

## 6. TEHNICI DE LITOGRAFIE ȘI DE GRAVURĂ

Procedeele tehnologice de realizare a dispozitivelor semiconductoare discrete ca și a circuitelor integrate presupun realizarea de impurificări controlate, oxidări, depuneri sau gravări de straturi conductoare sau izolante, în zone bine localizate, pe suprafețele cipurilor din cadrul plachetei de siliciu. De asemenea, în scopul definirii geometriei structurilor semiconductoare este necesară gravarea (corodarea selectivă) unor straturi sau a unor zone de pe plachetele semiconductoare.

### 6.1. Litografia

Procedeele de transfer al desenului (motivelor) de pe un șablon (mască fizică sau virtuală) spre plachetă se numește *litografie* (de la cuvântul grec *lithos* = piatră). Atunci când transferul imaginii de pe șablon spre plachetă are loc prin intermediul luminii procesul poartă numele de *fotolitografie* sau proces fotolitografic. Procedeele litografice permit transferul formei într-un strat solid subțire (cum ar fi: nitrură, oxid, metal, etc.), urmărind un desen bine definit.

*Tehnica litografiei* oferă posibilitatea localizării pe placheta de siliciu a operațiilor de: oxidare, dopări, metalizări, urmărind zone foarte bine definite și pe suprafețe din ce în ce mai mici, în scopul de a realiza dispozitive electronice elementare și de a le interconecta pentru a obține microcircuite.

Clasificarea radiației, prin care are loc transferul structurii de pe șablon pe substratul de material semiconductor, se poate face așa cum se indică în figura 6.1.

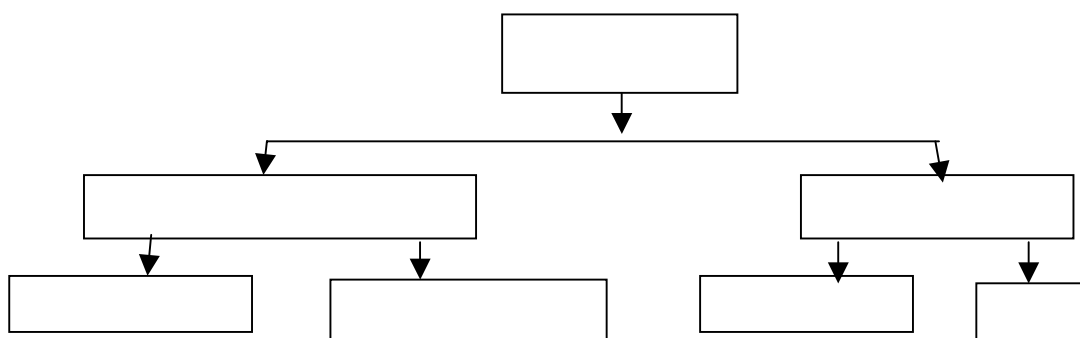


Fig. 6.1. Clasificarea radiațiilor folosite în litografie

#### 6.1.1. Principiul litografiei

Procedeele fotolitografice au la bază reacțiile fotochimice în diferite amestecuri de substanțe organice (lacuri sensibile la radiații numite și rezisturi), care sub acțiunea radiației sunt supuse unor procese de activare. Activarea cu ajutorul radiațiilor menționate (fig. 6.1), spre deosebire de radiația termică, are un caracter selectiv. În cazul radiației optice, cuantele luminoase sensibilizează numai anumite molecule din soluția de fotorezist (fotolac), lăsând intacte celelalte molecule.

În figura 6.2 se indică principiul procedurii fotolitografice în scopul transferării unui desen reprezentat pe un șablon (de exemplu un dreptunghi ce corespunde bazei unui tranzistor bipolar) pe suprafața plachetei din material semiconductor.

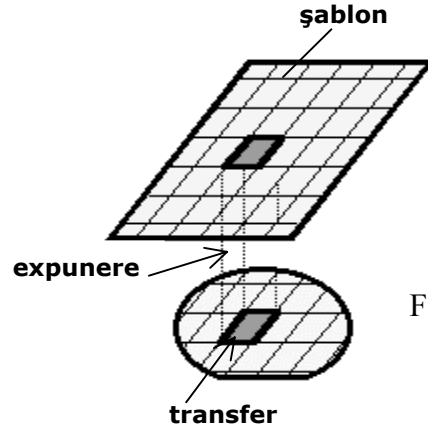


Fig. 6.2 Principiul transferului unui desen de pe mască pe plachetă

Rezoluția materialelor sensibile la radiații (a fotorezisturilor tip: 1-AZ 2400, 2-HPR 204, 3- AZ 1350) depinde de lungimea de undă  $\lambda$  a radiației incidente, așa cum se poate observa pe diagrama din figura 6.3.

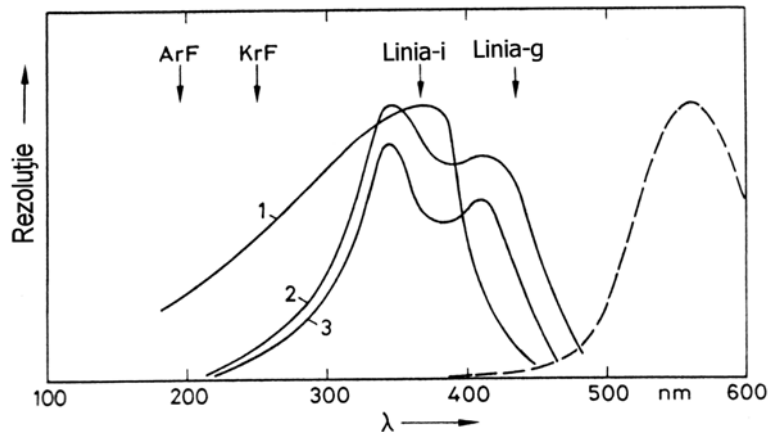


Fig. 6.3 Rezoluția spectrală a fotorezistului (1-AZ 2400, 2- HPR 204, 3- AZ 1350) în funcție de lungimea de undă a radiației

*Tehnica fotolitografică* folosește expunerea cu lămpi cu vapori de mercur, având componentele spectrale ale liniei *g* ( $\lambda=436$  nm) și linia *i* ( $\lambda=365$  nm). La noile sisteme de iluminare se folosesc radiațiile laser cu kripton *KrF* ( $\lambda=248$  nm) și argon *ArF* ( $\lambda=193$  nm). Pentru aceste radiații au fost realizate substanțe fotosensibile (fotolacuri) speciale.

La *röntgenlitografie* se folosesc radiații cu spectrul radiației în domeniul lungimilor de undă  $\lambda=0,4 \dots 5$  nm. Pentru această metodă este necesară o tehnică deosebită de mascare și un rezist special.

La *electronlitografie* se folosesc fascicule de electroni, care sunt accelerate cu tensiuni în domeniul  $U_a=10 \div 200$  kV. Lungimea de undă (De-Broglie) corespunzătoare acestor radiații se situează la valori  $\lambda \leq 0,01$  nm. Procesele de litografie

cu fascicol de electroni se caracterizează prin precizii foarte ridicate. Acestea se folosesc pentru fabricarea măștilor și numai în cazuri speciale la litografia fără mască.

