

Capitolul 7.6

Tehnologia dispozitivelor semiconductoare

Ciprian Ionescu

**Conferențiar la Catedra Tehnologie Electronică și Fiabilitate,
Fac. Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației
Universitatea Politehnica din București**



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMFOSDRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013"

PROCEDEUL FOTOLITOGRAFIC

- Procedul fotolitografic se utilizează în TSS, la fabricația circuitelor imprimate, a circuitelor integrate și în alte domenii ale electronicii pentru definirea cu precizie a formelor (layout-ului).

⑩ Definirea formelor prin fotolitografie se bazează pe aplicarea neselectivă peste structură a unui strat de fotorezist, strat în care urmează a se genera formele dorite prin expunerea selectivă la acțiunea unei radiații (în general în spectrul vizibil sau UV).

⑩ Relieful creat în stratul de fotorezist urmează a se transfera stratului printr-o acțiune de corodare în care fotorezistul are rol de mascare (protecție) a domeniilor ce nu trebuie îndepărtate.



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMPOSDRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

ELAN

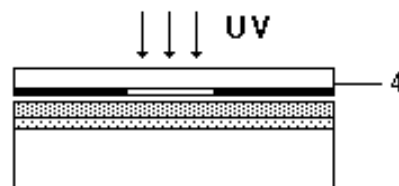
Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013

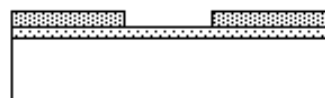
1 ETALARE / USCARE
FOTOREZIST



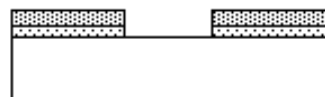
2 EXPUNERE



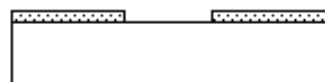
3 DEVELOPARE / SPĂLARE
(TRATAMENT TERMIC)



4 CORODARE



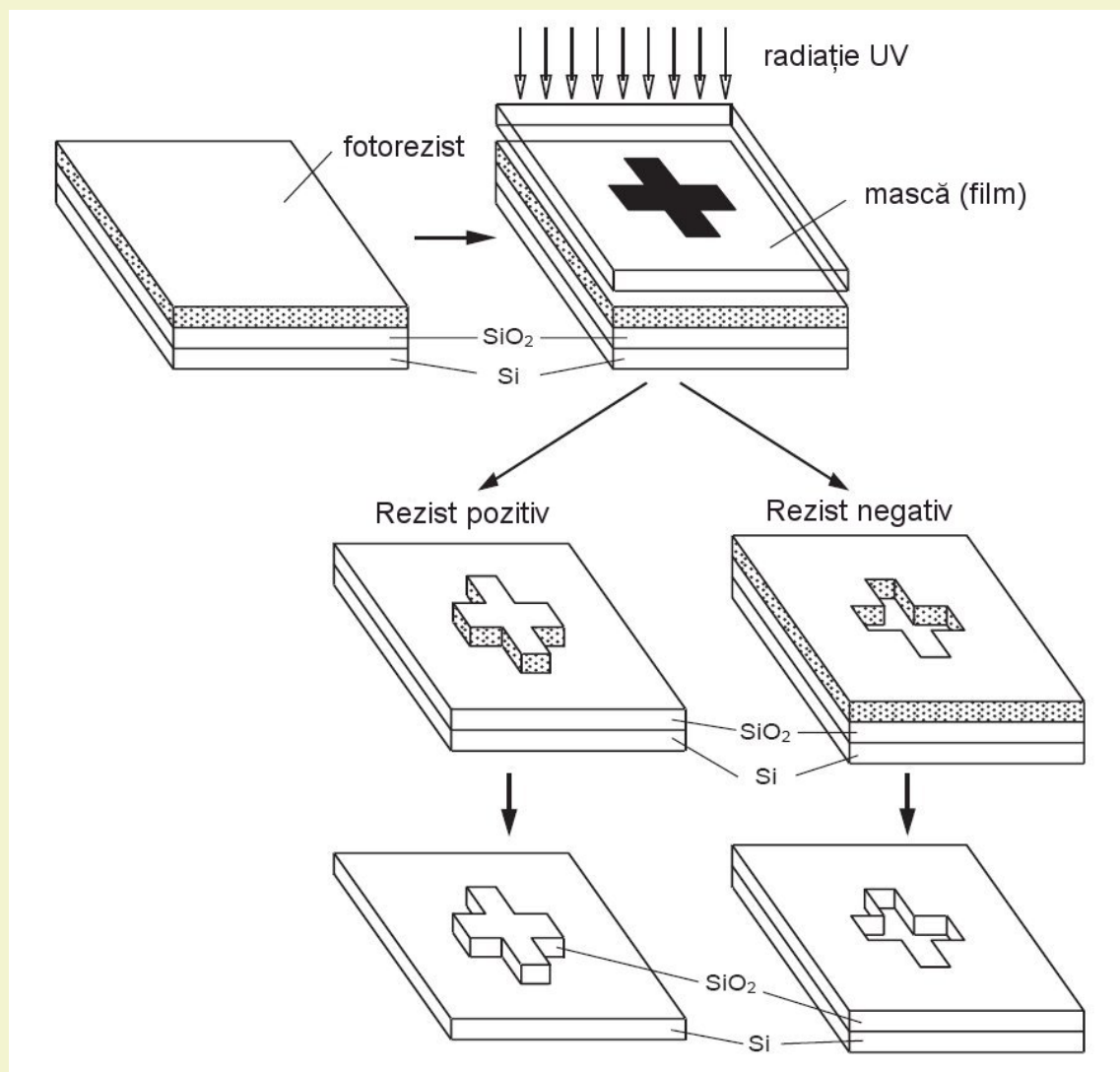
5 INDEPARTARE
FOTOREZIST



1 substrat
2 strat subțire
3 fotorezist
4 mască

10 Etapele procesului fotolitografic

Se utilizează pentru litografie atât fotorezist pozitiv cât și negativ.



⑩ Măștile fotolitografice sunt realizate de obicei din plăci de sticlă cu emulsie fotografică, dar există măști realizate din depuneri de straturi metalice (Cr) pe sticlă.

⑩ Rezoluția și precizia definirii elementelor de circuit depind în măsură esențială de realizarea corectă a măștilor.

⑩ Măștile sunt obținute prin reducerea fotografică a layoutului inițial, realizat la o scară mărită. La realizarea circuitelor integrate se obișnuiește ca imaginea la scara 1:1 să se reproducă de mai multe ori pe aceeași placă fotografică pentru a se obține cât mai multe copii ale circuitului la o singură imprimare prin contact.

⑩ De mare importanță în asigurarea unei bune definiții pe mască este calitatea sistemului optic utilizat la operația de fotoreducere. Sistemul optic, la care ne vom referi pentru simplificare ca la o singură lentilă, trebuie să asigure o rezoluție bună, o imagine fără aberații cromatice sau de sfericitate, un contrast suficient de mare, o regiune utilizabilă din spațiul imagine cât mai mare.



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMPOSDRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013

Rezoluția este limitată de fenomenul de difracție a luminii. Datorită acestui fenomen două puncte (sau două linii) aflate la distanța L pot să se confunde pe imaginea obținută cu lentila respectivă. Distanța minimă $L_{\min}$ dintre două puncte, respectiv două linii care apar încă distincte pe imagine este:

$$L_{\min} = \frac{0,61\lambda}{A_N} \qquad L_{\min} = \frac{0,5\lambda}{A_N}$$

- ⑩ unde - λ este lungimea de undă a radiației monocromatice utilizate
- ⑩ - A_N este apertura numerică a lentilei egală cu raportul dintre diametrul lentilei și dublul distanței focale
- ⑩ Se observă că o rezoluție mai bună poate fi atinsă cu lungimi de undă mai mici. Se utilizează în prezent litografie cu fascicul de electroni și cu raze X.



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMPOSDRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013

⑩ Etalarea fotorezistului se poate realiza prin:

- ⑩ a) centrifugare (spin coating)
- ⑩ b) imersie
- ⑩ c) pulverizare

⑩ Prin centrifugare se obțin grosimi uniforme de 2 -5 μ m. La aplicarea prin imersie se obțin grosimi mai mari de ordinul a 50 μ m. Pentru o uniformitate a stratului etalat trebuiesc controlate viscozitatea fotorezistului și viteza de rotație sau de extragere din imersie.

Înainte de etalare, fotorezistul trebuie filtrat prin site cu deschideri de ordinul a (0,2 - 2) μ m pentru a elimina incluziunile nedorite care pot crea defecte la corodare.

Uscarea fotorezistului se realizează timp de circa 10 minute la temperatura de 80 - 120 °C.

Urmează dezvoltarea fototrezistului, curățare, corodare strat subțire iar în final fotorezistul trebuie îndepărtat.



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMPOSDRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

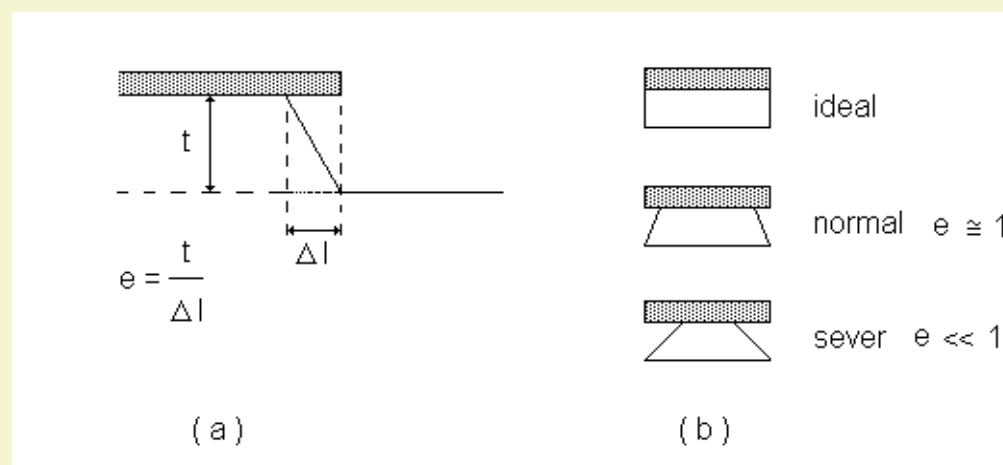
ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013"

Corodarea este procesul care definește efectiv formele în stratul depus și are un efect hotărâtor asupra calității structurii obținute. Corodarea se realizează prin imersare într-o soluție acidă sau bazică aleasă corespunzător pentru a ataca stratul respectiv și a nu reacționa cu fotorezistul sau cu alt strat subțire care nu trebuie atacat.

În urma corodării are întotdeauna loc un atac lateral (*undercut*), sub stratul de fotorezist. Se definește factorul de corodare e : $e = t / \Delta l$, semnificația mărimilor fiind prezentată în figura (a). În figura (b) este prezentat aspectul profilurilor de corodare ideal, normal și corodat sever.



ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMPOSDRU



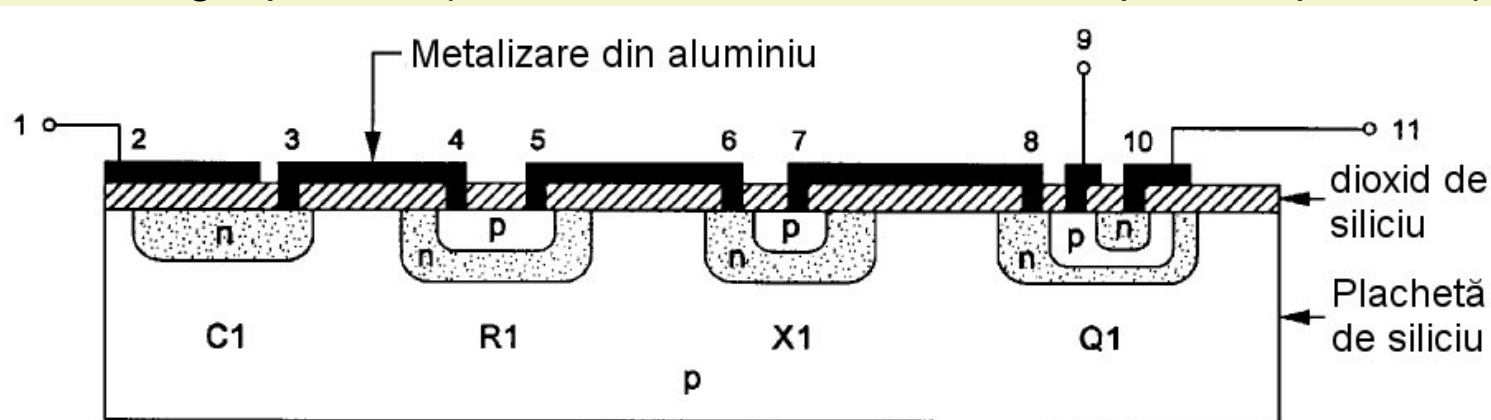
FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



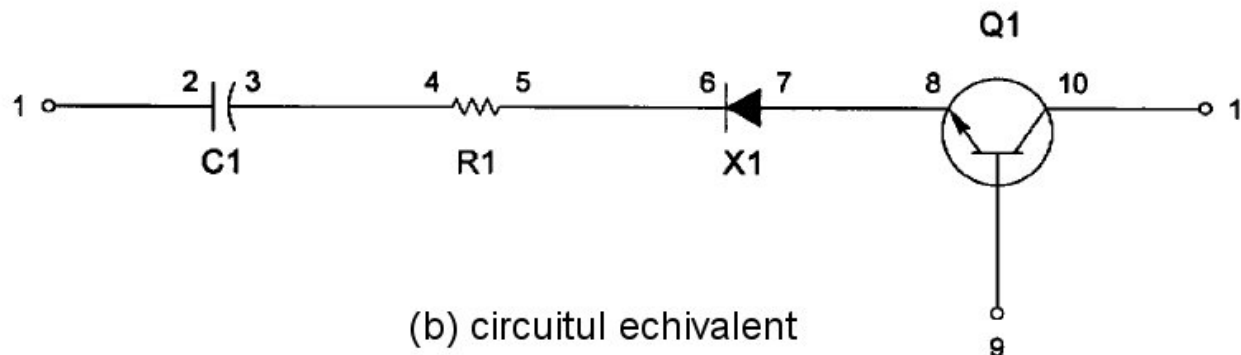
INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

TEHNOLOGIA DISPOZITIVELOR SEMICONDUCTOARE (TEHNOLOGIA SILICIULUI)

⑩ Tehnologia modernă a dispozitivelor semiconductoare pe bază de siliciu este așa numita tehnologie planară (uneori se utilizează denumirea planar-epitaxială)

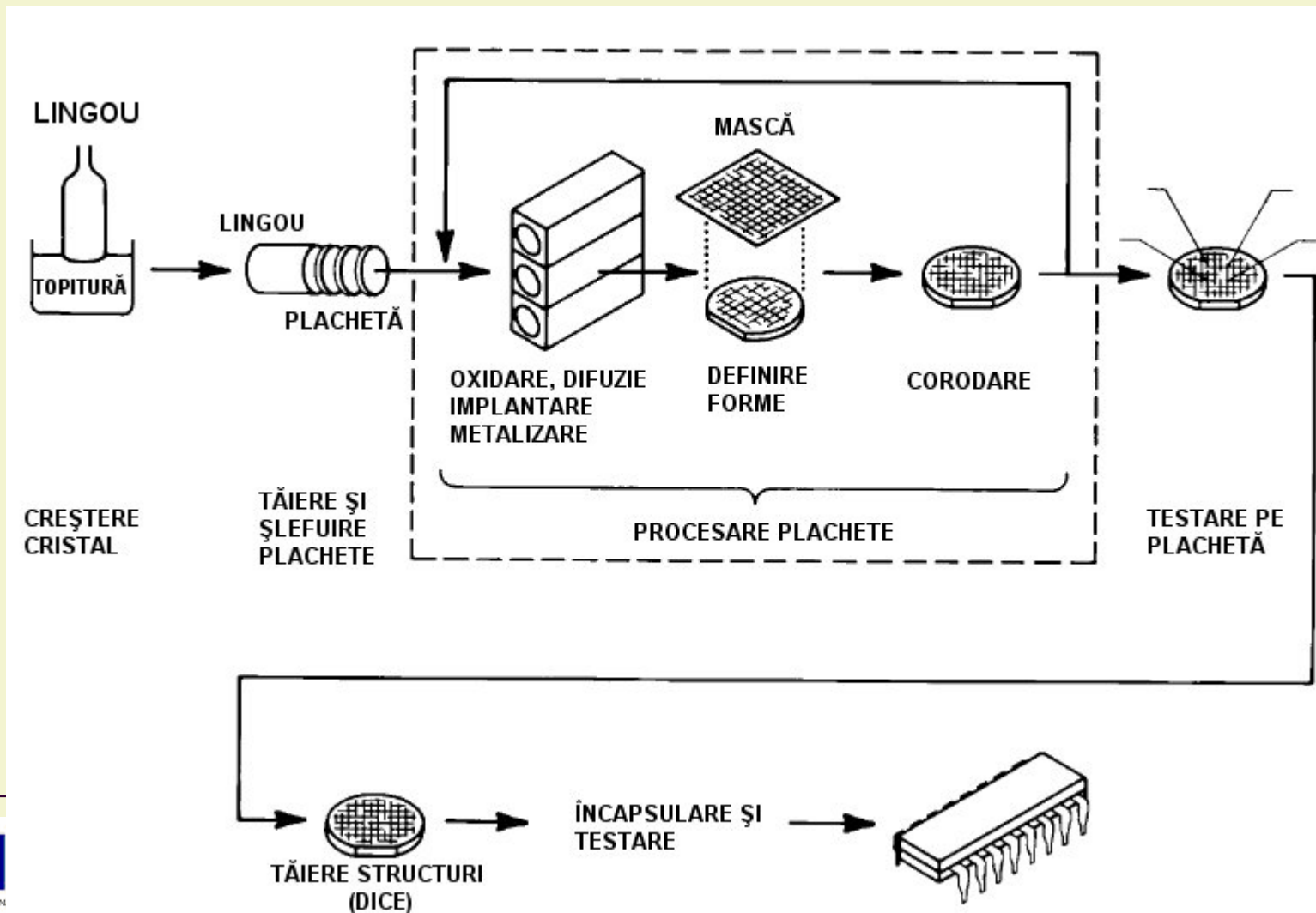


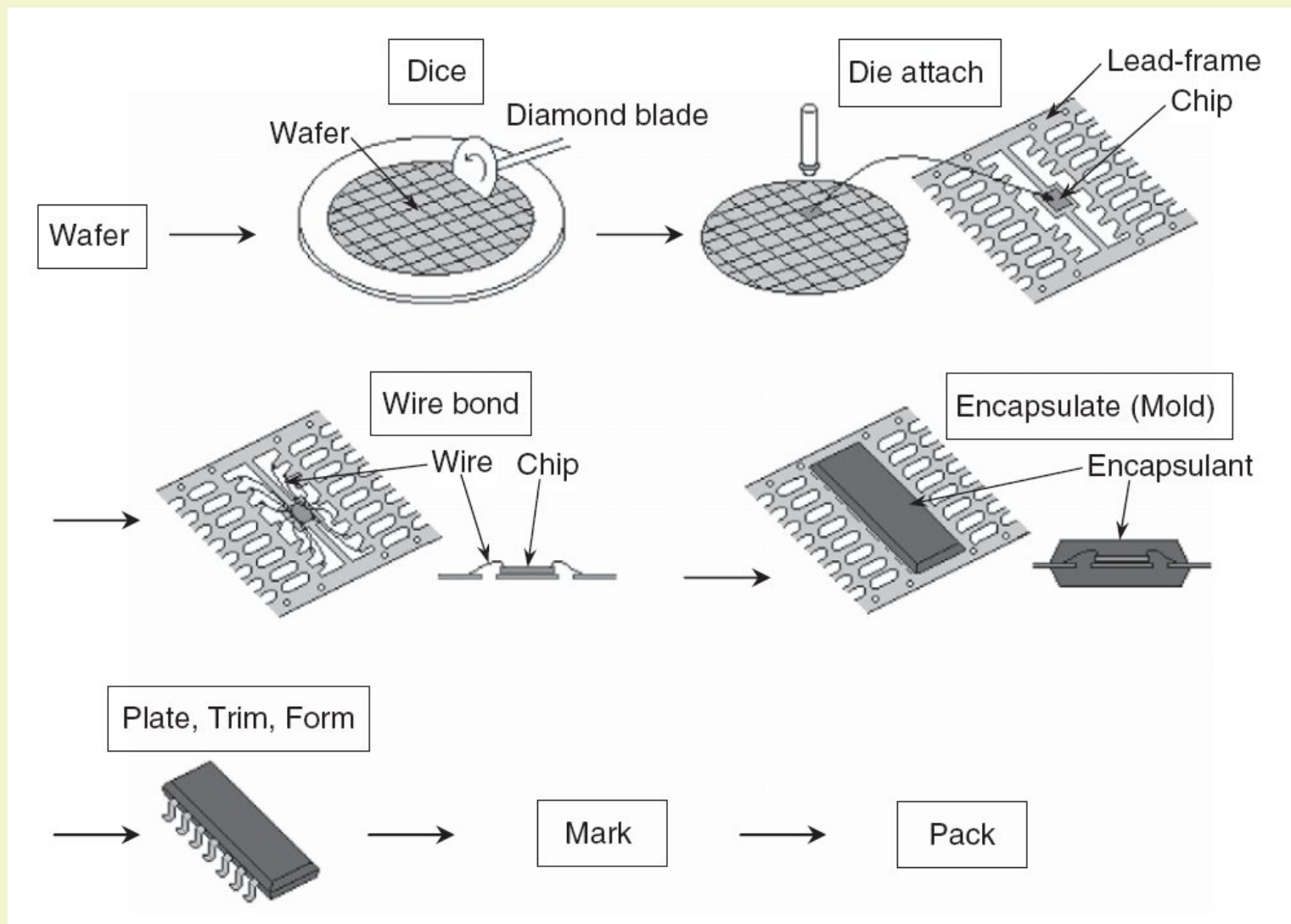
(a) structura circuitului integrat



(b) circuitul echivalent

Fluxul complet de realizare a unui circuit integrat este prezentat în figura de mai jos. Procesarea plachetelor în FAB este etapa cea mai importantă, etapele ulterioare de packaging electronic se pot realiza în alte unități.



