

BAZELE TEHNOLOGICE ALE MICROELECTRONICII

Bibliografie:

Ion Pârvu – Produse anorganice semiconductoare (1997)

Tehnologia materialelor semiconductoare

Radu M. Bârsan – Fizica și tehnologia circuitelor MOS integrate pe scară mare (1989)

Paul Gray, Robert Mayer – Circuite integrate analogice – Analiză și proiectare

Cap.1 Tehnologia materialelor semiconductoare

Etapele principale de dezvoltare a tehnologiei materialelor, dispozitivelor și circuitelor semiconductoare

În 1806 în Îndrumătorul de cuvinte se spunea că tehnologia include în sine aproape tot ce știu și ce fac oamenii. În Dicționarul Enciclopedic Rus în 1877 se spunea că tehnologia este știința despre producerea uneltelor de muncă și poate fi împărțită în două direcții: mecanica și chimia.

Mecanica se ocupă de prelucrarea materiei crude cu ajutorul meseriilor.

Chimia transformă materia pe baza reacțiilor chimice.

După Dicționarul Politehnic din 1980, tehnologia provine de la două cuvinte din greacă: “*tehne*” – măiestrie și “*logos*” – cuvânt, știință și aceasta reprezintă metode de prelucrare, producere și schimbarea proprietății formei materiei prime pt. obținerea producției finale.

Pentru a realiza un oarecare dispozitiv sau circuit integrat (C.I.) trebuie îndeplinită o succesiune de operații tehnice.

Se numește operație tehnică un proces care este îndeplinit la un anumit loc de lucru.

Există operații tehnice: - **principale**(sunt acele operații datorită cărora operația devine un produs final);

- **secundare**(creșterea epitaxială; purificarea H₂).

Proces de producere – include toate lucrările care se îndeplinesc la firmă pt. a produce un produs finit. Primele utilizări ale materialelor semiconductoare în tehnică au fost redresoarele pe baza seleniului (1886 - Frits). În 1927 (Grondal și Ghigher) au fost folosite redresoarele pe baza CuO (oxid de cupru).

Ge și Si au proprietăți semiconductoare foarte bune. Proprietățile principale ale Ge au fost descrise în 1870 de către Mendeleev.

În 1886 Vinclev a sintetizat pentru prima oară Ge (în Germania, de unde vine și numele).

În scoarța pământului Ge există doar în valoare de 0.001% , pe când Si este foarte răspândit în sol sub formă de bioxid de siliciu (SiO₂) și el constituie 25% din greutatea pământului.

În 1951 N. Ganiunov a descoperit un șir de materiale semiconductoare:

| | | | | |
|----|-----|----|----|----|
| II | III | IV | V | VI |
| Cd | In | Ge | As | S |
| Zn | Ga | Si | P | Se |
| Hg | Al | Sn | Sb | Te |

Dacă facem un aliaj din elementele din grupa a-V-a cu elemente din grupa a-III-a obținem un material de forma A^{III}B^V - care are proprietăți semiconductoare binare.

Banda interzisă (E_g) pt. aceste semiconductoare este: GaAs=1.45eV, GaP=2.2eV, InP=1.35eV, InAs=0.24eV, InSb=0.16eV, AlAs=3eV. Banda interzisă pt. Ge și Si:

E_g Ge = 0.707eV;

E_g Si = 1.1eV.

Lungimea de undă a ledurilor: $\lambda = \frac{1.24}{E_g}$ - lumina infraroșie.

Led-urile roșii se fac pe bază de GaP. InSb are cea mai mare mobilitate a purtătorilor de sarcină. Al_xGa_{1-x}As – amestec format din GaAs și AlAs este folosit la lasere.

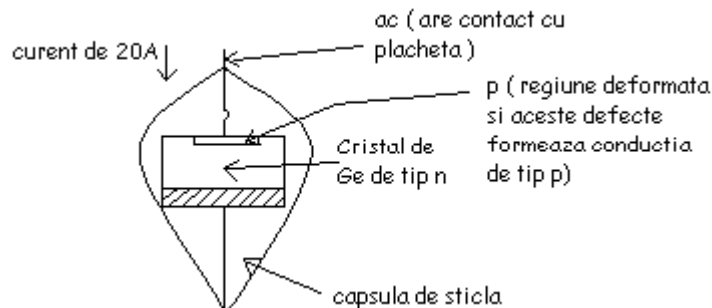
În 1963 pt. prima dată la Chișinău a avut loc o conferință de fizica semiconductoare – Laser pe baza semiconductorilor cu joncțiune pn.

N Ganiunov a mai arătat că elementele din grupa a-II-a și a-VI-a formează elemente cu proprietăți semiconductare: A^{II}B^{VI} (E_g ZnTe = 2.4eV, ZnSe, E_g CdSe = 1.45eV, CdSe, E_g Hg ≈ 0, HgAs).

Cd_xHg_{1-x}Te – pe baza acestui material se fac unele fotoreceptoare care au proprietatea de a vedea noaptea.

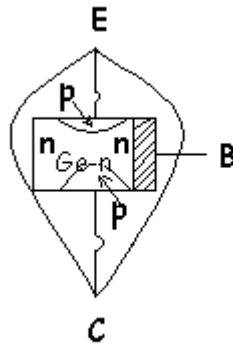
Compuși cuaternari – In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y} se folosesc pt. lasere cu lungime de undă între 1.3 și 1.55μm.

În 1939 pt. prima dată a fost stabilit din punct de vedere teoretic posibilitatea de formare a tranzistorului. În 1940 pt. prima dată a fost creată dioda punctiformă.



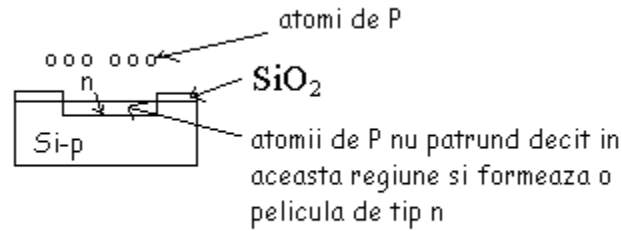
- frecvența de funcționare normală.

În 1948 savanții americani Bardin, Bratın și Shacly au realizat tranzistorul cu contacte punctiforme.



În 1955 a apărut tehnologia joncțiunii pn formată prin difuzia impurităților (primele tranzistoare formate prin difuzie).

În 1957 s-a demonstrat că pelicula de SiO_2 cu grosime de $1\mu\text{m}$ nu permite trecerea impurităților, iar în 1959 această peliculă a fost folosită în microelectronică.



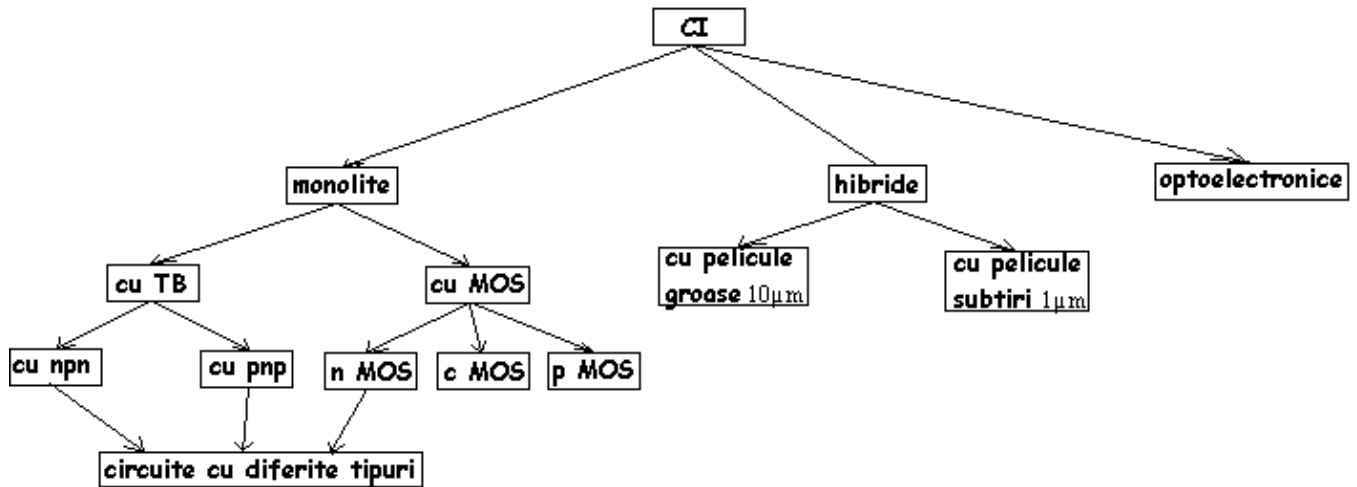
În 1959 au apărut primele circuite integrate (CI) care conțineau tranzistoare bipolare (TB).

În 1964 au fost confecționate primele CI cu tranzistoare MOS.

În 1968-1969 s-au făcut primele led-uri (diode luminescente).

În 1970 deja un cristal conținea câte 1000 tranzistoare MOS.

Clasificarea CI din punct de vedere al procesului tehnologic



CI monolite (din greacă “mono”- singular, unic, “ litos”- piatră) – în aceste circuite integrate toate elementele active (D, T) și pasive (R,C) sunt formate în placa de Si, iar conexiunile între aceste elemente sunt pe suprafața plachetei. În monolite fiecare element trebuie izolat unul de altul.

CI hibride – pe suprafața unei plăci de ceramică se fac toate elementele pasive și toate conexiunile, iar elemntele active se conectează la urmă. Hibridele pot funcționa la frecvențe mult mai înalte decât cele monolite.

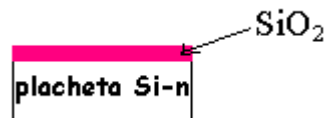
- cu pelicule subtiri – se formează prin depunerea vaporilor de Al în vid;
- cu pelicule groase – la acestea se folosesc paste rezistoare, conductoare și dielectrice.

CI optoelectronice – există trei elemente de bază:

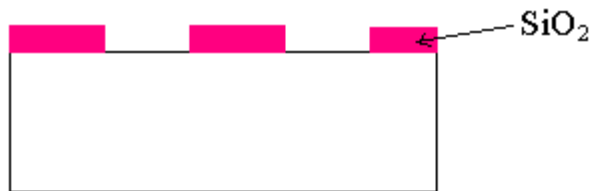
- sursa de lumină (laser);
- fotoreceptor (detectează această sursă de lumină);
- calea de transmisie pe baza joncțiunii pn.

Noțiuni de tehnologie a CI

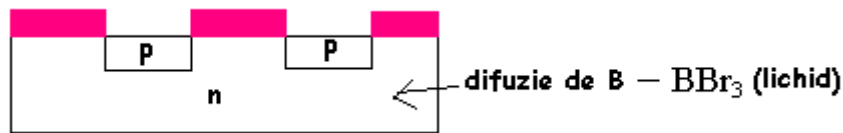
În 1957 a apărut tehnologia tranzistorilor planari.



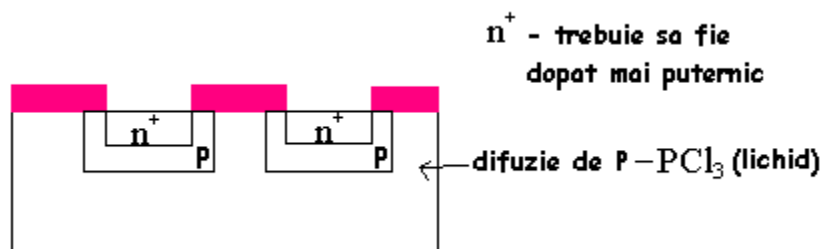
- această placchetă introdusă într-un cuptor electric se realizează oxidarea:
$$\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$$
- apoi se realizează un proces de fotolitografie; în placchetă se formează niște ferestre:



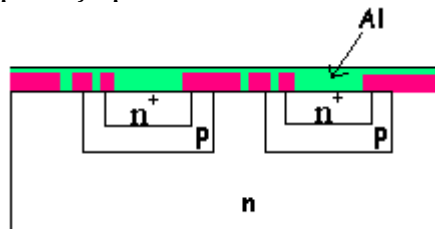
- apoi se face difuzia de tip p:



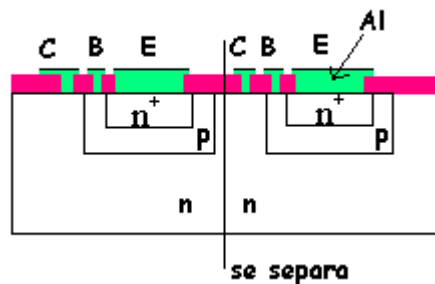
- se mai face o oxidare, apoi din nou un proces de fotolitografie:



- la npn purtătorii sunt electronii care se injectează în bază și formează curentul prin bază, o altă parte de electroni se injectează în colector și se formează curentul prin colector;
- pt. a face contactele placheta se oxidează din nou și din nou procesul fotolitografic ⇒ că se deschid niște ferestre de contact, după care se depune Al pe toată suprafața plachetei:

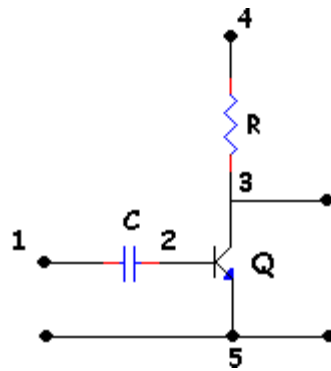


- apoi se înlătură Al cu ajutorul fotolitografiei, după care prin separare rezultă două tranzistoare care se pun fiecare în câte o capsulă.



Această tehnică planară a tranzistorului a fost în principiu trecerea rapidă la tehnologia circuitelor integrate.

În 1961 se realizează primele CI.



Pt. a face acest circuit în cadrul unui CI trebuie ca:

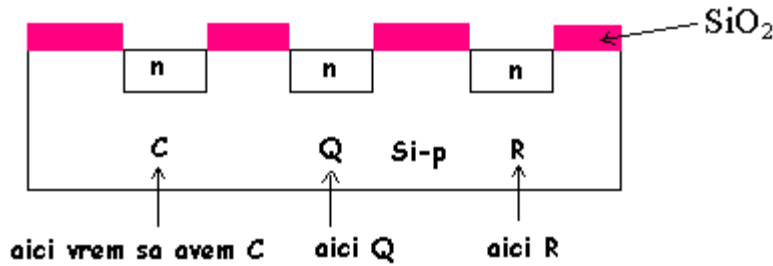
- structura lui Q trebuie să fie alta decât cea de la tranzistorul fabricat anterior;
- capacitatea de barieră a joncțiunii pn o folosim ca o capacitate în CI monolite.

$$R = \rho \frac{l}{b \cdot h} \quad ; \quad b = \text{lățimea}; \quad h = \text{grosimea.}$$

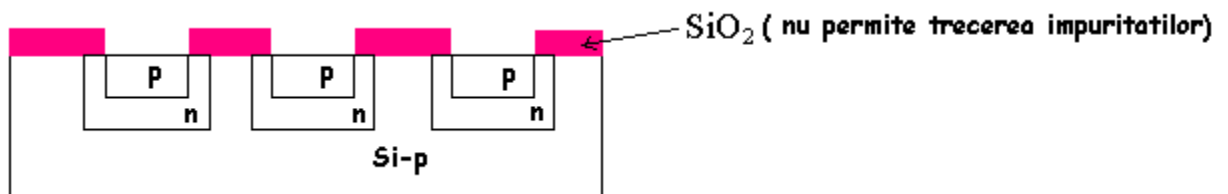
Vrem să folosim cam aceeași metodă de realizare a tranzistorului planar și pt. CI.



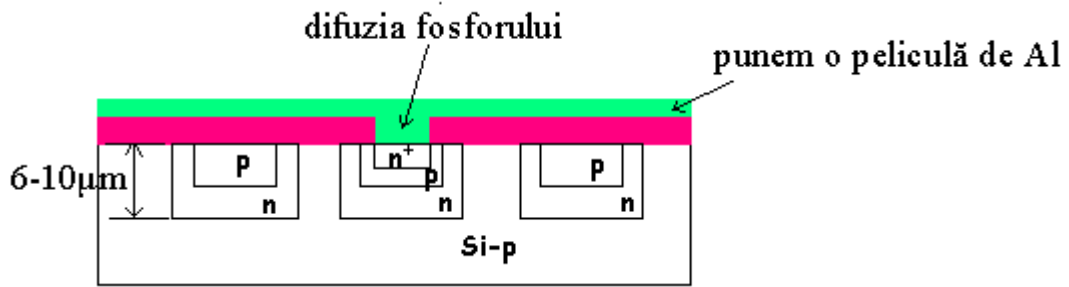
Următoarea operație este fotolitografia plus difuzia a impurităților de tip n (adică difuzia fosforului).



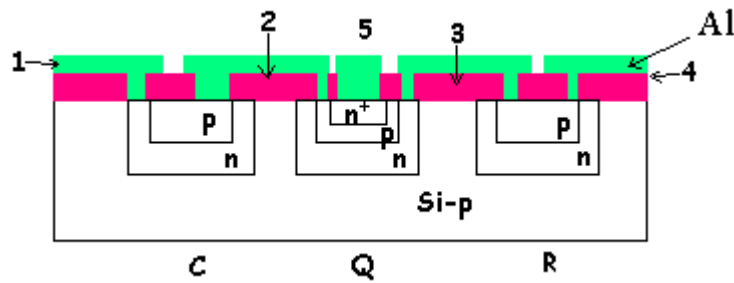
Următoarea operație este oxidarea pe toată suprafața plus fotolitografie plus difuzie a impurităților de tip p:



- pt. construcția C vom folosi joncțiunea BC \Rightarrow structura C este astfel realizată.
- pt. construcția R vom folosi regiunea bazei tranzistorului \Rightarrow structura R este realizată.
- pt. a realiza tranzistorul se face din nou oxidare plus fotolitografie, dar nu mai deschidem ferestre unde este C și R, după care difuzia fosforului (n^+) pt. E.

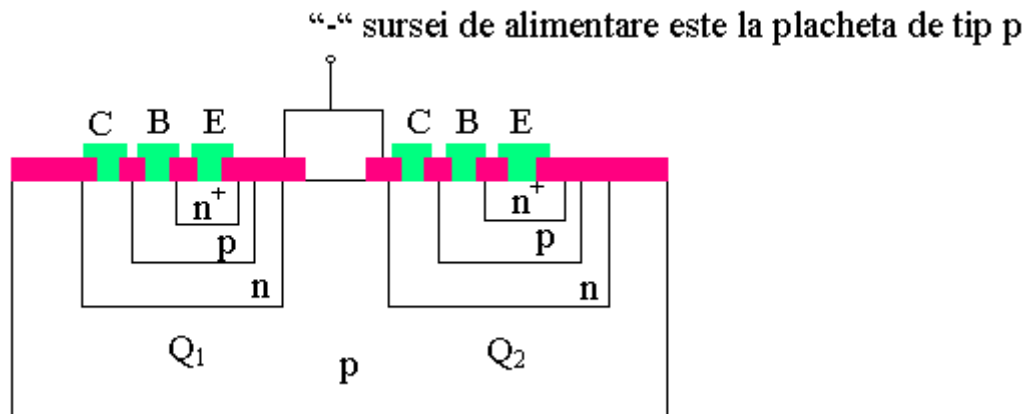


- realizăm contactele ⇒

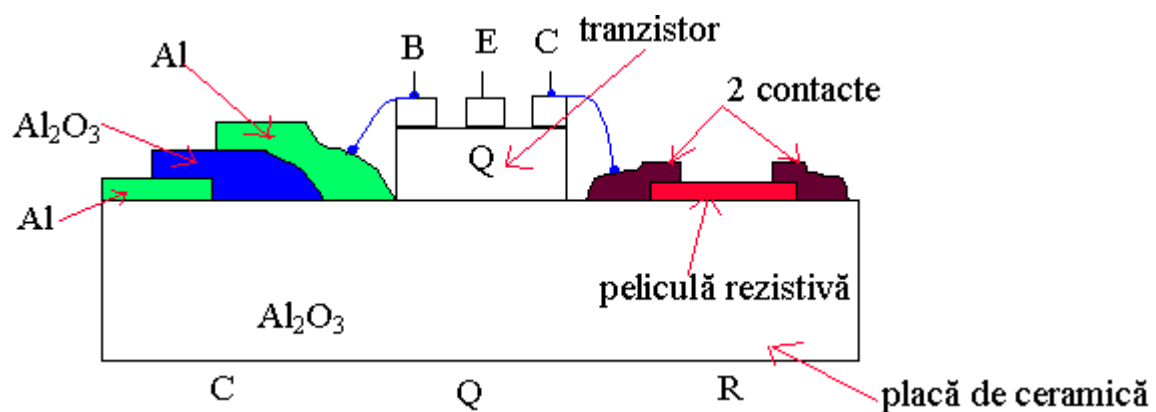


- tranzistorul Q are o joncțiune în plus față de cel realizat anterior (are conducție de tip n înconjurată de p).

Cum arată două tranzistoare la finalul procesului:



Realizarea aceluiași circuit în tehnologia hibridă



- în hibride obținem o precizie de 1/1000 (pt. R și C);
- pt. realizarea aceluiași CI ne trebuie o mască pt. C, o mască pt. pelicula rezistivă, pt. contacte \Rightarrow în total patru măști.

Într-un cm^3 de Si monocristalin se găsesc aproximativ $5 \cdot 10^{22}$ atomi. Există plachete de Si-n care au n (concentrația) = $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ atomi de impuritate \Rightarrow

$$C_{\text{impurități}} = \frac{5 \cdot 10^{16}}{5 \cdot 10^{22}} = 10^{-6} = 10^{-4}\% \Rightarrow \text{la 1 milion de atomi de bază ai Si îi}$$

corespunde 1 atom de impuritate

Caracteristica substanței curate

O substanță poate fi numită curată dacă concentrația tuturor impurităților care se găsesc în aceasta nu afectează parametri dispozitivului format (în natură nu există substanțe absolut curate).

Substanțele curate (în chimie, metalurgie) pot fi:

- marca curat : C = $2 \cdot 10^{-5}$ – 1% impuritate;
- curat pt. analiză : CPA = $1 \cdot 10^{-5}$ – 0.4% ;
- curat chimic : CC = $1 \cdot 10^{-6}$ – 0.2% ;
- deosebit de curat : DC = conține mai puțin de 0.05% impuritate (se utilizează în special în melectronică).

Această clasificare nu este unică în lume și nici prea bună. În SUA, Japonia se folosesc alte clasificări. Aceasta înseamnă că pot fi caracterizate prin nr. de atomi care sunt la 1000 atomi a substanței de bază, n part per milion (n = nr. de atomi de impuritate)(P.P.M.) sau part per billion (P.P.B.).

În acest mod se pot caracteriza substanțe gazoase, lichide.

Substanțele Indiu, Galiu au o astfel de marcă de curățenie:

- 5N8 – reprezentând nr. 99.9998% \Rightarrow 0.0002% impuritate;
- 3N7 – reprezentând nr. 99.97%.

Principiul de purificare a substanțelor prin cristalizare

Cristalizarea se numește trecerea substanței din faza lichidă în faza solidă (cristalină). Această metodă o folosim în ultimele faze de purificare când substanța are aproximativ 1-2% atomi de impuritate. Se folosește pt. a obține cristale de structură cristalină și pt. purificarea acestor substanțe.

Diagrame de fază

- faze: solidă, lichidă, gazoasă și plasmă.

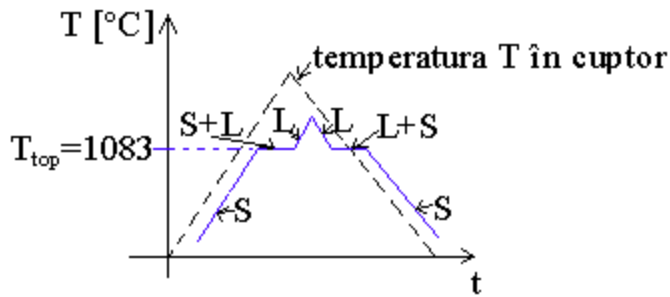
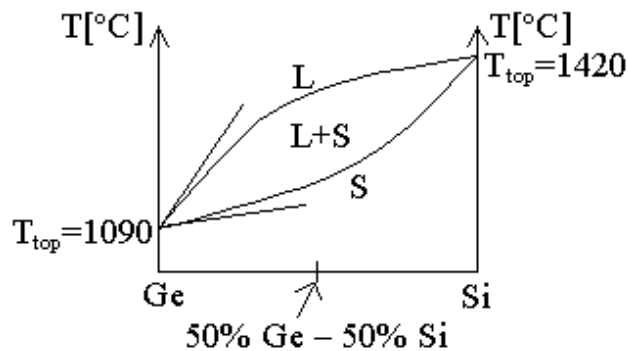


Diagrama de fază a unei singure componente – Cu, și se reprezintă schimbarea temperaturii acestuia în funcție de timp

Exemple de cele mai răspândite diagrame de fază:



La mijloc: același nr. de atomi de Si îi corespunde același nr. de atomi de Ge, 50% Ge – 50% Si. Dacă mergem spre Ge sunt mai mulți atomi de Ge și mai puțini de Si.

Diagrama de fază a unui semiconductor GaAs:

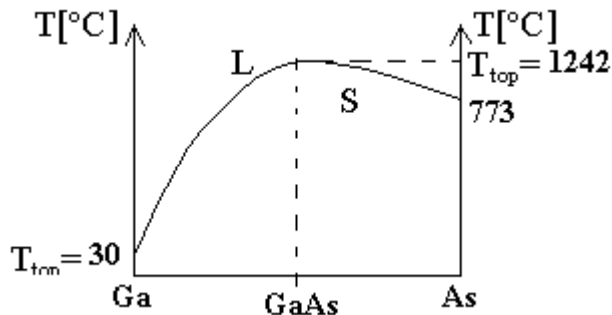
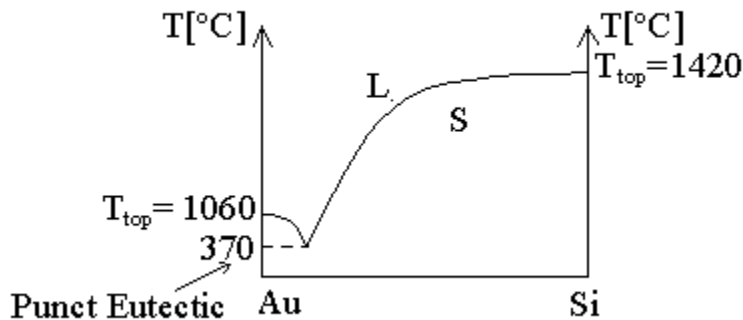
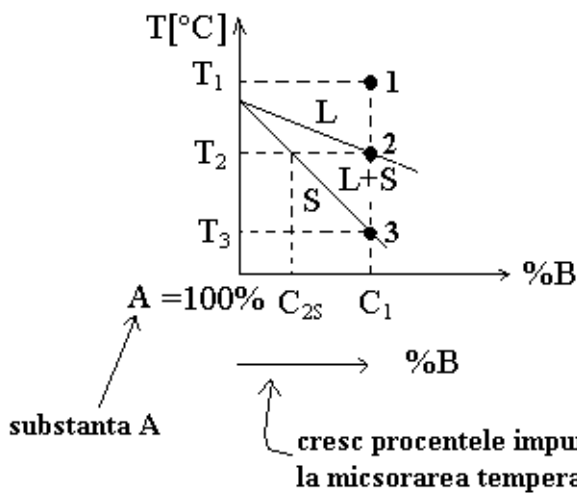


Diagrama de fază a unei substanțe pt. fixarea Au (folosit în electronică):



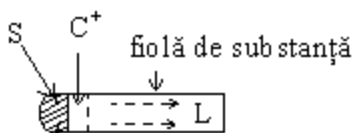
Ce rol au diagramele de fază în procesul de purificare?

Când există un procent mic de impuritate de Ge în Si nu trebuie făcută toată diagrama de fază, ci doar o parte din aceasta; doar tangentele la diagrama de fază lângă punctul de topire al Ge sau al Si.



- în punctul 1 există temperatura T_1 și concentrația impurității B este C_1 , iar substanța se află în stare lichidă;
- în punctul 2 avem temperatura T_2 , substanța se află în starea lichidă; în faza lichidă concentrația substanței la o temperatură este C_1 , iar la aceeași temperatură este în faza solidă dar cu un procent de impuritate C_{2S} mai mic;

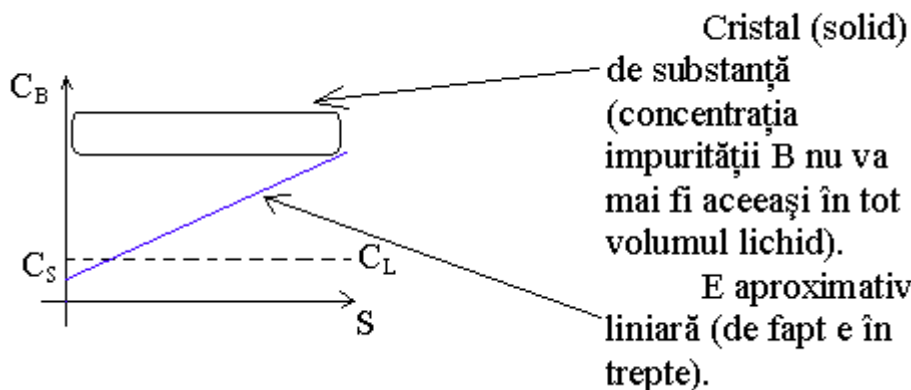
- în punctul 3 substanța este în starea solidă; aceeași concentrație de impurități se află în starea lichidă (la o temperatură mai mare) cât și în starea solidă (la o temperatură mai mică).