*Ionolitografia* (litografia ionică), în diferite variante, se situează încă în fază de cercetare.

### 6.1.2. Tehnologia fotolitografiei

Etapele procesului fotolitografic pentru localizarea unor "ferestre" pe suprafața plachetei semiconductoare sunt:

- curățirea și degresarea substratului (cu solvenți organici);
- depunerea stratului de fotorezist pe suprafața plachetei oxidate în prealabil;
- uscarea fotorezistului;
- poziționarea fotoșablonului și expunerea;
- dezvoltarea și argăsirea termică a stratului de fotorezist;
- corodarea chimică a stratului de oxid ( $SiO_2$ ) prin ferestrele făcute în fotorezist;
- îndepărtarea stratului de fotorezist.
- spălarea plachetelor; se face de mai multe ori pentru îndepărtarea tuturor firicelilor de praf, după care urmează degresarea cu solvenți organici (tricloretilenă, triclorură de carbon, etc.), spălarea cu acetonă, alcool și în ultima fază cu apă deionizată.

În figura 6.4 se indică principalele etape ale procesului fotolitografic folosit la localizarea zonelor ce se impurifică ("ferestre"), în cadrul tehnologiei planare.

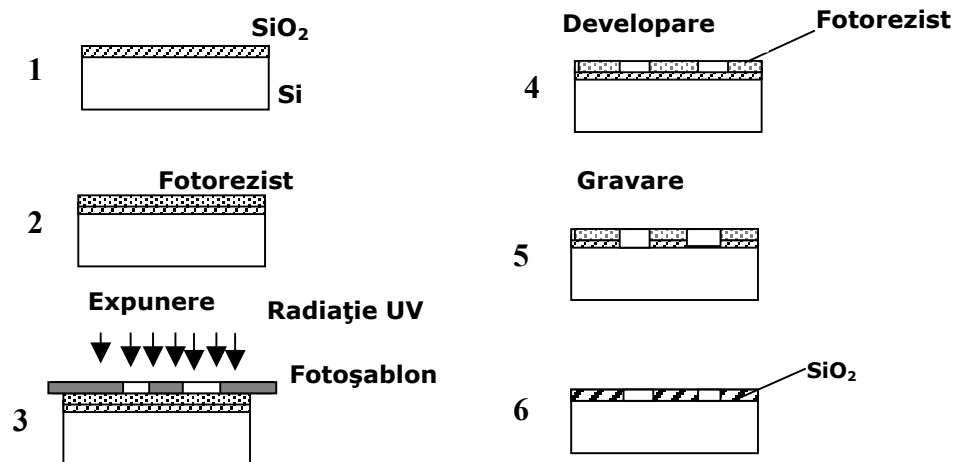


Fig. 6.4 Principalele etape ale unui proces fotolitografic

În tehnica fotolitografiei se folosesc substanțele fotosensibile (fotorezist) care se expun radiației în scopul transferului imaginii de pe mască pe plachetă și substanțe de dezvoltare.

### 6.1.2.1. Rezisturi

Denumirea de *rezist* a stratului provine de la faptul că este rezistent la acțiunea agenților de corodare utilizați în gravarea diferitelor straturi pe plachetă. Rezisturile se prezintă sub forma unei rășini sensibile la radiația incidentă. În funcție de modul în care rășina își modifică proprietățile, ea poate fi: pozitivă sau negativă.

În cazul folosirii unei rășini pozitive desenul de pe șablon se va regăsi de aceeași formă pe stratul gravat pe plachetă. De exemplu: unei zone opace de pe mască îi va corespunde pe plachetă o zonă similară, negravată. În cazul utilizării rășinilor negative se obține pe plachetă un desen complementar celui practicat pe mască (unei zone opace de pe mască îi corespunde pe plachetă o zonă gravată).

*Materialele fotorezistive* sunt sisteme multicomponente care au la bază un polimer în care se adaugă diferite substanțe în scopul obținerii următoarelor calități necesare procesului fotolitografic:

- sensibilitate mare într-un domeniu spectral;
- stabilitate la acțiunea unor agenți chimici;
- obținerea unui anumit coeficient de vâscozitate și de aderență la substrat.

Fotorezisturilor folosite în practică au compoziții bine precizate, acestea având la bază: alcoolul polivinilic, poliesteri, poliamide, polivinil-acetați, rășini epoxidice, etc. Fotorezisturile se caracterizează prin următorii parametri: randamentul cuantic, fotosensibilitatea, puterea de rezoluție, stabilitatea la acțiunea agenților chimici, etc.

*Randamentul cuantic*  $\gamma_c$  stabilește predispoziția moleculelor la transformări fotochimice. Acest randament se evaluează prin raportul dintre moleculele care au interacționat cu lumina  $N_L$  și numărul de fotoni absorbiți  $N_F$ :

$$\gamma_c = \frac{N_L}{N_F} \quad (6.1)$$

Conform legii lui Epstein fiecare cuantă de lumină ( $h\nu$ ) produce excitarea unei singure molecule. De aici ar rezulta că randamentul cuantic al unui produs fotochimic este egal cu unitatea. În realitate randamentul cuantic  $\gamma_c$  al unui produs fotochimic este diferit de unitate ( $\gamma_c \neq 1$ ), datorită reacțiilor secundare care au loc după actul primar al absorbției.

*Fotosensibilitatea*  $S_h$  este un parametru invers proporțional cu cantitatea de energie luminoasă necesară pentru a obține efect fotochimic în stratul de fotorezist la o anumită grosime  $h$ :

$$S_h = \frac{1}{E \cdot t_{ex}} \quad (6.2)$$

unde:

$E$  - iluminarea;

$t_{ex}$  - timpul de expunere.

Efectul fotochimic constă în scăderea (fotorezist negativ) sau creșterea (fotorezist pozitiv) solubilității regiunilor expuse la iradiere. Majoritatea materialelor fotosensibile sunt sensibile în domeniul ultraviolet al spectrului, în domeniul lungimii de undă  $\lambda=300\div 500$  nm.

Puterea de rezoluție caracterizează dimensiunea minimă a imaginii care se poate obține, respectiv numărul maxim de linii care se pot trasa perpendicular pe o anumită distanță. Se obișnuiește să se indice o putere de rezoluție a fotorzistului și o putere de rezoluție a procesului fotolitografic. De exemplu, puterea de rezoluție a fotorzistului poate fi 1000 linii/milimetru, iar a procesului fotolitografic de numai 500 linii/milimetru. Puterea de rezoluție a fotorzistului este limitată de granulație și de operațiile tehnologice. Puterea de rezoluție a procesului fotolitografic este limitată de o serie de procese fizice cum ar fi: difracția, dispersia, reflexia luminii în sistemul format din substrat, fotorezist și mască.

Stabilitatea la acțiunea agenților chimici caracterizează rezistența materialului la acțiunea acizilor (HF, HNO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) și a bazelor (NaOH, KOH, etc) la procesele de corodare chimică sau la procesele de depunere electrolică. Factorul de corodare chimică  $k_j$  se definește prin relația:

$$k_f = \frac{h}{x} \quad (6.3)$$

unde:  $h$  - grosimea stratului corodat;

$x$  - adâncimea de pătrundere prin corodare.

