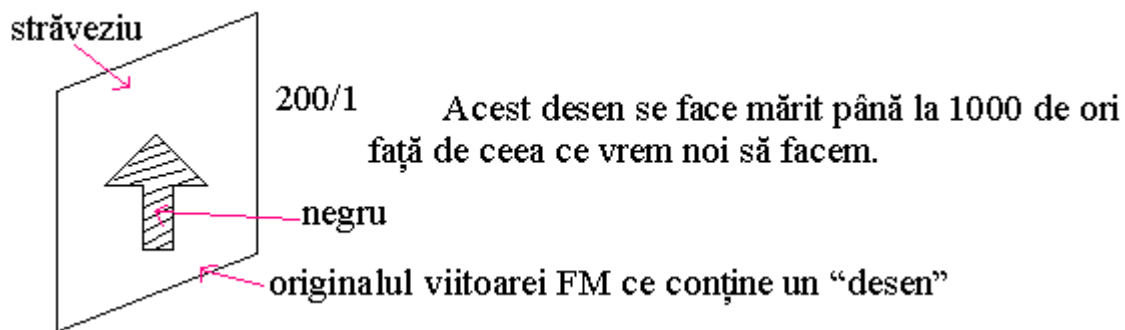
Masca pe baza peliculei de Cr: Cr are o adeziune mare pe sticlă. Se depune o peliculă de Cr și se pot face 600-700 litografii.

Cerințe pt. FM:

- contrast puternic (trecere abruptă între negru și străveziu);
- dimensiunile elementelor trebuie să fie aceleași atât în centrul măștilor cât și la marginile lor.

Metode de confecționare a FM

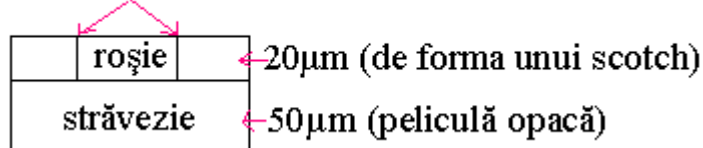
Una din metode (care nu poate fi utilizată în tehnologia VLSI) este metoda opticomecanică de confecționare.



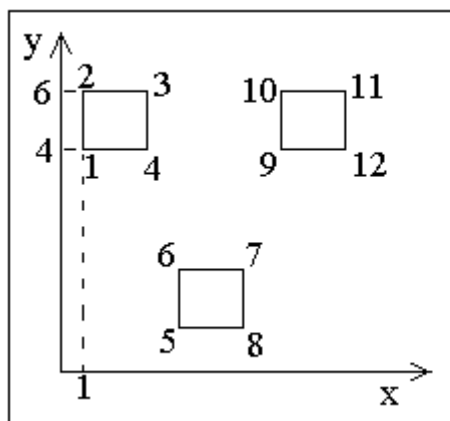
Ordinul de mărire depinde de detalii.

Pt. a desena acest original se folosește pelicula de tip mailar ce conține:

tăietura cu diamantul



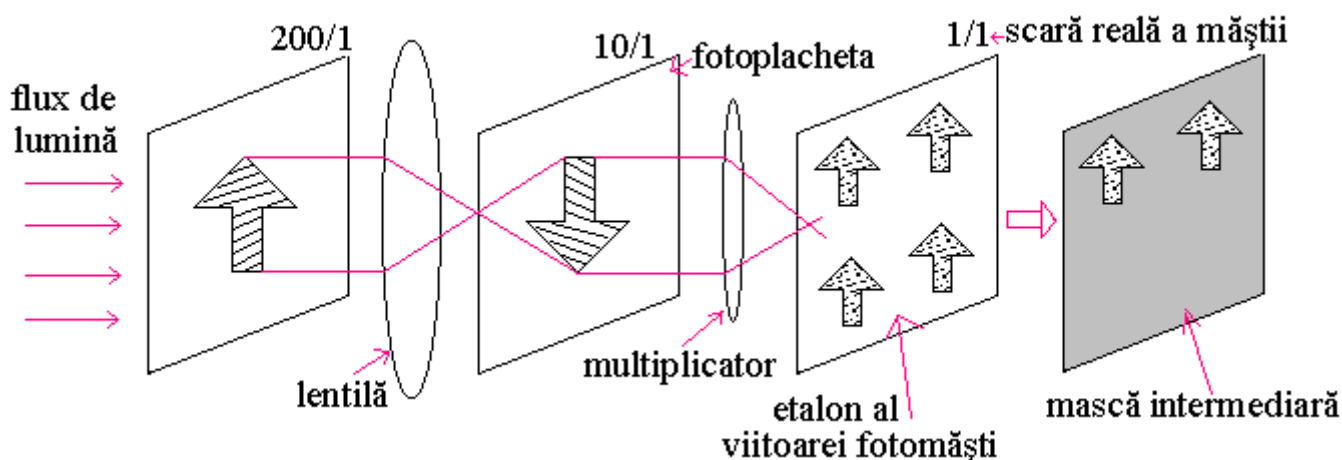
După ce am tăiat, cum ne trebuie nouă pt. a face originalul, se dezlipește ce nu ne trebuie. Tăieturile se fac cu un tăietor la care dăm coordonatele:



Punctul 1 are coordonatele: $x=1, y=4$, ș.a.m.d.

Apoi se pune o cameră de fotografiat de rezoluție mare într-un loc unde nu vor exista vibrații, după care se va primi un flux de lumină care va determina pe fotoplachetă desenul invers și la dimensiuni micșorate. Astfel pe fotoplachetă va apărea desenul pe scara de $10/1$.

După care se utilizează un multiplicator.



Putem face copii pt. lucru câte dorim, însă nu după etalon (nu se fac în contact cu etalonul) ci de pe o altă plachetă (mască intermediară).

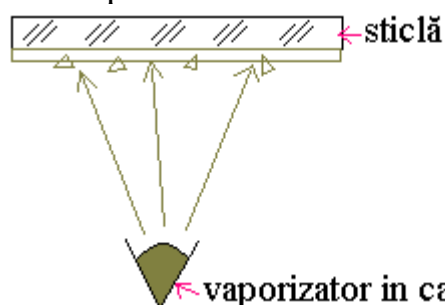
Pt. circuitele VLSI nu se mai folosesc astfel de măști, deoarece $L=1\mu\text{m}$ și în prezent în tehnologia VLSI $L=0.18\mu\text{m}$.

Confecționarea FM pt. lucru

FM se fac pe baza peliculei de Cr. Cr se vaporizează prin sublimare la $t=1100^\circ\text{C}$. Proprietăți:

- Cr se deosebește prin faptul că o peliculă chiar foarte subțire de Cr este absolut neșăvicioasă (opacă) pt. razele de lumină;
- pelicula de Cr se caracterizează printr-o adeziune foarte bună pe sticlă.

O FM poate fi utilizată de 600-700 de ori.

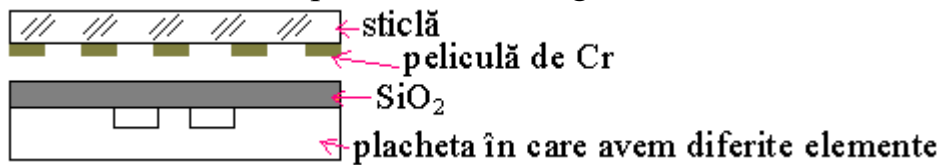


Fie o plachetă din sticlă, foarte bine curățată, într-o cameră cu vid unde se pune și un vaporizator care prin încălzire face să apară vapori de Cr care se vor depune pe placheta din sticlă.

Dacă de ex. au ajuns bucățele de Cr (există această posibilitate) pe suprafața sticlei, în timpul operației de aliniere se vor rupe de pe sticlă și vor rămâne niște găuri prin care va pătrunde lumina.

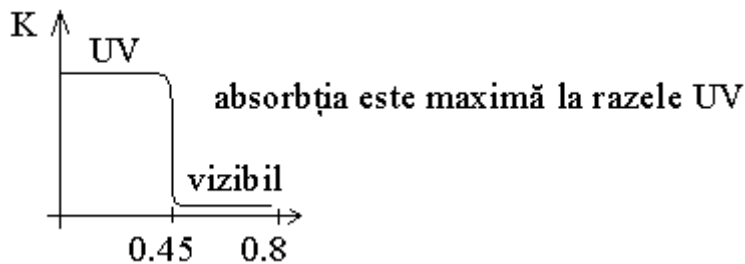
Înainte de a se utiliza sticla se finisează mecanic astfel încât bucățelele să dispară de pe suprafața sticlei, și se trece la o nouă vaporizare.

Odată creată FM facem un proces de fotolitografie \Rightarrow masca funcționabilă.



Este greu să se facă alinierea când pe mască avem foarte multe elemente opace și ca urmare au apărut FM colorate pe bază de Fe_2O_3 care are aceeași adeziune bună pe sticlă, dar care însă nu dau drumul la razele UV, însă lasă să treacă spectrul vizibil.

Dacă desenăm coeficientul de absorbție – k:



Toate procesele de fotolitografie conduc la elemente cu detalii minime: $l_{min}=1.1\mu m$ (deoarece lungimea de undă cu care se face expunerea este de 0.45 \Rightarrow rezoluție mică). Pt. a putea micșora dimensiunile elementelor până la dimensiuni submicronice trebuie micșorată lungimea de undă.

Litografia cu fascicol electronic

Se știe că fluxul de electroni are proprietăți cuantice și ondulatorii. Deci λ a fluxului

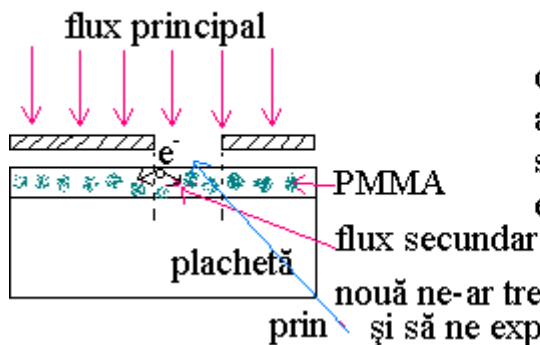
de electroni este: $\lambda \cong \sqrt{\frac{150}{V}} \left[\overset{\circ}{A} \right]$, [V]=volți.

Dacă : $\begin{cases} V = 150V \Rightarrow \lambda = 1 \overset{\circ}{A} \\ V = 1500V \Rightarrow \lambda = 0.1 \overset{\circ}{A} \end{cases}$, depărtarea dintre doi atomi în rețeaua cristalină este

de $6 \overset{\circ}{A} \Rightarrow$ noi nu putem obține o rezoluție la nivelul de $\overset{\circ}{A}$.

În calitate de rezist sensibil la fluxul de lectrini se folosește substanța organică polimeră PMMA=polimetilmetacrilat (plexiglas-sticlă organică).

De ex. avem o plachetă pe care avem o PMMA și avem și o mască pe care cade un flux de electroni, care au o anumită energie (de ex. 15KeV).



Însă în realitate dacă electronul cade pe o suprafață S se poate ciocni de nucleul atomului, învelișul electronic și ar putea să-i smulgă din atomii peliculei și ar rezulta electroni excitați.

nouă ne-ar trebui ca fluxul să treacă prin și să ne expună pelicula de PMMA

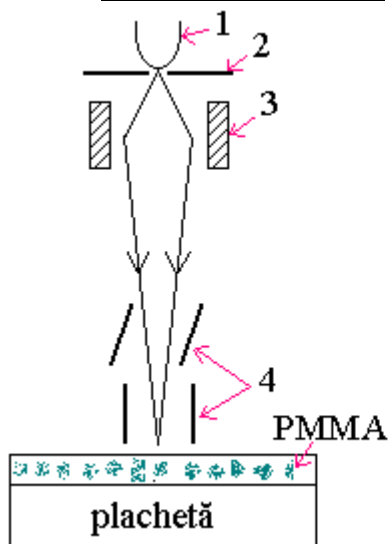
Datorită fluxului secundar expunerea va fi mai mare și în acest rezist are loc distrugerea legăturilor moleculare.

Noi putem focaliza un flux de electroni foarte bine astăzi cu $\lambda=0.1\mu\text{m}$.

Există două sisteme cu fascicol electronic pt. litografie:

- sistem cu scanare;
- sistem cu desen ivit simultan pe toată suprafața.

a) Sistem cu scanare



Sistemul este foarte bun pt. că nu ne trebuie o mască ci doar aplicăm un potențial pe plăcuțele de deflexie (x, y) și scanăm pe pelicula de PMMA. Cu acest flux de fascicol electronic putem face lent fotomăști cu o rezoluție foarte înaltă.

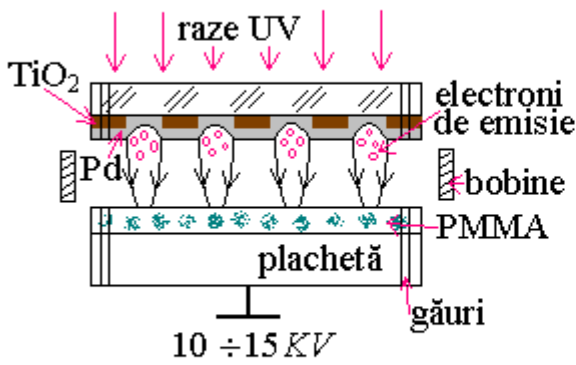
Productivitatea muncii este însă mică.

- 1-filament
- 2-diafragmă
- 3-bobină magnetică pt. focalizarea fluxului
- 4-plăci de deflexie

Dacă se dorește obținerea mai rapidă a aceluiași rezultat:

Fie o sticlă de cuarț. Pe această sticlă se depune consecutiv un strat de titan (Ti) care are o foarte bună adeziune pe sticlă și în plus nu emite electroni prin fotoemisie. Prin oxidare anodică pelicula de Ti se transformă în TiO_2 . După aceasta cu ajutorul litografiei cu fascicol electronic de scanare se formează desenul viitoareii măști (dimensiunile sunt submicronice). Apoi pe suprafața măștii se depune peste tot o peliculă de paladiu (Pd).

Tot acest sistem se numește **fotocatod**.



Sistemul se găsește în vid. Deasupra se dă un flux de raze UV. Pd este direct pe sticlă și face fotoemisia electronilor.

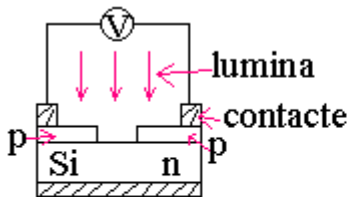
Legea fotoemisiei:
$$h \cdot \nu = A + \frac{m \cdot v^2}{2}$$

- $(h\nu)$ energia cuantului se consumă prin lucrul de ieșire (A) al electronului din material.

TiO₂ absoarbe razele UV iar Pd are proprietatea de fotocatod (emite electroni) și acolo unde nu există TiO₂ apar nurași de electroni.

Aplicăm un potențial și electroni sunt poziționați spre plachetă iar unde cade fluxul de electroni are loc și exponarea suprafeței peliculei de PMMA. În același fel se obține rapid o mască.

Deoarece sistemul este în vid alinierea nu se mai face ca până acum. Nu se poate pune microscop pt. a vedea semnele de pe placuțe, ca urmare se va face aliniere în regim automat. Sticla este pătrată și în fiecare colț este o gaură pe unde trece lumina. Găurile făcute cu ajutorul laserului sunt și pe plachetă. Alinierea va fi corectă când lumina din sticlă trece perfect prin gaura din plachetă. Acest rol este îndeplinit de un fotoreceptor:



fotoreceptor realizat pe timpuri pe baza Si-lui

lumina cade în centrul acestui fotoreceptor

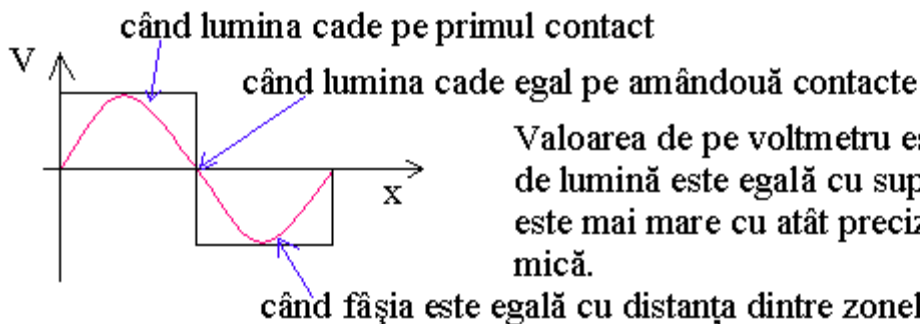
Schema echivalentă a fotoreceptorului:



Două diode cuplate în opoziție. Când le iluminăm fotocurentul: $I_f \cong (1 - R)\eta \cdot s$, unde R=coeficient de reflexie a luminii, η =factor cuantic, s=suprafața iluminată.

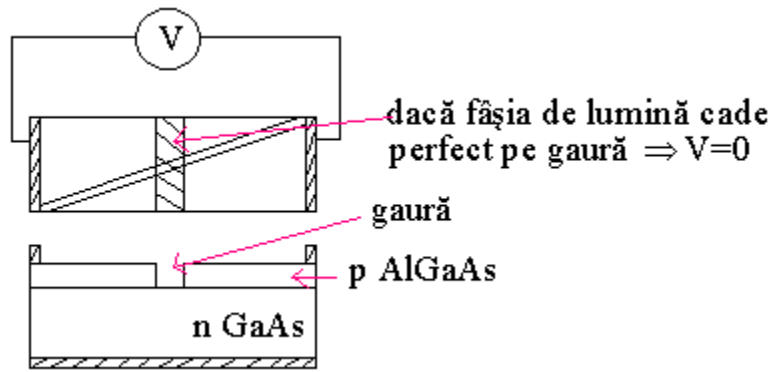
Dacă suprafețele iluminate sunt egale pe cele două diode $\Rightarrow I_f = 0 \Rightarrow V = 0$.

Dacă lumina cade mai mult pe primul contact, voltmetrul ne va arăta poziția fascicolului de lumină:

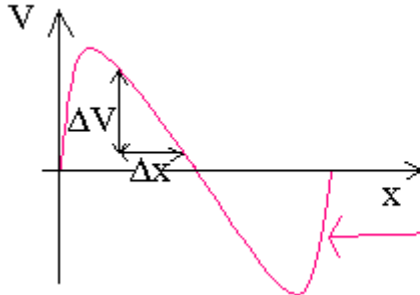


Valoarea de pe voltmetru este maximă dacă fâșia de lumină este egală cu suprafața p. Cu cât fâșia este mai mare cu atât precizia de măsurare este mai mică.

Ca să putem determina mai precis poziția s-a realizat următorul dispozitiv (cu heterojoncțiuni):



Fâșia poate fi oricât de mică => caracteristica:



$$S = \frac{\Delta V}{\Delta x \cdot P} = 2000 \frac{V}{W \cdot nm}$$

această caracteristică e destul de lungă

Patru astfel de traductoare (care au caracteristica de mai sus) se folosesc pt. aliniere cuplate prin elemente piezoceramice.

Litografia cu raze x

Razele x caracteristice apar de ex. într-un atom de Cu:

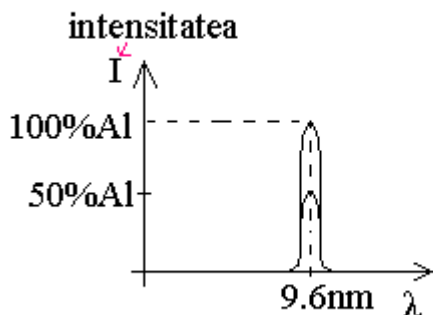
e^- ce se găsește în stare de excitație după ce a primit un impuls



Cuantul de lumină poate excita un electron ce să treacă pe o orbită superioară. Starea aceasta excitată este metastabilă (adică e stabilă 10^{-18} s) după care trece înapoi la locul lui și va emana un cuant de energie $h\nu$ ce este egal cu diferența dintre energiile acestor două orbite. De ex. pt Al la un potențial de accelerare a electronului: $U=20KV$

$$\Rightarrow \lambda_{Al_{K\alpha}} = 9.6nm = 96 \text{ \AA}, \text{ unde } K\alpha \text{ este orbita } K$$

Razele x se formează din analizirul cu raze x. Analizorul cu raze x lucrează astfel:

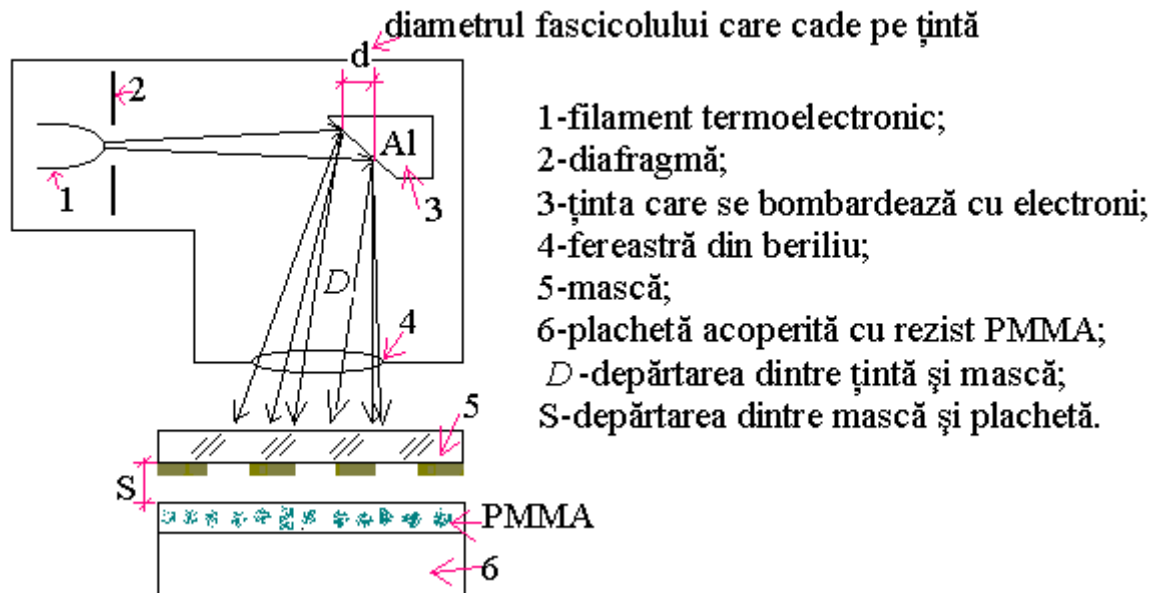


Avem o bucata de Al 100% și se măsoară intensitatea la $\lambda=9.6nm$

Avem de ex. o substanță $Al_xGa_{1-x}As$ și trebuie să găsim valoarea lui x-concentrația Al în acea substanță. Electronul se accelerează cu 20KV spre această peliculă. Unde este Al se emană cu $\lambda=9.6$, unde este Ga este altă λ , și în funcție de intensitate se poate afla procentajul elementului. Ga va emana o altă intensitate și va rezulta că toată substanța va emana o intensitate de 50% => x=50%.

Se poate astfel determina componența chimică a oricărui corp în funcție de componenta spectrală.

Instalația și principiul de lucru al litografiei cu raze x

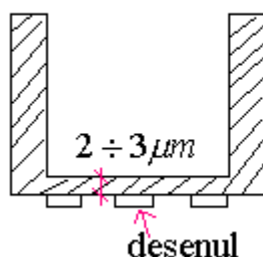


Funcționare:

Filamentul se încălzește și din el iese electronii. Aceștia nimeresc pe ținta de Al, având potențial de 20KV. În unele instalații se întrebuintează ținta sub formă de octaedru, care în timpul lucrului se rotește (electronul având o energie atât de mare când ajunge pe țintă poate să o topească) pt. a se ciocni pe mai multe fețe (în centru este apă pt. răcire).

Mișcarea electronilor se face în vid, de unde trebuie să iasă prin fereastra din Be în aer. Ca urmare din vid ies razele x, prin fereastra din Be (material care nu absoarbe razele x). Masca în acest caz este un material subțire și care nu absoarbe razele x decât în zonele opace. Trebuie să existe însă un material care le absoarbe.

Această mască poate fi realizată din membrane de SiO_2 :



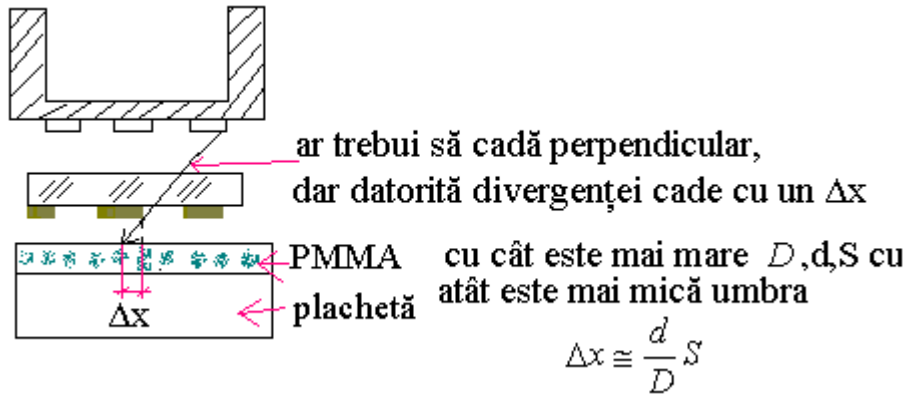
Această membrană nu o putem pune în contact cu placheta deoarece s-ar distruge și se pune la o distanță de $10\mu\text{m}$ (deoarece membrana are o grosime foarte mică ($2 \div 3\mu\text{m}$)). Se întinde o peliculă din polietilenă pe care se execută desenul necesar. Acesta se face dintr-o peliculă de Au care nu dă voie să treacă razele x.

Particularitățile acestei litografii

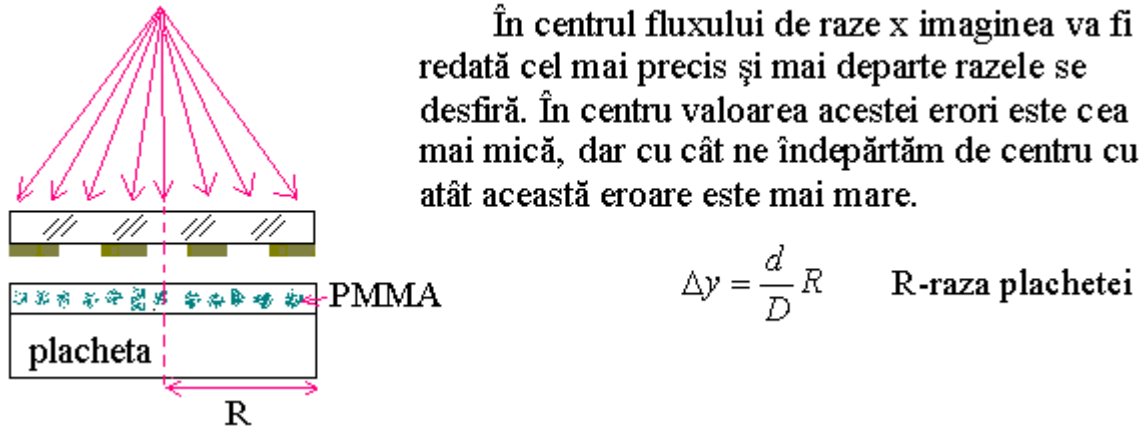
Nu putem obține elemente cu dimensiunile precise la nivelul de λ (precizie la aproximativ $1.09\mu\text{m}$). Cuantul de energie când se absoarbe poate distruge polimerul PMMA pe lături.

Apar unele probleme datorită faptului că λ este atât de mic și nu putem cu ajutorul lentilelor să focalizăm aceste raze x. Aceste raze x cad pe PMMA ca un flux ce se împrăștie divergent și apar erori de formare a desenului: 1- erori geometrice (semiumbră);
2- erori a căror valoare depinde de poziția elementului pe suprafața palchetei.

1-



2-

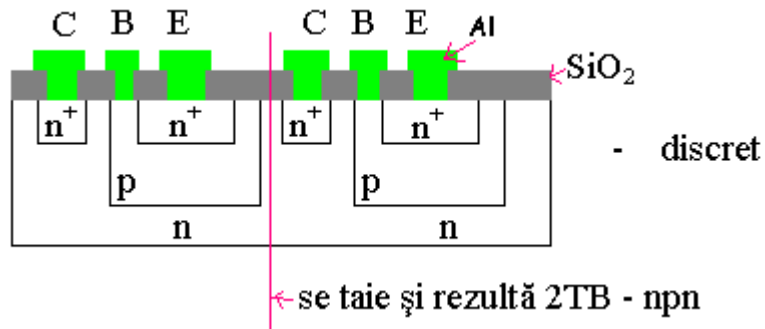


Placheta are diametrul de 200nm, dar fereastra de Be nu se poate face așa mare și nici membrana \Rightarrow nu se poate desena toată placheta odată. Ca urmare se face pe mai multe expuneri.

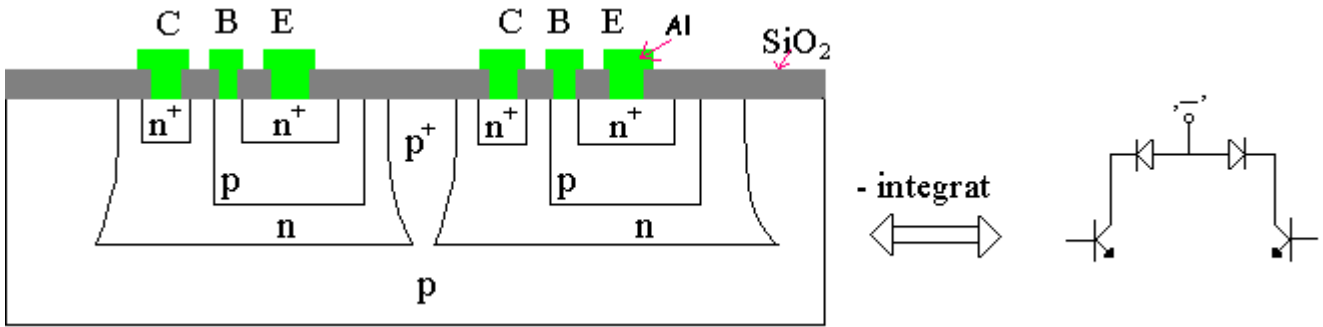
Cap.3 Metode de confecționare a circuitelor integrate cu tranzistoare bipolare

Construcțiile TB: - discrete;
- în cadrul unui CI.

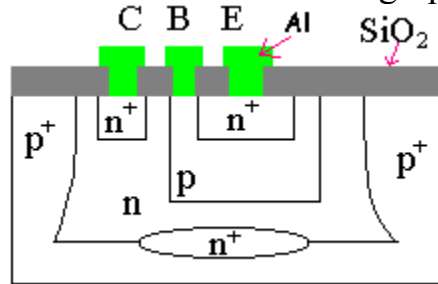
Tehnologia planară: toate contactele E,B,C se află în același plan:



Acești TB au regiunea n⁺ comună, după care se taie cele două TB.



Acești TB sunt izolați prin rezistența diodei polarizată invers.
În mod real TB dintr-un CI este cu strat îngropat:



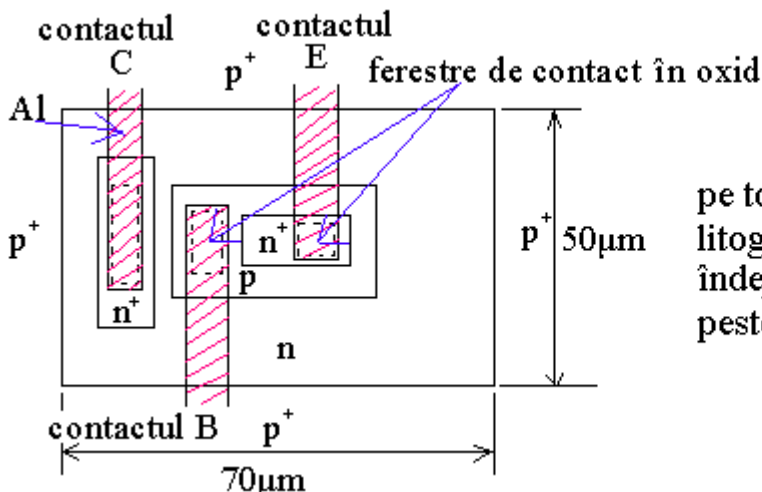
Stratul îngropat are rolul de a micșora rezistența colectorului. Contactele se fac din Al sau alaj Al-Cu. Pelicula de Al depusă trebuie tratată termic pt. o adeziune mai mare (300°C pt. câteva minunte), (Al pătrunde un pic în Si și Si un pic în Al).

Solubilitatea solidă a Al în Si: $N_{S_{(Al)}} = 10^{18} \text{ cm}^{-3} \Rightarrow$ din pelicula de Al de $1 \mu\text{m}$ ar

putea difuza în Si o concentrație de 10^{18} cm^{-3} iar concentrația electronilor în colector:
 $N_{e^{-}(C)} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

Dacă nu am avea stratul puternic dopat la C ($n^{+} \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) s-ar forma o diodă (o joncțiune pn) la contactul cu colectorul (nu ne trebuie).

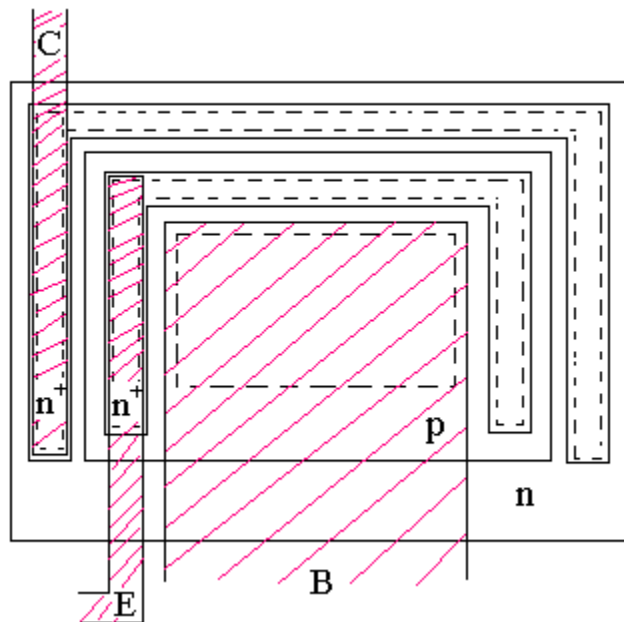
Vedere de sus a TB de mică putere:



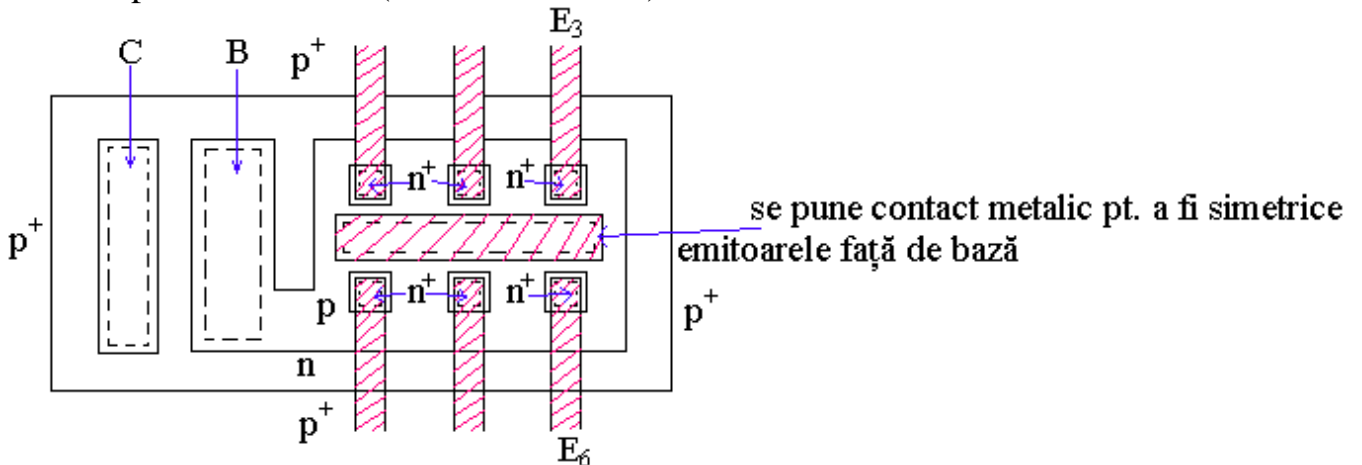
Se depune apoi o peliculă de Al pe toată suprafața, după care cu litografie și cu ajutorul măștii îndepărtăm Al și se lasă doar puțin Al peste ferestrele deschise.