Există mai puțină impuritate ca în lichid

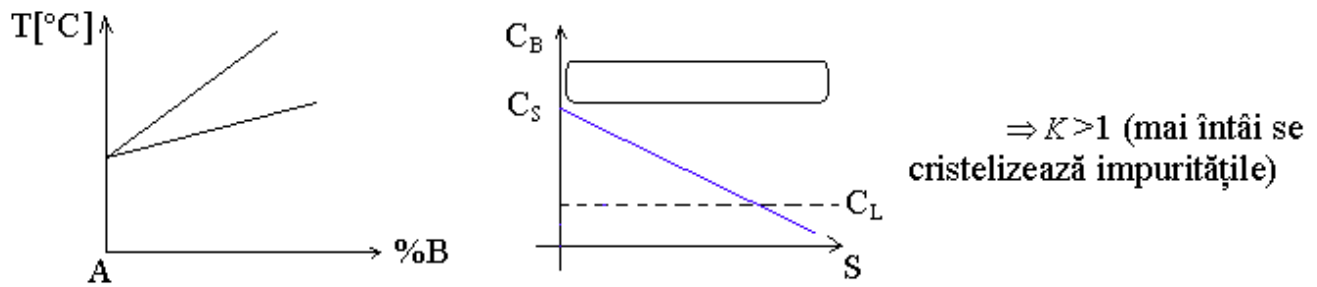
Concentrația în plus (C^+) se răspândește în tot volumul L rămas.

Principiul de purificare prin cristalizare:



K = coeficient de distribuire a impurităților (coeficient de segregare), și este egal cu raportul dintre concentrația în faza solidă cristalizată și concentrația în faza lichidă inițială: $K = \frac{C_{2S}}{C_{1L}} > 1$, unde în cazul de sus impuritățile duc la scăderea temperaturii de topire.

Dacă luăm alt caz în care impuritățile duc la creșterea temperaturii de topire:

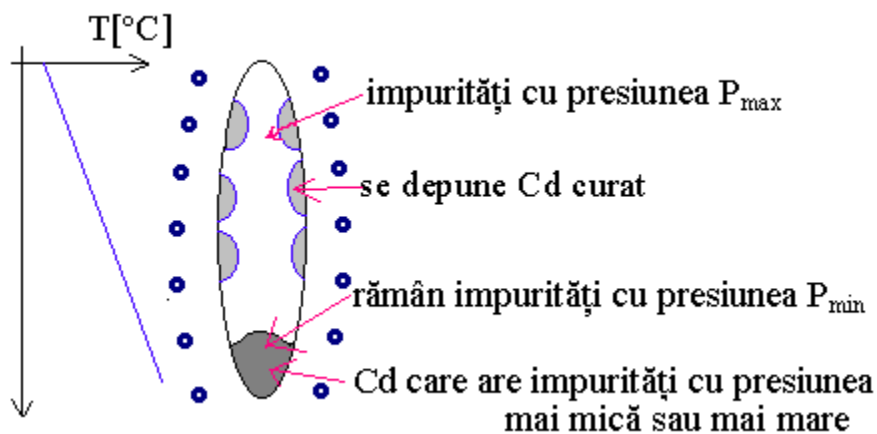


Procese de purificare a substanțelor din faza gazoasă

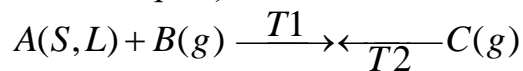
Procesul poate avea loc la materiale care se evaporă direct din faza solidă, netrecând prin faza lichidă. Substanța nu poate fi purificată de impuritate dacă, proprietățile impurității nu se deosebesc de proprietățile substanței (au aceeași presiune, temperatură, etc).

Zn, S, Se, Te, Sb – toate aceste substanțe se evaporă din starea solidă.

Avem o fiolă din quartz (pt. că Cd în atmosferă se oxidează) în care se introduce Cd. Această fiolă se introduce într-un cuptor (care nu are temperatură absolută) care se încălzește.



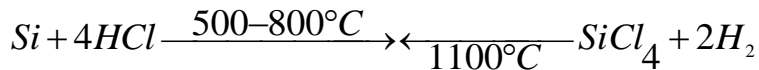
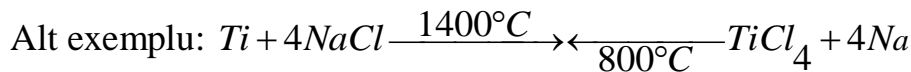
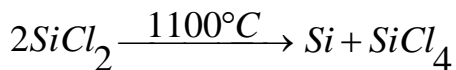
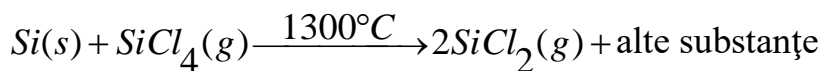
Altă metodă de purificare este cu folosirea reacțiilor chimice de transport (tot din starea solidă în vapori)



Acest tip de reacție a fost propusă de neamțul Șefer.

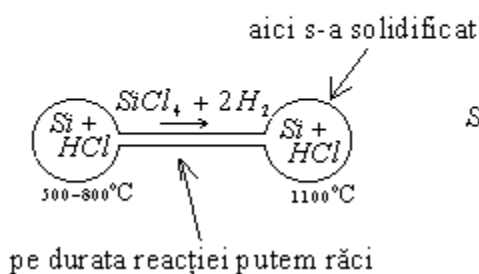
Avem substanța A solidă sau lichidă pe care vrem să o purificăm, substanța B care este un gaz, care se numește transportor, și care la temperatura T1 gazul intră în reacție cu substanța A, iar ca rezultat al reacției chimice este substanța C care este tot un gaz.

Această substanță C va trece în altă parte la temperatura T2 (unde această reacție se numește reversibilă) unde se descompune în substanța A (care nu mai conține impurități) și în substanța B (care inițial trebuie să fie pură).

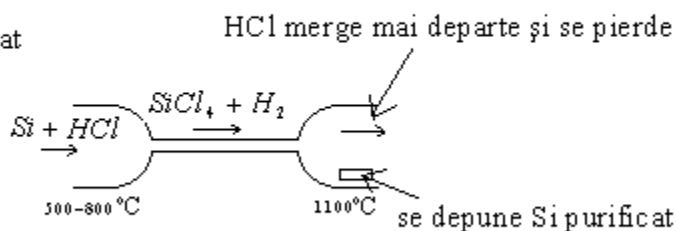


Aceste relații se pot utiliza atât în reacție închisă cât și deschisă.

În sistem închis:



În sistem deschis:

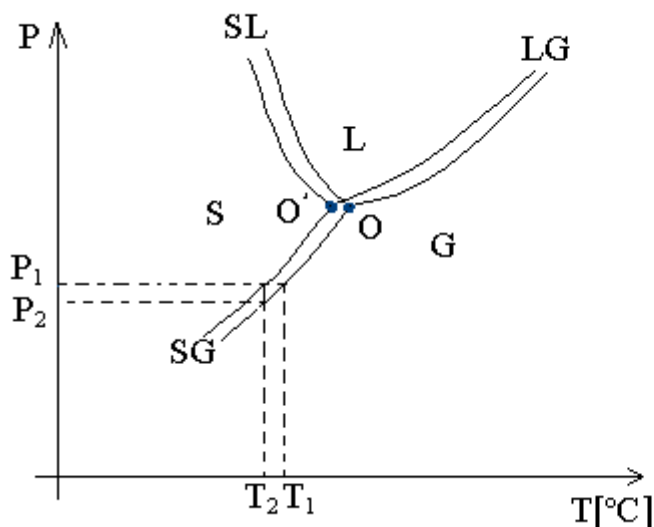


Formarea germenului (nucleația)

- este un început de creștere a cristalului;
- de ex. dacă într-un vas avem sare (ca cristal), se mărește volumul cristalului dacă nu se formează centre de cristalizare.

Creșterea cristalelor poate fi: - omogenă (apare datorită saturației);
- neomogenă (apare datorită răcirii).

Pentru a formula procesul de creștere a cristalului se analizează diagrama de fază în coordonate P și T, substanța putându-se afla în trei stări:



Răcind substanța (dacă aceasta se află în starea G) ea poate trece din faza G (gazoasă) în faza S (solidă), dacă este la o presiune mai mică, și poate trece din faza G în faza L (lichidă) (dacă aceasta se află în faza G) și din faza L în faza S (dacă aceasta se află în faza L) la o presiune mai mare.

O – punct triplu (substanța se află în toate fazele);

Răcind sistemul de la T_1 la T_2 la presiune constantă din starea gazoasă se trece în starea solidă.

$$\Delta T = T_1 - T_2 (P_1 = ct.) - \text{reprezintă suprarăcirea};$$

Majorând presiunea de la P_2 la P_1 la temperatură constantă, sistemul trece din starea G în starea S.

$$\Delta P = P_1 - P_2 (T_2 = ct.) - \text{reprezintă suprasaturația}.$$

Putem analiza trecerea substanței din starea G în starea S și rezultă un cristal.

Putem analiza trecerea și din starea G în starea L (la presiuni mult mai mari) și rezultă o picătură de lichid. Ca urmare orice trecere de fază care poate avea loc duce la micșorarea energiei libere.

$$\Delta G = \text{energielibera} = \Delta G_V + \Delta G_S \quad (1)$$

ΔG_V - schimbarea energiei libere la formarea volumului picăturii de lichid;

ΔG_S - schimbarea energiei libere la formarea picăturii de lichid.

Din teoria termodinamicii \Rightarrow că la trecerea unui mol de gaz din starea G în starea L, schimbul de energie ΔG_V (pt. 1 mol de gaz) este:

$$\Delta G_V = -RT \ln \frac{P}{P_0} \quad (2) \text{ unde } R - \text{ct. universală a gazelor, } T - \text{temperatura, } P -$$

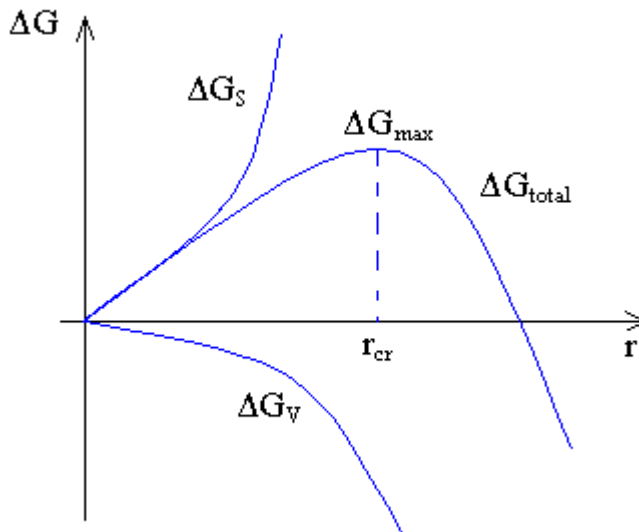
presiunea la care a avut loc trecerea, p_0 - presiunea în gaz (când vaporii sunt saturați, doar atunci se poate face trecerea din G în L).

$$\Delta G_V = -\frac{4\pi \cdot r^3}{3 \cdot v} RT \ln \frac{P}{P_0} \quad (3), \text{ unde } \frac{4\pi \cdot r^3}{3 \cdot v} - \text{volumul picăturii de apă.}$$

$$(4) \Delta G_S = 4\pi \cdot r^2 \cdot \sigma$$

$$\Rightarrow \Delta G = 4\pi \cdot r^2 \cdot \sigma - \frac{4\pi \cdot r^3}{3 \cdot v} RT \ln \frac{P}{P_0} \quad (5) - \text{schimbul total de energie la trecerea}$$

din G în L și formarea unei picături (germenele).



Dacă picătura de lichid s-a ajuns să aibă raza - r_{cr} , și se mai adaugă molecule \Rightarrow raza crește precum și volumul iar energia tinde spre micșorare. Dacă I se iau câteva molecule raza se micșorează, iar energia liberă tot tinde spre micșorare, iar această picătură se poate distruge (în ambele cazuri).

$$\frac{\partial \Delta G}{\partial r} = 8\pi \cdot r \cdot \sigma - 4 \frac{\pi \cdot r^2}{v} RT \ln \frac{p}{p_0} = 0 \Rightarrow r(8\pi \cdot \sigma - \frac{4\pi \cdot r}{v} RT \ln \frac{p}{p_0}) = 0 \Rightarrow$$

$$8\pi \cdot \sigma = \frac{4\pi \cdot r}{v} RT \ln \frac{p}{p_0} \Rightarrow r_{cr} = \frac{2\sigma \cdot v}{RT \ln \frac{p}{p_0}}$$

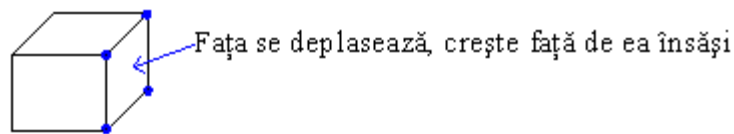
$$\Delta G_{max} = \frac{16\pi \cdot v^2 \cdot \sigma^3}{3 \left(RT \ln \frac{p}{p_0} \right)^2} - \text{reprezintă valoarea energiei libere max. când raza este}$$

critică.

În principiu nu putem regla în procesul tehnologic schimbarea energiei, dar putem regla suprarăcirea.

Mecanismul și cinetica reșterii cristalinelor

Mecanismul constă în creșterea cristalinelor prin deplasarea unei fețe a cristalului:

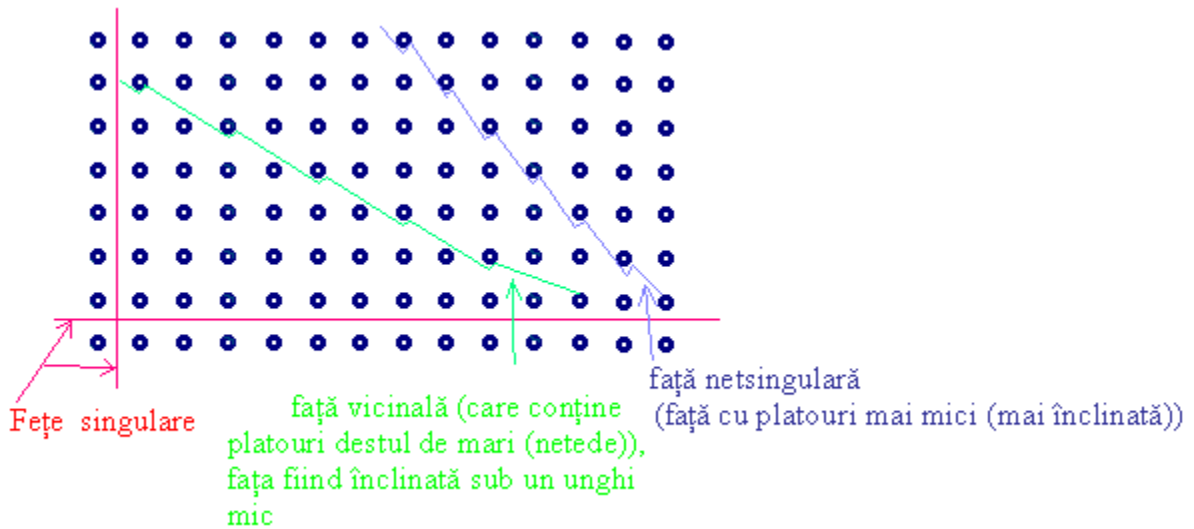


Toate fețele cristalului se împart în trei grupe:

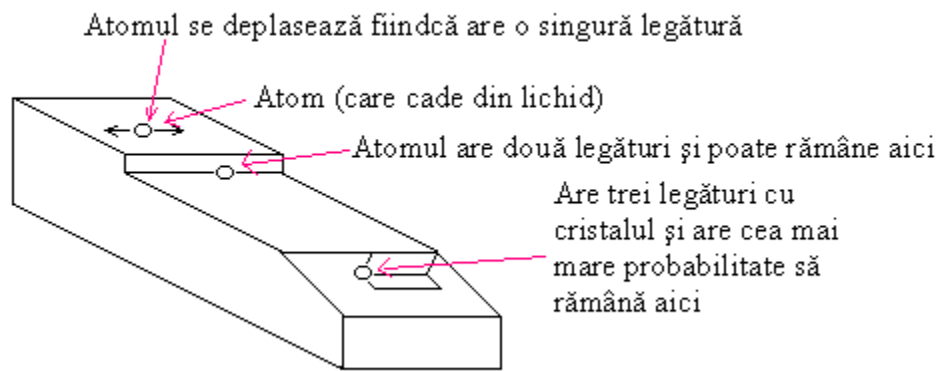
- fețe singulare
- fețe vicinale
- fețe netsingulare (zgrunțuroase)

Mecanismul de creștere pe aceste fețe este:

- avem atomii unui cristal ideal egal depărtați unul de celălalt:



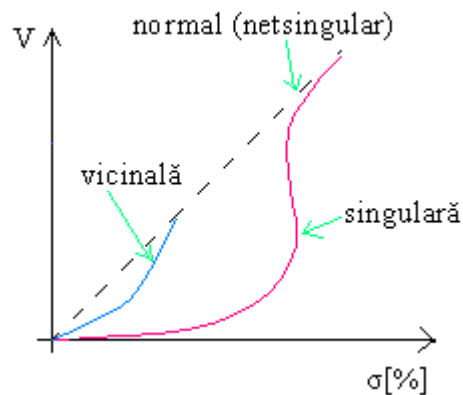
Creșterea pe o suprafață absolut netedă:



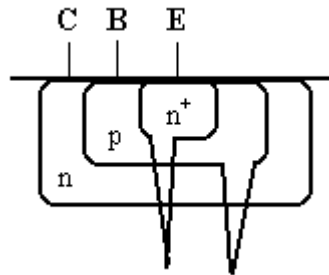
Pe fețele singulare, mecanismul de creștere este tangențial suprafeței iar creșterea cristalelor are loc relativ la saturații mari.

Creșterea pe fețe vicinale este tot tangențial la suprafață, însă ea poate avea loc la saturații mici.

Creșterea pe fețe netsingulare este verticală și poate avea loc la orice saturație.



În cristalele absolut ideale ar apare astfel de difuzii:



E este scurtcircuitat cu C \Rightarrow difuzia a pătruns în ambele straturi.

Creșterea cristalelor

Cristalele pot crește atât din faza G cât și din faza L.

Creșterea din faza L se împarte în două direcții: - creșterea din topituri;
- creșterea din soluții.

Creșterea cristalelor din topituri

Acest proces este cel mai răspândit în industrie pt. că se deosebește printr-o mare viteză de creștere a cristalelor.

Pt. a crește cristalele din topituri trebuie ca metalele să fie la temperatura de topire (ex. $T_{top Si} = 1420^{\circ}C$).

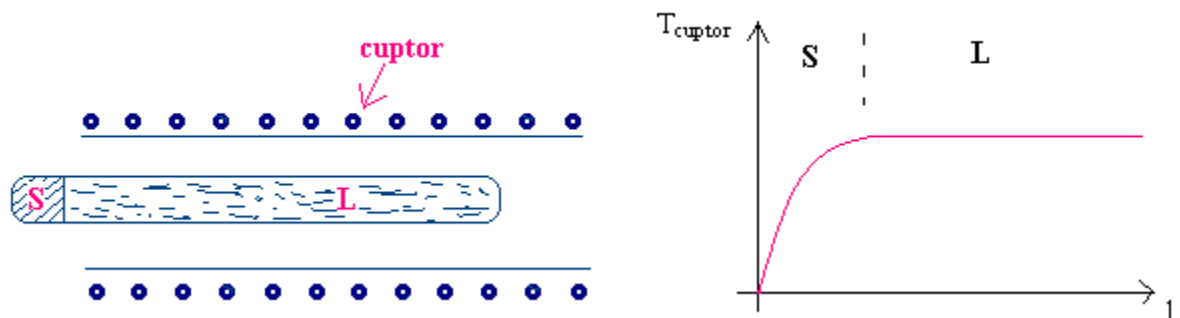
Neajunsuri: - datorită temperaturilor înalte pot avea loc reacții chimice dintre materialul containerului și topitură.

Această metodă poate fi utilizată la creșterea cristalelor care în starea topită au o presiune mică a vaporilor saturați. Pe baza unei creșteri din topituri pot fi realizate diferite tipuri de creșteri:

- cristalizare orientată;
- cristalizare prin metoda topirii zonale.

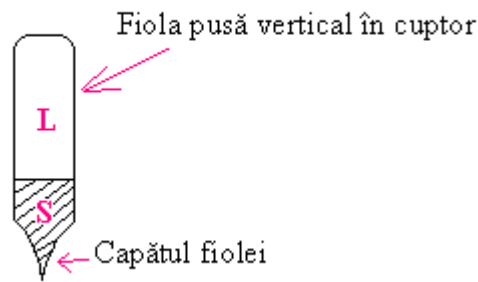
Cristalizarea din topituri poate avea loc prin intermediul germenului (agent de cristalizare) sau fără el.

Cum se crește un cristal din topitură:

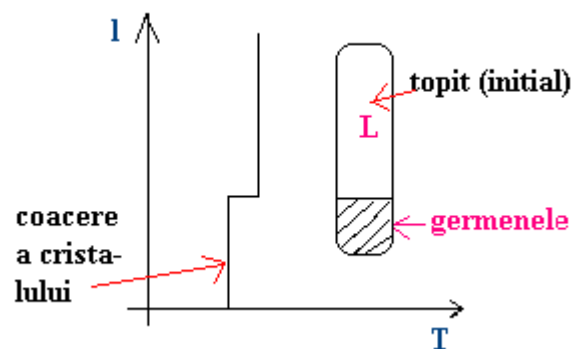


Putem deplasa cuptorul față de fiolă sau să extragem fiola din cuptor pt. a forma cristalul, însă vom avea un monocristal sau mai multe cristale mici.

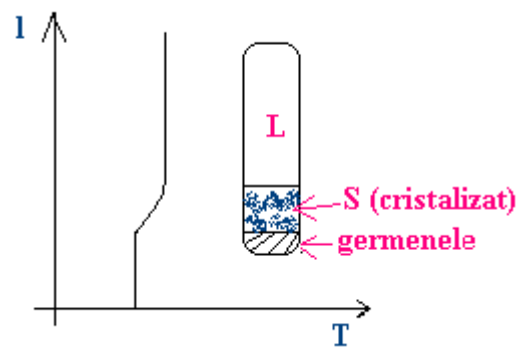
Altă metodă pt. a obține monocristalul:



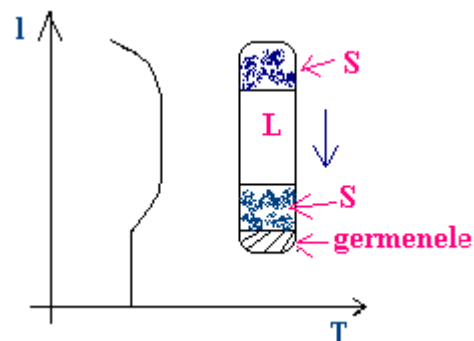
Volumul de S se răcește primul, se cristalizează primul pt. că are dimensiune mică.
Altă metode:



Metoda lui Stocbargher:

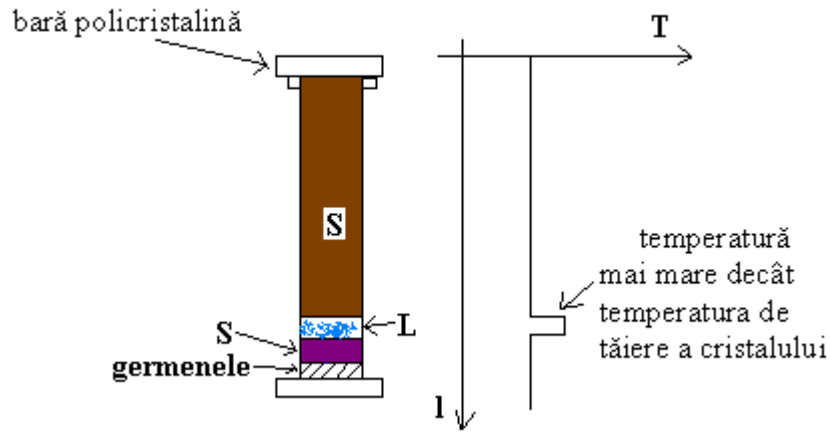


Metoda Bridgmen:



Aceste ultime metode sunt mai bune.

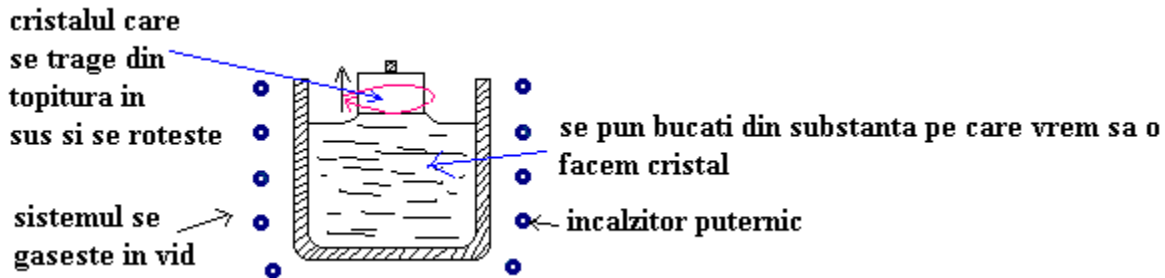
Pt. a obține cristale absolut curate se folosește **metoda topirii zonale fără container**:



Această metodă se realizează în vid, astfel încât cristalul să nu aibe contact direct cu fiola. Această metodă oferă posibilitatea creșterii cristalelor fără impurități.

Metoda tragerii cristalului din topitură

Această metodă este denumită metoda lui Czochalski și este cea mai utilizată, deoarece se fac sute de tone de Si.

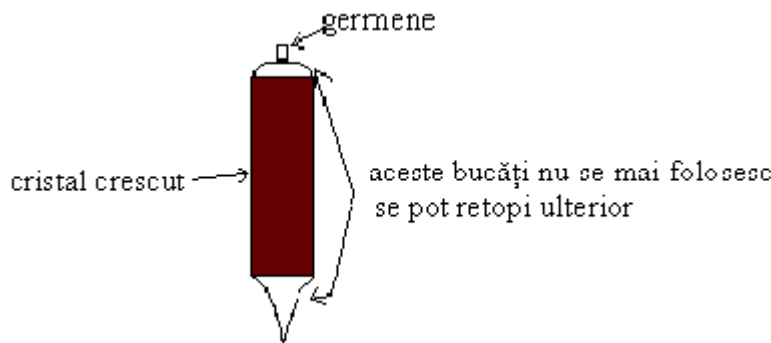


Germenele l-am pus în contact cu topitura astfel încât să se topească puțin, după care îl tragem în sus rotind-ul.

Topitura se încălzește peste temperatura de topire pt. a se evapora impuritățile volatile, înainte de a se pune în contact germenele cu topitura.

Rotim cristalul în jurul axei sale astfel încât concentrația impurităților să fie uniform distribuită.

Diametrul cristalului se reglează cu viteza de tragere a cristalului.

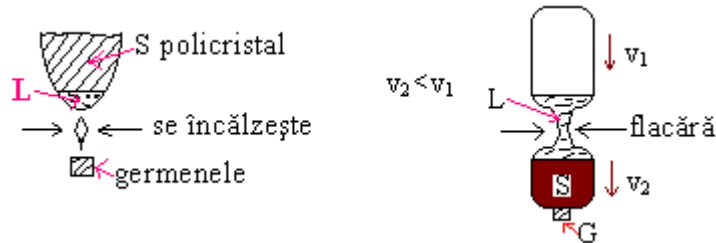


Metoda creșterii cristalelor cu ajutorul topirii zonale la o temperatură foarte mare

Luăm diamantul care necesită temperatură mare de topire.

Încălzirea se face cu H_2 .

G este o bucățică de diamant pe care curge topitura câte un pic, transformându-se topitura în S.



Folosind această metodă se pot crește cristale și din praf.

Creșterea cristalelor din soluție

Principala prioritate a acestei metode este temperatura joasă de creștere a cristalelor. Se pot crește cristale care au o temperatură mare de topire. Se pot crește cristale care au o presiune mare a vaporilor saturați în starea de topire (de ex. cristalele din quartz). Temperatura joasă a procesului dă posibilitatea de a crește cristale cu o rețea cristalină desăvârșită.