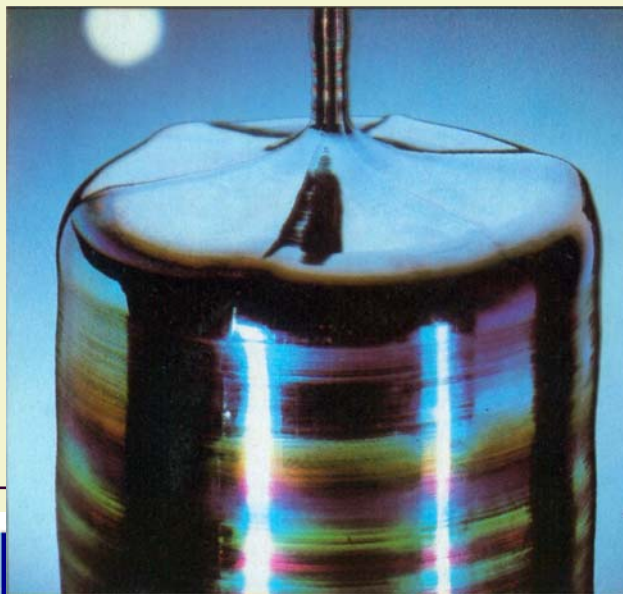


Activitățile tehnologice de Packaging pentru circuitele integrate

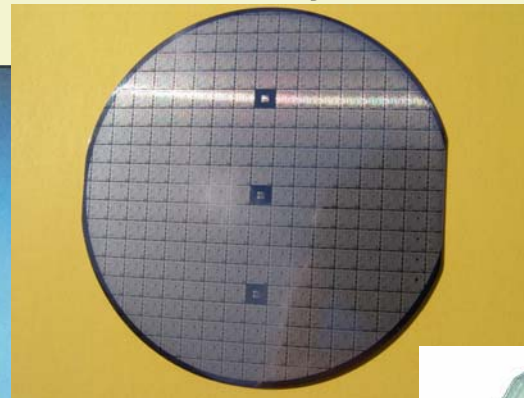
Siliciul, pentru a putea fi utilizat la realizarea de dispozitive electronice trebuie realizat sub formă de plachetă monocristalină. Se realizează la început un lingou cu diametrul apropiat de cel final al plachetei. Cele mai cunoscute procedee de realizare a cristalelor de Si sunt procedeul Czochralski și procedeul cu zonă flotantă.

Procedeul de realizare pe baza tragerii din topitură cunoscut și ca procedeul Czochralski utilizează un germene monocristalin care se rotește în sens invers față de creuzetul cu Si topit. Atomii din topitură se vor adăuga în mod ordonat la germenele monocristalin care se ridică cu viteză foarte mică din topitură.

Metoda zonei flotante se bazează pe deplasarea unei zone topite de-a lungul unui lingou existent, la extremitatea căruia există un germene monocristalin. Metoda zonei flotante are și avantajul că realizează și purificarea materialului, concentrația de impurități în stare topită fiind mai mare, astfel ele se acumulează în zona flotantă, care la sfârșitul procesului este adusă la un capăt al lingoului și se va elimina.



Lingou



Plachetă



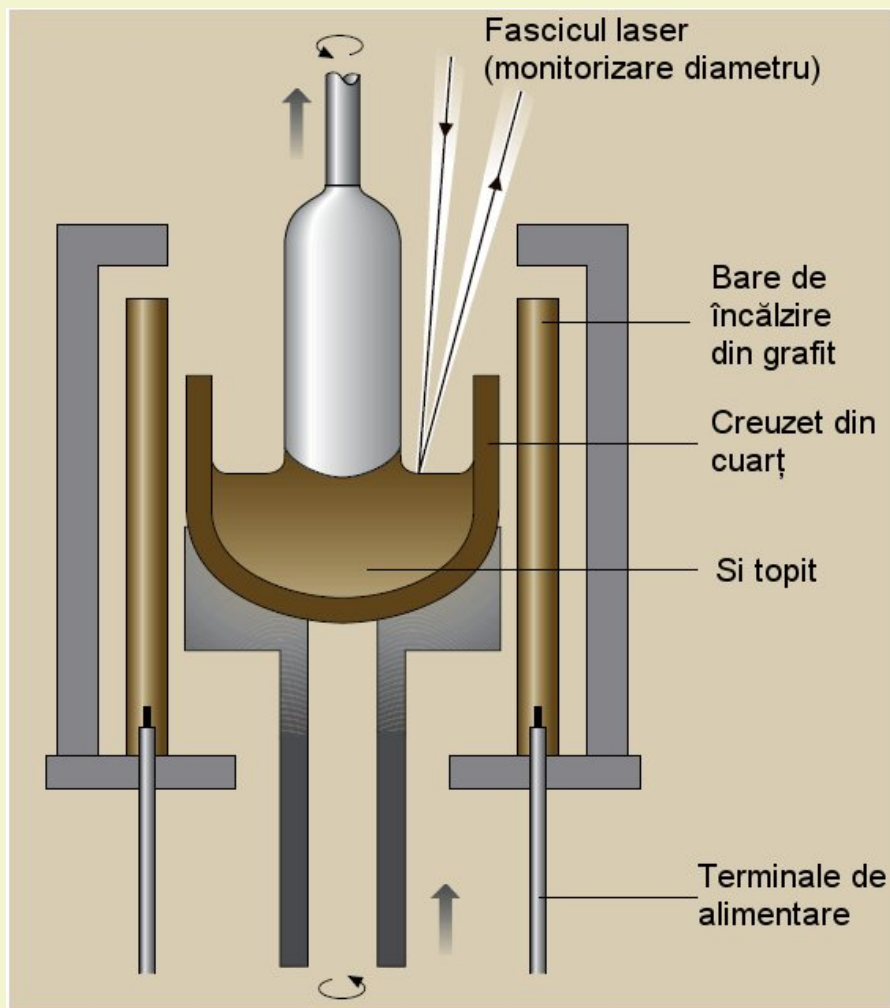
Transportul
plachetelor



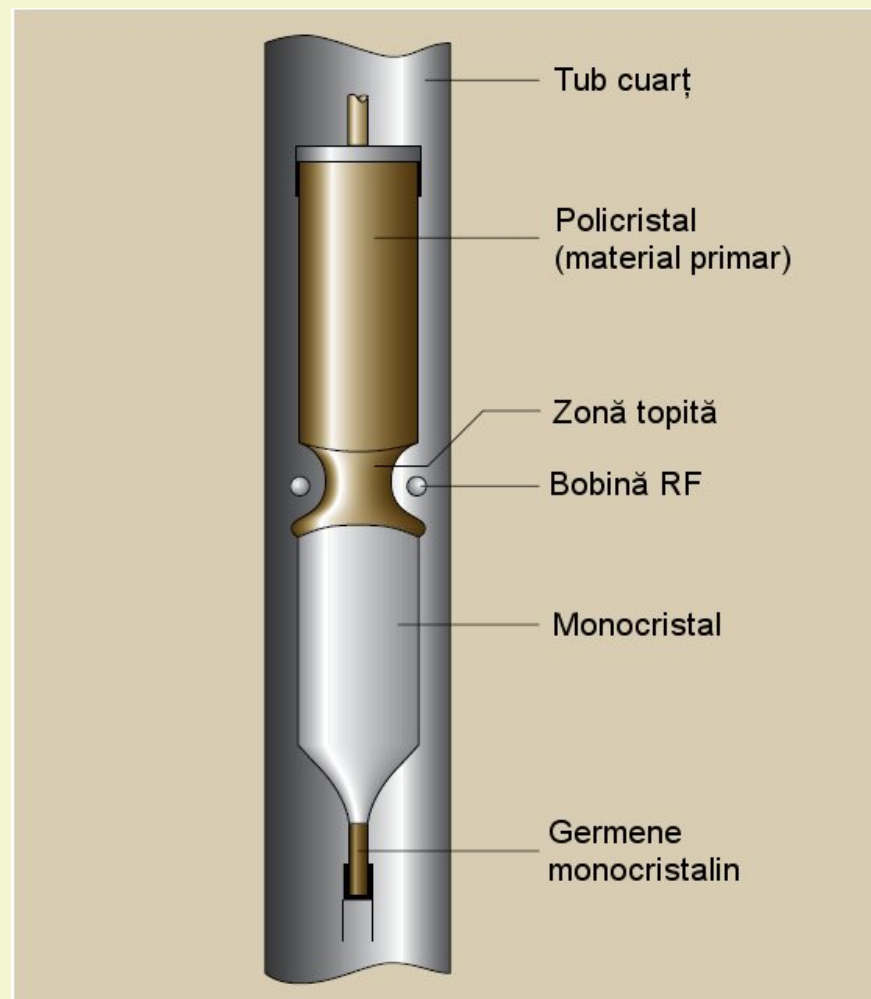
Plachetă de 12"
(30cm)

amism, Inițiativă în Industria Electronică
ni !
sial European prin
Resurselor Umane 2007-2013"

