

Capitolul 5. Joncțiuni semiconductoare și heterojoncțiuni

5.1. Joncțiuni semiconductoare

Tehnicile industriale de impurificare sau dopare a materialelor semiconductoare asigură realizarea unor concentrații cu profile diversificate în zone localizate cu rezoluții ridicate. Se urmărește controlul cât mai riguros al parametrilor joncțiunilor semiconductoare care alcătuiesc un dispozitiv semiconductor.

5.1.1. Difuzia din sursă finită și infinită

Difuzia reprezintă procesul de pătrundere prin substituție sau interstițial a atomilor de impuritate în monocristalul semiconductor și se datorează existenței unui gradient de concentrație al impurităților în reactorul de difuzie. Atomii difuzează din regiunea cu concentrație mare spre regiunea cu concentrație mai redusă, la o temperatură cuprinsă între 800÷1300°C, care favorizează procesul de difuzie.

Admitem prezenta unui câmp electric exterior \bar{E}_{ext} și a unui câmp interior (sau imprimat) \bar{E}_{int} datorită impurităților ionizate care au pătruns în monocristal, precum și datorită dislocațiilor din rețeaua cristalină (vezi anexa 7). De asemenea, admitem apariția unei reacții chimice la suprafața semiconductorului cu consum de material dopant, reacție care se desfășoară cu viteza \bar{k}_s . Fluxul atomilor de impuritate ce traversează unitatea de suprafață a plăchetei în unitatea de timp, este:

$$\bar{F} = -grad(DN) + \mu\bar{E}N - \bar{k}_sN, \quad (5.1)$$

unde: D este un coeficient de difuzie, N este concentrația atomilor dopanți, iar μ este mobilitatea atomilor de impuritate.

Descrierea procesului de transport de substanță este dată de legea a II-a a lui Fick:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -div\bar{F}. \quad (5.2)$$

Pentru siliciu, se poate considera $\bar{k}_s = 0$; $\bar{E}_{ext} = 0$; câmpul electric interior se poate neglija $\bar{E}_{int} \cong 0$, iar coeficientul de difuzie D se poate considera independent de N și de concentrația defectelor structurale ale rețelei atunci când concentrațiile de impurități au valori medii sau mici. În aceste condiții, relația (5.2), obține forma:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = Ddiv(gradN) = D\nabla N = D\Delta N. \quad (5.3)$$

Pentru cazul unidimensional sau pentru o variație unidimensională a concentrației de impurități de-a lungul axei Ox , prima lege a lui Fick are forma:

$$\bar{F} = -gradDN(x,t) = -D\frac{\partial N(x,t)}{\partial x}\bar{j}, \quad (5.4)$$

unde \bar{j} este vectorul cu modul unitar, sau versorul orientat de-a lungul axei Ox . Concentrația de impurități la un moment dat este descrescătoare de-a lungul axei Ox sau $\partial N(x)/\partial x < 0$ (fig. 5.1a).

Pentru cazul unidimensional, legea a doua a lui Fick are forma:

$$\frac{\partial N(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N(x,t)}{\partial x^2}. \quad (5.5)$$

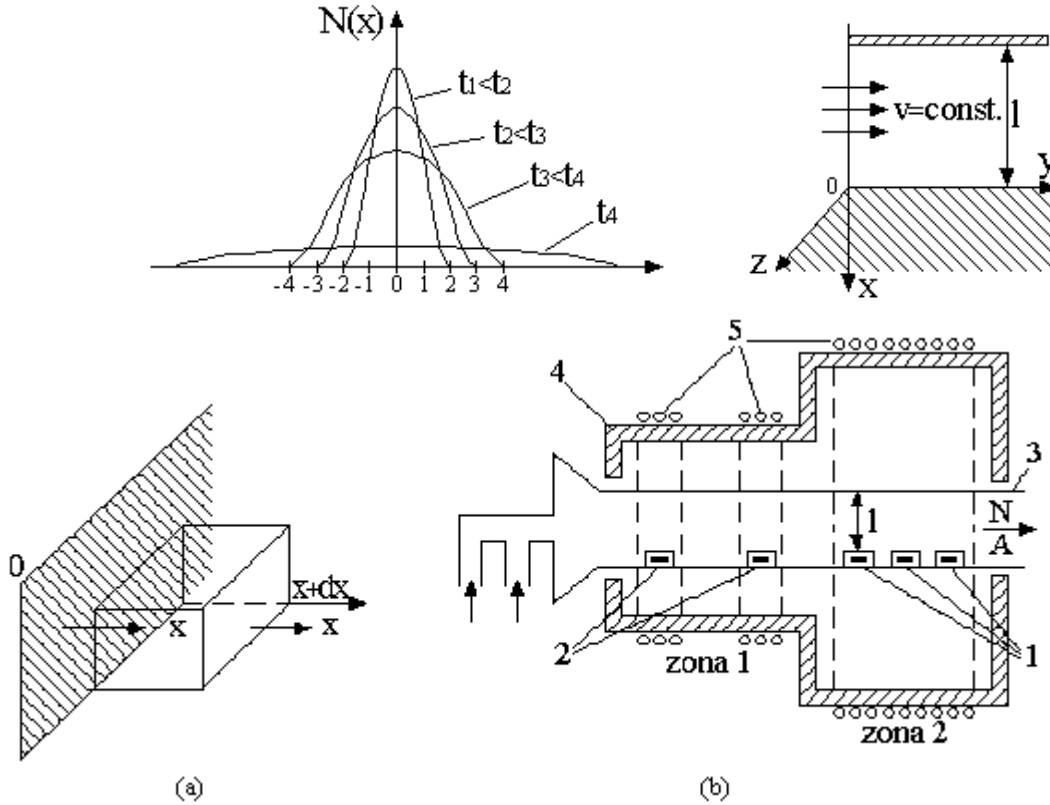


fig. 5.1 Distribuția concentrației de impurități într-un tub infinit de lung și de secțiune unitară, în ipoteza că la momentul inițial, întreaga cantitate de impurități este concentrată în planul $x=0$ (a). Incinta deschisă de difuzie cu reprezentarea detaliată a plachetei semiconductoare din incinta (b): 1-plachete semiconductoare; 2-surse de impurități; 3-tub din cuarț; 4-cuptor cilindric; 5-rezistențe de încălzire.

Presupunem că în momentul inițial, întreaga cantitate de impurități este concentrată în planul $x=0$ și difuzează în ambele sensuri ale direcției Ox , într-un tub semiconductor infinit de lung, de secțiune unitară. Cu creșterea timpului, impuritățile pătrund mai adânc în materialul semiconductor (fig.5.1a).

Rezolvarea ecuației (5.5) se efectuează prin substituție, concentrația de impurități considerându-se de forma:

$$N(x,t) = Ae^{\alpha x + \beta t}, \quad (5.6)$$

unde: A , este o mărime care nu depinde de timp și de coordonata x a planului în care se determină concentrația de impurități (fig.5.1a), iar α și β , sunt parametri care se vor determina astfel încât să fie respectată legea a doua a lui Fick, care obține forma:

$$\frac{\partial N(x,t)}{\partial t} = \beta N(x,t) = D\alpha^2 N(x,t) = D \frac{\partial^2 N(x,t)}{\partial x^2}. \quad (5.7)$$

Din relațiile (5.6) și (5.7), rezultă: $\beta = D\alpha^2$, iar relația (5.6) obține forma:

$$N(x,t) = Ae^{\alpha x + \alpha^2 Dt}. \quad (5.8)$$

În continuare se vor determina mărimea α și constanta A din condițiile inițiale și la limită, ținând cont că sursa de impurități este finită și concentrată la momentul inițial în planul $x=0$.

Pentru adâncimi x , tinzând spre infinit, concentrația de impurități tinde spre 0 și, întrucât A nu depinde de timp și coordonata x , funcția exponențială tinde spre 0, sau

$$\alpha x - \alpha^2 Dt \rightarrow -\infty.$$

Considerăm cantitatea de impurități finită Q, ca fiind de forma unei funcții Dirac: $Q\delta(x=0)$. Pentru un timp și o adâncime tinzând spre infinit, concentrația de impurități va tinde spre 0: $N(x \rightarrow \infty, t \rightarrow \infty) \rightarrow 0$. Pe de altă parte, concentrația de impurități într-un plan corespunzător coordonatei x (fig.5.1a), va descrește cu creșterea timpului, întrucât s-a presupus că la momentul inițial, cantitatea de impurități este finită. Rezultă că exponentul funcției (5.8), are forma:

$$\alpha x - \alpha^2 Dt = -k \frac{x^2}{t}, \quad (5.9)$$

unde: k este o mărime care nu depinde de x și t .

Din relația (5.9), se determină mărimea α , în funcție de k. Pentru ca soluția să fie unică, este necesar să fie îndeplinită condiția: $k=1/(4D)$. Dacă în relația (5.9) în loc de x^2/t s-ar fi luat x^{n+1}/t^n , mărimea k ar fi depins de x și t .