Rezistența materialului la acțiunea acizilor și a bazelor este determinată atât de natura polimerului cât și de substanțele de adaos. S-a constatat că o bună rezistență a fotorezistului se obține dacă se adaugă rășini epoxidice sau materiale pe bază de cauciuc. Stabilitatea fotorezistului la agenți chimici depinde nu numai de compoziția chimică, dar și de grosimea și de uniformitatea lui.

Fotorezisturile pozitive se caracterizează printr-o rezoluție mai bună decât cele negative, deoarece la acestea nu mai apare efectul de aureolare. Alegerea unui tip sau altul de fotorezist depinde de scopul procesului fotolitografic.

Depunerea stratului de fotorezist se face prin:

- imersie (cufundarea substratului) - procedeu puțin folosit;
- centrifugare - procedeu des folosit la care grosimea peliculei este invers proporțională cu viteza unghiulară de centrifugare;
- pulverizare - procedeu des folosit datorită avantajelor pe care le prezintă în asigurarea unei grosimi uniforme și controlabile a stratului depus.

În cazul centrifugării, rășina este uniformizată (întinsă) pe plachetă prin folosirea un disc turnant care se rotește (fig. 6.5).

Placheta se fixează pe disc prin aspirare. Prin reglarea vitezei de rotație și a accelerației se obține întinderea uniformă a rășinii pe plachetă.

Uscarea fotorezistului are loc în două etape, care cuprind:

- evaporarea lentă a solventului la temperatura ambiantă ( $\theta=20^{\circ}\text{C}$ ) cu o durată  $t=10\div 15$  minute;
- fixarea stratului la temperatura  $\theta=100\div 150^{\circ}\text{C}$  cu o durată  $t=20\div 60$  minute.

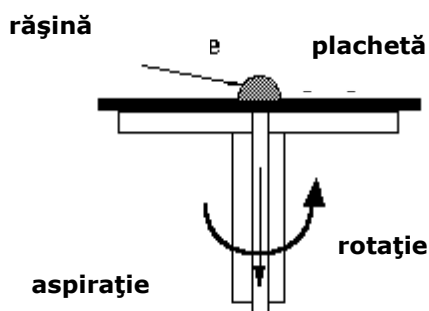


Fig. 6.5 Principiul depunerii rășinii fotosensibile prin centrifugare

Prin uscare, rășina se durifică, pentru a rezista atacului chimic ulterior cu acid fluorhidric. Prin gravarea umeda cu  $HF$  este atacat stratul de oxid neprotejat de rășina solidificată. În faza următoare rășina este îndepărtată de pe suprafața plachetei folosind un solvent (spre exemplu acetona). În unele cazuri se aplică gravarea cu plasmă de oxigen. Această metodă se aplică în mod curent în tehnologiile submicronice, unde rășina este folosită ca strat de mascare la implantarea ionică.

#### 6.1.2.2. Șabloane

Șabloanele sau măștile sunt suportți fizici pe care se realizează modelul (motivul) care urmează să se transfere pe substratul de material semiconductor. Materialul și modul de construcție al șabloanelor sunt în funcție de caracteristicile radiației folosite pentru transfer.

*Fotomasca* este realizată dintr-o placă plană din sticlă specială și se folosește pentru transpunerea modelului prin transparență pe suprafața plachetei de material semiconductor.

Fotomăștile trebuie să îndeplinească următoarele cerințe:

- putere mare de rezoluție; se ajunge la rezoluții (elementele minime ale desenului) mai mici de  $0,1\mu\text{m}$ .
- număr mare de imagini pe suprafața de lucru; în funcție de complexitate, pe suprafața măștii pot fi reprezentate între  $10\div 10^4$  de componente identice;
- precizie mare la reprezentarea elementelor din desen și a distanței dintre ele;
- planeitate bună a feței de lucru;
- precizie mare la poziționarea succesivă a setului de fotoșabloane necesare pentru realizarea dispozitivelor cu mai multe straturi.

Fotomăștile sunt de două feluri: pozitive și negative. La cele pozitive elementele circuitelor integrate sunt reprezentate prin regiuni opace la radiația activă pe un fond transparent, iar la cele negative configurația elementelor de circuit este realizată din regiuni transparente pe un fond opac.

*Realizarea fotomăștii* are loc prin transpunerea desenului dispozitivului (layout) pe pelicula existentă pe fotoșablon. Desenul se obține prin mărirea originalului de 100-

1000 ori, iar apoi are loc transferarea sa pe sticlă acoperită cu un lac netransparent, cu ajutorul unui coordonator. Transpunerea pe fotoșablon a desenului se face prin micșorarea de 500 ori. În acest fel precizia dimensională este mai bună de  $0,5 \mu\text{m}$ .

*Micșorarea dimensiunilor* se realizează în mai multe trepte. Se folosesc două sisteme de reducere: una pentru obținerea imaginilor relativ mari cu rezoluție medie, iar alta pentru obținerea imaginilor mici cu putere de rezoluție foarte bună. În afară de acestea mai este necesară o instalație pentru multiplicarea imaginilor pentru obținerea fotoșabloanelor finale sub forma unei matrice.

Plăcile fotografice utilizate pentru obținerea imaginilor intermediare a fotoșabloanelor trebuie să aibă o rezoluție mare și un contrast bun. Granulația substanței fotosensibile înglobate în gelatină trebuie să aibă dimensiuni cuprinse între  $0,01$  și  $0,1 \mu\text{m}$ . Straturile fotosensibile depuse pe plăci de sticlă sau metilmetacrilat trebuie să aibă grosimi de  $5 \div 7 \mu\text{m}$ . Fotoșabloanele se realizează în următoarele variante: cu emulsii, cu strat metalic și cu straturi de oxizi metalici.

- a) *Fotoșabloanele cu emulsii* se realizează relativ ușor, dar prezintă o serie de inconveniente:
  - sensibilitate la acțiunile agenților chimici;
  - rezistență mecanică redusă.
- b) *Fotoșabloanele cu pelicule metalice* se obțin prin corodarea unui strat de oxid metalic depus prin evaporare în vid pe suporturi de sticlă optică. În cazul straturilor subțiri din crom desenele se obțin prin tehnica fotolitografică obișnuită.

Fotoșabloanele cu peliculă de crom prezintă următoarele avantaje:

- rezistență mecanică mult mai bună decât a fotoșabloanelor cu emulsii (de aproximativ 100 ori mai bună);
- rezistență bună la solvenți organici;
- putere de rezoluție mult mai mare decât a măștilor cu emulsii;
- prin corodare chimică se obțin margini netede.

Obținerea fotoșabloanelor cromate a însemnat un progres în tehnica fotolitografică. Acestea prezintă și unele dezavantaje:

- reflexia parazită a luminii pe stratul de crom;
- poziționarea nu se poate controla vizual.

- c) *Fotoșabloanele cu pelicule de oxizi* se obțin în mod asemănător cu a peliculelor metalice. Rezultate bune se obțin cu pelicule de oxid de fier ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) care se depun pe suportul transparent (sticlă specială) prin evaporarea în vid sau prin descompunerea termică a pentacarbonatului de fier  $\text{Fe}(\text{CO})_5$  în atmosferă de oxigen.