10 Realizarea monocristalelor de Si

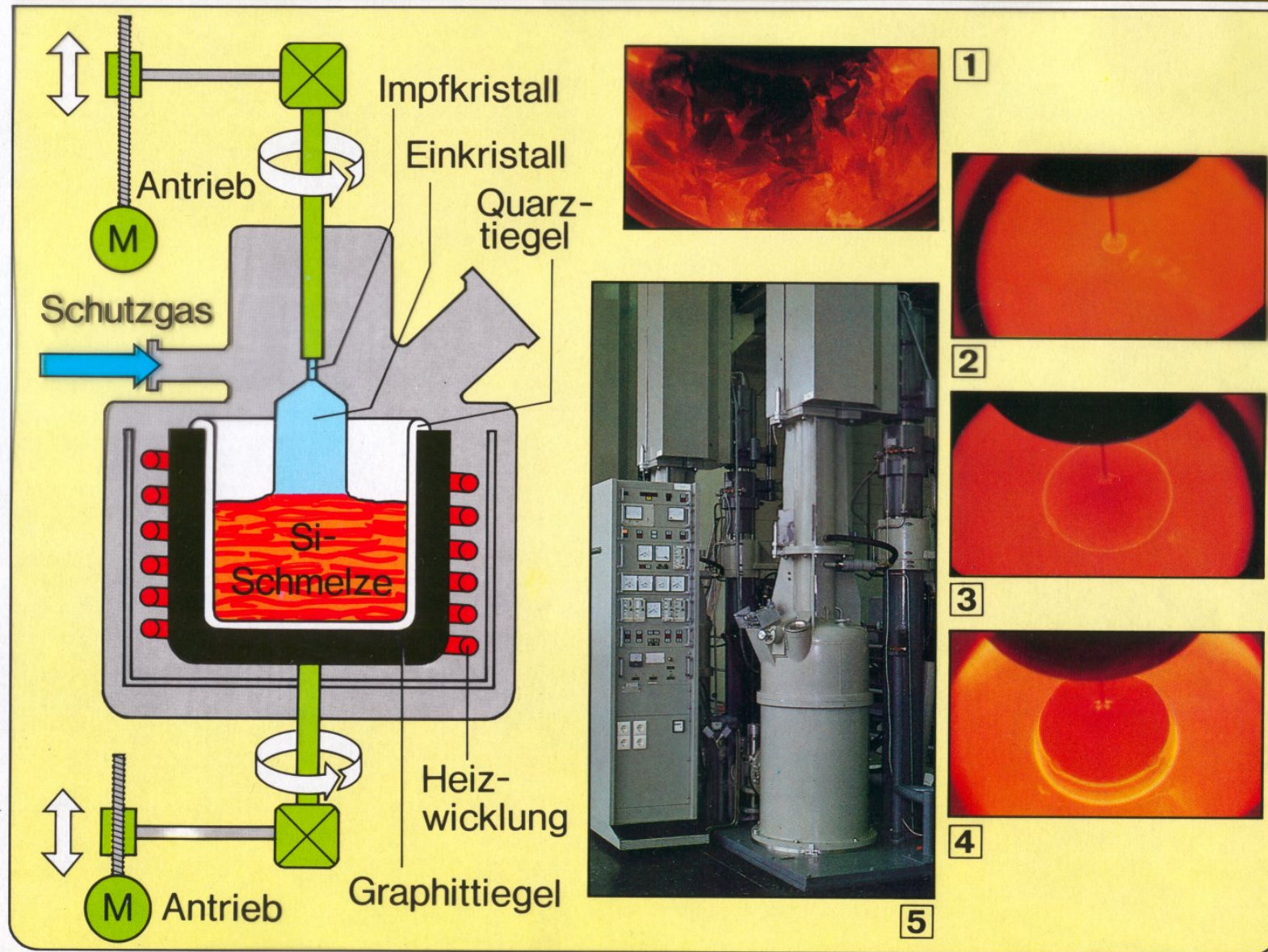


Metoda Czochralski



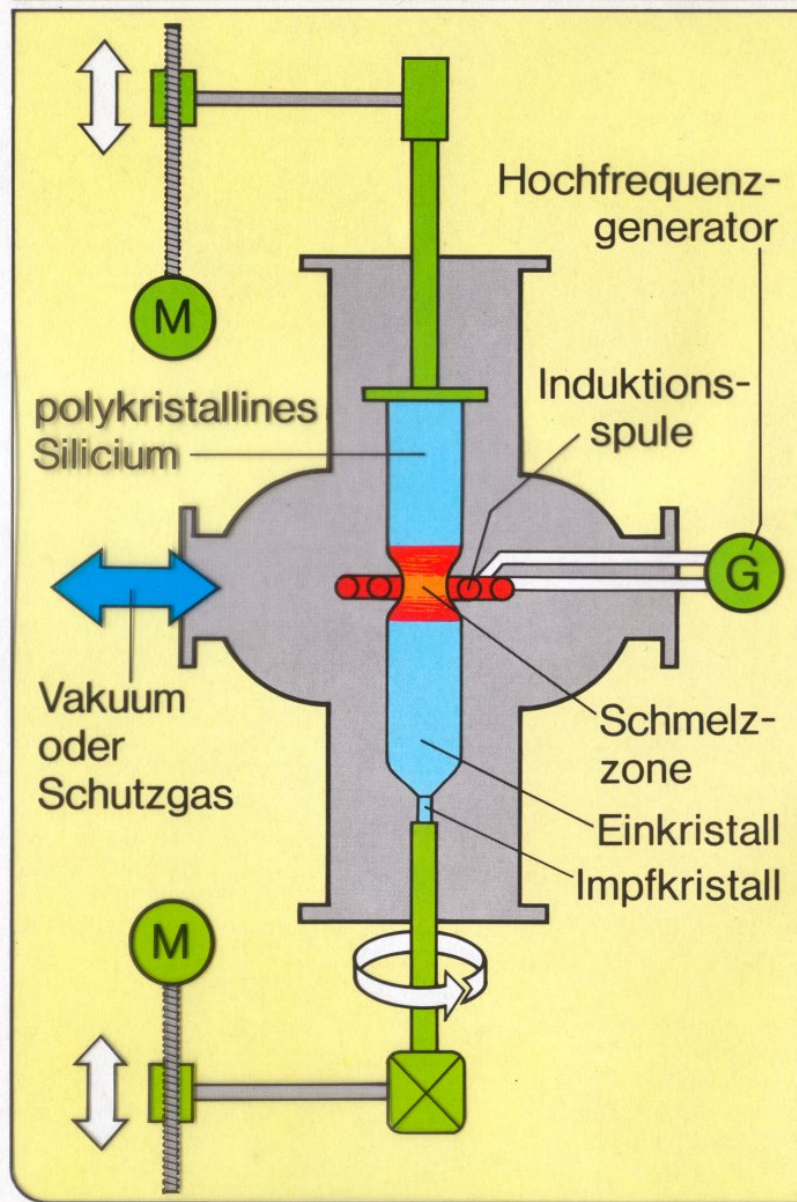
Metoda zonei flotante

Einkristall-Herstellung / Tiegelziehen



onică

Einkristall-Herstellung / Zonenziehen

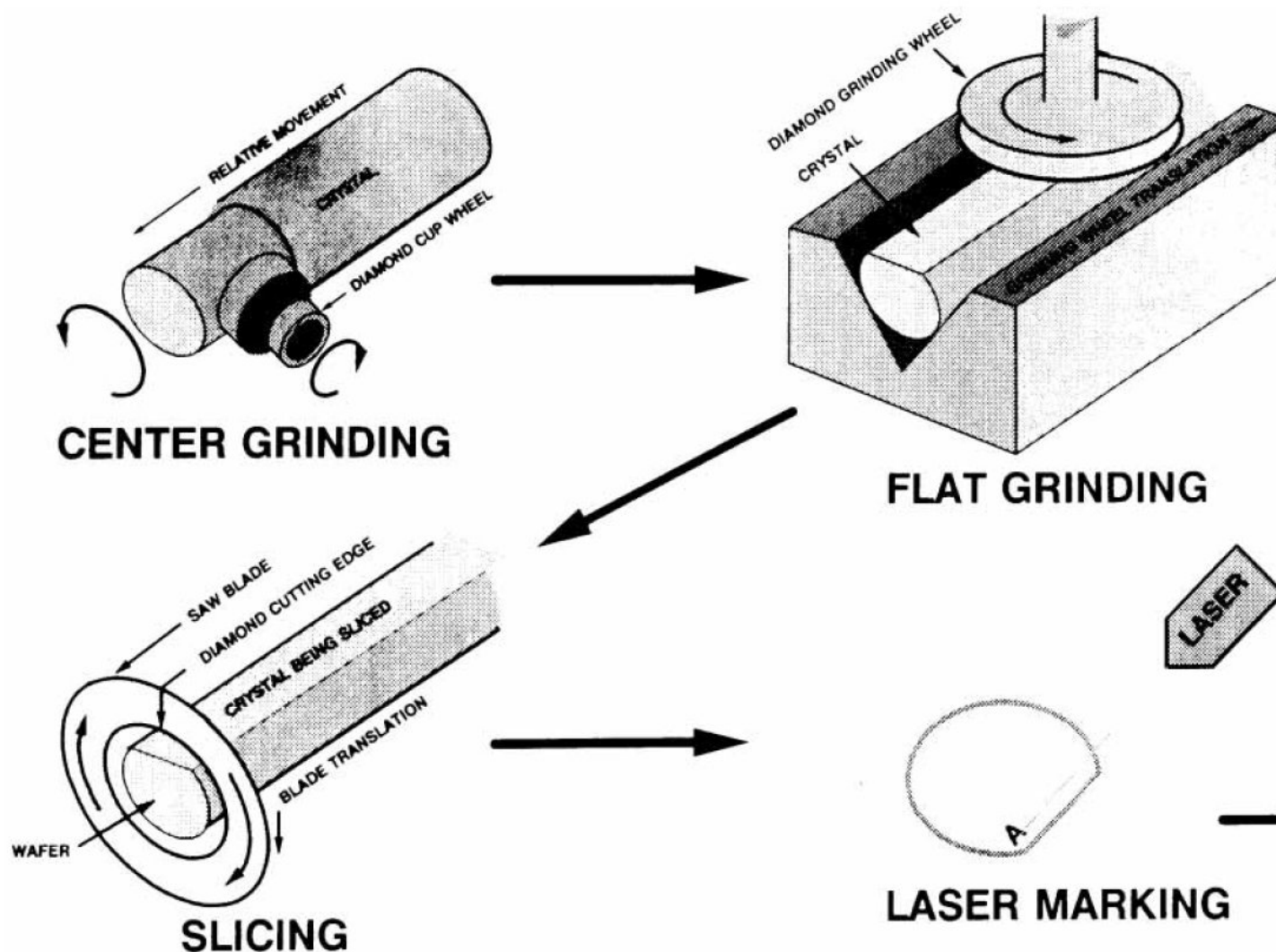


Metoda zonei flotante (foto)

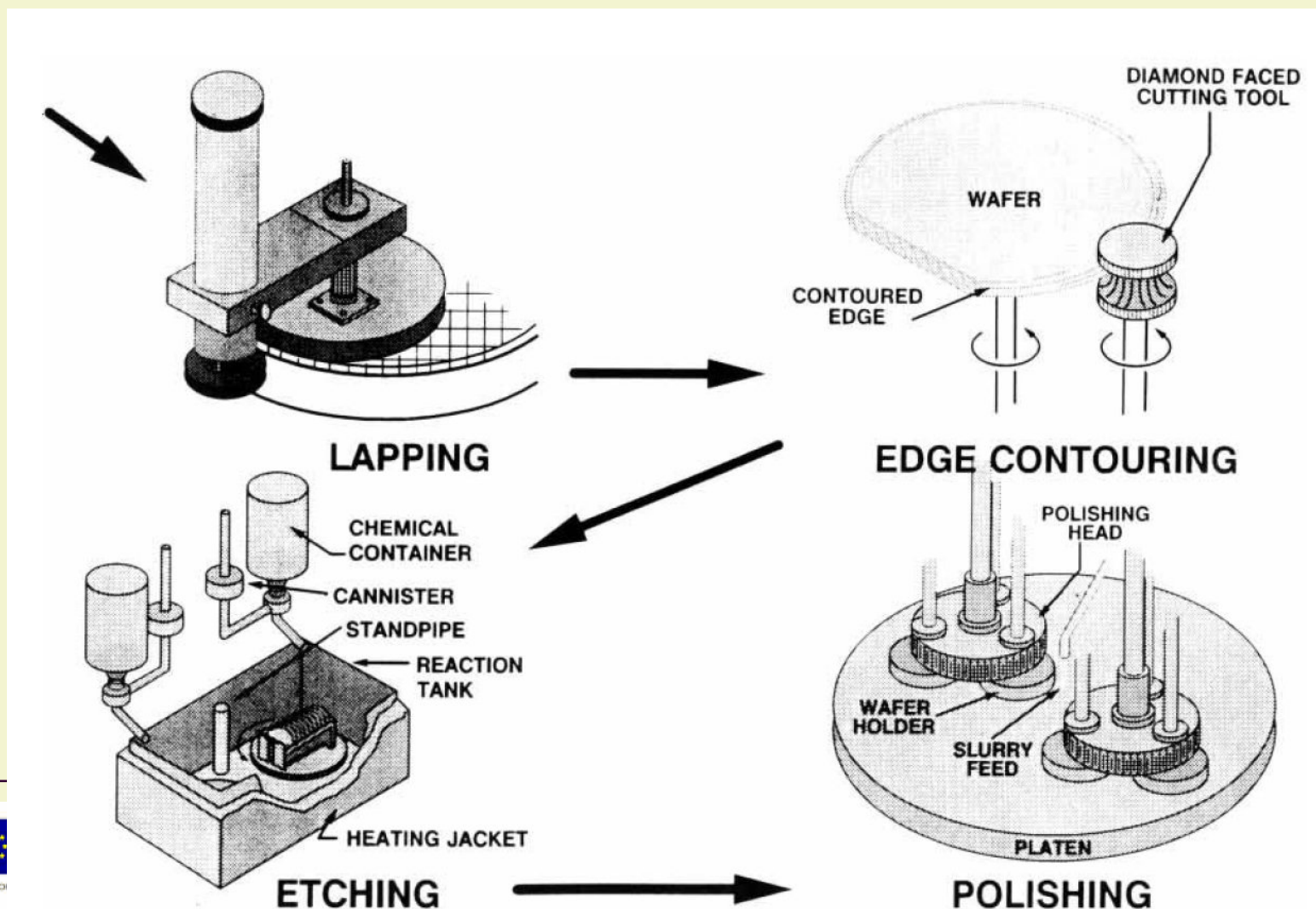
Investește în oameni !
Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013

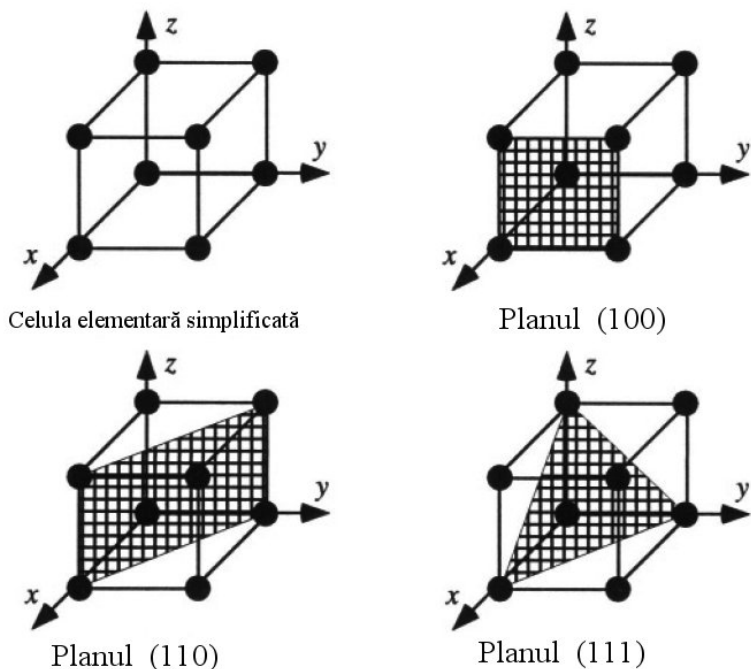
ică

După realizarea lingoului se realizează prelucrarea acestuia prin polizare circulară și plană. Teșitura laterală realizată după direcții cristaline precise identifică tipul de plachetă de siliciu. Tăierea se realizează cu lame diamantate de tip inelar.