În acest sistem de creștere se găsesc două componente:

- solventul (în care se dizolvă substanța);
- substanța.

Cerințe pt. solvent:

1.° solventul trebuie să micșoreze cu mult temperatura de creștere a cristalului, adică singur să aibă o temperatură de topire (ex. : I, St, Pl).

2.° să nu intre în componența cristalului crescut.

3.° atomii solventului care au intrat în interiorul cristalului trebuie să fie inactivi.

Dacă creștem cristale din soluție din GaAs \Rightarrow As (solvent) intră în componența cristalului.

Procesul de cristalizare din soluții are următoarele etape:

I – dizolvarea componentelor inițiali;

II – difuzia componentelor prin faza lichidă la frontul de cristalizare;

III – depunerea cristalului la frontul de cristalizare;

IV – disiparea căldurii de cristalizare.

Această metodă are neajunsul că viteza de creștere este de două ori mai mică decât viteza de creștere din topitură.

Solubilitatea substanței A în solventul B este: $\delta = \frac{mA}{mA + mB} \cdot 100\%$

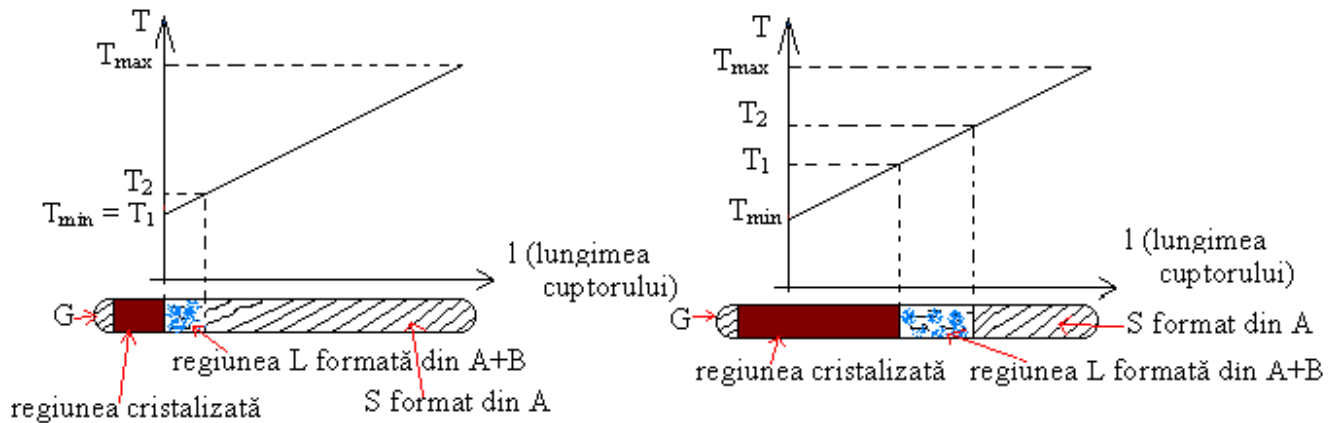
Solubilitatea este însă dependentă de temperatură. Cu cât este mai mare temperatura cu atât solubilitatea este mai mare în %.

Micșorarea masei solventului (m_B) se poate realiza și prin trecerea curentului electric la limita dintre solid și soluție (efectul PELTIE: la contactul a două materiale diferite trece curent continuu dintr-o direcție în alta, atunci contactul se poate încălzi într-o direcție și se poate răci în altă direcție).

Metoda topirii zonale într-un gradient de temperatură

Se pot obține cristale la care concentrația impurităților va fi uniformă pe toată lungimea cristalului. Creșterea cristalelor poate avea loc spontan fără germene sau cu germene.

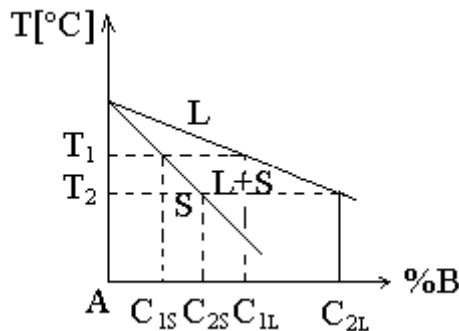
În 1955- Pfan a propus această metodă de creștere a cristalelor:



Germenele inițial se afla în zona punctului zero. Tot în această zonă se afla și substanța A+B. Solventul B în contact cu G face ca în punctul zero să avem temperatura T_1 . În continuare cristalul crește fără să-l mișcăm, se mișcă zona L datorită gradientului de temperatură în urma ei rămânând monocristalul format.

- A – substanța ; B – solventul.
- $T_{min} > T_{topB}$ iar $T_{max} < T_{topA}$
- T_{max} a cuptorului nu topește substanța A.

Diagrama de fază:

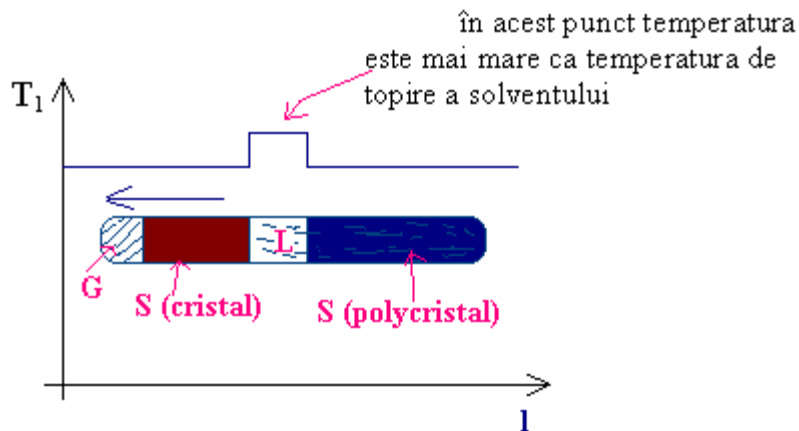


Solventul B a condus la micșorarea temperaturii. Substanța A trece în lichid la temperatură mult mai mică decât temperatura de topire a substanței.

La temperatura T_2 este dizolvată o concentrație iar la T_1 temperatura este mai mare și ca urmare concentrația dizolvată este mai mare $\Rightarrow C_{1L} > C_{2L}$.

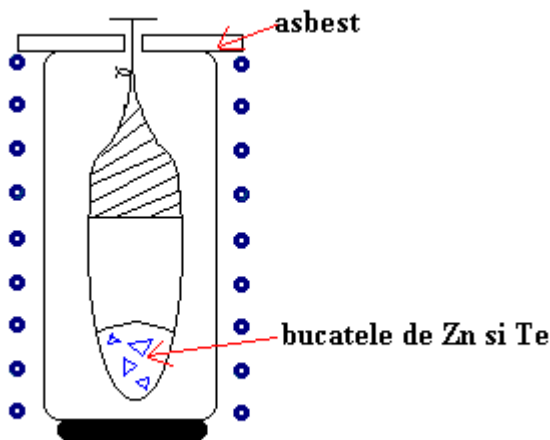
Neajunsuri : dacă coeficientul de segregare depinde de temperatură, atunci temperatura unui metal (ex.:Al) se modifică de la 1000°C la 600°C pe parcursul creșterii cristalului.

Pt. a avea un cristal dopat uniform pe toată lungimea sa, se realizează următoarea schemă:



Regiunea topită este la una și aceeași temperatură și ca urmare coeficientul de segregare este constant \Rightarrow dopare uniformă.

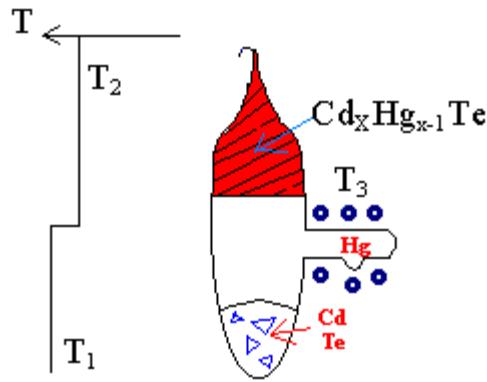
Creșterea cristalelor din faza gazoasă



Zn și Te prin încălzire se evaporă direct, nu trec prin starea lichidă.

La 1100°C Zn și Te erau în stare de vapori, se crează un gradient de temperatură iar atomii de Zn și Te formează centre de cristalizare în vârful fiolei.

Cristale din $Cd_xHg_{x-1}Te$ se utilizează în domeniul militar. Metoda de creștere a acestei substanțe:



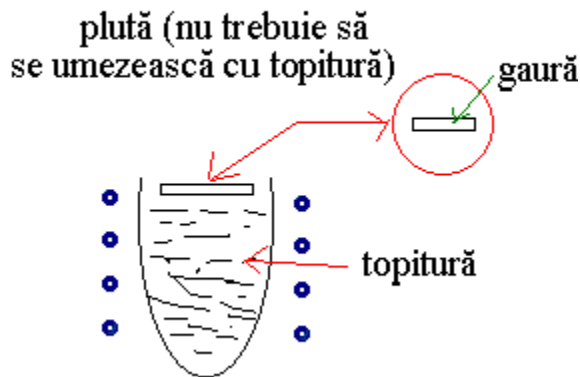
- cuptorul se încălzește până când avem o presiune a vaporilor saturați;
 $T_3 > T_1$ și T_2 .

Creșterea monocristalelor cu profil



Cristal pe care trebuie să-l tăiem în plăci \Rightarrow prin tăierea plăcilor jumătate din cristal se pierde

S-a propus creșterea cristalelor sub formă de plăci pt. a nu se mai pierde din cristal.



Soluția iese prin gaura plutei.
 Această metod permite creșterea cristalelor în orice profil.

Doparea cristalelor în faza solidă

Inițial cristalele nu sunt dopate, sunt pure, după care sunt supuse unui proces de dopare.

Etapele care stau la bază sunt: - posibilitatea transformării nucleare a unui element chimic în altul. Doparea poate avea loc cu folosirea neutronilor, protonilor și a gamei cuantice. Rezultatul decurgerii acestei reacții nucleare poate avea loc și cu o distrugere a rețelei cristaline. Se face un tratament termic în această privință, pt. lecuirea cristalelor, pt. această dopare la 800°C timp de o oră.

Concentrația impurităților care dopeză cristalul poate fi:

$$C_{imp} = F \cdot \sigma \cdot T \cdot C \cdot \alpha$$

unde: F – densitatea fluxului de neutroni termici, σ –

secțiunea efectivă a transformării nucleare (ct.), T – timp de iradiere cu neutroni, C – concentrația inițială a izotopului care se transformă în alt elemnt (ct.), α – concentrația atomilor în substanța de bază (ct.).

Această dopare se bazează pe faptul că Si conține: ^{28}Si : (92.28%), ^{29}Si : (4.67%), ^{30}Si : (3.05%), adunate toate = 100% substanță de Si.

Si conține trei tipuri de izotopi de masă diferită. Când această substanță e bombardată cu neutroni ar putea fi următoarea reacție nucleară:

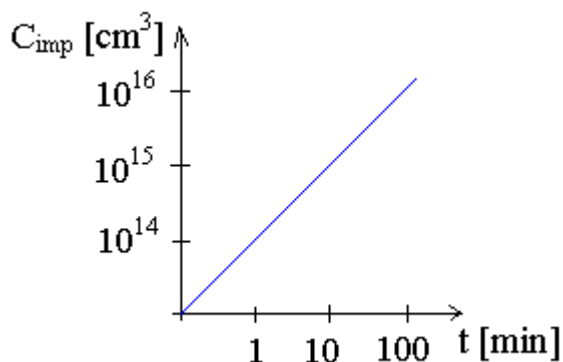
^{28}Si se poate transforma în ^{29}Si ;

^{29}Si se poate transforma în ^{30}Si ;

^{30}Si se poate transforma în ^{31}Si .

^{31}Si este însă masa atomică a P (fosfor), o parte din atomii de Si s-au transferat în atomi de P \Rightarrow dopați de tip n (P este din gr. V). Pt. dopați de tip p nu se poate deoarece nu se poate trece în grupa III.

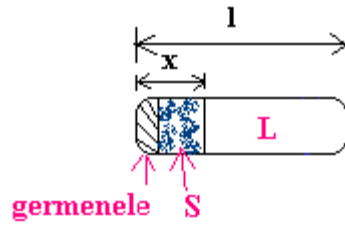
Timpul de iradiere cu neutroni termici:



Acest tip de dopare dopeză cristalul în toată suprafața sa foarte bine, cu o eroare de 3%. Perioada de descompunere a acestui izotop este de 26 ore. După aceasta poate fi tăiat pt. că nu mai este radioactiv.

Distribuirea impurităților la cristalizarea normală

La început tot cristalul este topit, după care scoatem fiola la rece, și partea scoasă de fiolă (în interior) se transformă în cristal.

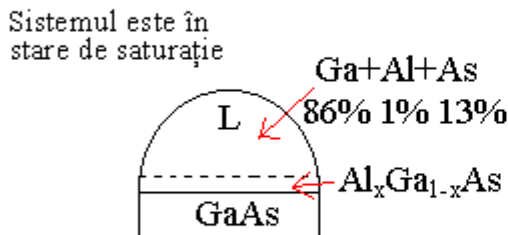


Cum se distribuie concentrația în faza cristalizată: - s-a presupus:

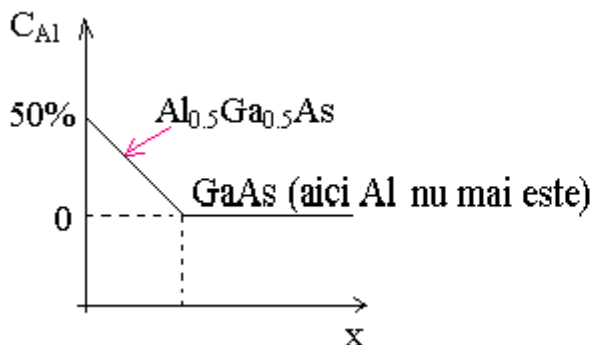
- 1) $D_S = 0$;
- 2) $D_L = \infty$;
- 3) $\rho_L \cong \rho_S$;
- 4) $K = \frac{C_{Ss}}{C_L} \cong ct.$ - coeficientul de segregatie.

Pt. aceste patru condiții de aproximație s-a dovedit cum este distribuită concentrația în faza S.

Se ia mai întâi că $K < 1 \Rightarrow$ toată substanța inițială (lichidă) avea o distribuție a impurităților ct. \Rightarrow în faza S intră mai puțină concentrație de impurități decât era în L. Deci toată substanța inițial era L în afară de G, și aceasta se caracterizează printr-o concentrație uniformă a impurităților în L. În faza S există mai puțină impuritate ca în L, în urma cristalizării.



Se începe cristalizarea. La început Al este în concentrație de 1%, dar după ce începe cristalizarea el crește la o concentrație de 50%, deoarece Al este mult mai activ decât Ga și formează molecule împreună cu As și se depune pe suprafața plăcii. Mai departe se crește pelicula fără Al.



Dacă $K < 1$ în faza S au intrat impurități cu concentrația $C_S < C_L \Rightarrow$ la frontul de cristalizare avem un surplus de concentrație care prin difuzie în L se distribuie uniform pe măsură ce crește cristalul.

Schimbarea concentrației în faza L este egală cu schimbarea concentrației care are loc în faza S \Rightarrow schimbarea concentrației impurităților este:

$$C_L dV_L \cong C_S dV_S \Rightarrow dC_L V_L = -(C_L - C_S) dV_L \text{ deoarece } C_L > C_S,$$

$$dC_L = -\frac{C_L - C_S}{V_L} dV_L, \text{ însă } K = \frac{C_S}{C_L};$$

$$\Rightarrow dC_L = -\frac{C_L - C_L \cdot K}{V_L} dV_L = \frac{(K-1)C_L}{V_L} dV_L$$

$$\int_{V_0}^{V_L} \frac{dV_L}{V_L} = \int_{C_0}^{C_L = \frac{C_S}{K}} \frac{1}{K-1} \frac{dC_L}{C_L} \Leftrightarrow \ln \frac{V_L}{V_0} = \left(\frac{1}{K-1} \right) \ln \frac{C_S}{K \cdot C_0} \Leftrightarrow \frac{V_L}{V_0} = \left(\frac{C_S}{K \cdot C_0} \right)^{\frac{1}{K-1}}$$

$$\Leftrightarrow \left(\frac{V_L}{V_0} \right)^{K-1} = \frac{C_S}{K \cdot C_0}$$

Distribuția lui C_S pe lungimea cristalului este:

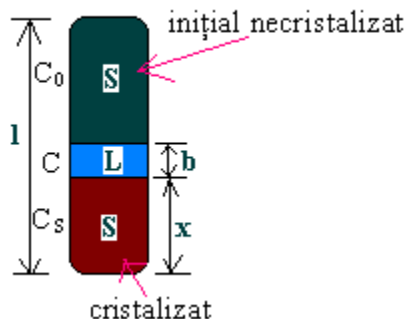
$$C_S = K \cdot C_0 \left(\frac{V_L}{V_0} \right)^{K-1} \text{ însă } V_L = V_0 - V_S, \text{ } V_L - \text{volumul după ce a avut loc}$$

procesul de cristalizare, V_0 - volumul inițial;

$$\Rightarrow C_S = K \cdot C_0 \left(1 - \frac{V_S}{V_0} \right)^{K-1} \Leftrightarrow C_S = K \cdot C_0 \left(1 - \frac{x}{l} \right)^{K-1} - \text{concentrația}$$

impurităților depinde de K , dacă $K=1 \Rightarrow C_S=C_0$

Cristalizarea cu ajutorul topirii zonale – distribuirea impurităților la topirea zonală



Prin: C_0 - concentrația impurității în faza solidă inițială;
 C_S - concentrația impurității în faza solidă recristalizată;
 C - concentrația impurității în faza lichidă;
 b - pe parcursul timpului rămâne ct..

$bdC = C_0 dx - C_S dx$ - cât s-a topit din C_0 este egal cu cât s-a cristalizat în C_S .

$$K = \frac{C_S}{C} \Rightarrow bdC = (C_0 - K \cdot C) dx$$

$$C_0 - K \cdot C = y \Rightarrow dy = -K \cdot dC \Leftrightarrow -b \frac{dy}{K} = y \cdot dx \Leftrightarrow \int_{y_0}^y \frac{dy}{y} = \int_0^x -\frac{K}{b} dx$$

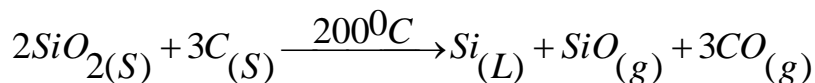
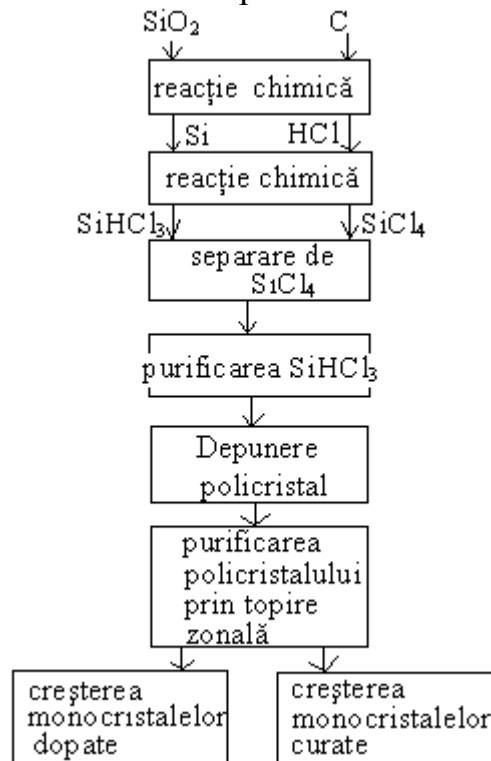
$$\Leftrightarrow \ln \frac{y}{y_0} = -\frac{K}{b} x \Leftrightarrow \ln \frac{C_0 - K \cdot C}{C_0 - K_0 \cdot C_0} = -\frac{K}{b} x \Leftrightarrow e^{-\frac{K}{b} x} = \frac{C_0 - K \cdot C}{C_0(1 - K_0)} = \frac{C_0 - C_S}{C_0(1 - K_0)}$$

$$C_0 - C_S = C_0(1 - K_0) e^{-\frac{K}{b} x} \Rightarrow C_S = C_0 \left[1 - (1 - K_0) e^{-\frac{K}{b} x} \right]$$

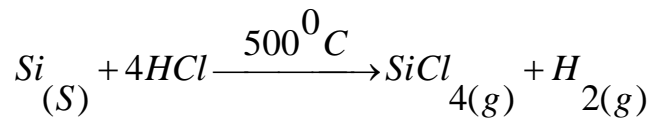
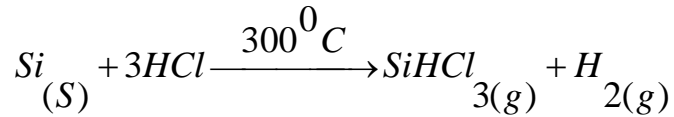
C_S – distribuția concentrației impurităților în faza solidă la cristalizare cu topire zonală.

Tehnologia monocristalelor de Si

Cristalele de Si au o tehnologie de creștere foarte lungă și schema bloc a acestui proces de creștere conține următoarele etape:



Si în stare L are 98% Si \Rightarrow 2% impurități: B, Cu, Al, Au, Ni.



La temperatura de 300°C se poate forma și SiCl₄, ca urmare a acestor două gaze trebuie să fie separate (SiCl₄ poate fi folosit la creșterea epitaxială).

Pt. a mări viteza primei reacții se adaugă catalizatori ca: Cu, Fe, Al. Introducând în Si până la 5% Cu, acesta duce la majorarea produsului reacției până la 95% la 265°C.

Ambele gaze trec în regiunea de răcire, unde la temperatura de 40°C-130°C are loc purificarea acestor gaze de diferite impurități (PCl₃, AlCl₃, CuCl₂ care sunt solide și prin intermediul unui filtru se curăță gazele de impurități).

După curățarea de praf amestecul gazos se condensează la -70°C (deși devine lichid la temperatura camerei). Temperatura de fierbere a lui SiHCl₃ este 31.8°C dar a lui SiCl₄ este 57.2°C \Rightarrow se mai face o purificare a SiHCl₃ și \Rightarrow 95% SiHCl₃ + 5% SiCl₄.

După purificare SiHCl₃ conține impurități de 10⁻⁸% (B, Ar). Si trebuie extras și purificat: $\text{H}_{2(g)} + \text{SiHCl}_{3(g)} \xrightarrow{1100^{\circ}\text{C}} \text{Si}_{(S)} + 3\text{HCl}$ unde Si poate fi și praf.

Dacă Si este sub formă de praf se trece printr-o cameră unde sunt bare de Si policristalin pe care se depune.

După acest proces polisiliciul în forme de bare nu este încă bun, îl topim prin metoda topirii zonale după care îl tragem în cristale.

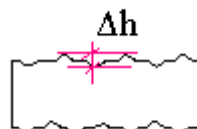
Prelucrarea mecanică a materialelor semiconductoare

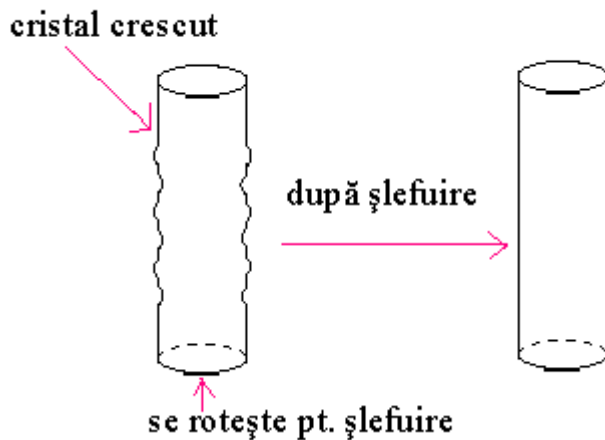
Operațiile de prelucrare mecanică sunt:

- 1) tăierea cristalului în plachete;
- 2) șlefuirea mecanică a suprafeței plachetelor;
- 3) poleirea de tip oglindă.

1) Tăierea monocristalelor

La prelucrarea mecanică se cere: - diametrul plachetei să fie: $\Phi = 100 \pm 0.1\text{mm}$;
- grosimea: $h = 600 \pm 10\mu\text{m}$;
- la poleirea de tip oglindă se cere ca $\Delta h = 0.025\mu\text{m}$.



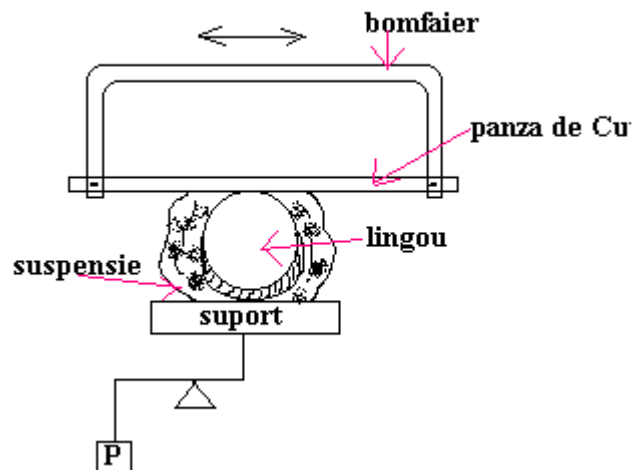


Se fixează lingoul într-un strung, pt. fixare mecanică se utilizează cleiuri care trebuie să se topească ușor, să se înlăture ușor de pe suprafața cristalului.

La șlefuire se folosește o cutie cu diamant . În interior se folosesc materiale n, p cu $\rho(1\ 1\ 1)(1\ 0\ 0)(1\ 1\ 0)$.

Toate plachetele utilizate în industrie au o tăietură (semn) pt. a oriente placheta față de axa de coordonate.

Prima metodă de tăiere a cristalelor în plăci a fost:

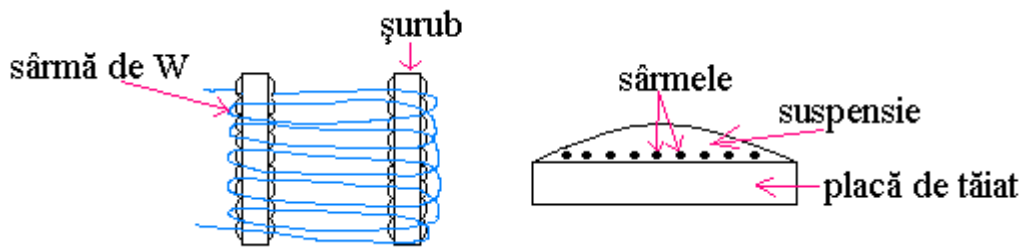


Se pun 200 de pânze una lângă alta la distanțe egale, pt. tăierea uniformă a cristalelor. Deasupra acestui lingou se toarnă o soluție din apă cu praf din carbid de Si.

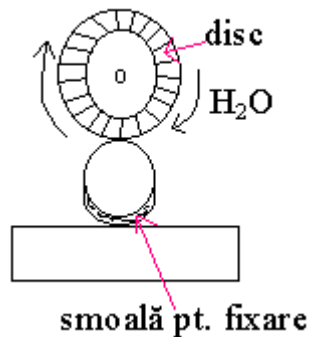
De pânza de Cu nu se lipeșta această suspensie care șlefuieste și taie cristalul. Cu însă nu taie mecanic cristalul, el fiind foarte maleabil.

Această metodă se folosește după ce în plăcuța de Si s-au făcut deja tranzistoarele.

A doua metodă este tăierea cu laser, care are o grosime de 0.3-0.5mm, și se utilizează pt. tăieri nu prea adânci (aproximativ 1mm).



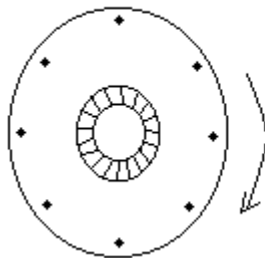
Cristalele au început să se taie apoi cu niște discuri de oțel cu grosime foarte mică, la care muchia de tăiere era exterioară. La marginea acestui disc se află Cu cu grăuncioare de diamant.



Discul are 5000 rotații/min din cauza aceasta el este răcit cu apă.