Acum se face tratamentul termic pt. a nu se deschide contactele (se topește puțin din Al pt. a se lipi de Si).

Analizăm construcția unui TB de putere mare:



Dacă TB are dimensiunea $\Phi=200 \times 150 \mu\text{m}$ \Rightarrow o putere de $25 \div 35 \text{mW}$.
 TB pt. circuite TTL (multiemitor – 6E):



Analog se pot face TB cu multe colectoare, dar acestea nu sunt bune.

Metode de izolare a TB în CI

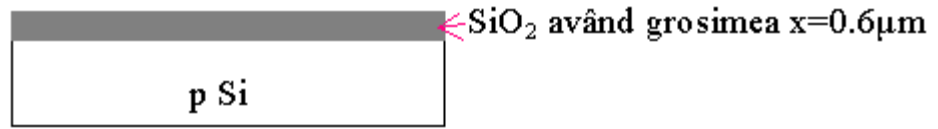
Izolarea poate avea loc:

- 1) cu ajutorul joncțiunii polarizate invers:
 - a) tehnologia standard;
 - b) izolarea cu ajutorul colectorului;
 - c) izolarea cu ajutorul bazei;
 - d) metoda a trei fotomăști (3 FM);
- 2) cu ajutorul dielectricilor: procesul epic;
- 3) izolarea combinată: procesul VIP și procesul IZOPLANAR.

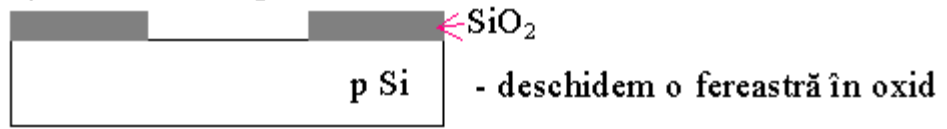
- 1) a) **Tehnologia standard:** se utilizează în proporție de 75% din toate CI cu TB.
 A) Se ia placheta inițială cu orientația (111) Si $D B 10 \Omega \cdot \text{cm}$:
 (operația de spălare se face după fiecare corodare, etc (nu o vom mai preciza))



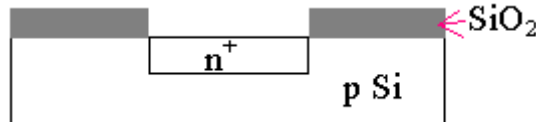
- B) Oxidarea termică a Si (în O_2 uscat, O_2 umed, O_2 uscat):



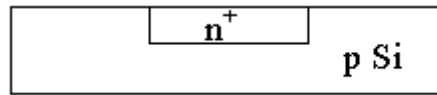
C) Prima fotolitografie (folosim prima FM):



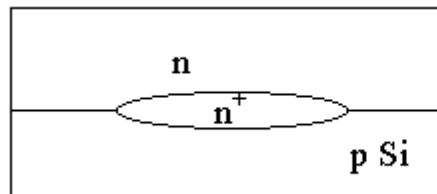
D) Facem difuzia de tipul n⁺: difuzia P din PCl₃+O₂ pt. stratul îngropat, pe care îl facem la o adâncime de 3.5μm, însă acum îl facem la 0.3μm pt. că după următoarele operații acesta va ajunge la adâncimea dorită (3.5μm):



E) Înlăturare lui SiO₂ prin introducerea plachetei în HF:



F) Creștere epitaxială a peliculei de tip n timp de 6 ÷ 10 min. la 1200°C:

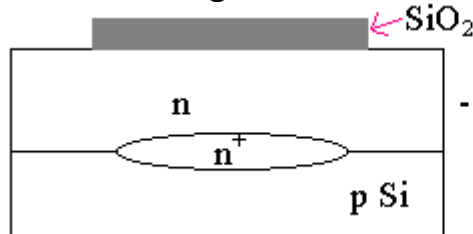


$$N_n = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$x_{\text{pel}} = 6 \div 10 \mu\text{m}$$

⇒ operații pt. obținerea colector

G) Oxidare termică + fotolitografie:

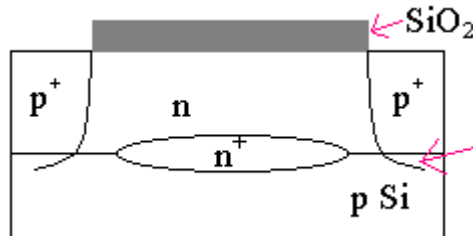


- difuzia în cazul acesta o facem mai adânc, la aproximativ 6μm

$$x_{\text{SiO}_2} = 0.8 \mu\text{m}$$

H) Difuzia de tip p⁺, de izolare, care se face în două etape:

- predifuzia;
- difuzia propriezisă.

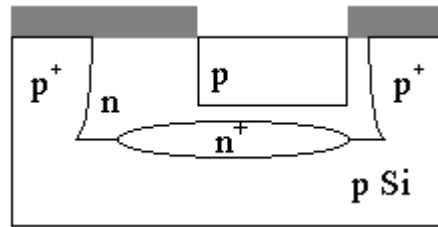


mai bine să treacă puțin în plachetă decât să nu ajungă la plachetă

Dacă de ex. facem difuzie dintr-o sursă semiinfinită, cu cât densitatea este mai mare cu atât capacitatea de barieră va fi mai mare și frecvența de funcționare a TB scade.

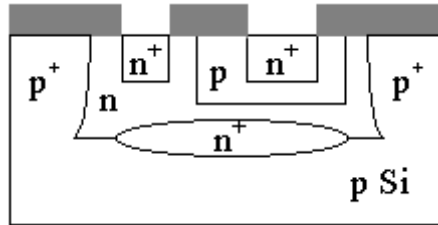
I) Oxidare termică, fotolitografie, difuzia bazei de tip p (Bor):

- fără să mai îndepărtăm SiO₂ de mai înainte, dar nu mai desenăm diferența de nivel a SiO₂:



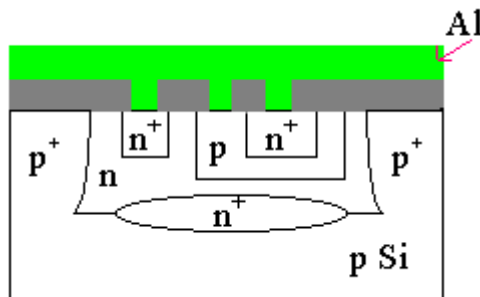
Baza se formează cu ajutorul difuziei în două etape, pt. ca concentrația pe bază să nu fie prea mare pt. că altfel nu mai putem face emitorul cu concentrație mai mare.

J) Oxidare, fotolitografie, difuzia pt. emitor și colector de tip n⁺:

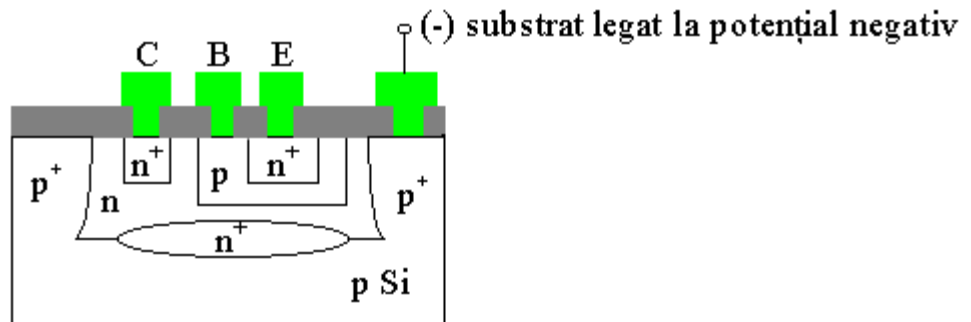


Tranzistoarele npn au o frecvență de lucru mai mare și din această cauză se folosesc mai mult.

K) Oxidare, fotolitografie (ferestre de contact) și depunerea Al pe toată suprafața:



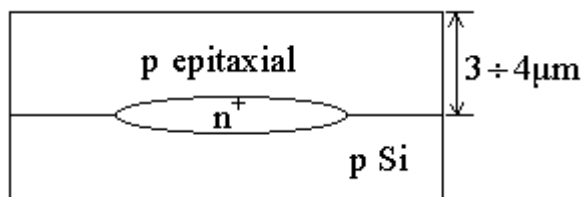
L) Fotolitografie pt. înlăturarea Al care nu ne trebuie:



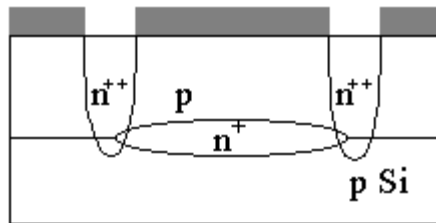
M) Depunerea lui SiO₂ în plasmă pt. pasivizarea circuitului și o fotolitografie pt. desciderea suprafețelor de contact.

b) Metoda de izolare cu ajutorul colectorului

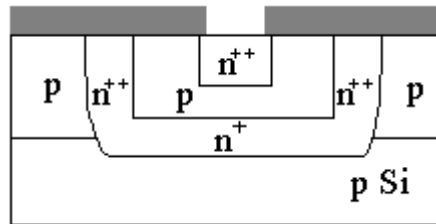
1°) În corespundere cu tehnologia standard (A, B, C, D, E) s-a ajuns la ceșterea peliculei epitaxiale de tip p:



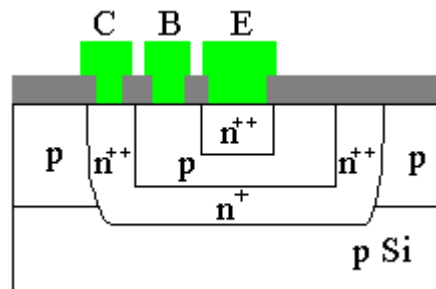
2°) Oxidare, fotolitografie, difuzia impurității n⁺⁺ care să fie în contact cu stratul îngropat n⁺ ⇒ colectorul este format din straturile: n⁺⁺n⁺n⁺⁺:



3°) Oxidare, fotolitografie, difuzia n^{++} pt. emitor:



4°) Tehnologia standard de realizare a contactelor, și rezultă în final tranzistorul:



Avantaje:

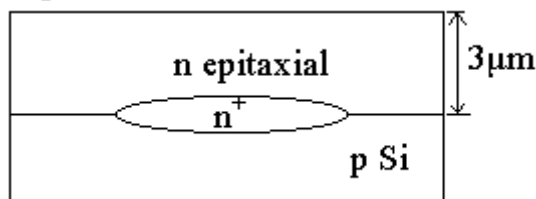
- s-a simplificat nr. de operații tehnologice;
- s-a redus suprafața pt. regiunea de izolare (îndeplinită de colector) și ca urmare se mărește gradul de integrare (nr. de elemente pe o unitate de suprafață).

Dezavantaje:

- colectorul este puternic dopat, are rezistență mică (bun), însă nu putem aplica tensiuni mari (se străpunge), dar poate lucra bine în circuite logice.

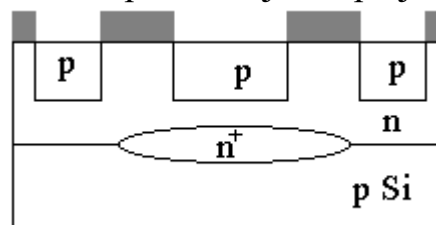
b) Metoda de izolare cu ajutorul bazei

1°) În corespundere cu tehnologia standard (A, B, C, D, E) s-a ajuns la ceșterea peliculei epitaxiale de tip n:

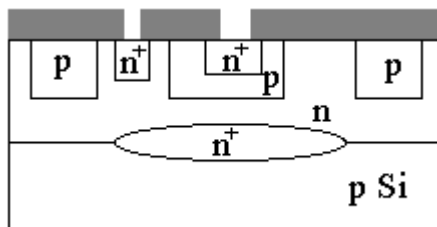


2°) Oxidare, fotolitografie, difuzie de tip p pt. bază:

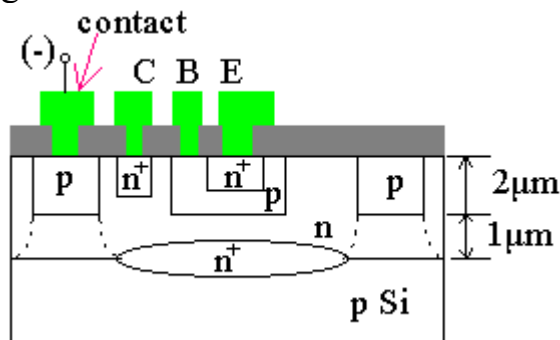
Obs! Regiunea difuzată p este de jur împrejurul tranzistorului.



3°) Oxidare, fotolitografie, difuzie de tip n^+ pt. emitor și colector:



4°) Prin tehnologia standard:



Dacă în continuare ar exista un alt tranzistor ar părea că colectoarele sunt scurtcircuitate (unite) ⇒ izolarea se face aplicând “-” la regiunea p și rezultă că regiunea adâncită se mărește precum și regiunea de izolare.

Avantaje:

- s-a micșorat nr. de operații tehnologice și se micșorează prețul CI;
- nu s-a micșorat gradul de integrare;
- tranzistorul are aceiași parametri ca în tehnologia standard.

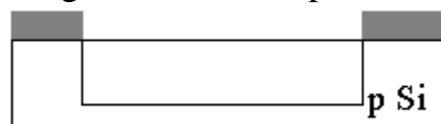
c) **Metoda a trei fotomăști**

Această metodă exclude creștere epitaxială (unde este foarte scumpă instalația).

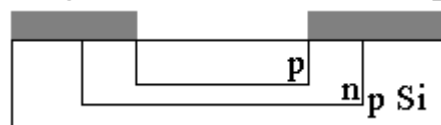
1°) Placheta inițială ca în tehnologia standard:



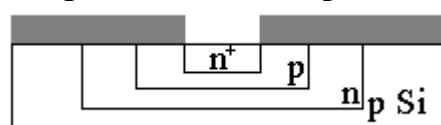
2°) Oxidare, fotolitografie, difuzia n pt. colector:



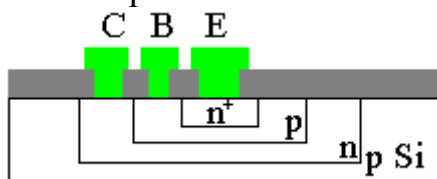
3°) Oxidare, fotolitografie, difuzia bazei de tip p:



4°) Oxidare, fotolitografie, difuzia n+ pt. emitor:



5°) Tehnologia standard pt. contacte:

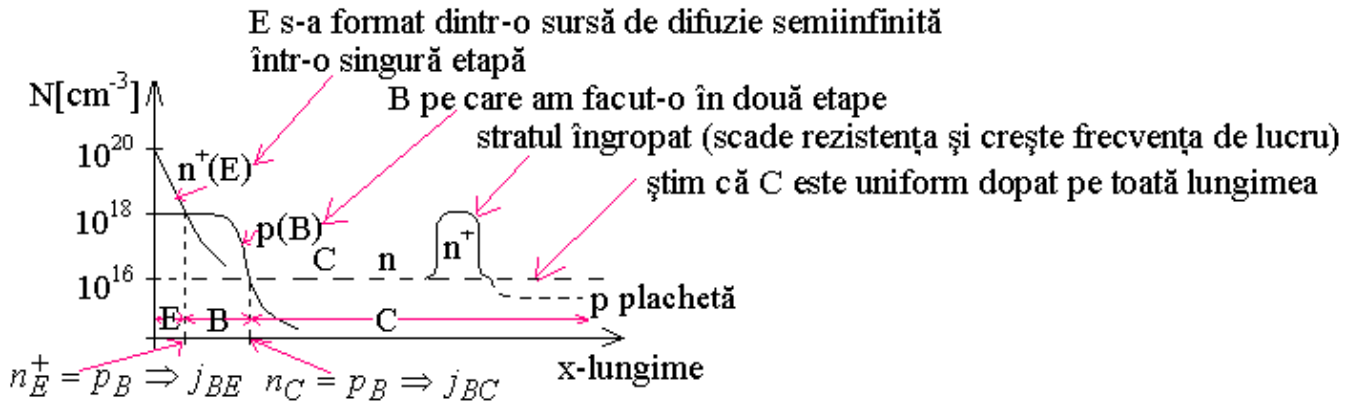


Avantaje:

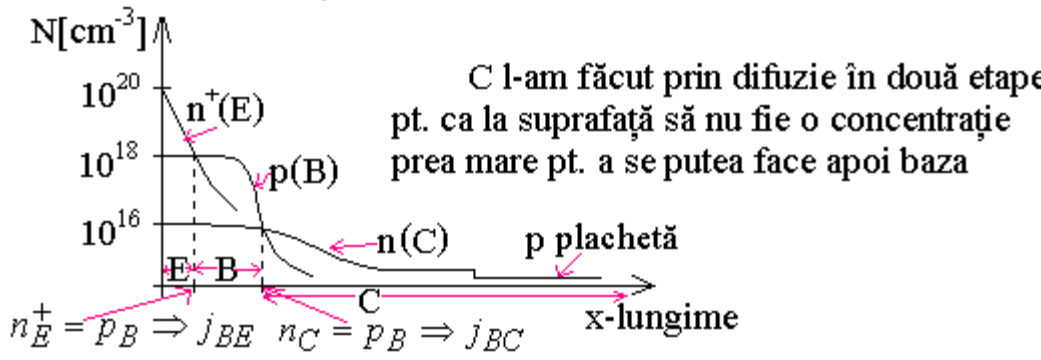
- este cea mai ieftină tehnologie;

- nu avem difuzie de izolare;
- nu mai avem stratul îngropat;
- tranzistoarele pot fi cât mai apropiate unul de altul.

Dacă punem axa de coordonate pe mijlocul emitorului putem determina distribuția concentrației impurităților pt. tehnologia standard și tehnologia celor 3 FM:



În cazul tehnologiei a 3 FM:



Concentrația scade \Rightarrow rezistența se mărește în lipsa stratului îngropat. Datorită gradientului de concentrație la joncțiunea BC apare un câmp ce împinge electronii înapoi în bază și ca urmare acest model este mai slab.

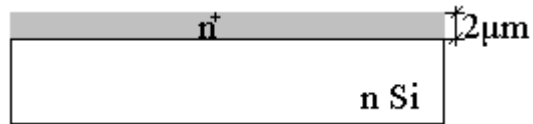
2) **Izolarea cu dielectrici. Procesul epic**

Toate metodele de izolare cu ajutorul joncțiunii pn polarizate invers au un neajuns: între colector și plachetă este dioda polarizată invers și orice diodă are capacitate de barieră. Această capacitate micșorează frecvența de lucru a tranzistorului.

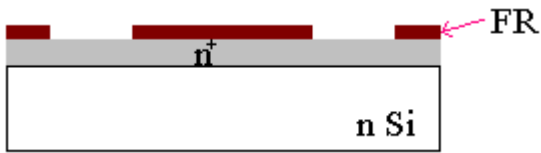
Trebuia micșorată capacitatea de barieră și s-a propus izolarea TB cu ajutorul dielectricului (în loc de garduț de tip p se utilizează un dielectric).

Operațiile de bază:

1°) Fie o plachetă de Si și fie un strat de n^+ depus prin epitaxie sau implantare ionică:

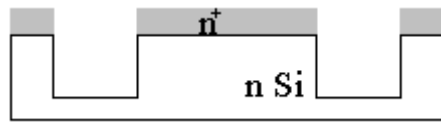


2°) Fotolitografie:

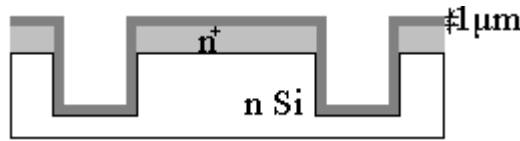


Fotorezistul servește drept mască pt. a face corodări în plachetă.

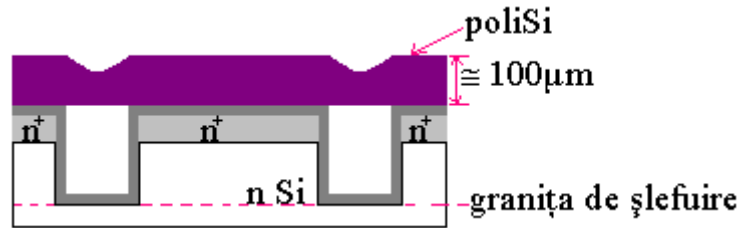
3°) Corodare chimică și înlăturarea FR – lui (în HF, HNO₄):



4° Oxidare termică:

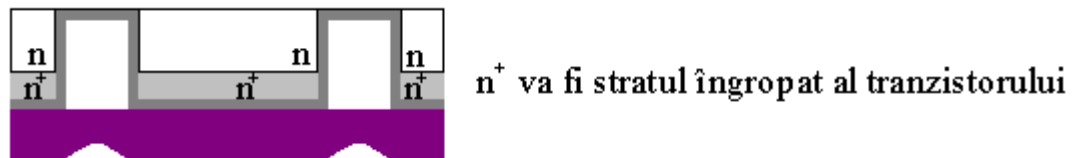


5° Depunerea polisiliciului:

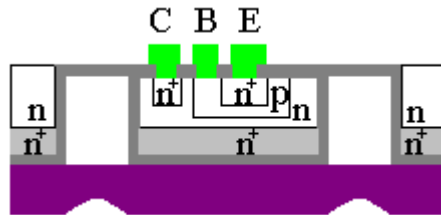


Nu se poate depune monoSi pe SiO₂ căci este o substanță amorfă. Dacă nu se depunea poliSi, prin șlefuire s-ar strica tranzistorul.

6° Întoarcem placheta invers și o șlefuiim:



7° Folosind tehnologia standard în insula din mijloc putem confecționa un tranzistor:



Avantaje față de tehnologia standard:

- este mai bine izolat tranzistorul, deoarece în jurul său este dielectric;
- curenții în dielectric sunt foarte mici $\cong 10^{-12}A$;
- tot există capacități între colector și poliSi, dar este mică;

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_{SiO_2} = 2.5 \div 4 \\ \epsilon_{Si} = 12 \end{array} \right. \Rightarrow \text{capacitatea de barieră va fi mai mică de trei ori și frecvența de}$$

lucru va fi mai mare de trei ori.

Aceste TB se folosesc în înaltă frecvență.

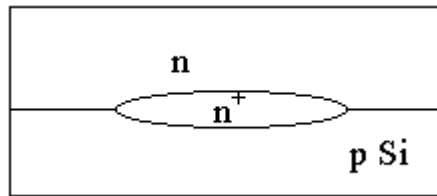
Dezavantaj: este mai acump deoarece șlefuirea cere o foarte mare precizie și efort.

3) **Metoda de izolare combinată** (primele două metode)

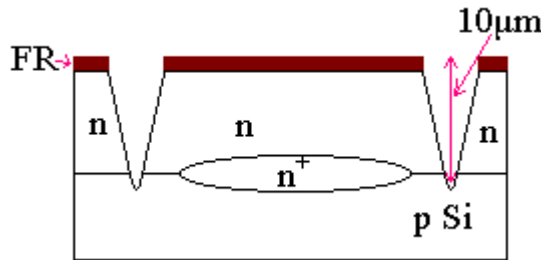
Partea laterală a tranzistorului este izolată cu ajutorul dielectricului iar partea din dos a tranzistorului rămâne izolată cu joncțiunea pn polarizată invers.

Tehnologia VIP

1° Avem placheta inițială ca în tehnologia standard cu deosebirea că placheta are orientarea (100):

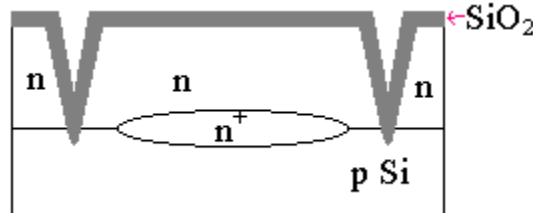


2°) Cu corodant vom realiza găuri sub formă de V \Rightarrow fotolitografie, corodare:



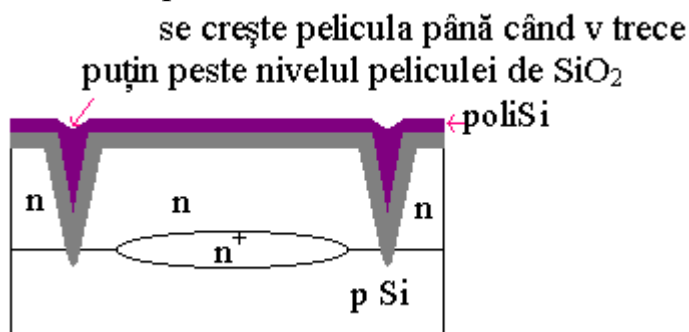
Obs! V ajunge până la plachetă.

3°) Înlăturarea FR – lui , oxidare termică:



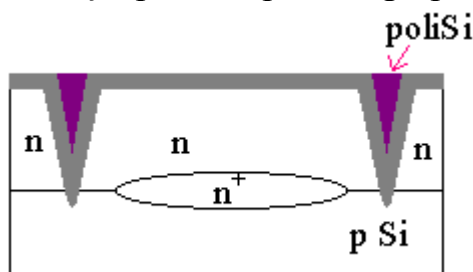
Dacă se face fotolitografie acum și difuzie (1200°C) pt. a forma tranzistorul, FR care se va folosi va cădea în aceste V – uri , iar la 1200°C (pt. difuzie) NO arde și ca urmare se strică tranzistorul. Pt. a evita acest lucru depunem mai întâi un strat de poliSi.

4°) Depunem o peliculă de poliSi:



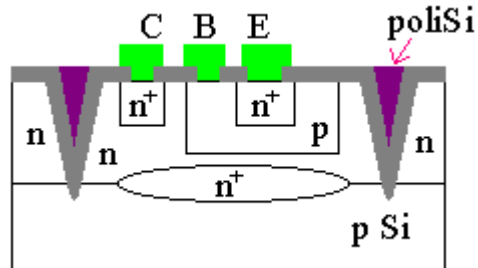
Pelicula de poliSi nu se crește grosă, deoarece gropița sub formă de V se umple mai repede (din ambele părți).

5°) Șlefuire: se șlefuieste până scăpăm de gropițe:



Scopul tuturor acestor noi tehnologii este de a face tranzistor standard, dar cu izolare mai bună.

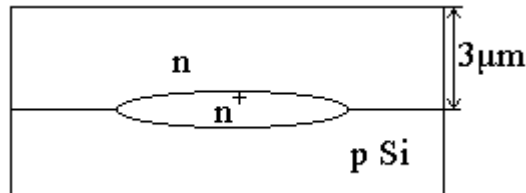
6°) Prin tehnologia standard:



Acest tip de tehnologie este tot complicată, dar mai puțin ca cea EPIC.

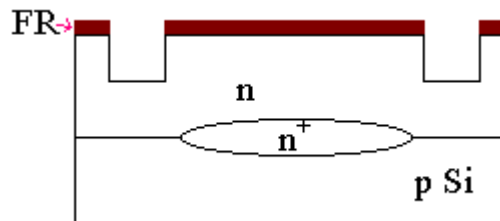
Tehnologia IZOPLANARĂ (cea mai performantă)

1°) Structura inițială este ca în tehnologia standard:



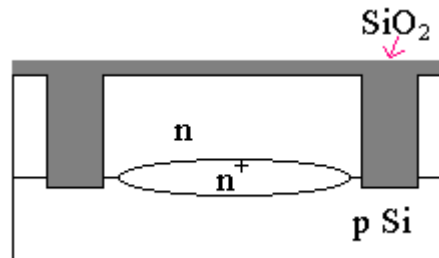
Obs! Se ține cont că creșterea oxidului are loc atât la suprafața plachetei cât și în interior.

2°) Fotolitografie, corodare:



Obs! Se corodează până la jumătate din grosimea stratului epitaxial.

3°) Înlăturarea FR – lui și oxidare adâncă:



Oxidăm adânc, atomii de O₂ pătrund adânc iar atomii de Si se ridică la suprafață umplând găurile. Oxidarea fiind adâncă ajunge până la nivelul stratului îngropat (un pic mai jos).

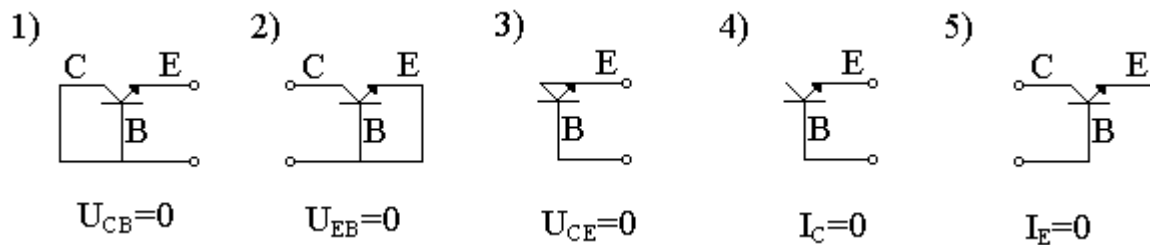
4°) Prin tehnologia standard rezultă tranzistorul.

Nu este atât de scumpă această tehnologie ca celelalte (costul a crescut datorită oxidării mai îndelungate).

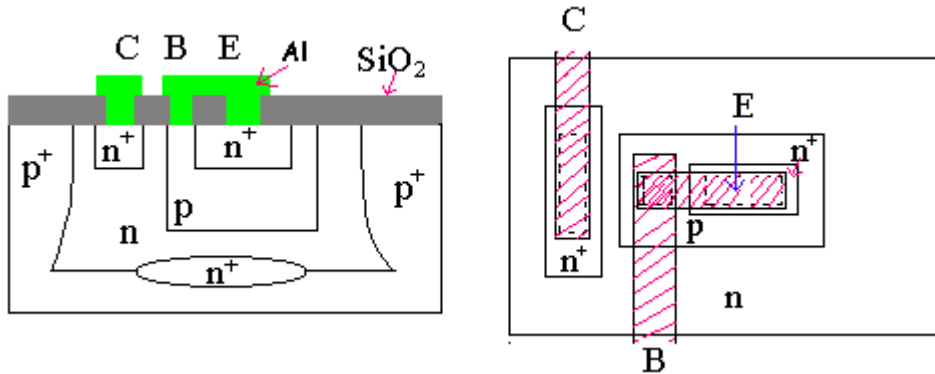
Toate celelalte elemente ale circuitului se fac simultan cu tranzistorul.

5 tipuri de conectare diodică a tranzistoarelor în CI

În CI nu este nevoie de a se confecționa diode speciale. Diodele sunt aceleași structuri ale tranzistoarelor (BE, CB, EC) conectate diodic.



Secțiune prin schema 2) și vedere de sus:



Parametrii diodei: - tensiunea de străpungere;
- capacitatea.

Cum se comportă fiecare schemă la tensiunea de lucru ce este un pic mai mare decât tensiunea de străpungere:

	U_{lucru}	Capacitatea- C_p
Schema 1:	E este puternic dopat $\Rightarrow U_{lmax}=5V$	1000 pF/mm ²
Schema 2:	15V	300 pF/mm ²
Schema 3:	5V	1300 pF/mm ²
Schema 4:	5V	100 pF/mm ²
Schema 5:	15V	300 pF/mm ²

Cap.4 Construcțiile și calculul elementelor în circuitele integrate

Construcțiile și calculul rezistoarelor difuzionate (formate prin difuzie) în CI

În principiu pt. confecționare rezistorului se poate folosi orice regiune a tranzistorului (regiunea emitorului, a colectorului, a bazei). Însă mai des se utilizează regiunea bazei.

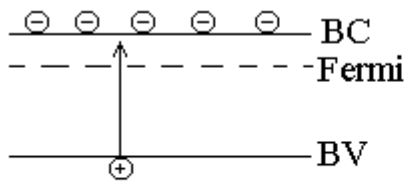
Parametrii rezistorului:

- rezistența ($\Omega, K\Omega$) – R_i ;
- puterea de disipare (pe care poate disipa) – P_i ;
- precizie - $\frac{\Delta R}{R}$;
- coeficient termic de rezistență - $\alpha_R = \frac{R_t - R_0}{R_0 \cdot t}$;

Considerente din care se alege baza pt. construcția rezistorului:

- fie un semiconductor de tip n;
- purtătorii de sarcină (electronii) cu o concentrație oarecare n_0 ;

Dacă semiconductorul se încălzește, se poate excita un electron și trece din banda de valență în banda de conducție \Rightarrow se mărește concentrația electronilor: $n_0 + \Delta n$.



$\sigma = e \cdot n \cdot \mu$, unde e =sarcina electronului;

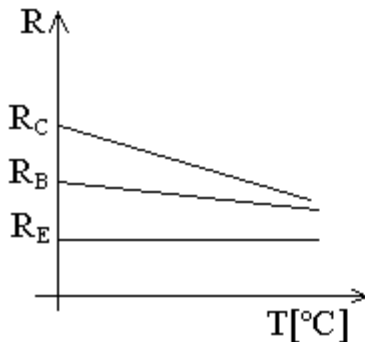
n = concentrația;

μ =mobilitatea.

Rezistivitatea: $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e \cdot n \cdot \mu}$

Când σ crește, ρ scade (la încălzire se micșorează).

Cum se schimbă rezistența unei bucați de semiconductor cu temperatura, având în vedere că:



- concentrația în emitor este $n^+ = 10^{20} \text{ cm}^{-3}$;
- concentrația în bază este $p = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$;
- concentrația în colector este $n = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

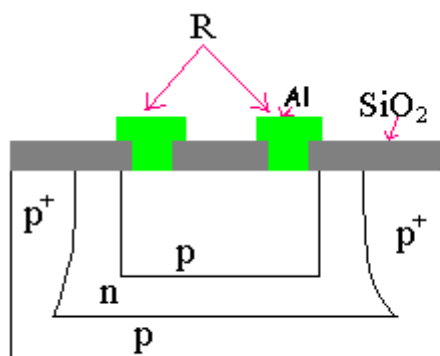
Tăiem o bucată de la emitor și colector, de semiconductor și începem să încălzim; R_E este mai mică deoarece concentrația este mai mare și R_C este cea mai mare pt. că are concentrația cea mai mică.

Surplusul de încălzire Δn este egală peste tot.

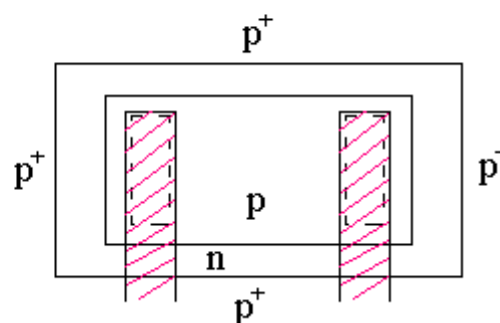
R_E este ct. iar R_C se schimbă puternic cu temperatura \Rightarrow pt. colector: $\alpha_R = \text{mare}$, iar pt. emitor: $\alpha_R = \text{mică}$.

În regiunea emitorului se pot implementa rezistoare cu valori de până la zeci de Ω (rezistență mică / suprafață). În regiunea colectorului nu se implementează rezistoare deoarece în această zonă parametrul $[R/S]$ are coeficient de variație cu temperatura. De aceea se folosește regiunea bazei pt. că răspunde mijlociu cerințelor de temperatură și rezistență.