Masca de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  se caracterizează prin:

- grosimea stratului de este de aproximativ  $0,25 \mu\text{m}$ ;
- corodarea  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  se face cu acid fosforic la temperatura de  $50^\circ\text{C}$ ;
- poziționare mai simplă și mai precisă decât la fotoșabloanele cromate.

- d) *Măștile virtuale* reprezintă rezultatul unor programe specializate de proiectare asistată pe calculator. Imaginea grafică se poate transfera din memoria calculatorului spre dispozitivul de baleaj (linie cu linie) al sistemului (de exemplu: litografia cu fascicol de electroni).

### 6.1.3. Expunerea

Expunerea plachetelor semiconductoare pentru transferul pe acestea a desenelor de pe șablon se poate realiza prin: contact, proximitate și prin proiecție. Fiecare dintre aceste procedee prezintă avantaje și dezavantaje.

*Expunerea prin contact* asigură, teoretic, cea mai bună definiție a desenului, dar conduce la deteriorarea progresivă a măștii după fiecare operație de mascare, datorită frecării de plachetă.

*Expunerea prin proximitate* are loc fără un contact dintre mască și plachetă. Rezoluția este mai redusă datorită difracției luminii.

*Proiecția* conduce la o definiție optică mai puțin bună, datorită efectului de difracție a luminii. Prin proiecție însă se pot efectua micșorări ale desenului pe cale optică. În acest caz, fabricarea măștii este mai simplă, deoarece nu pretinde realizarea unei definiții pe mască egală cu definiția desenului care se va transpune pe plachetă.

În figura 6.6 se prezintă caracteristicile de transfer ale imaginii de pe mască în funcție de modul de expunere. Aparent, așa cum rezultă din figura 6.6 proiecția constituie un caz mai defavorabil, dar datorită faptului că răspunsul rășinii la lumină este neliniar, se poate ameliora definiția desenului reglând cantitatea de fotoni transmisă (intensitatea luminoasă și timpul de expunere).

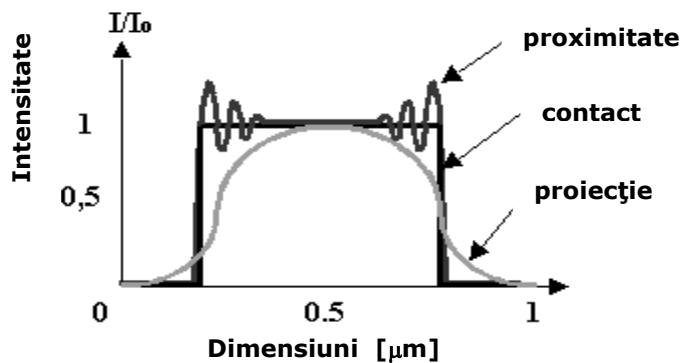


Fig. 6.6 Caracteristicile de transfer ale imaginii în funcție de modul de expunere

În figura 6.7 se prezintă construcția unui dispozitiv de expunere prin contact. Același principiu este folosit și la expunerea prin proximitate, dar fără ca între mască și plachetă să existe contact. După ce masca este aliniată în raport cu placheta, sursa luminoasă se deplasează deasupra ansamblului. Expunerea durează de la câteva zecimi de secundă la câteva secunde.

La expunerea prin *proiecție cu fotorepetiție* proiecția se realizează pe sectoare, adică cip cu cip sau bloc cu bloc de mai multe cipuri. În acest caz, se cere o poziționare foarte precisă a plachetei în raport cu masca. O bună aliniere a desenului se obține folosind un sistem de analiză de imagine și de poziționare a port-substratului



prin interferometrie LASER. Prin acest mod de expunere, folosit în cazul unei plachete cu diametrul de 200 mm, timpul necesar expunerii este mai mare (de ordinul minute pentru fiecare nivel de mascare).

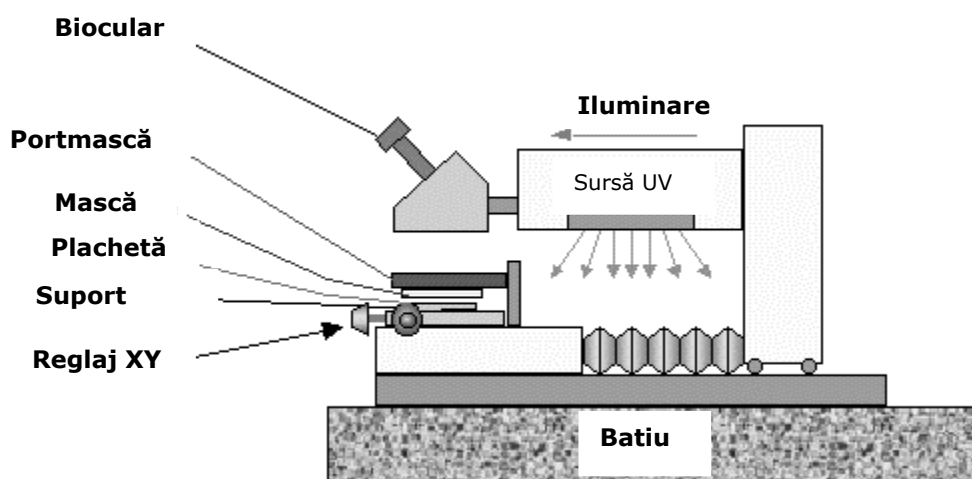


Fig. 6.7 Principiul expunerii prin contact

Procedeele fotolitografice clasice, folosind lumina din spectrul vizibil (în apropiere de ultraviolet) nu pot obține definiții ridicate, așa cum se cer în noile tehnologii de realizare a circuitelor integrate LSI și VLSI. Limitarea este cauzată, în principal, de fenomenul de difracție. Astfel, reducerea dimensiunilor desenelor necesită punerea la punct de procedee noi, cum ar fi litografia cu raze X sau cu fascicul de electroni.

Litografia cu fascicul de electroni este un procedeu deosebit, dar care are totuși unele limitări. Aceste limitări se datorează în primul rând duratei mari necesare pentru expunere, aceasta deoarece explorarea desenului se realizează linie cu linie (fig. 6.8).

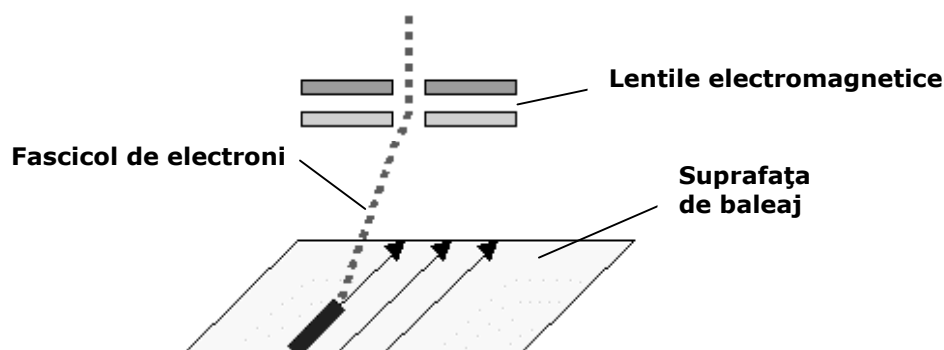


Fig. 6.8 Principiul gravării cu fascicul de electroni prin baleaj

Fasciculul este modulată, iar baleiajul este realizat electronic. Determinarea duratei necesare transferului unei structuri de pe mască pe suprafața de baleaj se poate urmări în exemplul de mai jos.