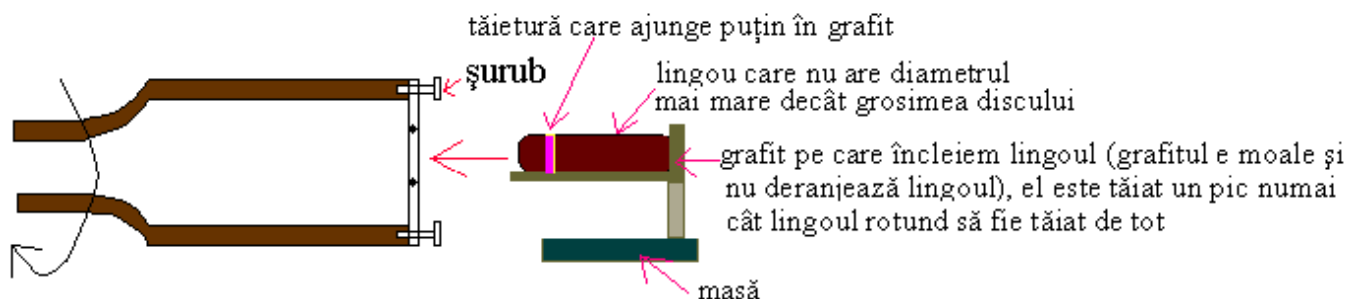
Această metodă tot nu este bună, deoarece, dacă se vrea să se taie o plachetă de 100mm discul trebuie să fie de 200mm minim. El fiind atât de mare creează vibrații care măresc grosimea tăieturii și astfel se duce mult produs la deșeuri.

Ultima metodă de tăiere este cu discuri cu muchie de tăiere interioară (strung rusesc).

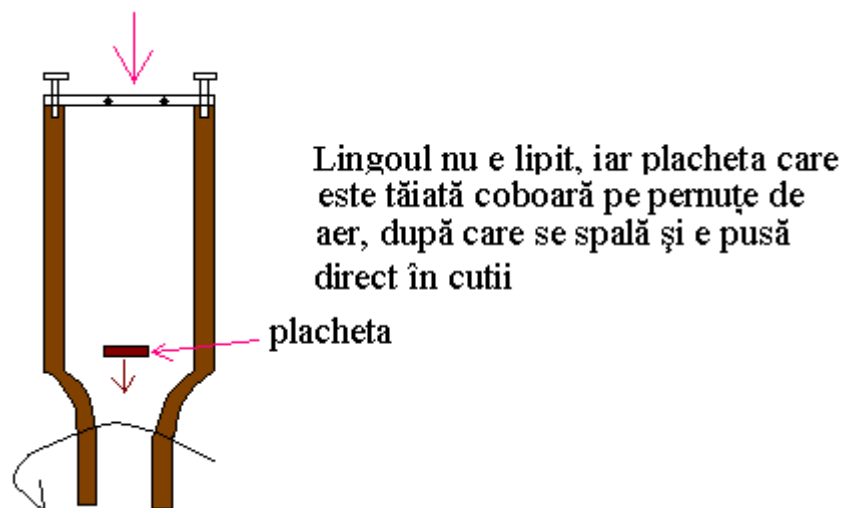


Cristalul intră în interiorul acestui disc care se rotește și se mișcă spre exterior făcându-se astfel tăierea. Tăierea se face tot cu apă.

Discul se întinde și se fixează undeva în opt locuri pt. ca tăierea să fie aproximativ egală cu grosimea acestui disc. Aceste discuri taie 500 plachete/1h cu diametrul de 100mm.



Plachetele nu cad deoarece ele rămân lipite în grafitul netăiat.
 Schema strungului japonez:



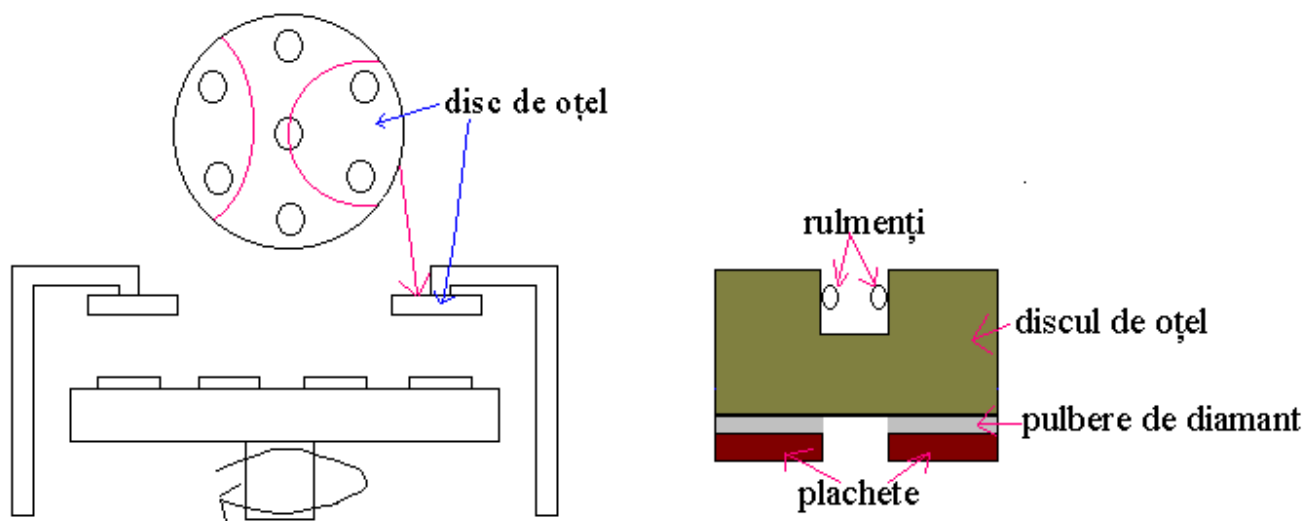
2) Șlefuirea plachetelor semiconductoare

După ce a fost tăiată placheta, pe ea poate rămâne niște valuri (au avut loc vibrații ale discului, undeva mai adânc, undeva mai la suprafață). Șlefuirea are scopul de a înlătura de pe suprafața plachetei aceste trepte și de a da plachetelor una și aceeași grosime.

Operația de șlefuire se face cu strunguri speciale.

Plachetele sunt puse pe un reșou pt. a se încălzi, după care cu ajutorul cleiurilor se ung și apoi se dau la răcit, apoi se iau la șlefuit. Rolul șlefuirii este de a înlătura stratul superficial cu defecte apărut la tăiere.

Prima operație de șlefuire:



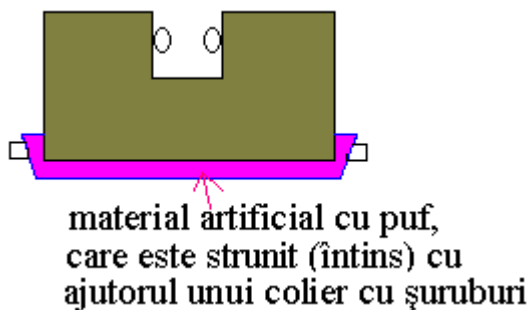
După această șlefuire are loc șlefuire cu diferite suspensii de șlefuit, de ex.: cu praf de diamant având diametre: $\Phi=20\mu\text{m}$, $\Phi=15\mu\text{m}$, $\Phi=10\mu\text{m}$.

Întâi se șlefuieste cu praful de $20\mu\text{m}$, se spală, după care se șlefuieste cu praful de $15\mu\text{m}$, ș.a.m.d..

3) Poleirea de tip oglindă

După operația de șlefuire are loc poleirea de tip oglindă care se face cu o pastă cu diamante (grăuncioare de diamant cu $\Phi=5\mu\text{m}$, $\Phi=3\mu\text{m}$, $\Phi=1\mu\text{m}$ \Rightarrow trei tipuri de paste).

Strungul de poleire este realizat în mod asemănător celui de sus:

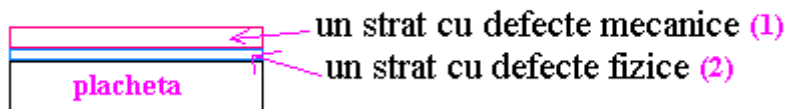


Se unge întâi cu pastă de $5\mu\text{m}$, se spală, apoi se unge cu pastă de $3\mu\text{m}$, ș.a.m.d..
Așa se face poleirea pe o singură față cealaltă față rămânând doar șlefuită.

Prelucrarea chimică a materialelor semiconductoare

Prelucrarea chimică în microelectronică este des întâlnită. Pt. a forma ferestre în SiO_2 se utilizează corodarea chimică. Corodarea chimică se folosește pt. determinarea defectelor pe suprafața plachetelor semiconductoare, pt. determinarea adâncimilor până în joncțiuni, pt. înlăturarea straturilor defecte de pe suprafața plachetei, cu scopul poleirii suprafeței.

Noi utilizăm corodarea chimică pt. înlăturarea defectelor de pe suprafața plachetelor.



Grosimea celui de-al doilea strat este egal cu jumătate din stratul unu. Dacă s-ar face difuzii în aceste straturi ar rezulta curenți mari.

Defecte mecanice: pori, crăpături, fisuri.

Defecte fizice: atomul nu este la locul lui în rețeaua cristalină.

Scopul prelucrării chimice este de a înlătura cele două straturi și de a face o rețea cristalină perfectă (aproximativ).

La baza corodării stau unele reacții chimice. În corespundere cu teoria corodării chimice a materialelor semiconductoare, corodarea se face în două etape:

I – oxidarea suprafeței semiconductorului;

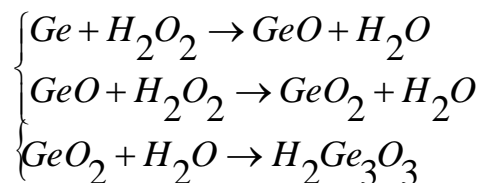
II – corodarea oxidului format.

Fiecare material corodant ar trebui să conțină: un oxidant (HNO_3 , H_2O_2 , H_2SO_4) și un corodant al oxidului format (HF).

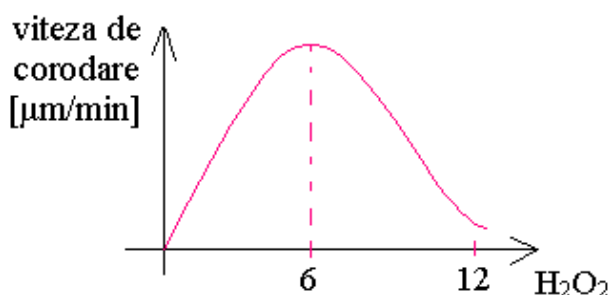
Orice soluție chimică mai conține catalizator (BrI) și un inhibitor (CH_3COOH – acid acetic) care micșorează viteza de corodare.

Analizăm corodarea materialului semiconductor Ge.

Ge are o abatere de la teoria corodării chimice. În general Ge se corodează în H_2O .

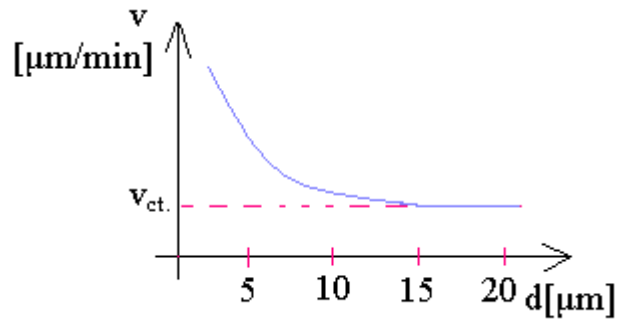


Ge se corodează într-un oxidant puternic. Oxidul de Ge se distruge în apă deoarece Ge în apă se corodează și din cauza aceasta nu este utilizat în tehnologia C.I.



Viteza totală a reacției chimice depinde de viteza de reacție a celei mai lente reacții. Dacă vitezele ambelor reacții ar fi egale, ar rezulta o viteză liniară (în sus).

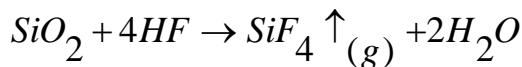
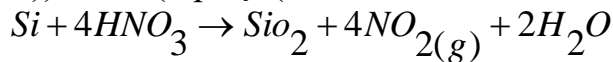
Folosind corodarea chimică noi putem găsi grosimea totală a straturilor defecte, măsurând viteza de corodare în funcție de grosimea stratului înlăturat:



La început viteza de corodare este mare, dar la un moment dat în strat avem o viteză de corodare ct. \Rightarrow grosimea stratului defectat este $15\mu\text{m}$.

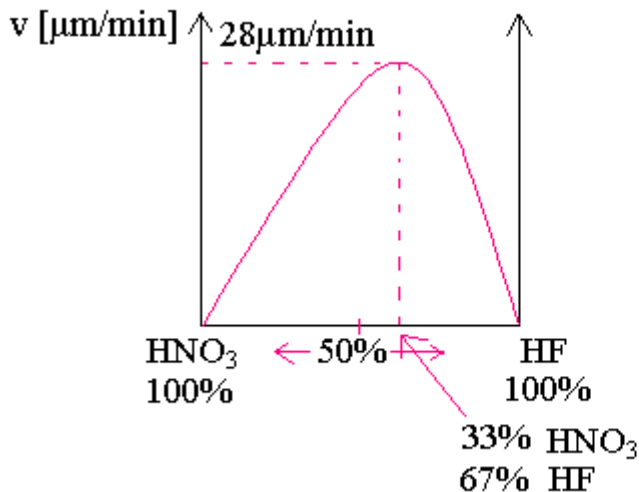
Corodarea Si (material de bază pt. CI)

Poate avea loc numai în două componente (amestecul HNO_3 (1 parte (oxidant puternic)) + HF (3 părți (corodant al oxidului format))).



Soluția în care a avut loc corodarea o înlăturăm cu apă deionizată cu o rezistivitate $\rho = 20\text{M}\Omega \text{ cm}$.

În graficul următor avem reprezentată viteza de corodare în funcție de concentrația substanțelor:



cea mai mare viteză de corodare este în punctul unde avem 33% HNO_3 (o parte) și 67% HF (două părți)

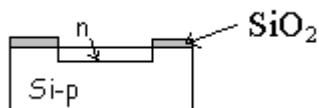
Cap. Pelicle în tehnologia microelectronicii

Fără pelicle nu există circuite integrate (CI). În electronică se utilizează trei tipuri:

- pelicle dielectrice;
- pelicle conductoare (metalice);
- pelicle epitaxiale (semiconductoare).

Toate ledurile, receptorii, laserele au la bază peliclele epitaxiale.

Peliclele dielectrice se utilizează pt. formarea locală a joncțiunilor pn.



Un condensator pelicular are în construcția sa: peliculă metalică, dielectric, peliculă metalică. În circuitele VLSI sunt un șir de trasee de contacte întretăiate care se izolează cu pelicle dielectrice. Tranzistorul MOS utilizează pelicula dielectrică. CI după ce este realizat se utilizează o peliculă dielectrică pt. pasivizarea circuitului integrat.

Peliclele metalice se utilizează la dispozitive și circuite integrate.

- plăcile condensatorului sunt pelicle metalice;
- dispozitivele cu barieră Shotchi.

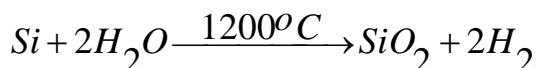
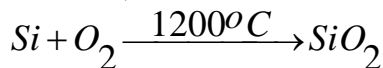
Peliclele epitaxiale pot avea grosimea între zeci de nm și până la 10μm

Epitaxie: „epi” – pe , „taxis” – a așeza, se așează o peliculă monocristalină pe un semiconductor monocristalin. Au cea mai mare utilizare.

Pelicle dielectrice

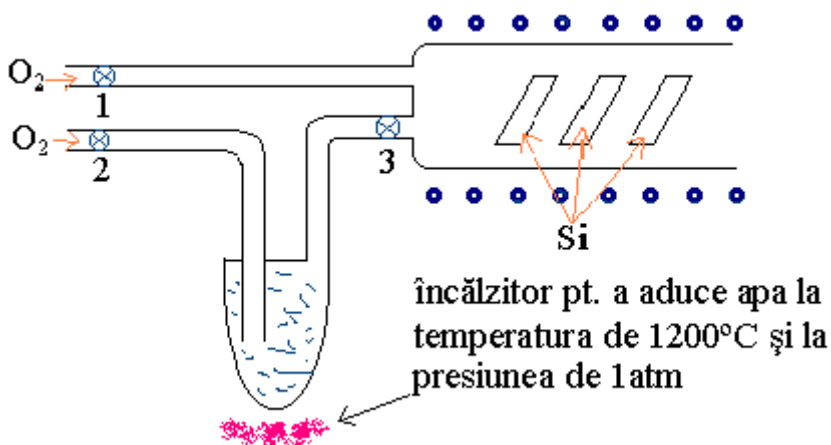
Oxidarea termică a Si

Plachță de Si o introducem într-un cuptor electric la o temperatură de 1000-2000°C. Dacă se introduce O₂ în cuptor pe plachetă se depune rugină (se oxidează în atmosferă de O₂).



În calitate de oxidant poate fi utilizat: O₂ uscat, vapori de H₂O, și un amestec: O₂ umed.

Instalația industrială, care în principiu poate îndeplini oxidarea în oxigen uscat, oxigen umed sau în vapori de apă este:



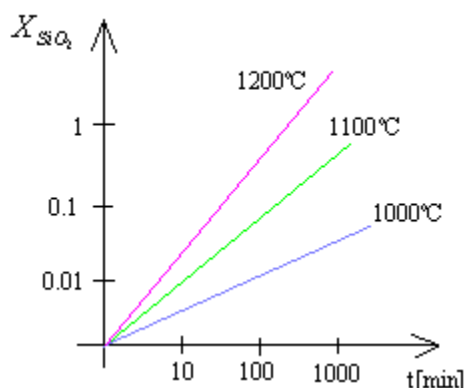
Într-un singur proces se pot introduce 100 de plachete de Si. Oxidarea se face într-un tub deschis.

1 deschis – se realizează oxidarea cu oxigen uscat;

- 2 deschis – se realizează oxidarea cu vapori de apă;
- 2 și 3 deschise – se realizează oxidarea în oxigen umed.

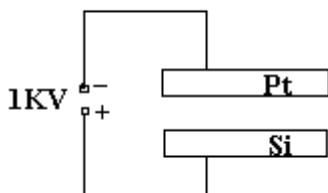
Procesul oxidării în oxigen uscat

Când oxidăm în O₂ uscat pelicula obținută are o calitate înaltă (pelicula nu are pori și are o viteză mică de corodare în HF), însă viteza de creștere a peliculei în O₂ uscat este destul de mică.



Cu cât temperatura este mai mare cu atât viteza de creștere este mai mare

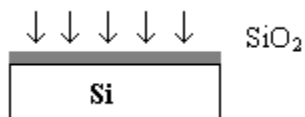
O₂ la temperatura de 1200°C este sub formă de ioni negativi.



La câmp de 1KV/cm viteza de creștere se majorează și ca urmare placheta atrage ioni negativi.

Procesul de oxidare în vapori de apă

În vapori de H₂O calitatea oxidului este mult mai rea, însă viteza de creștere este mult mai mare. S-a dovedit că în cazul oxidării cu vapori de H₂O, pe suprafața plachetei



se formează prima peliculă de SiO₂ prin care vaporii de apă ar trebui să difuzeze pt. a oxida în continuare. Se demonstrează că vor difuza prin pelicula de oxid doar grupări de hidroxil (OH). Acestea vor forma pori în oxid.

Din aceste considerente viteza de creștere la oxidarea în vapori de apă este mai mare decât viteza de creștere în oxigen uscat.

Problema oxidării în oxigen umed

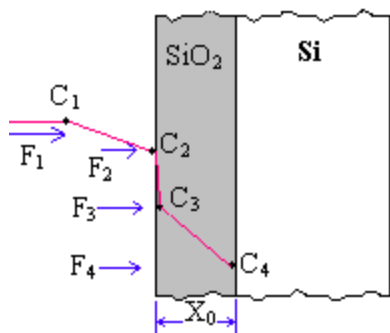
Oxidând în O₂ umed noi putem regăsi calitatea. Adăugând vapori de apă se strică însă calitatea dar mărim viteza de creștere.

Procesul oxidării ideale este: se face întâi oxidare în O₂ uscat, după care se dă drumul la vapori și oxidăm în vapori de apă, după care din nou oxidăm în O₂ uscat.

Obs.! Pt. obținerea peliculei de SiO₂ de 1μm se oxidează în O₂ uscat timp de o oră.

Practic se fac pelicule de 0.1μm prin oxidare în O₂ uscat, vapori de H₂O, O₂ uscat în timp de 1-2h.

Cinetica oxidării termice a Si

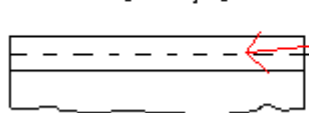


Avem o plachetă de Si pusă în reactor și fluxul de O₂ merge paralel suprafeței plachetei. Concentrația C₁ reprezintă cantitatea de atomi a oxidantului în 1 cm³. Spre stânga punctului concentrația este ct. Pe suprafața peliculei concentrația oxidantului este C₂ (C₂<C₁).

C₃ – concentrația oxidantului dizolvat în oxid;

C₄ – concentrația oxidantului la suprafața plachetei de Si – numai acest oxidant poate intra în reacție chimică și poate forma oxid.

Suprafața plachetei inițiale



s-a format primul strat de oxid molecular

○ parte din oxid s-a format în interior iar o parte s-a dus deasupra suprafeței inițiale

Fluxul se realizează întotdeauna când sunt diferențe de concentrații, și reprezintă cantitatea de atomi ai oxidantului care pătrund într-o unitate de timp printr-o unitate de suprafață, F[at/cm²*s].

$$F_1 = h(C_1 - C_2)$$

$$F_2 = \delta(C_2 - C_3)$$

$$\vec{F} = -D \frac{\partial \vec{C}}{\partial X} \quad \text{unde: } h - \text{constanta vitezei transportului de masă în faza gazoasă;}$$

$$F_3 = D \frac{C_3 - C_4}{X}$$

$$F_4 = K \cdot C_4$$

δ - constanta vitezei dizolvării oxidantului în oxid;

\vec{F} - flux de difuzie;

F₃ – flux de difuzie al oxidantului

K – constanta vitezei reacției chimice între oxidant și Si.

Pt. un regim stabilit, toate fluxurile sunt egale: $F_1=F_2=F_3=F_4$

$$F_2 = F_4 \Leftrightarrow \delta(C_2 - C_3) = K \cdot C_4 \Rightarrow \frac{K}{\delta} = \frac{C_2 - C_3}{C_4}$$

$$F_3 = F_4 \Leftrightarrow D \frac{C_3 - C_4}{x} = K \cdot C_4 \Rightarrow \frac{K \cdot X}{D} = \frac{C_3 - C_4}{C_4}$$

$$\Leftrightarrow \frac{K}{\delta} + \frac{K \cdot X}{D} + 1 = \frac{C_2 - C_3}{C_4} + \frac{C_3 - C_4}{C_4} + 1 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{K}{\delta} + \frac{K \cdot X}{D} + 1 = \frac{C_2}{C_4}$$

$$\text{Notăm: } C_2 = \frac{C_1}{\alpha > 1} \Rightarrow \frac{K}{\delta} + \frac{K \cdot X}{D} + 1 = \frac{C_1}{C_4} \Rightarrow C_4 = \frac{\frac{C_1}{\alpha}}{\frac{K}{\delta} + \frac{K \cdot X}{D} + 1}$$

$$F_4 = K \cdot C_4 = \frac{\frac{C_1 \cdot D}{\alpha}}{\left[\left(\frac{1}{\delta} + \frac{1}{K}\right) + \frac{X}{D}\right] D} \Rightarrow F = \frac{\frac{C_1 \cdot D}{\alpha}}{\left(\frac{1}{\delta} + \frac{1}{K}\right) D + X}$$

Viteza de creștere a peliculei: $v = \frac{dX}{dt} = \frac{F}{N_0} = F \cdot V$; X - grosimea peliculei; N_0 - nr.

de atomi care se formează într-o unitate de volum; V - volumul oxidului format.

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\frac{C_1 \cdot D \cdot V}{\alpha}}{\left(\frac{1}{\delta} + \frac{1}{K}\right) D + X}; \text{ unde notăm constantele: } \left(\frac{1}{\delta} + \frac{1}{K}\right) D = \frac{A}{2} \text{ și } \frac{C_1 \cdot D \cdot V}{\alpha} = \frac{B}{2}.$$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{\frac{B}{2}}{\frac{A}{2} + X} = \frac{B}{A + 2X} \Rightarrow \int (A + 2X) dX = \int B \cdot dt \Rightarrow \mathbf{X^2 + A \cdot X - B \cdot t = 0}$$

reprezintă ecuația matematică a oxidării termice a Si.

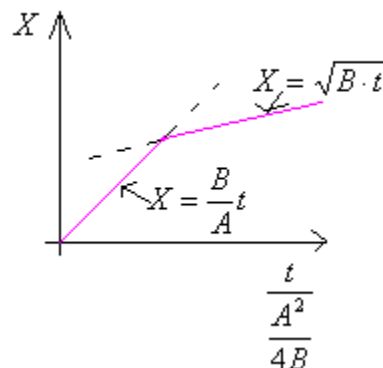
$$X_{1,2} = \frac{-A \pm \sqrt{A^2 + 4B \cdot t}}{2} \Rightarrow X = -\frac{A}{2} + \sqrt{\left(\frac{A}{2}\right)^2 + B \cdot t} \Rightarrow X = -\frac{A}{2} + \frac{A}{2} \sqrt{1 + B \cdot t \left(\frac{2}{A}\right)^2} \Rightarrow$$

$$X = \frac{A}{2} \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{t}{\frac{A^2}{4B}}} \right);$$

$$\text{I - } t \gg \frac{A^2}{4B} \Rightarrow X = \frac{A}{2} \cdot \frac{\sqrt{B \cdot t}}{\frac{A}{2}} = \sqrt{B \cdot t};$$

$$\text{II - } t \ll \frac{A^2}{4B} \Rightarrow X = \frac{A}{2} \left(-1 + 1 + \frac{B \cdot t}{\frac{2A^2}{4}} \right) = \frac{B}{A} t.$$

Reprezentare grafică:



Creșterea peliculelor subțiri de SiO₂ prin oxidarea termică a Si

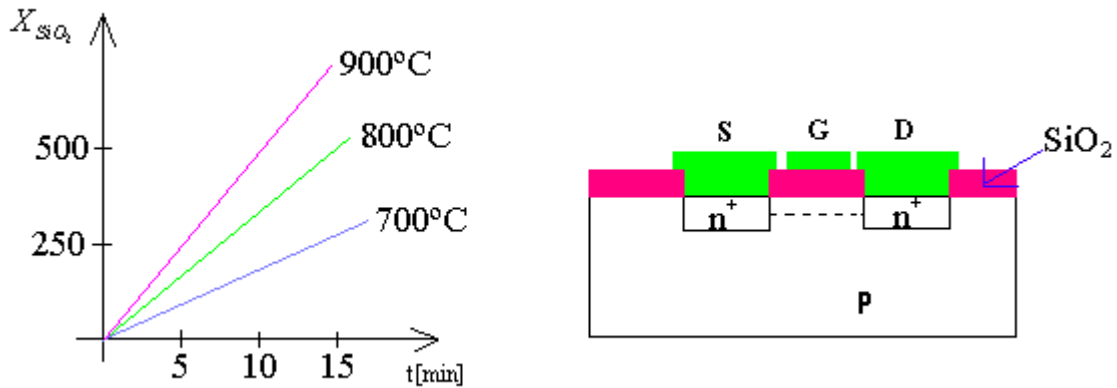
În CI pe scară mare grosimea peliculei de SiO₂ este mai mică decât 500Å (100 de straturi moleculare de SiO₂). Aceste pelicule se caracterizează printr-o tensiune de străpungere E_{str} SiO₂ (peliculă groasă)=10⁶V/cm și E_{str} SiO₂ (peliculă subțire-500Å)=5*10⁷V/cm.

S-a observat din analiza cinetică că grosimea peliculei de SiO₂ depinde liniar de

timp: $X_{SiO_2} = \frac{B}{A} t$, când $t \ll \frac{A^2}{4B}$, unde $\frac{B}{A}$ - constantă care în cazul creșterii peliculei la

nivel de 500Å, aceasta trebuie înmulțită cu 10, rezultă deci că viteza de creștere a peliculei subțiri este mult mai mare ca la cele groase.

Cu cât timpul este mai mare, cu atât grosimea peliculei este mai precisă, calitatea este mai bună dacă aceasta este oxidată în oxigen uscat și la temperaturi minime posibile. Se dorește ca timpul de oxidare să fie cât mai lung pt. a putea controla bine grosimea (se vor folosi 400 – 450°C).



S-a constatat că oxidarea uscată nu este bună în cazul obținerii de pelicule de 500Å. Aceste pelicule conțin ioni de Na⁺ (ioni sateliți).

Dacă la G punem 1V la 500Å \Rightarrow câmpul $E = \frac{1V}{500 \text{ Å}} = \frac{1V}{500 \text{ Å} \cdot 10^{-6} \text{ cm}} \cong 10^4 \frac{V}{\text{cm}}$, 1Å = 10⁻⁴μm=10⁻⁶cm.