Rezultă expresia concentrației de impurități:

$$N(x,t) = Ae^{-x^2/4Dt} = Ae^{-x^2/L^2}, \quad (5.10)$$

unde: $L = 2\sqrt{Dt}$ este adâncimea sau lungimea de difuzie.

Cunoscând cantitatea de impurități finită Q, constanta A se determină din relația (vezi anexa):

$$\int_0^\infty N(x,t) dx = A2\sqrt{Dt} \int_0^\infty e^{-[x/(2\sqrt{Dt})]^2} d\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) = A2\sqrt{Dt}\sqrt{\pi} = Q. \quad (5.11)$$

Pentru un semiconductor semiinfinit, în care aceeași cantitate de impurități Q difuzează într-un singur sens -sensul axei Ox- concentrația de impurități într-un plan corespunzător coordonatei x , la un moment dat, va fi dublă, iar expresia normalată a concentrației de impurități are forma:

$$\frac{N(x,t)}{Q} = \frac{1}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-[x/(2\sqrt{Dt})]^2}. \quad (5.12)$$

Dacă sursa de impurități este finită, concentrația de impurități în planul $x=0$ va fi constantă în timp, sau: $N(0,t)=N_s$, unde N_s este concentrația superficială de impurități, corespunzătoare unei temperaturi date. Pentru un timp tinzând spre infinit, concentrația de impurități în materialul semiconductor -de lungime finită, este N_s . Dacă la momentul inițial, concentrația preexistentă de impurități în planul corespunzător coordonatei x , este $N_0(x,0)$, creșterea normalată a concentrației de impurități în planul respectiv, în conformitate cu relația (5.12), are expresia:

$$\frac{N(x,t) - N_0(x,0)}{N_s - N_0(x,0)} = 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi Dt}} \int_0^x e^{-[x/(2\sqrt{Dt})]^2} dx = \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}. \quad (5.13)$$

Dacă concentrația inițială de impurități este nulă: $N_0(x,0)=0$, concentrația normalată de impurități provenite din sursa infinită are expresia:

$$\frac{N(x,t)}{N_s} = \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} = \operatorname{erfc} \frac{x}{L}. \quad (5.14)$$

Dacă sursa de difuzie păstrează în timpul difuziei o concentrație constantă N_s de impurități la suprafața semiconductorului, difuzia se numește din sursă infinită sau predifuzie și se utilizează pentru introducerea în monocristalul semiconductor a unei cantități determinate de impurități, având ca rezultat obținerea unui semiconductor extrinsec de tip „n” sau „p”.

Dacă difuzia are loc pornind de la o cantitate determinată Q de impurități, difuzia se numește din sursă finită și este utilizată pentru realizarea joncțiunilor semiconductoare prin introducerea în semiconductorul extrinsec rezultat din predifuzie, a unei cantități controlate și localizate de impurități de tip opus celor din semiconductorul extrinsec. Se precizează că atât semiconductorul extrinsec cât și joncțiunile semiconductoare, pot fi realizate prin ambele tipuri de difuzie.

Coeficientul de difuzie $D=D_0\exp(-b/T)$, poate fi considerat constant la temperatură constantă, D_0 și b fiind mărimi constante, care depind de materialul semiconductor și de tipul de impurități difuzate.

Relațiile (5.12), (5.14) și (5.15) sunt valabile pentru concentrații medii de impurități și adâncimi medii -de ordinul micronilor. Pentru concentrații mari de impurități și adâncimi reduse, relațiile (5.12) și (5.14) nu mai sunt valabile, iar coeficientul de difuzie depinde de concentrația de impurități, de interacțiunea dintre atomii materialului semiconductor și impurități, precum și de procesul de difuzie spre exteriorul semiconductorului.

Impuritățile se introduc în monocristalul semiconductor din sursa solidă, lichidă sau prin transport chimic. Procedul de difuzie presupune realizarea unei presiuni parțiale suficient de ridicate a impurităților în gazul purtător (azot, argon), care să asigure la suprafața plachetei monocristaline o concentrație superficială maximă N_s , a impurităților la temperatura din reactor. Impuritățile se introduc din sursa lichidă prin evaporare în incinta de difuzie sau reactor. La echilibru termic, presiunea parțială a impurităților în gazul purtător, este egală cu presiunea vaporilor sursei la temperatura din reactor. Difuzia din sursa lichidă presupune trecerea gazului purtător prin sursa lichidă prin barbotare, înainte de a fi introdus în reactor. Presiunea parțială a impurității în gaz, este egală cu presiunea de vapori a lichidului la temperatura din reactor. Difuzia realizată prin transport chimic presupune declanșarea unei reacții chimice la sursa de impurități, care eliberează impuritățile în reactor.

Incinta de difuzie poate fi închisă sau deschisă. În fig. 5.1b este prezentată o incintă de difuzie deschisă, impuritățile fiind obținute prin evaporarea surselor solide plasate în zona 1 și care sunt transportate în zona 2, prin intermediul unui gaz purtător.

În zona 1 temperatura este mai scăzută decât în zona de difuzie 2, însă suficient de ridicată pentru ca să mențină presiunea necesară de vapori. Temperatura în zona de difuzie este cuprinsă între 1200°C și 1300°C și este menținută în limite stricte ($\pm 2\%$). Diametrul mult mai mare al cuptorului cilindric în raport cu dimensiunile plachetelor, asigură obținerea unui gradient de temperatură constant.

La suprafața plachetei semiconductoare (fig. 5.1b), se realizează un echilibru vapori-solid. Acest echilibru este stabil dacă impuritatea transportată de gazul purtător, care se deplasează cu viteza v , compensează cantitatea de impuritate ce difuzează în semiconductor. Deoarece gazul prezintă pierderi de concentrație de-a lungul axei Ox -în exteriorul plachetei semiconductoare -ca urmare a difuziei impurităților în semiconductor, rezultă o concentrație

superficială variabilă a impurităților. Dacă concentrațiile superficiale sunt scăzute, sau fluxul de impurități a ajuns la o valoare staționară -prin prezența în permanență a unui exces de impurități, corelația dintre presiunea de vapori și concentrația superficială poate fi neglijată, iar echilibrul superficial se stabilește rapid. Dacă echilibrul la suprafață este atins lent, va exista o diferență între concentrația superficială reală și cea care corespunde echilibrului. În concluzie, pentru realizarea unei difuzii din faza de vapori, este necesar să fie stabilită la suprafața plachetei semiconductoare, o concentrație de echilibru corespunzătoare solubilității maxime a impurităților în semiconductor. În cazul ideal, concentrația de echilibru este proporțională cu presiunea vaporilor și prin controlul presiunii vaporilor se influențează concentrația superficială a impurităților.

Relațiile (5.12) și (5.14) sunt prezentate în fig.5.2. Profilele concentrațiilor de impurități difuzate din sursa infinită sunt abrupte, în timp ce profilele obținute prin difuzia din sursa finită pot fi abrupte, dacă timpul și lungimea de difuzie au valori reduse, sau pot fi gradate, dacă timpul și lungimea de difuzie au valori crescute. Din expresiile soluțiilor (5.12) și (5.14) ale ecuației (5.5), rezultă că impuritățile pătrund mai adânc în placheta semiconductoare cu creșterea timpului de difuzie. Concentrații uniforme de impurități în placheta semiconductoare -de grosime finita, se pot obține prin difuzii efectuate într-un timp îndelungat. Prin difuzia ulterioară a unor impurități de tip opus celor preexistente în semiconductor, se realizează o joncțiune semiconductoare. Procesul este descris prin relația (5.13).

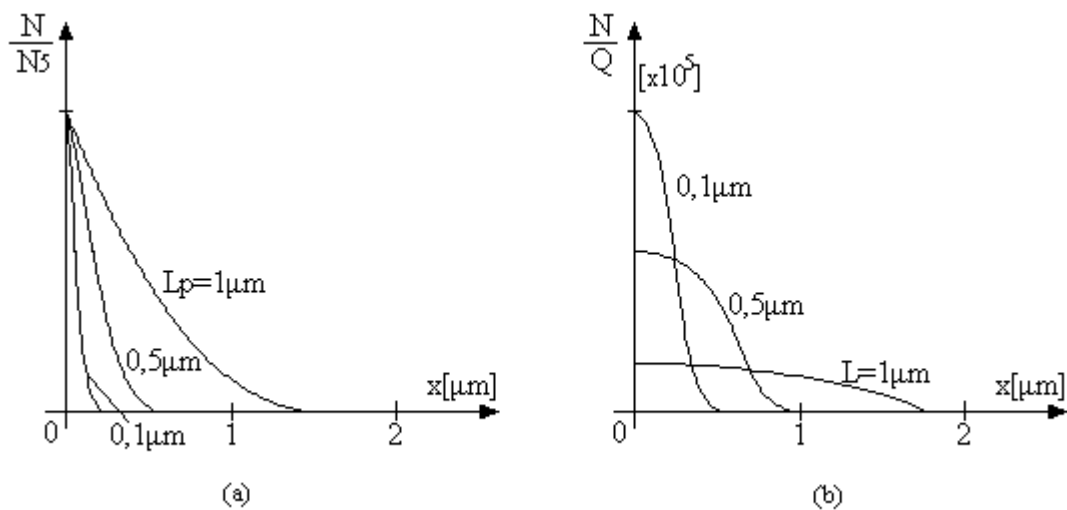


fig.5.2 Profilul normal al distribuției de impurități pentru difuzia din sursa infinită (a) și finită (b)

Cu creșterea temperaturii la care are loc difuzia, coeficientul de difuzie: $D=D_0 \exp(-b/T)$ se mărește și impuritățile pătrund mai adânc în materialul semiconductor impurificat. Din acest motiv, se impune menținerea riguroasă a temperaturii în incinta de difuzie la valoarea corespunzătoare solubilității maxime a impurității în placheta semiconductoare.