Urmează un proces de polizare fină (lepuire), apoi sunt formate marginile iar în final se face o șlefuire foarte fină de tip oglindă (luciu optic).

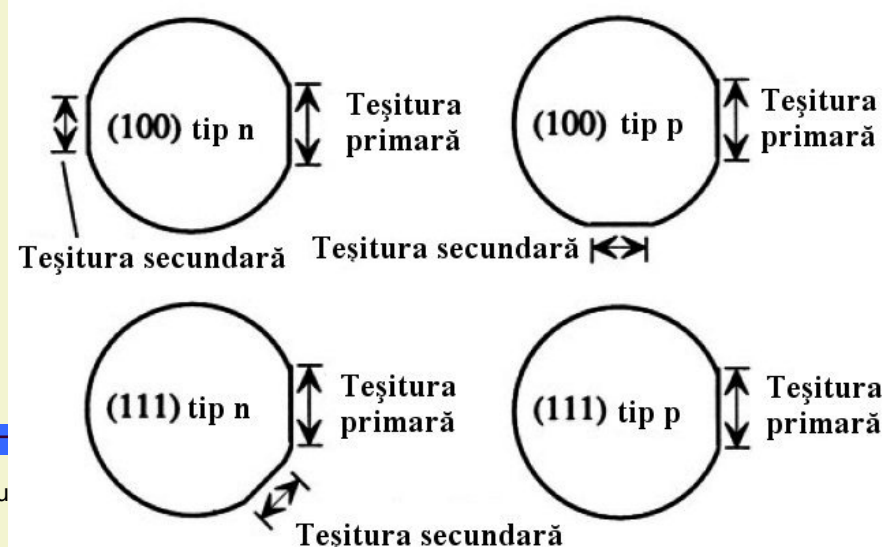




Monocristalele de Si având o orientare cu planele (100) la suprafață sunt numite plachete (100). Dacă o diagonală a unei fețe a celulei elementare este perpendiculară pe suprafața plachetei atunci aceasta este de tipul (110). Dacă o diagonală a cubului celulei elementare este perpendiculară pe suprafața plachetei atunci aceasta este numită plachetă de tipul (111).

Monocristalele de Si având o orientare cu planele (100) la suprafață sunt numite plachete (100). Dacă o diagonală a unei fețe a celulei elementare este perpendiculară pe suprafața plachetei atunci aceasta este de tipul (110). Dacă o diagonală a cubului celulei elementare este perpendiculară pe suprafața plachetei atunci aceasta este numită plachetă de tipul (111).

Teșiturile plachetei ajută la identificarea acesteia, ca în figură.



2. PROCESAREA PLACHETEI DE SILICIU

Procesarea plachetei de siliciu presupune o serie complexă de operații. Aceste operații implică oxidarea siliciului, creștere de straturi subțiri diverse, inclusiv metalizări, dopare. Pentru definirea formelor se utilizează procedeul litografic.

Pentru creșterea de straturi subțiri se utilizează metode CVD (Chemical Vapor Deposition) care au loc în cuptoare (reactoare) la temperaturi înalte. Epitaxia este o creștere a unui strat pe un substrat cu rețea cristalină identică. O metodă mai complexă este MBE –Molecular Beam Epitaxy.

Realizarea zonelor semiconductoare de tip „p” și „n” se realizează prin procedeele de difuzie din stare gazoasă (impurificare la suprafață) sau prin implantare ionică (impurificare în adâncime).



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMFOSDRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



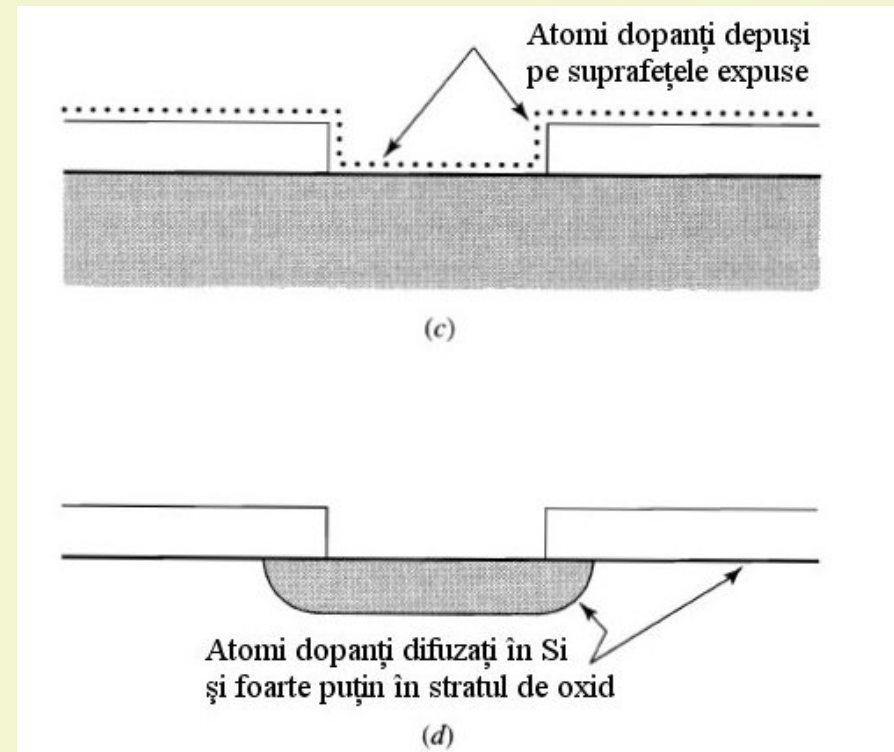
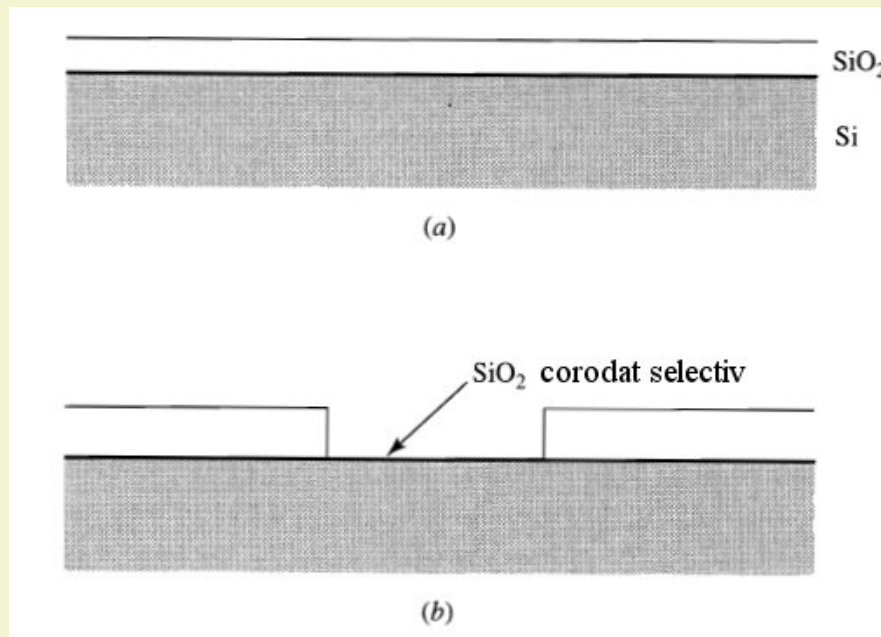
INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013”

Marea răspândire a circuitelor integrate pe siliciu în deceniile trecute s-a datorat utilizării stratului de dioxid de siliciu pe post de agent de mascare, de definire a formelor. Acest strat se realizează relativ ușor prin oxidarea (selectivă) a stratului de bază.



Etape principale ale procesului planar-epitaxial a) formarea stratului de oxid, b) corodare selectivă a oxidului, c) +d) difuzia atomilor de impuritate în siliciu

10 REALIZAREA DOPĂRII-DIFUZIA ȘI IMPLANTAREA IONICĂ

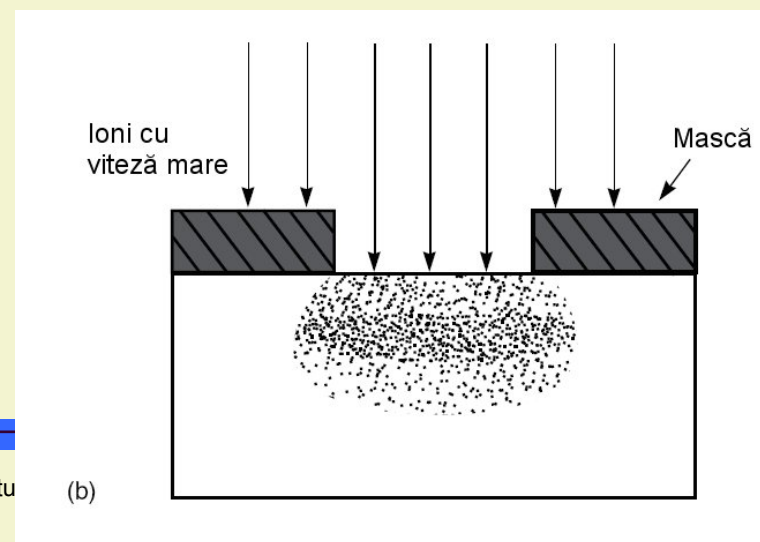
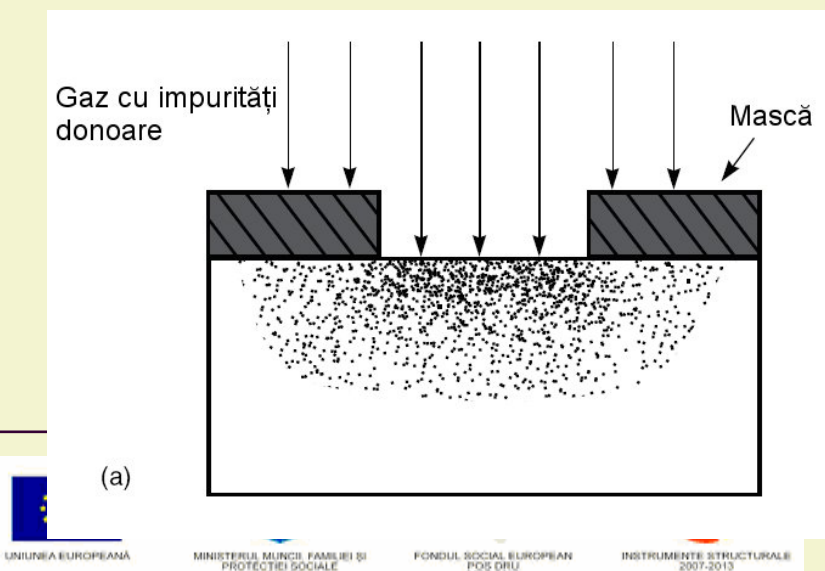
Difuzia sau doparea este procesul prin care atomii de impuritate sunt aduși în interiorul unui monocristal de Si pentru a-l converti într-un semiconductor de tip n sau de tip p.