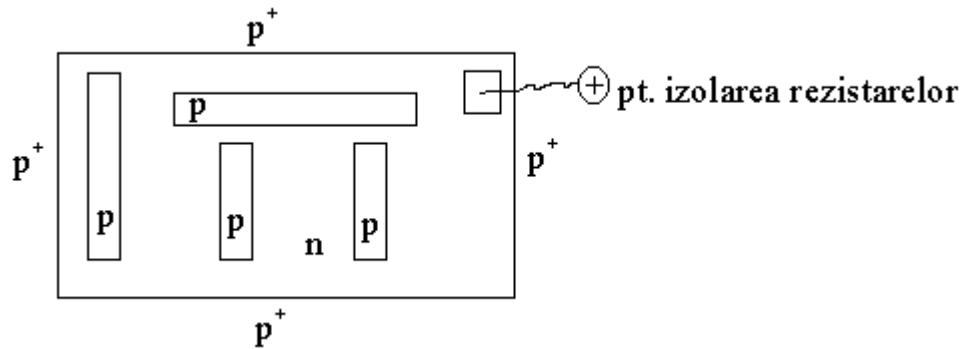
Desenăm un rezistor cu utilizarea regiunii bazei:



vedere de sus (topologie):

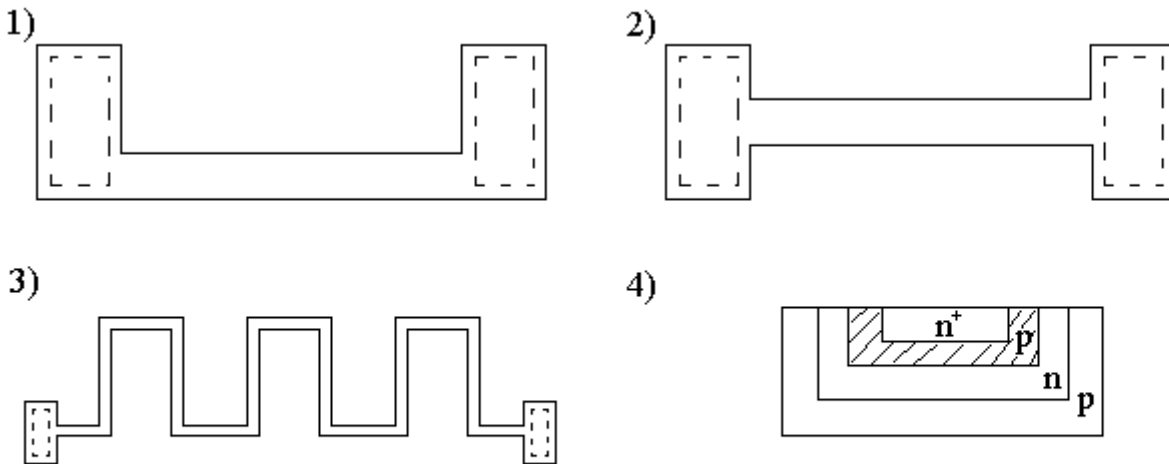


De obicei în CI se dorește ca orice rezistor să fie așezat într-o insulă izolată comună.



Pt. ca rezistorul să fie izolat trebuie ca într-un punct al regiunii izolate să avem un potențial pozitiv. De aceea rezistoarele trebuie să fie toate la un loc ca să avem numai un singur fir la care să fie potențial pozitiv și nu câte un fir pt. fiecare rezistor.

Diferite construcții de rezistoare:



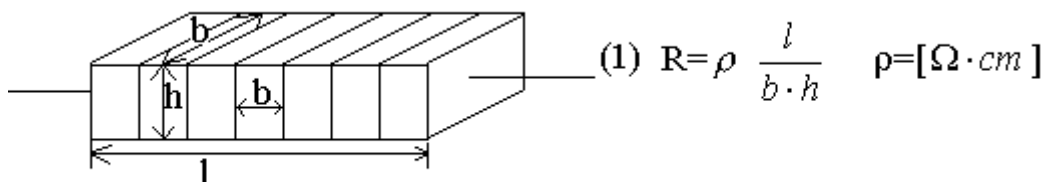
- construcție de tip “meandru” - rezistență ciupită – rezistor Pinch (are valori de sute de $K\Omega$ și o precizie de $\pm 100\%$)
(ca să nu fie întins pe tot circuitul)

Pt. a proiecta topologia acestui circuit:

- se analizează circuitul și se calculează puterea de disipare a fiecărui rezistor;
- interesează și toleranțele (în cel mai bun caz putem lua $\Delta R/R=20\%$);
- ΔT = intervalul de temperatură de exploatare a circuitului integrat= $[-20^\circ C \div +40^\circ C]$.

Având acești parametri, putem proiecta fiecare rezistor în cadrul CI (se determină dimensiunile geometrice).

Pt. calcule se introduce o nouă valoare: rezistivitate specifică pe suprafață.



1 – suprafața secțiunii transversale la trecerea curentului;

Toate rezistoarele formate în cadrul unui circuit au aceeași adâncime (adâncimea este ct. pt. toate rezistoarele).

$$(2) \quad \rho_s = \frac{\rho}{h}, \quad (1), (2) \Rightarrow R = \rho_s \frac{l}{b} \quad (3), \text{ unde } \rho_s \text{-rezistivitate la suprafață.}$$

Dacă în relația (3) facem $l=b \Rightarrow$ suprafața este un pătrat și atunci $R=\rho_s$;

$$[\rho_s]_{SI} = \frac{\Omega}{\text{patrat}}; \quad (4) \quad K_f = \frac{l}{b} = \text{coeficientul de formă}, \Rightarrow \mathbf{R} = \rho_s \cdot \mathbf{K}_f \quad (5) - \text{formula pt.}$$

determinarea rezistivității.

$$\text{Se știe că } \rho_s \text{ pt. bază este: } \rho_s(B) = 300 \frac{\Omega}{\text{patrat}}.$$

Dacă de ex. avem nevoie ca $R_i = 3 \text{ K}\Omega \Rightarrow K_f = 10 \quad (l=10b)$.

Obs! Puterea de disipare este direct proporțională cu mărimea rezistorului.

Trebuie să găsim mai întâi lățimea rezistorului pt. ca să ne satisfacă cerințele de: putere, toleranță:

$$b_{\text{cal}}(\text{culat}) \geq \max \{ b_{\text{teh}}(\text{nologie})(3 \mu\text{m}), b_{\Delta}(\text{precizie})(5 \mu\text{m}), b_p(\text{utere})(7 \mu\text{m}) \} \quad (6)$$

b_{teh} = lățimea minimă a rezistorului care poate fi confecționată astăzi, reproductibil = $3 \mu\text{m}$.

b_{Δ} = cu cât este mai mare lățimea rezistorului cu atât este mai precis.

Din (4)

$$\Rightarrow \frac{\Delta K_f}{K_f} = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta b}{b}$$

$$\Delta l = \Delta b = \text{erorile absolute a dimensiunii lor rezistorului} = 0.1 \mu\text{m} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$l = b_{\Delta} \cdot K_f$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta K_f}{K_f} = \frac{1}{b_{\Delta}} \left(\frac{\Delta l}{K_f} + \Delta b \right) \Rightarrow b_{\Delta} = \left(\frac{\Delta l}{K_f} + \Delta b \right) \cdot \frac{K_f}{\Delta K_f} \quad (7) \quad - \text{formula pt.}$$

determinarea lățimii maxime a rezistorului care satisface cerințele de precizie.

Dar din (5)

$$K_f = \frac{R}{\rho_s} \Rightarrow \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho_s}{\rho_s} + \frac{\Delta K_f}{K_f} + \alpha_R \cdot \Delta T, \quad (8), \text{ unde } \alpha_R = 10^{-4} [^{\circ}\text{C}]^{-1}, \Delta T - \text{ales din}$$

proiectare, și rezistența se poate schimba dacă T se schimbă, $\Delta R/R = 0.2$,

$\Delta \rho_s/\rho_s = 0.05 \div 0.1 =$ eroarea relativă a rezistivității specifice (depinde de concentrația la suprafață, stabilitatea temperaturii, adâncimea joncțiunii)

$$\Rightarrow (9) \quad \frac{\Delta K_f}{K_f} = \frac{\Delta R}{R} - \frac{\Delta \rho_s}{\rho_s} - \alpha_R \cdot \Delta T \rightarrow \text{nu trebuie să rezulte valoare negativă.}$$

$$(7), (9) \Rightarrow b_{\Delta}.$$

Trebuie să aflăm b_p : $P_0 = \frac{P_i}{S}$ = puterea disipată de o unitate de suprafață a

Si=0.5 ÷ 3 $\frac{W}{mm^2}$ (se alege valoarea funcție de capsulă: din plastic - $P_0 = 0.5 \frac{W}{mm^2}$,
metalică - $P_0 = 3 \frac{W}{mm^2}$, cele din ceramică, sticlă se situează în intervalul [0.5 ÷ 3].

$$P_0 = \frac{P_i}{S} = \frac{P_i}{l \cdot b_p} \xrightarrow{(4)} \frac{P_i}{K_f \cdot b_p^2} \Rightarrow b_p = \sqrt{\frac{P_i}{P_0 \cdot K_f}} \quad (10) \text{ - formula pt. determinarea}$$

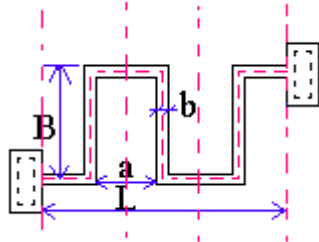
lățimii rezistorului ca să ne satisfacă cerințele de disipare a căldurii.

După ce am găsit cu cât este egal $b_{cal} \Rightarrow l = b_{cal} \cdot K_f$ - în acest fel putem determina lățimea rezistoarelor dreptunghiulare.

Rezistor de tip meandru:

pt. $R=30 K\Omega \Rightarrow K_f=100$, $\rho_s(B)=300 \frac{\Omega}{patrat}$.

Meandru trebuie comprimat, altfel va ocupa aproape toată suprafața chip-ului.



Se împarte în segmente de tipul Z. În cazul nostru avem $3Z=n=nr.$ de segmente sub forma Z; l_{mij} =lungimea liniei ce trece prin mijlocul rezistorului.

$$L = n(a + b) \quad (1)$$

$$l_{mij} = n(a + B) \quad (2) \Rightarrow B = \frac{l_{mij} - n \cdot a}{n} \quad (3)$$

Dacă $L=B$ (rezistorul ocupă cea mai mică suprafață dacă el este înscris într-un

pătrat) $\Rightarrow n(a + b) = \frac{l_{mij} - n \cdot a}{n} \Rightarrow n^2(a + b) + n \cdot a - l_{mij} = 0$

$$\Delta = b^2 - 4ac = a^2 - 4(a+b)l_{mij}$$

$$\Rightarrow n_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{\Delta}}{2a} = \frac{-a \pm \sqrt{a^2 + 4(a+b)l_{mij}}}{2(a+b)} =$$

$$= \frac{-a}{2(a+b)} \pm \sqrt{\frac{a^2}{4(a+b)^2} + \frac{l_{mij}}{a+b}}$$

Notez: $\frac{a}{b} = y \Rightarrow n_{1,2} = -\frac{y}{2(y+1)} + \sqrt{\frac{y^2}{4(y+1)} + \frac{l_{mij}}{b}}$, primii doi termeni au valoare

mică și putem să-i neglijăm $\Rightarrow n = \sqrt{\frac{l_{mij}/b}{y+1}} = \sqrt{\frac{K_f}{y+1}}$, însă adesea $\underline{a=b}$

$$\Rightarrow n = \sqrt{\frac{K_f}{2}} = \sqrt{50} \cong 7 \text{ segmente (pt. } K_f=100).$$

De ex. calculați un rezistor meandru:

$$R_i=28 \text{ K}\Omega \quad \alpha_R = \frac{R_t - R_0}{R_0 \cdot t} = 10^{-4}$$

$$P_i=5 \text{ mW} \quad \Delta T=(-20 \div 40^\circ\text{C})=60^\circ\text{C}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = 20\%$$

$$K_f = \frac{R_i}{\rho_s} = \frac{28 \text{ K}\Omega}{300 \frac{\Omega}{\text{patrat}}} \cong 93$$

$$n = \sqrt{\frac{K_f}{2}} = \sqrt{46} \cong 7 \text{ segmente}$$

$$\frac{\Delta K_f}{K_f} = \frac{\Delta R}{R} - \frac{\Delta \rho_s}{\rho_s} - \alpha_R \cdot \Delta T = 0.2 - 0.1 - 60 \cdot 10^{-4} \cong 0.1$$

$$b_\Delta = \left(\frac{\Delta l}{K_f} + \Delta b \right) \cdot \frac{K_f}{\Delta K_f} = \left(\frac{0.1}{0.3} + 0.1 \right) \frac{1}{0.1} \cong 1 \mu\text{m}$$

$$b_p = \sqrt{\frac{P_i}{P_0 \cdot K_f}} = \sqrt{\frac{5 \text{ mW}}{0.5 \frac{\text{W}}{\text{mm}^2} \cdot 93}} = \sqrt{\frac{5 \cdot 10^{-3}}{46.5}} \cong 10 \mu\text{m}$$

$$l_{mij} = b \cdot K_f = 10 \cdot 93 = 930 \mu\text{m}$$

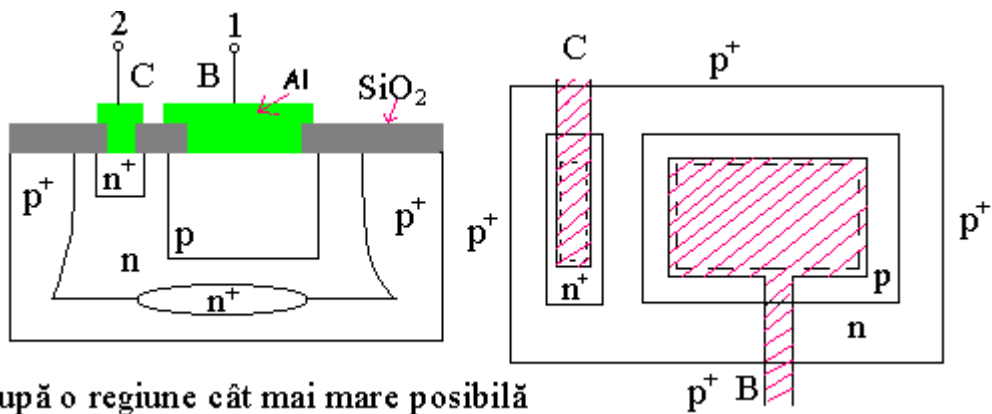
$$L = n(a+b) = 2 \cdot a \cdot n = 2 \cdot 10 \cdot 7 = 140 \mu\text{m}$$

$$B = \frac{l_{mij} - n \cdot a}{2} = \frac{930 - 70}{7} = \frac{860}{7} = 123 \mu\text{m}$$

Construcțiile și calculul condensatoarelor în CI

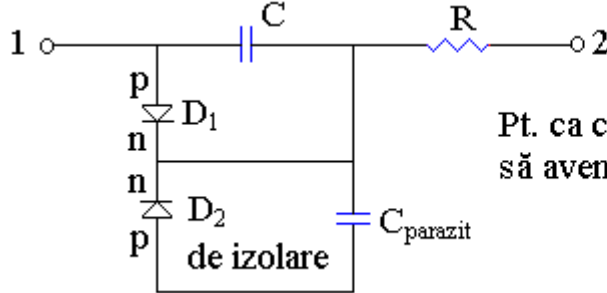
În calitate de condensator se folosește capacitatea de barieră a jonțiunii pn a tranzistorului bipolar. Poate fi utilizată jonțiunea: E-B, B-C, C-E sau C-Body(placheta), însă numai una din acestea poate fi utilizată.

Desenăm un condensator ce folosește drept capacitate de barieră C_{BC} :



Al ocupă o regiune cât mai mare posibilă

Cu cât rezistența plăcilor este mai mare cu atât factorul de calitate este mai mic.
Schema echivalentă mergând din punctul 1 în 2 :

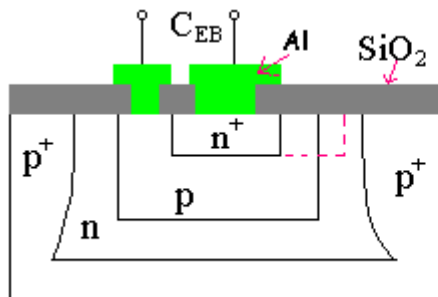


Pt. ca condensatorul să fie de barieră trebuie să avem la 1 “-“ și la 2 “+”.

Pt. ca condensatorul să fie bun trebuie ca $\frac{C}{C_{parazit}} = 7 \Rightarrow$ un factor de calitate scăzut

pt. că avem rezistențe mari.

Dacă considerăm C_{EB} :



dacă este cu linia punctat $\Rightarrow C_{EC-B}$

Parametrii condensatorului: - tensiunea de lucru;
- capacitatea unității de suprafață.

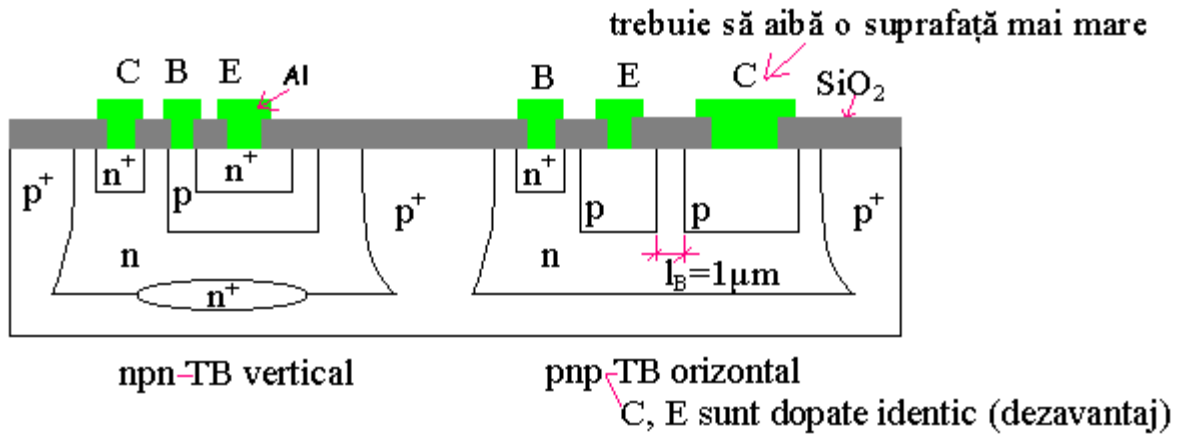
	C_{EB}	C_{CB}	C_{EC-B}	$C_{C-plachetă}$
U_1 (V)	5	15	5	75
C_0 ($\frac{pF}{mm^2}$)	1000	300	1300	150

Calculul: - funcție de suprafață:

$$S_{C_{BC}} = (S_B + S_{laterală}) \cdot C_0$$

Metode de formare a structurilor npn/npn

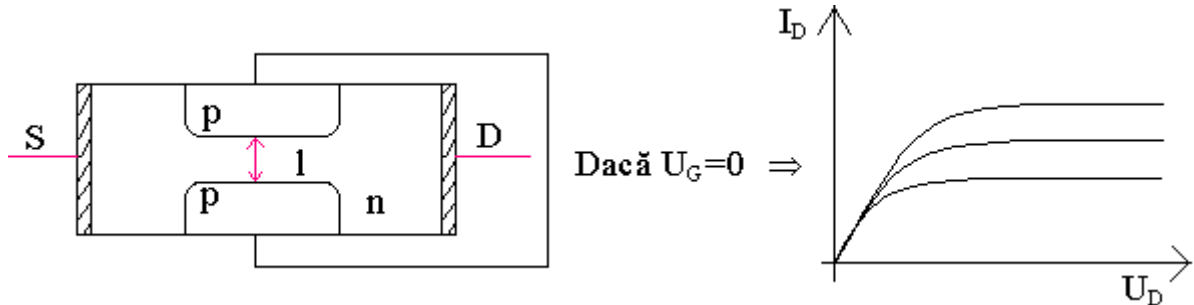
Se are în vedere tehnologia standard până aici. În cadrul aceluiași CI ar trebui să existe două tranzistoare:



Tehnologia I²L folosește acest tip de realizare a tranzistorului vertical și a tranzistorului orizontal.

TEC (tranzistoare cu efect de câmp) în CI și metode de confecționare

Structura unui TEC-J:



Dacă dăm un potențial de -1V la G, se mărește RSS (regiunea sărăcită), canalul se îngustează (l se micșorează), rezistența se mărește iar curentul scade.

Există două metode de confecționare a tranzistoarelor TEC:

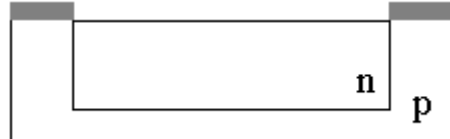
- 1°) metoda difuziei duble;
- 2°) metoda creșterii epitaxiale și a difuziei.

1°) Metoda difuziei duble

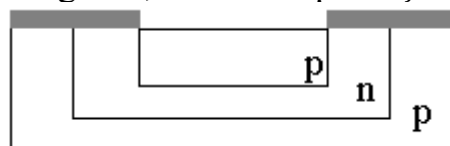
a) Fie o plachetă de tip p cu o concentrație mică: $N_A=10^{15}\text{cm}^{-3}$ (slab dopată):



b) Oxidare, fotolitografie, difuzia impurității de tip n:

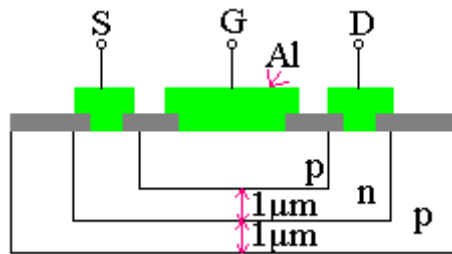


c) Oxidare, fotolitografie, difuzia impurității de tip p:



Structura TEC este aproximativ gata, mai trebuie să-I mai facem contactele.

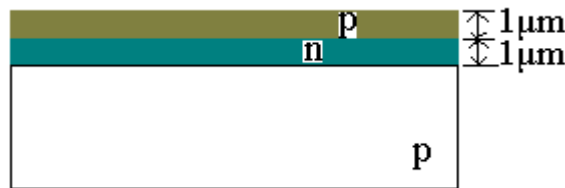
d) Tehnologia standard, oxidare, fotolitografie, deschidem ferestre de contact, etc:



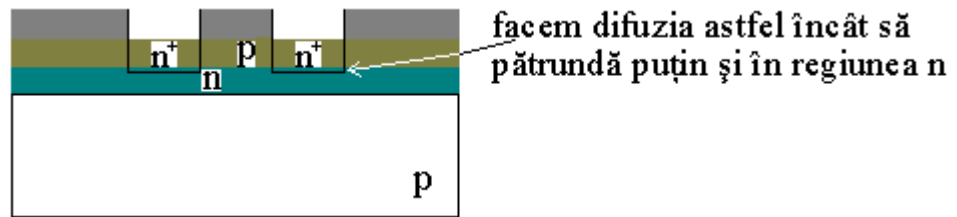
Acest tranzistor nu cere izolație specială pt. că regiunea p este slab dopată și are rezistență mare. Ca urmare acest tranzistor poate să nu mai fie izolat (ajunge izolarea pe care o are).

2°) **Metoda creșterii epitaxiale și a difuziei**

a) Fie o plachetă de tip p de Si, pe care s-a crescut un strat de tip n de 1 μm. După care dăm drumul în instalație la impurități de tip p și creștem încă un strat de tip p de 1 μm.

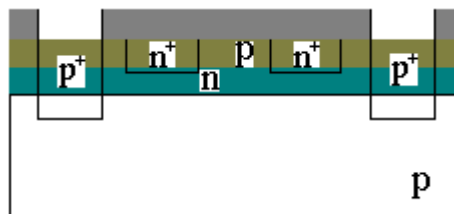


b) Facem o fotolitografie, difuzie pt. a pune contactele pt. S și D și o difuzie de tip n⁺:



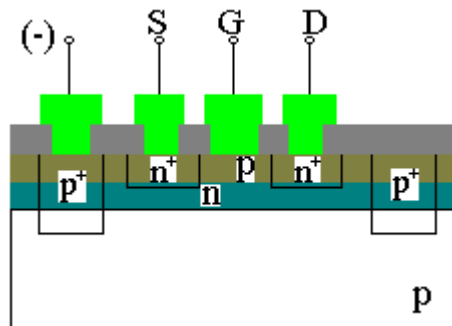
Acest tranzistor nu poate fi utilizat încă în CI deoarece are toate canalele unite. Trebuie să facem o difuzie de tip p pe margini pt. a izola.

c) Oxidare, fotolitografie, difuzie de tip p⁺:



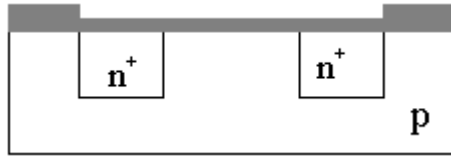
Această difuzie laterală se numește inel de gardă.

d)

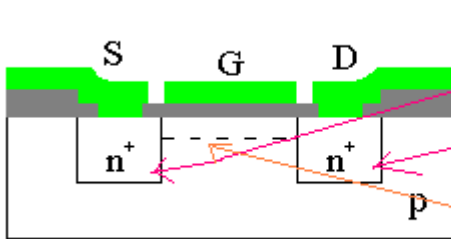


Doar la un inel de gardă facem un contact.

Depunerea peliculelor n și p au fost realizate prin epitaxie, numai regiunile n⁺ și p⁺ au fost realizate prin difuzie. Canalul este uniform.

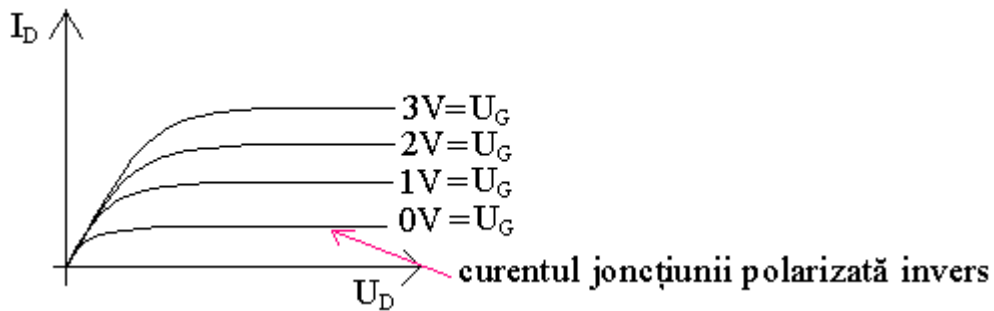


5°) Tehnologia standard:

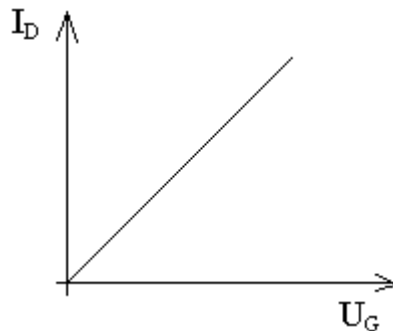


dacă punem pe D (+) și S (-) \Rightarrow joncțiunea pn este polarizată direct și are rezistență mică iar joncțiunea pn este polarizată invers și are rezistență mare \Rightarrow suma a două rezistențe (una mare+una mică)= rezistență mare
a apărut canalul când am aplicat (+) pe regiunea p

Curentul în acest caz va fi:



Caracteristica de transfer la MOS:

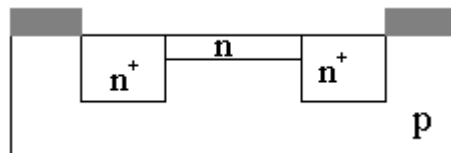


Tranzistorul poate funcționa numai în regim de îmbogățire a canalului cu purtători de sarcină.

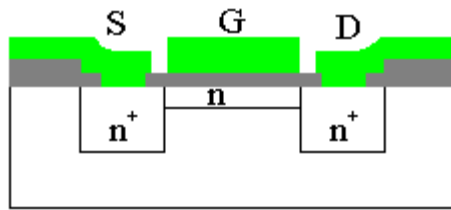
MOS cu canal inițial prezintă performanțe mai mari (funcționează și în regim sărăcit și în regim îmbogățit)/

1°, 2°) identic ca n MOS.

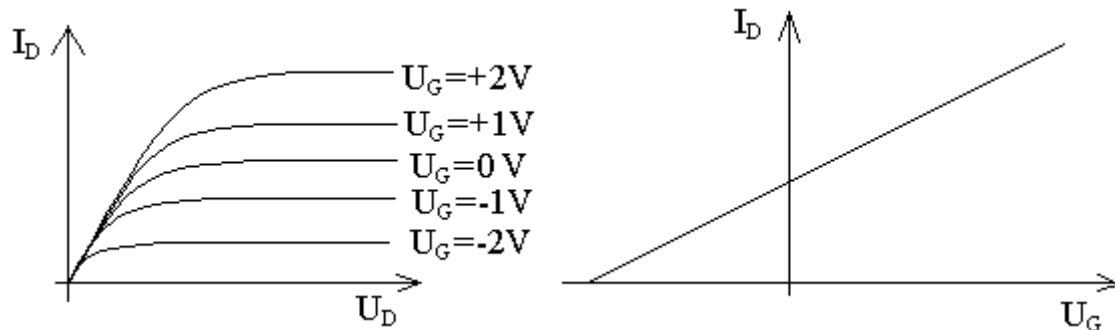
3°) Difuzie de tipn a canalului inițial (în tehnologia VLSI se face implantare ionică):



3°, 4°, 5°) identic \Rightarrow în final:



Cu o operație în plus s-a îmbunătățit semnificativ performanțele.
Caracteristica de ieșire și caracteristica de transfer:



Cap.5 Tehnologia circuitelor integrate hibride (CIH)

Există două tipuri de CIH:

- cu peliculă subțire (câteva sute de Å);
- cu peliculă groasă.

Deosebirea principală constă în modul de confecționare a acestor circuite. Un CIH este un suport dielectric pe suprafața căruia sunt depuse elemente pasive (rezistoare, condensatoare, bobine, trasee de interconectări) cu unirea de mai departe a elementelor active (diode, tranzistoare, chip-uri). Prin metodele de astăzi se depun elementele pasive și apoi se conectează cele active. Plăcile de cablaj imprimat au doar trasee și pe acestea se conectează elementele.

În principiu peliculele subțiri se depun prin vaporizare termică în vid, prin pulverizarea în plasmă (metalice (conductoare), rezistive, dielectrice). Configurația acestor pelicule se face cu ajutorul măștilor.

La baza CIH cu pelicule groase stau așa numitele paste (pastă conductoare, rezistivă, dielectrică). Aceste paste conțin materiale deficitare: Au, Pt. Principala problemă este că aceste paste nu se depun în vid și se pot depune în atmosferă, deoarece CIH sunt cele mai ieftine circuite. Însă având în vedere că sunt confecționate pe suport dielectric, deci au capacitatea dintre elemente mică, de aceea pot funcționa la frecvențe mai înalte decât CI monolite.

Suportul pt. CIH. Metode de purificare și control

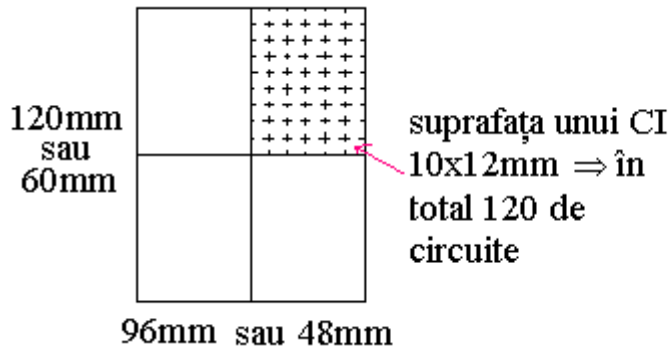
Cerinte față de suportul CIH:

- suportul nu trebuie să conțină pori, pt. că la depunerea în vid a peliculelor, din acești pori se poate degaja aerul absorbit pt vid;
- suprafața trebuie să fie destul de netedă pt. a putea folosi procesele de fotolitografie;
- materialele suportului trebuie să aibă o rezistivitate mare pt. izolarea elementelor;

- suportul trebuie să aibă o conductibilitate termică înaltă pt. a disipa căldura de la elementele circuitului integrat;
- materialul trebuie să fie ieftin pt. a produce circuite în masă.

Materiale folosite pt. suporturi:

- sticla (dar este destul de fragilă și conductibilitatea termică nu este atât de bună);
- 96% Al_2O_3 (4% alți oxizi) – aceste suporturi pot avea dimensiuni: 96/120 sau 48/60.



Orice circuit trebuie să aibă dimensiuni astfel încât să aibă un nr. concret de elemente și să nu rămână spații libere pe plachetă.

- Be_2O_3 – cel mai bun suport, deoarece are o conductibilitate termică foarte bună și $\rho = 10^{18} \Omega \cdot cm$ și corespunde tuturor cerințelor, dar nu se folosește pt. că Be este o substanță otrăvitoare (culoare roșu închis);
- astăzi se folosesc suporturi din duraluminiu, pe suprafața căruia se depune o peliculă groasă de Al_2O_3 .

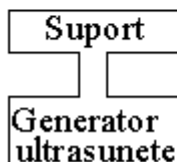
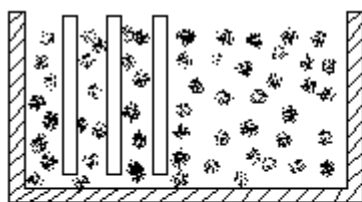
Confecționarea suportului

De ex. dacă avem 96% Al_2O_3 și există fire de praf pe suprafață, Al_2O_3 se amestecă, se toarnă într-o formă de sticlă, se usucă și se arde la 2200°C.

Altă metodă este prin presare la presiuni de 50 ÷ 80atm.

Purificarea suportului cu ultrasunete

În condiții de uzină într-un vas se pune placheta și apoi se toarnă o substanță organică (acetona). Vasul îl punem pe o măsuță conectată la un generator de ultrasunete. În acest vas se formează niște vibrații care corodează de pe suprafața plachetei impuritățile.



Trebuie verificat dacă placheta este purificată destul. Aceasta se face astfel: se ia apă deionizată, se introduce placheta în apă și dacă apa umezește toată suprafața plachetei înseamnă că aceasta este curată.

Având în vedere că CIH cu pelicule subțiri se obțin în vid trebuie să știm cum se obține vidul.

Metode de obținere a vidului

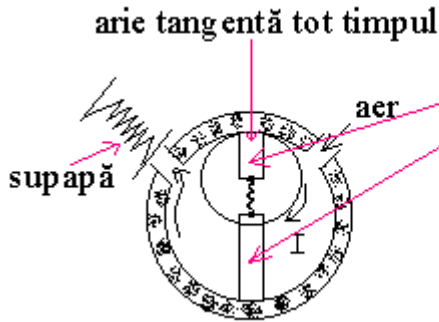
Presiunea atmosferică are 760mmHg. Pt. a depune o peliculă în vid se cere un vid cu o presiune de 10^{-6} mmHg, adică de câte ori trebuie să fie răcită atmosfera pt. a se obține vid. Pt. a se obține vid se folosesc pompe mecanice și pompe difuzionice.

Obs! La epitaxie 10^{-12} mmHg.

Construcțiile și principiul de funcționare a pompelor mecanice

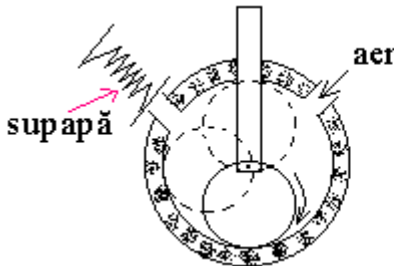
Sunt două tipuri de pompe: - cu plăci rotitoare;
- cu plăci staționare.

Pompa cu plăci rotitoare:



2 plăci intră în interiorul cilindrului.
Axa cilindrului este într-un motor electric.
Aerul intră în prima cameră a pompei.
Centrul cilindrului corespunde cu centrul axei.
Se rotește cilindrul, aerul se comprimă până ajunge unde este supapa și aerul iese în afară.

Pompe cu plăci staționare



Cilindrul se rotește și la un moment dat poziția lui se va schimba și placheta va fi mai sus și volumul aerului scade.

Placa este staționară.