5.1.2. Obținerea joncțiunilor semiconductoare

Dacă într-un semiconductor extrinsec de tip „n” se introduce impurități de tip „p”, numărul impurităților donoare și acceptoare fiind egal, semiconductorul

se va comporta ca un semiconductor intrinsec compensat, întrucât electronii proveniți de la atomii donori pot fi captați de atomii acceptori. Nu vor exista purtători de sarcină majoritari ci numai perechi electron-gol generate termic sau prin efect fotoelectric, precum și prin mecanism extrinsec.

Presupunem că impuritățile acceptoare -cu concentrație N_A , sunt introduse în placheta semiconductoare de tip „n” -uniform dopată, (având concentrația de impurități constantă: $N_D=N_B=ct.$), prin suprafața superioară de separație, din sursa infinită sau finită de impurități (fig. 5.3a).

Concentrația de impurități donoare, este maximă la suprafața plachetei și scade pe măsură ce adâncimea x se mărește, iar pentru: $x=x_j$ concentrația impurităților donoare, este egală cu concentrația impurităților acceptoare preexistente în semiconductorul „n”.

Adâncimea joncțiunii x_j este redusă pentru difuzii din sursa infinită (fig. 5.3b) și poate fi extinsă sau restrânsă pentru difuzii din sursa finită (fig. 5.3c).

Adâncimea de difuzie din sursa infinită x_{ja} , se determină din condiția:

$$N(x_{ja}, t_p) = N_B - N_B \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_V t_p}}, \quad (5.15)$$

unde: D_V , este coeficientul de difuzie a impurităților preexistente spre exteriorul plachetei semiconductoare.

În ipoteza că $D_V \cong D$, expresia adâncimii joncțiunii abrupte, care se obține prin difuzie din sursa infinită, este:

$$x_{ja} = Dt_p \operatorname{arg} \operatorname{erfc} \frac{N_B}{N_B + N_S}. \quad (5.16)$$

Adâncimea de difuzie din sursa finită a joncțiunii gradate x_{jg} , se determină din condiția:

$$N(x_{jg}, t_d) = N_B, \quad (5.17)$$

și are expresia:

$$x_{jg} = 2\sqrt{Dt_d} \ln \left(\frac{Q}{\sqrt{\pi Dt_d}} \frac{1}{N_B} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (5.18)$$

Dacă gradientul de concentrație al impurităților este redus, tensiunea de străpungere a joncțiunii (gradate) este ridicată.

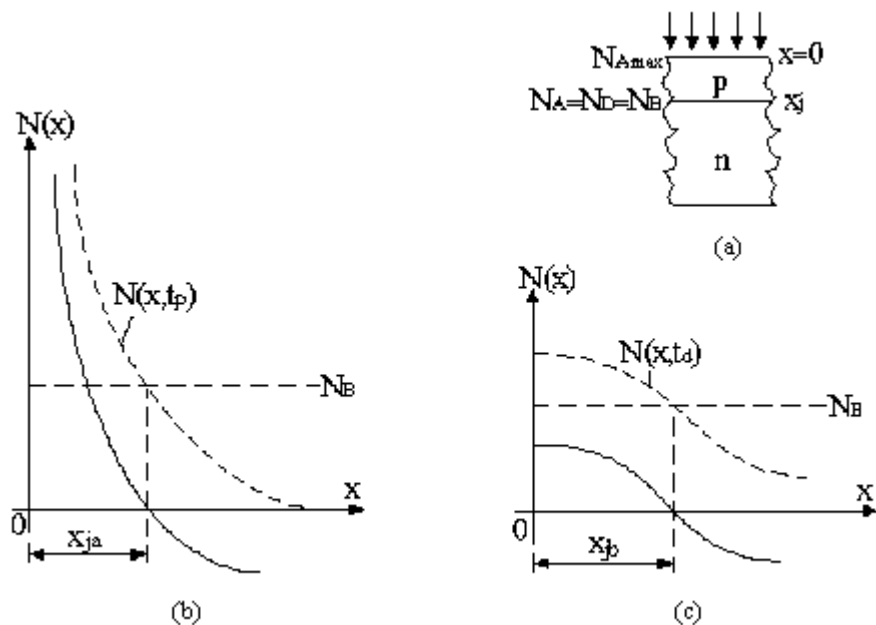


fig. 5.3 Obținerea joncțiunilor semiconductoare prin difuzie (a) și profilele concentrațiilor de impurități realizate prin difuzie din sursa infinită (b) și finită (c).

5.1.3. Localizarea zonelor dopate

Etapele procedeeilor litografice utilizate în tehnologia planară pentru localizarea zonelor în care sunt introduse impurități în cantități prestabilite, sunt reprezentate în fig. 5.4.

Etapa I: Pasivizarea suprafeței plachetei prin formarea unui strat omogen, uniform și suficient de gros din bioxid de siliciu (SiO_2), sau nitrat de siliciu (SiN_4), prin care nu difuzează impuritățile.

Etapa II: Depunerea prin centrifugare sau pulverizare a unui strat sensibil la iluminare în spectru ultraviolet, iradiere cu radiații β , X, sau prin bombardare cu ioni. Stratul sensibil la radiațiile în spectrul ultraviolet (sau vizibil) se numește fotorezist, fiind pozitiv atunci când este format din polimeri care depolimerizează prin expunere și negativ când este format din monometri care polimerizează prin expunere. Rezoluția în ultraviolet este de 500 linii/mm și crește cu micșorarea lungimii de undă a radiației incidente. Astfel, pentru radiația β care este formată din electroni, rezoluția este de 2000 linii/mm, permițând o localizare mai exactă precum și dimensiuni mai reduse ale zonei disipate, iar prin scanare s-au obținut rezoluii de 130nm –intre linii.

Etapa III: Iluminarea sau iradierea selectivă a stratului fotorezist sau electronerezist -prin intermediul unei măști depusă pe sticlă sau metalică. Fiecare mască este formată dintr-o configurație de zone opace și transparente, având dimensiunile dispozitivului semiconductor, multiplicată pe două direcții ortogonale cuprinse în planul măștii. Prin mascare se delimitează și zona atribuită unui anumit dispozitiv semiconductor. Mastile utilizate în etape tehnologice ulterioare se poziționează prin intermediul unor repere, astfel încât zona delimitată a dispozitivului semiconductor să coincidă cât mai exact cu cea delimitată prin mascarea anterioară.

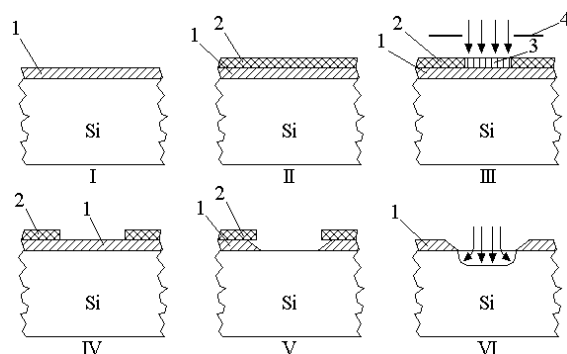


fig. 5.4 Etapele procedurii litografice de localizare pe suprafața plăchetei semiconductoare (din siliciu) a zonelor de dopare cu impurități:
 1 – bioxid de siliciu; 2 – strat fotorezist; 3 – strat fotorezist iluminat;
 4 – masca de selectare a zonei de dopare.

Etapa IV: Developarea stratului de resist în solvenți organici, care nu reacționează cu bioxidul de siliciu. Monomerii sunt solubili în solvenți și sunt îndepărtați de pe stratul de bioxid de siliciu, iar polimerii sunt insolubili și rămân pe stratul de bioxid de siliciu.

Etapa V: Corodarea stratului de protecție în zonele neprotejate de rezist polimerizat. Pentru bioxidul de siliciu se utilizează soluții de acid fluorhidric (HF).

Etapa VI: Îndepărtarea stratului de rezist polimerizat cu un alt solvent organic, inactiv față de siliciu și bioxidul de siliciu. Rezultă o mască din bioxidul de siliciu cu o fereastră prin care se poate efectua o difuzie selectivă (sau o metalizare a suprafeței plăchetei – într-o etapă tehnologică ulterioară).