Elemente dopante din grupa a V-a: P (fosfor), As (Arseniu) și Sb (Stibiu, antimoniu) numite și impurități donoare vor putea produce material semiconductor de tip n.

Elemente din grupa a III-a, ca B (Bor), numite și impurități acceptoare vor produce semiconductori de tip p.

Parametrii procesului depind de tipul impurităților, concentrația lor, timpul de difuzie și temperatură.

Prin difuzie se realizează concentrații ale atomilor de impuritate ce scad de la suprafață spre interiorul plachetei, fig. (a). Prin implantare ionică, dacă atomii au viteze mari, este posibil să se realizeze concentrații mai mari în interiorul plachetei, fig. (b).



Legile difuziei

Fluxul de particule ce străbate o suprafață aflată la distanța x de suprafața semiconductorului este proporțional cu gradientul concentrației de particule în acea regiune, aceasta fiind prima lege a lui Fick:

$$F = -D \cdot \frac{\partial C}{\partial x}$$

Parametrul D [cm^2/s] se numește difuzivitate și depinde de tipul impurităților și de temperatură.

Pe de altă parte, modificarea în timp a concentrației în zona dx poate fi exprimată ca diferență a fluxului de atomi care pătrund prin cele două suprafețe:

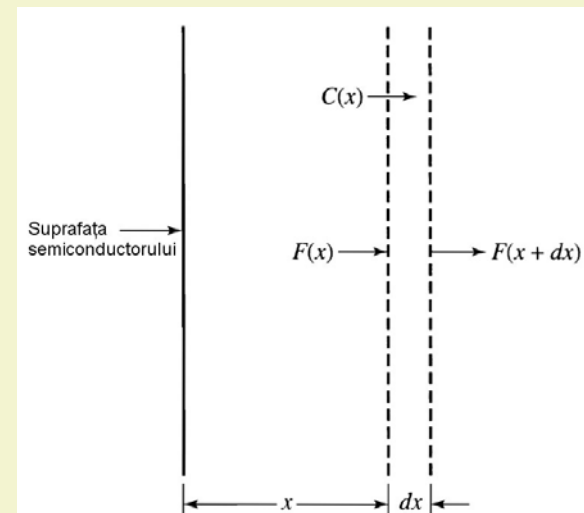
$$\frac{\partial C}{\partial t} dx = F(x) - F(x + dx) \cong F(x) - F(x) - \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right) dx \quad \text{sau} \quad \frac{\partial C(x)}{\partial t} = - \frac{\partial F}{\partial x}$$

Dacă se introduce F din prima relație în ultima rezultă

$$\frac{\partial C(x)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(-D \frac{\partial C(x)}{\partial x} \right) = D \frac{\partial^2 C(x)}{\partial x^2}$$

aceasta fiind cunoscută ca cea de-a doua lege a lui Fick.

Ecuatia permite calculul profilului de difuziune, cu impunerea condițiilor inițiale.



Ecuatia difuziei se rezolvă pentru două cazuri particulare: difuzia din sursă infinită și din sursă finită

	Difuzia din sursă infinită (Concentrație constantă la suprafață) $C_s = \text{const.}$	Difuzia din sursă finită (Cantitate de impurități constantă pe unitatea de arie $S = \text{const.}$)
Condiții inițiale	Presupunem concentrația de impurități în momentul inițial nulă $C(x,0)=0$ Concentrație nulă departe de suprafață $C(\infty,t)=0$ Concentrație constantă la suprafață $C(0,t)=C_s$	Presupunem concentrația de impurități în momentul inițial nulă $C(x,0)=0$ Concentrație nulă departe de suprafață $C(\infty,t)=0$ Cantitate constantă atomi $\int_0^\infty C(x,t) = S$
Soluție	$C(x,t) = C_s \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$	$C(x,t) = \frac{S}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$

unde erfc este funcția complementară a erorilor. Mărimea $(Dt)^{1/2}$ se numește adâncime de difuzie.

În cazul distribuției din sursă finită soluția este de tip Gauss. Cele două ecuații se pot reprezenta grafic, normat, pentru a evalua profilele de difuzie.



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMPOSDRU



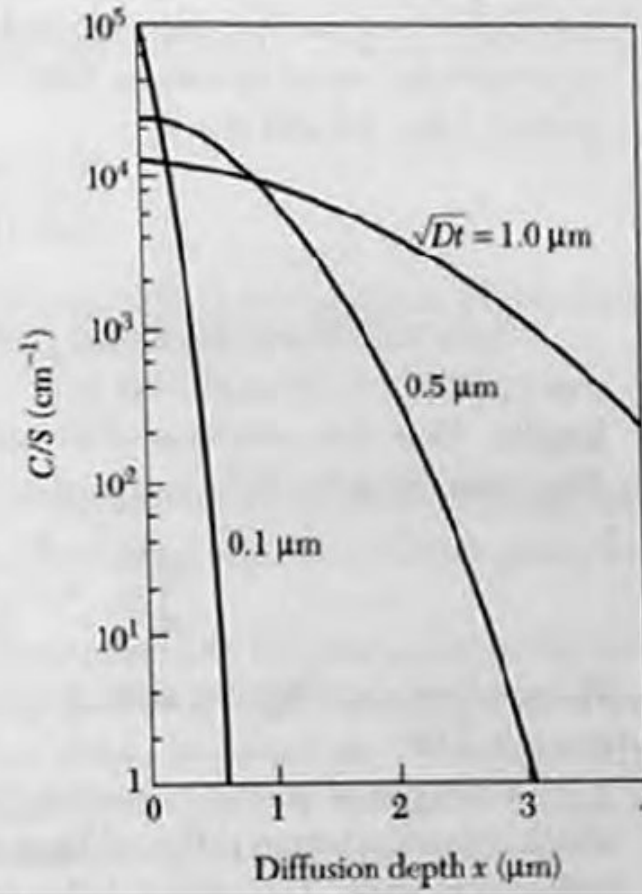
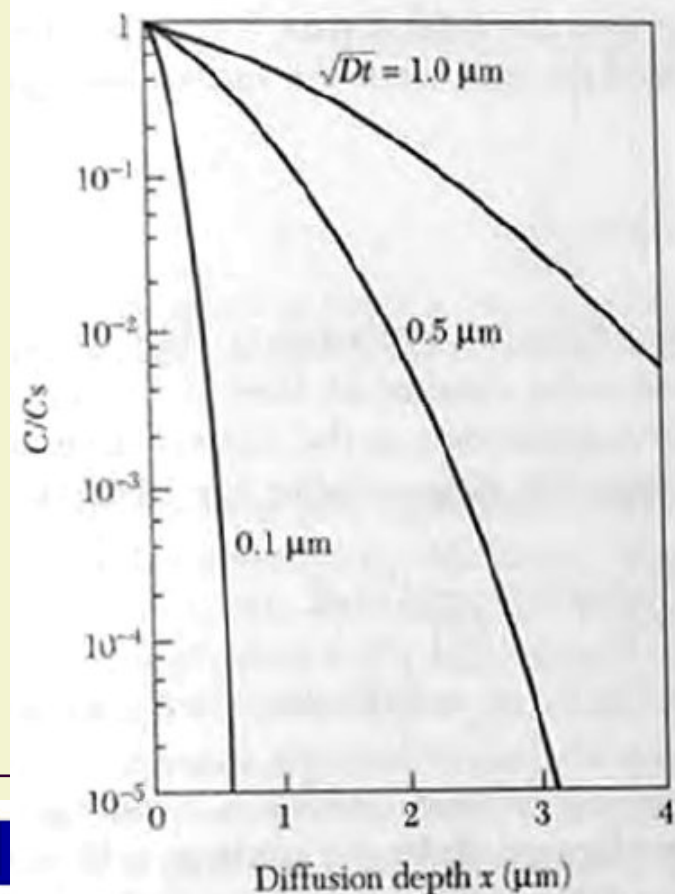
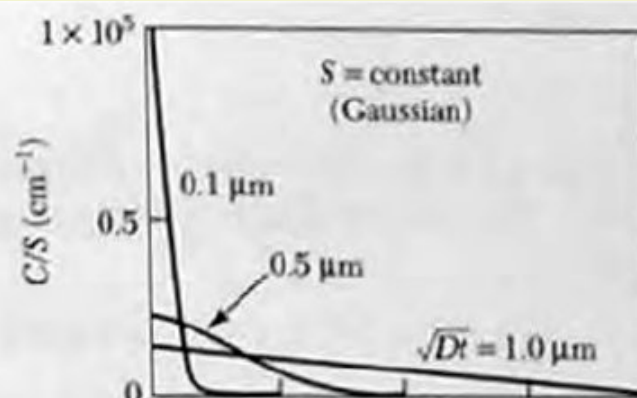
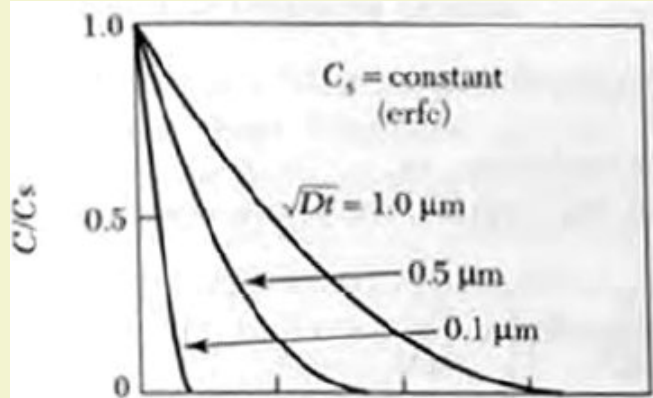
FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013



(a)

(b)