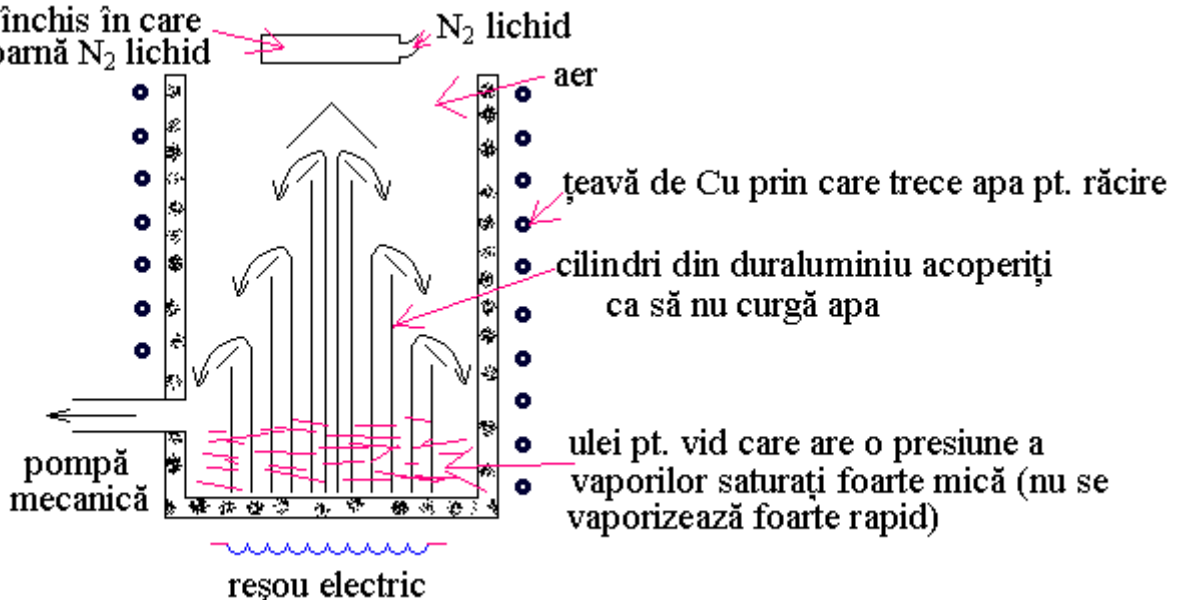
Pompa difuzionică

Pompele se deosebesc prin presiunea atmosferică. La pompele mecanice presiunea este presiunea atmosferică. Pompele difuzionice pot lucra de la o presiune de intrare de 10^{-1} . Presiunea maximă pe care o poate obține este 10^{-6} .

Pompele se mai caracterizează prin viteza de pompare:

- la cele mecanice: câteva sute litri/sec;
- la cele difuzionice: 5000 l/sec.

vas închis în care se toarnă N_2 lichid



Are trei etape de pompare (trei cilindri).

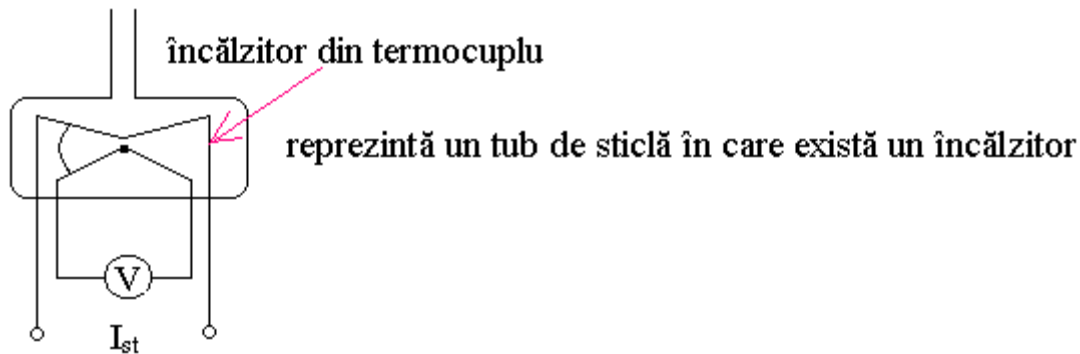
În acest ulei există molecule care au presiunea vaporilor saturați mai mare și aceștia se ridică în sus și se lovesc de pereții vasului care sunt răciți cu apă. Acești vapori se condensează. Ies alți vapori ș.a.m.d.. Moleculele din (aerul) volumul pe care îl pompăm

difuzează în moleculele de ulei, se comprimă în partea de jos a instalației și sunt scoase în afară cu ajutorul pompei mecanice.

Măsurarea vidului

Există două tipuri de traductoare pt. măsurarea vidului:

1) Traductor termoelectronic



Se dă un curent I_{st} = curent stabilizat, și cu voltmetru se măsoară tensiunea care apare la termocuplu.

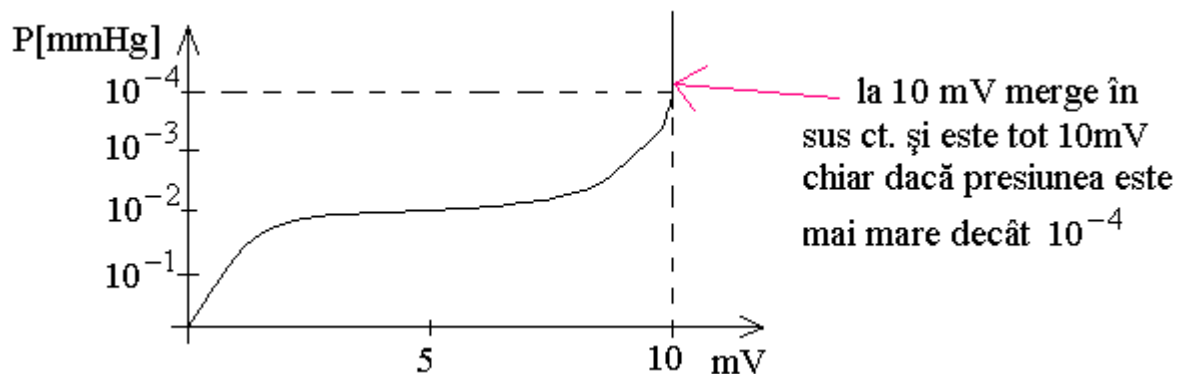
Se elimină o anumită cantitate de căldură prin încălzitor.

Se conectează firele pt. a nu-și schimba poziția.

Presiunea este mare în interior.

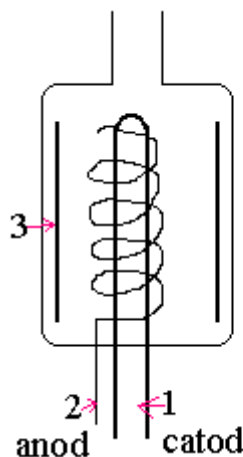
Termocuplul ne arată la capete o tensiune când se încălzește.

Aerul din interior se încălzește, căldura se emană în toate direcțiile și termocuplul indică foarte puțin. Dacă îl conectăm la o pompă, aerul se răcește, curentul crește, termocuplul ne arată mV:



Acest traductor poate să măsoare doar până la 10^{-4} mmHg.

2) Traductor ionizotomic – este folosit pt. a măsura presiuni de peste 10^{-4} mmHg.



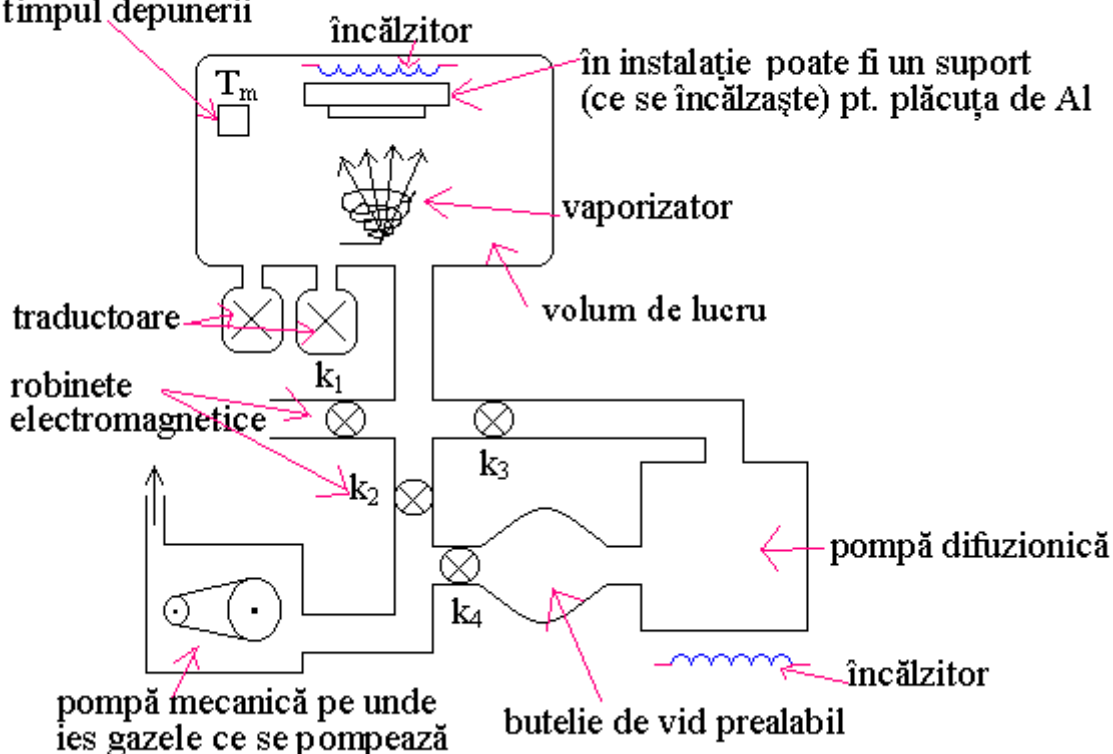
- 1- filament termoelectronic (emite electroni termici, are funcția de catod);
- 2- anodul;
- 3- cilindru din Ni, numit colector de ioni (la care se dă potențial negativ).

Funcționare: acest vas este conectat la volumul de lucru \Rightarrow are aceeași presiune. Cu acest traductor se măsoară presiuni în intervalul $[10^{-4} \div 10^{-7}]$ mmHg.

Catodul emite electroni ce ajung în câmpul anodului, și se vor accelera spre anod, și pe parcursul drumului de mișcare au posibilitatea de a se ciocni cu atomii aerului rămas în sistem. Din aceste ciocniri rezultă ioni pozitiv încărcăți (electronul smulge un electron de la atom). Acest ion este atras de câmpul catodului sau de colectorul de ioni (care are potențial negativ mai mare) $\Rightarrow I_{\text{colector ioni}} \sim P(\text{presiunea})$.

Construcția instalației cu vid și principiul de funcționare

traductor pt. măsurarea grosimii peliculei în timpul depunerii



k_1 este pt. a da drumul la aer în volumul de lucru.

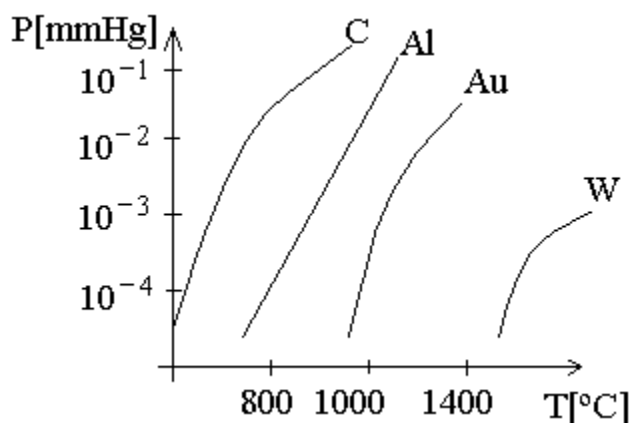
Pt. a se obține vid: k_1, k_2 închise, k_3 deschis și se pompează afară aerul din instalație \Rightarrow vid de 10^{-1} mmHg. Se încălzește pompa difuzionică, se închide k_2 și se deschide k_4 , pompa mecanică va pompa din butelia de vid și din pompa difuzionică. Apoi se deschide k_3 și se pompează din instalație \Rightarrow se obține vidul necesar și se face în instalație operația dorită.

Dacă se vrea altă operație se închid k_2, k_3 și se deschid k_1, k_4 și se dă drumul la aer în instalație, după care se reia procedeul.

Pompa difuzionică nu se răcește (se încălzește continuu).

Bazele fizice a vaporizării termice în vid

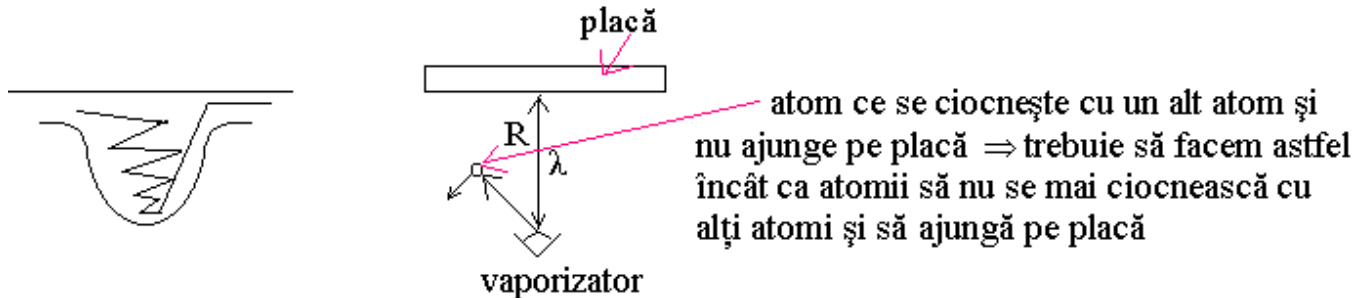
Orice substanță are o anumită presiune la temperatura dată:



- presiunea vaporilor saturați: $p = A - \frac{B}{T}$, A, B = ct.-e ale substanțelor,

T[°K]=temperatura.

Principala problemă când se face vaporizarea este că substanța trebuie să fie dispersată până la starea atomică. Pt. a nu se forma așa ceva se pune o membrană (placă) magnetică deasupra care să nu permită substanței să iasă până nu se încălzește toată (până la vaporizare):



λ - lungimea parcursului liber al atomului=lungimea maximă pe care o poate parcurge atomul fără ciocnire.

$p = 10^{-2}$ mmHg=presiunea condițională de vaporizare.

Dacă $\lambda \gg R \Rightarrow$ vid înalt;

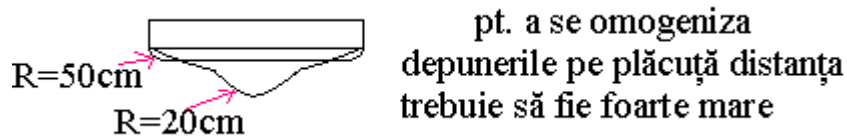
Dacă $\lambda \cong R \Rightarrow$ vid mijlociu;

Dacă $\lambda < R \Rightarrow$ vid scăzut (în principiu nu putem vaporiza).

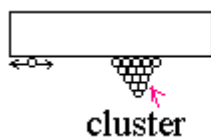
Pt. a determina λ , din teoria cinetico-moleculară: $p = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{p_0}$ [cm], p_0 =presiunea

vidului; dacă $p_0 = 10^{-4}$ mmHg $\Rightarrow \lambda = 50$ cm.

Nu avem rezultate bune dacă apropiem plăcuța de vaporizator, deoarece pelicula depusă pe suprafața suportului nu este uniformă peste tot:



Atomul vaporizat când ajunge pe plachță se poate mișca pierzându-și energia și unde ajunge, într-o groapă potențială, își formează două legături cu suportul și rămâne acolo.



Apoi vin alți atomi până se face un centru de cristalizare sub forma unei sfere numită cluster. Aceste cluster creșteră până ajung în contact unul cu celălalte.

Pelicula cu mai multe cluster are rezistivitate mai mare.

Cel mai simplu vaporizator:

vaporizator în formă de curzină



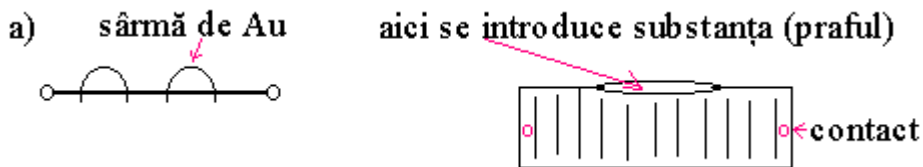
Sârma din care este făcut nu trebuie să intre în reacție chimică cu substanța lichidă. Aceasta trebuie să aibă o temperatură înaltă de topire.

Astfel de materiale sunt: Wolfram, Tantal.

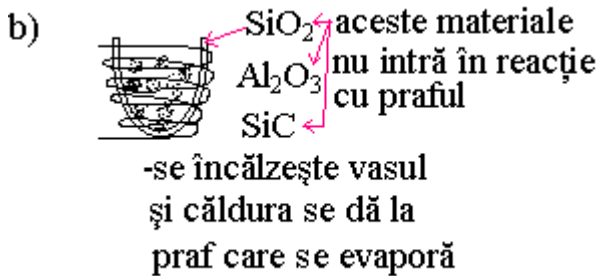
Noi putem vaporiza substanțe sub formă masivă, dar nu putem vaporiza substanțe sub formă de praf cu acest tip de vaporizator.

Vaporizatoarele se împart în:

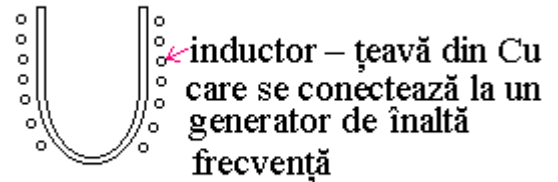
- a) cu încălzire directă;
- b) cu încălzire indirectă.



Cu vaporizatoarele cu încălzire directă se pot vaporiza materiale sub formă de praf (trece curent prin materialul vaporizator).



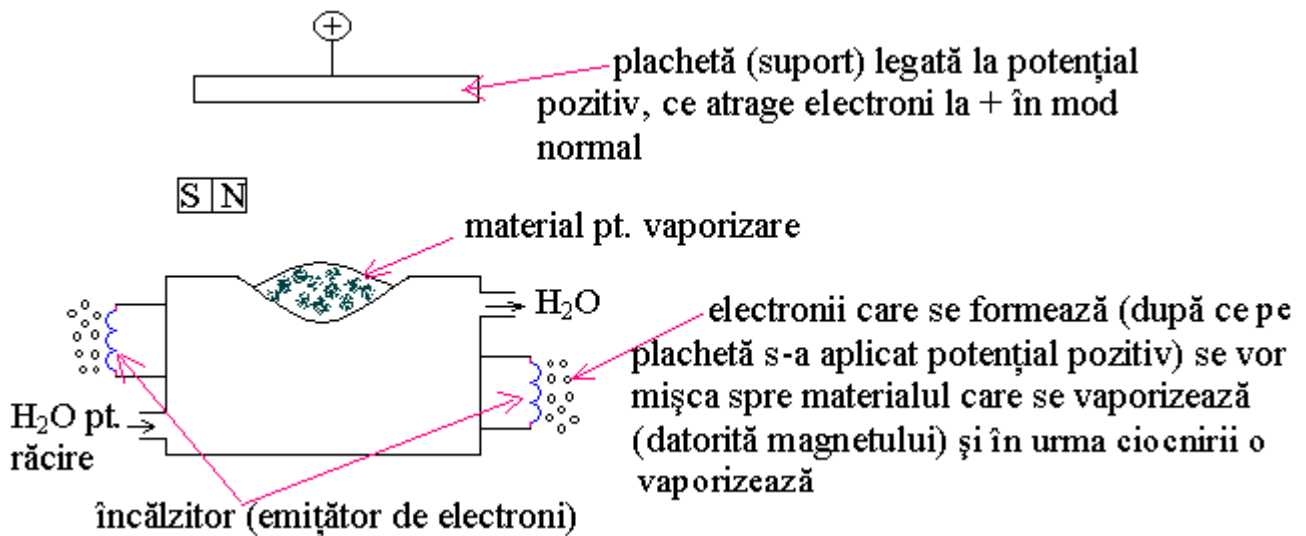
Pt. încălzire foarte mare:



- prin interiorul țevii trece apă pt. a se răci;
- curenții se absorb în vas;

Materialul vasului însă nu poate fi dielectric (pt. că se topește) și se utilizează grafitul care rezistă la temperaturi mai mari de 2000°C și astfel putem vaporiza orice substanță care se află direct în contact cu vaporizatorul.

Dacă în vaporizator există impurități acestea vor intra și în pelicula depusă. Pt. a se depune pelicule absolut curate se folosește vaporizatorul cu fascicul electronic:

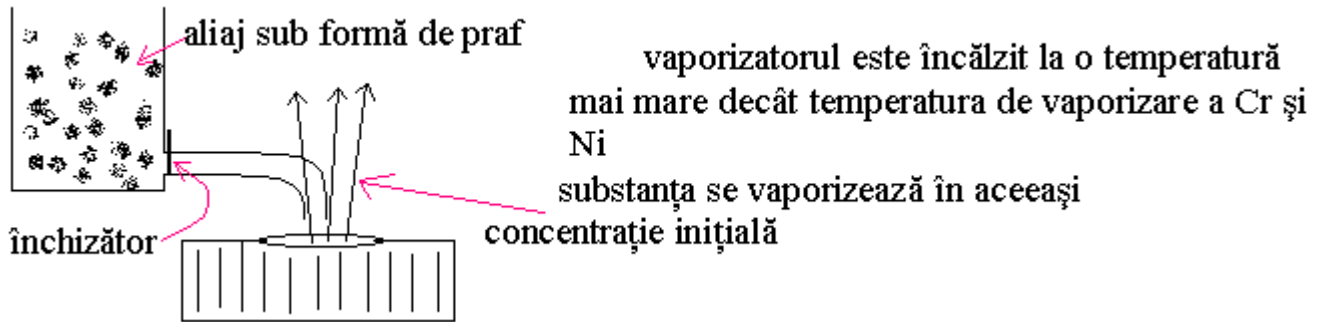


Cu astfel de vaporizatoare putem vaporiza substanțe cu temperatură mare de vaporizare obținându-se astfel substanțe cu grad înalt de puritate.

Obs! Pt CIH este necesară vaporizarea aliajelor. De ex. Ni+Cr la T=1000°C, presiunea Cr este $P_{Cr} \cong 10P_{Ni}$ (presiunea vaporilor saturați ai Cr – lui este mai mare de zece ori decât ai Ni - lui). Deoarece aliajul 80%Ni+20%Cr după vaporizare nu-și mai păstrează compoziția (mai întâi se depune Ni apoi Cr) \Rightarrow se vaporizează foarte bine în vaporizator cu fascicul de electroni.

Altă metodă de vaporizare este :

Metoda de vaporizare momentană



În tehnologia peliculelor subțiri se folosesc astăzi și alte metode:

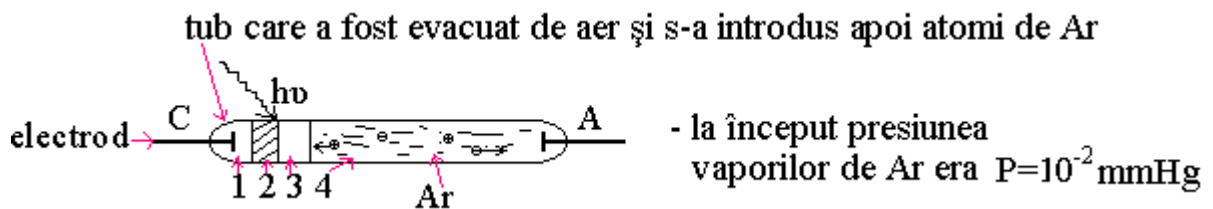
Metoda pulverizării în plasmă (substanța este în stare de ioni și electroni; toți atomii din plasmă sunt ionizați).

Pulverizarea în plasmă în principiu are multe priorități față de vaporizarea termică în vid.

Avantaje:

- posibilitatea de a depune aliaje fără schimbarea procentului fiecărui component în pelicula depusă;
- posibilitatea de a obține pelicule din materiale cu temperatura de topire foarte mare;
- posibilitatea de a obține pelicule dielectrice datorită reacției chimice în plasmă dintre substanța care se vaporizează cu un oarecare gaz de reacție (O_2 sau N_2);
- uniformitatea grosimii peliculei depuse este mult mai bună decât în cazul vaporizării termice în vid;
- se poate asigura continuitatea procesului prin folosirea unei "șinte" (materialul care se vaporizează reprezintă o șintă masivă) care se schimbă la $\frac{1}{2}$ de an;
- procesul este puțin inert;
- peliculele au o adeziune mai înaltă decât în cazul vaporizării termice, datorită faptului că atomul pulverizat are o energie de trei ori mai mare decât în cazul vaporizării termice în vid;

Fizica procesului pulverizării catodice



La C dăm "--" și la A dăm "+" și ridicăm potențialul. La un moment dat se va observa că tubul va începe să lumineze într-o culoare roșie (potențialul nu poate rupe electroni din atomi, deci nu din această cauză luminează). Tubul când începe a lumina de fapt luminează plasma.

Există posibilitatea ca pe acest tub să vină o particulă cu o energie $h\nu$, când atomul se ciocnește cu această particulă (dacă atomul este destul de mare) formează un ion pozitiv (ce are masă mai mare și se mișcă mai încet) și un electron.

Electronul mișcându-se spre A se poate ciocni de un atom neutral și se poate forma o altă pereche electron-ion \Rightarrow are loc înmulțirea în avalanșă a purtătorilor de sarcină.

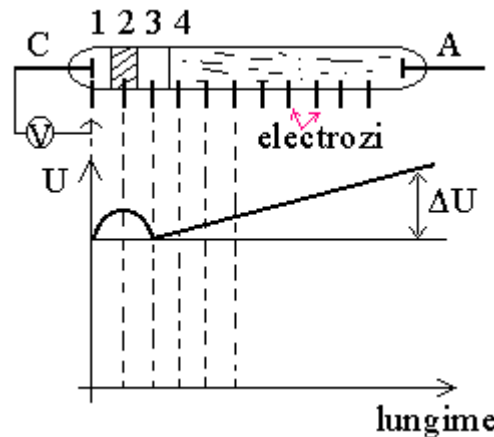
La un moment dat tot acest gaz este ionizat, adică s-a obținut plasmă în interiorul acestui tub.

În interiorul tubului se vor vedea patru regiuni:

- 1 – regiunea întunecată de lângă catod;
- 2 – regiunea luminoasă negativă;
- 3 – regiunea întunecată anodică;
- 4 – regiunea luminoasă anodică (cea mai mare).

Ne imaginăm că am pus niște electrozi în tub și când a început iluminarea vom măsura distribuția potențialului față de C, vom mișca poziția voltmetrului la fiecare electrod în parte.

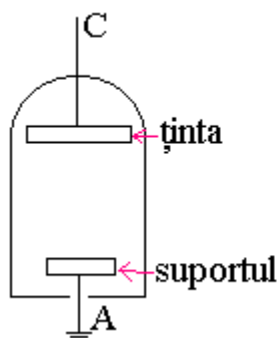
Graficul cu distribuția potențialului pe lungimea acestui tub:



Cel mai mare potențial cade lângă catod; în regiunea luminoasă diferența de potențial ΔU este mică. În regiunea 4 căderea de potențial fiind mică, purtătorii de sarcină se vor mișca haotic (ca în procesul de difuzie).

Un ion mișcându-se prin difuzie ajunge lângă regiunea întunecată de lângă catod, se accelerează și bombardează materialul catodului și rupe ioni care cu o energie destul de mare pot ajunge pe suprafața anodului.

Dacă la A punem suportul și la C punem ținta \Rightarrow la A se va depune materialul de la C:



suprafața țintei este de două ori mai mare decât suprafața suportului pt. ca pelicula depusă să fie destul de uniformă

Există două teorii pt. procesul de pulverizare:

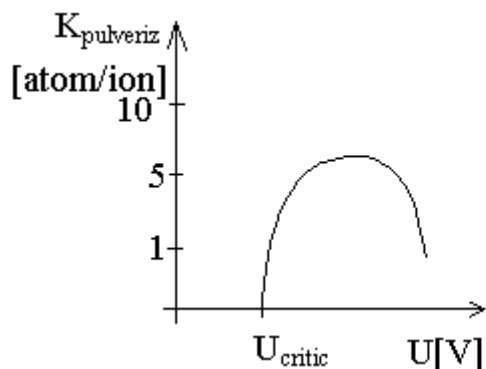
I teorie:- teoria clasică ce nu poate lămuri toate aspectele problemei;

- ionul nimerind pe suprafața țintei îi cedează acestei energie și ținta local se încălzește până la topire și mai departe are loc vaporizarea. Practic dacă am încălzi catodul ar crește randamentul, ceea ce nu s-a întâmplat.

II teorie: - pulverizarea are loc prin mecanismul impulsurilor (biliard) \Rightarrow se schimbă vitezele la ciocnire, precum și direcțiile de mișcare.

Acest mecanism poate lămuri oarecum rezultatele experimentale obținute.

Dacă vom desena coeficientul de pulverizare, ce reprezintă nr. de atomi smulși din C sub acțiunea unui ion, în dependență de potențialul aplicat $U(V)$:



se obs. că pulverizarea pt. diferite materiale începe la un anumit potențial U_{cr}

Cu cât se mărește potențialul de accelerare cu atât mai mulți atomi pot fi smulși din țintă (K mare). La un moment dat K se micșorează (chiar dacă se mărește energia) și ionul se poate implanta în interiorul țintei la energie mare.

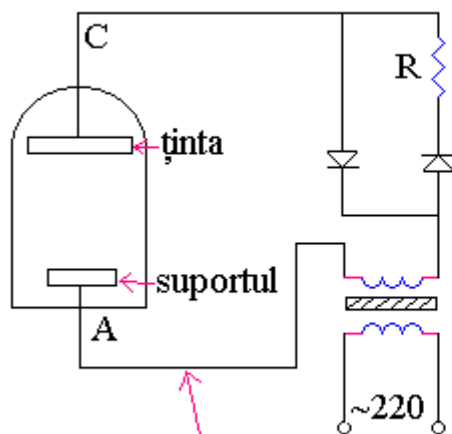
S-a obținut pt. viteza de pulverizare următoarea formulă: $v = \frac{K \cdot (U - U_{cr}) \cdot J}{P \cdot D}$,

unde $U - U_{cr}$ = potențialul aplicat, J = densitatea curentului [A/cm^2], P = presiunea gazului inert în tub, D = distanța dintre A și C.

⇒ viteza de pulverizare este invers proporțională presiunii.

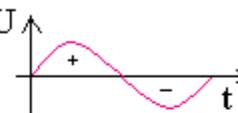
Dacă presiunea este mare atunci atomii se vor împrăștia și nu se vor mai depune pe suport, ca urmare trebuie să micșorăm presiunea, și deci trebuie să mărim potențialul.

Cu cât este mai mare presiunea în aceste gaze se găsesc și diferite impurități. Pt a depune pelicule cu o puritate mai înaltă se folosește **pulverizarea catodică cu ajutorul curentului alternativ**:



pt. a nu fi A legat la masă

-sistem diodic ce se alimentează cu c.a. care se redresează



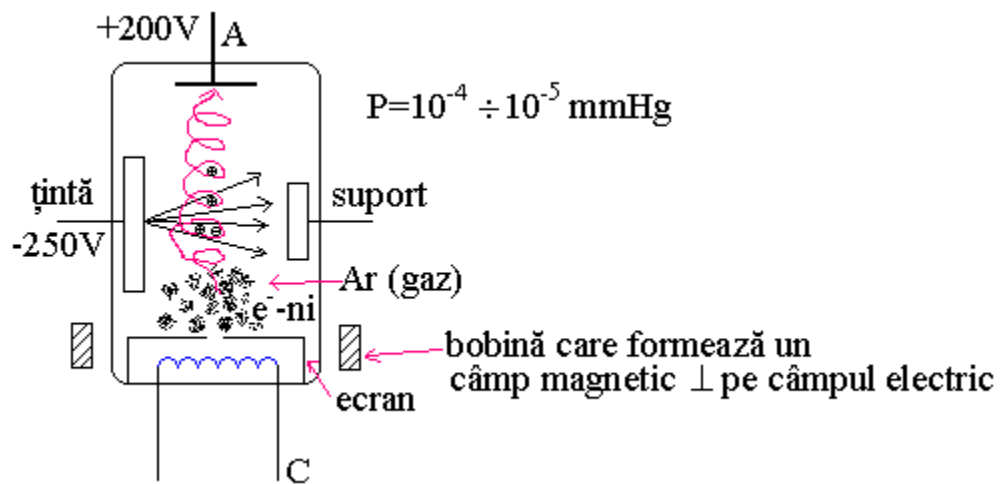
- în alternanța negativă are loc pulverizarea catodului;
- în alternanța pozitivă ionii pozitivi vor bombardă suportul fără a-l vaporiza, deoarece ionii au o energie mai mică.

Dacă în pelicula depusă pe suport au fost depuse și gaze în alternanța negativă aceste gaze se vor degaja în interiorul instalației.

Această metodă face ca pelicula depusă să fie mai curată. Nu putem însă micșora foarte mult presiunea.

Ultimele două metode sunt numite sisteme diodice, deoarece există doar anod și catod.

Pulverizarea în sistem triodic (A, C, țintă)



Catodul se încălzește și datorită efectului electrotermic iese un noraș de electroni care este atras de potențialul anodului care este pozitiv. Acești electroni se vor mișca sub formă de spirală pt. a lovi cât mai mulți atomi de Ar (care sunt destul de rari) și prin ciocnire \Rightarrow un ion pozitiv și un electron.

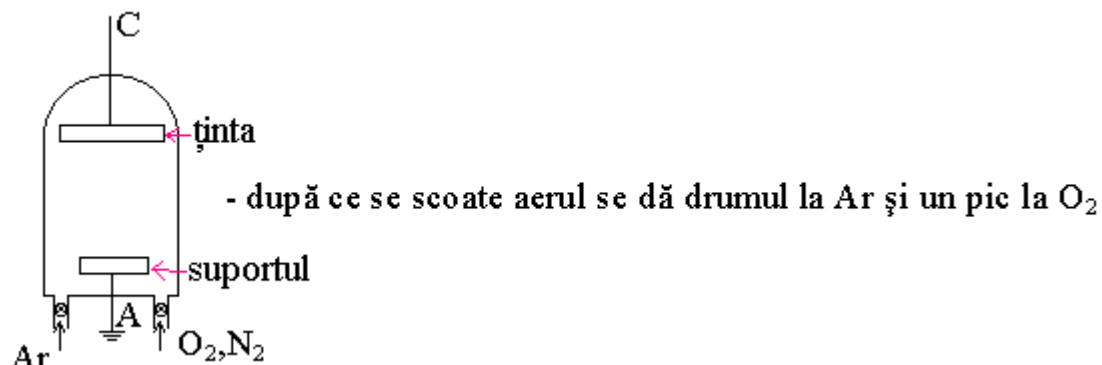
Încărcătura pozitivă care s-a format, pt. a nu ne bombardeze C am pus un ecran. Ca urmare se bombardează ținta și smulge din aceasta atomi ce vor ajunge (o parte) pe suport.

Avantajele acestei vaporizări:

- viteza de depunere a peliculei este mult mai mare decât în sistemele diodice datorită micșorării presiunii;
- gradul de purificare a peliculei este mai înalt pt. că presiunea este mai mică.

Acest sistem poate fi folosit pe larg pt. depunerea peliculelor subțiri.

Pulverizarea reactivă: (poate fi făcută și în sistemele diodice și triodice)



Materialul țintei	Gazul de reacție	Pelicula obținută
Si	O ₂	SiO ₂
Al	O ₂	Al ₂ O ₃
Si	N ₂	Si ₃ N ₄

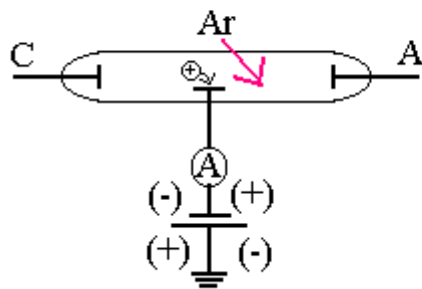
Cu această metodă se pot obține și pelicule dielectrice (aici nu mai încălzim suportul pt. adeziune) pt. că atomii smulși din țintă au o energie de trei ori mai mare (ca la depunerea termică) și suportul se încălzește de către atomii ce se ciocnesc.