Prin procedeul descris, se pot realiza joncțiuni planare fără defecte și pe suprafețe relative mari ale plăchetei monocristaline, al cărei strat superficial poate fi crescut epitaxial pentru asigurarea unei structuri și compoziții cât mai uniforme. Datorită difuziei laterale, în zonele de la marginea ferestrelor, pereții joncțiunii nu sunt cilindrici, dezavantaj care poate fi înlăturat doar prin implantarea ionică a impurităților.

Prin compensarea tipului de impurități preexistente, se pot crea în aceeași zonă mai multe joncțiuni. Numărul maxim de difuzii succesive este limitat la trei pentru majoritatea dispozitivelor semiconductoare, datorită atingerii la suprafață a concentrației maxime de impurități.

Dezavantajul principal al procedurii de realizare a joncțiunilor semiconductoare, constă în posibilitatea contaminării stratului de bioxid de siliciu cu ioni de hidrogen sau natriu, care au mobilitate ridicată și pot determina apariția unor straturi de inversie, care compromit joncțiunea. Pe de altă parte, prin stratul de bioxid de siliciu pot difuza aluminiu și galiu mai ales atunci când grosimea stratului este redusă.

Procedeele recente de litografie prin utilizarea unui fascicul focalizat de electroni, care este deplasat treptat pe întreaga suprafață a plăchetei semiconductoare pentru impresiunea stratului sensibil la radiația de electroni, permit rezoluții care sunt limitate la 130 nm. Procesul de impresiune durează sute de ore. Pentru eliminarea duratei mari de prelucrare a suprafeței plăchetei semiconductoare (cu diametrul de 100 mm) și mărirea rezoluției, se utilizează o matriță realizată prin procedeul descris, cu care sunt presate regiuni localizate din stratul depus pe suprafața plăchetei semiconductoare, îndepărtându-se astfel

stratul protector și permițând prelucrări ulterioare ale regiunii respective. Procedeul de imprimare nanolitografică (Nano-Imprint Lithography) durează 20 de secunde și permite rezoluții de 6 nm.

5.1.4. Implantarea ionică

Implantarea ionică reprezintă procedeul de introducere a impurităților în placheta semiconductoră prin bombardarea suprafeței plachetei cu un fascicul nefocalizat de ioni, având energii cuprinse între keV și sute de keV. O instalație de implantare ionică este reprezentată în fig.5.5.

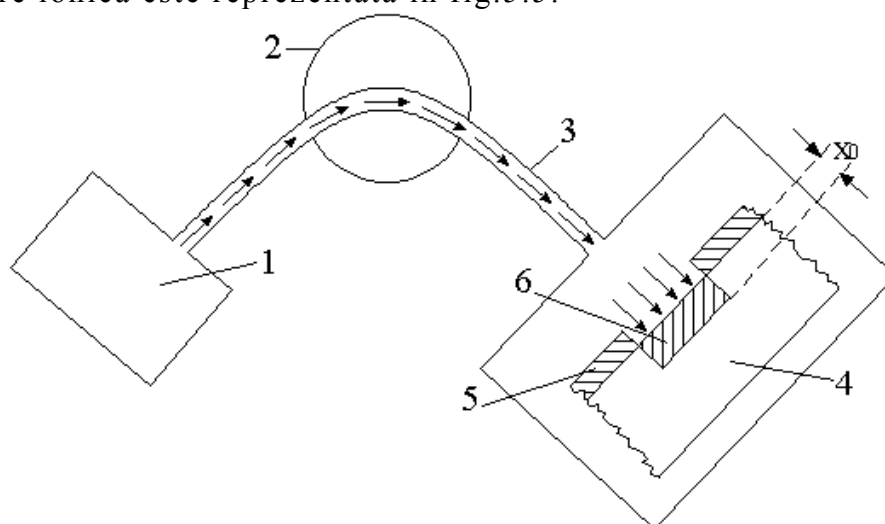


fig. 5.5 Instalație de implantare ionică: 1 – sursa de ioni; 2 – separator magnetic; 3 – fascicul nefocalizat de ioni; 4 – țintă; 5 – masca metalică sau strat gros din bioxid de siliciu; 6 – zona dopată.

Ionii proveniți de la o sursă de ioni, sunt accelerați spre separatorul magnetic și conduși spre țintă prin mijloace de corecție și deflexie electromagnetică. Delimitarea zonelor de implantare ionică se efectuează prin intermediul unei măști metalice, sau din strat gros de bioxid de siliciu. Ionii care pătrund în țintă reacționează cu electronii liberi sau legați. Pentru valori mari ale energiei ionilor incidenti pe suprafața țintei, devine semnificativă frânarea electronică a ionilor, rezultată din interacțiunea ionilor cu electronii țintei. Efectul frânării electronilor asupra traiectoriei ionilor în țintă este neglijabil, pierderea de energie a ionilor fiind ne semnificativă.

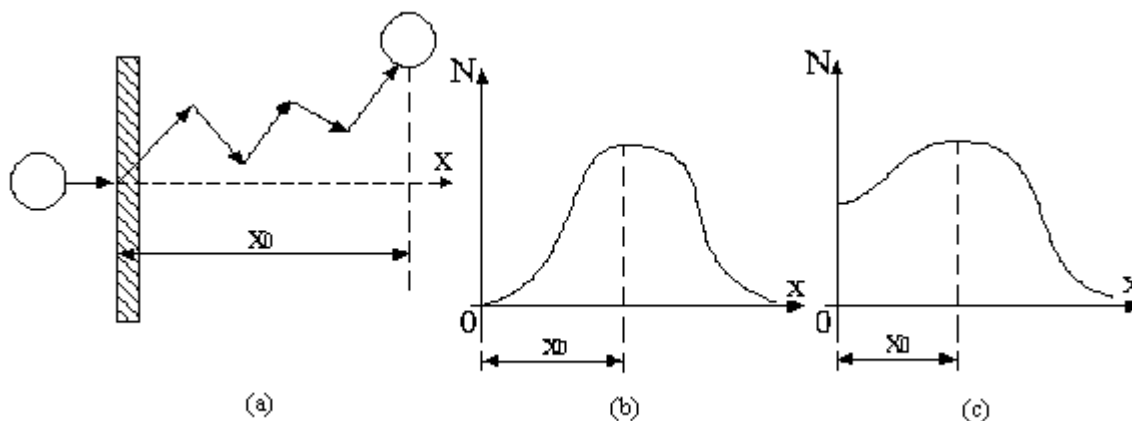


fig.5.6 Traiectoria unui ion incident în țintă (a) și profilul concentrației de ioni în țintă pentru ioni cu masă inferioară (b), sau superioară masei atomilor țintei (c).

Frânarea nucleară a ionilor (fig. 5.6a), rezultă din ciocnirea ionilor incidenti cu atomii țintei. Pierderea de energie, este semnificativă și se produc defecte ale rețelei cristaline sau dislocații. Pentru un material amorf, distribuția concentrațiilor de ioni depinde de raportul în care se găsesc masele ionilor și atomilor țintei (fig. 5.6b,c). Adâncimea x_0 , care corespunde concentrației maxime de ioni, este inferioară adâncimii maxime.

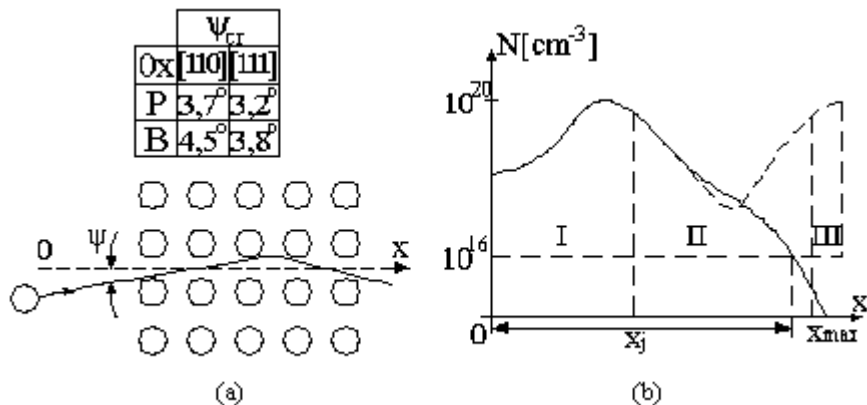


fig.5.7 Canalizarea ionilor implantați și dependența unghiului critic de direcția Ox a canalului (a); profilul concentrației de impurități spațiu (b).