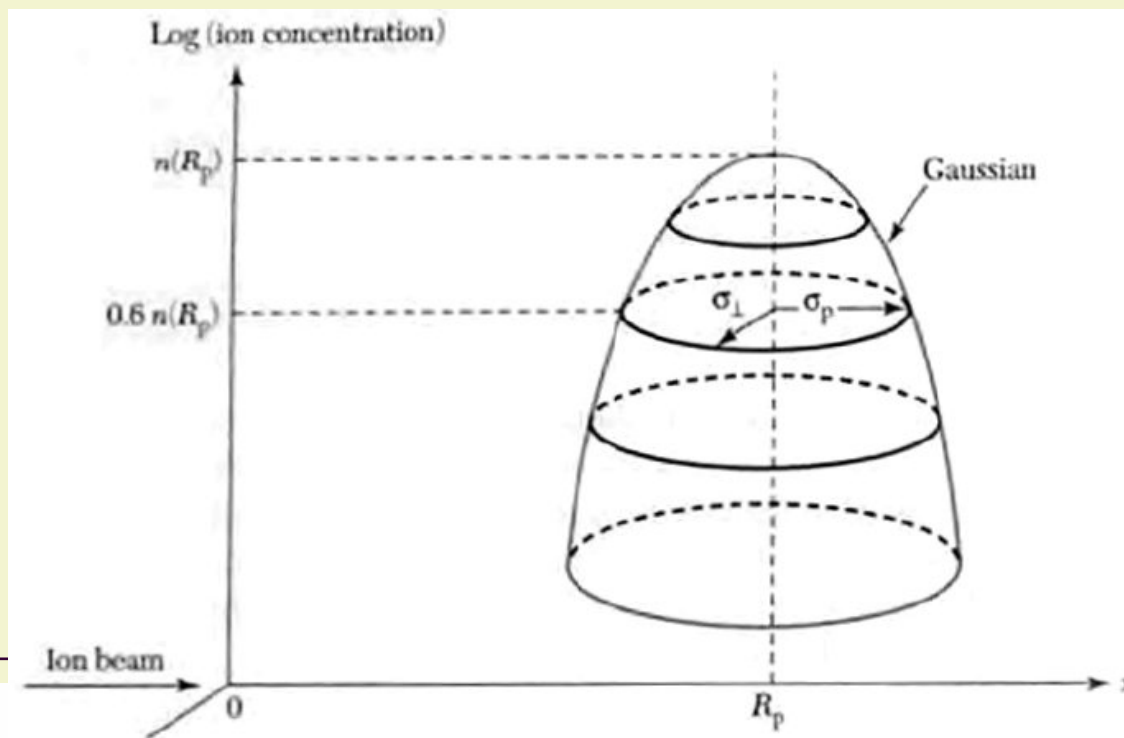
Evoluția în timp poate fi urmărită după parametrul Dt . De exemplu în cazul (a) se constată pătrunderea spre dreapta a graficului, adică creșterea concentrației de impurități. Același lucru se constată și în situația (b), dar cu scăderea concentrației la suprafață, față de cea din momentul inițial.

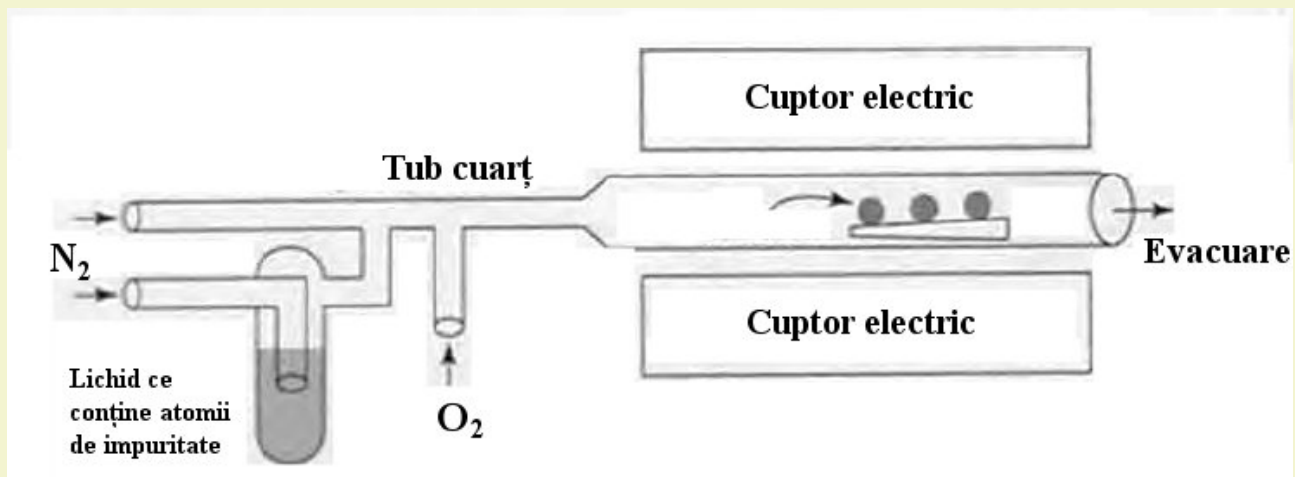
În cazul implantării ionice se obține tot o distribuție gaussiană centrată pe distanța R_p , distanța dorită ca țintă.

Concentrația de ioni la distanța x de suprafață este:

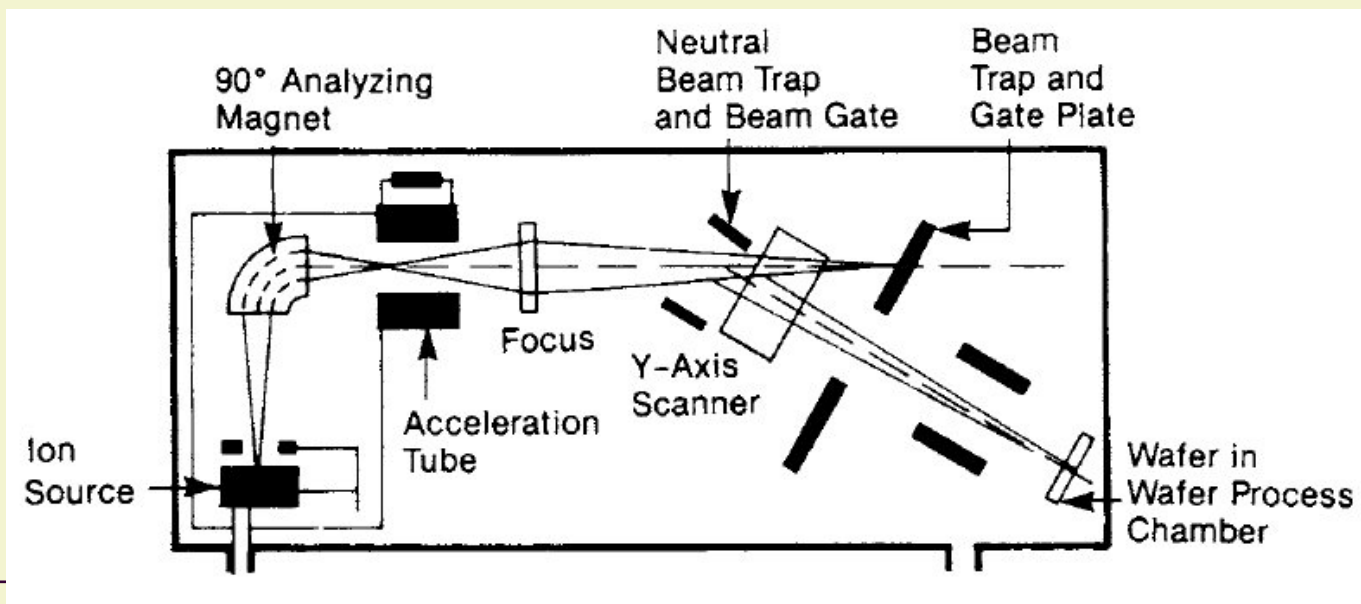
$$n(x) = \frac{S}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \exp\left[-\frac{(x-R_p)^2}{2\sigma_p^2}\right]$$

⑩ cu S doza de ioni pe unitatea de arie, iar σ_p un parametru de dispersie.