Pulverizarea dielectricilor la frecvențe înalte

Fie sistemul considerat anterior. În loc de Al se pune țintă din sticlă de cuarț (SiO₂) (mecanic o schimbăm).

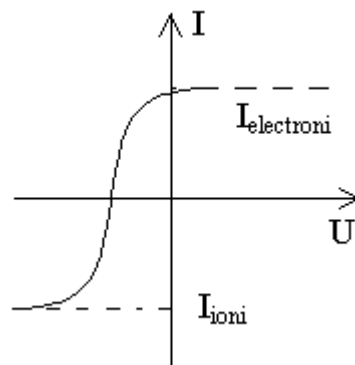
Dacă de țintă se ciocnește o încărcătură pozitivă (ion) acesta se acumulează pe suprafața catodului și la un moment dat această încărcătură va neutraliza potențialul catodului \Rightarrow pulverizarea dielectricilor nu poate loc.

Sonda lui Lengmiur pt. pulverizarea la înaltă frecvență:



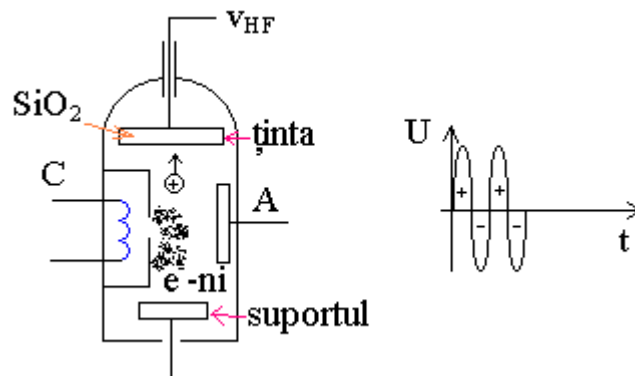
- dacă la sondă avem potențial negativ, ionii pozitivi se atrag în circuitul acestei sonde iar ampermetrul ne arată curent;
- de ce la sondă este încă potențial negativ când la sondă vin electroni pt. a forma un curent pozitiv, și când $U \sim 0$ curentul este aproximativ maxim?

S-a măsurat curentul prin sondă pt. ambele polarități:



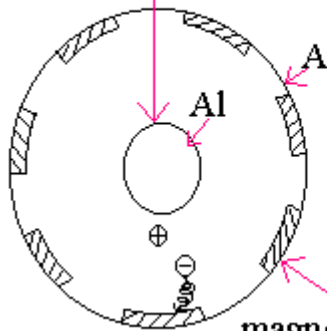
Justificare: mobilitatea electronilor este mai mare decât cea a ionilor. Deoarece ionii nu se neutralizează imediat pe suprafața catodului, atrag electroni mobili ce sunt mai mici și se deplasează cu viteză mai mare.

Este necesară o frecvență înaltă pt. amorsarea efectului:



Când la țintă avem potențial negativ ionii formați în plasmă vor bombarda ținta și se vor acumula pe suprafața țintei din SiO_2 . Când $U \sim 0$ ținta este bombardată de electroni neutralizând potențialul ionilor \Rightarrow ținta este gata iar pt. a putea fi pulverizată când potențialul este pozitiv.

în centru avem C ce reprezintă în principiu ținta



Au loc procese din sistemul diodic. Electronul se poate îndrepta spre A însă nu într-o traiectorie dreaptă ci sub formă de spirală pt. că există probabilitate mai mare de a ioniza pe drum și alți atomi \Rightarrow presiunea poate fi mai mică. Ionii vor bombarda din toate părțile C și se va pulveriza.

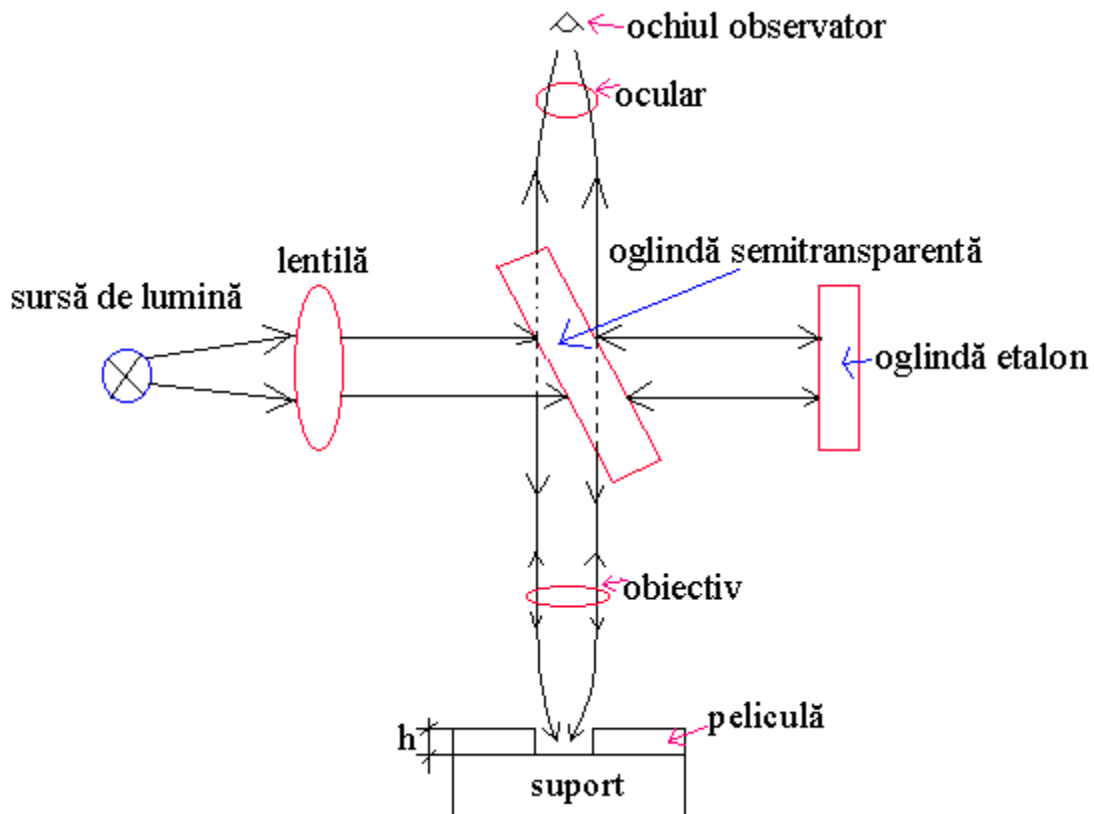
Magnetronul rotindu-se pelicula se va depune uniform.

magnetronul pe care sunt așezate plachete

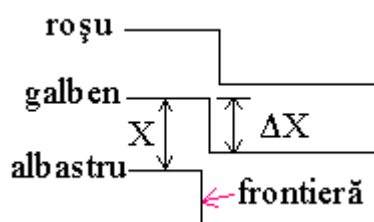
Măsurarea grosimii peliculelor în timpul depunerii

Peliculele care formează rezistoare în CIH au grosimea 500-600Å \Rightarrow trebuie o precizie foarte mare la depunerea peliculelor.

Pt. măsurarea acestora se utilizează microscopul interferențiomicroscopic:



Razele cad pe suport prin deschizătura din peliculă, după care o parte din raze se reflectă de pe suprafața suportului și o parte de pe suprafața peliculei și ajung la ocular cu o diferență de drum parcurs, și vom vedea:



Dacă lumina (raza) este verde avem:
$$h = \frac{\Delta X}{X} \cdot \frac{\lambda}{2} = \text{grosimea peliculei};$$

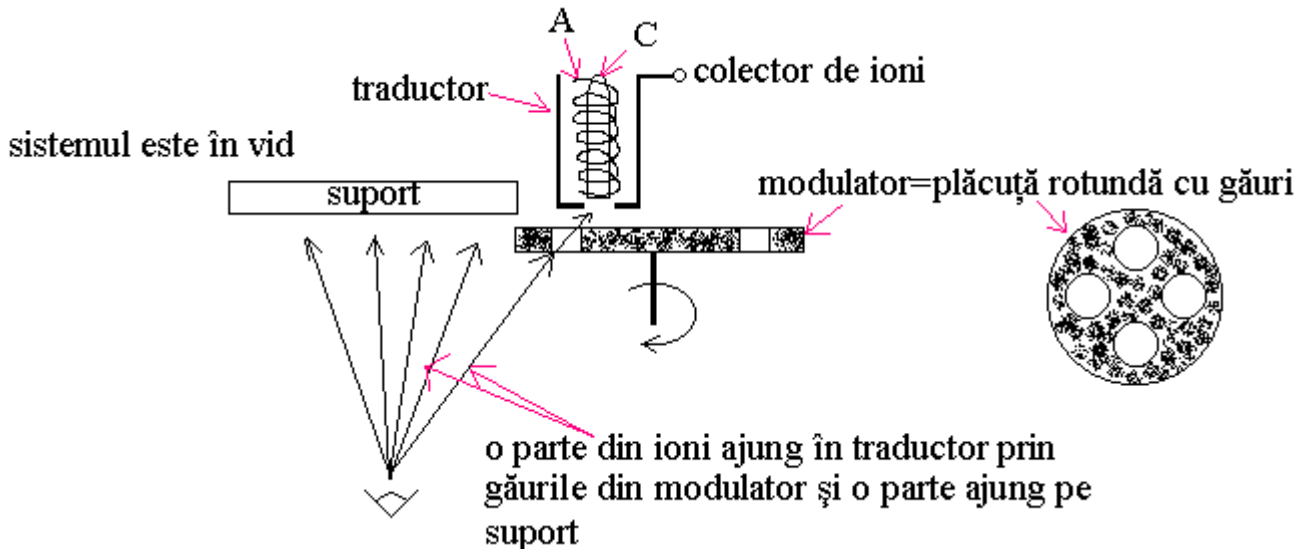
$$\lambda_{verde} = 0.550 \mu m \Rightarrow h = 0.275 \frac{\Delta X}{X} [\mu m] - \text{așa se calculează grosimea peliculei.}$$

Se folosesc diferiți traductori (pt. măsurarea grosimii), aparate de măsură ce trebuie să măsoare diferite grosimi ale peliculei precum și viteza de depunere a peliculei.

Efecte fizice ce stau la baza acestei metode de măsurare:

- efectul ionizațional;
- efectul de rezonanță;
- efectul rezistiv;
- efectul capacitiv.

a) Măsurarea vidului are loc cu ajutorul efectului ionizațional:



Electronii din catod se duc spre anod și ionizează gazul rezidual din traductor și se duc pe colectorul de ioni \Rightarrow se ivește un curent alternativ care apare datorită nr.-lui de atomi ce pătrund în traductor prin găurile modulatorului. Acest curent a ionilor este proporțional vitezei de depunere a peliculei: $I_{ion} \propto v_{dep}$.

$$\text{Grosimea peliculei depuse: } h = \frac{1}{D} \int_0^t I(t) \cdot dt - \text{se utilizează un integrator; D-ct. a}$$

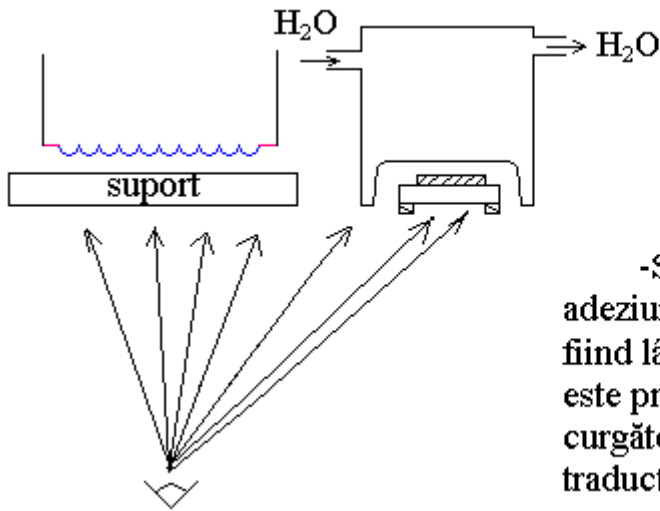
traductorului și depinde de construcția sa.

Noi putem regla și controla grosimea peliculei depuse cu acest aparat.

b) Traductor pe baza efectului de rezonanță:

Orice cristal de cuarț are o frecvență de rezonanță f_0 , dar care depinde de temperatura materialului de exploatare.

Știind masa, densitatea peliculei putem determina grosimea.

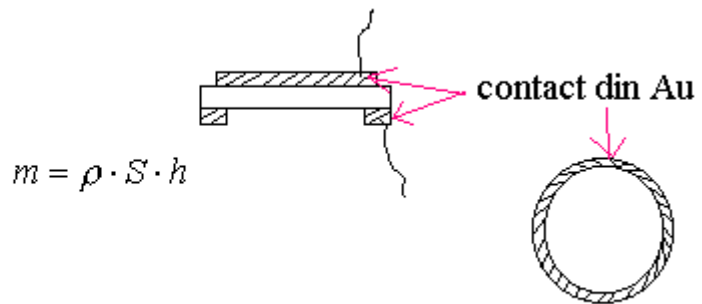
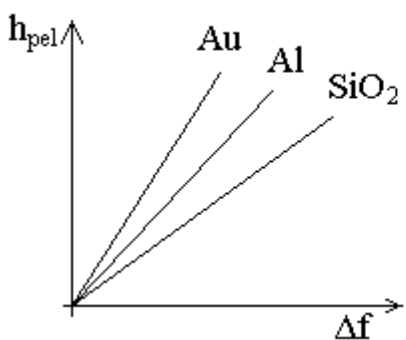


-Suportul trebuie încălzit pt. a avea adeziune mai bună și ca urmare traductorul fiind lângă suport se încălzește și el. Dacă este prea tare încălzit se răcește cu apă curgătoare. Are loc depunerea peliculei și pe traductor.

Traductorul se caracterizează prin $f_0 \cong m_0$ (masa traductorului);

- masa se schimbă: $m_0 + \Delta m \cong f_0 + \Delta f$; $\Delta f \cong \Delta m$.

Acest traductor trebuie gradat pt. diferite tipuri de materiale:



Depunerile de pe traductor trebuie uneori îndepărtate pt. că se ajunge la frecvențe foarte mari. Pe traductor se depune o peliculă de Al pt. ca îndepărtarea să se facă cu un corodant pt. Al și va îndepărta depunerile de mai târziu (astfel se pot îndepărta depunerile de SiO₂ dacă traductorul este din SiO₂).

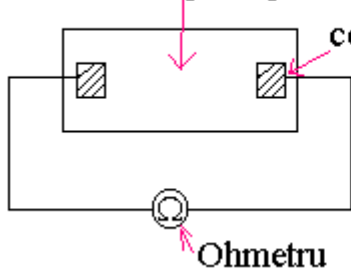
Cum se poate măsura viteza de depunere: prin diferențierea în timp a semnalului proporțional masei.

Obs! Această metodă se folosește și în VLSI.

c) Efectul de rezistență

Presupunem că s-a depus un rezistor:

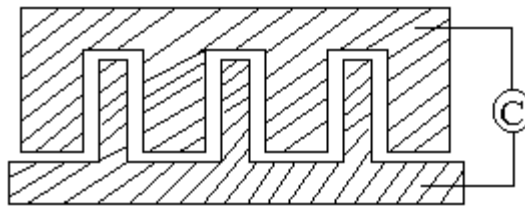
aici se depune pelicula rezistivă



$$R = \rho \frac{l}{b \cdot h} \Rightarrow h$$

Acest traductor este doar pt. materiale rezistive.

d) Efectul capacitiv



C_0 -capacitatea inițială

$C_0 + \Delta C$ -după depunerea dielectricului

Condiție: $\epsilon_{diel. depus} > \epsilon_{sup ort}$

aparat de măsurat capacitatea

În funcție de ΔC se poate calcula h , dar nu e nevoie pt. că noi depunem pelicula până când ajungem la capacitatea dorită (astfel încât să avem h dorit).

Tehnologia măștilor

Adesea concomitent cu procesul de depunere a peliculelor pt. CIH are loc și formarea configurațiilor viitoarelor elemente. Pt. aceste scopuri se folosesc măști.

Cerințe pt. măști:

- trebuie confecționată dintr-un material destul de subțire pt. ca să lipsească efectul umbrei;
- masca nu trebuie să se deformeze la căldură, pt. a fi mereu în contact bun cu suportul.

Tipuri de măști:

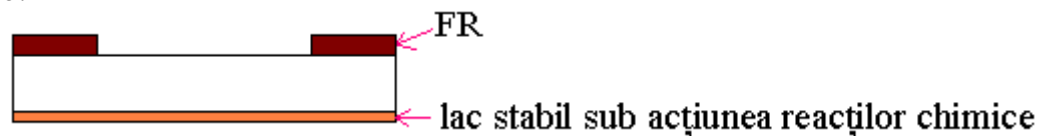
- monometalice;
- bimetalice;
- cu trei straturi.

Procesul de formare a măști monometalice

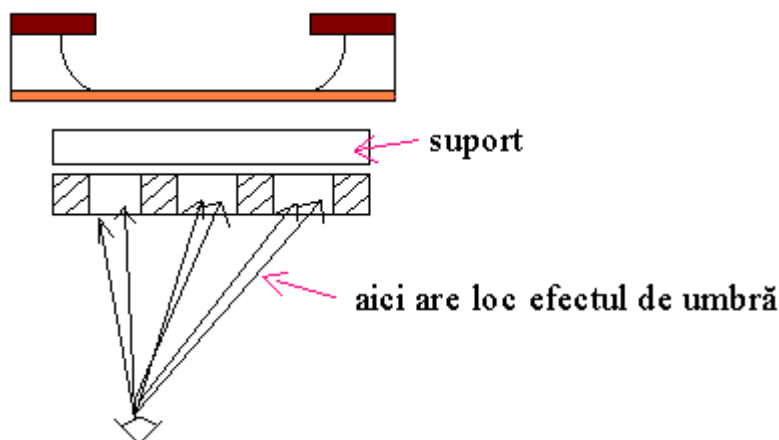
1°) masca se formează dintr-un material destul de elastic ca să se lipească bine de suport, de ex. BBe_2 (bronz beriliu):



2°) fotolitografie:



3°) corodarea: care are loc și sub FR:

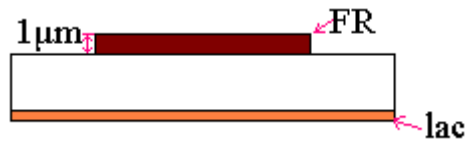


Aceste măști sunt cel mai simplu de confecționat, însă datorită efectului de umbră nu se prea folosesc.

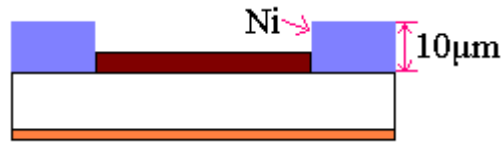
În industrie se folosesc măștile bimetalice.

Procesul de realizare a acestora:

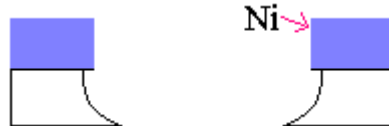
1°)



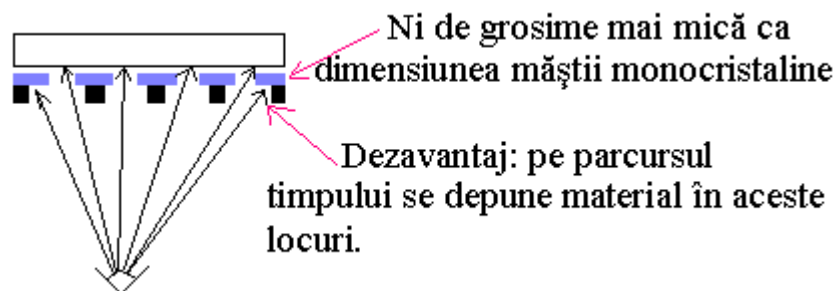
2°) depunere Ni electrochimic:



3°) înlăturare FR și corodare:



4°) scade efectul de umbră:

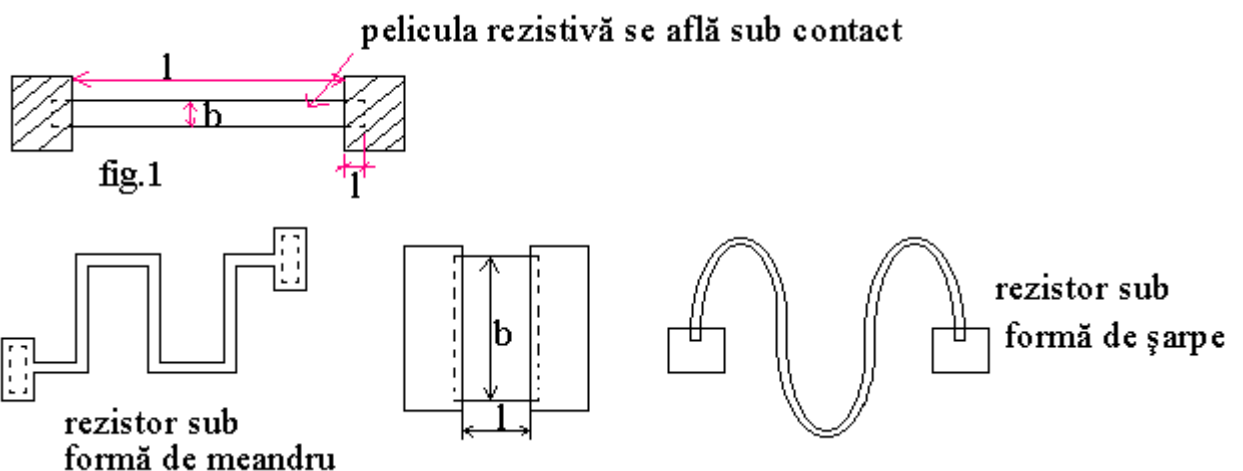


Deoarece Ni și BBr_2 au coeficienți termici diferiți \Rightarrow deformare la creșterea temperaturii. Soluția este de a depune și pe cealaltă parte a bronzului o peliculă de Ni \Rightarrow mască cu trei straturi:



Această metodă nu se folosește prea des pt. că trebuie să se facă alinierea pe două părți și costă foarte mult.

Construcțiile și calculul rezistoarelor peliculare



Cu ajutorul măștii grosimea rezistorului nu poate fi mai mică decât 25μm, însă cu litografia permite 3μm.

Calculul rezistoarelor ca în CI monolitice cu deosebirea că:

$$R = \rho_s \frac{l}{b} = \rho_s \cdot K_f, \quad \rho_s = \frac{\rho}{h} = \left[\frac{\Omega}{\text{patrat}} \right].$$

Dacă în circuitele monolitice foloseam pt. construirea rezistoarelor baza tranzistorului, aici putem confecționa rezistorul în cadrul unui CI din mai multe materiale (aproximativ trei, dacă sunt mai multe va trebui mai multe măști ⇒ rezistența mică (material cu ρ mic), rezistența mare (material cu ρ mare), rezistența medie (material cu ρ mediu)).

Există formulele:

$$\rho_{Soptimal} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n R_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}}} \left[\frac{\Omega}{\text{patrat}} \right] \quad (1) \quad , \quad b_{cal} \geq \{b_P, b_{\Delta}, b_{teh}\};$$

$$\text{pt. } l > b: b_P = \sqrt{\frac{P_i}{P_0 \cdot K_f}} \quad (2) \quad , \quad \text{pt. } l < b: \text{altă formulă};$$

$$b_{\Delta} = \left(\Delta b + \frac{\Delta l}{K_f} \right) \cdot \frac{K_f}{\Delta K_f} \quad (3).$$

Deosebirea principală este că știm K_f : $K_f = \frac{R}{\rho_s}$;

$\Delta l, \Delta b$ = erorile absolute geometrice $\cong 0.1\mu\text{m}$ la fotolitografie șo $\pm 2\mu\text{m}$ cu măști.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho_s}{\rho_s} + \frac{\Delta K_f}{K_f} + \frac{\Delta R}{R_c} (= 2 \div 3\%) + \frac{\Delta R}{R_{imb}} (= 3 \div 5\%) + \alpha_R \cdot \Delta T, \text{ unde}$$

$R_c = R_{\text{contact}}$ și $R_{imb} = R_{\text{îmbătrânire}}$.

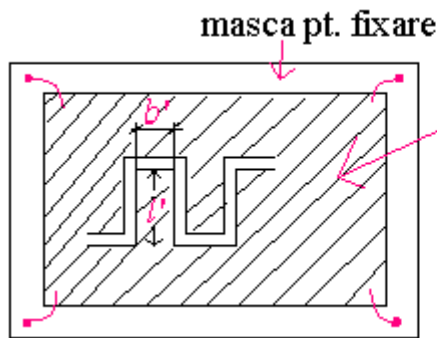
$$\frac{\Delta K_f}{K_f} = \frac{\Delta R}{R} - \frac{\Delta \rho_s}{\rho_s} - \frac{\Delta R_c}{R_c} - \frac{\Delta R_{imb}}{R_{imb}} - \alpha_R \cdot \Delta T;$$

$$l = b_{cal} \cdot K_f + 2l.$$

Toate calculele de până acum s-au făcut pt. $K_f \leq 10$. Dacă este mai mare nu se mai fac rezistori ca în fig.1, ci sub formă de șarpe sau meandru.

Rezistorul meandru trebuie să îndeplinească anumite cerințe: $\frac{l'}{b'} \leq 10$.

Masca pt. acest rezistor:



în acest spațiu rămas sunt și alte elemente
 $\Rightarrow \frac{l'}{b'} \leq 10$ (dacă este mai mare se îndoaie, pt. că este subțire și se fixează doar pe margine, pt. că există și alte elemente)

Materiale pt. rezistoarele peliculare și metodele de depunere

Un rezistor pelicular reprezintă o peliculă subțire de aproximativ $500 \div 700 \text{ \AA}$ la care sunt două contacte dintr-o peliculă destul de groasă (mai mare de $1 \mu\text{m}$). Trebuie cunoscut faptul că dacă pelicula are o grosime $h \geq 1000 \text{ \AA} = 0.1 \mu\text{m}$, atunci pelicula are $\rho_{\text{peliculă}} = \rho_{\text{monolit}}$

[rezistivitatea specifică]. $R = \rho \frac{l}{b \cdot h}$; coeficientul $\alpha_R = \frac{R_t - R_0}{R_0 \cdot t}$ pt. metale (metalul

când se încălzește rezistența crește datorită purtătorilor de sarcină care încep să se agite foarte tare; la semiconductori scade) $\Rightarrow \alpha_R > 0$ pt. metale.

Dacă pelicula are câteva sute de \AA atunci rezistivitatea ρ se mărește fiindcă se micșorează lungimea drumului liber parcurs al electronilor datorită disipării lor la granița peliculei și a grăunțioarelor monocristaline.

Deci, dacă avem $h = n \cdot 100 \text{ \AA}$, atunci $\rho_{\text{pel}} > \rho_{\text{monolit}}$ și $\alpha_R = 0$.

În pelicule la care grosimea $h = n \cdot 10 \text{ \AA}$ rezistența se mărește cu câteva ordine de mărime: $\rho_{\text{pel}} = 10^n \cdot \rho_{\text{monolit}}$ și $\alpha_R < 0$ (ca în semiconductor).

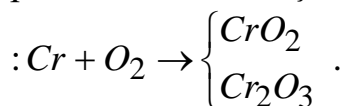
Există multe materiale din care se pot confecționa rezistoare. Unul din primele materiale utilizate pt. realizarea rezistoarelor a fost Cr, care are o adeziune foarte bună (pe sticlă sau pe suprafață ceramică). Pelicula de Cr cu grosimea $h = n \cdot 100 \text{ \AA}$ are

$$\rho_{\text{pel}} \cong 100 \cdot \rho_{\text{monolit}}$$

Depunerea Cr-lui

Obs! Cr este un material care se vaporizează prin sublimație la $T_{\text{vaporizare}} = 1000^\circ\text{C}$, iar $T_{\text{topire}} = 1600^\circ\text{C}$.

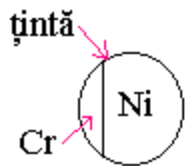
Aceste rezistoare au însă un grad de reproductibilitate foarte scăzut, deoarece Cr poate intra foarte ușor în reacție chimică cu O_2 (rămas în sistemul cu vid), formând



Datorită acestui fapt peliculele de Cr nu dau rezistență reproductibilă și a fost scos din uz.

Un alt material (aliaj) este: Ni+Cr – care dă rezistențe reproductibile și putem obține rezistențe în intervalul: $\rho = 150 \div 350 \text{ M} \cdot \Omega \cdot \text{cm}$. Dar acest material la vaporizare termică la $T = 1200^\circ\text{C}$, presiunea vaporilor saturați $P_{\text{Cr}} = 10 \cdot P_{\text{Ni}} \Rightarrow$ se vaporizează mai întâi Cr și apoi Ni \Rightarrow se folosește vaporizarea în plasmă.

Procentajul Ni, Cr în peliculă și rezistențele se pot regla astfel:



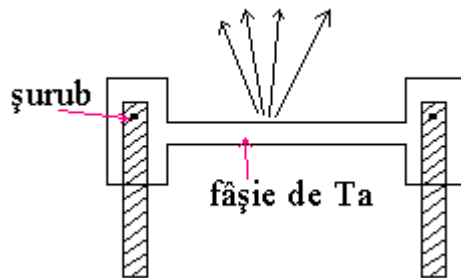
știind K_f a Cr, Ni \Rightarrow concentrația în pelicula

depusă: $\frac{C_M}{C_{Cr}} = \frac{K_M \cdot S_M}{K_{Cr} \cdot S_{Cr}}$, $S_{Cr, Ni} = \text{suprafața}$.

Prin această metodă se obține o reproductibilitate mai mare. Aceste rezistoare pot ajunge la $\rho_s = 10^4 \left[\frac{\Omega}{\text{patrat}} \right]$, $\alpha_R = 10^{-4} \frac{1}{\text{grad}}$. Aceste rezistoare sunt folosite și astăzi în tehnologia CIH cu pelicule subțiri.

Un alt material este Tantalul (Ta) care are $T_{\text{top}} \geq 3000^\circ\text{C}$.

Depunerea peliculei din Ta se face prin vaporizare de tipul:



Se ia și se încăcă un condensator cu curent continuu. După care la un moment dat C îl descărcăm prin Ta, care se topește și se vaporizează în toate direcțiile.

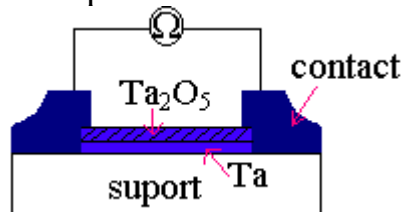
Dezavantaj: nu putem însă regla grosimea peliculei depuse. Reproductibilitate prea mică.

Se folosește pulverizarea în plasmă pt. depunerea peliculei de Ta.

Avantaje: - $\rho_s = 100 \frac{\Omega}{\text{patrat}}$;

- grosimea peliculei depuse: $h = 500 \div 600 \text{ \AA}$

- rezistențele din Ta pot fi aduse la valoarea normală cu o precizie de $10^{-3}\%$ astfel:



Pelicula este depusă în atmosferă un pic încălzită și Ta intră foarte rapid în reacție cu O_2 din atmosferă și formează la suprafață o peliculă dielectrică $Ta_2O_5 \Rightarrow$ se micșorează grosimea peliculei de Ta \Rightarrow rezistența crește și când se măsoară cu ohmetrul rezistența dorită se oprește încălzirea.

Odată cu ajustarea la nominal s-a făcut și îmbătrânirea rezistorului, care datorită stratului destul de gros de la suprafață de Ta_2O_5 nu va "îmbătrâni" mai mult.

Pelicula de Ta nu va mai crește din cauza oxidului gros.

Din Ta se fac și condensatoare (din această cauză sunt mai bune pt. că se poate face un CI întreg din Ta).

Rezistoare pe baza aliajelor metal-dielectric

Sunt rezistoare din Cr-SiO (cermet-praf cafeniu). Aceste pelicule au rezistivitatea

$$\rho_s = 10 \div 1000 \frac{\Omega}{\text{patrat}} \text{ și } \alpha_R = 10^{-4} \frac{1}{\text{grad}}.$$

Acest aliaj reprezintă un praf și nu se poate face țintă din acesta, deoarece el se vaporizează în vaporizator pt. pref.

Aceste rezistoare nu sunt foarte reproductibile.

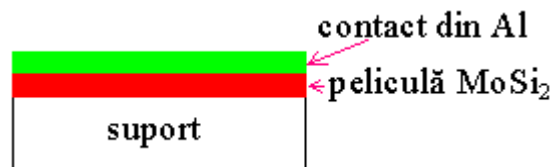
Rezistoare silicide

MoSi₂, CrSi₂, Si-Cr – acest grup de materiale este cel mai utilizat pt. că aceste rezistențe nu au nevoie de pasivizare a suprafeței fiindcă că în timpul ajustării la nominal ele se acoperă cu dielectric (SiO₂).

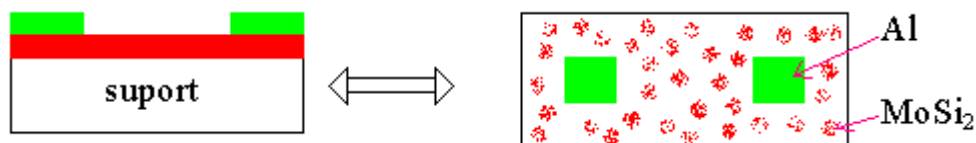
În principiu aceste rezistoare pot avea: $\rho_s = 200 \frac{\Omega}{\text{patrat}} \div 20 \frac{K\Omega}{\text{patrat}}$ și

$$\alpha_R = 10^{-4} \frac{1}{\text{grad}}.$$

Configurația acestor rezistoare este formată adesea cu ajutorul fotolitografiei:



Urmează prima fotolitografie și înlăturarea unei părți de Al:

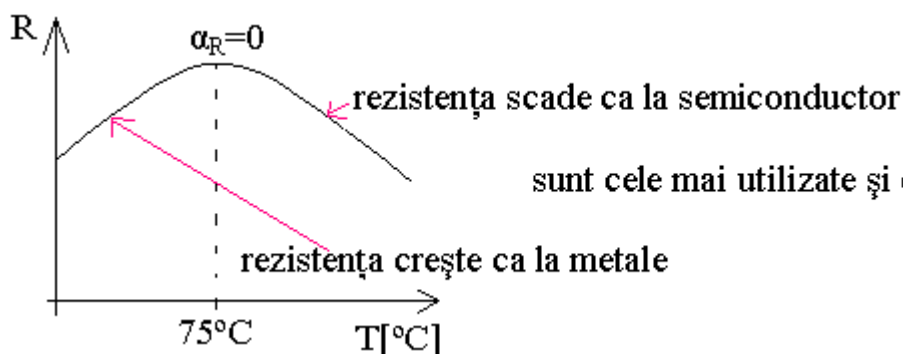


A doua fotolitografie (se înlătură MoSi₂):



Tratamentul termic la $T \cong 550^\circ\text{C}$, timp de 10 ÷ 15 min. pt. ca o parte din material să se oxideze și grăuncioarele să se mărească (ca o structură policristalină).