În plachetele monocristaline apare un proces de canalizare a ionilor implantați, atunci când unghiul de incidență ψ al fasciculului de ioni, este inferior unghiului critic ψ_{cr} . Pentru un unghi $\psi=0$, apare împrăștierea ionilor pe defectele rețelei monocristaline. Cu creșterea gradului de compactitate, unghiul critic scade și de asemenea scade și adâncimea de pătrundere a ionilor implantați. Pentru siliciu, gradul de compactitate maxim corespunde direcției [111]. Distribuția spațială a ionilor canalizați, depinde de starea suprafeței plachetei, de temperatură și de doza de iradiere. Procesul de canalizare se evită prin crearea unui strat amorf pe suprafața plachetei din siliciu. Stratul amorf se poate obține prin bombardarea suprafeței cu ioni inactivi -din punct de vedere electric, cu atomii de siliciu. Pentru doze mari de radiații, ionii implantați pot distruge rețeaua monocristalină creând un strat superficial amorf. Pentru unghiuri de incidență a fasciculelor de ioni $\psi > \psi_{cr}$ se evită de asemenea, apariția canalizării. În figura 5.7b, este reprezentată distribuția ionilor implantați și canalizați în funcție de adâncimea lor de pătrundere într-o plachetă semiconductoră dopată uniform, cu o concentrație N_B de impurități, de tip opus față de ionii implantați. Cu o linie punctată s-a reprezentat distribuția ideală a ionilor implantați, iar cu linie continuă s-a trasat distribuția reală. Profilul concentrației de impurități implantate, se poate delimita în trei zone. În prima zonă, din apropierea suprafeței expuse iradierii, impuritățile au o distribuție asemănătoare cu cea din materialele amorse (fig.5.6c). În această zonă, mai ales pentru doze mari de radiații, se distruge rețeaua cristalină chiar de către ionii implantați, ceea ce reprezintă cauza principală a decanalizării. Zona a doua conține impurități decanalizate, care au pierdut energie prin interacțiune cu electronii plachetei, ieșind din canal. Zona a treia conține impurități care s-au deplasat în canal până în momentul opririi. Valoarea adâncimii maxime x_{max} , este apropiată de adâncimea x_j a joncțiunii semiconductoră, obținută prin implantare ionică, spre deosebire de joncțiunea obținută prin difuzie, unde cele două valori diferă substanțial. Scăderea pronunțată a concentrației de impurități în zona III,

constituie unul dintre principalele avantaje ale procedurii de obținere a joncțiunilor semiconductoare prin implantare ionică.

Un alt avantaj important al procedurii descrisă constă în temperatura mai redusă la care se desfășoară procesul de implantare ionică.

Adâncimea joncțiunii x_j este afectată de mai mulți factori, iar în cazul implantării ionilor de bor sau fosfor, cu doze cuprinse între: $10^{14} \div 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, pe direcția [111] a unui monocristal de siliciu cu un număr preexistent de impurități cu concentrație mai redusă decât 10^{-15} , la temperatura de $700^\circ\text{C} \div 800^\circ\text{C}$, adâncimea joncțiunii se poate calcula cu relația empirică:

$$x_j^{[111]} = 0.075\sqrt{E} \quad (5.19)$$

unde: E, este energia fasciculului de ioni, exprimată în keV.

Procedul de localizare a zonelor dopate este cel litografic, similar cu procedul utilizat pentru difuzie, cu diferența că masca prin care se efectuează implantarea ionică este metalică, sau este constituită dintr-un strat gros de bioxid de siliciu.

Adâncimile la care pătrund impuritățile, sunt sensibil mai mici decât în cazul difuziei. Profilele de implantare au un maxim pronunțat și fronturi rapid căzătoare.

Prin implantare ionică se pot realiza dopări extrem de reduse, care implică rezistivități ridicate ale semiconductorului astfel realizat și, de asemenea, se pot realiza dopări în straturi extrem de reduse (sub o sutime de micrometru), iar timpul de viață a purtătorilor de sarcină nu este micșorat, întrucât temperatura este mult mai redusă decât în cazul difuziei.

Prin implementare ionică cantitatea de impurități introduse în semiconductor se poate controla riguros, iar zonele implantate se pot localiza mult mai exact, prezentând suprafețele laterale cilindrice, datorită energiilor mari ale fasciculului de ioni.

5.1.5 Alierea

Procedul de obținere a joncțiunilor semiconductoare prin aliere nu este aplicabil numai în tehnologia planară, cum sunt difuzia sau implementarea ionică.

În fig.5.8 sunt prezentate etapele obținerii unei joncțiuni semiconductoare prin alierea indiului cu germaniul.

Alierea se efectuează în casete de aliere sau prin limitarea laterală determinată de tensiunile superficiale care apar între fazele lichid-solid. Pastila din indiu împreună cu placheta de germaniu, se încălzesc până la o temperatură suficient de ridicată pentru ca să se asigure topirea indiului, dar inferioară temperaturii de topire a germaniului.

Pastila de indiu este parțial dizolvată în topitură. Prin răcirea lentă a ansamblului se obține o zonă (5), recristalizată și saturată cu impurități.

Se impune ca răcirea să se desfășoare lent, pentru evitarea apariției tensiunilor interne, care ar putea duce la un profil neregulat al joncțiunii semiconductoare, care oricum prezintă neregularități.

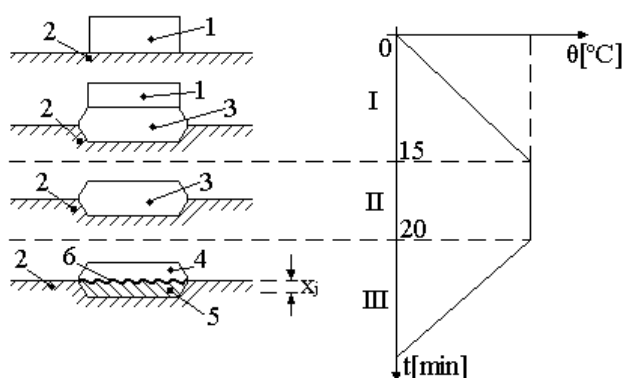


fig.5.8 Etapele obținerii joncțiunilor semiconductoare prin aliere:

- I –încălzire; II – menținere la temperatură constantă; III – răcire lentă.
1 –indiu; 2 –germaniu; 3 –amestec de indiu topit cu germaniu solid;
4 –amestec eutectic; 5 –germaniu „p” dopat; 6 –joncțiune semiconductoare.

Aliajul eutectic reprezintă amestecul a două componente în proporții strict determinate, pentru care, la o anumită temperatură, care depinde de componentele amestecului, să rezulte aceeași concentrație a componentelor în faza solidă ca și în lichidul aflat în echilibru cu faza solidă. Temperaturile de topire și solidificare ale aliajului eutectic sunt identice.

Adâncimea joncțiunii, de ordinul micrometrilor, este dificil de controlat. Joncțiunile realizate prin aliere sunt abrupte deoarece concentrația realizată de impurități corespunde solubilității maxime a impurității în materialul semiconductor.

5.2. Heterojoncțiuni

Heterojoncțiunile simple sau duble sunt structuri de tipul AlGaAs – GaAs, sau Al InAs – GaInAs – AlInAs, AlGaAs – InGaAs – AlGaAs, sau AlGaAs – GaAs – AlGaAs, precum și alte combinații și sunt utilizate pentru realizarea diodelor LASER[Shi;Zha] și a tranzistoarelor cu efect de câmp HEMT[Mat;Lai] (High Electron Mobility Tranzistor), care funcționează în frecvențe de zeci de GHz. Ambele tipuri de dispozitive exploatează discontinuitățile mari între benzile interzise ale straturilor în contact, ceea ce determină pe de o parte indici de refracție diferiți pentru stratul intermediar față de cele două straturi vecine, iar pe de altă parte, în stratul intermediar, se poate obține o densitate ridicată a gazului electronic bidimensional (2DEG), combinată cu o mobilitate ridicată a electronilor și, implicit o densitate ridicată de curent. Gazul electronic bidimensional, se formează în interfața dintre straturile structurii, densitatea superficială de electroni fiind $4.5 \cdot 10^{12} \text{cm}^{-2}$, iar mobilitatea electronilor depășește $10000 \text{cm}^2/\text{Vs}$ [Mat]. Densitatea curentului de prag al diodelor LASER, realizată cu heterojoncțiune simplă este de ordinul: $n \times kA/\text{cm}^2$, iar pentru heterojoncțiuni duble, curentul de prag scade cu un ordin de mărime la: $n \times 100A/\text{cm}^2$ [Das].

Dispozitivele active bazate pe utilizarea ca material de bază a siliciului sau a arseniurii de galiu, sau în general, toate dispozitivele semiconductoare, sunt eficiente doar în proporție de 10%, restul de 90% din puterea consumată fiind transformată și pierdută în căldură. Dispozitivele realizate cu nitrit de galiu (GaN) pot dubla sau chiar tripla aceasta eficiență, la care se adaugă posibilitățile sporite de miniaturizări, sub aspectul eliminării procedeeleor de răcire forțată și a circuitelor de corecție a semnalului de ieșire. Pe de altă parte, dispozitivele cu GaN funcționează la frecvențe ridicate și puteri transferate ridicate [Eas].

Heterojoncțiunile cu GaAs sunt dopate cu impurități, pentru că gazul electronic bidimensional poate fi creat în semiconductori numai prin dopare cu impurități, pentru a putea suporta un exces fie de electroni, fie de goluri.