**Exemplu:**

Să se determine timpul necesar pentru expunerea unor desene pe suprafața de  $100 \text{ cm}^2$  ( $10 \times 10 \text{ cm}$ ) a unei plachete de siliciu de către un fascicol de electroni cu diametrul de  $1 \text{ }\mu\text{m}$ , dacă frecvența sa de baleaj  $f_b = 10 \text{ Hz}$ .

*Rezolvare:*

Timpul de expunere  $T_{exp}$  se poate determina prin multiplicarea duratei unei linii  $T_b$  cu numărul de linii  $N_L$  corespunzătoare explorării suprafeței:

$$T_{exp} = N_L \cdot T_b$$

- numărul de linii  $N_L$  descrise de fasciculul de electroni:

$$N_L = \frac{\text{latimea de baleaj}}{\text{diametrul fascicul}} = \frac{0,1}{1 \cdot 10^{-6}} = 1 \cdot 10^5$$

- duratei trasării unei linii  $T_b$  corespunde cu perioada baleajului:

$$T_b = \frac{1}{f_b} = 0,1 \text{ s, iar prin înlocuire în relația timpului de expunere } T_{exp} \text{ rezultă:}$$

$$T_{exp} = N_L \cdot T_b = 1 \cdot 10^5 \cdot 0,1 = 10^4 \text{ s} \approx 2 \text{ ore și } 47 \text{ minute}$$

Acest timp este prea lung, cu atât mai mult, cu cât el corespunde gravării unei singure plachete.

Avantajele de care beneficiază litografia cu fascicul de electroni sunt următoarele:

- utilizarea unei măști virtuale (mască informatică) obținută la calculator ca rezultat al unui program specializat;
- realizarea pe aceeași plachetă de circuite integrate complet diferite (pentru clienți diferiți); se pot realiza "circuite multi - proiect" (CMP).

Tehnica litografiei electronice este bine adaptată la fabricația în serii mici. Sistemul folosit la realizarea litografiei electronice (fig. 6.9) este foarte costisitor, el trebuind să elimine orice vibrație mecanică a plachetei cu amplitudinea superioară unei zecimi de micron. Pentru aceasta este necesar un dispozitiv antiseismic, compensat la variații de temperatură și protejat de orice particulă de praf. Fasciculul de electroni, care este asigurat de către filamentul incandescent, este focalizat și baleiat de către *lentila electrostatică*.

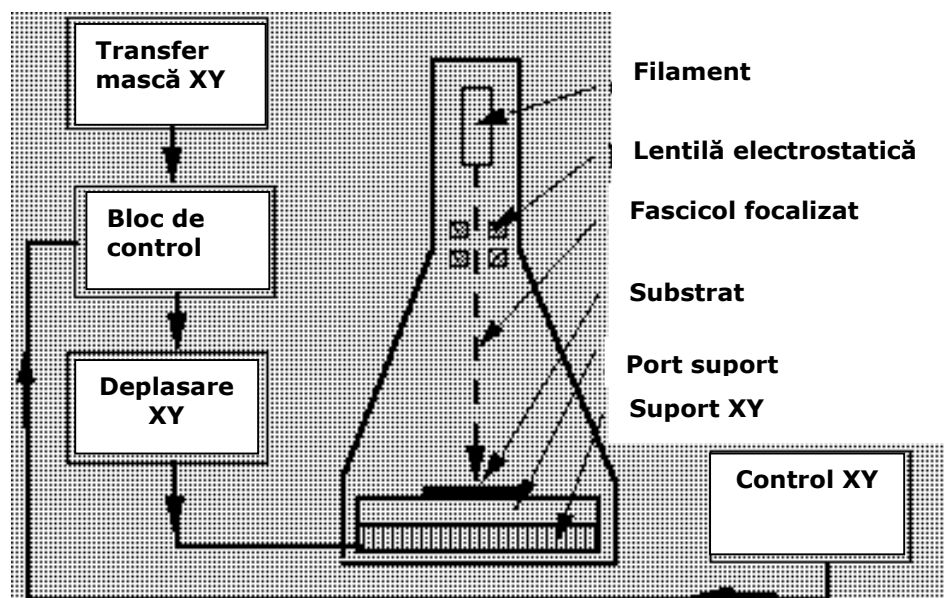
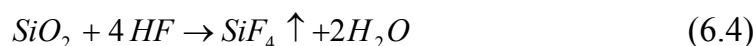


Fig. 6.9 Reprezentarea schematică a unui sistem de litografie cu fascicul de electroni

Modularea fascicolului electronic se realizează de către blocul de *transfer mască XY*. După accelerare, fasciculul de electroni ajunge la substratul de material semiconductor fixat pe placa port suport, care după fiecare linie de baleaj realizează deplasarea suportului XY.

*Developarea* constă în îndepărtarea straturilor de fotorezist expuse la radiații (fotorezist pozitiv) sau îndepărtarea straturilor de fotorezist neexpuse la radiații (fotorezist negativ).

*Corodarea* are rolul de a îndepărta selectiv porțiunile de oxid neprotejate. Agentul care realizează corodarea este acidul fluorhidric. Reacția care are loc în acest caz este:



Tetrafluorura de siliciu, care rezultă în urma corodării fiind gaz se degajă.

#### 6.1.4. Direcții de perfecționare a litografiei

Principalele tendințe ale tehnologiei litografice au în vedere următoarele cerințe:

- reducerea costurilor șabloanelor,
- micșorarea dimensiunilor dispozitivelor și circuitelor realizate;
- creșterea rezoluției;
- creșterea preciziei și reducerea timpilor de poziționare.

Aceste direcții de perfecționare ale tehnologiei sunt strâns corelate între ele. Creșterea puterii de rezoluție a procesului litografic permite micșorarea dimensiunilor dispozitivelor și circuitelor realizate și creșterea preciziei.

### Creșterea puterii de rezoluție

Creșterea puterii de rezoluție a procesului litografic se poate obține prin scăderea lungimii de undă a radiației folosite în procesul de transfer a modelului realizat pe șablon. Conform fizicii optice rezultă că dimensiunea minimă  $x_{min}$  a fascicolului unei radiații optice este proporțională cu lungimea de undă  $\lambda$  a radiației și invers proporțională cu apertura  $A$  a sistemului optic:

$$x_{min} \cong \frac{\lambda}{A} \quad (6.5)$$

La sistemele optice perfecționate  $A=1,66$  și prin utilizarea unei surse de radiații ultraviolete ( $UV$ ) cu  $\lambda=360$  nm cu relația (6.5) se obține puterea de rezoluție  $x_{min}=0,225$   $\mu\text{m}$ .

În cazul practic, puterea de rezoluție cu radiații  $UV$  este cu până la un ordin de mărime mai mare, situându-se între 1 și 2  $\mu\text{m}$ .

Creșterea în continuare a rezoluției s-a obținut prin reducerea lungimii de undă a radiației. În tehnologia planară au căpătat răspândire expunerile cu radiații Röntgen, fascicule de electroni sau de ioni. În funcție de natura radiațiilor folosite în expunerea rezistului, ansamblul de procese folosite la realizarea de circuite integrate poartă numele de röntgenolitografie, electronolitografie sau ionolitografie.