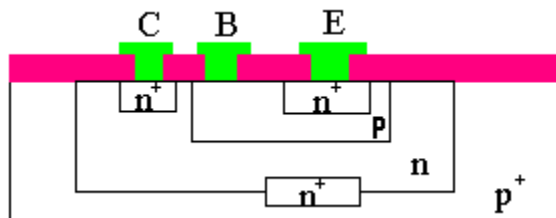
Ionii de Na în câmpul electric polarizează dielectricul. Noi trebuie să punem la G un potențial pozitiv ca să iasă negativ sub G. Dar dacă ionii polarizează, rezultă că câmpul neutralizează câmpul electric format de electroni și atunci ar fi ca și cum nu s-ar fi aplicat nici un potențial (ionii se vor orienta după câmp și vor anula câmpul electric format de electroni). Noi trebuie să scăpăm însă de acești ioni de Na din pelicula subțire (apăreau și în pelicula grosă dar nu deranjează), și putem proceda în felul următor.

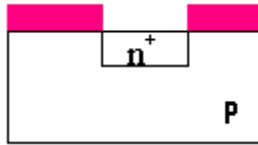
Soluție: în procesul de oxidare termică a Si, în oxigenul uscat se adaugă vapori de acid clorhidric (HCl):

$HCl + Na^+ \rightarrow NaCl + H_2^+$ - se obține molecula de sare de bucătărie care este neutră în câmpul electric.

Pt. a obține pelicule subțiri sub 500Å, este necesar de oxidat Si la temperaturi joase, în atmosferă de oxigen uscat cu adăugarea vaporilor de HCl.

Stratul îngropat în tranzistor:





Pt. a face acest strat îngropat în tranzistor noi am făcut oxidare termică, fotolitografie, ș. a. m. d.

Neajunsul principal a oxidării termice a Si (pt. a obține o peliculă de 1 μm grosime trebuie să avem la oxidare temperaturi mari) este temperatura mare care face ca abrupțea joncțiunilor să se piardă în urma redifuziilor impurităților dintr-o regiune în alta.

S-a pus problema obținerii de pelicule de SiO₂.

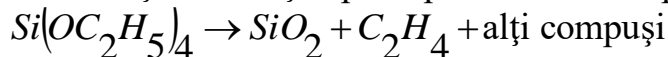
Depunerea peliculelor de SiO₂

Această metodă dă posibilitatea de micșorare a temperaturii de depunere a peliculei, și astfel pelicula poate fi depusă pe orice suport. Dar calitatea peliculei nu este însă la fel de bună ca la oxidarea termică.

Pt. a depune pelicule de SiO₂ se folosește așa numita metoda pirolizei, care se mai numește și descompunerea termică a unei substanțe care conține molecula de SiO₂.

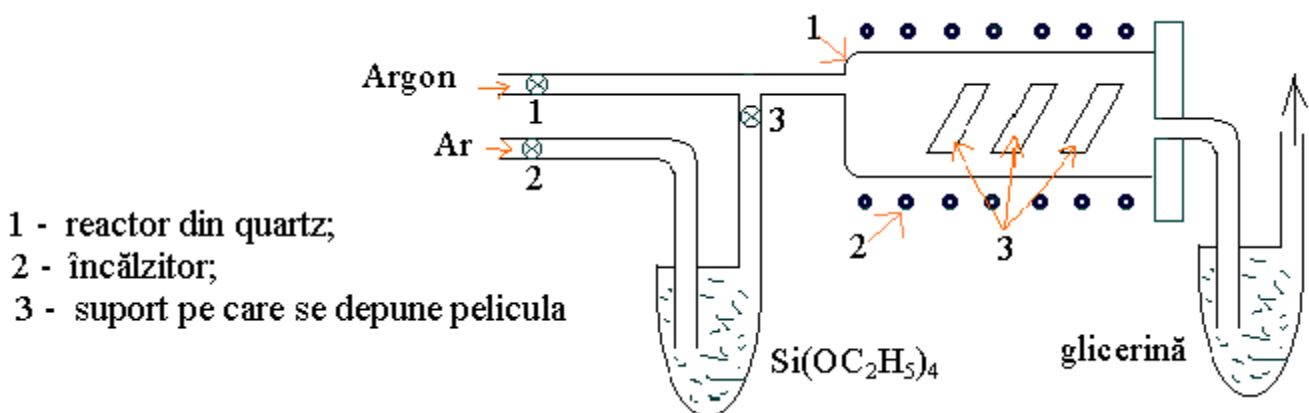
În tehnologia microelectronicii se folosește ca substanță inițială (din grupa *alcooxisilane*) *tetraetaxisilanul*, o substanță organică care are formula: Si(OC₂H₅)₄. Această substanță are temperatura de fierbere t=167°C și temperatura de descompunere (piroliză) t=728 – 840°C.

Construcția instalației pt. depunerea acestei pelicule de SiO₂ este:



Această substanță reprezintă un lichid străveziu (în condiții atmosferice) care în principiu se poate polimeriza sub acțiunea razelor solare. Este o substanță otrăvitoare.

Formarea peliculei:

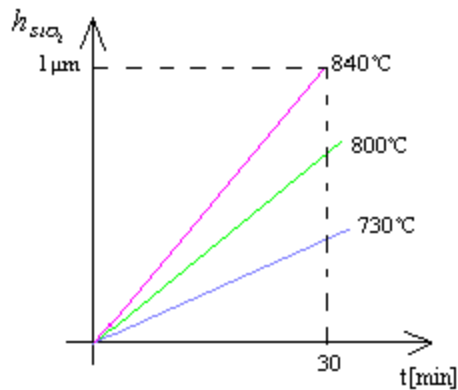


- 1 - reactor din quartz;
- 2 - încălzitor;
- 3 - suport pe care se depune pelicula

Pași: - robinetul 1 deschis ⇒ este scos aerul din reactor și intră argonul.

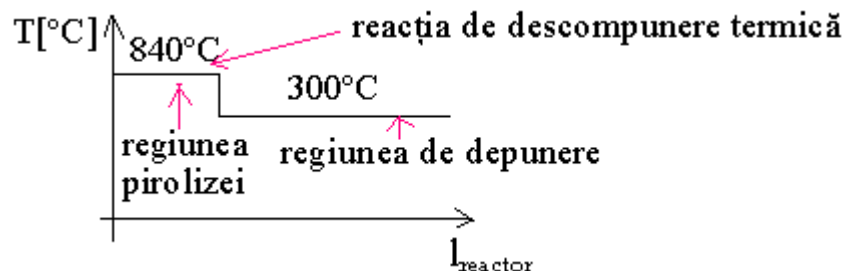
Obs.! Se folosește glicerina pt. că are o presiune a vaporilor saturați mică și nu intră în reactor.

- se închide robinetul 1, se deschide robinetul 2, vine Ar și pe suport are loc reacția de piroliză.



Viteza reacției chimice depinde exponențial de temperatură (grosimea peliculei crește odată cu temperatura plachetei)

Putem să avem un cuptor cu două regiuni de temperatură:



Putem depune pelicula pe orice suport la 300°C deoarece are o adeziune bună pe suport.

Legea tehnologiei: orice operație se îndeplinește la temperaturi mai joase decât temperatura de la operația precedentă (în tehnologie în general).

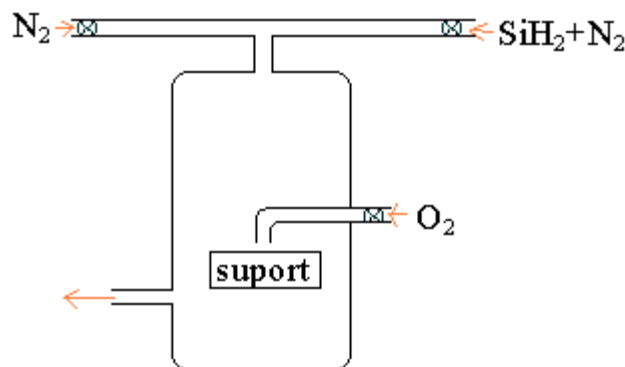
Altă metodă de depunere a peliculei de SiO₂ care are la bază reacția:

$SiH_4 + O_2 \rightarrow SiO_2 + 2H_2$ - această reacție poate avea loc și la temperatura camerei;

SiH₄ – silan, este un gaz explozibil în reacție cu aerul.

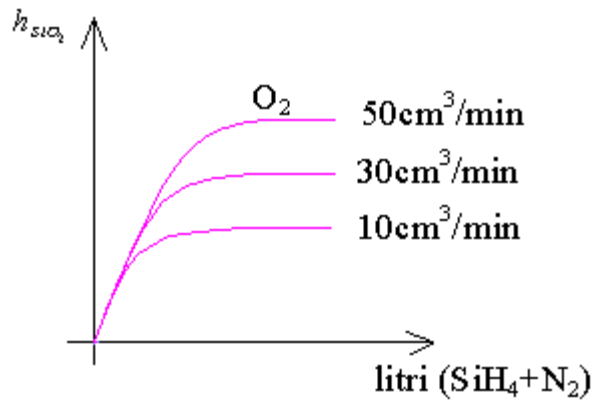
Pt. a nu exploda trebuie să punem cantități foarte mici din această substanță.

Instalația:



N₂ este folosit pt. a evita pericolul exploziei și de a scoate aerul din instalație.

O₂ vine exact deasupra suportului pt. ca pelicula să se depună numai pe acesta și nu pe toți pereții instalației.



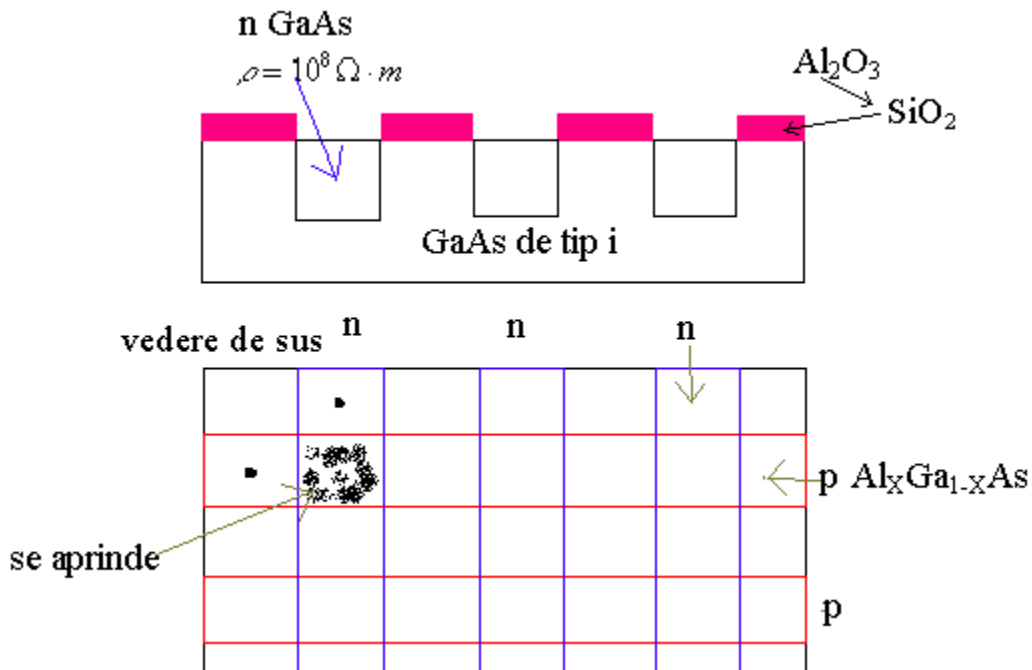
Grosimea peliculei crește linear cu concentrația lui SiH_4 , și viteza reacției la un moment dat este constantă (la O_2).

Depunerea peliculei de Al_2O_3 și Si_3N_4

Aceste pelicule se caracterizează prin diferiți parametri:

- pelicula de SiO_2 se dizolvă numai în HCl pe când pelicula de Al_2O_3 și Si_3N_4 pot fi dizolvate (corodate) în acid ortofosforic la temperatura de $70 - 80^\circ\text{C}$.
- pelicula de Al_2O_3 are cea mai mare valoare a lui ϵ față de SiO_2 ; Si_3N_4 se caracterizează printr-o tensiune de străpungere mare.

Pe această plachetă trebuie crescută o matrice de leduri și apoi o matrice de fotoreceptori:

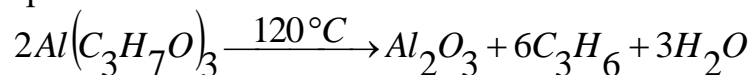


Pt. mască nu se poate folosi SiO_2 pt. că se dizolvă în GaAs topit. Ca urmare dacă această peliculă este înlocuită cu o peliculă de Al_2O_3 , atunci este posibilă umplerea canalelor cu GaAs .

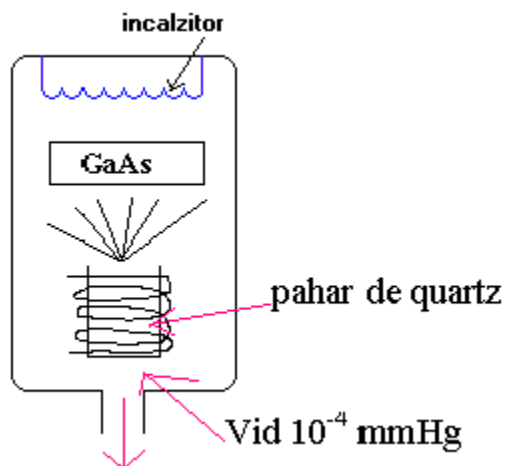
Și astfel a fost formată prima matrice de leduri.

Obținerea peliculei de Al_2O_3

Cea mai simplă metodă este cea de descompunere termică a moleculei de $Al(C_3H_7O)_3$ (această substanță reprezintă un praf alb și intră foarte ușor în reacție chimică cu vaporii de apă din aer). Această moleculă la temperatură nu mai mare de $120^\circ C$ se descompune în:



Instalația folosită:



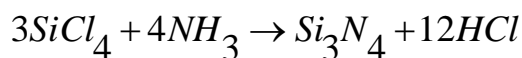
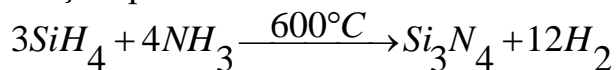
Se încălzește până la $450^\circ C$.

Când temperatura ajunge la $120^\circ C$ toată substanța se vaporizează momentan. Grosimea peliculei depuse depinde de cantitatea de substanță din vaporizator. Această substanță hidrolizează foarte ușor, nu poate fi pusă în contact cu atmosfera. Ea trebuie cântărită cu mare precizie. Într-un bol se pune cântarul și în atmosferă de Ar se cântărește.

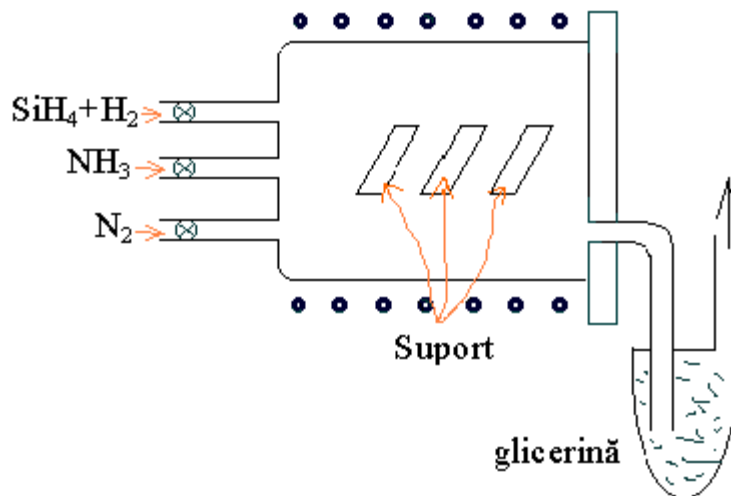
Pelicula are culoarea proporțională cu grosimea (grosimea peliculei se determină prin culoare).

Obținerea peliculei de Si_3N_4

Se obține prin metoda care are la bază reacția chimică:



Instalația: - grosimea peliculei depinde de fluxul reactanților: SiH_4 , NH_3 , N_2 .



Obs.! Întâi se dezlocuiește aerul.

Măsurarea grosimii peliculei dielectrice

Măsurarea are o mare importanță pt. aplicarea acestor pelicule în anumite cazuri. Cea mai simplă metodă de măsurare este metoda măsurării precise.



Putem cântări masa suportului cu peliculă $\Rightarrow P_{sup} + pel$;

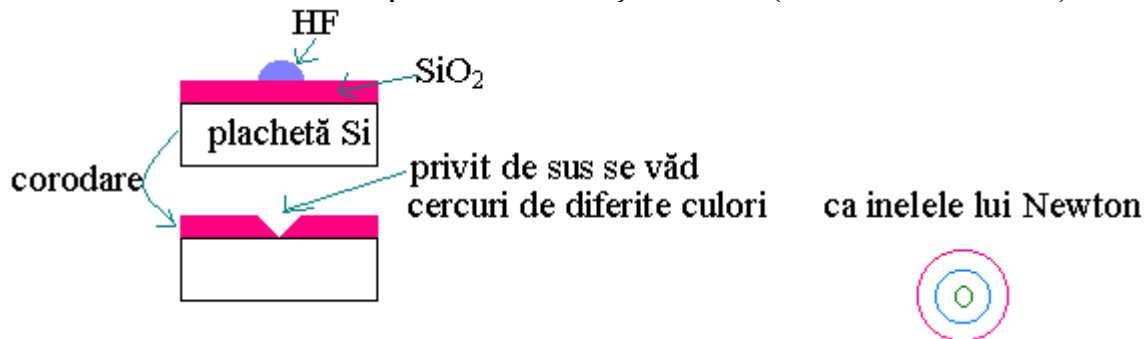
Corodăm pelicula $\Rightarrow P_{sup}$;

Grosimea peliculei: $X = \frac{P_{sup} + pel - P_{sup}}{\rho \cdot S}$;

Masa: $m = \rho \cdot v = \rho \cdot S \cdot X$; v- volumul, S – suprafața.

În industrie se folosește metoda culorilor pt. determinarea grosimii peliculei.

Obs.! Culorile unsoirii cu apa în interferența luminii (Inelele lui Newton).



Culorile curcubeului pot fi repetate, în funcție de grosimea peliculei.

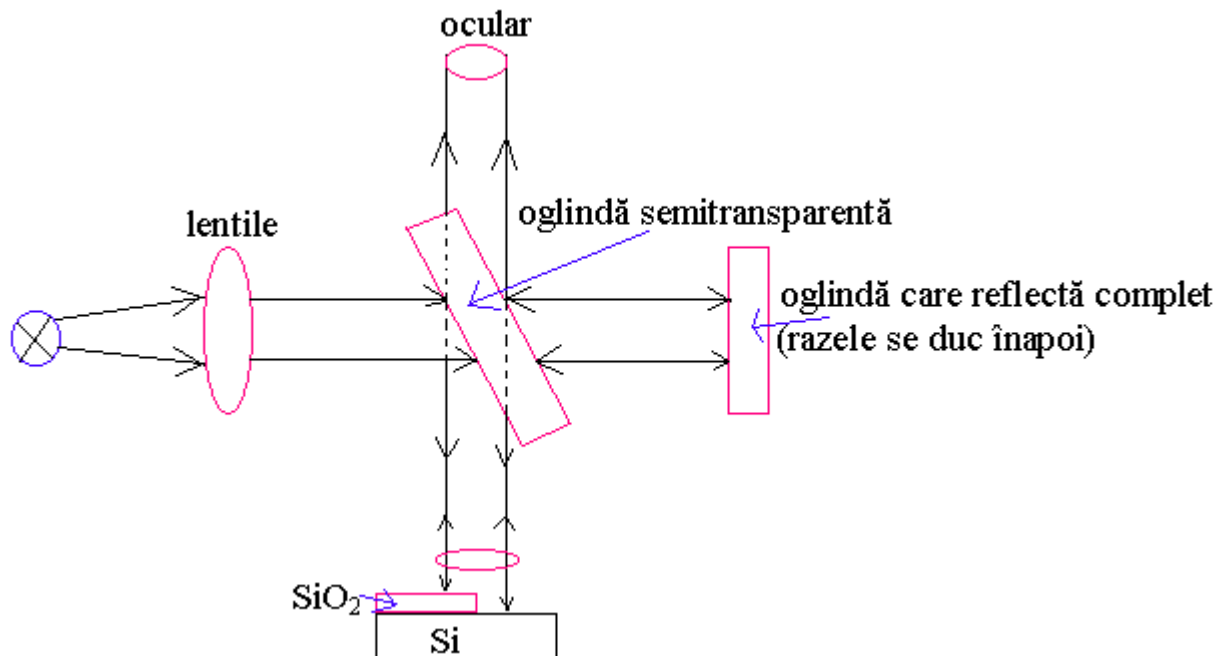
Determinăm ordinul de interferență. De exemplu la suprafață vedem roșu și mai vedem încă de două ori \Rightarrow ordinul de interferență = 3. Se folosește un tabel în care în funcție de culoare și ordin de interferență \Rightarrow grosimea peliculei.

| | Ordin de interferență | | |
|-----------------|-----------------------|------|-------|
| culoare | 1 | 2 | 3 |
| Cafeniu deschis | 50Å | 500Å | 1000Å |
| Roșu | 80Å | 800Å | 1300Å |
| Galbeu | | | |
| Albastru | | | |

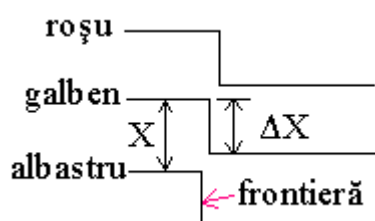
Dacă culoarea nu este omogenă \Rightarrow grosimea nu este omogenă.

Altă metodă de măsurare cu ajutorul unui microscop interferențiomtric care ne dă posibilitatea să măsurăm grosimea peliculei.

Schema acestui microscop:



În ocular se observă:



Dacă aceste raze nimeresc pe o suprafață omogenă, nu trebuie să existe acea frontieră.

Dacă lumina (raza) este verde avem:
$$h_{SiO_2} = \frac{\Delta X}{X} \cdot \frac{\lambda}{2};$$

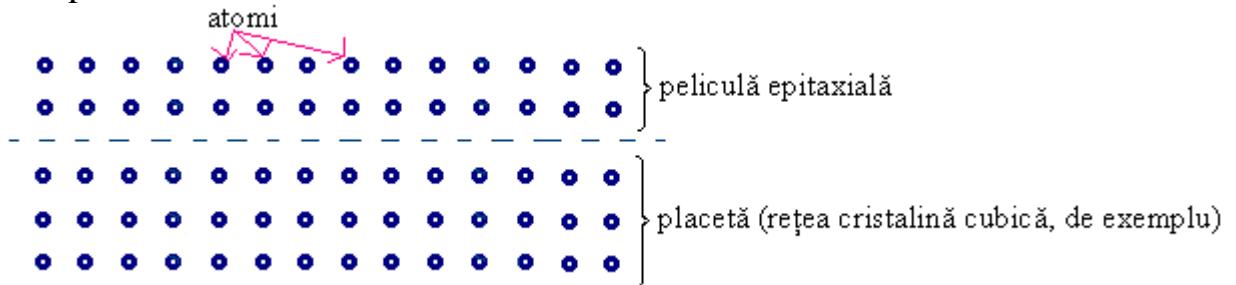
$$\lambda_{verde} = 0.550 \mu m \Rightarrow h_{SiO_2} = 0.275 \frac{\Delta X}{X}$$
 - așa se calculează grosimea peliculei.

Creșterea peliculelor epitaxiale

Noțiuni generale despre epitaxie. Clasificarea proceselor epitaxiale

Epitaxie – din gracă “epi” = pe; “taxis” = a așeza.

Epitaxia este procesul de creștere a peliculei monocristaline pe suprafața plachetei monocristaline în așa mod ca rețeaua cristalină a peliculei să fie o prelungire a rețelei cristaline a plachetei.



Aceste pelicule epitaxiale se folosesc în toată tehnologia microelectronicii (CI, tiristor, laser, fotoreceptor).

Tipuri de epitaxii

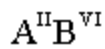
Autoepitaxie – componența chimică a plachetei și a peliculei crescute nu se deosebește.

| | | | | | | |
|----------|----|------|---|---|----------------|----------------|
| Pelicula | Si | GaAs | p | n | n ⁺ | p |
| Placheta | Si | GaAs | n | p | n | p ⁺ |

Deosebirile pot fi numai în tipul de impuritate.

Heteroepitaxie - componența chimică a plachetei și a peliculei crescute este diferită.

| | | | |
|----------|------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Pelicula | GaAs | Al _x Ga _{1-x} As | In _x Ga _{1-x} P |
| Placheta | Ge | GaAs | InP |



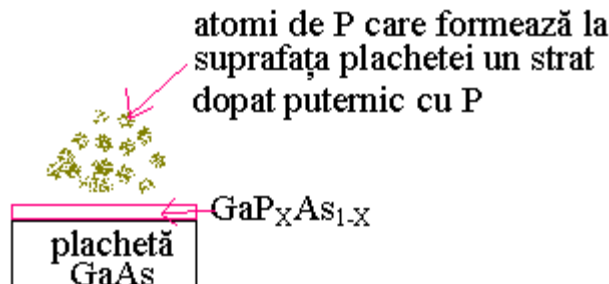
$\left. \begin{array}{l} \text{CdTe} \\ \text{ZnTe} \end{array} \right\} \text{ de tip p}$ pt. a forma o heteroepitaxie putem lua CdTe care este de tip p și ZnSe care este de tip n

$\left. \begin{array}{l} \text{ZnSe} \end{array} \right\} \text{ de tip n}$

Condiții: - nu putem însă crește orice material pe orice plachetă pt. că între plachetă și peliculă se pot forma o serie de defecte, dacă acestea două nu corespund;
 - temperatura plachetei și peliculei trebuie să fie aproximativ egale.

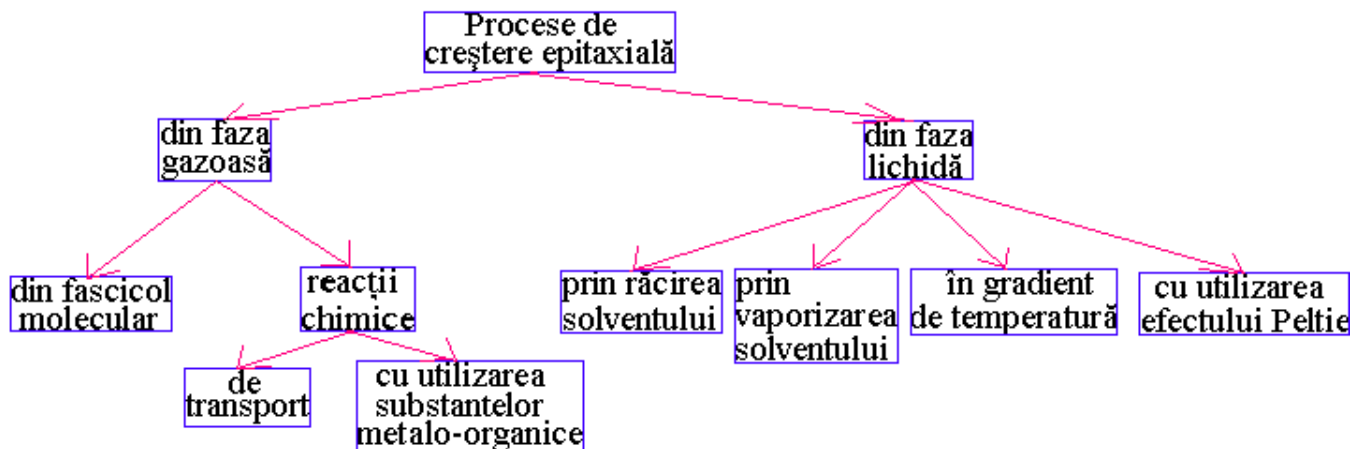
Hemioepitaxie – pelicula epitaxială se formează datorită reacției chimice dintre materialul plachetei și substanța din faza gazoasă.