Heterojoncțiunile cu GaN nu necesită dopări, pentru că exista în mod natural regiuni puternic polarizate, care posedă sarcini electrice.

Atunci când nitritul de aluminiu galiu este crescut pe nitrit de galiu, la limita celor două cristale apare o heterojoncțiune simplă. În cristalul de nitrit de galiu, atomii individuali posedă electroni, sau sunt ionizați. Atomii mari de galiu

și cei mici de azot, sunt aranjați cu o oarecare neregularitate unul în raport cu celălalt, din cauza diferenței de mărime. Această combinație dintre ionizare și neregularitate conduce la o polarizare electrică spontană în cristal, sau la o separare a sarcinilor electrice în nenumărați ioni negativi și pozitivi, care sunt distanțați într-un mod regulat. În cristalele de nitrit de galiu, polarizația globală este nulă, pentru că polarizațiile regiunilor încărcate cu sarcini electrice de semn opus, se anulează peste tot. Această anulare nu mai are loc atunci când cristalele de nitrit de galiu formează o heterojuncțiune la suprafața de separație cu un alt cristal, cum ar fi nitratul de galiu și aluminiu. În acest caz, modificarea abruptă de interfață, determină apariția unei regiuni încărcate electric în imediata vecinătate a suprafeței de separație dintre cele două cristale. Această regiune încărcată cu sarcini electrice și polarizată, se mărește în continuare prin polarizare piezoelectrică, ca urmare a tensiunii mecanice cauzate de diferența de 3.3% între constantele de rețea ale celor două rețele cristaline diferite.

Aceste polarizări combinate, induc la rândul lor un exces de electroni liberi în nitratul de galiu. Electronii se concentrează în număr foarte mare în apropierea regiunii de polarizare, fără a intra în nitratul de aluminiu galiu, datorită lățimii de bandă interzisă mai mare a acestuia, care acționează ca o barieră. Astfel se formează spontan un gaz electronic bidimensional în nitratul de galiu.

Mobilitatea electronilor în nitratul de galiu ($2000\text{cm}^2/\text{Vs}$), este mai ridicată decât în siliciu ($1500\text{cm}^2/\text{Vs}$) și mai scăzută decât în arseniura de galiu ($8500\text{cm}^2/\text{Vs}$), dar conductivitatea termică este de șapte ori mai mare decât a arseniurii de galiu, iar rigiditatea dielectrică ($3\text{MV}/\text{cm}$) este cu mult superioară față de arseniura de galiu ($0.4\text{MV}/\text{cm}$). Mobilitatea electronilor în gazul electronic bidimensional din nitratul de galiu, este mult crescută numai în vecinătatea interfeței cu nitratul de galiu aluminiu. Din punctul de vedere al lățimii benzii interzise (3.49eV), nitratul de galiu devansează toate celelalte materiale semiconductoare cunoscute. Lățimea mare a benzii interzise, se asociază cu comportarea de dielectric a nitrului de galiu, care se poate polariza și a cărei rigiditate dielectrică, este de valoare ridicată. Cu cât este mai largă banda interzisă, cu atât este mai mare energia și frecvența fotonului emis. Din acest motiv, nitratul de galiu poate emite fotoni în spectrul verde, albastru, purpuriu și ultraviolet. Fotonii care au toate frecvențele spectrului vizibil, au energii mai mici decât lățimea benzii interzise a nitrului de galiu, astfel că trec prin cristal fără a fi absorbiți, iar cristalele au aspectul transparent. Temperatura maximă a dispozitivelor realizate cu nitrit de galiu, este 300°C , în timp ce temperatura maximă a celor realizate cu siliciu, este de 150°C [Eas].

5.3. Întrebări

1. Definiți procesul de difuzie a impurităților într-un monocristal semiconductor și descrieți reactorul de difuziune;
2. Analizați relațiile care descriu procesul transportului de material dopant prin difuzia acestuia în materialul semiconductor;
3. Determinați expresia concentrației de impurități într-un plan transversal în raport cu fluxul de impurități și la un moment precizat, pentru difuzia din sursa finită;

4. Determinați expresia concentrației de impurități într-un plan transversal în raport cu fluxul de impurități și la un moment precizat, pentru difuzia din sursa infinită;
5. Scrieți relațiile concentrațiilor normale de impurități pentru difuzia din sursa finită și infinită și trasați diagramele asociate, cu explicațiile de rigoare;
6. Descrieți procedeul de obținere a joncțiunii semiconductoare prin difuzia impurităților de tip opus și trasați diagramele asociate;
7. Descrieți procedeul litografic de localizare a zonelor dopate și analizați modul prin care lungimea de undă a radiației utilizate influențează rezoluția procedurii;
8. Descrieți procesul MIL de prelucrare a unei plachete semiconductoare și precizați avantajele pe care le prezintă în comparație cu alte procedee;
9. Descrieți și analizați procedeul de implementare ionică și precizați avantajele pe care le prezintă acest procedeu în comparație cu difuzia;
10. Precizați în ce constă frânarea nucleară și cea electronică a ionilor implantați într-un material amorf;
11. Descrieți canalizarea ionilor implantați în materiale monocristaline și analizați profilul concentrației de impurități reale și ideale;
12. Stabiliți corelația dintre unghiul critic de incidență a ionilor implantați și gradul de compactitate a rețelei monocristaline;
13. Enumerați principalele materiale semiconductoare utilizate pentru fabricarea dispozitivelor semiconductoare și precizați succint dezavantajele pe care le prezintă în comparație cu nitritul de galiu;
14. Precizați avantajele pe care le prezintă nitratul de galiu pentru fabricarea dispozitivelor semiconductoare în comparație cu alte materiale semiconductoare utilizate în același scop și enumerați principalele domenii în care posibilitățile nitrului de galiu depășesc posibilitățile celorlalte materiale semiconductoare;
15. Analizați într-un mod comparativ și diferențiat, pe baza schemelor structurale, două tranzistoare cu efect de câmp realizate cu siliciu, respectiv nitrit de galiu și explicați succint prin ce diferă cele două structuri, având în vedere procesele care au loc;
16. Explicați formarea unei heterojoncțiuni la suprafața de separație dintre cristalul suport de nitrit de galiu și stratul depus de acesta, din nitrit de aluminiu-galiu și analizați formarea gazului electronic bidimensional;
17. Explicați motivul pentru care gazul electronic bidimensional se poate forma în materiale semiconductoare numai prin dopare cu impurități, excepție făcând sistemul format din nitrit de galiu-nitrit de aluminiu-galiu;
18. Comparați nitritul de galiu cu alte materiale semiconductoare, din punctul de vedere al mobilității electronilor, al câmpului de străpungere în avalanșă, al benzii interzise, al temperaturii de funcționare și al densității de putere pe milimetru de lungime a grilei;
19. Apreciați influența benzii interzise largi a nitrului de galiu asupra posibilităților de emisie și absorbție a radiației electromagnetice și comparați posibilitățile mai mari ale nitrului de galiu cu cele ale altor materiale semiconductoare;

5.4. Probleme

1. Un monocristal din siliciu este dopat cu impurități acceptoare cu concentrația: $N_A = 1,1 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ și cu impurități donoare cu concentrația: $N_D = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$.

a) Să se determine concentrațiile purtătorilor de sarcină majoritari și minoritari;

b) Să se poziționeze nivelele Fermi față de nivelul Fermi intrinsec;

Se cunosc dependențele de temperatură a concentrației purtătorilor de sarcină pentru semiconductorul intrinsec și a mobilității purtătorilor precum și valorile la $T_1 = 300 \text{ K}$.

$$n_i = A \cdot T^{1,5} \cdot e^{-\frac{\Delta E_g}{2kT}}; \mu = a \cdot T^{-2,5}; \quad n_i = 1,45 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}; \mu_n = 1000 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}}; \mu_p = 400 \frac{\text{cm}^2}{\text{V} \cdot \text{s}},$$

unde: A și a sunt constante, $\Delta E_g = 1,11 \text{ eV}$ este lățimea benzii interzise, constanta lui Boltzmann are valoarea $k = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$, sarcina electronului este $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, iar concentrațiile electronilor și golurilor la temperatura T, sunt:

$$n = n_i \cdot e^{\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}}; \quad p = n_i \cdot e^{-\frac{E_{Fi} - E_F}{kT}}$$

nivelul Fermi intrinsec E_{Fi} fiind plasat la mijlocul benzii interzise.

Rezolvare:

a) Între concentrațiile de purtători de sarcină există relațiile:

$$n \cdot p = n_i^2; \quad p + N_D = n + N_A,$$

monocristalul fiind neutru din punct de vedere electric.