În cazul proceselor electronolitografice puterea de rezoluție se determină tot pe baza relației (6.5). Lungimea de undă echivalentă a fluxului de electroni  $\lambda$  [ $\oplus$ ] accelerați în câmp electric la diferența de potențial  $U$  [V] se determină cu relația:

$$\lambda = \sqrt{\frac{150}{U}} \quad (6.6)$$

*De exemplu:*

Considerând tensiunea de accelerare  $U=15 \cdot 10^3$  V, cu relația (6.6) rezultă lungimea de undă echivalentă  $\lambda = 0,1 \oplus$ .

Această valoare fiind mult mai mică decât lungimea de undă a radiației  $UV$  permite definirea unor structuri cu rezoluție mult mai ridicată.

### Corodarea anizotropă

Una din căile de perfecționare a litografiei, în scopul creșterii gradului de integrare, constă în utilizarea unor tipuri noi de substanțe de corodare cu *acțiune anizotropă*. Viteza de corodare chimică a materialelor semiconductoare depinde atât de natura decapantului (soluției de corodare) cât și de orientarea cristalografică. Bazându-se pe acest principiu s-a realizat un procedeu de izolare a elementelor integrate printr-un strat de aer (izolare dielectrică).

Etapele *procesului de izolare anizotropă* sunt următoarele:

- deschiderea ferestrelor în placheta semiconductoare (în stratul de  $\text{SiO}_2$ ) prin expunerea acesteia prin fotoșblon și corodarea stratului de  $\text{SiO}_2$  (fig. 6.10.a);

- corodarea cu decapant anizotrop (fig. 6.10.b);
- oxidarea părții corodate;
- depunerea prin creștere epitaxială a unui strat de siliciu policristalin peste stratul de oxid (fig. 6.10.c);
- șlefuirea plachetei pe partea opusă față de cea pe care s-a realizat creșterea până la straturile îngropate.

Deoarece viteza de corodare în stratul (100) este de aproximativ 30 de ori mai mare decât în stratul (111) (fig. 6.10) în placheta de siliciu se creează adâncituri în formă de V a căror adâncime depinde de lățimea ferestrei practicate prin șablon. Acest procedeu a permis atingerea unor tensiuni de lucru de până la 300V la distanțe de ordinul a 10  $\mu\text{m}$  în structura semiconductoare a circuitelor integrate [3].

Tranzistoarele bipolare *nnp* și *pnp* izolate prin acest procedeu funcționează la frecvențe mari (sute de MHz) și fabricarea lor necesită un număr mic de procese de difuzie.

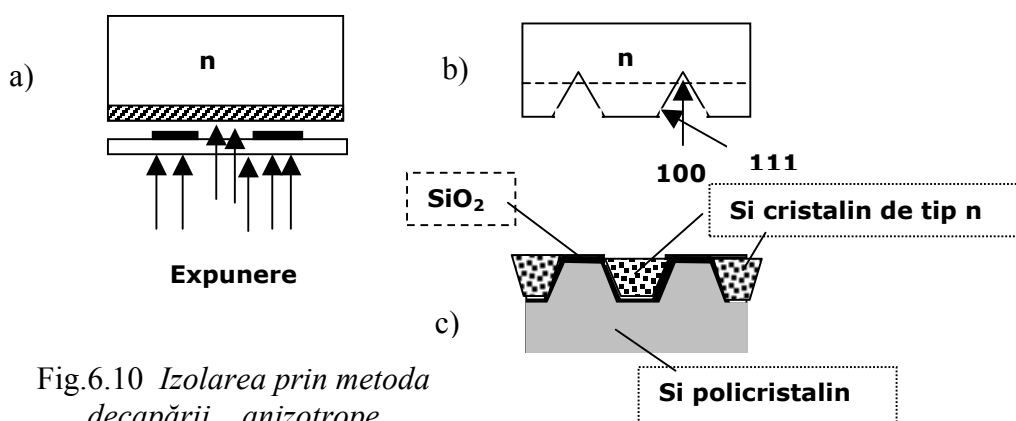


Fig.6.10 Izolarea prin metoda decapării anizotrope

## 6.2. Gravura

Gravura reprezintă o tehnică de îndepărtare în mod selectiv a unor straturi (conductoare, semiconductoare sau izolante) de pe plachetele semiconductoare în scopul definirii unor elemente constitutive ale dispozitivelor electronice sau ale circuitelor integrate.

În practică, se utilizează două tehnici de gravură, care în funcție de mediul în care se desfășoară sunt întâlnite sub denumirea de gravură umedă și respectiv gravura uscată. Cele două tipuri de gravură intervin de un număr mare de ori pe parcursul unui procedeu modern de fabricație. Aceste procese permit gravarea în mod selectiv a straturilor sau peliculelor, pentru a crea zonele active ale dispozitivelor electronice, grilele tranzistorelor, traseele de interconexiune, etc.

În operațiile de fotolitografiere se folosesc rășini fotosensibile, prin care anumite zone pot fi protejate contra gravării. Vor fi gravate în acest caz doar zonele neprotejate.

### 6.2.1. Gravura umedă

Gravura umedă se realizează prin atac chimic în soluții lichide formate din reactivi (acizi în anumite proporții). Vitezele de gravare ale straturilor formate din diverse tipuri de materiale, depind de concentrațiile substanțelor reactive. Gravarea pe cale umedă este *izotropă*, deoarece ea atacă stratul de corodat în mod egal după toate direcțiile din spațiu.

În multe variante tehnologice gravura umedă este folosită aproape majoritar, aceasta fiind relativ simplu de realizat și în același timp este foarte productivă. Astfel, în cursul unei singure etape tehnologice se poate grava un lot complet, format din până la 200 de plachete. Gravarea umedă este o metodă productivă, deoarece permite prelucrarea simultană a unui grup de plachete (fig. 6.11). Plachetele fixate pe suport se introduc în containerul ce conține soluția de corodare și se mențin o durată determinată.

După tratamentul chimic, este necesar ca plachetele să fie bine clătite și apoi uscate. *Clătirea plachetelor* are loc în containere cu apa deionizată. Apa folosită în procesul de clătire este supusă pe parcursul acestei etape măsurărilor de rezistivitate în scopul stabilirii cantității de ioni contaminanți care ar putea fi absorbiți de plachete. Atunci când rezistivitatea apei depășește valoarea  $\rho > 1,6 \cdot 10^5 \Omega \cdot m$  clătirea se poate opri (rezistivitatea apei pure este  $\rho = 1,8 \cdot 10^5 \Omega \cdot m$ ).