Exemplu:



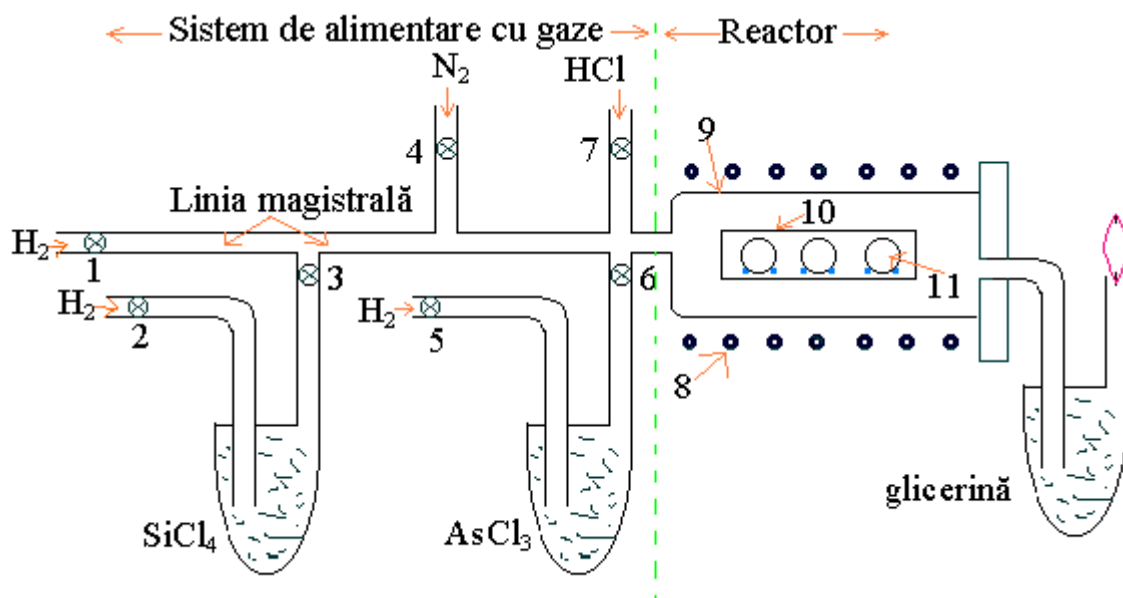
Procesele de creștere epitaxială

Toate procesele pot fi împărțite în două grupe mari:



Creșterea stratului epitaxial de Si din faza gazoasă

a) *Construcția instalației de creștere epitaxială:*



Instalația conține trei părți: - reactorul;
 - sistemul de alimentare cu gaze;
 - sistemul de alimentare cu energie electrică și control

(nu este desenat).

Pe linia magistrală merg toate celelalte componente (HCl, N₂, etc) în reactor.

Reactorul poate fi realizat din sticlă de quartz cu o puritate înaltă. Reactorul se încălzește cu ajutorul generatorului de frecvențe înalte.

8 – reprezintă inductorul care este realizat dintr-un tub de aramă, care conduce bine căldura și care se răcește cu apă curgătoare.

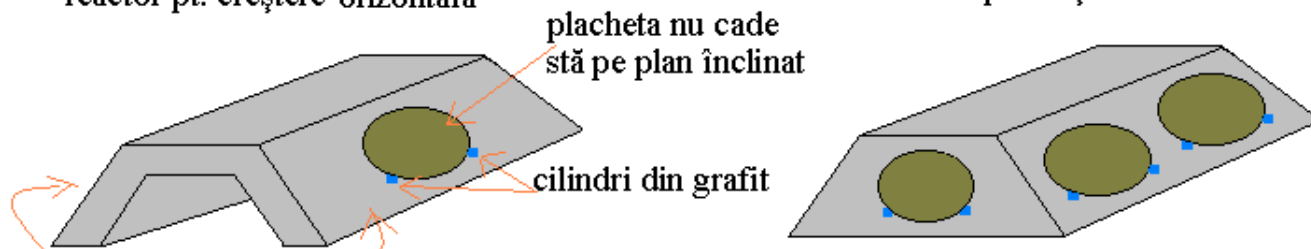
Pt. ca temperatura să fie stabilă, reactorul trebuie încălzit apoi răcit rapid.

11 – reprezintă plachetele de Si pe care se cresc peliculele epitaxiale.

10 – reprezintă pedestralul format din grafit de o puritate înaltă. Acest pedestral poate fi:

reactor pt. creștere orizontală

reactor pt. creștere verticală



se pun plachete pe ambele părți

se pot introduce până la 100 de plachete cu diametrul de 150mm

Pedestralul se rotește și grosimea peliculei crescute va fi omogenă pe toate plachetele.

Grafitul este o substanță care conduce curentul electric, rezistența este mică, și rezistă bine la temperaturi destul de înalte.

Sticla de quartz nu absoarbe curentul electric, ci îl absoarbe grafitul și condus mai departe. La frecvențe înalte (frecvența industrială = 13.56MHz) grafitul se încălzește puternic cedând căldura plachetelor.

Sistemul de gaze: gazele pe care le folosim sunt în principiu niște substanțe lichide, foarte agresive.

Robinetele de la 1 la 7 se reglează pt. trecerea gazelor. Aceste robinete sunt realizate din teflon stabil din punct de vedere chimic, nu reacționează cu gazele. Se mai pot realiza și din oțel-inox, dar nu este chiar atât de dur ca teflonul.

Mai există și sistemul de traductoare pt. măsurarea temperaturii în interiorul reactorului.

b) Fișa tehnologică a procesului de creștere epitaxială

1. așezarea plachetelor de Si pe pedestral și erimizarea reactorului; toate robinetele sunt închise, ca urmare în reactor este aer.

2. se deschide robinetul 4 și înăuntrul reactorului se dă drumul la N₂ pt. a dezlocui aerul care este în reactor (timpul cât se ține deschis robinetul este în jur de 15-20min în funcție de viteza N₂).

N₂ va ieși apoi din reactor prin ultimul vas.

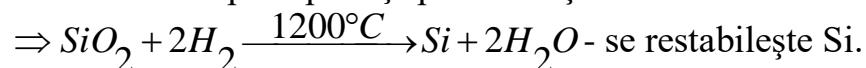
3. se închide robinetul 4 și se deschide robinetul 1 și pe linia magistrală se dă drumul la H₂ (bine purificat). Nu se dă drumul din prima pt. că face cu aerul un amestec exploziv.

H₂ purificat trece prin reactor pt. a dezlocui N₂ și apoi H₂ formează un gaz care restabilește suprafața plachetei de oxizi.

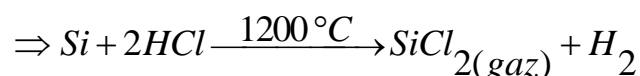
Din culoarea flăcării se determină dacă H₂ a dezlocuit tot N₂ (culoarea trebuie să fie albăstrui și nu roșatică, ca în cazul unui amestec).

4. dacă în interiorul reactorului curge numai H₂, atunci putem conecta inductorul la generator și încălzim reactorul până la T = 1200°C.

SiO₂ care este pe suprafața plachetei și cu H₂ din reactor la 1200°C ⇒



5. după prelucrarea mecanică a plachetelor, pe suprafața acestora mai există defecte. Acest strat de defecte trebuie înlăturat. Placheta se încălzește până la 1200°C și se deschide robinetul 7 ⇒

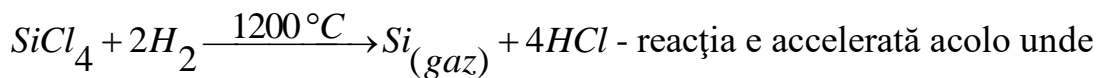


Dacă de exemplu grosimea stratului defectat este de 3μm, calculăm viteza și determinăm timpul cât trebuie să ținem deschis robinetul 7.

6. închidem robinetul 7 și deschidem robinetele 2, 3, 5, 6.

H₂ de la robinetul 2 transportă molecula de SiCl₄ pe linia magistrală. Dacă încălzim SiCl₄ la un flux constant, atunci cantitatea de substanță introdusă pe linia magistrală este mai mare.

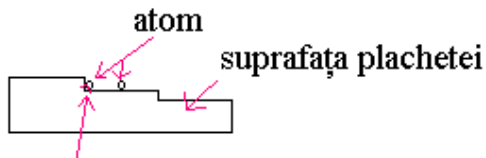
Cantitatea de substanță introdusă în reactor depinde de temperatură.



temperatura e mai mare (pe pedestral) = deasupra plachetelor.

În interiorul reactorului cele două substanțe reacționează (SiCl_4 , H_2) și formează atomi de Si în stare gazoasă.

Repartiția straturilor din plachetă:

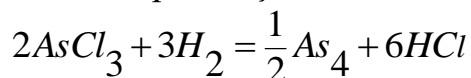


atomul de Si ajunge pe suprafața plachetei unde se integrează în structura cristalină – creștere tangențială

2 legături cu materialul și poate rămâne aici după ce s-a plimbat pe suprafața plachetei

AsCl_3 este utilizat pt. doparea peliculei epitaxiale. În loc de AsCl_3 se mai poate utiliza PCl_3 , BBr_3 .

Deci AsCl_3 se utilizează pt. a introduce atomi de As în interiorul peliculei epitaxiale în timpul creșterii.



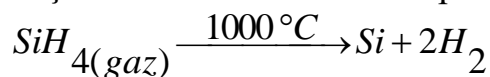
Doparea aceasta cu AsCl_3 are cele mai înalte priorități, deoarece atomii de As în faza gazoasă își ocupă locul cel mai bun în rețeaua cristalină fără să deranjeze alți atomi. În același timp asigură și o dopare cu cele mai puține defecte.

Pt. adopa cu P utilizăm PCl_3 , iar pt. a dopa cu B utilizăm BBr_3 .

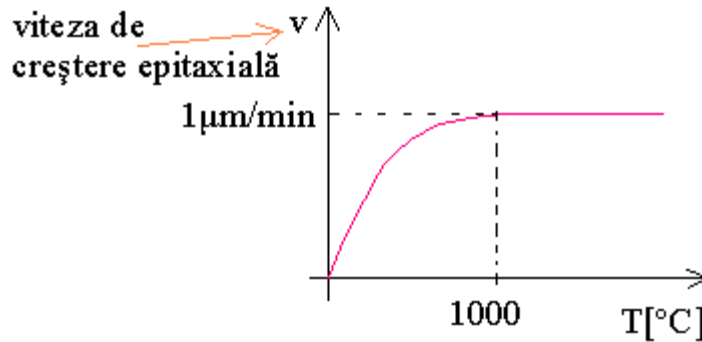
Știind viteza de creștere a peliculei de Si (la $T=1200^\circ\text{C}$ viteza de creștere este: $v=1\mu\text{m}/\text{min}$), calculăm timpul cât trebuie ținute deschise robinetele, apoi închidem robinetele 2, 3, 5, 6.

7. apoi răcim reactorul, închidem robinetele cu H_2 și deschidem robinetul 4 pt. a dezlocui H_2 cu N_2 . Se închide robinetul 4, se deschide reactorul și se scot plachetele cu peliculă epitaxială crescută.

Altă metodă de creștere epitaxială: în loc de SiCl_4 se utilizează SiH_4 (este foarte exploziv și din această cauză nu se prea utilizează).



La 1000°C toată această substanță se descompune. Coeficientul de difuzie dintr-o peliculă este mai mic față de cealaltă metodă (pt. că este mai mică).

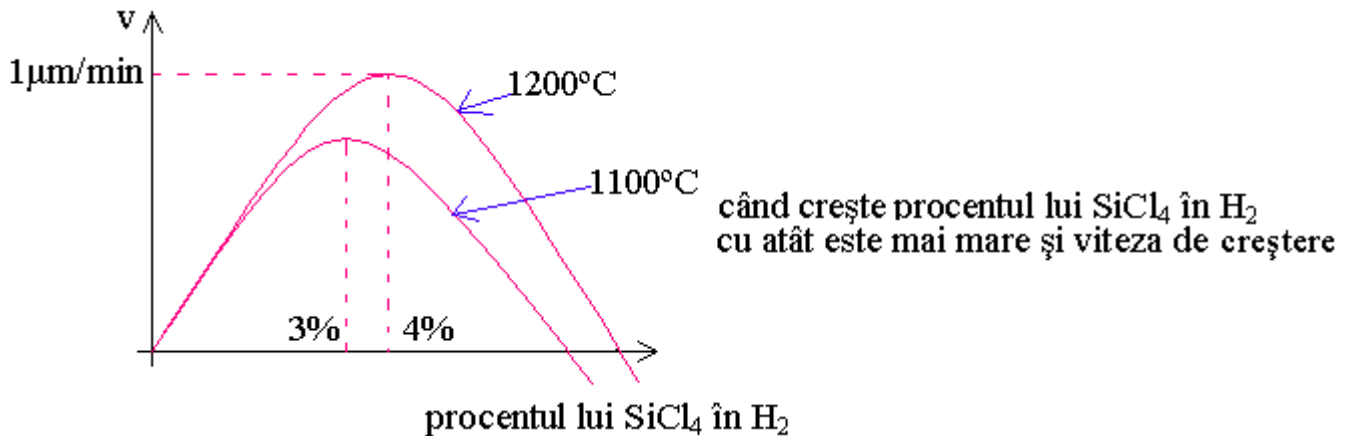


c) *Influența diferitor factori la procesul de creștere a peliculei de Si cu utilizarea substanței SiCl_4*

- 1) influența cantității de SiCl_4 ;
- 2) influența temperaturii;
- 3) orientarea plachetei;
- 4) influența câmpurilor electrice;
- 5) influența razelor ultraviolete.

1) Influența cantității de SiCl_4 în interiorul reactorului

Pt. reacția $\text{SiCl}_4 + \text{H}_2$ avem graficul:

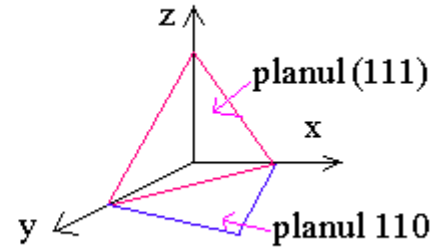
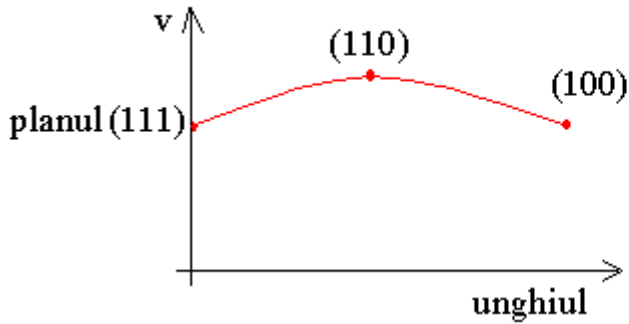


Viteza de creștere ajunge la maxim, apoi ajunge la zero, apoi poate ajunge negativă (înseamnă că începe să se corodeze, să se distrugă).

HCl poate să distrugă suprafața plachetei, și astfel se explică viteza de creștere negativă.

3) Orientația plachetei

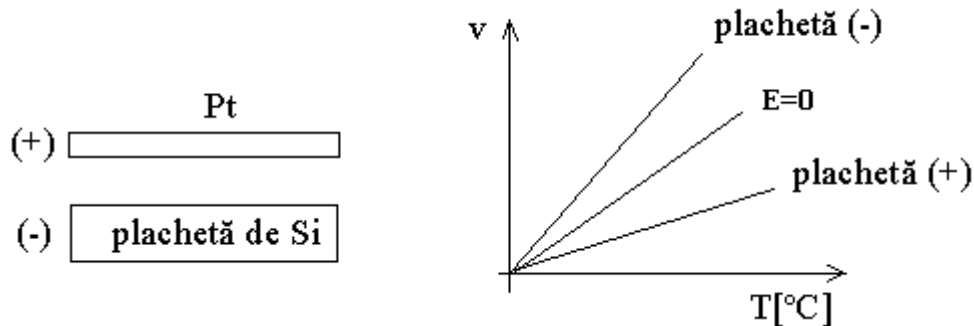
Dependența vitezei de creștere față de diferite planuri de orientare a plachetei:



Pe planul 110 viteza va fi mai mare decât pe alte planuri.

4) Influența câmpurilor electrice

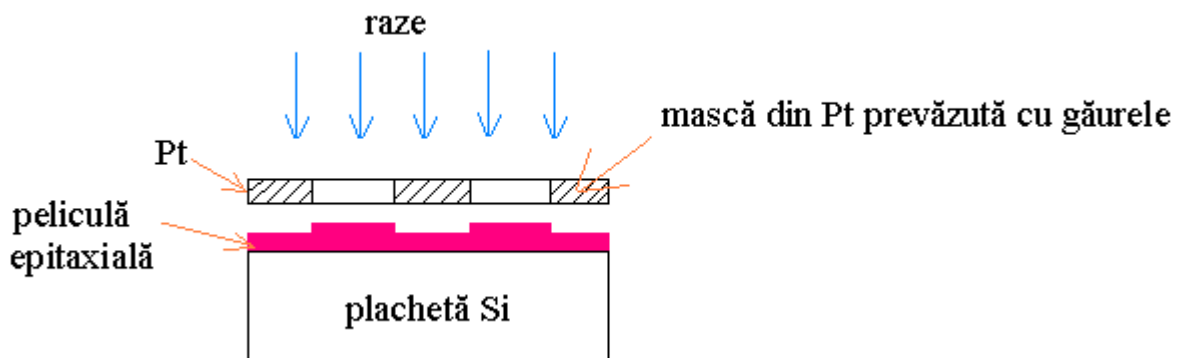
Platina, de exemplu, nu reacționează cu substanțe din reactor. La plachetă este potențial negativ pt. că la platină am pus potențial pozitiv:



În aceleași condiții de creștere dacă la Pt avem potențial negativ iar la plachetă pozitiv, viteza de creștere este mult mai mică, pe când în cazul desenat avem o viteză de creștere mult mai mare pt. potențial negativ aplicat la plachetă.

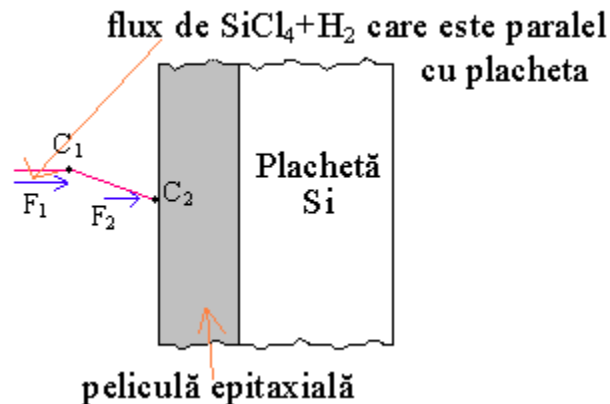
5) Influența iradierii cu raze ultraviolete

Razele ultraviolete cresc viteza reacției.



Unde este iradiată placheta, viteza de creștere este de trei ori mai mare decât unde nu este iradiată.

Cinetica creșterii epitaxiale a peliculelor din Si



Fie o plachetă de Si și paralel cu aceasta curge un flux de $\text{SiCl}_4 + \text{H}_2$. La o oarecare distanță de suprafața plachetei fluxul are concentrația C_1 și mai departe nu se schimbă (C_1 se numește concentrația lui SiCl_4 în H_2 la o depărtare destul de mare de suprafața plachetei unde această concentrație este mai departe constantă (în partea stângă)).

Dacă în apropierea plachetei fluxul crește \Rightarrow concentrația de SiCl_4 scade $\Rightarrow C_2$ – concentrația de SiCl_4 în H_2 pe suprafața plachetei.

Dacă avem o diferență de transport \Rightarrow că avem un transport de masă.

$$F_1 = h(C_1 - C_2)$$

$$F_2 = K \cdot C_2 \quad h - \text{constanta vitezei transportului de masă; } K - \text{ct. vitezei reacției}$$

chimice.

Molecula de SiCl_4 de la suprafața plachetei intră în reacție chimică și formează fluxul F_2 .

La un moment dat aceste fluxuri sunt egale între ele.

$$F_1 = F_2 = F \Rightarrow h(C_1 - C_2) = K \cdot C_2 \Rightarrow h \cdot C_1 = C_2(K + h) \Rightarrow C_2 = \frac{h}{K + h} C_1$$

C_1 se exprimă ca concentrația totală a lui SiCl_4 :

$$C_1 = C_{tot} \cdot y \quad - C_{tot} - \text{concentrația maximă a lui } \text{SiCl}_4 \text{ care este în reactor;}$$

- y – partea molară care intră în reactor.

$$\Rightarrow F = \frac{K \cdot h}{K + h} (C_{tot} \cdot y); \quad \text{viteza de creștere} - v = \frac{F}{N_0}, \quad \text{unde } F - \text{fluxul, } N_0 -$$

concentrația atomilor într-un cm^3 de Si.

$$\Rightarrow v = \frac{K \cdot h}{K + h} \frac{C_{tot}}{N_0} y \quad - \text{unde variabil este doar } y, \text{ restul sunt constante.}$$

Deci, viteza de creștere este direct proporțională cu concentrația molară.

Teoretic – viteza este liniară cu concentrația de SiCl_4 .

Această teorie corespunde practicii, dar numai pt. concentrații mici, deoarece în teorie nu sunt introduse toate condițiile. Aici nu s-a calculat, nu s-a luat în vedere fluxul de HCl care este îndreptat de la suprafața plachetei în interiorul reactorului.

Practic – viteza poate să scadă, la concentrații mari, chiar să devină negativă.

Creșterea straturilor epitaxiale a compușilor A^{III}B^V din faza gazoasă

Compușii A^{III}B^V sunt niște semiconductori (din tabelul lui Mendeleev).

Cel mai utilizat compus este GaAs (InP, GaP, AlP).

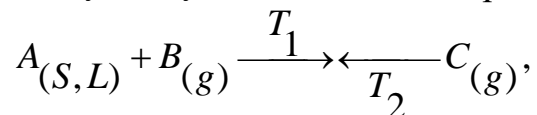
Această metodă stă la baza tehnologiei laserelor, CI optoelectronice.

Folosind aceste materiale semiconductoare putem mări frecvența de lucru a dispozitivelor.

Creșterea epitaxială a compușilor A^{III}B^V are loc din faza gazoasă, cu utilizarea reacțiilor de transport, și din faza lichidă.

Metoda creșterii epitaxiale ale compușilor A^{III}B^V din faza gazoasă cu utilizarea reacțiilor de transport

Esența reacției chimice de transport a fost formulată de Șefer:



A – substanță care trebuie transportată (solidă sau lichidă) pt. a crește pelicula epitaxială;

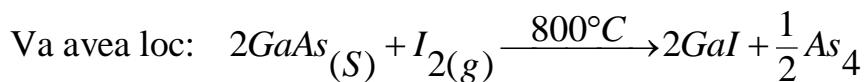
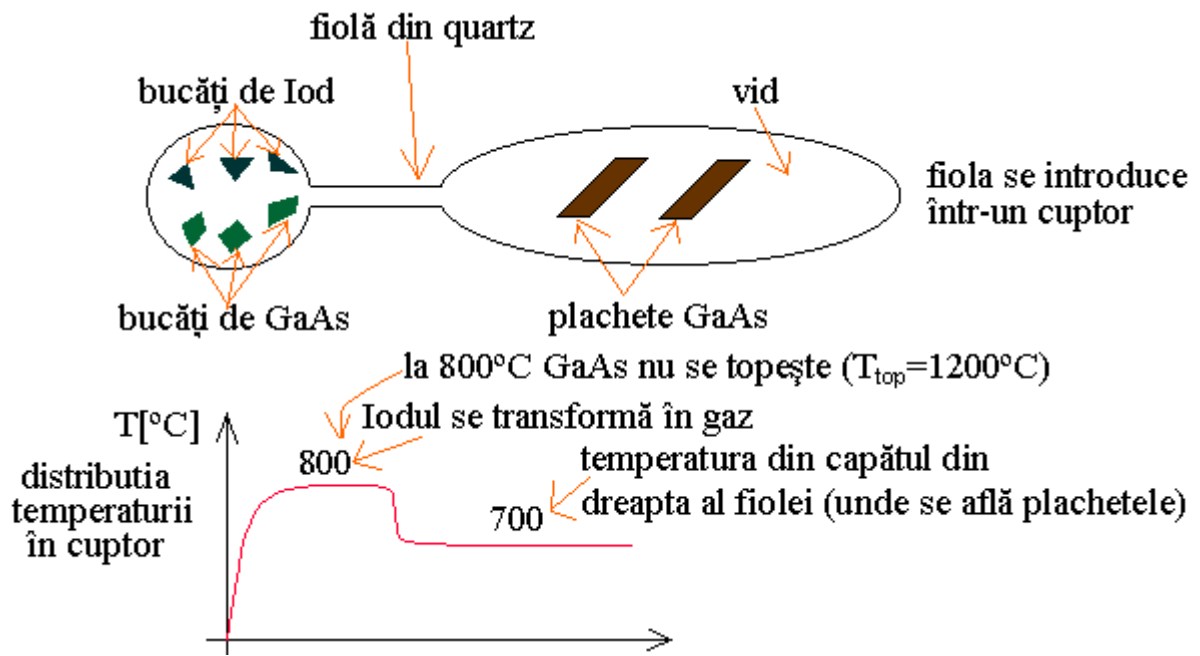
B – este un gaz care se numește transportor;

C – este un gaz care reprezintă produsul reacției chimice dintre substanța A și B.

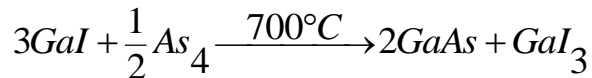
Această reacție este reversibilă.

Această creștere epitaxială are loc în două metode: a) metoda închisă
b) metoda deschisă.

a) **Metoda închisă** (nu prea se utilizează)



Dacă acest gaz ($C = 2GaI + 1/2As_4$) se formează în partea stângă a fiolei, trece mai departe și umple tot volumul fiolei. Dar trecerea se face la o temperatură mai joasă ($700^{\circ}C$) și \Rightarrow



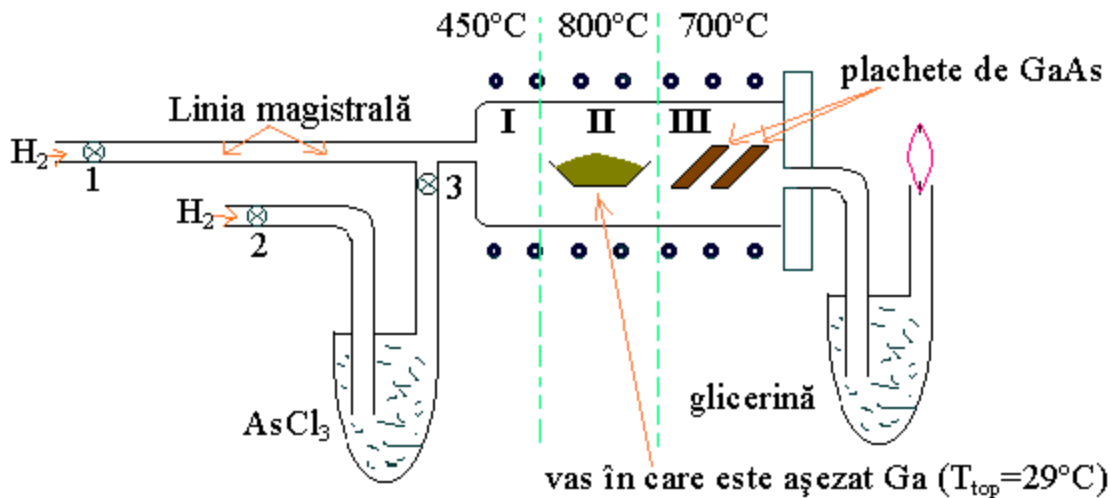
- la $800^{\circ}C$ valența I este 1 iar la $700^{\circ}C$ este 3; GaAs se depune pe plachete; GaI_3 rămâne în faza gazoasă.

Această reacție de transport se termină când substanța este transportată în altă parte. Putem stopa reacția micșorând temperatura.

Pt. a scoate plachetele însă trebuie să tăiem fiola și din această cauză această metodă poate fi utilizată doar în laborator. Metoda nu oferă productivitate.

b) *Metoda deschisă*

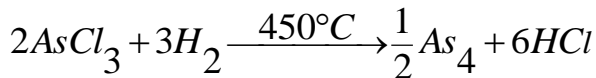
Studiem cum se cresc pelicule epitaxiale de GaAs pe plachete de GaAs:



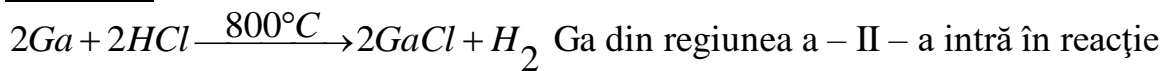
Pe linia magistrală se dă drumul la H_2 și în continuare noi vom încălzi reactorul până la temperaturile: $450^\circ C$, $800^\circ C$, $700^\circ C$.

Robinetele 1, 2, 3 deschise, $AsCl_3$ ajunge în regiunea I împreună cu H_2 , acesta din urmă restabilind suprafața plachetei de oxizi.

La $450^\circ C$ în regiunea I are loc reacția:

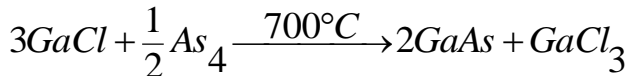


La $800^\circ C$ are loc:

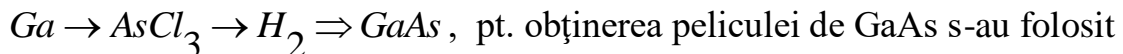


chimică cu vaporii din gazul de la prima reacție ($\frac{1}{2}As_4 + 6HCl$).