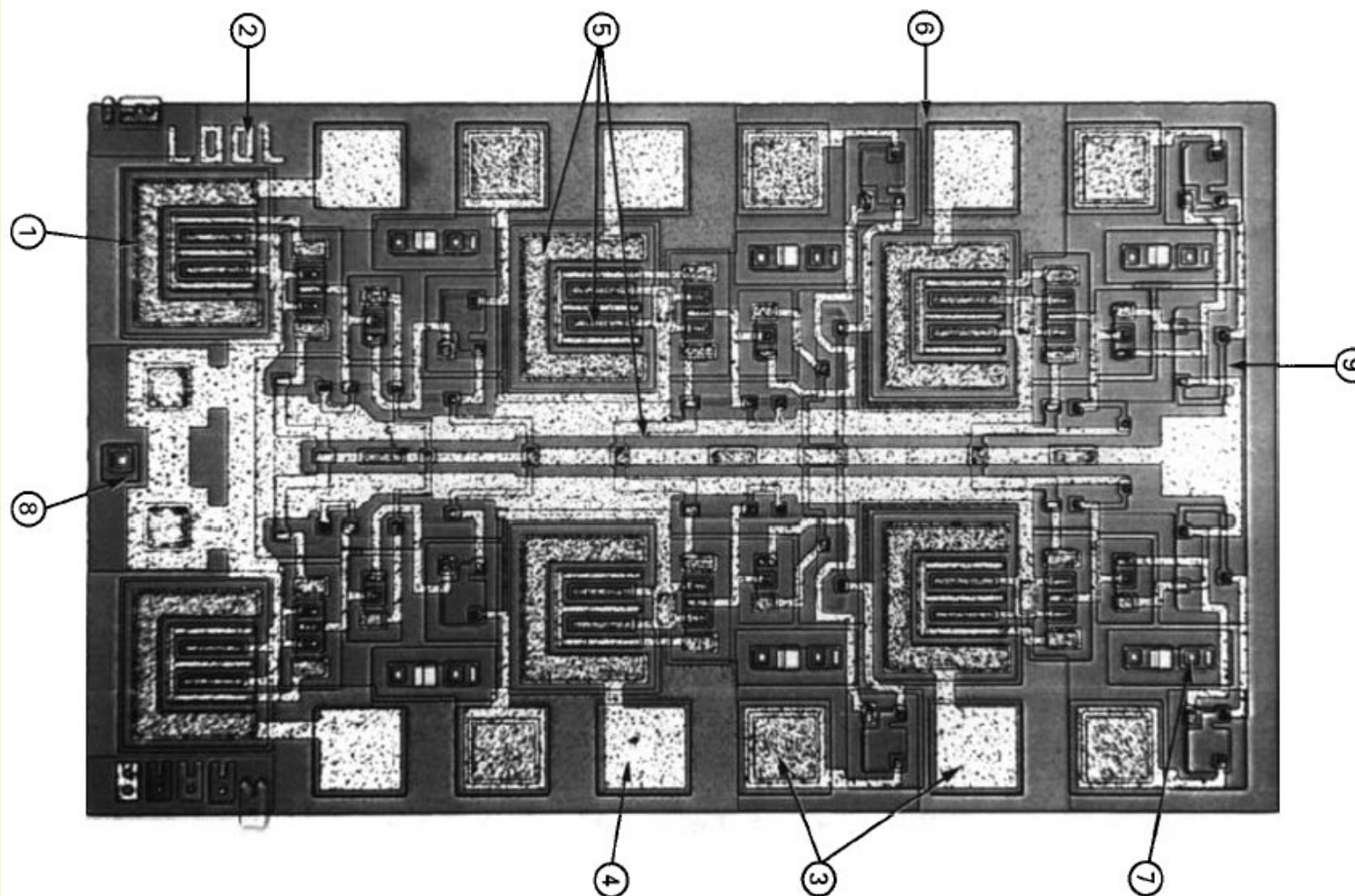




Schemă instalație difuzie

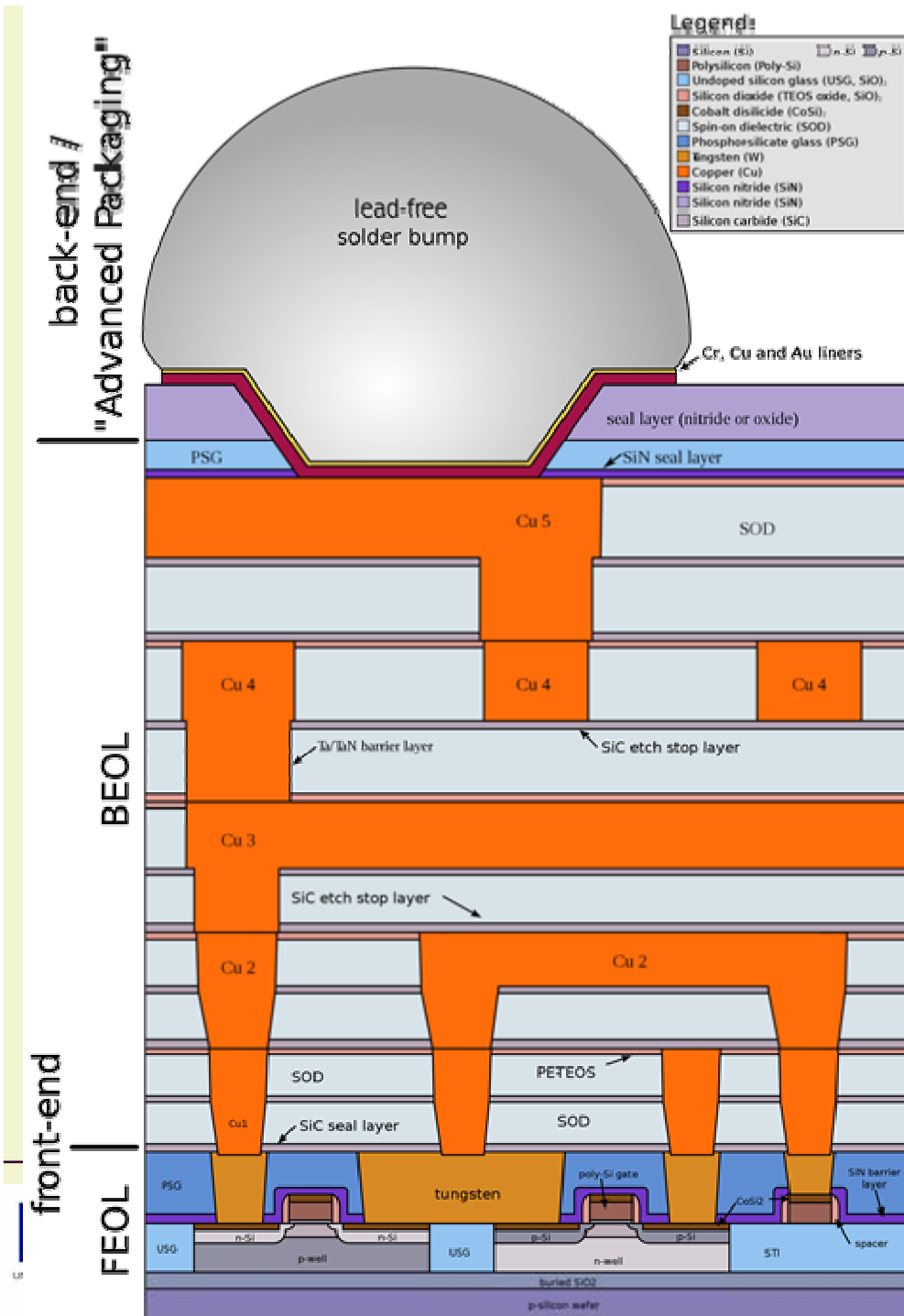


Schemă instalație implantare ionică



Exemplu de layout circuit analogic 1 – tranzistor, 2- număr de identificare circuit, 3,4 - pastile pentru wire bonding, 5- linii de metalizare, 6 –linii de separare, 7- componentă neconectată, 8- marcaje pentru alinierea măștii, 9 - rezistor





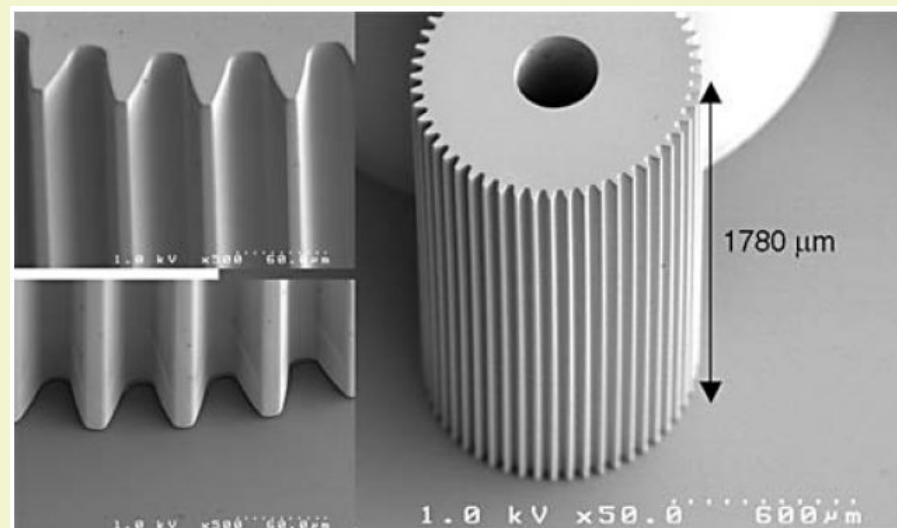
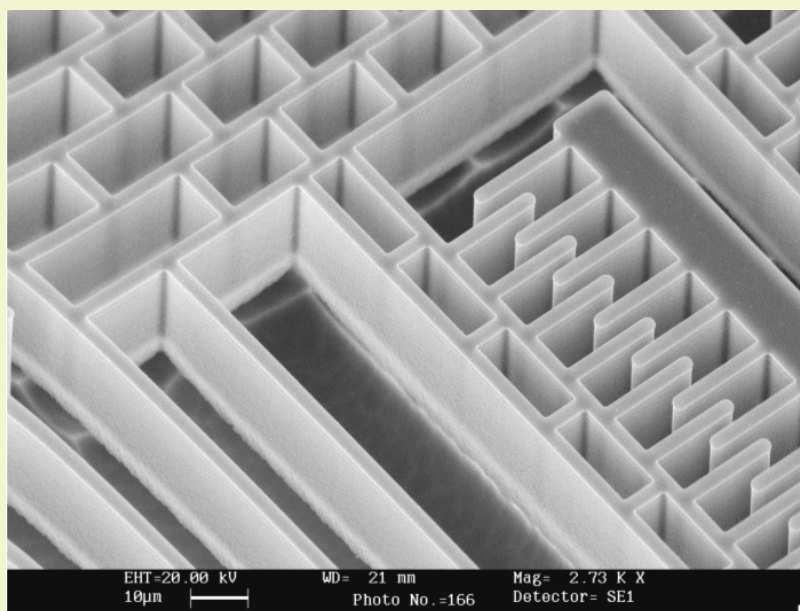
Circuitele integrate moderne utilizează depuneri succesive pentru a putea realiza interconectările complexe pe mai multe nivele.

ELAN

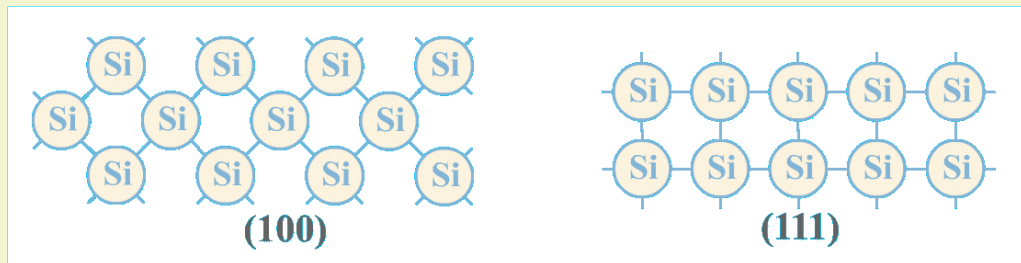
ulturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
 Investește în oameni !
 Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
 amul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013"

⑩ ALTE PROCESE PENTRU SILICIU- Realizarea MEMS

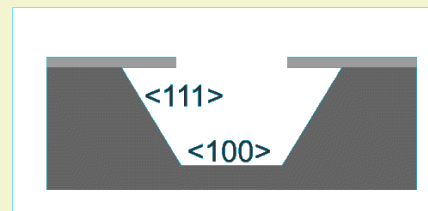
⑩ MEMS-Micro Electro-Mechanical Systems sunt realizate de regulă în siliciu prin operații similare celor pentru fabricația circuitelor integrate, numite în engleză *micromachining*. Se pot realiza diverși senzori dar și actuatori, micromotoare, micropompe, roți dințate, etc.



O mare parte din structurile MEMS se realizează pe baza corodării anizotrope. S-a constatat că anumiți agenți de corodare atacă selectiv siliciul, anumite direcții fiind atacate mai repede.

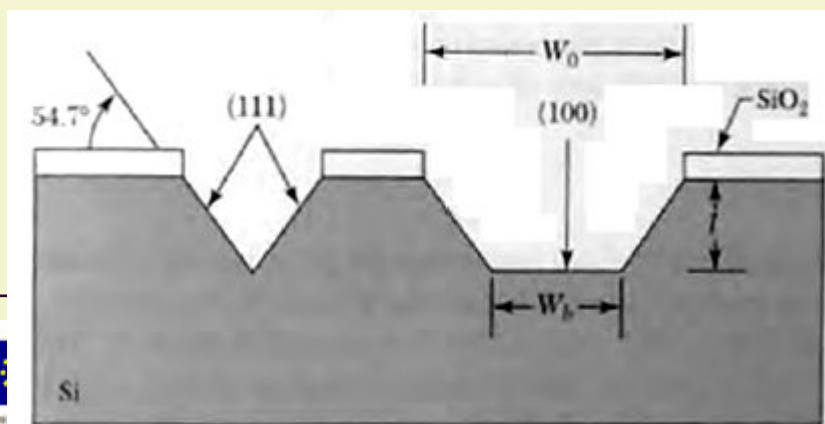


Corodare izotropă

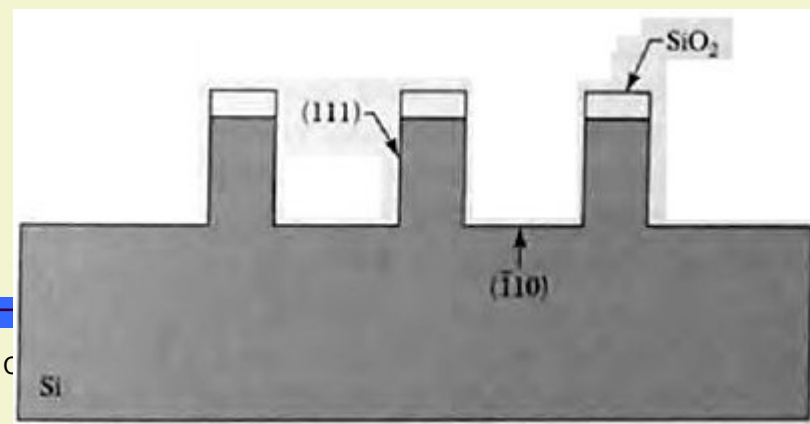


Corodare anizotropă

Într-o plachetă cu suprafețe (100) se obțin prin corodare anizotropă piramide de tip V sau U cu fețele fiind planele (111), fig. (a). Dacă se utilizează plachete cu fețele (110) atunci se obțin pereți drepecți paraleli cu planele (111), fig (b).



(a)



(b)



UNIUNEA EUROPEANĂ



MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI ȘI
PROTECȚIEI SOCIALE
AMFOSDRU



FONDUL SOCIAL EUROPEAN
POSDRU
2007-2013



INSTRUMENTE STRUCTURALE
2007-2013

ELAN

Promovarea Culturii Antreprenoriale: Adaptabilitate, Dinamism, Inițiativă în Industria Electronică
Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin
Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013