Pt. pelicula de Cr-Si₂:

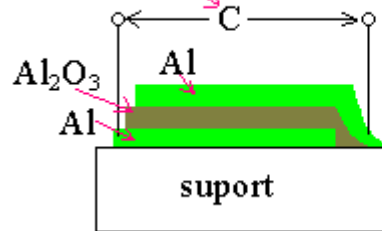


sunt cele mai utilizate și cele mai precise

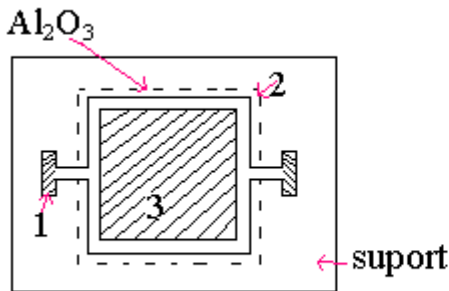
Construcțiile condensatoarelor în CI cu pelicule subțiri

Cea mai simplă și cea mai utilizată construcție a condensatorului este:

între aceste contacte avem capacitatea necesară

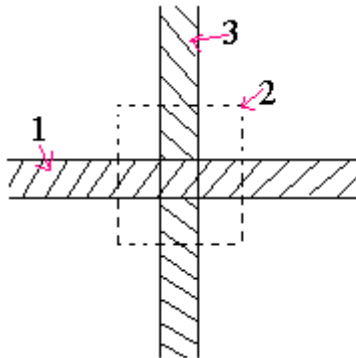


În topologie:



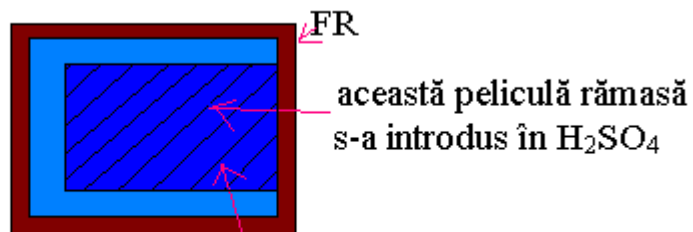
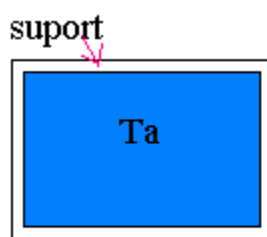
1. placa (armătura) de jos a condensatorului;
2. dielectric care acoperă placa de jos a C;
3. placa de sus a condensatorului și este mai mare decât placa de jos datorită faptului că dielectricul este mai subțire ca placa de metal, dacă placa de sus ar acoperi tot dielectricul acesta s-ar putea subția într-un loc \Rightarrow scurt circuit.

Dacă este nevoie de condensator cu capacitate de până la 2pF:



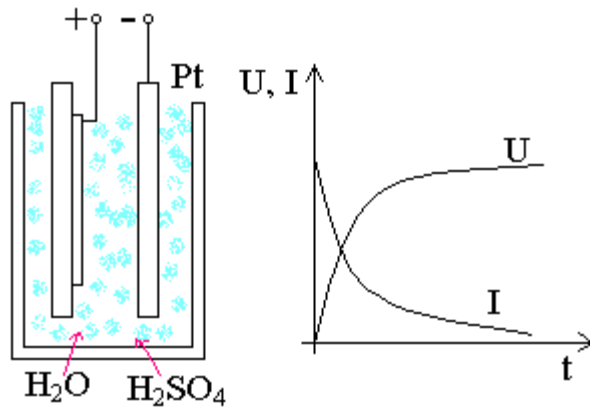
un condensator pus la întretăierea a două linii de contact de CI

Condensator pe baza Ta:



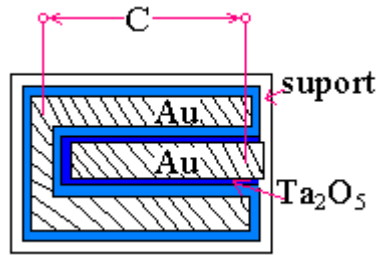
o parte din Ta care a intrat în reacție - Ta_2O_5

Dăm un potențial pt. ca pelicula să se oxideze \Rightarrow această operație se numește oxidare anodică.



în funcție de potențialul aplicat
 ⇒ grosimea peliculei (cu câți mai mulți volți cu atât este mai groasă pelicula)

Apoi se face placa de sus:

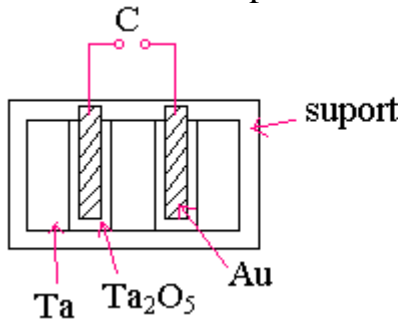


S-a folosit Au pt. contacte pt. că condensatorul are dielectric din Ta (rezistiv) ⇒ este înconjurat de trei părți de Au ⇒ crește factorul de calitate, dar crește și suprafața ocupată de condensator.

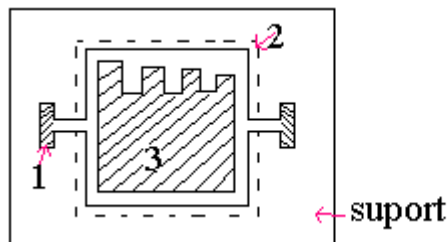
Problema care apare la condensatorul din Ta:

- s-a obs. că aceste condensatoare sunt polare: într-o direcție tensiunea de străpungere este mai mare și în cealaltă direcție este mai mică.

Condensatorul nepolar:



un condensator nepolar reprezintă două condensatoare conectate în serie (placa de jos este comună) ⇒ suprafața este însă mai mare



1-placa de jos;
 2-dielectric;
 3-placa de sus.

Am făcut placa astfel încât condensatorul să fie un pic mai mare decât ne trebuie. Pt. a-l micșora tăiem un dinte și astfel ajustăm mai precis la nominal.

Materialele dielectricilor pt. condensatoare

Știm că capacitatea poate fi determinată: $C = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S}{d}$, unde $\epsilon_0=1$, ϵ -permitivitatea dielectrică, S-suprafața de suprapunere a plăcilor, d-grosimea dielectricului.

$$\text{Capacitatea specifică a condensatorului: } C_0 = \frac{C}{S} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0}{d} \left[\frac{pF}{mm^2} \right].$$

Cu cât d este mai mic cu atât C_0 este mai mare. Însă d nu poate fi foarte mic datorită tensiunii de străpungere.

$$\text{Tensiunea de străpungere: } E_{str} = \frac{U_{str}}{d} \left[\frac{V}{mm} \right].$$

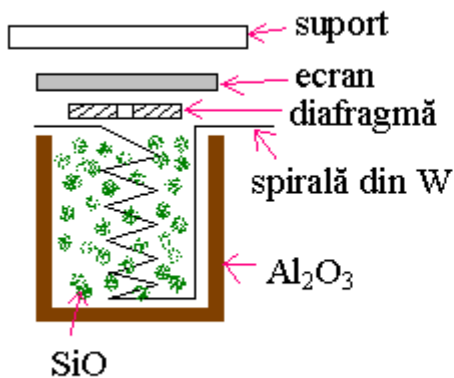
Pt. ca un condensator să lucreze bine trebuie ca: $U_{lucru} < U_{str}$
 $\Rightarrow U_{lucru} = \alpha \cdot U_{str} = \alpha \cdot E_{str} \cdot d, \alpha \leq 0.8.$

De ex. $E_{str_{SiO_2}} = 10^6 \frac{V}{cm} \Rightarrow$ putem depune o peliculă de SiO_2 de $0.1 \mu m$;

$$E_{str_{SiO_2}} (d = 0.1 SiO_2) = 100 \frac{V}{\mu m} \Rightarrow U_{str} = 10V.$$

Grosimea maximă a dielectricului este limitată de coeficientul dilatării termice (ce este diferit de la dielectric față de metal și dacă acesta este mai mare de $1 \mu m$ ar crăpa).

Primul material folosit pt. condensatoarele monolitice a fost SiO (sub formă de praf ce poate fi depus prin vaporizare în vid astfel:



Înainte de a începe depunerea (până când sistemul ajunge la condițiile necesare) W se încălzește puternic până când se stabilizează tot, conductivitatea lui SiO este mică iar primind căldură de la W poate să zboare din vas și să ajungă pe suport prin interiorul diafragmei. Pt a evita acest lucru se pune un ecran. După ce s-a încălzit uniform W se dă la o parte ecranul și are loc vaporizarea prin diafragmă (ce este necesar pt. ca sursa de vaporizare să fie punctiformă pt. a putea calcula grosimea peliculei depuse pe suport).

Dacă luăm materialul:

Material	ε	C_0 [$\mu F/cm^2$]
SiO	$5 \div 6$	$0.01 \div 0.5$
SiO_2	$3.5 \div 4$	$0.004 \div 0.02$
Al_2O_3	10	$0.03 \div 0.08$
Ta_2O_5	$21 \div 25$	$0.1 \div 0.15$

De ex. dintr-o suprafață de $1cm^2$ de SiO poate rezulta un condensator cu capacitatea de $0.5 \mu F$ care însă ocupă o suprafață foarte mare și se vor folosi în concluzie condensatori discreți.

Dacă avem, în concluzie, condensatoare cu capacitate mare putem folosi în cadrul CI condensatoare discrete care pot ocupa o suprafață mult mai mică.

În CIH este rațional de a folosi condensatoare cu capacitate până la $300pF$.

Materiale pt. conductori în CIH

Nu putem folosi în CIH un singur metal pt. a face conductori.

Metal	$\rho[\mu\Omega \cdot cm]$	$\rho_s \left[\frac{\Omega}{patrat} \right] \geq 1000 \text{ \AA}$
Cu	1.6	0.2
Au	2.4	0.27
Al	2.8	0.33
Pd-Au	21	3
Ti	55	10
Ni+Cr	100	15

Deși este cel mai bun conductor, Cu curat nu poate fi folosit în CIH pt. că are adeziune slabă pe plachetă și pt. că are tendințe să se oxideze în timpul procesului.

Cu am putea să-l folosim dacă sub stratul de Cu punem un strat de Ti sau Ni+Cr (ce au adeziune mai mare), și pt. ca Cu să nu se oxideze deasupra mai punem o peliculă de Au \Rightarrow trei pelicule de contact.

Au nu putem să-l folosim simplu pt. că nu are adeziune bună (însă Au nu se oxidează - bun) și depinde cum conectăm elementele circuitului integrat (cu ciocanul de lipit: pelicula de Au se dizolvă în cositor, cu termocompresie este bine).

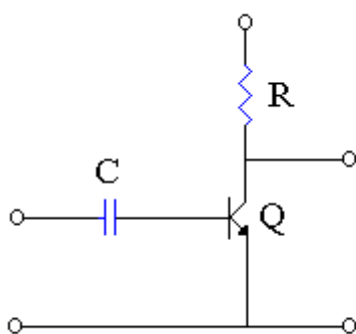
Al se poate folosi în cadrul CI pt. că are o adeziune satisfăcătoare, dar nu se umezește cu cositor \Rightarrow se poate pune deasupra o peliculă de Ni+Cr. Elementele pot fi cuplate direct pe Al cu ajutorul ultrasunetelor.

Fluxul tehnologic de confecționare a CIH cu pelicule subțiri

Topologia CIH se poate forma prin trei metode:

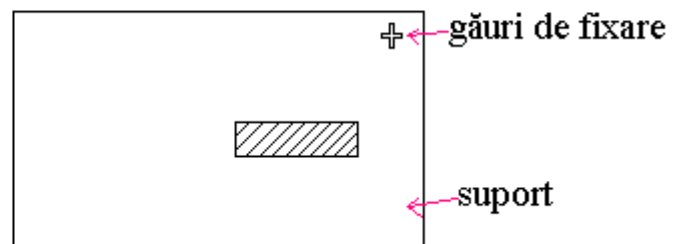
- confecționarea cu ajutorul măștilor;
- confecționarea cu ajutorul fotolitografiei;
- confecționarea combinată.

a) Confecționarea cu ajutorul măștilor

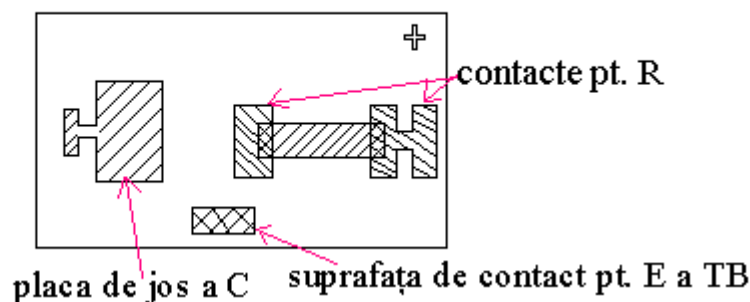


Cum realizăm acest CI cu ajutorul măștilor:

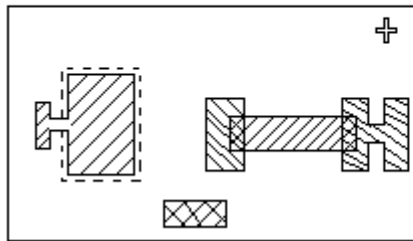
1) depunerea rezistorului prin mască:



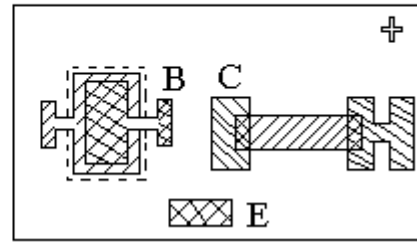
2) depunem toate contactele și placa de jos a condensatorului:



3) depunerea dielectricului:

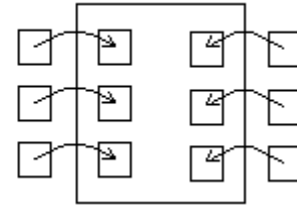


4) depunerea plăcii de sus a condensatorului:



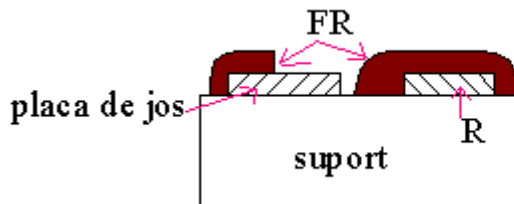
Dacă Q are terminale sub formă de fire le lipim.

Dacă este chip se prind cu ajutorul termocompresiei:



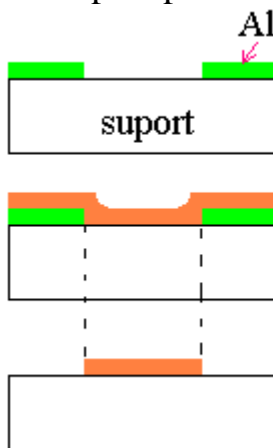
b) Confecționarea cu ajutorul fotolitografiei

Fotolitografia inversă:



la înlăturarea FR se înlătură și dielectricul inutil

Neajuns: nu putem depune FR cu adeziune slabă, pt. că FR este un material organic ce se arde la temperaturi mari. Acest neajuns poate fi înlăturat prin folosirea în loc de FR a unei alt tip de peliculă:



Îndepărtăm Al și odată cu el se îndepărtează și pelicula de Au de deasupra lui și rămâne acea bucată de Au care ne trebuie.

Tehnologia CIH cu pelicule groase

Avantajele tehnologiei:

- prețul de confecționare al acestui circuit este cel mai mic din toate circuitele;
- nu se cer elemente active cu parametri destul de preciși;
- nu se cere utilaj tehnologic scump și de o precizie înaltă.

Un CIH cu peliculă groasă reprezintă un suport dielectric pe suprafața căruia sunt depuse paste (rezistive, conductoare și dielectrice) din care se formează rezistori, condensatoare și conductori ai CI. După confecționarea părții pasive în circuit se cuplează elementele active (diode, tranzistoare, chip-uri).

Principii generale de proiectare a CIH cu pelicule groase:

Care este fluxul tehnologic de confecționare a acestor CIH. Acesta conține următoarele operații:

- 1) proiectarea topologiei;
- 2) confecționarea măștilor;
- 3) depunerea pastei conductoare (după fiecare depunere a pastei se face uscare și apoi coacere);
- 4) depunerea pastei dielectrice;
- 5) depunerea pastelor rezistive;

Pastele rezistive pot avea: $\rho_s = 10 \frac{\Omega}{\text{patrat}} \div 1 \frac{M\Omega}{\text{patrat}}$. Aceste paste le punem în

funcție de cerințele de temperatură.

- 6) ajustarea la nominal;
- 7) conectarea elementelor active;
- 8) ajustarea funcțională (din aceste circuite de ex. nu putem realiza un procesor pt. calculator ci pot fi folosite pt. altele (amplificatoare); prin ajustarea funcțională putem mări capacitatea condensatorului);
- 9) testarea: schemele se testează înainte de a le separa de pe placă;
- 10) separarea CIH;
- 11) încapsulare;
- 12) testare;
- 13) depozit.

Timpul de realizare a acestor CIH cu peliculă groasă este mult mai mic față de cele cu pelicule subțiri.

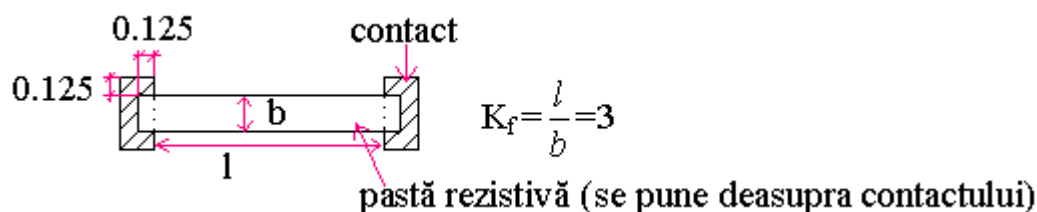
Proiectarea topologiei: cum trebuie să fie așezate elementele pe suprafață astfel încât să nu ocupe prea mult. Trebuie să știm câte rezistoare avem și din câte paste vom confecționa aceste rezistoare (putem să le realizăm din trei tipuri de paste care se deosebesc prin ρ_s). Trebuie să știm puterea de disipare a fiecărui rezistor.

Suprafața rezistorului: $S[\text{mm}^2] = 0.012 P_{\text{utere}}[\text{mW}] \Rightarrow$ suprafața necesară pt. rezistor.

Avem două tipuri de proiectări de rezistoare.

Un rezistor bine proiectat are configurația următoare:

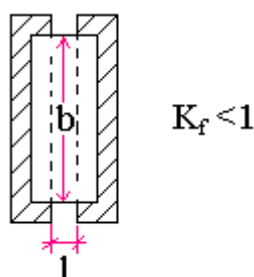
1)



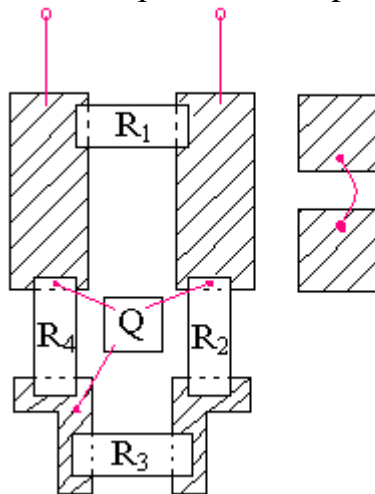
Rezistoarele pot să-și schimbe mult rezistența dacă le coacem da mai multe ori.

Dacă în circuite avem rezistoare de o valoare mică a rezistenței, putem face astfel:

2)



În circuitul pe care l-am proiectat putem avea de ex.:



-avem 4 R conectate în serie, însă prin aducerea la nominal punând două contacte, nu putem măsura și de aceea se despart după care se unesc printr-o sărmuliță;

$$S_R = S_{R_1} + S_{R_2} + S_{R_3} + \dots + S_{R_n} \Rightarrow \text{suprafața totală ocupată de rezistoare.}$$

Trebuie apoi să determinăm suprafața ocupată de condensator.

Știm că $C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S}{d}$; grosimea dielectricului în cazul de față nu este o problemă,

are cel puțin 10μm (satisface perfect cerințele de tensiune de lucru).

Dacă știm ϵ pt. pastă (care se poate schimba între 10 ÷ 100) putem determina S.

Dacă de ex. avem în circuitul integrat un condensator ≥ 300 pF în locul acestui condensator putem pune un condensator discret de de câțiva μF.

Dacă folosim în circuite și condensatoare discrete trebuie să știm anumite detalii.

Suprafața ocupată de condensatoare: $S_C = S_{C_1} + S_{C_2} + \dots + S_{C_n}$.

Suprafața ocupată de elementele active: $S_A = S_{A_1} + S_{A_2} + \dots + S_{A_n}$.

Dimensiunile suportului pe care va fi confecționat acest circuit:

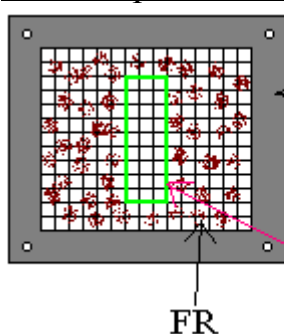
$$S_{total} = S_R + S_C + S_A \Rightarrow S_{suport} = (4 \div 5)S_{total} \Rightarrow \text{pt. traseele circuitului}$$

integrat ne trebuie suprafață mai mare.

Trebuie să aranjăm aceste elemente astfel încât să nu apară întretăieri între trasee, altfel mai trebuie să introducem încă două operații.

Confecționarea măștilor

Primul tip de mască, cea mai simplă:



duraluminiu pe care se așează o sită din metal (sau masă plastică). Această sită este foarte bine întinsă și are împletitura asemănătoare cu cea a sitei de cernut făina.

forma rezistorului

FR

Pe această sită se depune FR cu un pulverizator. Fotomaska se pune pe suprafața plachetei și apoi se fac procesele obișnuite (litografie, uscare...) \Rightarrow forma viitorului rezistor.

După toate procesele de litografie a rezultat o gaură, iar restul suprafeței sitei rămâne acoperită cu FR. Această gaură reprezintă forma rezistorului.

Această mască este utilizată în laborator, nu se utilizează pt. depunerea în masă pt. că la depuneri prea dese se găurește.

Al doi-lea tip de mască permite realizarea rezistorului la două ochiuri și jumătate.

Avem de la început aceeași sită, care se pune pe plăcuță, și se depune FR-ul pe o suprafață netedă (celofan), după care pe celofanul pe care s-a depus FR se face litografia.

Acest celofan nefiind tratat termic, imprimat cu desenul și cu FR pe dânsul, se pune pe această sită, se apasă puțin și se dezlipește apoi celofanul. După ce s-a dezlipit, are loc un tratament termic mai puternic astfel încât sita să intre în FR.

Neajuns: acest tip de mască nu se poate utiliza un timp îndelungat.

Al trei-lea tip de mască este combinată.

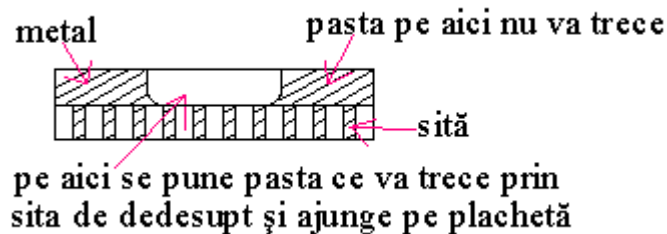
Avem o sită pe care depunem o foiță metalică de o grosime de 100 μm pe care sunt formate locurile pt. elemente (desenele).

Această mască se poate utiliza mai mult (domeniu industrial) însă are un neajuns: foița metalică și sita au coeficienți diferiți și nu vor fi uniforme.

Al patru-lea tip de mască este *masca monometalică* care are configurația:

Avem o foiță metalică de 100 μm și pe jumătate din foiță am făcut o corodare și am realizat geometria elementelor.

Depunem apoi FR și realizăm o expunere prin sită.



Paste și metode de depunere a lor

Există trei tipuri de paste.

Orice tip de pastă conține în cel mai rău caz trei tipuri de materiale:

- 1) materialul funcțional, care determină destinația pasteii;
- 2) materialul de legătură staționară;
- 3) materialul de legătură temporară.

Pasta conductoare:

1)

Ag	mai
Ag+Pd	Vechi,
Au	mai
Au+Pt	scumpe
Au+Pd	
Ni	mai noi,
Al	mai
Cu	ieftine

Aceste materiale sunt prafuri cu diametrul $\phi = 5 \div 15 \mu m$ și în pasta totală sunt în proporție de 75%.

Pastele de Ag nu se mai folosesc în prezent pt. că distanța între contacte sunt foarte mici și ionii de Ag datorită câmpului electric tind să se miște pe suprafața plachetei și pot face lanțuri de atomi între trasee \Rightarrow scurtcircuit. Se mai folosesc la bateriile solare pt. că acolo contactele sunt scurtcircuitate.

Pt. a stopa migrația ionilor în pasta de Ag se adaugă Pd.

Pastele cu Au curat au neajunsul că au o adeziune nu prea bună pe suprafața suportului și Au din pastă se poate dizolva foarte ușor în cositor.

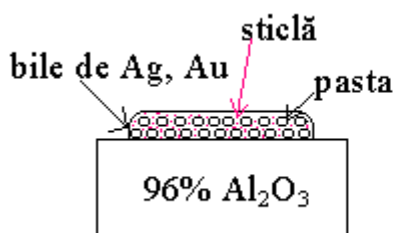
Cele mai scumpe paste sunt cele din Au+Pt și Au+Pd ce au o adeziune bună și nu se dizolvă în cositor.

2) Materialul de legătură constant este sticla, în orice material poate fi folosit astfel: SiO_2 , Al_2O_3 , PbO_2 , Bi_2O_3 .

În pastele conductoare acești oxizi se folosesc în proporție de 5%.

4) Sunt formate din substanțe organice ce reglează vâscozitatea pastei și legătura temporară.

Materialele 1), 2), 3) se amestecă foarte omogen și se depune pe suport.

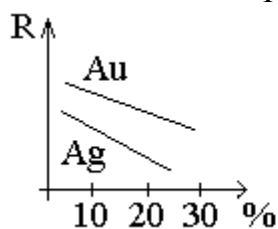


Când am depus pasta pe suport, pt. ca aceasta să conducă curent electric, bilele de Ag sau Au trebuie să fie unite bine între ele, iar intervalele dintre ele trebuie să fie umplute cu material ct. (sticlă), (când s-ar usca materialul 3) dacă nu ar fi materialul 2), Ag ar fi sub formă de praf și s-ar dezlipi).

Pastele rezistive:

Erau formate din același material ca cele din care se formau conductorii.

Trebuie cunoscută precis însă concentrația acestor materiale:



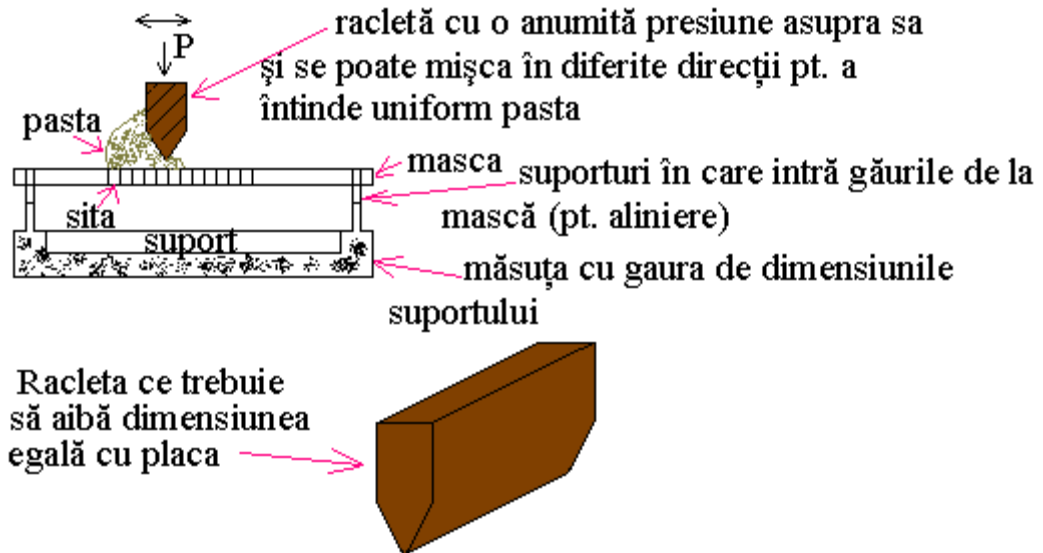
rezistența necesară se face prin depunere de aproximativ 80%, apoi prin creștere o aducem la nominal (vrem o rezistență de 100Ω o facem inițial de 80Ω)

Pastele dielectrice:

În ele se adaugă praf de BaTiO_3 pt. a le crește ϵ (până la 1000). În pastă se află aceeași sticlă pt. a avea aderență bună pe suport.

Procesul de depunere a pastelor

Se depune cu o instalație care are următoarea schemă:



Există două metode de depunere:

- 1) când masca este în contact cu suportul;
- 2) când între mască și suport este o distanță de 500 μm .

1) când masca este în contact absolut cu suportul:



pasta se pune pe o latură a racletei și se întinde pe toată suprafața

Pasta are proprietăți ticsotropice, adică sub acțiunea presiunii pasta își micșorează vâscozitatea și unde nu este acoperit cu FR trece ușor prin ochiurile sitei.

Avantaj: masca pe parcursul depunerii pastei nu se deformează pt. că este în contact direct cu suportul.

2)

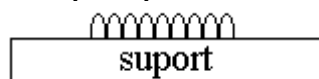


desenul (prin aplicarea pastei are forma sitei, dar pt. că aceasta se ridică repede desenul este mai bun)

Dezavantaj: această metodă deformează masca.

Uscarea și coacerea pastelor

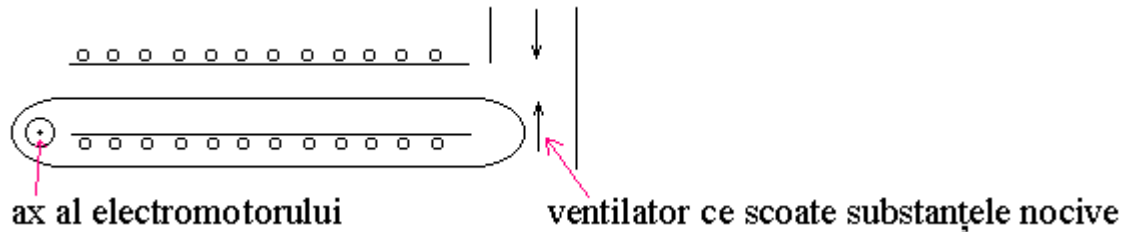
La început după ce s-a depus, pasta are o configurație în funcție de configurația sitei:



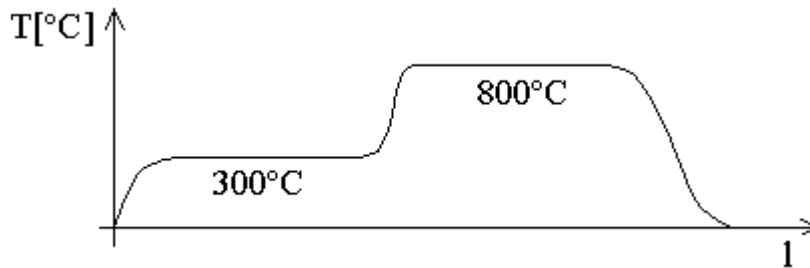
Această pastă depusă nu o punem direct la uscat. Se lasă 20-30 min. să stea și are loc scurgerea acestei paste până se formează o suprafață netedă.

Adesea procesele de uscare și coacere au loc în una și aceeași instalație, scopul uscării este înlăturarea din pastă a substanțelor organice de legătură temporară, iar scopul coacerii este majorarea adeziunii pastei pe suprafața suportului și formarea structurii interne a pastei.

Instalația pt. uscare și coacere:

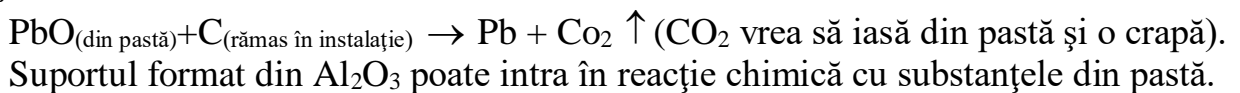


Distribuirea temperaturii pe lungimea cuptorului:



Dacă încălzim prea mult vâscozitatea sticlei scade și bilele plutesc în sticlă, ducându-se apoi la fund \Rightarrow procesul de aglomerație a bilelor. Adeziunea bilelor fără sticlă este mică, iar deasupra sticla nu poate fi încălzită cu cositor pt. lipire.

Coacerea se face într-o atmosferă de gaze inerte (Ar sau N_2). Pot exista următoarele reacții:



Cap.6 Tehnologia circuitelor VLSI

Elementele au dimensiuni micrometrice ($0.12 \mu m$ – lungimea canalului tranzistorului MOS).

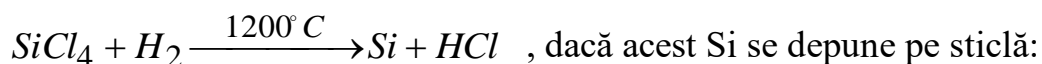
Procese de bază:

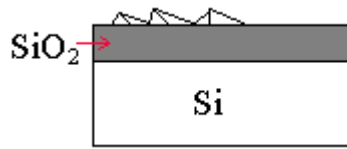
- epitaxie din fascicol molecular;
- fotolitografia cu fascicol de electroni;
- corodarea în plasmă;
- depunerea polisiliciului;
- procese de autoalinier;
- confecționarea metalizării multistrat (până la șase straturi de metale).

Depunerea polisiliciului

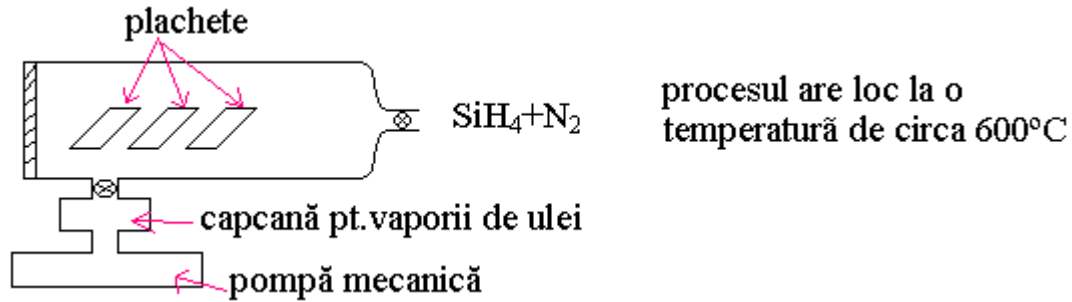
Cea mai importantă utilizare a poliSi este la grila tranzistoarelo MOS. PoliSi dopat poate fi folosit în calitate de contacte în CI. Deasemenea poliSi poate fi sursă de difuzie. Din poliSi se pot confecționa rezistoare precise.

PoliSi reprezintă o peliculă cu foarte multe cristale mărunte orientate în diferite direcții.