Din sistemul de relații rezultă:

$$n = \frac{1}{2} \left[N_D - N_A (\pm) \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4 \cdot n_i^2} \right],$$

sau:

$$n = \frac{2 \cdot n_i^2}{N_D - N_A (\pm) \sqrt{(N_A - N_D)^2 + 4n_i^2}};$$

$$p = \frac{2n_i^2}{N_D - N_A (\pm) \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2}},$$

sau:

$$p = \frac{1}{2} \left[N_A - N_D (\pm) \sqrt{(N_A - N_D)^2 + 4 \cdot n_i^2} \right].$$

Expresiile cu semnul plus corespund din punct de vedere fizic, întrucât concentrațiile de purtători nu pot avea valori negative.

Concentrația de purtători în semiconductorul intrinsec la temperatura $T_2 = 600 \text{ K}$ se determină din relația:

$$\frac{n_i, T_2}{n_i, T_1} = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{1,5} \cdot e^{-\frac{\Delta W_i}{2k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)}$$

de unde rezultă: $n_i, T_2 = 1,876 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ valoare mult superioară concentrației n_i, T_1 .

La temperatura T_1 , n_i , $T_1 \ll N_A - N_D$, iar concentrațiile se determină cu relațiile aproximative:

$$p \cong N_A - N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$n \cong \frac{n_i^2}{N_A - N_D} = 2,1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

La temperatura $T_2 = 600 \text{ K}$ se utilizează relațiile exacte, rezultând valorile:

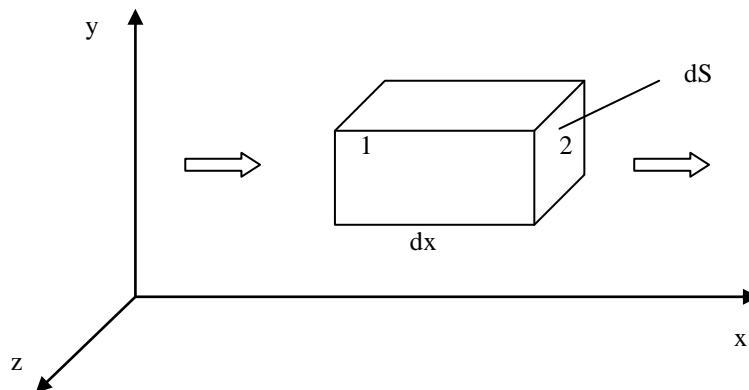
$$p = 1,034 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}, \quad n = 3,4 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}.$$

b) Poziția relativă a nivelului Fermi față de nivelul Fermi intrinsec pentru temperaturile T_1 și T_2 , se determină din relația:

$$E_{F_i} - E_p = kT \cdot \ln \frac{p}{n},$$

de unde rezultă valorile: $E_{F_i} - E_F = 0,347 \text{ eV}$ pentru $T_1 = 300 \text{ K}$ și $0,088 \text{ eV}$ pentru $T_2 = 600 \text{ K}$. Prin urmare, cu creșterea temperaturii, nivelul Fermi al semiconductorului extrinsec de tip „p” se apropie de nivelul energetic maxim corespunzător benzii de valență. Este de reținut că poziția nivelului Fermi depinde atât de temperatură cât și de concentrația de purtători de sarcină.

2. Admițând cunoscută expresia fluxului de particule care difuzează prin unitatea de suprafață, în unitatea de timp: $F = -D \cdot \text{grad}C$, iar C este concentrația particulelor, să se determine relația care descrie procesul de transport de materie pentru cazul unidimensional.



Rezolvare:

Difuzia este un proces de transport (atomi, molecule) determinată de mișcarea termică a atomilor rețelei cristaline a materialului semiconductor în direcția scăderii concentrației materialului difuzant.

Pentru cazul unidimensional fluxul materialului difuzant este: $F = -D \cdot \frac{\partial C}{\partial x}$.

Acceptând că fluxul de materie în unitatea de timp, prin unitatea de suprafață, pe o direcție perpendiculară pe această suprafață, depinde de coordonatele spațiale ale suprafeței considerate.

Numărul de particule care traversează suprafața 1 sau 2, în intervalul de timp dt , este: $dN_1 = F_1 \cdot dS \cdot dt$

$$dN_2 = F_2 \cdot dS \cdot dt,$$

unde: $F_2 = F_1 + \frac{\partial F}{\partial x} \cdot dx$, sau $dN_2 = \left(F_1 + \frac{\partial F}{\partial x} \right) \cdot dS \cdot dt$

În același interval de timp dt , numărul particulelor din elementul de volum $dV=dx \cdot dS$, se modifică cu: $dN = dN_1 - dN_2$:

$$dN = \left[F_1 - \left(F_1 + \frac{\partial F}{\partial x} \right) \right] \cdot dS \cdot dt = -\frac{\partial F}{\partial x} \cdot dx \cdot dS \cdot dt.$$

Variația în unitatea de timp a numărului de particule din unitatea de volum ce difuzează în direcția axei „x” este: $\frac{dN}{(dx \cdot dS) \cdot dt} = \frac{\partial C}{\partial t}$.

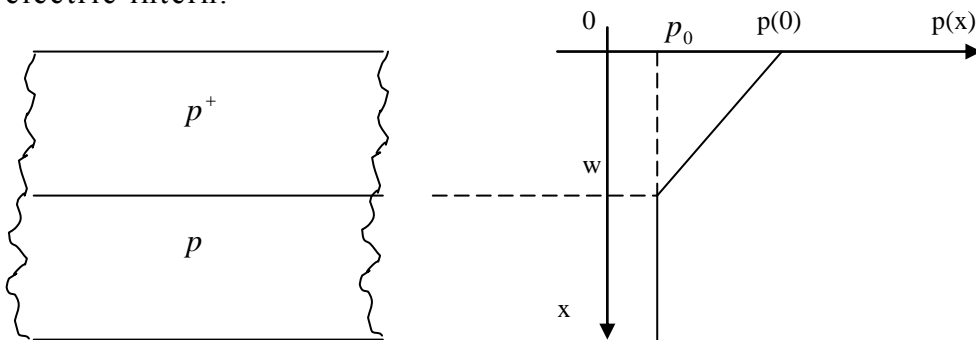
Prin urmare:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial F}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x}(-D \cdot \text{grad}C) = -\frac{\partial}{\partial x} \left(-D \frac{\partial C}{\partial x} \right) = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}.$$

Pentru o direcție oarecare a fluxului de impurități, $\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \Delta C$, iar expresia

coeficientului de difuzie este: $D = D_0 \cdot e^{-\frac{W_D}{kT}}$, unde: D_0 este un coeficient care caracterizează rețeaua cristalină a materialului semiconductor – din punct de vedere al difuziei, iar W_D este energia de activare a unei microdifuzii – de tip interstițial, sau prin substituție.

3. Cunoscând profilul concentrației de goluri dintr-un semiconductor, să se stabilească expresia densității curentului de difuzie a golurilor $J_{pdif}(x)$ și expresia câmpului electric intern.



Rezolvare:

Curentul de difuzie apare numai în regiunea: $x \in (0, w)$, unde: $\text{grad} p(x) \neq 0$ și are expresia:

$$J_{pdif} = e \cdot D_p \cdot \text{grad} p(x) = e \cdot D_p \cdot \frac{dp(x)}{dx} = e \cdot D_p \cdot \frac{p(0) - p_0}{w} = \text{const.},$$

coeficientul de difuziune având forma: $D_p = \frac{kt}{e} \mu_p$,

unde: e este sarcina electronului și a golului, k este constanta lui Boltzmann, iar μ_p este mobilitatea golului.

Expresia câmpului electric intern care apare între regiunile cu concentrații diferite de goluri și care se opune curentului de difuzie, rezultă din condiția de anulare a curentului total de goluri:

$$J_p = p(x) \cdot e \cdot \mu_p \cdot E(x) - e \cdot D_p \cdot \frac{dp(x)}{dx} = 0.$$

Expresia câmpului intern este de forma:

$$E(x) = \frac{D_p}{\mu_p} \cdot \frac{1}{p(x)} \cdot \frac{dp(x)}{dx} = \frac{kT}{e} \cdot \frac{1}{p(x)} \cdot \frac{p(0) - p_0}{w}.$$

Se va considera aceeași problemă pentru o joncțiune semiconductoare la echilibru, în care există două tipuri de curenți de difuziune: de goluri și de electroni. Câmpul intern se va reprezenta grafic.

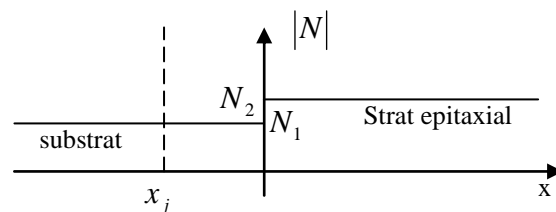
4. Un strat epitaxial din siliciu, dopat cu 10^{16} atomi de bor/cm² este crescut simultan pe patru substraturi de siliciu, dopate cu:

- 10^{14} atomi de fosfor /cm³;
- 10^{16} atomi de fosfor /cm³;
- 10^{18} atomi de fosfor /cm³;
- 10^{16} atomi de stibiu /cm³.