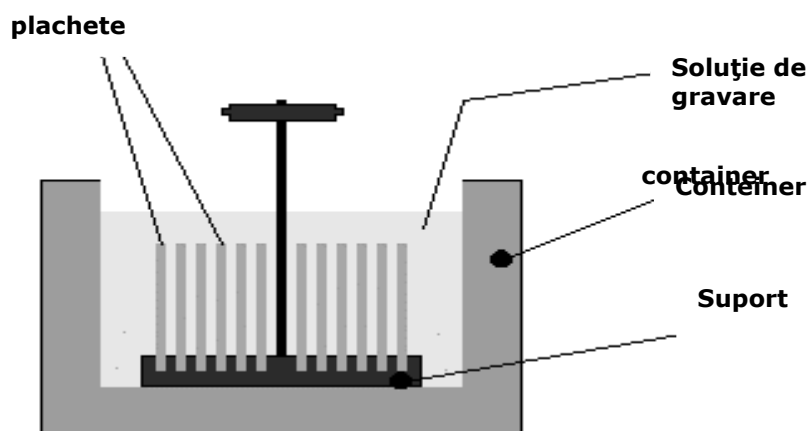


Fig. 6.11 Gravarea pe cale umedă a unui grup de plachete

Uscarea plachetelor se realizează în centrifuge de dimensiuni mari sau prin suflare cu azot sau cu aer uscat.

Gravura umedă prezintă însă și unele inconveniente:

- gravura este *izotropă* (materialul este atacat în toate direcțiile din spațiu) ceea ce conduce și la atacul lateral al zonelor acoperite cu rășină,
- viteza de gravare depinde de concentrație și de tipul impurităților conținute în stratul de gravat; viteza depinde totodată de cantitatea de plachete tratate; eficacitatea atacului scade după mai multe loturi gravate;
- limita de gravare este dificil de controlat; apare riscul supragravării laterale sau verticale, în cazul în care selectivitatea este slabă.

Soluțiile folosite frecvent, în funcție de natura materialului gravat, sunt prezentate în tabelul 6.1.

Tabelul 6.1 *Soluțiile folosite în gravarea umedă*

Materialul de gravat	Soluția folosită
Siliciu policristalin	HNO <sub>3</sub> + HF
Siliciu monocristalin	Hidrazina - N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (65%) + H <sub>2</sub> O (35%)
SiO <sub>2</sub> - dioxidul de siliciu	HF + NH <sub>4</sub> F + H <sub>2</sub> O
Nitrura de siliciu	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>
Aluminiu:	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> + HNO <sub>3</sub> + acid acetic + H <sub>2</sub> O

Vitezele de atac (de gravare) depind de concentrațiile relative ale substanțelor care intră în compoziția soluțiilor. Sfârșitul procesului de gravare, în cazul gravării unui strat de oxid depus peste siliciu monocristalin, este detectat prin apariția fenomenului de hidrofobie. Acest fenomen constă în tendința lichidului de a părăsi suprafața plachetei în timp ce, în prezența oxidului, toată suprafața era uniform umezită. Același procedeu permite verificarea uniformității grosimii straturilor și a atacului.

### 6.2.2. Gravura uscată

Gravura uscată se bazează pe producerea de electroni, ioni și de componente reactive (radicali) în plasmă. Gravura uscată este de fapt o tehnică de *gravare cu plasmă* în care intervin, în același timp, efectele bombardamentului cu particule și reacțiile chimice. Se diferențiază următoarele variante: gravura cu radiație ionică, gravura ionică cu reactivi - tehnica aceasta este întâlnită sub abrevierea R.I.E. (Reactive Ion Etching)- și gravura cu plasmă.

Principiile diferitelor procedee de gravare uscată sunt prezentate schematic în figura 6.12.

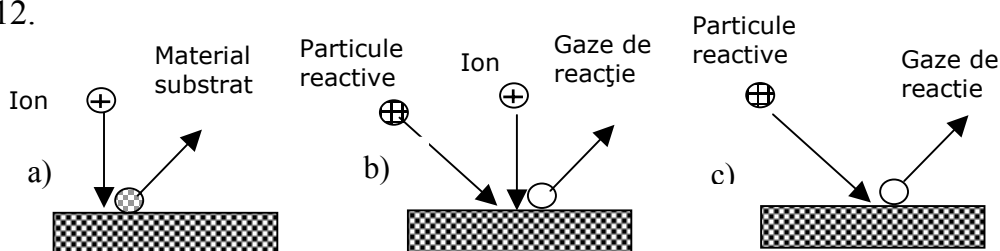


Fig. 6.12 *Principiile gravării uscate a) Gravura cu radiație ionică b) Gravura ionică cu reactivi c) Gravura cu plasmă*

La gravura ionică predomină mecanismele fizice de dizlocare a atomilor și moleculelor materialului substratului, folosind energii ridicate (0,5...5 keV). Principalul dezavantaj al gravurii ionice este cel al selectivității scăzute. Viteza gravurii ionice la siliciu și SiO<sub>2</sub> se situează între 20...40 nm/min [10].

Principalele caracteristici ale procedeelor de gravare uscată indicate anterior sunt prezentate în tabelul 6.2.

Tabelul 6.2 Caracteristicile procedurilor de gravură uscată

<b>Gravura cu radiație ionică</b>	<b>Gravura ionică cu reactivi</b>	<b>Gravura cu plasmă</b>
Presiune 5...50 mPa	Presiune 0,5...10 Pa	Presiune 20...500 Pa
Energia ionilor ridicată	Energia de valoare medie	Energia de valoare scăzută
Gravură anizotropă	Gravură parțial anizotropă	Gravură izotropă
Selectivitate scăzută	Selectivitate medie	Selectivitate ridicată

La *gravura cu plasmă* a siliciului plasma se formează în câmp electric prin introducerea în mediul de corodare (reactor) a unor compuși ai fluorului sau ai clorului, care contribuie la formarea gazelor ( $F$  sau  $Cl$ ) și a plasmei. Gazele injectate sunt destinate gravării stratului de la suprafața plachetelor (fig. 6.13).

Instalația folosită la gravura uscată cu plasmă folosește un reactor cu placa port-substrat orizontală. Pentru stimularea formării substanțelor active în reactor se folosește un generator de radiofrecvență. În cazul în care electrozii nu sunt polarizați, atacul este izotrop, adică identic după toate direcțiile. Dacă însă materialele de gravat au direcții preferențiale, cum este spre exemplu cazul cristalelor semiconductoare, gravarea poate fi dirijată după planurile reticulare sau după axele cristalografice.

Reactorul este de obicei echipat cu un sistem de control al gravării, pentru detectarea sfârșitului procesului de gravare. Se folosește în acest scop un interferometru cu laser, la care perioada semnalului detectat se modifică odată cu schimbarea naturii materialului vizibil pe suprafața plachetei.