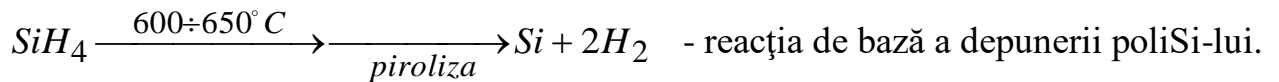
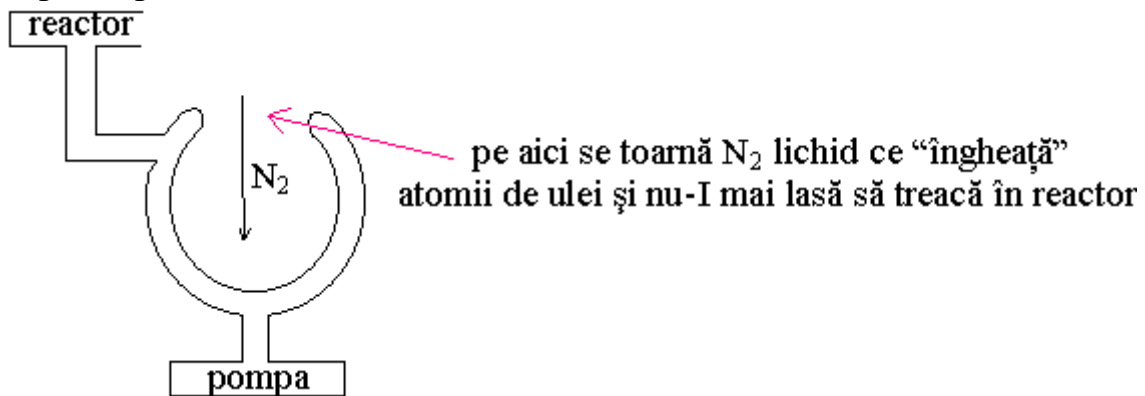


În tehnologia de azi poliSi se depune la o temperatură mult mai joasă:

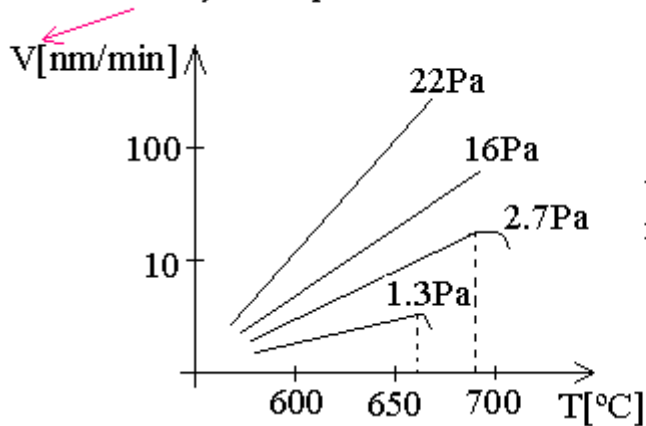


procesul are loc la o temperatură de circa 600°C

Capcana poate fi astfel:

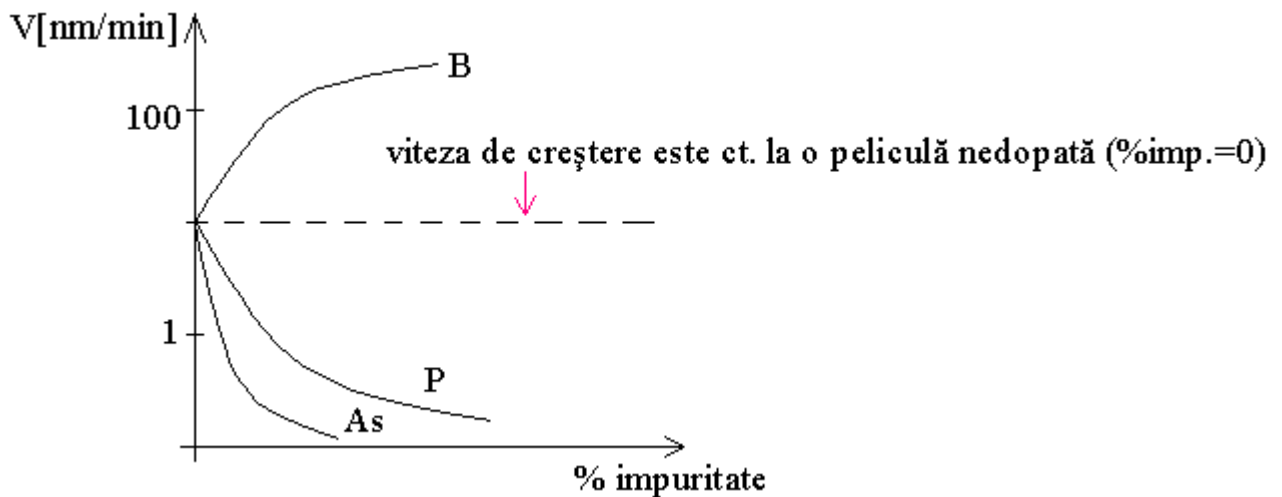


Metoda de creștere epitaxială (la presiuni mai mici ca presiunea atmosferică). Se dă un flux ct. de SiH₄ și cu ajutorul robinetului se poate regla presiunea. viteza de creștere a poliSi



- dacă presiunea este mare viteza de creștere depinde liniar de temperatură, însă dacă presiunea este mică până la un moment dat viteza crește după care scade.

Când dopăm poliSi (în același grafic presupunem temperatura și presiunea=ct.):



Pt. că vitezele sunt mici și scad se face mai întâi o creștere de poliSi curat apoi o implantare ionică.

Tehnologia plasmei în circuitele VLSI

Plasma poate fi folosită pt. depunerea peliculei de SiO_2 , Si_3N_4 , Al_2O_3 din plasmă la temperaturi mai mici decât la oxidarea termică ($500-600^\circ\text{C}$).

Această depunere (în plasmă) se folosește pt. a pasiviza suprafața CI, în general, sau pt. a face metalizare multistrat și trebuie să realizăm izolație între contacte.

Putem depune și la temperatura camerei pe suprafața plachetei.

În 1968 se folosește plasma pt. a înlătura rămășițele de FR de pe suprafața plachetei. Însă la înlăturarea FR-lui o parte din atomi totuși rămâneau pe suprafața plachetei (atomii de St care duceau la scurtcircuitarea între rețelele de contact).

Timp de 10 ani nu s-a mai folosit acest proces. S-a ivit apoi problema că s-a început a se utiliza pelicula de Si_3N_4 , pt. care nu exista un corodant pt. a fi înlăturat și s-a început corodarea acestuia cu ajutorul plasmei.

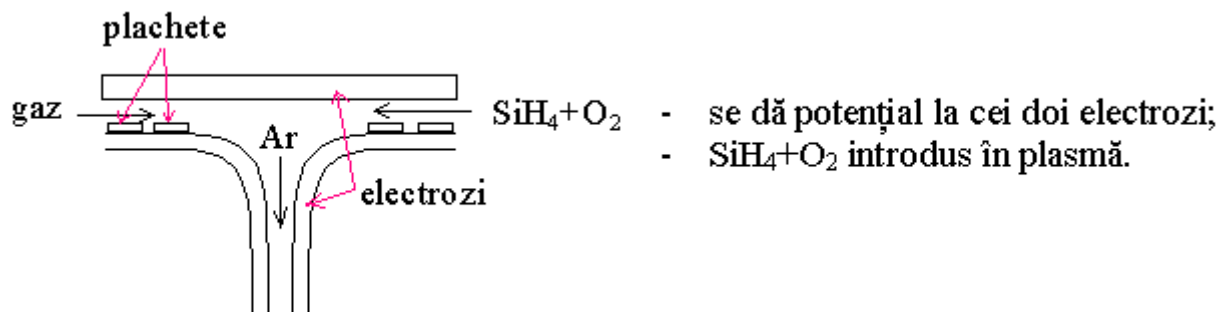
Datorită acestui fapt s-a început cercetarea corodării cu plasmă și începând cu anii '80-'83 plasma a început să fie folosită pe scară largă pt. circuitele VLSI.

Plasma s-a folosit pt. a depune pelicule din: Pt, WF_6 , Mo.

Cum plasma este ioni+electroni \Rightarrow molecula WF_6 (sare de W- în stare gazoasă) se va descompune în: WF_5+F sau WF_5+F^- .

Depunerea SiO_2 și Si_3N_4 :

Se pot depune în plasmă cu instalația:



Procesele care au loc în plasmă:

disociație	$A_2 \rightarrow A+A$ (molecula care conținea doi atomi s-a disociat în doi atomi)
disociație +ionizare	$A_2 \rightarrow A+A^+$
disociație +ionizare	$SiH_4 \rightarrow SiH_2+H+H^+$

Procesul de depunere a peliculei are următoarele etape:

1) absorbția de către suprafața plachetei a radicalilor și ionilor (de ex. $O_2 \rightarrow O+O^+$).

Problema principală constă în faptul că temperatura plachetei poate fi temperatura de cameră.

Molecula de SiO_2 poate fi formată din:
$$\begin{cases} SiH_4 + O_2 \rightarrow SiO_2 + 2H_2 \\ SiH_4 + 2N_2O \rightarrow SiO_2 + 2N_2 + 2H_2 \end{cases}$$

Viteza de depunere a lui SiO_2 depinde de puterea în W aplicată la reactor.

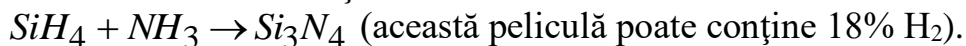
În practică s-a arătat:

Metoda	T[°C] depunere	Raportul $\frac{oxidant}{SiH_4}$	Compoziție	Viteza de corodare [nm/s]
Depunere în plasmă SiH_4+O_2	300	3	-	4.5
SiH_4+N_2O	300	55	$SiO_{1.94}$ $N_{0.06}$	3.0
Reacție chimică SiH_4+O_2	500	1.5	SiO_2	6
Oxidare termică	900	1.5	SiO_2	1.7

Corodarea se face în: $HF+NH_4F$ (1/9). Pt a obține o corodare destul de bună se folosește același corodant.

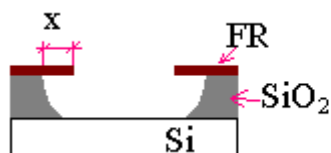
Obs! viteza de corodare scade \Rightarrow oxid dens. Oxid în plasmă folosit doar în izolarea traseelor.

Pt. depunerea în plasmă a Si_3N_4 (e o mască care nu dă voie să treacă O_2) se folosește reacția chimică dintre SiH_4 și NH_3 :



Corodarea uscată

Fie o peliculă de SiO_2 pe care avem depus FR:



Orice substanță corodantă folosită pătrunde și sub FR.

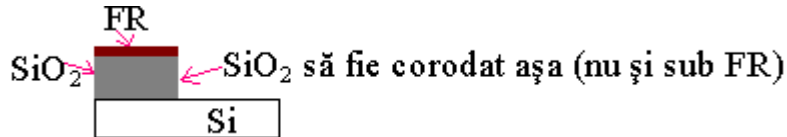
$SiO_2 + HF (x = 25 \mu m) \rightarrow SiF_4 \uparrow$, x=adâncimea de pătrundere a corodantului sub FR.

SiF_4 este un gaz care ridică polimerul.

S-a adăugat în HF, pt. a nu mai pătrunde sub FR, NH_4F :

$SiO_2 + HF(1) + NH_4F(9) \rightarrow SiF_6 \downarrow$, unde SiF_6 cade în soluție.

Această corodare însă nu poate fi folosită în tehnologia VLSI, pt. că nouă ne-ar trebui așa ceva:



Pt. a obține aproximativ configurația de mai sus se folosește: **corodarea în plasmă**.

Dacă notăm prin V_L -viteza de corodare orizontală, V_V -viteza de corodare verticală, atunci anizotropia (=corodare doar pe o direcție) vitezei de corodare este:

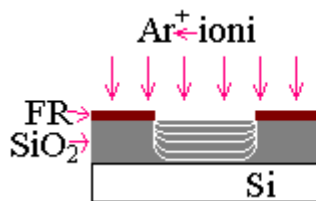
$$A = 1 - \frac{V_L}{V_V}, \text{ dacă } V_L \text{ și } V_V \text{ sunt egale atunci } A=0 \text{ și } \Rightarrow \text{ nu există anizotropie și}$$

corodarea ar fi ca un semicerc. În ultimul desen $V_L=0 \Rightarrow A=1$, predomină viteza verticală.

Tipuri de corodare uscată:

- cea mai simplă:

- pulverizare în plasmă: ținta sau catodul se bombardează cu ioni și din țintă se desprind atomii (se pulverizează ct.);
- corodarea uscată se poate face într-un sistem diodic sau triodic.

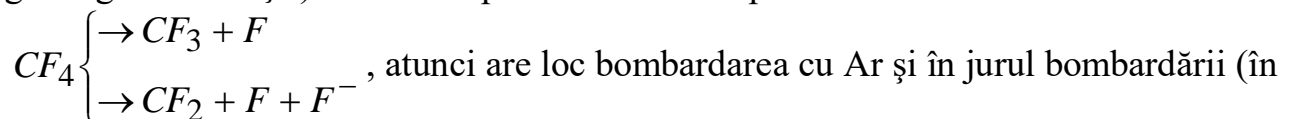


bombardăm cu Ar^+ , atomii de SiO_2 se desprind, ionii de Ar^+ cad vertical în pelicula de SiO_2 și nu pătrund prea mult sub FR.

Dar aici interesează și procesul de selectivitate (corodarea să se finalizeze când ajungem la Si) care în acest caz este greu de obținut.

- FR tot se bombardează cu ioni, tot se poate vaporiza;
- Viteza de distrugere a FR este mai mică decât viteza de corodare a peliculei de SiO_2 .

Primele corodări au avut loc cu utilizarea plasmelor CF_4 (în plasma de Ar se mai adaugă un gaz de reacție). Acesta în plasmă se descompune:



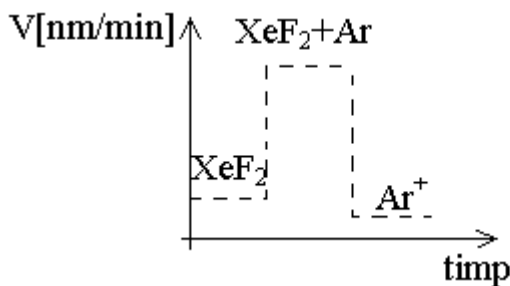
plasmă) mai sunt și atomi de F $\Rightarrow SiO_2 + 4F \rightarrow SiF_4 + O_2 \Rightarrow$ în interiorul plasmelor mai are loc și reacția chimică ce mărește viteza de corodare a peliculei.

În același mod: $Si + 4F \rightarrow SiF_4$
 $SiN_4 + 4F \rightarrow SiF_4 + 2N_2$ - **plasmă reactivă**- plasma în care

are loc și reacții chimice

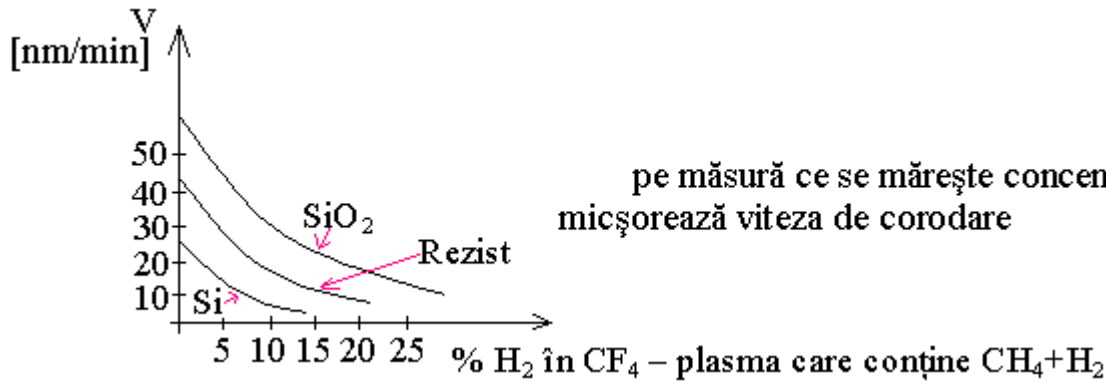
Rezultate experimentale:

- viteza de corodare la niște condiții constante a Si-lui în plasma care conține XeF_2 (gaz), XeF_2+Ar , Ar^+ :

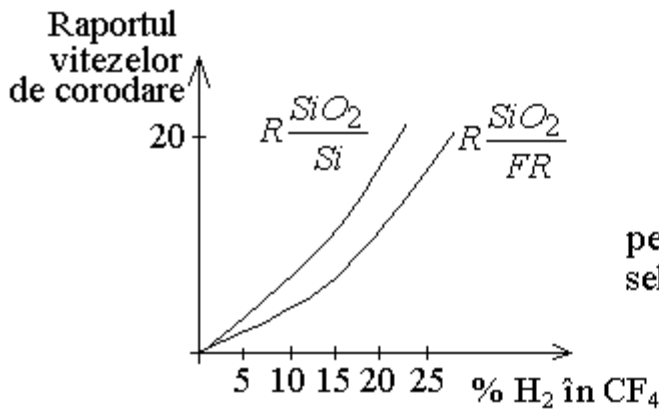


- în plasma de XeF_2 viteza de corodare este mică;
- în plasma de Ar^+ viteza de corodare este și mai mică;
- viteza de corodare în $\text{XeF}_2 + \text{Ar}$ este mai mare pt. că se bombardează simultan și cu atomi de XeF_2 și cu atomi de Ar și în și în plasmă mai există și F .

Date experimentale:

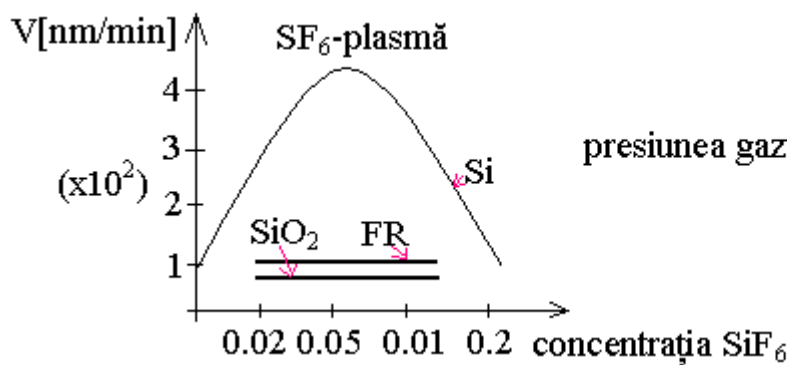


pe măsură ce se mărește concentrația H₂, se micșorează viteza de corodare

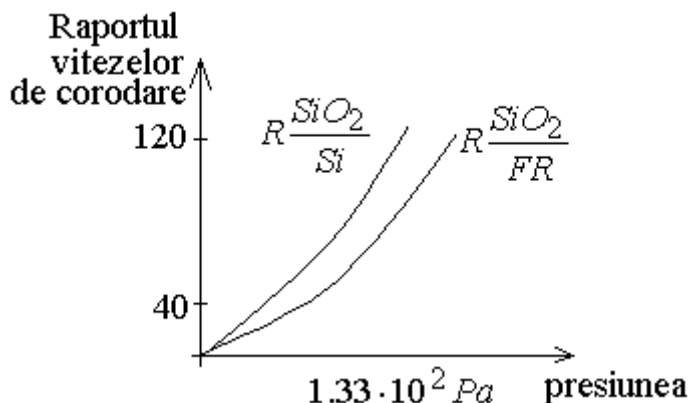


pe măsură ce crește concentrația H₂ se mărește selectivitatea $\frac{\text{SiO}_2}{\text{FR}}$

Corodarea monoSi și a poliSi:

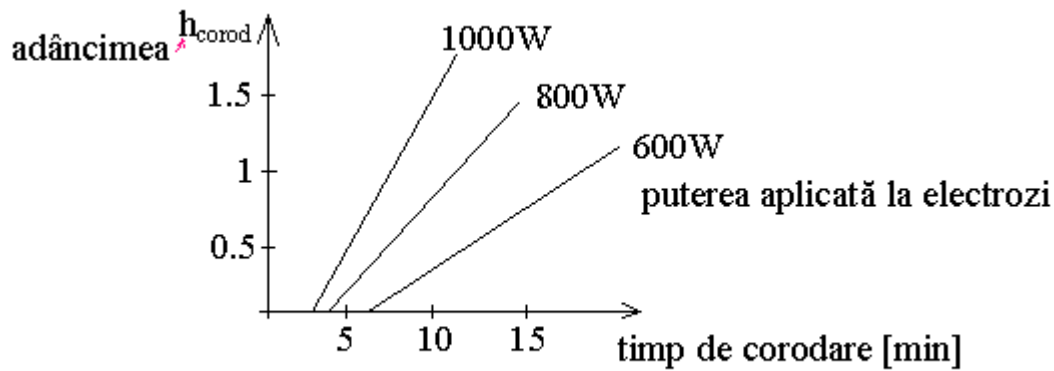


presiunea gazului = $1.33 \cdot 10^2 \text{ Pa}$



Corodarea Al:

Al se corodează în plasmă de tipul: CCl_4 și BCl_3 .



Al are pe suprafața sa Al_2O_3 și până nu se rupe această peliculă nu are loc corodarea Al.

Date pt. proiect:

Material pt. corodant	Gaz	$V_{\text{corodare}} [\text{nm}/\text{min}]$	Selectivitatea		
			Material/FR	Material/Si	Material/ SiO_2
Al, Al-Si, Al-Cu	$\text{BCl}_3 + \text{Cl}_2$	50	5 ÷ 8	3 ÷ 5	20 ÷ 25
PoliSi	Cl_2	50 ÷ 80	5	3 ÷ 5	25 ÷ 30
SiO_2	$\text{CF}_4 + \text{H}_2$	50	5	20	25 ÷ 30
P.S.G. (sticlă fosforsilicată)	$\text{CF}_4 + \text{H}_2$	80	8	32	25 ÷ 30

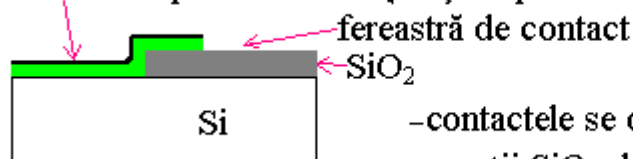
Procese de bază în tehnologia circuitelor MOS integrate pe scară mare (VLSI)

Planarizarea și autoalinierarea:

Pt. un circuit VLSI sunt necesare 17 ÷ 20 operații de fotolitografie. Când toate elementele circuitului sunt gata facem oxidare termică și deschidem ferestre de contact în SiO_2 (le vom deschide prin corodare uscată).

Prima metodă de planarizare a suprafeței plachetei înainte de a depune contactele:

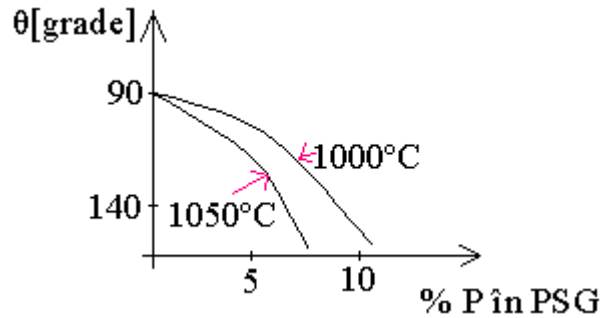
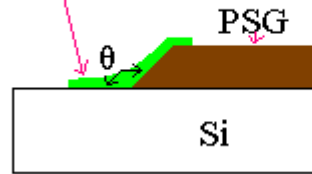
contact sensibil pt. că este subțire și se poate arde la curent mare



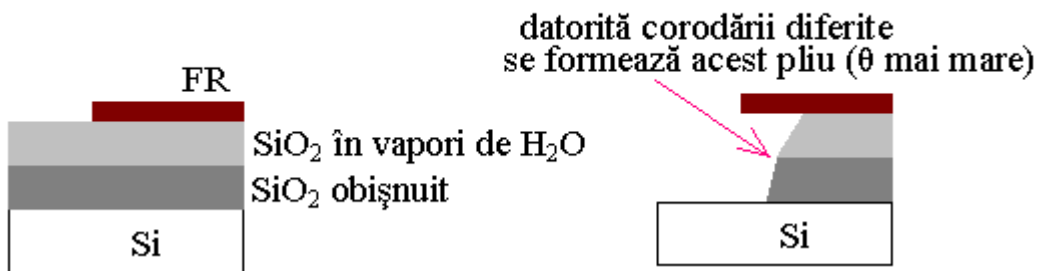
- contactele se depun prin pulverizarea în vid
- pereteii SiO_2 destul de abrupti

La ultima etapă se depune un strat de PSG (Phosfor Silicon Glasse). În atmosferă de O_2 are loc oxidarea termică, dar în același timp în reactor se dă drumul la PCl_3
 $\Rightarrow (\text{SiO}_2)_x (\text{P}_2\text{O}_5)_{1-x}$ = sticlă fosforo-silicată. PSG dacă îl încălzim curge (are $T_{\text{top}} \prec T_{\text{topSiO}_2}$) \Rightarrow unghiul drept care deranjează dispare:

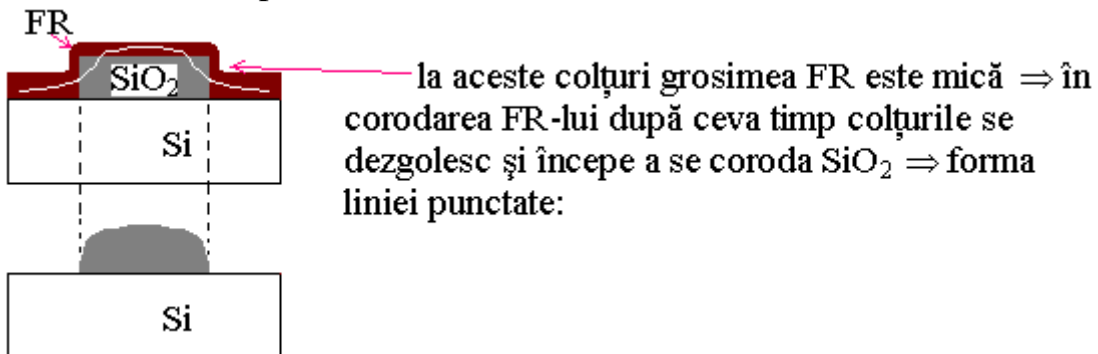
contact depus pe un unghi mult mai mic



A 2-a metodă de planarizare a plachetei (nu se poate folosi în VLSI):
corodarea în acest caz o facem în lichid



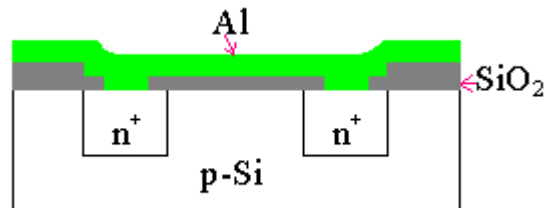
A 3-a metodă de planarizare:



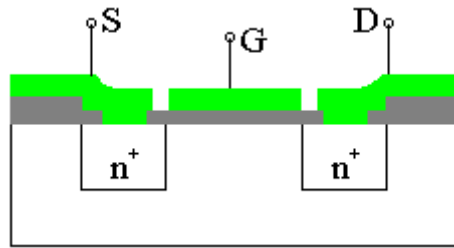
A 4-a metodă de planarizare: folosirea rășinii poliimidice. Această rășină poate fi depusă ca și FR și după ce se încălzește la 300°C aceasta se smulge => pereții nu mai sunt atât de abrupti.

Autoalinieria:

Obs! În tehnologia tranzistoarelor MOS cu grila din Al avem:



În timpul litografiei se greșește (nu se aliniază) cu 0.1 μm (de ex.) (nu e la aceeași depărtare contactul de Al de S și D => capacități de intrare și ieșire diferite).



Fluxul tehnologic pt. procesul de autoalinierare:

1) Fie o plachetă de tip p-Si pe care s-a format prin oxidare obișnuită o peliculă de SiO_2 :



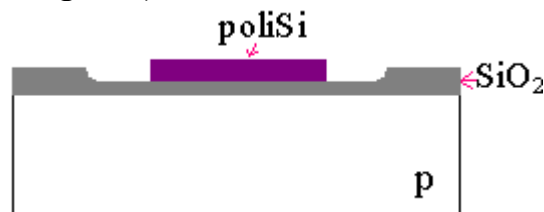
2) Litografie (nu se corodează până la p-Si ci se lasă o grosime pt. grila tranzistorului MOS):



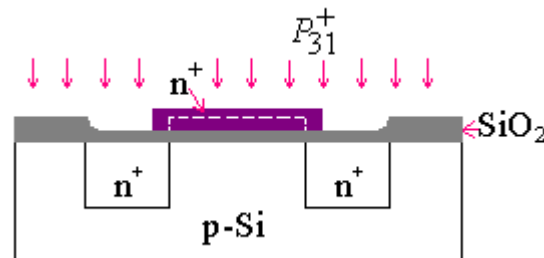
3) Depunerea poliSi cu o grosime $h=1\mu\text{m}$:



4) Litografia pe poliSi (cu fotolitografia se poate lucra până la $2\mu\text{m}$, pt. dimensiuni mai mici se utilizează litografia):

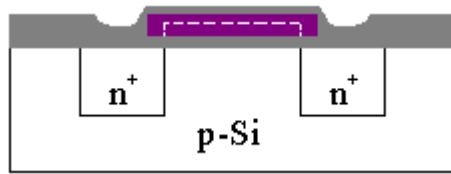


5) Implantarea ionică (ionii trec prin oxid și se formează în plachetă regiunile n^+):

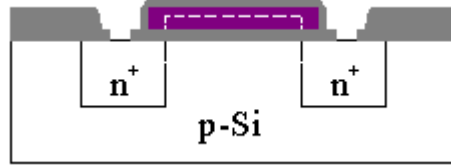


Obs! Poli se crește nedopat pt. că el crește mai ușor și aici se dopează.

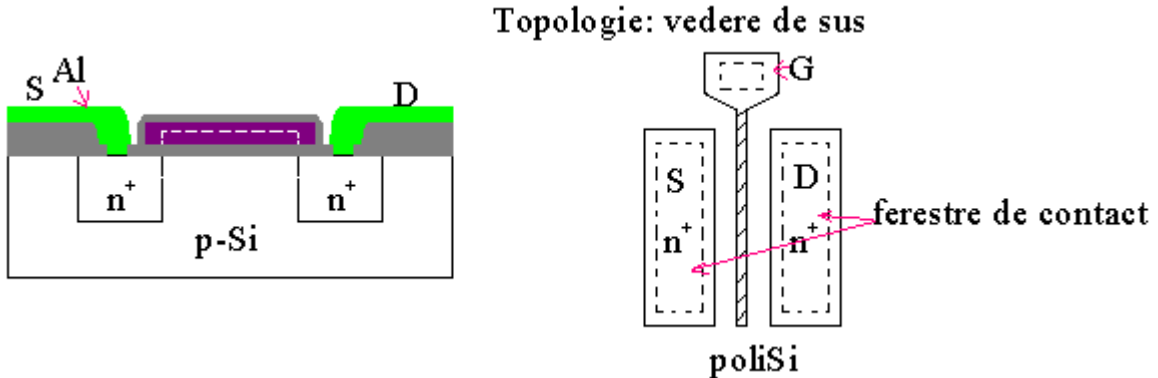
6) Oxidare termică pt. creșterea stratului de oxid de peste S și D și în plus acoperirea poliSi cu oxid (vrem să izolăm G de D și S):



7) Litografie pt. a deschide ferestre de contact (nu deschidem fereastră de contact la G pt. că stratul este foarte subțire, de $0.15\mu\text{m}$, și nu putem):



8) Depunere Al:



Prin acest procedeu de autoalinierare, formându-se mai întâi G, nu mai există distanțe diferite între G-S și G-D.

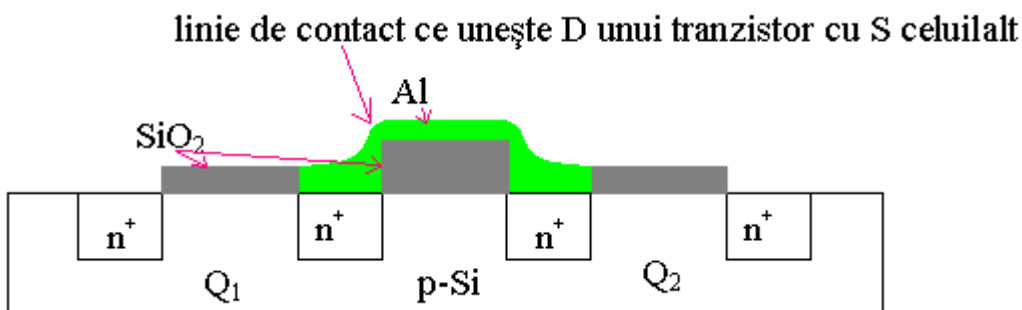
Tehnici de izolare a tranzistoarelor în circuitele VLSI

Circuitele integrate cu tranzistor MOS nu conțin rezistori și nici condensatoare. Acești tranzistori trebuie să fie foarte bine izolați.

Cerințe față de sistemele de izolare a tranzistorului

- 1) Curenții (paraziți) dintre tranzistori trebuie să fie atât de mici astfel încât să poată fi neglijați;
- 2) Suprafața ocupată de izolare trebuie să fie destul de mică ca să nu afecteze gradul de integrare;
- 3) Izolarea trebuie făcută cu metode nu foarte complexe pt. a nu ridica costul circuitului integrat.

Necesitatea izolării: de ex. cu două tranzistoare:



Dacă placheta inițială de p-Si este slab dopată și Q_1 , Q_2 se găsesc la o distanță mare unul de altul atunci izolarea nu este necesară fiindcă tranzistorii sunt izolați de către materialul de tip p care are o mare rezistivitate. Dacă vrem să-i apropiem (pt. grad mare de integrare), sub Al+oxidul (de sub Al) dintre Q_1 și Q_2 se poate induce un canal parazit ce ar duce la scurgerea curentului prin acesta.

În concluzie, elementele CI trebuiesc izolate unul de altul la majorarea gradului de integrare.

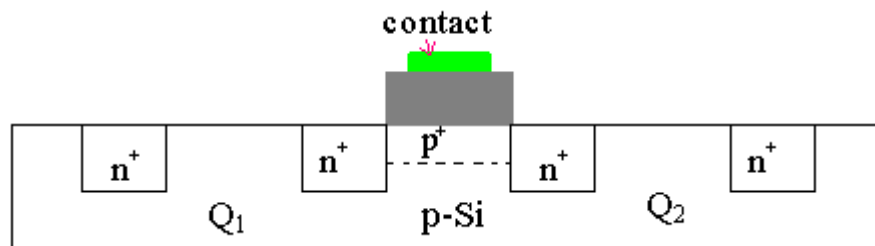
Izolarea poate fi realizată prin patru metode:

- 1) izolarea cu ajutorul oxidului gros și dopării pe câmp (locul liber dintre tranzistoare);
- 2) izolarea locală sau tehnica LOCOS (LOCal Oxidation Silicon);
- 3) izolarea prin șanțuri corodate în Si;
- 4) izolarea cu ajutorul epitaxiei selective.

Aceste metode se deosebesc prin complexitatea lor. Cea mai utilizată este tehnica LOCOS.

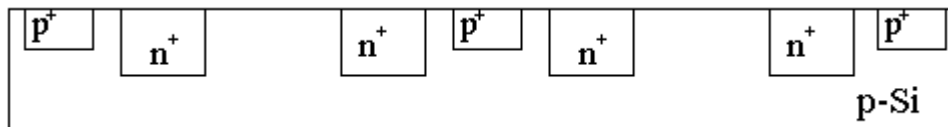
1) **Izolarea cu ajutorul oxidului gros și dopării pe câmp**

Dacă creștem grosimea oxidului, nu se mai poate forma un canal parazit și apar în plus greutatea de deschidere a ferestrelor de contact.



Dacă concentrația impurităților în p-Si va fi mare, trebuie și la oxidul gros o tensiune mare pt. ca să formeze canalul ⇒ în tot câmpul neocupat de tranzistor facem o regiune p+ ⇒ canalul parazit se formează mult mai greu.

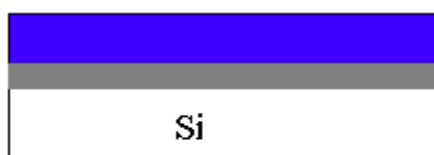
Dezavantaj: se formează joncțiunea p+n+ cu o tensiune de străpungere mică. Această problemă se rezolvă cu inelul de gardă (în jurul fiecărui tranzistor se face un “gărduleț” de p+):



Acest tip de izolare este cel mai simplu, cel mai ieftin, dar nu are performanțe atât de înalte, iar oxidul are trepte destul abrupte.

2) **Tehnica LOCOS** – se folosește pt. a denivela aceste trepte:

a)

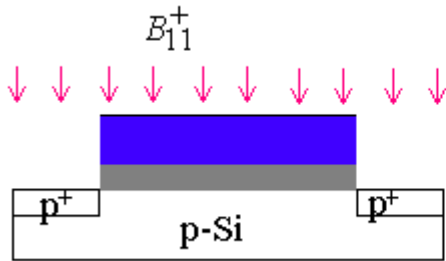


← Si₃N₄ (1μm)

← SiO₂ (0.1μm)=strat buffer pus pt. că coeficientul de dilatare al Si₃N₄ și Si sunt diferiți, iar SiO₂ are același coeficient de dilatare intermediar

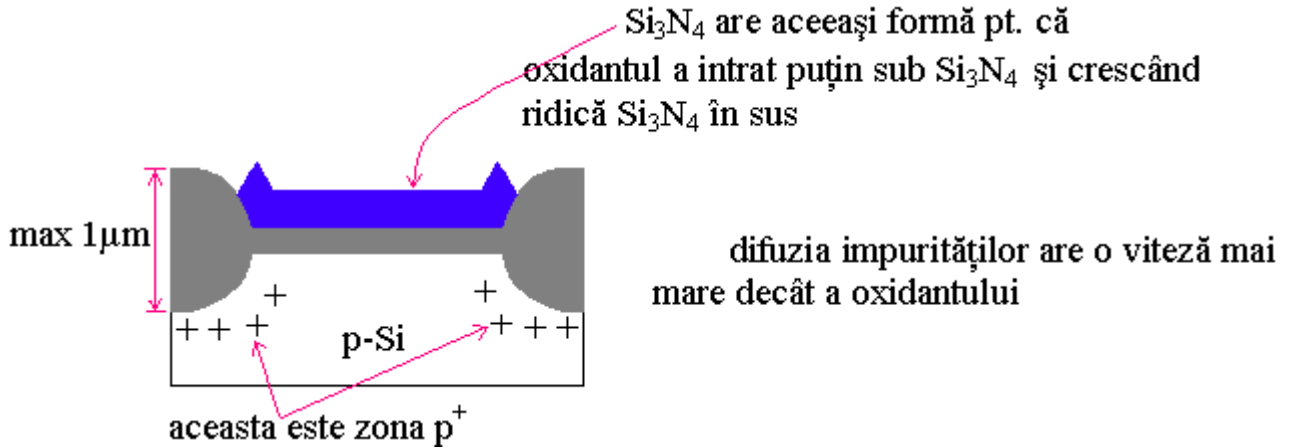
⇒ Si₃N₄ la încălzire/răcire nu va crăpa pe suprafața Si-lui.

b) litografia și implantarea ionică:

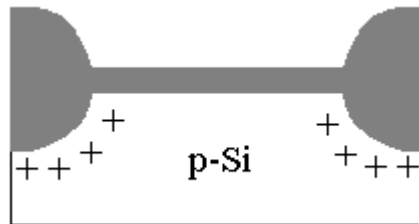


- această regiune p^+ reprezintă în principiu doparea pe câmp, pt. a nu se face un oxid gros

c) oxidarea termică a Si (Si_3N_4 e mască pt. oxidant \Rightarrow se vor oxida doar locurile neprotejate de oxid (p^+)):

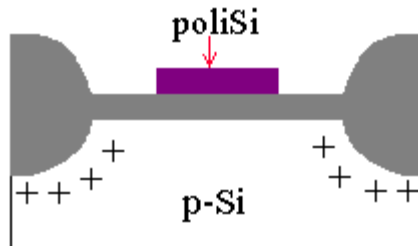


d) Pt. a coroda Si_3N_4 introducem placheta în H_3PO_4 la $T=70^\circ C$, pelicula de Si_3N_4 se înlătură:



Mai departe se repetă tehnologia de obținere a tranzistorului MOS (cu poliSi).

e)



Principala problemă a tehnicii LOCOS constă în aceea că se obține un relief de SiO_2 ce nu este prea abrupt.

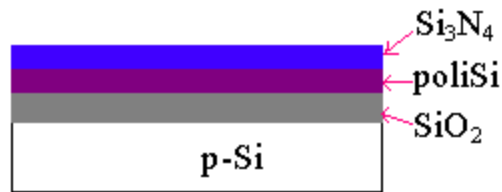
Neajunsurile tehnicii LOCOS:

- "ciocul de pasăre" ce intră sub Si_3N_4 ; datorită forțării stratului de Si_3N_4 (la ridicare) apar defecte și ca urmare nu se pot folosi aceste porțiuni;
- formarea așa numitei oxinitruri (N_2 din Si_3N_4 poate intra în reacție cu O_2 la oxidarea termică \Rightarrow o oxinitură ce frânează pătrunderea O_2 spre adâncime).

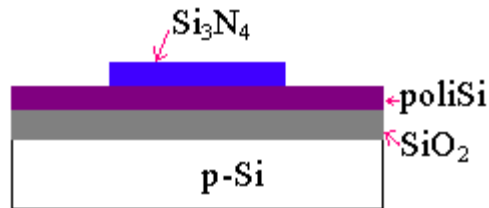
Pt. a evita aceste neajunsuri s-a format **tehnologia SEPOX** (Selective Polisilicon Oxidation).

Ca să nu apară defecte în cristal, nu oxidăm cristalul ci poliSi-ul.

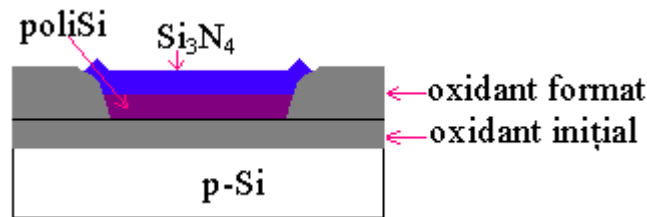
1)



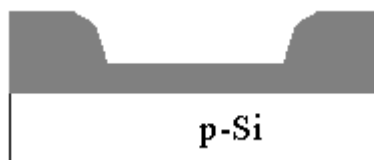
2) fotolitografie:



3) oxidare (oxidantul pătrunde sub Si_3N_4 pe care îl ridică în sus și îl rupe de pe poliSi):



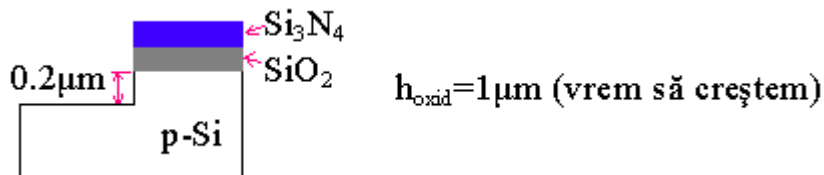
4) îndepărtăm apoi Si_3N_4 și poliSi-ul, iar defectele ce data trecută apăreau în oxid acum sunt în poliSi-ul ce se îndepărtează:



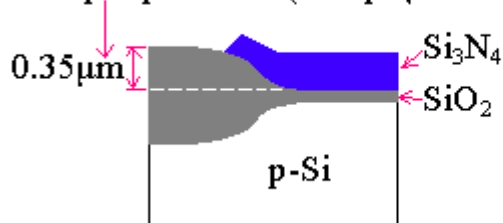
Se face în continuare cu tehnologia de mai sus.

4) **Izolarea prin șanțuri corodate în Si**

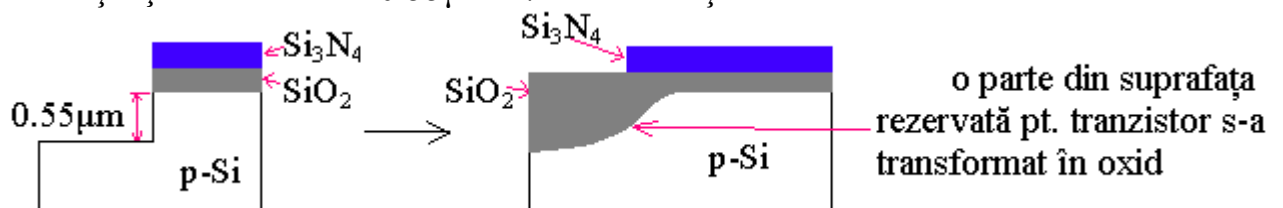
În jurul viitoarei structuri s-a făcut un șanț.



deasupra plachetei (mai puțin ca în cazul LOCOS)

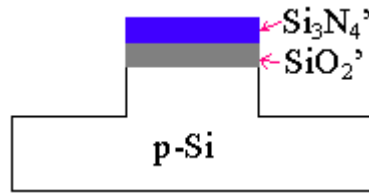


Dacă șanțul l-am face la $0.55\mu\text{m}$ \Rightarrow ar fi același nivel:

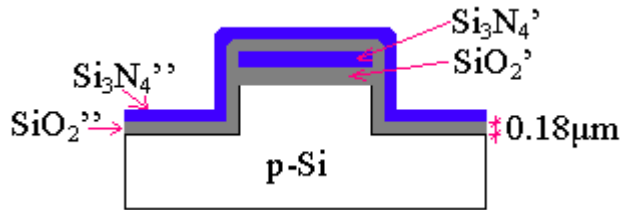


Neajuns: oxidul este mult și scade suprafața de integrare și soluția ar fi ca să punem și pe partea laterală a șanțului Si_3N_4 și SiO_2 :

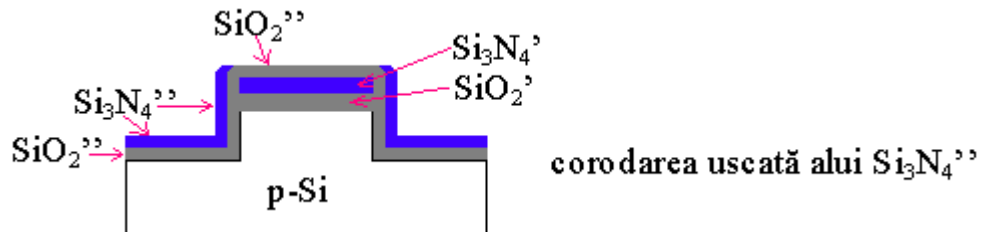
1)



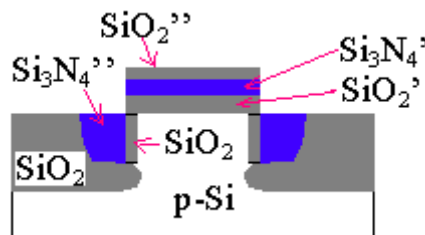
2) depunem în plasmă SiO_2 și Si_3N_4 (într-un singur reactor):



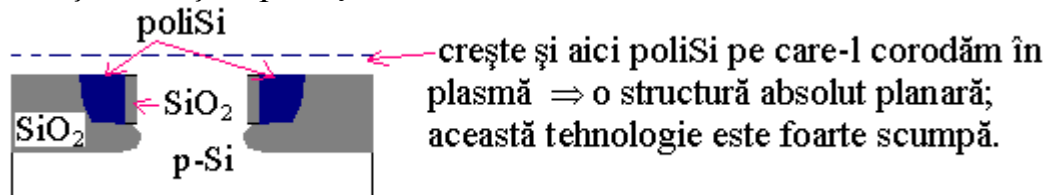
3) în același reactor facem corodarea uscată (fără litografie): bombardăm suprafața cu ioni \Rightarrow se corodează numai pe suprafețele orizontale:



4) problema este că atunci când vom înlătura Si_3N_4 apar niște găuri ce se pot umple cu poliSi (sau cu SiO_2):



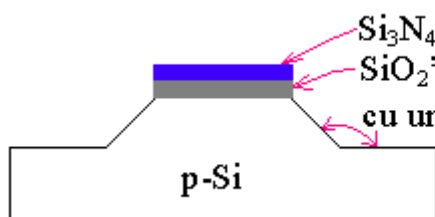
5) apoi are loc o șlefuire și suprafața rămâne absolut netedă



Apoi are loc o șlefuire și suprafața rămâne absolut netedă.

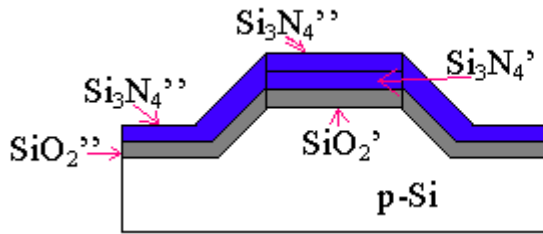
Altă metodă de izolare cu șanțuri ce exclude creșterea și șlefuirea:

1) placheta cu orientarea (100) + operațiile inițiale:



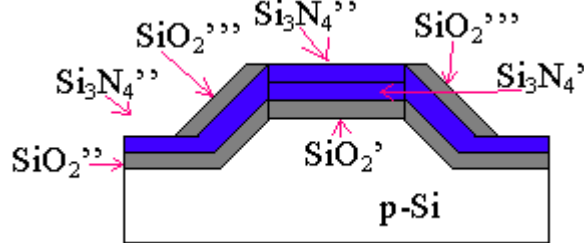
cu un corodant s-au săpat șanțuri sub un unghi de 45°

2) oxidare termică $\Rightarrow \text{SiO}_2$ și depunerea lui Si_3N_4 în plasmă:

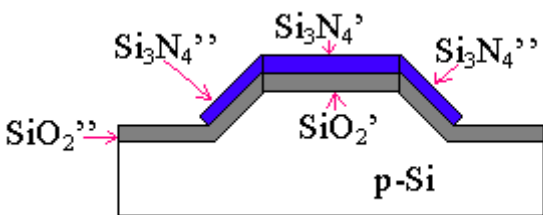


- peste Si_3N_4 nu se poate face oxidare
 \Rightarrow nu crește SiO_2 peste Si_3N_4

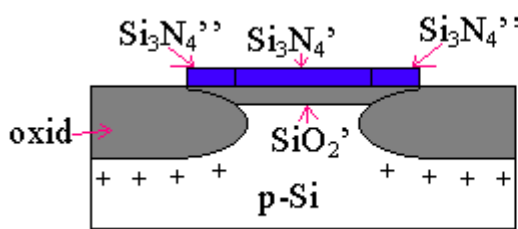
3) pt. ca în cursul bombardării să nu se strice Si_3N_4 depunem în plasmă SiO_2 pe care îl corodăm astfel încât să rămână doar pe părțile laterale:



4) corodare în plasmă pt. înlăturarea lui Si_3N_4 de pe părțile orizontale:



5) oxidare adâncă:



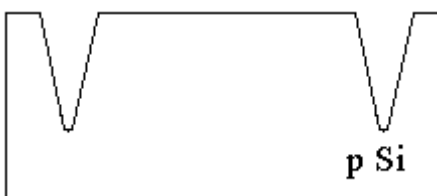
- prin oxidarea lui Si_3N_4 de pe părțile laterale, acesta se ridică la nivelul lui SiO_2 și nu se mai formează șanțuri cu Si_3N_4 \Rightarrow nu se mai fac operațiile de șlefuire și creșterea a poliSi-lui sau a SiO_2 .

Izolarea cu șanțuri de tipul V

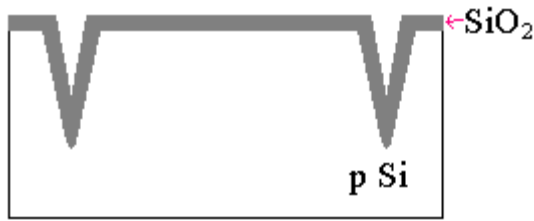
1) fie o plachetă de tip p-Si cu orientația (100):



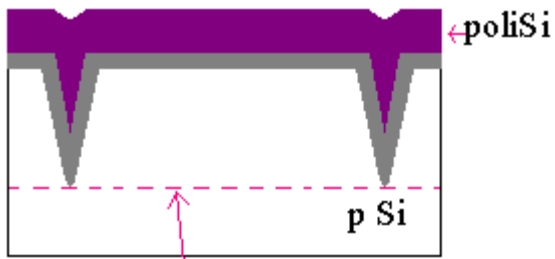
2) în plachetă s-au realizat șanțuri prin corodare:



3) oxidarea termică:



4) depunerea poliSi-lui (h=100μm):



granița de șlefuire

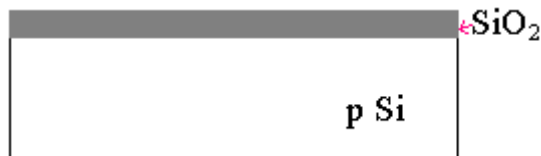
5) se întoarce structura invers (după șlefuire) conform tehnologiei EPIC:



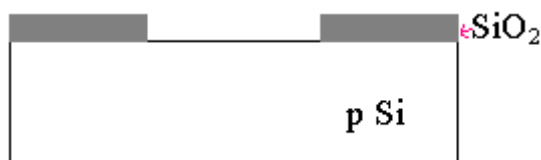
Neajunsuri: procesul de șlefuire este greu de făcut (datorită preciziei).

4) **Izolarea cu ajutorul epitaxiei selective** - are cele mai multe avantaje.

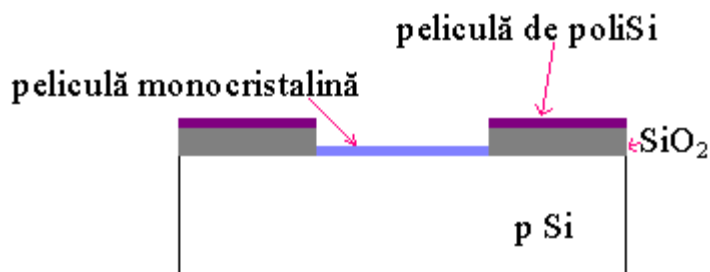
1) fie o plachetă de tip p-Si pe care realizăm o oxidare de h=1μm:



2) litografie (se deschide fereastră pt. noul tranzistor):

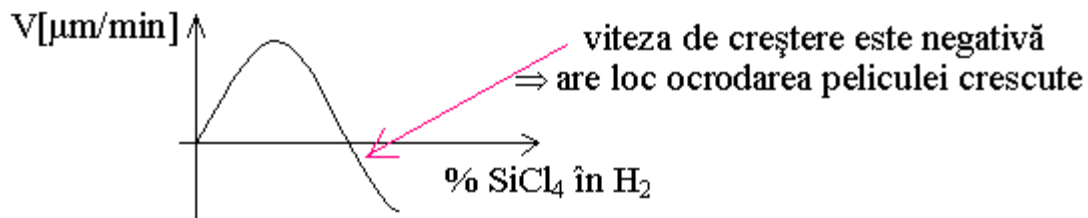


3) creștere epitaxială:



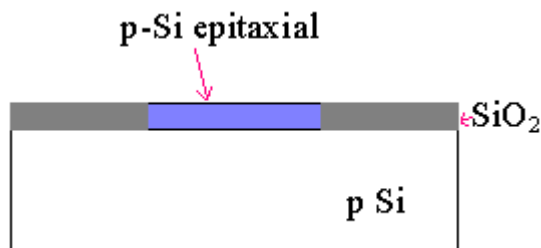
Nu putem crește pelicula până la capăt pt. că Si crescut se depune și pe marginile găurii (le vom crește pe rând peliculele).

Pt. a înlătura defectele de la capătul găurii: $SiCl_4 + H_2 \rightarrow Si + HCl$.



Se crește un pic de strat epitaxial după care se dă drumul la SiCl_4 și are loc corodarea stratului de pe marginile găurii. Această operație se repetă de 10 ÷ 15 ori.

4)



1 μm de Si epitaxial este de ajuns pt. a se face în el un tranzistor.

Avantaje: - stratul p-Si epitaxial are mai puține defecte decât placheta crescută prin metoda Czochalski;

- suprafața este absolut plană.

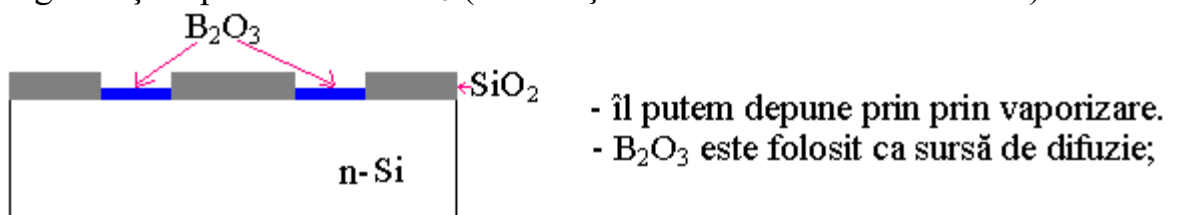
Tehnologia PMOS standard

În această tehnologie se ia o plachetă de n-Si cu orientația (111) și cu $\rho = 3.5 \div 5 \Omega \cdot \text{cm}$.

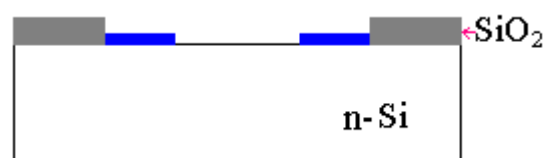
1) această plachetă se oxidează:



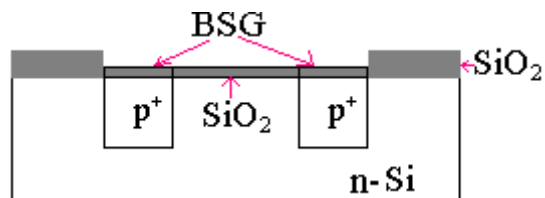
2) litografie și depunerea lui B_2O_3 (substanță care la $T=400^\circ\text{C}$ este lichid):



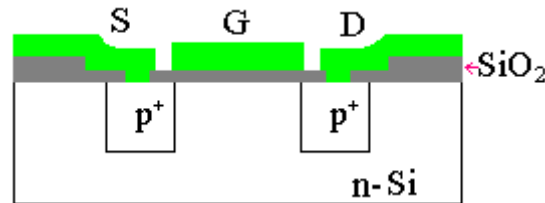
3) prin litografie se înlătură SiO_2 gros (îl lăsăm doar pe cel care nu este pe câmpul tranzistorului):



4) creșterea oxidului subțire la o temperatură destul de înaltă (900°C) \Rightarrow B se "înfundă" în plachetă și se formează BSG (Bor Silicon Glasse) deasupra B_2O_3 ce poate fi îndepărtată ușor:



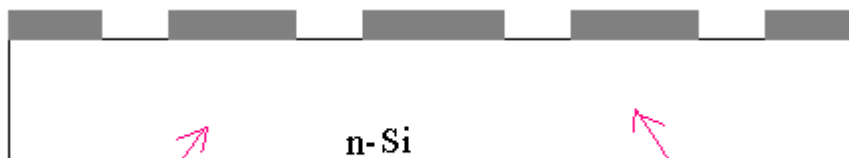
5) litografie, deschidem ferestre de contact, prin tehnologia standard \Rightarrow tranzistorul:



Tehnologia PMOS actuală

Conține tranzistorul cu canal inițial și cu canal indus.

1)



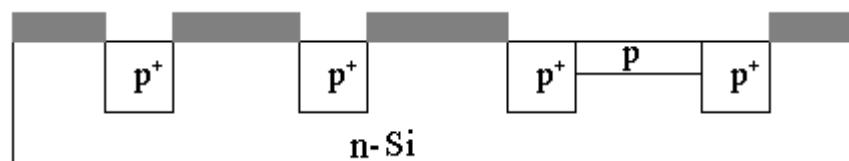
aici vrem să facem T cu canal indus

aici cu canal inițial

2)

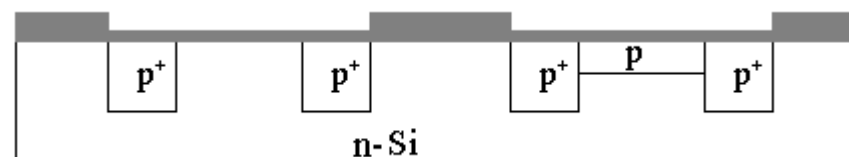


3) litografie + difuzie din sursă lichidă- BBr_3 :

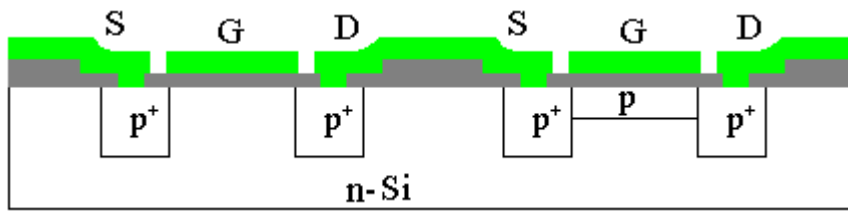


Reglăm concentrația astfel încât să se creze o regiune p nu mai mare de $1\mu\text{m}$ (lățimea $p \sim V_{\text{TH}}$). B intră și în zonele p^+ dar nu le schimbă proprietățile.

4) litografie (înlăturăm oxidul gros de sub G)+ oxidare termică \Rightarrow un strat de oxid subțire:



5) litografie pt. ferestre de contact, depunerea Al, litografie pt. înlăturarea Al ce nu este necesar, pasivizarea, etc:



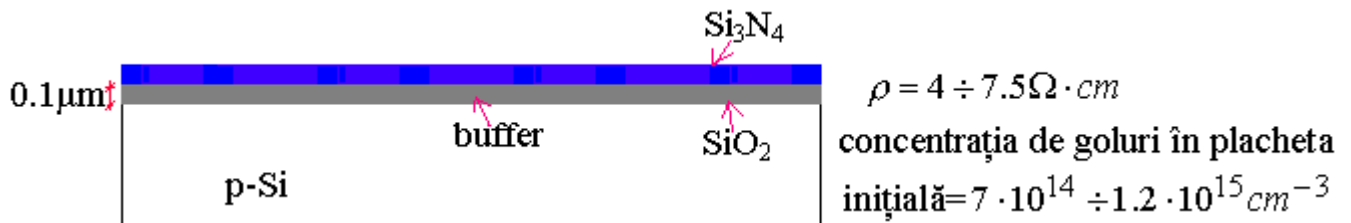
Tehnologia NMOS de bază

Cuprinde toate operațiile caracteristice VLSI:

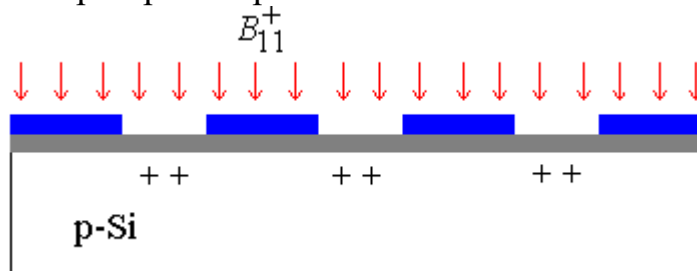
- tehnica de izolare LOCOS;
- poliSi;
- implantarea ionică;
- tranzistori cu canal indus și cu canal inițial.

Se ia o plachetă de tip p inițial cu orientația (100) (sarcina acumulată în oxid pe placheta (100) este mai mică decât pe (111) \Rightarrow capacitățile sunt mai mici).

1)

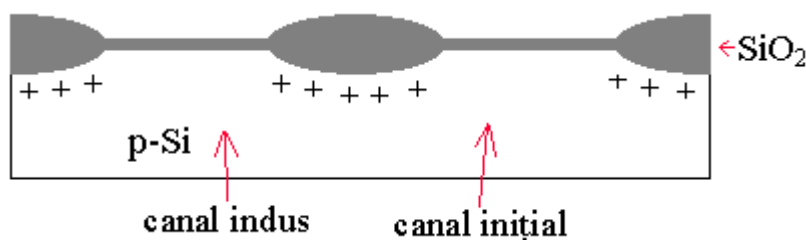


2) litografia + dopări pt. câmpul dintre tranzistoare:

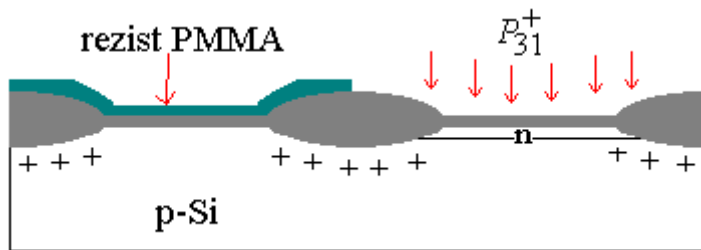


Oxidul nu trebuie înlăturat pt. că se folosește implantarea ionică B_{11}^+ ce trece prin oxid.

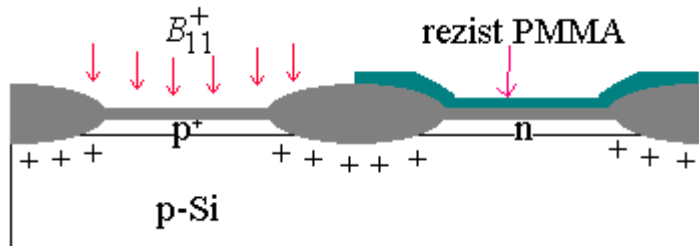
3) oxidare locală și înlăturarea Si_3N_4 :



4) depunere rezist + implantare ionică P_{31}^+ \Rightarrow canal inițial de tip n:

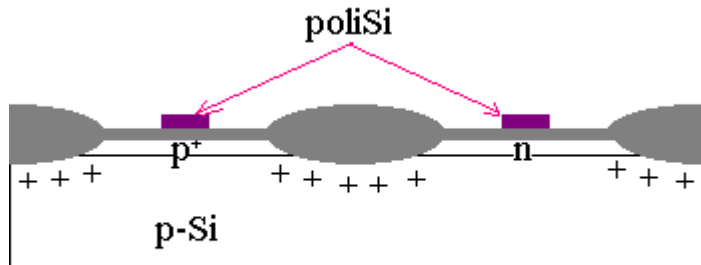


5) litografie:



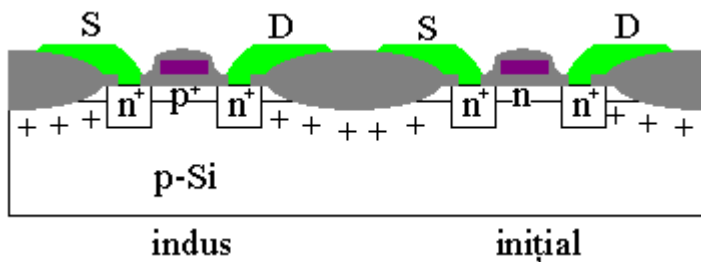
Rezistul este pus pt. ca să se poată face implantarea ionică B_{11}^+ . Se face implantarea ionică B_{11}^+ pt. ca acești doi tranzistori să fie simetrici din punct de vedere al tensiunii de prag.

6) înlăturarea rezistului, depunerea poliSi-lui, litografia pe poliSi:



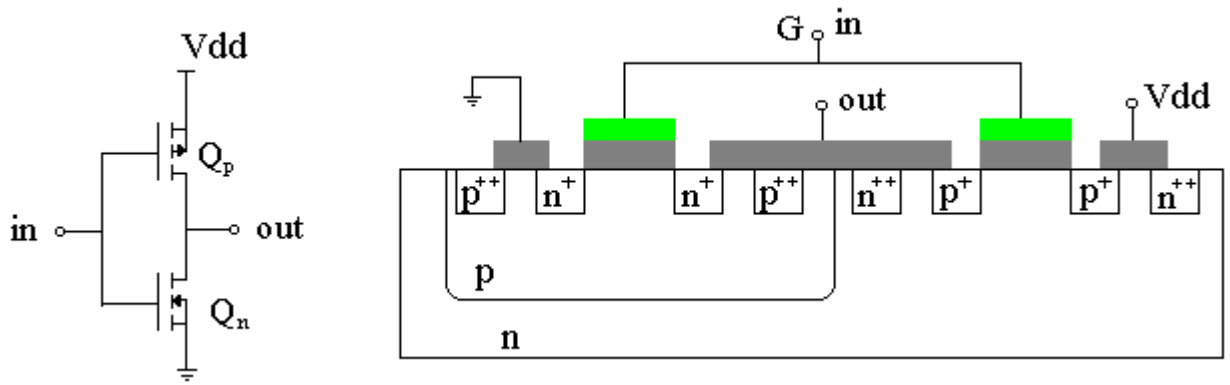
Aici se poate face autoalinierarea.

7) implantare ionică P_{31}^+ , oxidare, litografie – ferestre de contact, depunere Al, litografie pt. înlăturarea Al, depunerea oxidului de pasivizare, litografia pt. deschiderea ferestrelor de contact:



Tehnologia CMOS în circuitele VLSI

Include toate avantajele pe care le are tehnologia NMOS.
Structura unui inversor:

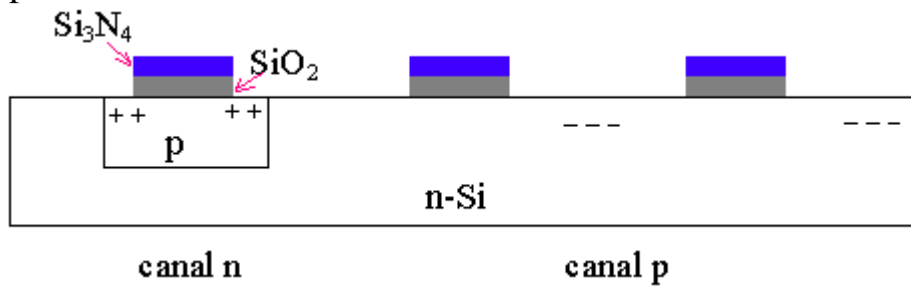


Obs! Avem numai tranzistor cu canal indus de tip ϕ și de tip n.

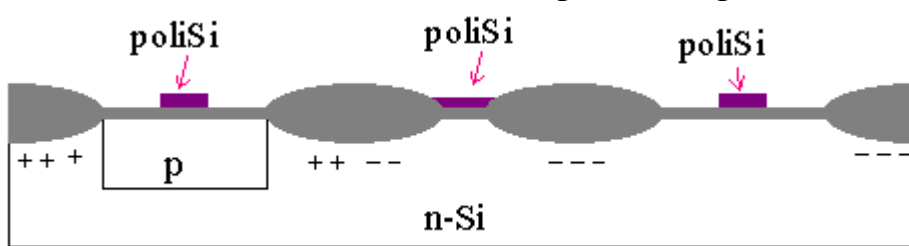
1) oxidare, fotolitografie, difuzie (nu putem face implantare ionică deoarece insulița de tip p trebuie să fie mai mare de $1\mu\text{m}$ (maximul ce se poate face cu implantarea ionică)):



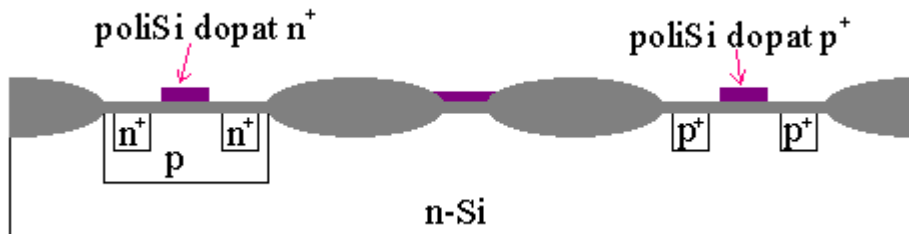
2) înlăturarea oxidului, (tehnologia LOCOS), oxidare termică, depunerea Si_3N_4 , litografie, implantare:



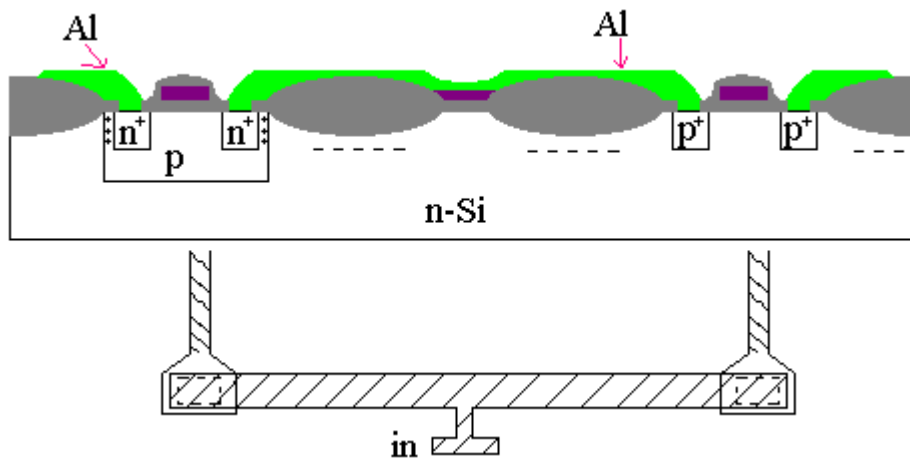
3) oxidarea LOCOS, înlăturarea lui Si_3N_4 , poliSi, litografie:



4) facem difuzia n^+ acoperind cu rezist tranzistorul cu canal p și invers pt. canal p pt. sursă și drenă, litografie, implantare ionică P_{31}^+ , litografie, implantare ionică B_{11}^+ :



5) oxidare, fotolitografie (ferestre de contact), depunere Al, litografie pe Al:



Depărtarea între S și D este submicronică, ca urmare contactul pt. G va fi scos înafară prin tehnologia știută.