Stratul epitaxial este crescut timp de 20 minute, la temperatura de 1250 °C. Să se calculeze adâncimea joncțiunii pentru fiecare caz, știind că profilul fixat de impurități, ținând cont de redistribuția impurităților atât în stratul epitaxial cât și în substrat este:

$$N(x) = \frac{N_1}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_1 t}} \right) - \frac{N_2}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_2 t}} \right),$$

unde: N_1 și N_2 sunt concentrațiile purtătorilor de sarcină de tip opus din substrat și stratul epitaxial, iar D_1 și D_2 sunt coeficienții de difuzie, a căror valori sunt: $1\mu\text{m}^2/h$ pentru bor, fosfor și $0,36\mu\text{m}^2/h$ pentru stibiu. Să se calculeze adâncimile joncțiunilor pentru fiecare caz.



Rezolvare:

Adâncimea joncțiunii x_j se determină din condiția: $N(x_j) = 0$. Pentru primul caz, reprezentat în diagramă, se obține:

$$10^{14} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x_j}{1,095} \right) = 10^{16} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{x_j}{1,095} \right),$$

$$\operatorname{erf} \frac{x_j}{1,095} = \frac{10^{14} - 10^{16}}{10^{14} + 10^{16}} = -0,98.$$

Întrucât $\operatorname{arg} \operatorname{erfc} 0,02 = 1,64$, rezultă $x_j = -1,095 \cdot 1,64 = -1,8\mu\text{m}$.

Pentru al doilea caz și ultimul caz concentrația impurităților din substrat și stratul epitaxial vor trece prin punctul $N_1/2 = N_2/2$, care corespunde planului:

$x=0$, indiferent de valoarea coeficientului de difuzie. Prin urmare: $x_j = 0$. Deosebirea dintre cele două cazuri constă în redistribuția mai redusă a impurităților substratului din ultimul caz, datorită coeficientului de difuziune mai redus.

Pentru al treilea caz, se procedează ca și în primul caz, și întrucât: $N_2 < N_1$, joncțiunea va fi situată în semiplanul drept, iar adâncimea joncțiunii este: $x_j = +1,8\mu m$.

5. O joncțiune p^+n s-a realizat efectuând o predifuzie de bor timp de $t_p = 15$ minute la temperatura de $990^\circ C$ pe o plachetă din siliciu de tip n , dopat cu $5 \cdot 10^{15}$ atomi de fosfor/ cm^3 . Difuzia propriu-zisă a borului s-a efectuat la $1200^\circ C$, timp de: $t_d = 9$ ore. S-a măsurat rezistivitatea medie a stratului p^+ : $\bar{\rho} = 0,19\Omega m$, iar adâncimea joncțiunii are valoarea $x_j = 7\mu m$. Se cunosc coeficienții de predifuzie și difuzie: $D_p = 6 \cdot 10^{-2} \mu m/h^{1/2}$; $D_d = 0,6\mu m/h^{1/2}$ și concentrațiile superficiale: $N_{s,p} = 3 \cdot 10^{20} cm^{-3}$; $N_{s,d} = 6 \cdot 10^{17} cm^{-3}$. Să se determine concentrația de impurități în funcție de distanță, cantitatea totală de impurități difuzate pe unitatea de suprafață și gradientul de concentrație în regiunea joncțiunii.

Rezolvare:

Profilul concentrației de impurități după predifuzie are expresia:

$$N_p(x) = -N_{s,p} \cdot \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_p \cdot t_p}} + N_B, \quad (1)$$

unde: N_s este concentrația superficială uniformă de impurități acceptoare, D_p este coeficientul de predifuzie, iar N_B este concentrația preexistentă de impurități donoare.

După difuzie se obține o distribuție gaussiană de impurități:

$$N_d(x) = -N_{s,d} \cdot e^{-\frac{x^2}{4D_d t_d}} + N_B, \quad (2)$$

dacă este îndeplinită condiția:

$$\sqrt{\frac{D_p \cdot t_p}{D_d \cdot t_d}} = \sqrt{\frac{L_p}{L_d}} = 1,67 \cdot 10^{-2} \leq 0,25$$

și dacă redistribuția impurităților în substrat este presupusă neglijabilă.

Pentru $x = x_j$, relația (2) se anulează și rezultă lungimea de difuziune:

$$L_d = D_d \cdot t_d = 2,56\mu m^2.$$

Lungimea de difuzie se poate calcula direct întrucât se cunosc valorile D_d și t_d , rezultând: $L_d = 3,24\mu m^2$.

Diferența dintre cele două valori provine din aprecierea imprecisă a timpului de difuziune, prima valoare fiind afectată de o eroare mai mică.

Expresia concentrației de impurități în funcție de distanță este:

$$N_d(x) = -6 \cdot 10^{17} \cdot e^{-\frac{x^2}{10,24}} + 5 \cdot 10^{15} [cm^{-3}],$$

unde: distanța x este exprimată în μm .

Cantitatea totală Q , de impurități, pe unitatea de suprafață, introdusă în semiconductor, se determină cu relația:

$$Q = N_{s,d} \sqrt{\pi \cdot D_d \cdot t_d} = 5,10 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}.$$

Cantitatea Q se mai poate determina și din relația:

$$Q(t) = \int_0^{\infty} N_p(x,t) dx.$$

Prin integrarea expresiei:

$$N_p(x,t) = N_{s,p} \cdot \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_p \cdot t_p}}, \text{ rezultă:}$$

$$Q(t) = 2\sqrt{\frac{D_p \cdot t_p}{\pi}} \cdot N_{s,p} = 1,01 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}.$$

Din aceleași motive se va opta pentru prima valoare.

Valoarea $N_{s,p}$ corespunde solubilității maxime a materialului dopant în semiconductor.

Din relația (2) rezultă, expresia gradientului concentrației de impurități în regiunea joncțiunii:

$$\left. \frac{dN_d(x)}{dx} \right|_{x=x_j} = \frac{x_j}{2 \cdot D_d \cdot t_d} \cdot N_B = 7,6 \cdot 10^{-18} \text{ cm} \cdot -4.$$

5.5. Anexe

Defecte ale rețelei cristaline

Din punct de vedere geometric, defectele de structură se clasifică în:

1. Defecte punctuale, care pot fi de tip Schottky (vacante în rețeaua cristalină), de tip Frenkel (atomi interstițiali), sau de tipul atomilor de impurități. Aceste defecte sunt asociate prezenței gradientilor de temperatură care apar în procesul de creștere epitaxial a monocristalului, sau în procesul de impurificare.

2. Defecte liniare, care pot fi de tipul microfisurilor sau de tipul dislocațiilor. Dislocațiile sunt cele mai frecvente defecte care apar în procesul de creștere epitaxială sau de difuzie a impurităților în monocristal. Energia potențială a rețelei cristaline scade în regiunea dislocației, iar impuritățile din cristal tind să difuzeze spre regiunea perturbată, generând o atmosferă de impurități. Șirul liniar de atomi din rețeaua cristalină este întrerupt la extremitatea dislocației, având ca rezultat câte o legătura chimică nesatisfăcută – corespunzătoare atomilor de la extremitățile șirului. Se creează astfel un nivel local acceptor. Impuritățile difuzează mult mai rapid în regiunea dislocației, unde există fie vacante, fie atomi interstițiali sau de substituție, care constituie centrul de recombinare al purtătorilor de sarcină minoritari. Durata de viață a purtătorilor minoritari scade pe măsură ce numărul de dislocații crește. Timpul de comutare al unei joncțiuni poate fi redus substanțial prin crearea de dislocații în regiunea joncțiunii, dar tensiunea de străpungere scade în egală măsură.

3. Defecte volumice, care se datorează incluziunii unei faze străine. Aceste defecte determină reducerea performanțelor dispozitivului semicon-ductor.

Proprietățile funcției de eroare

Funcția de eroare are forma:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\alpha^2} d\alpha$$

Funcția complementară de eroare are expresia:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\alpha^2} d\alpha = 1 - \operatorname{erf}(x)$$

$$\operatorname{erfc}(x) = 0$$

$$\operatorname{erfc}(\infty) = 0$$

$$\operatorname{erfc}(x) \cong \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot x \quad \text{pentru } x \gg 1$$

$$\operatorname{erfc}(x) \cong \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \frac{e^{-x^2}}{x} \quad \text{pentru } x \gg 1$$

$$\frac{d}{dx} [\operatorname{erfc}(x)] = \frac{2}{\pi} \cdot e^{-x^2}$$

$$\int_0^x \operatorname{erfc}(x') dx' = x \cdot \operatorname{erfc}(x) + \frac{1}{\sqrt{\pi}} (1 - e^{-x^2})$$

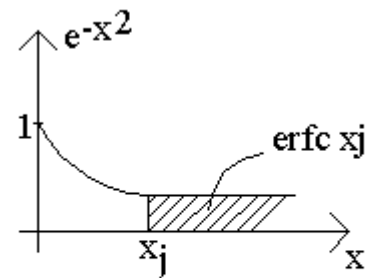


Fig.A.8.1. Reprezentarea grafică a funcției complementare de eroare