La $700^\circ C$ toate gazele din primele două regiuni merg în a – III – a :

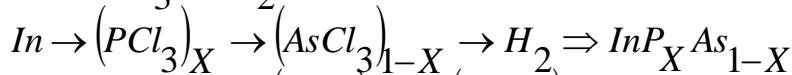
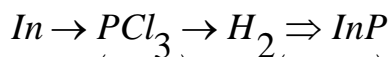
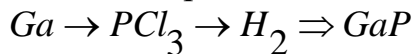


Această metodă este folosită în sistemul: **universalitatea pistonului**, care se prezintă astfel:

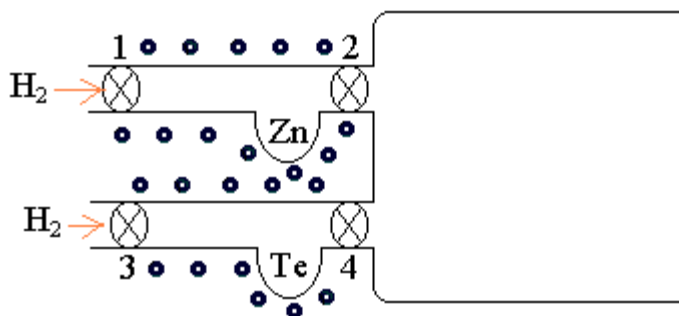


substanțele: Ga, $AsCl_3$ și H_2 .

Pt. a obține peliculă de GaP (cu aceeași instalație):



Cum facem doparea?



Acest sistem este universal.

Zn și Te sunt substanțe care se vaporizează direct din starea solidă (prin sublimare).

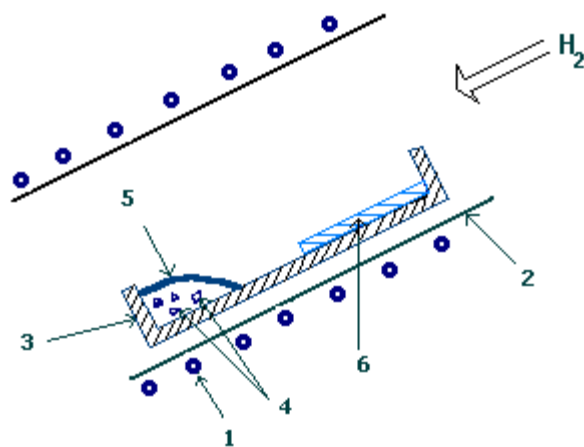
Vrem să dopăm pelicula de GaAs cu Zn (grupa a – II – a) \Rightarrow se va crește peliculă dopată de tip p (robinetele 1 și 2 deschise).

Pt. a dopa pelicula cu Te (grupa - VI – a) deschidem robinetele 3 și 4 și se va forma o peliculă dopată de tip n .

Metoda creșterii epitaxiale ale compușilor $A^{III}B^V$ din faza lichidă

Această metodă a fost propusă pentru prima dată de savantul american Nelson în 1963. Această metodă este cea mai ieftină, nu folosește substanțe otrăvitoare și dă posibilitatea de a crește stratul sau pelicula cu o rețea cristalină desăvârșită, iar peliculele pot fi dopate în timpul creșterii destul de ușor.

Ce a propus Nelson:



1 – încălzitor; 2 – reactor din quartz; 3 – casetă din grafit; 4 – GaAs; 5 – Ga; 6 – plachță GaAs.

În partea stângă este pus Ga care îndeplinește funcția de solvent și niște bucățele din GaAs care reprezintă substanța care se dizolvă. În partea dreaptă este așezată placheta pe care vor crește peliculele epitaxiale.

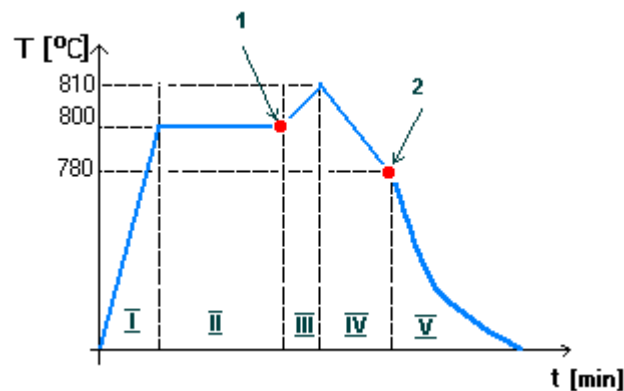
$$T_{top}Ga = 29^{\circ}C$$

$$T_{top}GaAs = 1242^{\circ}C$$

Pentru ca Ga topit să nu stea pe plachetă, stă înclinat într-un singur loc.

Nelson:

H₂ se introduce în sistem și se încălzește reactorul după următorul grafic:



1 – punct de umezire a plachetei cu soluție (topitură); 2 – punerea reactorului în poziția inițială.

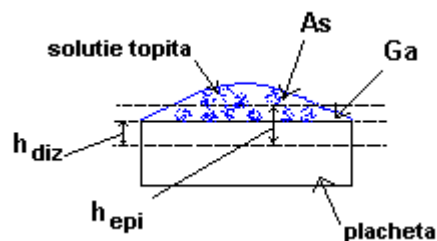
Până la 800 °C GaAs nu este topit, însă Ga era topit deja. GaAs în contact cu Ga se începe a se dizolva în Ga.

Deci când încălzim la 800 °C rezultă prima regiune numită:

I – regiune de ieșire a sistemului la temperatura necesară de lucru;

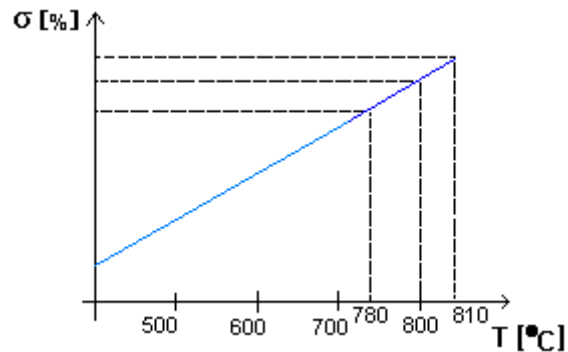
II – regiune de omogenizare ; datorită difuziei, As topit în Ga se va răspândi uniform;

În punctul de umezire reactorul s-a înclinat în partea dreaptă(orizontal) ca urmare substanța topită din partea stângă a ajuns pe plachetă.



- stratul h_{epi} se înlătură la temperatura de 810 °C și ca urmare se netezește suprafața plachetei.

Dacă în acest moment (soluția fiind în stare de saturație la $t^{\circ} = 800^{\circ}\text{C}$) ridicăm temperatura la 810°C , se mărește solubilitatea (solubilitatea depinde de temperatură).



$$\sigma = \frac{mAs}{mGa + mAs} ; \sigma - \text{solubilitatea.}$$

Cu cât este mai mare temperatura cu atât este mai mare solubilitatea As în Ga.

Dacă în punctul de umezire soluția era în stare de saturație, la creșterea temperaturii sistemul iese din starea de saturație și ea ne dizolvă o oarecare grosime din plachetă.

$$h_{diz} = K \frac{mGa}{S_{plach}} \{ \sigma (810^{\circ}\text{C}) - \sigma (800^{\circ}\text{C}) \} ; \quad K - \text{constantă,}$$

S_{plach} – suprafața plachetei

III – regiune cu ridicarea temperaturii în scopul înlăturării stratului defectat de pe suprafața plachetei prin dizolvarea acestui strat.

După 810°C sistemul începe să se răcească, sistemul trece în starea de suprasaturație la răcire și trece în faza de cristalizare. Răcind sistemul o parte din atomii de As nu sunt utili, trebuie să avem o masă mai mică de As. Atomii care sunt în apropierea plachetei se vor așeza pe plachetă (lângă un atom de As se așează un atom de Ga – astfel se formează pelicula).

IV – regiunea de creștere a peliculei epitaxiale prin răcirea sistemului ; în punctul 2 s-a pus reactorul din nou în poziția inițială și soluția topită s-a scurs de pe suprafața peliculei crescute și procesul de creștere s-a încheiat.

V – răcirea reactorului deconectat de la energia electrică.

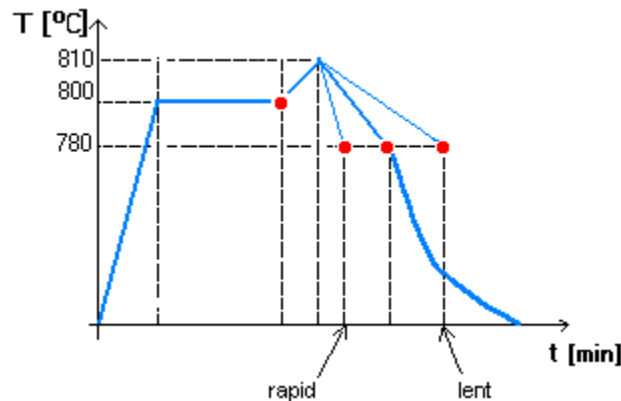
Grosimea peliculei epitaxiale este aproximativ egală cu cu aceleași valori ca la

h_{diz} :

$$h_{\text{epi}} = K \frac{mGa}{Splach} \{ \sigma (810 \text{ }^{\circ}\text{C}) - \sigma (780 \text{ }^{\circ}\text{C}) \}$$

Putem dinainte calcula grosimea stratului crescut în μm . Cu cât este mai mare intervalul de răcire cu atât va fi mai mare grosimea stratului crescut (de exemplu 50nm la lasere).

Noi putem răci sistemul într-un interval mai mic sau mai mare de temperatură.



Este de preferat răcirea mai lentă. Dacă se răcește rapid GaAs se cristalizează nu pe plachetă ci mai departe de aceasta și nu se mai lipește de plachetă.

Cerințe față de solvenții care se folosesc la creșterea epitaxială

- solvenții trebuie să aibă o temperatură mică de topire pentru a fi ușor înlăturați de pe suprafața peliculei crescute.
- solventul trebuie să aibă o presiune mică a vaporilor saturați pentru ca să nu se piardă în timpul creșterii epitaxiale.
- în sistemul solvent – substanță dizolvată, trebuie să fie stabilă numai componenta $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ la temperatura de creștere.

Doparea peliculelor epitaxiale în timpul creșterii

Se utilizează elemente chimice și nu substanțe otrăvitoare cum este în faza gazoasă. Pentru GaAs noi vrem să avem pelicule de tip n și de tip p.

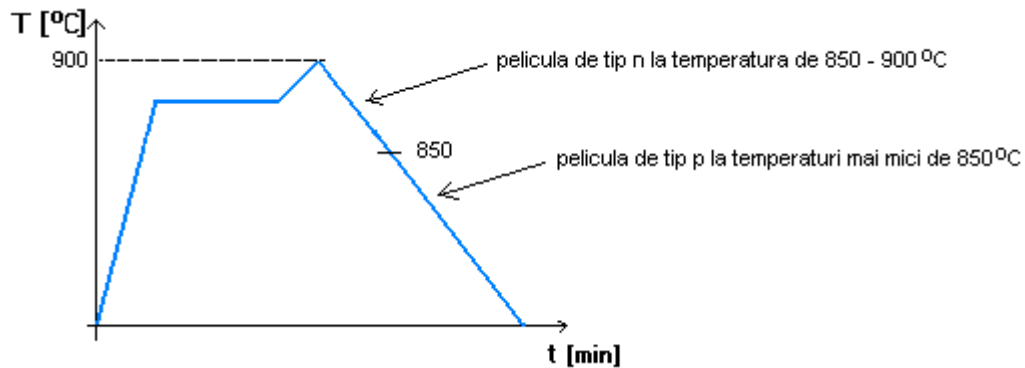
| | | | | | |
|----|----|----|----|---|----|
| | n | p | | | |
| VI | { | S | Cd | } | II |
| | | Se | Zn | | |
| | | Te | Be | | |
| IV | Sn | Ge | IV | | |
| IV | Si | | | | |

Dacă dopăm cu substanțele: Cd, Zn, Be, Ge se obțin conducții de tip p. Astfel, Cd având $2e^-$ ocupă locul Ga care are $3e^-$ și când dopăm cu Cd rezultă un gol și ca urmare avem conducție de tip p.

Dacă dopăm cu substanțele: S, Se, Te, Sn se obțin conducții de tip n. De exemplu, S având $6e^-$ ocupă locul As care are $5e^-$ și în urma dopării cu S rămâne un e^- în aer și ca urmare avem conducție de tip n.

Si ne poate da conducție atât de tip p cât și de tip n. Această proprietate a Si se numește proprietate amfoterică (această proprietate s-a observat numai în peliculele de GaAs).

Dacă facem o creștere epitaxială ca în figura de mai jos, vom avea:



lungimea de undă a ledurilor: $\lambda = \frac{1.24}{E_g(GaAs)} = \frac{1.24}{1.45} \cong 0.87 \mu\text{m} = \text{lumina infraroșie}$

a ledurilor construite cu GaAs

LED - urile cu GaAs dopate cu Si se utilizează la schimbarea canalelor TV.

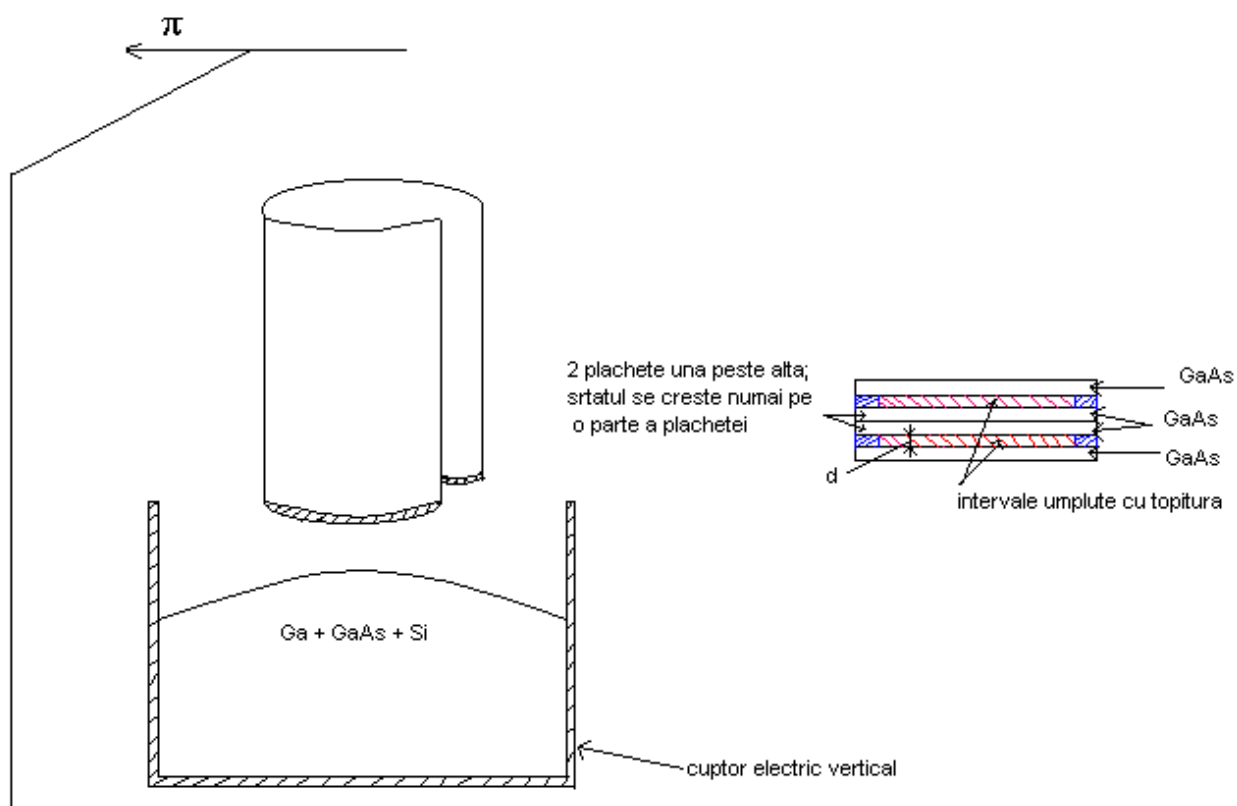
Aceste LED - uri (roșii) au randament foarte mare: 40%.

Creșterea stratului epitaxial din faza lichidă limitată

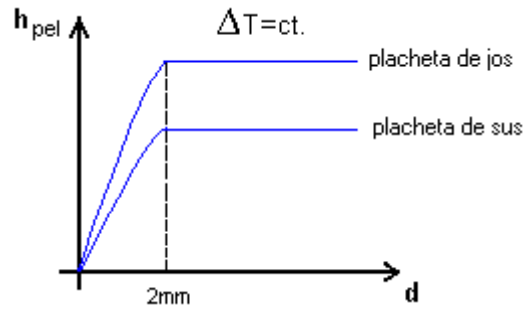
Pentru creștere se utilizează un cilindru de grafit tăiat pe lateral, în interiorul căruia se vor așeza plachetele de GaAs.

Între plachete este pusă o membrană din grafit.

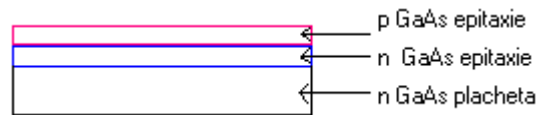
Temperatura în cuptor este în același mod schimbată ca la Nelson. În momentul în care s-a ajuns în punctul de umezire cilindrul s-a introdus în soluția topită. Prin deschizătura cilindrilor datorită forțelor artificiale soluția topită va intra între plachete și va umple intervalele. Apoi se scoate cilindrul și se ridică temperatura. Stratul cu defecte se dizolvă și apoi în timpul răcirii va avea loc creșterea epitaxială pe toate plachetele. Pentru a avea un strat de creștere cât vrem noi se utilizează fie o centrifugă pentru a scoate soluția, fie introducem un gaz pentru a stopa creșterea.



În figura următoare avem dependența grosimii peliculei crescute în funcție de grosimea fazei lichide și dacă vom răci unul și același interval de temperatură se schimbă doar grosimea fazei lichide. Porțiunea fazei lichide este foarte subțire și în ea sunt puțini atomi, ca urmare grosimea peliculei este mică. Răcind în același interval de temperatură ΔT și măbind grosimea fazei lichide în continuare, la un moment dat grosimea peliculei nu mai crește rămâne constantă.

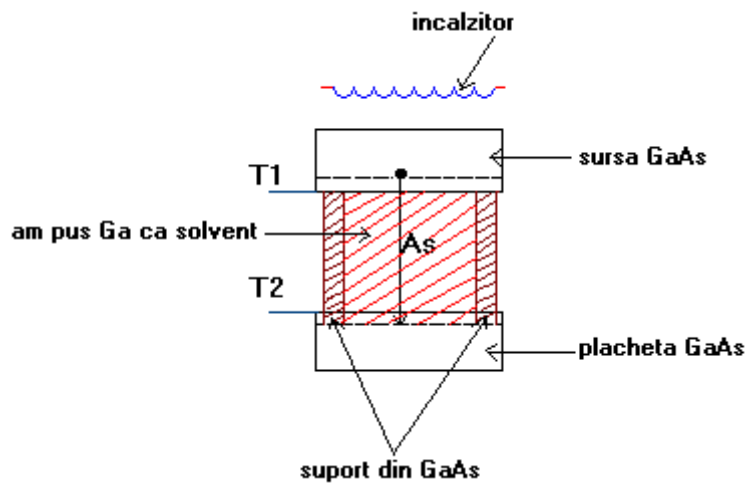


Pe placheta de sus grosimea peliculei crescute este mai mică pentru că la placheta de jos asupra atomilor de As acționează forța gravitațională și ca urmare aceasta va fi mai mare.



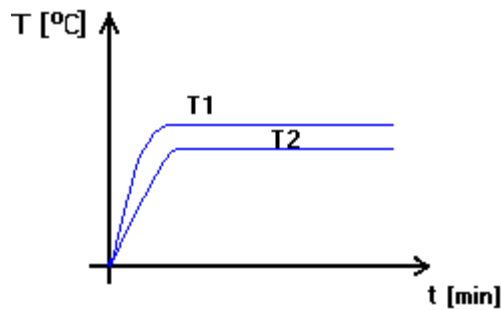
Metoda solventului mișcător

Est tot o creștere epitaxială din faza lichidă în gradient de temperatură.



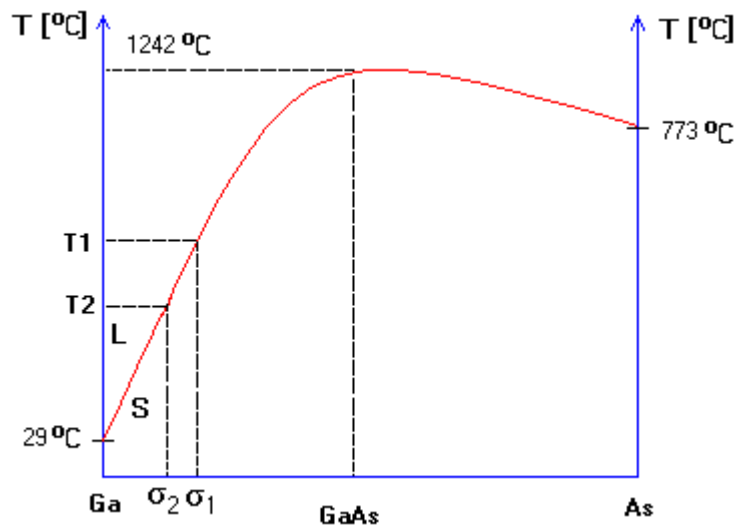
Placheta este monocristalină; sursa este tot o plachetă poate fi și policristalină.

Se introduce totul într-un sistem vidat și încălzim sursa. Depărtarea dintre plachete este de 1mm – 2mm.



T2 este mai jos deoarece cu cât placheta este mai departe de încălzitor cu atât temperatura este mai mica ($T1 > T2$).

Diagrama de fază a GaAs:



σ_1 - procentul de As care se dizolvă la T1

σ_2 - procentul de As care se dizolvă la T2

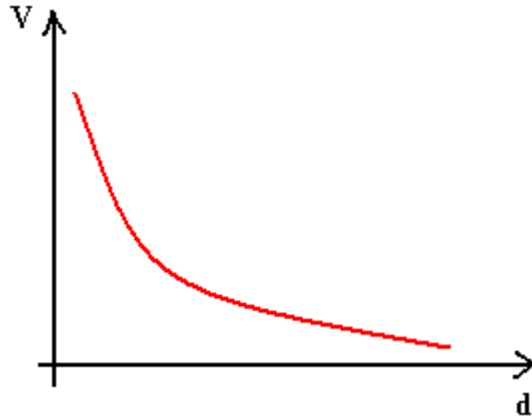
$\sigma_2 < \sigma_1$

Temperatura dintre Ga și GaAs este T1, mai jos este T2 și în timpul încălzirii cantitatea de soluție dizolvată la T1 este mai mare decât la T2.

Când încălzim se dizolvă o parte din sursă și o parte din plachetă, ideal pentru a elimina imperfecțiunile.

Deoarece concentrația As de sus va fi mai mare decât concentrația As de jos se va ivi un flux de As de sus în jos (atomii de As trec de sus în jos) și unde era stare de saturație (jos) se realizează suprasaturație și se începe cristalizarea. Atomii de As plecând de sus nu mai este îndeplinită condiția de saturație și atunci se continuă dizolvarea sursei ș.a.m.d. De aceea se numește metoda solventului mișcător.

În următorul grafic avem reprezentată viteza de creștere a peliculei (viteza de mișcare a regiunii topite) în funcție de grosimea soluției de Ga dintre plăci.



Cu cât este mai mică această distanță cu atât atomii de As ajung mai rapid pe frontiera de jos și cu atât viteza de creștere este mai mare.

Particularitățile creșterii din faza lichidă a compuşilor ternari $Al_xGa_{1-x}As$

Acest compus a stat la baza formării heterojoncțiunilor laserelor.

$a =$ constanta rețelei GaAs = 5.656Å
constantă rețelei AlAs = 5.655Å

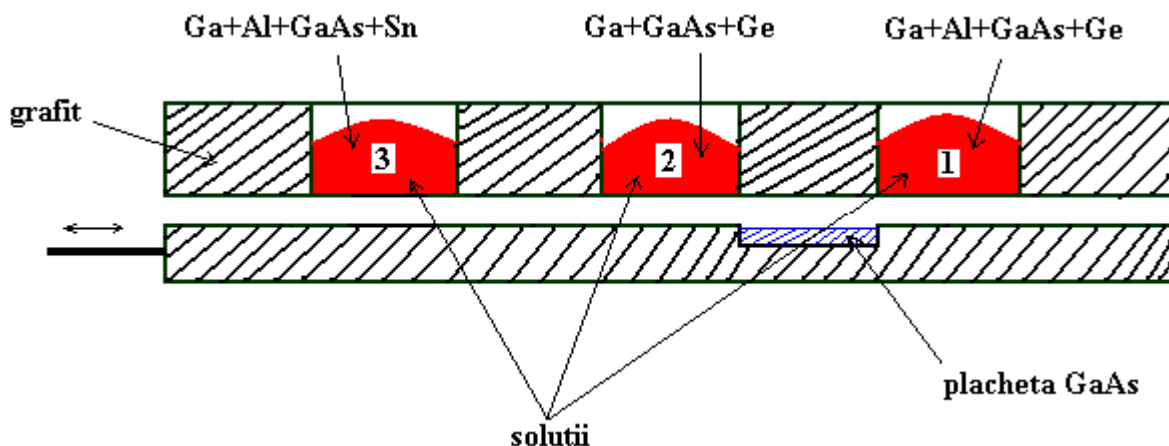
AlAs este un material semiconductor care nu a fost folosit pentru că intră foarte repede în reacție chimică cu vaporii de apă din atmosferă și se transformă în praf.

Pe când structura $Al_xGa_{1-x}As$ este stabilă în atmosferă și poate fi utilizat.

Banda interzisă a acestui material este: $E_g = 1.45 - 2.24eV$.

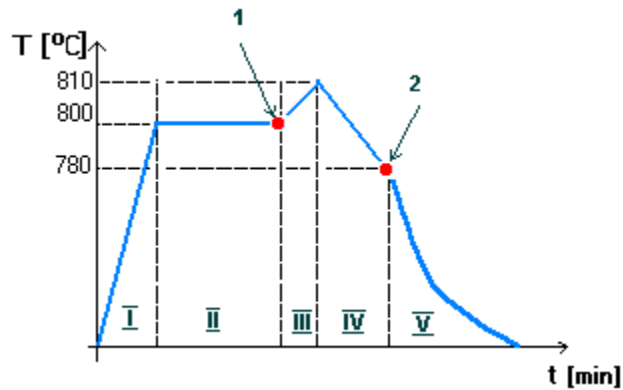
Au fost elaborate două tipuri de casete care permit creșterea peliculelor epitaxiale a plachetelor.

I – Casetă de tip penal



- în soluția 3 avem Sn care este impuritate de tip n

- în soluțiile 2 și 1 avem Ge care este impuritate de tip p
Tot sistemul este introdus într-un reactor de quartz și încălzim ca la Nelson:

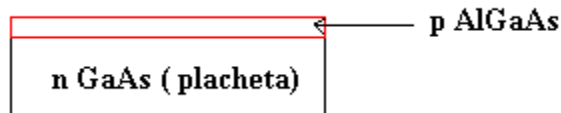


1 – punct de umezire a plachetei cu soluție (topitură); 2 – punerea reactorului în poziția inițială.

Împingem placheta astfel încât să nierească sub prima soluție pentru a se realiza depunerea peliculei cu Al_2O_3 .

Grafitul este străveziu pentru H_2 , adică toată suprafața este acoperită cu un strat de oxid.

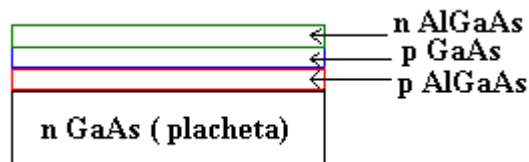
Placheta împinsă înspre dreapta, muchia ei rupe pelicula de Al_3O_3 și placheta se umezește pe toată suprafața. După ce s-a umezit placheta (în punctul 1) s-a ridicat temperatura pentru a înlătura stratul de solvent de pe plachetă.



Când am ajuns în punctul 2 am tras placheta de sub topitura 1 și am dus-o sub topitura 2 după ce am terminat creșterea peliculei cu topitura 1.

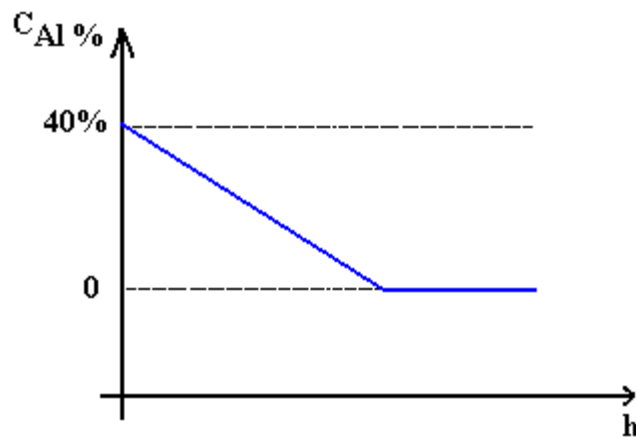
Scădem în continuare temperatura și creem din nou o altă peliculă ș.a.m.d.