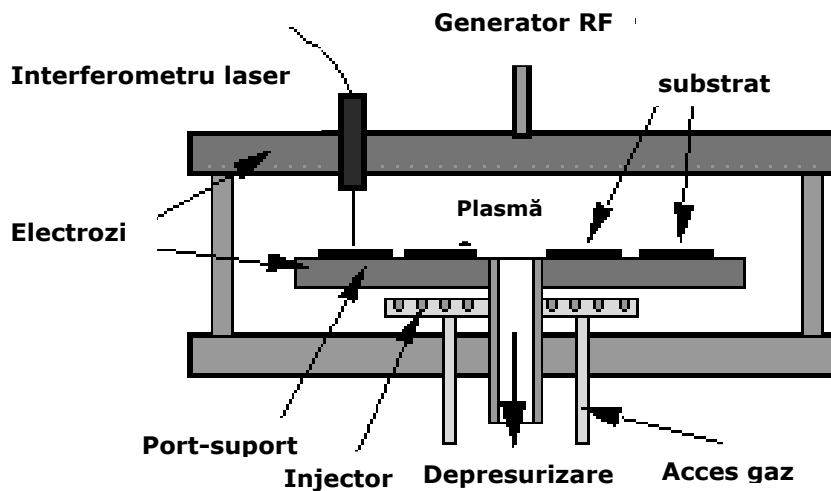


Fig. 6.13 Reactor de gravare cu plasmă, cu placa port-suport orizontal

Principiul procedurii de gravare cu plasmă poate fi rezumat astfel :

- generarea în plasmă a substanțelor reactive capabile să atace chimic straturile de pe suprafața plachetelor;
- transferul substanțelor reactive spre suprafața de gravat;
- absorbția substanțelor reactive și atacul suprafețelor;
- reacții cu materialul de pe suprafață; produșii de reacție trebuie să fie volatili, pentru a putea degaja suprafața;
- desorbția reactivilor;
- difuzia în mediul gazos.



Dacă toate aceste condiții sunt îndeplinite, se poate spera într-un bun rezultat al gravurii cu plasmă. Pentru punerea la punct a acestei etape tehnologice, dificultatea constă în a genera produși volatili după reacția la suprafață. Selectivitatea gravării se modifică odată cu gradul de diluție. Ea va fi ajustată de la caz la caz, în funcție de necesități.

În funcție de reactivii introduși în reactor și în funcție de natura stratului de gravat, viteza de gravare va fi diferită. Un bun control al gravării se poate face speculând diferențele dintre vitezele de gravare pentru diverse substanțe. Precizia, în special la sfârșitul gravării, va fi cu atât mai bună cu cât selectivitatea este mai mare. Într-adevăr, trebuie să se poată grava un oxid, fără a elimina prin aceasta și stratul subadiacent (spre exemplu, sursa unui tranzistor MOS). Un strat de siliciu policristalin aflat deasupra unui strat de oxid se poate elimina, fără a-l afecta pe acesta din urmă. Prin reglarea proporției gazelor reactive din incinta de gravare se ajustează selectivitatea gravării oxidului în raport cu cea a polisiliciului.

Diferența dintre cele două viteze, datorată bombardamentului cu ioni după direcția verticală, permite realizarea unei gravări anizotrope. Se poate obține o gravare izotropă sau una anizotropă, reglând acțiunea ionilor-proiectil din plasmă și cea a ionilor activi chimic. Printr-o tensiune continuă de polarizare aplicată între cei doi electrozi, pot fi accelerați ionii reactivi, pe direcții preferențial-orientate spre suprafața de gravat. Gravura va fi în acest caz *anizotropă*. Se acționează totodată asupra dozării raportului dintre bombardamentul ionic și atacul chimic. Figura 6.14 ilustrează anizotropia gravării obținută prin folosirea unui bombardament ionic prin care se crește viteza de gravare verticală în raport cu cea orizontală.

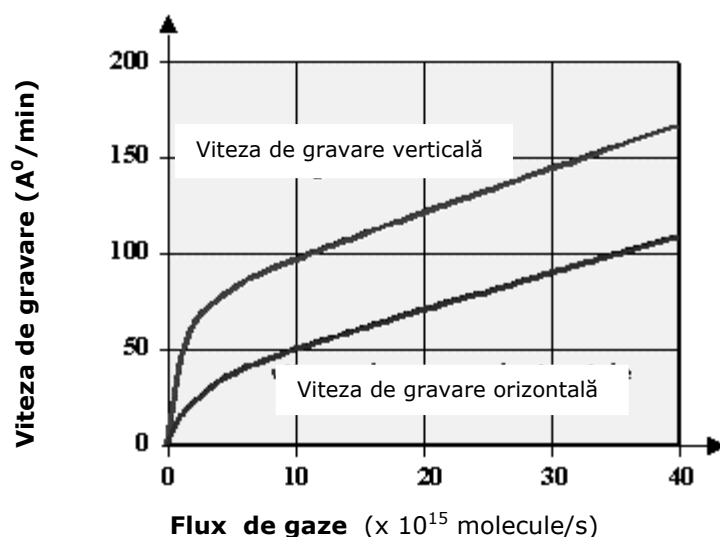


Fig. 6.14 Vitezele de gravare după direcțiile verticală și orizontală obținute prin bombardare ionică

Acest tip de gravură este util în special atunci când se dorește realizarea de "distanțare" de foarte mici dimensiuni, în tehnologiile ce folosesc autoaliniera. Se pot obține astfel noi "măști de implantare" a căror deschidere este, spre exemplu, cu  $0,2 \mu\text{m}$  mai largă sau mai îngustă decât deschiderea preexistentă. Procedul se folosește la realizarea de

tranzistori MOS submicronici cu drena dublu dopată (două zone cu dopaje diferite). În tabelul 6.3 se indică principalele gaze utilizate în gravura uscată.

Tabelul 6.3 Gaze utilizate în gravura uscată

Materialul de gravat	Siliciu	SiO <sub>2</sub>	Siliciura
Gaze folosite	SF <sub>6</sub>	CHF <sub>3</sub>	CFCl <sub>3</sub>
	CF <sub>4</sub> + O <sub>2</sub>	CF <sub>4</sub> + O <sub>2</sub>	CF <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>
	HF	CF <sub>4</sub> + H <sub>2</sub>	CCl <sub>4</sub>
	CFCl <sub>3</sub>	SiCl <sub>4</sub>	SF <sub>6</sub>

Diferența dintre cele două moduri de gravură, izotropă și anizotropă este ilustrată în figura 6.15. În cazul gravurii izotrope (cazul gravurii umede) corodarea (gravarea) laterală este importantă (fig. 6.15.a). Pentru realizarea unor gravuri de dimensiuni foarte mici, este preferabilă gravura anizotropă (fig. 6.15.b), deoarece aceasta permite o corodare diferită după direcțiile de gravare.

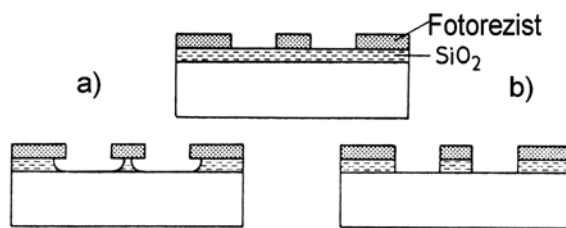


Fig. 6.15. a) Gravura izotropă b) Gravura anizotropă

### 6.3. Întrebări recapitulative

1. În ce constă tehnica litografiei?
2. Ce fel de radiații se folosesc pentru transferul modelului pe plachetă?
3. Care sunt principalele etape ale unui proces fotolitografic?
4. Ce este fotorezistul și prin ce se caracterizează?
5. Ce tipuri de șabloane (măști) se folosesc în litografie și prin ce se caracterizează?
6. Ce posibilități de expunere cunoașteți și prin ce se caracterizează acestea?
7. Cum se determină grosimea stratului epitaxial depus?
8. Care sunt posibilitățile de creștere a puterii de rezoluție a procesului litografic?
9. Ce tehnici de gravura se utilizează și prin ce se caracterizează acestea?