În final avem trei pelicule pe care le-am crescut pe o singură plachetă.



Când creștem pelicula de AlGaAs punem în faza lichidă 1% Al iar în faza solidă (cristalizată) vom primi 40% Al ; însă 40% nu este constant pe suprafața peliculei.

În graficul următor avem reprezentată schimbarea concentrației Al în %.



În această metodă soluțiile sunt nu sunt amestecate (avantaj) .

La început atomii de Al sunt mult mai active decât atomii de Ga și formează primii stratul epitaxial.

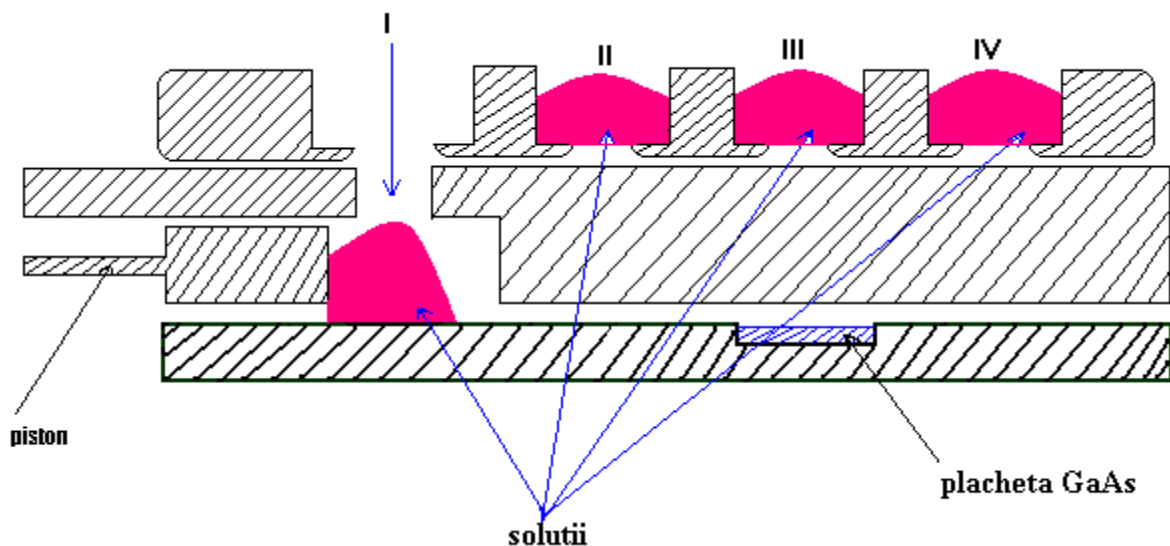
La un moment dat concentrația Al este 0, după ce a avut 40%, și se cristalizează GaAs curat fără Al.

Dacă se schimbă concentrația Al se schimbă și lățimea benzii interzise în acest material.

Coeficientul de segregare a Al , $K_{Al} = \frac{C_{Al}(S)}{C_{Al}(L)}$, se poate schimba în intervalul de temperatură 200°C – 400°C și este mai mare la temperaturi mai joase.

Neajunsuri : s-a crescut peliculă cu soluția 1 și după aceea dorim să creștem o altă peliculă cu soluția 2, dar în timpul tragerii din dreptul soluției 1 în dreptul soluției 2 stratul care conține Al se poate oxida , apar defecte între straturi.

II – Casetă de tip seringă



Pistonul este împins și soluția topită intră deasupra plachetei, strecurată de pelicula de Al_2O_3 și apoi umezită. Când răcim crește pelicula de soluția I . Soluția numărul II

curge prin orificiu, o împingem cu pistonul; prima soluție se va dizolva și va fi înlocuită de a doua soluție.

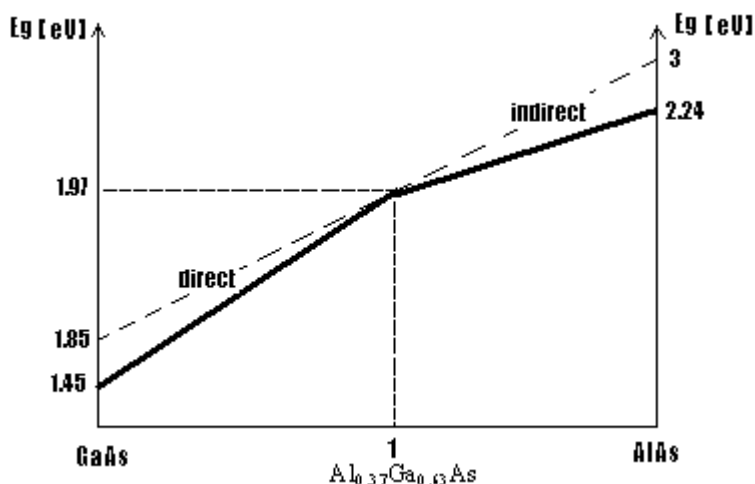
Soluțiile s-au amestecat toate și nu mai pot fi folosite (dezavantaj).

Cum se pot confecționa lasere, leduri, fotoreceptoare

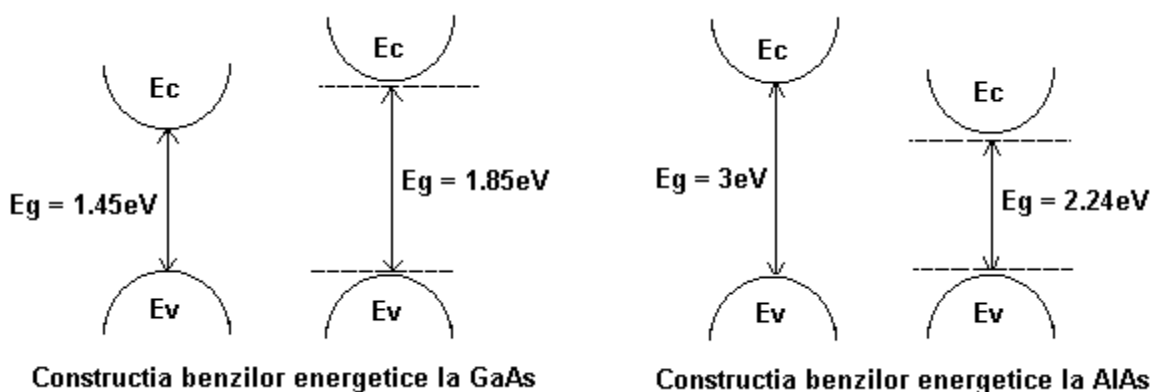
Diagrame energetice a heterojuncțiunilor și mecanismul de trecere a curentului

Heterojuncțiunile dintre $Al_xGa_{1-x}As$ – GaAs sunt aproape ideale.

În figura următoare avem reprezentată schimbarea benzii interzise în acest material:



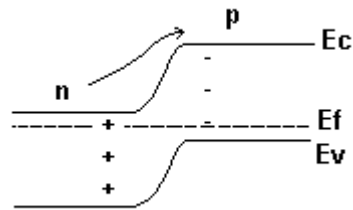
Construcția benzilor energetice sunt reprezentate în figurile următoare:



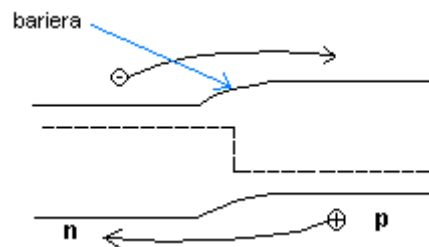
Până în punctul 1 se păstrează benzii interzise directe. După punctul 1 structura este ca la AlAs, adică cu bandă interzisă indirectă

Punctul 1 a fost determinat experimental.

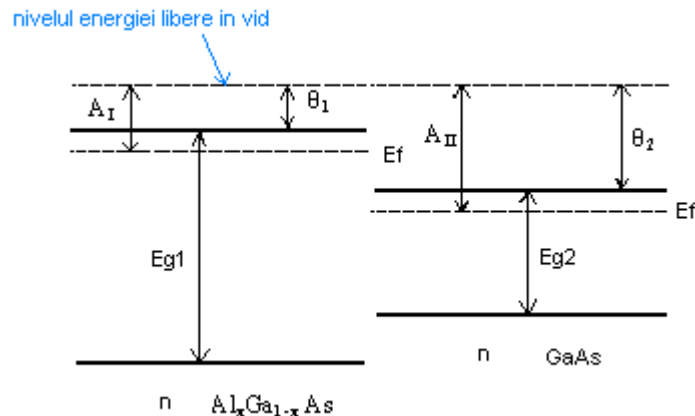
La joncțiunea pn, în interiorul ei se formează un câmp interior, iar liniile câmpului sunt de la + la - .



Pentru ca joncțiunea să fie polarizată direct aplicăm “+” la p și “-” la n. Potențialul fiind aplicat în sens contrar câmpului interior rezultă că se modifică bariera (benzile).



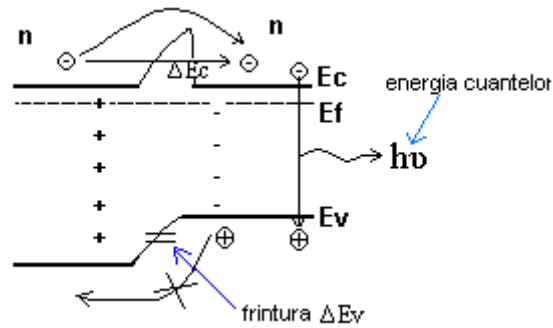
Aceste heterojoncțiuni au fost analizate pentru prima dată de Anderson. Luăm de exemplu o heterojoncțiune de tip nn:



θ – afinitatea electronică

Aceste două benzi de material le apropiem până ajung în contact. La două materiale în contact nivelul Fermi trebuie să fie același.

Dacă $A_{II} > A_I$ electronii ies mai ușor din materialul cu bandă interzisă mai mare și se duc în celălalt material.



Pentru că aceste materiale au benzile interzise diferite, sus va apare o frântură ΔE_c în banda de conducție.

$$\Delta E_c = \theta_2 - \theta_1 = \Delta \theta$$

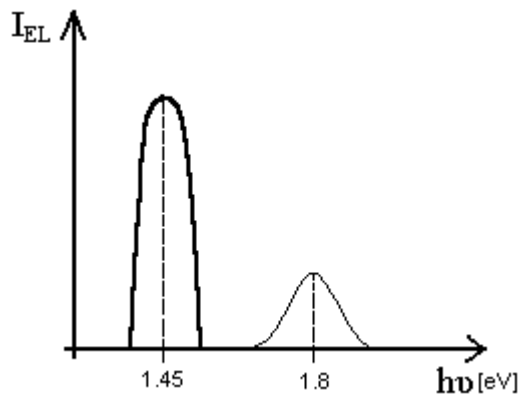
$$\Delta E_v = E_{g1} - E_{g2} - \Delta \theta$$

Polarizăm direct heterojoncțiunea. Nivelul Fermi fiind aproape de banda de conducție concentrația electronilor în ambele materiale este aceeași.

Electronii din partea stângă (sus) vor trece în partea dreaptă sărind peste barieră sau tunelând această barieră, însă golurile din dreapta (jos) nu pot trece peste barieră deoarece este prea înaltă.

Curentul trece din materialul cu bandă interzisă mai mare în materialul cu bandă interzisă mai mică – mecanismul de trecere a curentului.

Electronul din partea dreaptă (sus) se recombina cu golul din banda de valență și de aici rezultă cuantul de lumină cu energia egală cu $h\nu$.

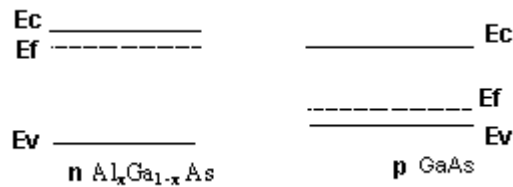


I_{EL} = intensitatea electroluminiscenței (intensitatea fotonilor care se emană din acest material)

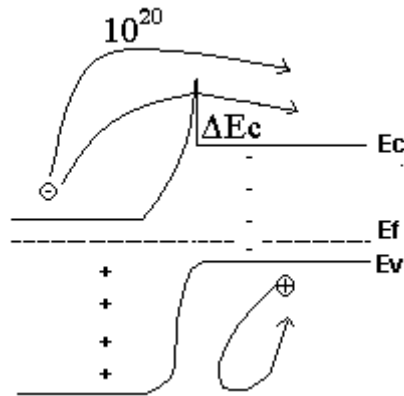
Cea mai mare intensitate a electronilor este în jurul punctului 1.45, dacă este în jurul punctului 1.8 rezultă că s-au injectat niște goluri cu energie mai mare care vor putea să treacă bariera.

Recombinarea are loc în materialul cu bandă interzisă mică.

Alt exemplu care se utilizează la lasere:



Se observă că avem o heterojuncțiune np. Cele două materiale le apropiem până ajung în contact.



Polarizăm direct, electronii din materialul n (purtători de sarcină majoritară în materialul n) au tendința să se îndrepte înspre potențialul “+” , unii sărind bariera, alții trecând prin ea. Golurile (purtători de sarcină majoritară în materialul p) nu pot însă sări bariera deoarece este prea înaltă și se duc înapoi.

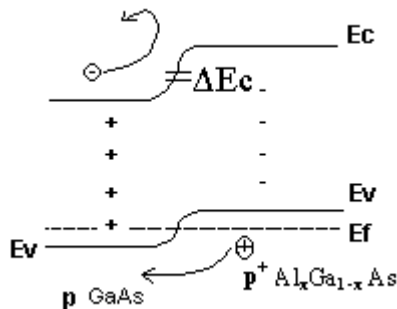
Efectul de suprainjecție

Pentru ca joncțiunea să poată injecta trebuie să aibă contacte.

Concentrația purtătorilor de sarcină injectați este mai mare decât concentrația purtătorilor de sarcină în materialul dat și prin urmare pot trece 10^{20} electroni = efect de suprainjecție.

Concentrația golurilor în partea dreaptă poate fi destul de mare, dar nu pot trece înspre stânga. Această heterojuncțiune poate fi folosită ca joncțiune BE în TB.

Altă heterojuncțiune utilizată la lasere:



Nivelul Fermi se află mai jos decât banda de valență deoarece semicon-ductorul este de tip p⁺ (are concentrație foarte mare a purtătorilor majoritari).

Polarizăm direct; concentrația golurilor în partea dreaptă este mai mare ca în partea stângă și golurile pot trece liber, însă electronii nu pot trece bariera pentru că este prea înaltă.

Și în heterojuncțiunea de tip pp⁺ injecția are loc din semiconductorul cu bandă interzisă mare către semiconductorul cu bandă interzisă mică. Această heterojuncțiune se folosește la laserul cu semiconductor.

Tehnologia fotoreceptorilor și a laserelor cu heterojuncțiuni

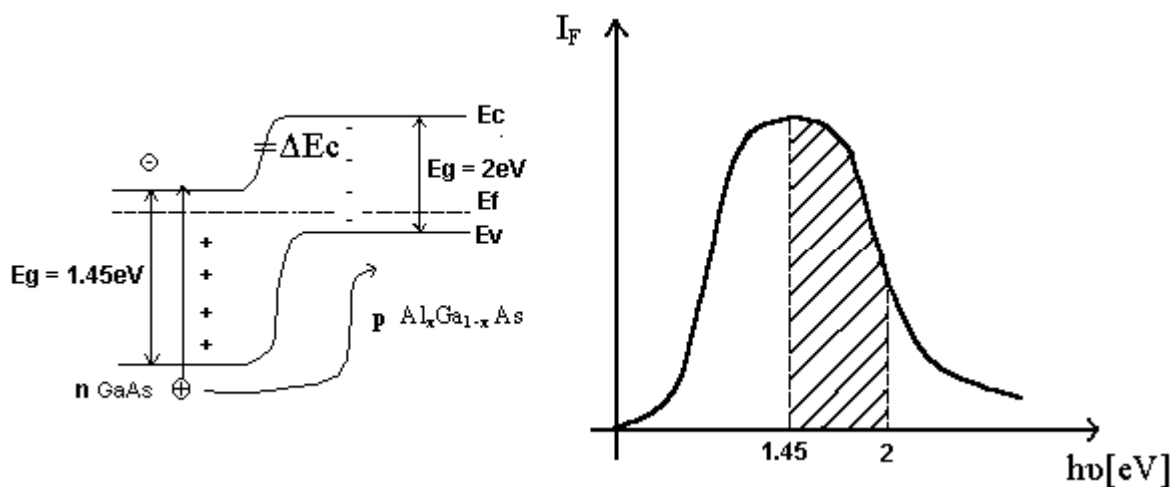
Aceste dispozitive stau la baza circuitelor optoelectronice.

1. Elemente solare cu heterojuncțiuni

- au cel mai mare randament.

Bazele fizice de funcționare a elementelor solare

Avem un material de tip n GaAs și pe suprafața lui se crește o peliculă epitaxială de tip p cu bandă interzisă mare.



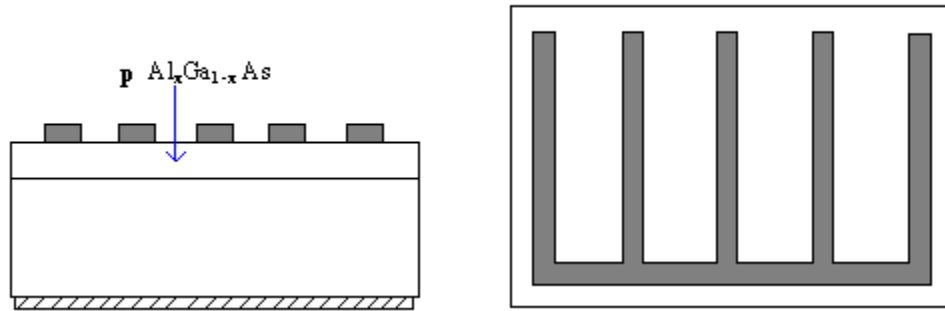
Iluminăm această heterojuncțiune cu un spectru solar care are intensitatea fotonilor în funcție de energia lor. Dacă energia $h\nu$ căzută pe suprafața heterojuncțiunii este mai mică decât 1.45eV, rezultă că nu se absorb electroni pentru că energia lor nu este destul de mare (energia fotonului este mai mică decât banda interzisă a materialului). Dacă energia fotonilor $1.45 \leq h\nu \leq 2\text{eV}$, fotonii vor trece liber din partea dreaptă spre stânga, energia unui foton fiind suficientă pentru a excita un electron și de a-l ridica din partea stânga jos în sus (stg) rămânând acolo un gol unde se formează o pereche electron – gol. Dacă $h\nu > 2\text{eV}$ s-ar ivi în partea dreaptă o pereche electron – gol.

Toți fotonii formează perechi electron – gol în partea stângă.

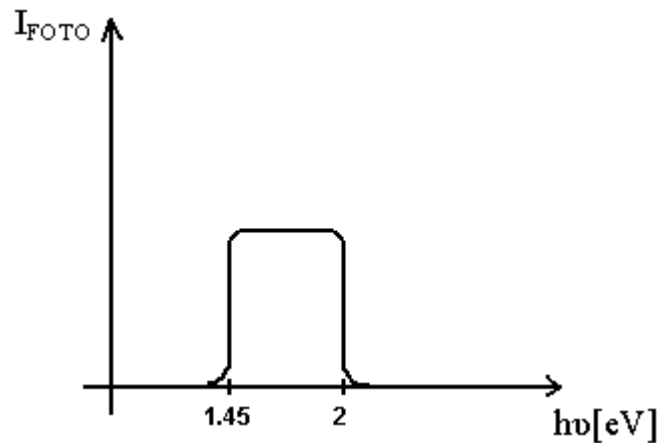
Golul din partea stângă jos va trece în partea dreaptă jos și va compensa încărcătura unui electron, iar prin circuitul exterior va trece un curent format dintr-un electron; electronul din partea stângă sus nu poate trece în partea dreaptă sus deoarece el nu poate trece bariera, prin urmare potențialul câmpului electric interior s-a micșorat.

Acest element solar convertește în energie electrică doar porțiunea dintre 1.45 și 2eV.

Elementul solar s-ar putea realiza astfel:



Acest element solar are următoarea caracteristică spectrală:

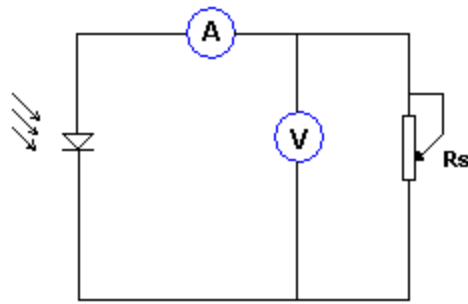


Randamentul: $\eta = \frac{P_s}{P_0}$, unde P_s = puterea sarcină , P_0 = puterea incidentă a

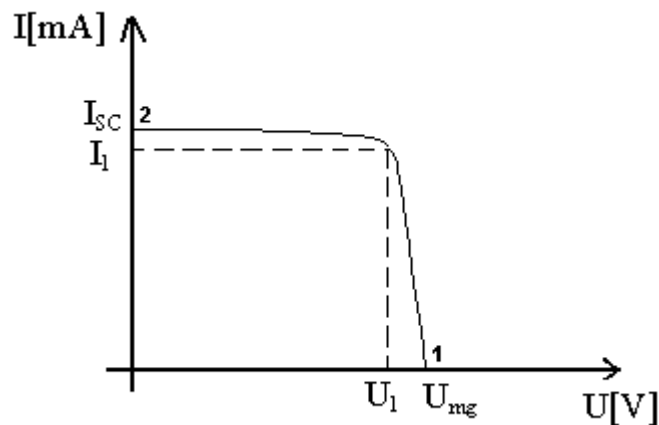
soarelui.

Determinarea η

Pentru a determina η se face următoarea analiză:



Când schimbăm valoarea rezistenței R_s avem următoarea caracteristică:



unde $I_{sc} = 25 \text{ mA/cm}^2$

Mărind R_s putem micșora curentul până la zero. Dacă R_s are valoare maximă atunci punctul 1 se numește tensiunea mersului în gol. Când $R_s = 0$, nu există tensiune pe R_s , curentul este maxim, iar punctul 2 se numește curent de scurtcircuit.

Pentru a determina acest randament vom construi un dreptunghi care are suprafața maximă posibilă.

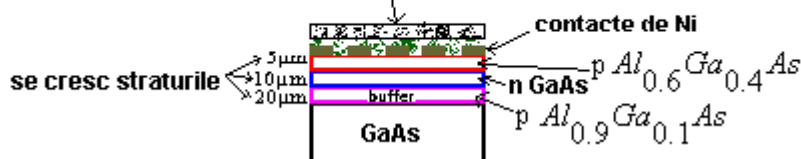
I_l = curent de lucru

$$U_1 = \text{tensiune de lucru} \quad \Rightarrow \quad \eta = \frac{I_l \cdot U_l}{P_0}$$

Astăzi $\eta = 30\%$, inițial era de 11%.

De exemplu de pe o singură plachetă se pot scoate mai multe elemente solare:

s-a lipit o sticlă cu rășină epoxidică



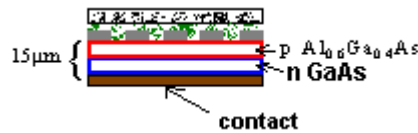
buffer – strat epitaxial monocristalin

Primul strat se corodează foarte ușor în HCl și se corodează până când elementul solar se dezlipește (se înlătură cei de 20μm de pe plachetă).



Placheta nu are defecte, din ea nu s-a corodat nimic, și din nou se introduce la epitaxie, se crește iar un element solar și acesta se scoate de pe suprafața plachetei. Astfel se pot scoate 50 – 60 elemente.

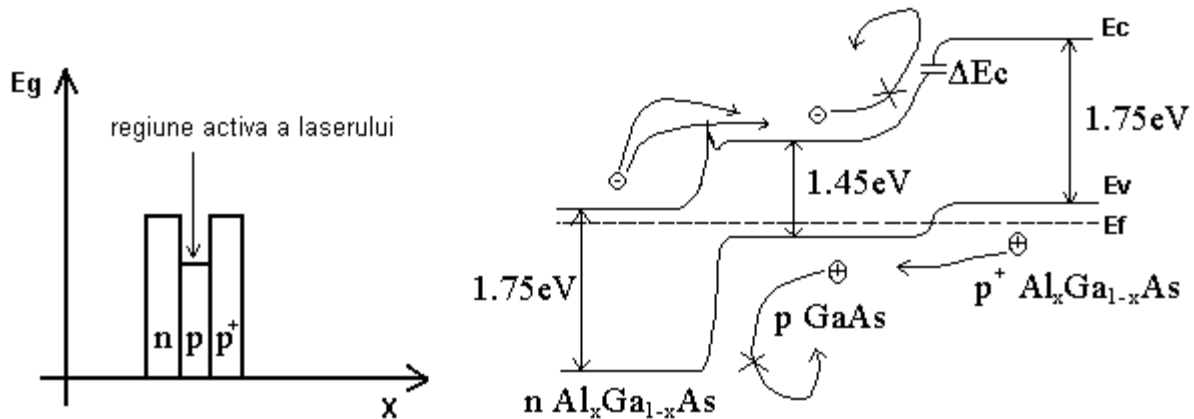
Elementul solar trebuie să aibă două contacte, care trebuie tratate termic, pentru ca el să aibă o adeziune bună în semiconductor.



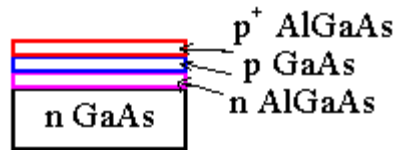
Dacă depunem un contact sub pelicula de n GaAs, aceasta trebuie tratată termic. Tratarea se face cu ajutorul laserului infraroșu, care nu încălzește rășina.

2. Tehnologia laserelor

Pentru a realiza un laser, trebuie să știm principiul de lucru al acestuia și să construim diagrama energetică a acestuia (care a fost propusă de savantul rus Alferov).



Pentru a crește din faza lichidă, pe o plachetă se crește întâi primul strat, al doilea strat și apoi al treilea strat. Avem trei soluții și tragem suportul ca la metoda cu caseta penal.



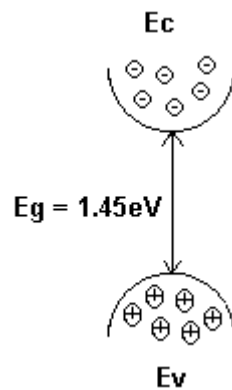
Polarizăm direct (“+”la p^+ și “-”la n).

Din primul emitor are loc injecția electronilor în regiunea activă, ei sar prima barieră dar nu sar și de a doua barieră pentru că este prea înaltă.

Din al doilea emitor se injectează goluri care vor trece numai peste prima barieră, nu și de a doua.

Condiții ca laserul să poată funcționa:

- suprapopulația nivelelor:



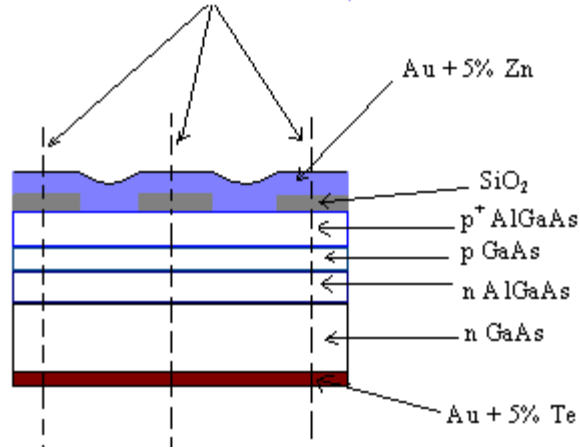
Se injectează electroni în banda de conducție și goluri în banda de valență. Rezultă că se adună mulți electroni și multe goluri, prin urmare avem suprapopulație datorată injecției.

- rezonatorul Fabri – Pero (două oglinzi la margine, una semitransparentă și una care să reflecte): laserul trebuie să emită o lumină cu aceeași energie a fotonilor, și pentru aceasta se utilizează două oglinzi la margine care se numesc rezonatorul Fabri – Pero.

Energia pe care o are electronul în banda de conducție a fost emanată sub formă de foton (lumina laserului). La margine (electronii care se găsesc pe nivelul cel mai înalt al benzii de conducție) electronul se recombina cu un gol și pentru ca să nu fie altă energie se pun două oglinzi, și fotonul format se lovește de o oglindă de alta și simulează alte perechi electron-gol care dau aceeași energie.

Construcția laserului pentru a putea lucra

laserul se taie cu niste sarme care se deplaseaza si slefuieste



Laserul tăiat arată astfel:

