

ROLUL FIZICII ÎN DEZVOLTAREA MICROELECTRONICII

prof. dr. fiz. Eugen Ștefan Lakatoș

1. ÎNCEPUTURILE MICROELECTRONICII

Două mari teorii ale Fizicii actuale, au revoluționat această știință în primele decenii ale secolului al XX-lea: *teoria relativității* și *teoria cuantică*. Teoria relativității a fost, în esență, creația fizicianului Albert Einstein¹, și a determinat o modificare radicală a noțiunilor mecanicii clasice newtoniene de spațiu și timp, conducând la viziunea unei lumi cuadridimensionale, în care timpul este considerat ca a patra coordonată, deși nu este în întregime echivalentă cu cele trei coordonate spațiale. Teoria relativității a introdus modificări importante în modelarea mișcării electronilor în atomi, a mișcării planetelor în Sistemul Solar și a mișcării galaxiilor în Univers. Teoria cuantică reprezintă creația mai multor oameni de știință, începând cu Max Planck, care a introdus în fizică noțiunea de *cuantă de energie* [1].

Deși la sfârșitul secolului al XIX-lea mulți fizicieni aveau convingerea că se reușise să se descopere tot ce era mai important în domeniul fenomenelor fizice, realitatea a fost cu totul alta. Începea o eră nouă, în care teoriile clasice, care au dominat fizica încă din timpurile pre-newtoniene, au fost reevaluate și răsturnate. Zorile unei noi științe își făceau apariția, aceasta fiind *teoria cuantelor*, elaborată de Max Planck², fizician german, membru al Academiei de Științe din Berlin. La 14 decembrie 1900, la o ședință a Societății germane de fizică, Max Planck arată că paradoxurile care abundau în teoria clasică a emisiei și absorbției luminii de către corpuri ar putea fi înlăturate dacă s-ar presupune că *energia radiantă poate exista numai în formă de porții discrete*. Planck numește aceste *porții* de energie, *cuante de lumină*. În acest fel, Planck, un fizician sută la sută clasic, rezolvă problema termodinamicii radiației, inițiind ceea ce astăzi numim *fizica modernă* [1].

În anul 1905, aplicând teoria cuantelor de lumină, Einstein explică legile empirice ale *efectului fotoelectric* (emisii electronilor de către suprafețele metalice iluminate cu lumină violetă și ultravioletă). Ulterior, Arthur Compton a demonstrat, prin experimentele sale, că difracția razelor X de către electronii liberi are loc după aceeași lege ca și ciocnirea elastică dintre două sfere. Astfel, în numai câțiva ani, noua idee a *cuantificării energiei radiante* a început să domine atât fizica teoretică cât și cea experimentală [1].

Primele aplicații electronice au fost realizate pe baza tuburilor cu vid: *dioda cu vid*, ca element redresor, realizată de englezul John Fleming, în 1904; *trioda cu vid*, ca dispozitiv de amplificare a semnalului, brevetată de americanul Lee de Forest, în 1907. Epoca tuburilor cu vid a dăinuit într-o perioadă în care nivelul de dezvoltare al fizicii nu permitea abordarea electronicii corpului solid. Acest fapt devine posibil după anul 1925, când prin lucrările lui Bohr, de Broglie, Schrödinger, Dirac, Fermi, Heisenberg, se pun bazele *meccanicii cuantice*. Declanșarea celui de-al doilea război mondial determină mutarea nucleului școlii de mecanică cuantică, din Europa în SUA, la universitățile Princeton și MIT. În aceste universități se vor forma viitorii specialiști, pionieri ai unui domeniu cu totul nou, aflat la granița dintre fizică și electronică, *microelectronica*.

Actul de naștere al acestui domeniu este datat 23 decembrie 1947, când o echipă de la Bell Telephone Laboratories, formată din William Bradford Shockley³, Walter Houser

¹ Albert Einstein (1879 – 1955), autor al teoriei relativității, premiul Nobel pentru fizică, 1921. [en.wikipedia.org/wiki/Albert_Einstein]

² Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858 – 1947), fondator al mecanicii cuantice, premiul Nobel pentru fizică, 1918, "*ca apreciere pentru descoperirea cuantei de energie*". [en.wikipedia.org/wiki/Max_Planck]

³ William Bradford Shockley (1910 – 1989), fizician și inventator american, premiul Nobel pentru fizică, 1956. [en.wikipedia.org/wiki/William_Shockley]



Figura 1.1. Inventatorii tranzistorului: de la stânga - John Bardeen, William Shockley și Walter Brattain
(Sursa: upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c2/Bardeen_Shockley_Brattain_1948.JPG)

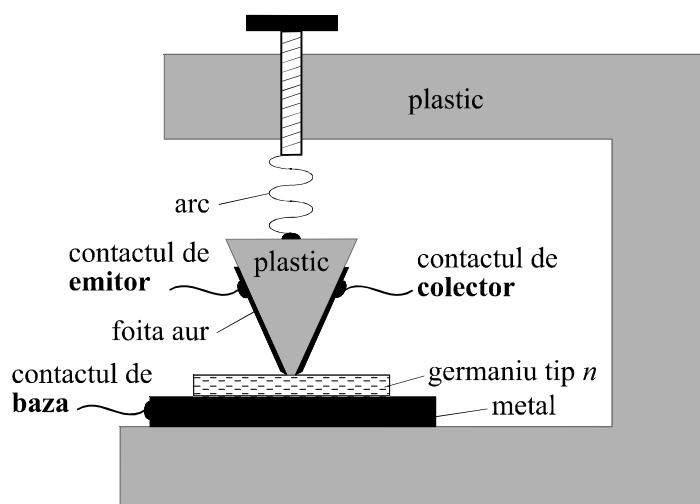


Figura 1.2. Prototipul primului experiment de punere în evidență a efectului de *tranzistor*
(Sursa: en.wikipedia.org)

Brattain și John Bardeen, obțin primele rezultate cu un **dispozitiv de cristal cu trei electrozi**, numit ulterior **tranzistor**, care putea să amplifice și să detecteze semnale electrice (fig.1.1). Între 17 noiembrie 1947 și 23 decembrie 1947, cei trei cercetători realizează un experiment prin care observă că prin aplicarea a două contacte punctiforme, aurite și foarte apropiate între ele, pe un cristal de *germaniu*, semnalul produs la ieșirea circuitului are puterea mai mare decât semnalul de la intrare. Prototipul acestui experiment este ilustrat în figura 1.2. Grupul celor trei a pornit de la studiul teoretic și experimental al efectului câmpului electric în materialele solide, cu scopul de a găsi un înlocuitor al tuburilor cu vid, un dispozitiv cu dimensiuni mult mai mici și care să aibă un consum de putere mai mic.

La 26 februarie 1948 este brevetată ideea **tranzistorului cu contact punctiform**. Se realiza astfel primul amplificator cu corp solid din istoria Electronicii. Autorii invenției erau Bardeen (care a plecat de la ideea încercată de Shockley în 1939, cea a unui amplificator cu siliciu pe baza efectului de câmp, înlocuind siliciul cu germaniul) și Brattain (cel care a realizat baza experimentală), ei neincluzându-l în cererea de brevet și pe Shockley. În aceste condiții, Shockley elaborează modelul care stă la baza explicării funcționării tranzistorului *bipolar*,

injecția de purtători minoritari⁴, brevetând, la 26 iunie 1948, **tranzistorul bipolar cu joncțiuni** (tranzistorul difuzat). Toți trei primesc premiul Nobel în fizică, în anul 1956, pentru “cercetările în domeniul semiconductorilor și descoperirea efectului de tranzistor”⁵. De remarcat este faptul că toți trei erau *fizicieni*, meseria de inginer electronist, așa cum o înțelegem astăzi, fiind în curs de dezvoltare.

Inventarea tranzistorului a determinat o creștere fără precedent a activității de cercetare și dezvoltare a două domenii: *fizica corpului solid*, în particular, *fizica semiconductorilor* și *tehnologia dispozitivelor semiconductoare*. Astăzi se poate afirma că ideile fundamentale privind teoria dispozitivelor semiconductoare, au fost gândite și modelate de Shockley⁶. Teoriile care au stat la baza cunoașterii proceselor fizice din corpul solid au fost: *conceptul de dualitate undă-particulă* al lui de Broglie și *teoria benzilor de energie*, elaborată de Alan Wilson, în 1931.

Prima firmă de dispozitive semiconductoare este înființată de Shockley în viitoarea celebră Vale a Siliciului, în anul 1955 (**Shockley Transistor Corporation**). Cavalcada descoperirilor dar și a rivalităților în domeniul microelectronicii începe odată cu brevetarea primei idei de **circuit integrat**, în 1959, existând de fapt două brevete depuse la un interval de câteva luni, de către Jack Kilby⁷ (**Texas Instruments**), pentru realizarea unor circuite având toate elementele înglobate într-un singur bloc semiconductor, și Robert Norton Noyce⁸, (cofondator al companiei **Fairchild Semiconductor Corporation**), care combină **tehnologia planară** cu tehnicile de fotogravură a unor trasee metalice peste stratul de *bioxid de siliciu* (SiO_2), ceea ce reprezenta de fapt o descriere a conceptului de **circuit integrat**. O contribuție deosebit de importantă la definirea tehnologiei planare a avut-o fizicianul american, de origine elvețiană, Jean Hoerni, care a sugerat tehnica de stabilizare a dispozitivelor semiconductoare pe bază de *siliciu monocristalin*, cu ajutorul unui strat de SiO_2 crescut pe suprafața siliciului⁹. De fapt, ușurința formării stratului de oxid pe suprafața siliciului a fost

⁴ Purtătorii de sarcină minoritari injectați de joncțiunea emitorului polarizată direct, străbat baza tranzistorului (regiune semiconductoare având conductivitatea de tip opus regiunii emitorului, cu lungimea mai mică decât lungimea de difuzie a purtătorilor minoritari), recombinaându-se într-un procent foarte mic (2%), fiind colectați de joncțiunea colectorului polarizată invers. Prin urmare, purtătorii de sarcină minoritari străbat o regiune semiconductoare având o concentrație mare de purtători majoritari, practic fără să se recombine. Curentul de purtători minoritari traversează structura tranzistorului de la un circuit cu rezistență mică (joncțiunea emitor, polarizată direct), la un circuit cu rezistență mare (joncțiunea colector, polarizată invers), de aici rezultând termenul de *TRANSfer-reZISTOR* de la care provine cuvântul *TRANZISTOR* [2]. Cuvântul *TRANZISTOR* a fost inventat de John Pierce în mai 1948. În anii 50', tranzistorul bipolar cu joncțiuni, produs de firme ca GE sau Texas Instruments, a început să fie folosit ca amplificator în produse comerciale cum ar fi aparatele auditive și receptoarele radio. La începutul anilor 60', tranzistorul a înlocuit tuburile cu vid, în cele mai multe circuite ale calculatorului.

⁵ [<http://en.wikipedia.org/wiki/Transistor>]

⁶ În iulie 1949 Shockley a publicat ideea teoriei injectiei de purtători minoritari într-un articol intitulat *The Theory of P-N Junctions in Semiconductors and P-N Junction Transistors*, dezvoltând această teorie în cartea intitulată *Electrons and Holes in Semiconductors*, publicată în anul 1950. Aceasta a fost prima lucrare de referință pentru noul domeniu al Microelectronicii.

⁷ Pe 24 iulie 1958, Jack Kilby a emis următoarea ipoteză: miniaturizarea circuitelor electrice ar putea fi realizată prin înglobarea într-o singură plachetă de siliciu a rezistoarelor, capacitoarelor, tranzistoarelor și diodelor. Ideea a fost demonstrată în septembrie 1958, prin realizarea primului oscilator integrat, pe substrat de germaniu, având frecvența de 1,3 MHz [50 Years of Electron Devices, 2002, IEEE].

⁸ Robert Norton Noyce (1927-1990), inginer american [en.wikipedia.org/wiki/Robert_Noyce]

⁹ Jean Hoerni a inventat procesul tehnologic planar în 1958, la Fairchild Semiconductor Corporation. În ianuarie 1959, Robert Noyce concepe o nouă alternativă a tehnologiei de fabricație a circuitelor integrate: *în multe aplicații ar fi de dorit să se facă mai multe dispozitive pe un singur substrat de siliciu pentru a putea realiza interconexiuni între ele, ca parte a procesului de fabricație*. Abordarea distinctivă a lui Noyce a constat în depunerea de trasee de aluminiu pe suprafața stratului de SiO_2 , pentru a interconecta elementele de circuit definite prin tehnologia planară. [50 Years of Electron Devices, 2002, IEEE]

unul dintre motivele pentru care germaniul a fost înlocuit cu siliciul monocristalin, ca material semiconductor de bază folosit în *microelectronică*. Identificarea metodei de *oxidare a siliciului* a condus la dezvoltarea tehnologiei planare.

Ideea circuitului integrat este dezvoltată de către Robert Noyce și Gordon Earle Moore¹⁰, la celebra firmă **Intel** (**I**ntegrated **E**lectronics, înființată în anul 1968), unde se produce, în 1971, primul *microprocesor* (4004) și prima *memorie integrată*. Calea către realizarea *calculatorului personal* era deschisă, primul *calculator personal* fiind realizat în 1975, folosindu-se microprocesorul *Intel 8080*.

Timp de aproximativ 40 de ani, de la inventarea circuitului integrat, rata de creștere a performanței tehnologiilor de calcul a fost exponențială, puterea de calcul dublându-se la fiecare 18 luni [3]. Această evoluție a primit numele de „lege”: *legea lui Moore*. Pornind de la datele existente la nivelul anului 1965 (începând cu 1958, anul invenției circuitului integrat), Gordon Moore a estimat o dublare a numărului de tranzistori la fiecare 12 luni, și a prezis că această tendință va continua "pentru cel puțin zece ani". În anul 1975 Moore și-a revizuit estimarea, stabilind dublarea numărului de tranzistori la aproximativ doi ani. La nivelul anului 2005 se aștepta ca această tendință să continue cel puțin până în 2015 sau 2020. Cu toate acestea, în anul 2010 s-a estimat o încetinire a creșterii la sfârșitul anului 2013, conform căreia numărul de tranzistori se va dubla la fiecare 3 ani¹¹.

Chiar dacă această „lege”, bazată în fapt pe observații empirice, a funcționat timp de mai bine de 40 de ani, realitatea tehnologică depășind de mai multe ori barierele prezise de experții din domeniu, limitele finale ale actualei tehnologii sunt din ce în ce mai aproape. În mod surprinzător, barierele care se profilează sunt de natură economică, o fabrică de circuite „la cheie” costând la ora actuală 50 miliarde de dolari, față de 2 miliarde, în anul 2001. Costul unei fabrici de circuite integrate urmează aceeași curbă exponențială a performanței circuitelor integrate [3]. Creșterea costurilor de înzestrare tehnologică a acestor fabrici a fost dată de prețul echipamentelor folosite. Astfel, prețul din ce în ce mai mare al microminiaturizării circuitelor integrate a fost determinat de cerințele de precizie din ce în ce mai mari privind: prelucrarea suprafeței *oglină*¹² a plachetelor de siliciu, alinierea măștilor în procesul de *fotogravură*¹³, sudura firelor de interconexiuni între *padurile*¹⁴ circuitului și terminalele capsulei. În plus, cheia costului scăzut al *cipului* (structurii) de circuit integrat, este procesarea simultană a cât mai multe structuri în cadrul aceluiași proces tehnologic. Această cerință a condus la creșterea diametrului plachetelor de siliciu de la 2 *țoli* (5,08 cm) în 1970, la 12 *țoli* (30,48 cm) în 2010.

Creșterea diametrului plachetelor a determinat de asemenea creșterea costurilor de dotare cu echipamente care să asigure un grad din ce în ce mai mare de automatizare a proceselor

¹⁰ Gordon Earle Moore (1929 -), chimist, fizician și om de afaceri american.
[en.wikipedia.org/wiki/Gordon_Moore]

¹¹ [en.wikipedia.org/wiki/Moore's_law]

¹² Suprafața plachetei de siliciu, pe care se realizează întregul proces tehnologic necesar fabricării circuitelor integrate, trebuie să aibă o planeitate foarte bună (suprafață *oglină*). În caz contrar, *fotorezistul* nu acoperă întreaga suprafață a plachetei, rezultând imperfecțiuni datorită corodării *vârfurilor* de siliciu neacoperite. Se obține printr-o operație de polizaj mecano-chimic, cu o soluție abrazivă conținând granule foarte mici, cu diametre cuprinse între 0,1 μm și 0,5 μm .

¹³ *Fotogravură*: proces tehnologic de definire a configurațiilor unui circuit integrat (realizarea în anumite zone ale plachetei de siliciu a unor *ferestre*). Etapele principale ale acestui proces sunt: *oxidarea* suprafeței plachetei, acoperirea suprafeței plachetei cu un strat de material fotosensibil (*fotorezist*), expunerea plachetei la o lumină de o anumită lungime de undă, printr-o mască, care impresionează fotorezistul în anumite zone (fotorezistul este iluminat numai în zonele transparente ale măștii), *developarea* (dizolvarea chimică a fotorezistului expus la lumină), *corodarea* oxidului și îndepărtarea fotorezistului rămas (deschiderea ferestrei).

¹⁴ *Pad*: arie (zonă, suprafață) de cupru asociată *pinilor* (terminalelor) unui circuit.

tehnologice (loturile de plachete sunt transferate între diversele operații ale fluxului tehnologic, cu ajutorul unor linii de transport complet automatizate, fără intervenția manuală a operatorilor tehnologici).

Evoluția în timp a tehnologiei de realizare a structurilor MOS se definește prin rata de micșorare a principalului parametru care caracterizează structura tranzistorului MOS, anume *lungimea porții tranzistorului MOS*. Câteva repere: 1971 – 10 μm , 1985 – 1 μm , 2004 – 0,09 μm , 2015 – 0,01 μm , 2022 – 0,005 μm .

În aceste condiții, un nou domeniu este prefigurat deja în laboratoarele de cercetare, *nanotehnologia*. Acest domeniu va înlocui, probabil, actuala tehnologie și o dată cu ea, materialul semiconductor folosit în toată această perioadă, care pe bună dreptate a primit numele de „epoca siliciului”.

În lucrare sunt prezentate principalele capitole ale fizicii care au contribuit la dezvoltarea domeniului microelectronicii, principalele concepte teoretice și modelele lor fizice care au stat la baza dezvoltării tehnologiilor de fabricație din industria dispozitivelor pe bază de semiconductori și a circuitelor integrate. Astfel, în cuprinsul articolului sunt consacrate părți separate principalelor operații tehnologice care alcătuiesc fluxurile de fabricație ale circuitelor integrate: oxidarea, implantarea de ioni, epitaxia, difuzia. Sunt descrise modelele fizice ale acestor operații, modele care au stat la baza proiectării proceselor tehnologice din industria microelectronicii, precum și principalele metode de caracterizare a diverselor straturi obținute în urma aplicării proceselor respective. Aceste modele fizice sunt folosite și în softurile de simulare ale proceselor tehnologice. Deoarece toate dispozitivele semiconductoare active sunt formate din joncțiuni *pn*, lucrarea cuprinde o prezentare succintă a acestei structuri semiconductoare de bază. Este definit modelul de conducție ambipolară, caracteristic structurilor semiconductoare, model adoptat pentru descrierea funcționării dispozitivelor semiconductoare active. Lucrarea se încheie cu o scurtă prezentare a principalelor tehnologii folosite în fabricația circuitelor integrate.

2. INTRODUCERE ÎN FIZICA CORPULUI SOLID

Studiul proprietăților fizice ale *stării solide*, considerată ca ramură a fizicii atomice, a început în primii ani ai secolului XX. Dacă în secolul al XIX-lea, studiul cristalelor se referea numai la forma exterioară a cristalelor și la proprietățile lor fizice, *fizica stării solide* a început să însemne studiul cristalelor și al electronilor în cristale. Astfel, după anul 1910, în urma descoperirii difracției razelor X pe cristale și publicării unei serii de calcule și predicții simple și destul de reușite ale proprietăților cristaline, fizicienii au început să se ocupe mai profund de modelele atomice ale cristalelor.

O dată importantă în istoria *fizicii corpului solid* este 8 iunie 1912, când Max von Laue, fizician german, împreună cu W. Friedrich și P. Knipping, prezintă la Academia Bavareză de Științe din Munchen articolul intitulat “Efecte de interferență cu raze Roentgen”. În articol este prezentată o teorie elementară a difracției razelor X pe o structură periodică de atomi precum și primele observații experimentale ale difracției razelor X în cristale. Conținutul lucrării a dovedit că razele X sunt *unde*, deoarece ele pot fi difractate. S-a dovedit, de asemenea, în mod decisiv, că materialele cristaline sunt compuse din *aranjamente periodice de atomi*. Această dovadă experimentală, foarte importantă, a marcat începutul domeniului fizicii corpului solid așa cum este cunoscut astăzi. La scurt timp, în 1913, au fost efectuate și primele determinări de structuri cristaline cu ajutorul analizei prin difracția razelor X, de către William Henry Bragg [4]. Dezvoltarea acestui domeniu al fizicii a permis înțelegerea fenomenelor legate de mecanisme de difuzie ale impurităților în solide și de creștere a monocristalelor, două domenii foarte importante care au contribuit la dezvoltarea tehnologiilor de fabricație ale structurilor microelectronice pe bază de semiconductori.

Fizica corpului solid studiază toate proprietăților fizice ale *stării solide*: mecanice, termice, optice, electrice, magnetice. Ca domeniu al fizicii a apărut în perioada 1930 – 1935 și s-a dezvoltat datorită implicării în realizări tehnice importante ale secolului al XX-lea. Ca exemple, se pot enumera: *tranzistorul bipolar*, celelalte dispozitive semiconductoare dezvoltate ulterior, *laserul*, *memoria magnetică*, *supraconductibilitatea*, *microelectronica* – domeniul de vârf al tehnologiei secolului al XX-lea. Fizica corpului solid cuprinde trei mari capitole: fizica metalelor și aliajelor, fizica dielectricilor, fizica semiconductoarelor [5].

Starea *solidă (condensată)* a materiei este caracteristică celor mai multe materiale în condiții de temperaturi și presiuni cu valori normale. Caracteristic pentru aceste materiale sunt interacțiunile interatomice puternice. Prin urmare, volumul și forma materialului sunt bine definite.

Materialele solide pot fi: *cristaline, amorse, policristaline*. Caracteristic materialelor solide cristaline este *structura cristalină*, caracterizată prin *ordine la distanță* (aranjare spațială regulată a atomilor, ionilor sau moleculelor). Proprietățile electrice și optice sunt dependente de direcția acțiunii factorilor externi. *Anizotropia*¹⁵ proprietăților fizice (conductibilitatea electrică și termică, proprietățile optice, modulul de elasticitate etc.) ale *cristalelor* și, în mare măsură, formele exterioare ale acestora, sunt determinate de distribuția preferențială a atomilor sau moleculelor în spațiu (așezarea spațială ordonată a atomilor sau moleculelor în nodurile unei rețele asimetrice).

Pentru solidele amorse, la care așezarea atomilor sau moleculelor este *dezordonată*, proprietățile fizico-mecanice, electrice, optice, magnetice etc., sunt *independente* de direcția considerată (*izotropia* proprietăților fizice) [6].

Solidele policristaline pot fi definite pe scurt ca *agregate de cristale*.

Rețeaua cristalină este caracteristică solidului cristalin. Rețeaua cristalină este reprezentată de mulțimea punctelor din spațiu determinată de vectorul:

$$\mathbf{r} = n_1\mathbf{a} + n_2\mathbf{b} + n_3\mathbf{c}, \quad (2.1)$$

unde $n_1, n_2, n_3 \in \mathbb{Z}$ iar $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ reprezintă *vectorii fundamentali* ai rețelei. Punctele definite de relația (2.1) se numesc *nodurile rețelei*.

Cristalul ideal este definit ca o repetare regulată, infinită în spațiu, a unei *unități structurale (bază)* identice (un atom, un grup de atomi sau molecule). *Structura cristalină* reprezintă suprapunerea dintre *rețeaua cristalină* și *baza* de atomi (așezarea unei baze de atomi fiecărui nod al unei rețele cristaline) [4].

Celula cristalină elementară este caracterizată de vectorii fundamentali și unghiurile dintre ei: $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}, \alpha, \beta, \gamma$ (fig. 2.1).

Corpurile solide cristaline sau amorse se găsesc în stările respective datorită acțiunii forțelor de atracție și de respingere dintre atomi. Acest tip de legătură între atomi asigură și existența moleculelor.

Stabilitatea stărilor de agregare este determinată de egalitatea dintre forțele de atracție și de respingere. Prin urmare, rețeaua cristalină a oricărei substanțe există datorită interacțiunii dintre atomi. Caracterul acestei interacțiuni este determinat de structura învelișurilor electronice ale atomilor care formează cristalul respectiv.

¹⁵ *Anizotropie*: proprietate caracteristică anumitor corpuri, constând în *dependența* unor mărimi mecanice, electrice, optice etc., numite constante de material, de direcția de acțiune a factorilor externi.

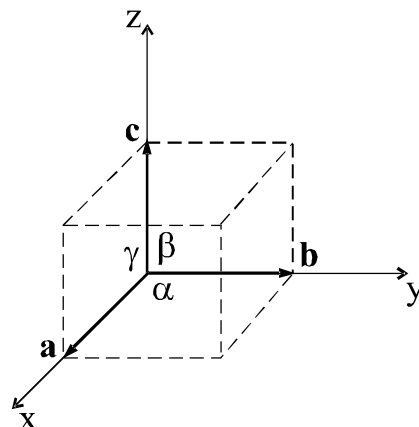


Figura 2.1. Celula cristalină elementară

Forțele de legătură depind de distanța dintre atomi și de natura atomilor. În esență, aceste forțe sunt de natură electrică, la care contribuie unele efecte de natură cuantică [6]. Există patru categorii de legături între atomi (fig. 2.2) [4].

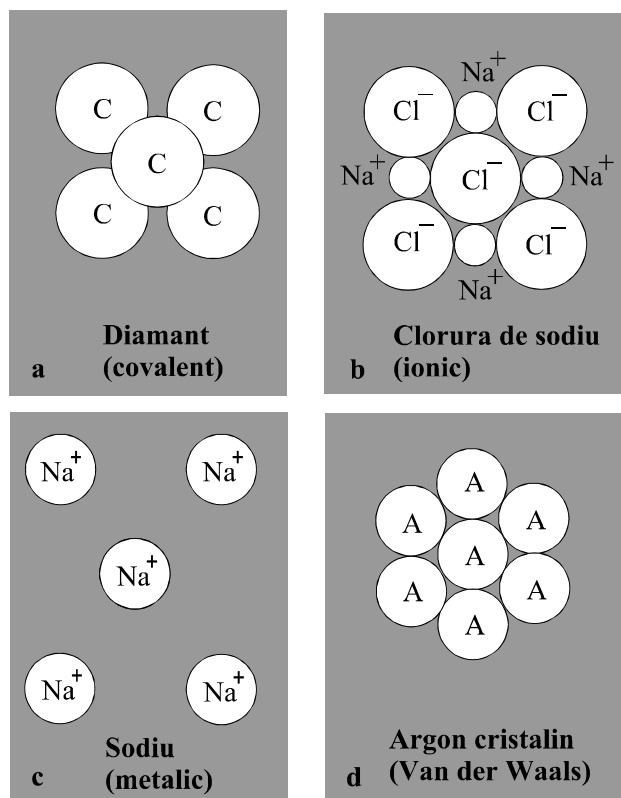


Figura 2.2. Tipurile principale de forțe de legătură cristalină: a) legătura covalentă; b) legătura ionică; c) legătura metalică; d) legătura Van der Waals (*Sursa: prelucrat după Kittel [4]*)

Rolul fundamental în fenomenul interacțiunii dintre atomi este determinat de *efectul de schimb*, conform căruia doi atomi își pot transfera electronii unul altuia, rezultând forțe de atracție între atomi. Această legătură se numește *legătură homopolară*, deoarece, de obicei, se observă la atomi de același fel. Deoarece la realizarea ei participă electronii de valență, această legătură se numește *legătură covalentă* [7]. Prin urmare, legătura covalentă se stabilește ca rezultat al punerii în comun a electronilor de valență ai atomilor, cu formarea de

perechi comune de electroni. Maximul forței de legătură apare în cazul în care atomii schimbă o pereche de electroni cu *spini* antiparaleli¹⁶.

Acest tip de legătură asigură cristalului o stabilitate și o duritate deosebită. Ca exemple de substanțe cu legătură covalentă se pot da: diamantul, *siliciul*, germaniul. În cazul siliciului, fiecare atom formează legături covalente prin punerea în comun a electronilor de valență, cu cei patru atomi învecinați (fig. 2.3).

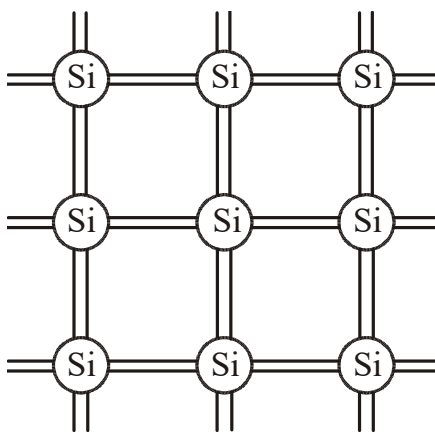


Figura 2.3. Legătura covalentă ilustrată cu ajutorul cristalului de siliciu

Legătura *ionică* este caracteristică cristalelor ionice, formându-se între ioni pozitivi și negativi, un ion de un tip având ca vecini de ordinul întâi ioni de tip diferit (exemplu: cristalul de Na^+Cl^- , fig. 2.2.b). Acest tip de legătură se formează prin atracția electrostatică între ionii pozitivi și negativi, asigurându-se astfel stabilitatea cristalului. Legătura ionică este un caz particular al legăturii covalente [7].

Caracteristic legăturii *metalice* este existența *electronilor liberi* (electronii de valență) care se pot deplasa prin rețeaua cristalină a metalului, rezultând o bună conductibilitate electrică. Interacția electronilor liberi cu nodurile încărcate pozitiv ale rețelei determină o mare stabilitate a acestei legături. Legătura metalică reprezintă o altă formă limită a interacțiunii de schimb, prin care are loc schimbul de electroni între perechi de atomi oarecare ai aceluiași cristal, electronii aparținând rețelei cristaline în ansamblu [7].

Legătura *Van der Waals* este o legătură *slabă* între atomi cu pături electronice exterioare complete.

Teoria cuantică a comportării electronilor în corpul solid arată că nivelele de energie pe care aceștia le pot ocupa, se grupează în *benzi energetice*. Aceste benzi energetice sunt separate prin zone cu energii interzise pentru electroni, numite *benzi interzise* [8]. Notăția consacrată pentru lățimea benzii interzise este E_g (“energy gap”). Banda energetică complet ocupată de *electronii de valență* se numește *bandă de valență*. Conform modelului benzilor de energie, electronii pot să devină *electroni de conducție* dacă primesc suficientă energie pentru a ocupa un nivel în *banda de conducție* (fig. 2.4). Din punct de vedere al *conductibilității* electrice, corpurile solide se împart în trei categorii: *metale*, *semiconductori* și *izolatori (dielectrice)*. Intervalele de valori ale *conductivității* electrice pentru cele trei categorii de solide sunt, respectiv $10^3 \div 10^6 \, \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$, $10^{-10} \div 10^3 \, \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$, $10^{-22} \div 10^{-10} \, \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$.

¹⁶ *Spinul electronului*: moment cinetic asociat mișcării de rotație a unui electron în jurul axei proprii. În mecanica cuantică, acestei mărimi îi corespunde un număr cuantic de spin s .

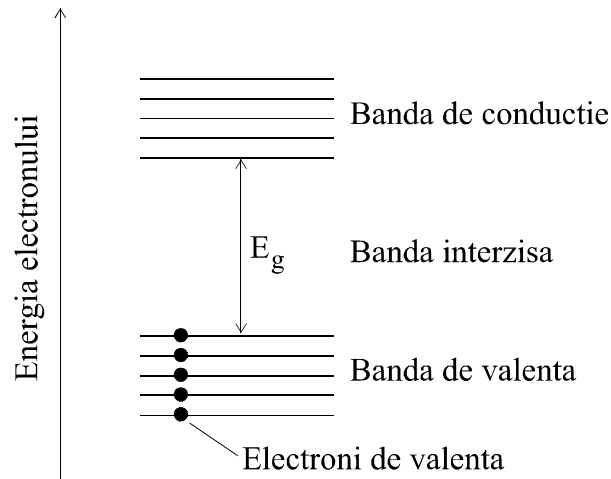


Figura 2.4. Schema structurii benzilor de energie pentru electroni în corpul solid

2.1. Modelul electronilor liberi

În cadrul acestui model, *electronii de conducție* se deplasează prin rețeaua cristalină, ciocnindu-se cu ionii rețelei. Rezultă modificarea vitezei lor, în *modul* și *direcție*. Ca urmare, deplasarea *medie* a electronilor este nulă, mișcarea dezordonată nedeterminând un curent electric. Pentru apariția lui, este necesară deplasarea *orientată* a electronilor, care poate fi determinată de diferiți factori: aplicarea unui câmp electric, existența unui gradient de temperatură, iluminare neomogenă a materialului, etc.

Acțiunea câmpului electric de intensitate **E** determină accelerarea electronilor, cu accelerația dată de relația:

$$a = \frac{q}{m} E. \quad (2.2)$$

Prin urmare, conform legilor cinematicii, viteza fiecărui electron este de forma:

$$v = at = \frac{q}{m} tE. \quad (2.3)$$

Viteza unui electron la momentul de timp t după aplicarea câmpului electric, va fi:

$$v(t) = v_T + at, \quad (2.4)$$

unde v_T reprezintă *viteza termică* (media vitezei mișcării termice), caracteristică mișcării dezordonate. Componenta vitezei electronilor în sensul câmpului electric se micșorează, iar în sens contrar câmpului, crește, astfel încât ansamblul lor primește o viteză de mișcare orientată, în sens opus câmpului electric (fig. 2.5).

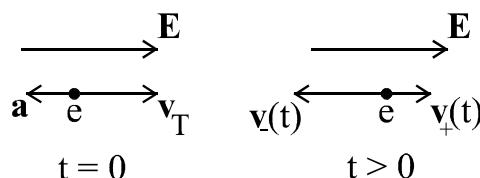


Figura 2.5. Mișcarea electronilor în câmp electric

În teoria electronică clasică, se presupune că modificarea vitezei se produce ca urmare a procesului de interacțiune a electronilor cu atomii sau ionii rețelei cristaline, interacțiune analoagă fenomenului de ciocnire mecanică. Între două ciocniri, electronii se mișcă ca niște particule libere, conform legilor cinematicii:

$$l = v_T \cdot \tau, \quad (2.5)$$

unde l reprezintă *drumul liber mijlociu* (lungimea parcursului liber) iar τ , *timpul mediu* între două ciocniri (durata parcursului liber).

Dacă la momentul $t = 0$ viteza mișcării electronilor este zero, atunci la $t = \tau$ va fi:

$$a\tau = \frac{q}{m} \tau \cdot E. \quad (2.6)$$

Viteza de drift se definește ca media aritmetică a vitezelor la cele două momente de timp:

$$v_d = \frac{0 + a\tau}{2} = \frac{q\tau}{2m} E \equiv \mu E, \quad (2.7)$$

unde v_d reprezintă viteza de *drift* (*transport*) iar μ *mobilitatea* electronilor.

Legea lui Ohm în formă diferențială se exprimă pornind de la expresia densității de curent. Pentru o concentrație n de electroni, în unitatea de timp, prin secțiunea S va trece sarcina electrică cuprinsă în volumul V al paralelipipedului respectiv:

$$J = I/S = Nq/S = nVq/S = nSv_dq/S = nqv_d. \quad (2.8)$$

Relația (2.8) se exprimă sub forma vectorială:

$$\mathbf{J} = qn\mathbf{v}_d = qn\mu\mathbf{E} \equiv \sigma\mathbf{E}, \quad (2.9)$$

unde σ reprezintă *conductivitatea* electrică a materialului.

Conductibilitatea electrică, proprietatea de a conduce curentul electric, este caracterizată de mărimea fizică numită *conductivitate*.

2.2. Modelul benzilor de energie pentru corpul solid

Modelul benzilor de energie pentru cele trei categorii de materiale solide este reprezentat în figura 2.6. Conform figurii, există o deosebire clară între metale, pe de o parte și izolatori/semiconductori, pe de altă parte. Astfel, la metale, nivelele ocupate și cele libere nefiind separate de o bandă interzisă (există o suprapunere parțială a benzilor de energie), electronii de valență sunt liberi (electronii de valență cu energie mai mare au nevoie de o energie suplimentară *mică* pentru a ocupa nivele de energie în banda de conducție, adică pentru a deveni electroni de conducție), putând să conducă curentul electric chiar la aplicarea unui câmp electric de intensitate mică. Concentrația electronilor liberi (de conducție) este suficient de mare astfel încât metalele să fie bune conducătoare de electricitate, chiar la temperatura camerei (fig. 2.6.a).

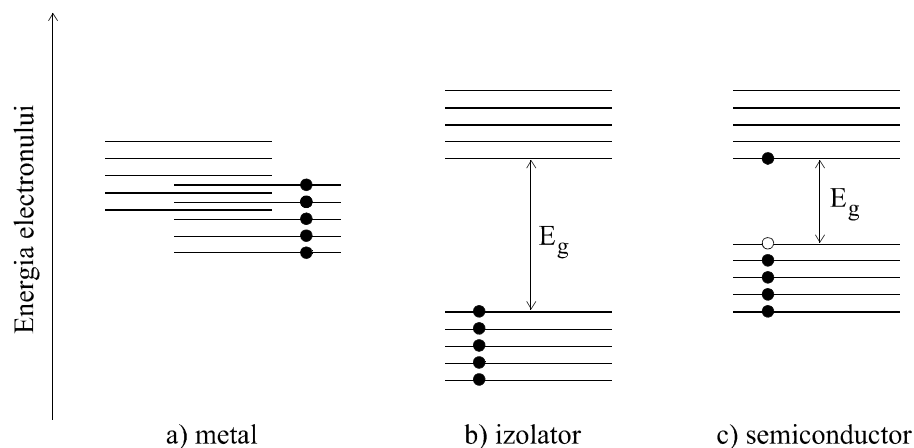


Figura 2.6. Modelul benzilor de energie pentru materialele solide

Situația este cu totul diferită în cazul izolatorilor. Datorită legăturilor puternice pe care electronii de valență le formează cu atomii, în materialul izolator nu există electroni liberi (de conducție). Această proprietate se reprezintă în modelul de benzi cu o bandă interzisă mare. Toate nivelele de energie din banda de valență sunt ocupate, nivelele din banda de conducție fiind libere (fig. 2.6.b). Pentru ruperea legăturilor este nevoie de câmpuri electrice de intensitate

mare, care pot să conducă la străpungerea izolatorului, situație în care tot nu se poate vorbi de conducție electrică.

Cazul intermediar este cel al materialelor semiconductoare, la care legătura chimică covalentă este o legătură de intensitate moderată. La temperaturi mai mari de zero absolut, ruperea unor legături covalente determină apariția electronilor liberi (de conducție), care sunt purtători de sarcină electrică *negativă*. Acești electroni ocupă nivele energetice în banda de conducție. Legăturile rămase libere sunt numite *goluri*, care ocupă nivele energetice în banda de valență (fig. 2.6.c) [8]. În acest mod, modelul mecanismului de conducție în semiconductori este completat cu cel al *conducției prin goluri*, privit ca un mecanism susținut de purtători de sarcină *pozitivă* liberi. În urma aplicării unui câmp electric, electronii din banda de conducție și golurile din banda de valență primesc energie cinetică, fiind capabili să participe la conducția curentului electric. Acest model de *dublă* conducție definește mecanismul de *conducție ambipolară*, model adoptat pentru explicarea funcționării *tranzistorului bipolar*.

În fabricația de dispozitive electronice active se folosesc ca materiale de bază, materialele semiconductoare. Deoarece este vorba de dispozitive care trebuie să conducă curentul electric, se poate pune întrebarea, firească până la un anumit moment, de ce se folosesc materiale semiconductoare, în locul metalelor. Din punctul de vedere al conductibilității electrice, metalele conduc electricitatea rapid (practic instantaneu), datorită prezenței în volumul metalului a unui număr foarte mare de electroni liberi. Posibilitatea de obținere a electronilor liberi depinde de structura atomică a materialului și de temperatură. Foarte important este faptul că, în cazul semiconductoarelor, un număr mic de atomi *străini* (diferiți de atomii materialului de bază), prezenți în rețeaua cristalină, influențează proprietățile electrice ale acestor materiale. De exemplu, concentrația atomilor în siliciu fiind de ordinul 10^{22} at/cm³ (aceasta fiind concentrația de atomi într-un corp solid), în cazul dopării cu atomi de fosfor având concentrația de ordinul 10^{18} at/cm³, rezultă că doparea se face în proporția de 1 atom de fosfor la 10^4 atomi de siliciu. Proprietățile caracteristice materialelor semiconductoare sunt determinate de: agitația termică, prezența impurităților, defecte ale rețelei cristaline și acțiuni ale factorilor externi (radiație electromagnetică, radiație penetrantă, câmp electric). Cel mai folosit material semiconductor, încă, la ora actuală, în industria microelectronică, este siliciul monocristalin.

2.3. Ce este un semiconductor?

Un material semiconductor este un corp solid având conductivitatea cuprinsă între cea a metalelor și izolatorilor, fiind caracterizat de o lărgime a benzii interzise mai mică de 3 eV. Proprietățile electrice ale semiconductoarelor sunt dependente de factori externi, ca de exemplu: temperatură, iluminare, presiune, câmpuri electrice sau magnetice, radiație nucleară. Ca exemplu de material semiconductor, se consideră siliciul (*Si*), care, la fel ca toate semiconductoarele, este un cristal, cu atomii aranjați într-o rețea cristalină. În figura 2.7 este reprezentată o rețea bidimensională de siliciu, în care sunt evidențiate legăturile covalente a atomilor de siliciu.

Într-o rețea cristalină ideală toți electronii fiind legați, nu există purtători de sarcină electrică, liberi. Rezultă că, la aplicarea unui câmp electric nu apare curent electric. Dacă o legătură covalentă se rupe, rezultă doi electroni liberi (de conducție), câte unul de la fiecare atom. Așa cum s-a arătat, locurile rămase libere sunt numite goluri. Procesul de apariție a electronilor și golurilor se numește generare de *perechi electron – gol* (electronii și golurile apar în număr egal). Energia necesară pentru acest proces trebuie să fie egală sau mai mare decât energia benzii interzise, care în cazul siliciului este 1,12 eV (la $T = 300$ K).

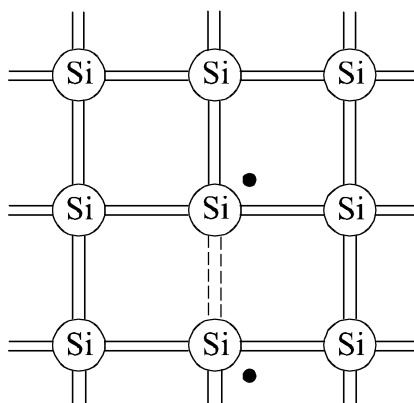


Figura 2.7. Legătura covalentă a siliciului. O legătură ruptă conduce la apariția a doi electroni liberi
(Sursa: după Lakatoș [9])

La temperaturi scăzute, majoritatea electronilor sunt plasați în banda de valență. O dată cu creșterea temperaturii, electronii primesc energia necesară trecerii în banda de conducție, devenind electroni de conducție, astfel încât, la aplicarea unui câmp electric materialul semiconductor conduce curentul electric.

În scopul asigurării unei conductibilități mai mari, se pot obține *semiconductori extrinseci*, printr-o operație tehnologică de *impurificare controlată* numită *dopare*. Prin acest procedeu tehnologic se adăugă, în mod deliberat, impurități materialului semiconductor de bază, în scopul *modificării controlate* a *valorii* conductivității și *tipului* de conductibilitate (*n* sau *p*). Operația constă în introducerea în rețeaua cristalină a siliciului, a atomilor de impuritate cu valența 5 sau 3 (valența siliciului fiind 4). În urma acestei operații, se obține semiconductorul de tip *n* sau *p*. Astfel, pentru fiecare atom cu valența 5 (*fosfor*, de exemplu), al cincilea electron de valență nefiind legat covalent, devine, foarte ușor (chiar la temperatura camerei), electron liber (de conducție). Atomul de fosfor este *donor*, experimentele arătând că atomii pentavalenți se substituie atomilor rețelei originale. Siliciul dopat cu atomi donori este de tip *n* (fig. 2.8.a).

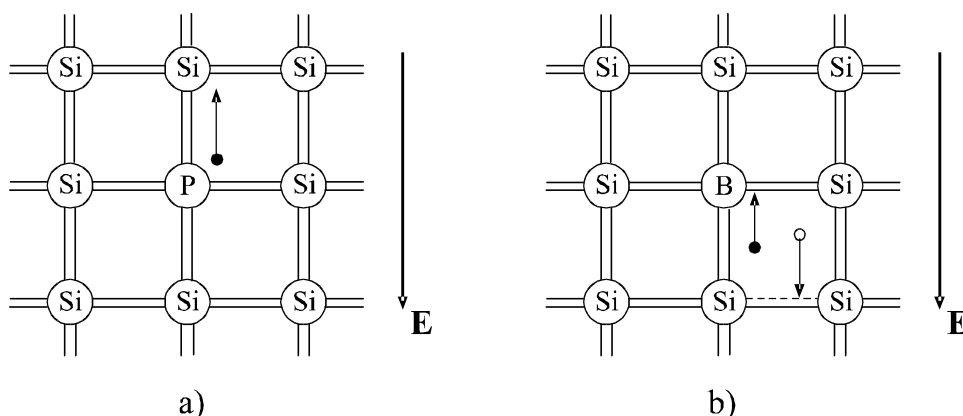


Figura 2.8. Siliciu extrinsec: a) siliciu tip *n* (se indică mișcarea electronului liber în sens opus câmpului electric aplicat); b) siliciu tip *p* (se indică refacerea legăturii necompensate a atomului de bor cu un electron captat de la un alt atom de siliciu din rețea și deplasarea în sensul câmpului electric a legăturii necompensate)

(Sursa: după Lakatoș [9])

Similar, în cazul dopării cu atomi de valență 3 (*bor*, de exemplu; atomul de bor este *acceptor*), locul rămas liber (legătura necompensată) este echivalent cu un gol. Acest gol poate să captureze un electron liber, sau un electron de la o altă legătură a rețelei, lăsând astfel necompensată o altă legătură dintre doi atomi de siliciu. Dacă materialul este supus acțiunii unui câmp electric, atunci deplasarea dirijată a electronilor, în sens opus câmpului electric, determină

o deplasare în sensul câmpului electric a golurilor (fig. 2.8.b). Deplasarea golurilor este modelată ca o conducție suplimentară. Siliciul dopat cu atomi acceptori este de tip *p*.

2.3.1. Semiconductorul la echilibru termic

La echilibru termic, densitatea de sarcină electrică se exprimă:

$$\rho_0 = q(p_0 - n_0 + N_D^+ - N_A^-), \quad (2.10)$$

unde: p_0 reprezintă *concentrația golurilor* la echilibru termic, n_0 , *concentrația electronilor* la echilibru termic (sarcini electrice *mobile*), N_D^+ , *concentrația ionilor donori* (impurități *donoare* ionizate pozitiv; sarcini electrice *fixe*), N_A^- , *concentrația ionilor acceptori* (impurități *acceptoare* ionizate negativ; sarcini electrice *fixe*).

Condiția de neutralitate electrică înseamnă îndeplinirea condiției $\rho = 0$, în orice punct al volumului semiconductorului. Condiția este valabilă pentru semiconductoare omogene, dopate uniform cu impurități, la *echilibru termic*.

Condiția de echilibru termic este îndeplinită dacă asupra corpului nu acționează nici un factor extern: câmp electric, câmp magnetic, radiație luminoasă, radiație nucleară. De asemenea, corpul trebuie să se găsească în echilibru cu mediul exterior, din punct de vedere al temperaturii. La echilibru termic procesele de generare și cel invers, de recombinare, se compensează reciproc, astfel încât concentrațiile de purtători mobili, numite *concentrații de echilibru*, rămân constante.

Materialul semiconductor este neutru din punct de vedere electric, adică sarcina electrică *negativă*, $(n_0 + N_A^-)q^-$, este egală cu sarcina electrică *pozitivă*, $(p_0 + N_D^+)q^+$. Deoarece $q^- = -q^+$, rezultă *ecuația neutralității sarcinii electrice*:

$$n_0 + N_A^- = p_0 + N_D^+ \quad (2.11)$$

Regiunile din material care îndeplinesc această condiție se numesc *regiuni neutre*.

În condiții de echilibru termic, produsul concentrațiilor de electroni și goluri este independent de tipul semiconductorului, fiind egal cu:

$$n_0 p_0 = n_i^2, \quad (2.12)$$

unde n_i reprezintă concentrația *intrinsecă* care depinde de temperatură conform relației:

$$n_i \approx \exp(-E_g/(2kT)), \quad n_i|_{\text{Si}, T=300\text{K}} \cong 10^{10} \text{ at/cm}^3. \quad (2.13)$$

În relația (2.13) k reprezintă constanta lui Boltzmann.

În condiții de *neechilibru* densitatea de sarcină electrică devine:

$$\rho = q(p_0 + \Delta p - n_0 - \Delta n + N_D^+ - N_A^-), \quad (2.14)$$

condiția de neutralitate electrică nemaifiind respectată. Dacă $\Delta n = \Delta p$, în orice punct din volumul semiconductorului, atunci $\rho = 0$. Aceasta este aproximația de *cvasineutralitate* care presupune că abaterea față de condiția de echilibru nu este semnificativă.

2.3.2. Semiconductorul intrinsec

Semiconductorul *intrinsec* este lipsit de impurități donoare și acceptoare sau de defecte cristalografice (semiconductor *pur*). În acest caz ideal este valabilă relația:

$$n_0 = p_0 = n_i, \quad (2.15)$$

adică, semiconductorul intrinsec are o concentrație de goluri egală cu cea a electronilor liberi.

Conducția electrică *intrinsecă* este asigurată de mișcarea electronilor în banda de conducție și a golurilor în banda de valență. Acest tip de conducție este determinat de fenomenul de *generare bandă – bandă*, caracteristic formării perechilor electron-gol, prin ruperea unor legături covalente (la temperaturi diferite de zero absolut). Modelul conducției intrinseci este reprezentat în figura 2.9. Electronii din banda de conducție se deplasează în sens opus câmpului electric aplicat, iar golurile din banda de valență, *în sensul* câmpului

aplicat. Conform modelului de benzi discutat, legăturile necompensate sunt echivalente cu nivele de energie ocupate cu sarcini pozitive (goluri) care participă *fictiv* la conducție, ca și cum ar fi sarcini pozitive; în realitate, legătura necompensată *se deplasează* în câmp electric ca o sarcină pozitivă, ca urmare a deplasării unui electron de valență de la un atom la altul. Relația densității de curent se scrie:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} = q(n_0 \mu_n + p_0 \mu_p) \mathbf{E}, \quad (2.16)$$

unde este evidențiată expresia conductivității intrinseci, σ .

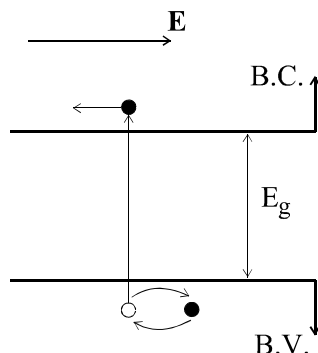


Figura 2.9. Modelul conducerii intrinseci

2.3.3. Semiconductorul extrinsec

Semiconductorul real (*extrinsec*) este dopat cu ambele tipuri de impurități, în concentrații neegale. Dacă concentrațiile de impurități diferă considerabil, semiconductorul se comportă ca un semiconductor cu un singur tip de impuritate.

Pentru un *semiconductor de tip n* impuritățile donoare cedează electroni rețelei cristaline, electronii fiind purtători *majoritari* de sarcină electrică. La temperatura camerei ($T = 300$ K), aproape toți atomii donori sunt ionizați, fiecare atom de impuritate ionizat contribuind cu un electron.

În aceste condiții, concentrația de echilibru a electronilor de conducție este egală cu cea a atomilor donori ionizați pozitiv (fig. 2.10, $T = 300$ K). Ecuația neutralității electrice este de forma:

$$n_0 = N_D^+ \quad (2.17)$$

La temperaturi ridicate, întreaga impuritate este ionizată, intervenind și ionizarea substanței de bază (generare bandă-bandă). Concentrația electronilor de conducție este dată de suma concentrațiilor atomilor donori și intrinsecă (fig. 2.10, $T > 300$ K):

$$n_0 = N_D + n_i \quad (2.18)$$

Dacă $N_D \gg n_i$ se obțin relațiile aproximative pentru concentrațiile de purtători majoritari și minoritari (la $T > 300$ K):

$$n_0 = N_D, \quad p_0 = \frac{n_i^2}{N_D} \quad (2.19)$$

În figura 2.10 este prezentat modelul de benzi pentru semiconductorul cu impurități donoare. Nivelele energetice donoare (nivelele ocupate de atomii de impuritate) sunt plasate în banda interzisă, la o distanță de banda de conducție egală cu energia de ionizare a impurităților donoare (0,045 eV pentru fosfor).

Pentru aprecierea tipului de conductibilitate al materialelor semiconductoare, se folosește *metoda sondei calde*, o metodă de laborator dar și industrială, foarte rapidă. Metoda se bazează pe semnul *potențialului termoelectric*. Astfel, dacă cele două capete ale probei au temperaturi diferite, purtătorii minoritari de neechilibru, acumulați în zona adiacentă sondei

calde, difuzează spre regiunea mai rece a volumului materialului, rezultând un anumit sens al curentului (măsurat de galvanometrul din circuit) diferit, în funcție de tipul de conductibilitate al materialului semiconductor (fig. 2.11). Dacă semiconductorul este de tip *p*, sonda rece se încarcă negativ, dacă semiconductorul este de tip *n*, sonda rece se încarcă pozitiv. La circuit deschis apare o diferență de potențial, de semn contrar pentru cele două tipuri de semiconductori.

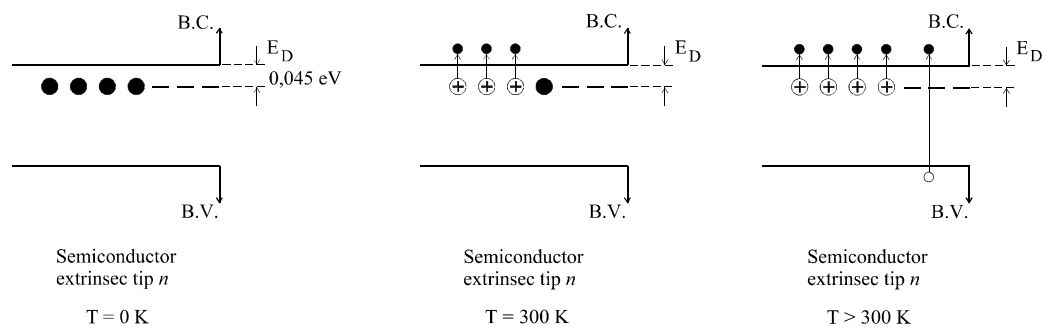


Figura 2.10. Modelul benzilor de energie pentru semiconductorul de tip *n*. Săgețile de la marginile benzilor de energie indică sensurile de creștere a energiei electronului, respectiv golului

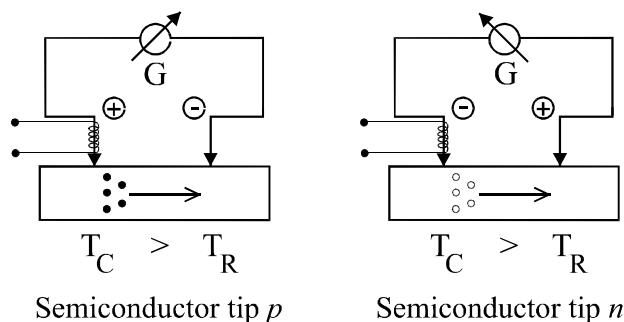


Figura 2.11. Metoda sondei calde pentru aprecierea tipului de conductibilitate al materialelor semiconductoare (Sursa: după Lakatoș [9])

2.3.4. Mișcarea purtătorilor de sarcină în semiconductori

Funcționarea dispozitivelor electronice semiconductoare depinde de mișcarea purtătorilor de sarcină liberi în volumul materialului. Există trei tipuri de mișcare care sunt descrise în continuare, din punct de vedere calitativ.

Mișcarea termică este reprezentată de mișcarea dezordonată a electronilor în cristal. Electronii se *ciocnesc* cu ionii rețelei, determinând modificarea vitezei, ca mărime vectorială. Modificarea modulului vitezei determină schimbarea energiei cinetice. La echilibru termodinamic, temperatura gazului electronic este egală cu cea a ionilor rețelei. Prin urmare, în medie, nu are loc transfer de energie între electroni și rețea. Datorită caracterului întâmplător al împrăstierii electronilor prin ciocnirile cu rețeaua cristalină, viteza medie a fiecărui electron, într-un interval de timp, cât și deplasarea medie (ca mărimi vectoriale), sunt nule. În concluzie, mișcarea dezordonată nu poate să determine un curent electric.

Mișcarea indusă de câmpul electric reprezintă deplasarea orientată a electronilor. Conform modelului electronilor liberi, rezultă mișcarea dirijată a electronilor în sens opus câmpului electric aplicat (driftul electronilor). Golurile, *privite* ca sarcini pozitive, se deplasează în sensul câmpului electric (fig. 2.12).

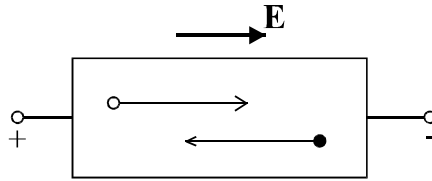


Figura 2.12. Mișcarea purtătorilor de sarcină în semiconductor indusă de câmpul electric.

Mișcarea indusă de gradientii de concentrație reprezintă o altă cauză care poate să producă deplasarea purtătorilor de sarcină între două regiuni ale semiconductorului. Gradientii de concentrație pot fi induși de un gradient de temperatură de-a lungul probei semiconductoare sau de iluminarea neomogenă. În aceste condiții, purtătorii de sarcină *difuzează* din regiunea de concentrație mare în cea de concentrație mică (fig. 2.13).

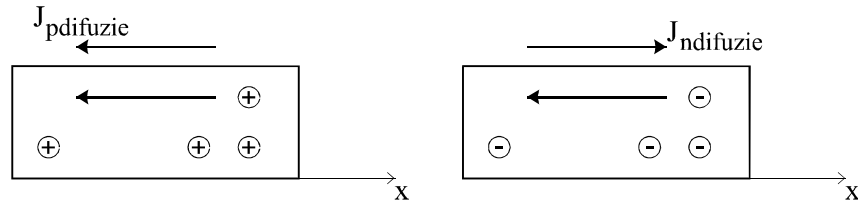


Figura 2.13. Mișcarea purtătorilor de sarcină în semiconductor indusă de gradientul de concentrație

2.4. Recombinarea purtătorilor de sarcină

Majoritatea dispozitivelor semiconductoare active funcționează în condiții de *neechilibru*, stare definită de relația $n \cdot p \neq n_i^2$. Starea de neechilibru este determinată, așa cum s-a arătat, de acțiunea unor factori externi, ca de exemplu: radiație electromagnetică, câmp electric. Funcționarea dispozitivelor semiconductoare este determinată de tendința de *revenire la echilibru* [8]. Din acest motiv, atunci când este vorba de transportul purtătorilor de sarcină, se face referire la *purtătorii de neechilibru*, curenții de conducție fiind determinați de transportul acestei categorii de purtători. Ecuațiile densităților de curenți sunt exprimate în funcție de concentrațiile de neechilibru ale purtătorilor de sarcină. Pentru joncțiunea *pn* și tranzistorul bipolar conducția este asigurată de curenții de difuzie, în timp ce la tranzistorii cu efect de câmp curenții de drift sunt cei care asigură, cu preponderență, conducția.

Concentrațiile de purtători în exces se definesc astfel:

$$\Delta n = n - n_0, \Delta p = p - p_0. \quad (2.20)$$

Se disting două situații de abatere de la condiția de echilibru:

- *injecția* de purtători de sarcină în exces, definită prin:

$$\Delta n, \Delta p > 0 \Leftrightarrow n \cdot p > n_i^2, \quad (2.21)$$

- *extracția* purtătorilor de sarcină, exprimată prin:

$$\Delta n, \Delta p < 0 \Leftrightarrow n \cdot p < n_i^2. \quad (2.22)$$

În funcție de raportul dintre concentrația purtătorilor majoritari *în exces* și concentrația de purtători majoritari *la echilibru* (egală cu concentrația de impurități, în condițiile ionizării complete), se disting două cazuri pentru injecția purtătorilor de sarcină. Astfel, pentru semiconductorul de tip *n*, se vorbește de: *nivel mic de injecție*, dacă $\Delta p = \Delta n \ll n_{n0}$ (exemplu: $n_{n0} = 10^{16} \text{ at/cm}^3$, $\Delta p = \Delta n \cong 10^{12} \text{ at/cm}^3$) și de *nivel mare de injecție* dacă $\Delta n = \Delta p \cong n_{n0}$ (exemplu: $n_{n0} = 10^{16} \text{ at/cm}^3$, $\Delta p = \Delta n \cong 10^{16} \text{ at/cm}^3$).

Revenirea la echilibru se face prin fenomenul de *recombinare*, în cazul injecției de purtători de sarcină în exces și prin fenomenul de *generare*, în cazul extracției de purtători de sarcină. Procesul de revenire la echilibru este caracterizat de două mărimi fizice principale: *timpul de viață* al purtătorilor de sarcină în exces (minoritari), notat cu τ și *lungimea de difuzie* a purtătorilor minoritari, definită ca fiind lungimea medie parcursă, prin difuzie, de

purtătorii minoritari, până la recombinare, notată cu L . Cu alte cuvinte, revenirea la echilibru are loc cu *trecerea timpului* sau cu *creșterea distanței* față de locul în care au apărut purtătorii de sarcină în exces.

3. INTRODUCERE ÎN FIZICA JONCTIUNII SEMICONDUCTOARE pn

3.1. Formarea jonctiunii pn

Deoarece toate dispozitivele semiconductoare active sunt formate din jonctiuni pn , este importantă cunoașterea modelului fizic al acestei structuri semiconductoare de bază.

Din punct de vedere strict teoretic, formarea jonctiunii pn se poate considera că are loc prin aducerea în contact intim a două materiale semiconductoare de conductivități diferite, p și n . Datorită realizării contactului celor două materiale de tip opus, golurile (purtători majoritari în semiconductorul de tip p) din apropierea jonctiunii, vor difuza din regiunea p în regiunea n , unde se recombina cu electronii; electronii (purtători majoritari în semiconductorul de tip n) vor difuza din regiunea n în regiunea p , unde se recombina cu golurile. Fluxurile de goluri și electroni tind să anuleze gradientul mare de concentrație al purtătorilor de sarcină, care există între regiunile p și n . Dacă golurile și electronii nu ar fi particule încărcate electric, aceste fluxuri ar continua până în momentul stabilirii unei concentrații uniforme a ambelor tipuri de purtători de sarcină, în întreaga structură. Deoarece materialele semiconductoare conțin și ioni de impurități (atomi donori și acceptori *ionizați*), situația reală este diferită [8]. Prin difuzia golurilor rămân atomi acceptori ionizați *negativ*, a căror sarcină nu este compensată iar prin difuzia electronilor rămân atomi donori ionizați *pozitiv*, a căror sarcină nu este compensată. Atomii acceptori și donori fiind fișși, în regiunea de trecere de la un tip de material la cel de conductivitate opusă, se formează un *strat de sarcină spațială* fixă: sarcină negativă în regiunea p și sarcină pozitivă în regiunea n [11]. Sarcina spațială determină apariția unui *câmp electric intern*. Sensul acestui câmp electric (de la n la p) este astfel încât să împiedice difuzia purtătorilor de sarcină liberi majoritari, dintr-o regiune în alta (fig. 3.1).

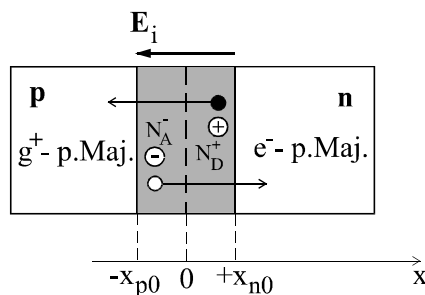


Figura 3.1. Formarea jonctiunii pn (Sursa: după Lakatoș [9])

În regiunile neutre (în afara regiunii de sarcină spațială), câmpul electric este nul. În jonctiune se stabilește un *echilibru dinamic* în care fluxul datorat *difuziei* fiecărui tip de purtători de sarcină este egal și opus fluxului aceluiasi tip de purtători datorat câmpului electric, fluxul net de goluri și electroni fiind zero (fig. 3.2). În absența unei tensiuni externe, curentul total prin jonctiune este nul. Câmpul electric intern determină o barieră de potențial Φ_B (*diferența internă de potențial a jonctiunii pn*) în regiunea de sarcină spațială. În absența unei polarizări externe, valoarea ei este constantă, dar diferită de zero.

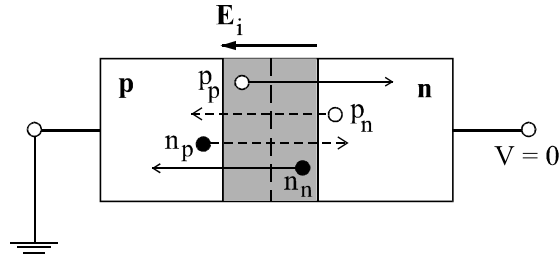


Figura 3.2. Echilibrul dinamic al joncțiunii *pn* (linia *plină* – componenta de *difuzie*, linia *punctată* – componenta de *drift*) (Sursa: după Lakatoș [9])

Pentru a caracteriza *regiunea de sarcină spațială* se folosește *aproximația de golire*, conform căreia această regiune este lipsită de purtători de sarcină electrică liberi (*regiunea golită*; $p, n \ll N_A, N_D$; $p, n \cong 0$). În aceste condiții, densitatea de sarcină electrică se exprimă (în aproximația ionizării complete):

$$\rho \approx q(N_D - N_A). \quad (3.1)$$

Deoarece în regiunile neutre *p* și *n* câmpul electric trebuie să fie nul, sarcinile totale pe unitatea de arie, în cele două părți ale regiunii de sarcină spațială, sunt egale și de semn contrar (sarcina totală pe unitatea de arie în regiunea golită, este zero). Se obține:

$$N_D x_{n0} = N_A x_{p0}, \quad (3.2)$$

relație valabilă pentru aproximația *joncțiunii abrupte* (§ 3.2).

Aplicarea aproximației de golire permite integrarea ușoară a ecuației Poisson în cazul unidimensional, rezultând relații analitice simple, care descriu cu o bună precizie variația cu distanța a intensității câmpului electric și a potențialului în regiunea de sarcină spațială. Aceste relații se pot calcula în cazul a două aproximații pentru joncțiunea semiconductoră: joncțiunea *abruptă* și joncțiunea *liniar gradată*. Cele două aproximații sunt folosite în problemele teoretice de modelare a dispozitivelor semiconductoră pe bază de joncțiuni *pn*, pentru joncțiunile *reale* (*difuzate*).

În general, pentru joncțiunile difuzate se consideră două cazuri limită: joncțiunea *superficială*, care poate fi aproximată cu o joncțiune *abruptă asimetrică* și joncțiunea *adâncă*, care poate fi aproximată printr-o joncțiune *liniar gradată*. Joncțiunile *pn* difuzate din practică se pot aproxima fie prin unul din cele două cazuri, fie se plasează între ele.

3.2. Aproximația joncțiunii abrupte

Această aproximație reprezintă cel mai simplu caz de joncțiune *pn* la care se aplică aproximația de golire. Teoretic, joncțiunea abruptă reprezintă schimbarea bruscă a tipului de impurități într-un material semiconductor, de exemplu, de la N_D la N_A (fig. 3.3). Joncțiunea abruptă reprezintă o bună aproximație pentru joncțiunea aliată, joncțiunea difuzată *superficial* și joncțiunea obținută prin implantare cu ioni.

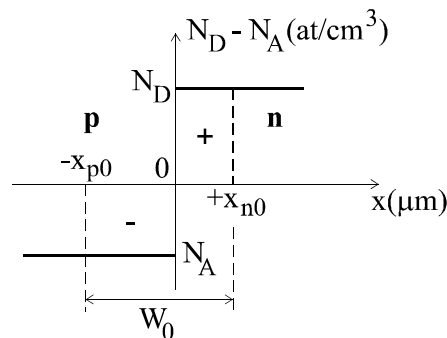


Figura 3.3. Distribuția impurităților în cele două regiuni ale joncțiunii abrupte.

Concentrațiile de impurități sunt constante în regiunile p și n . Extinderile regiunii de sarcină spațială în regiunile n și p sunt notate cu x_{n0} și x_{p0} . Lățimea totală a regiunii de sarcină spațială, $(x_{n0} + x_{p0})$ este notată cu W_0 (corespunzător polarizării zero a joncțiunii). Distribuția câmpului electric intern este ilustrată în figura 3.4. Distribuția potențialului electric în stratul de baraj este ilustrată în figura 3.5.

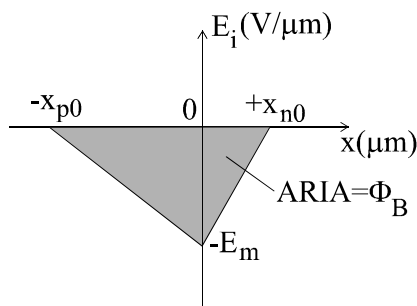


Figura 3.4. Distribuția câmpului electric intern în regiunea golită a joncțiunii abrupte

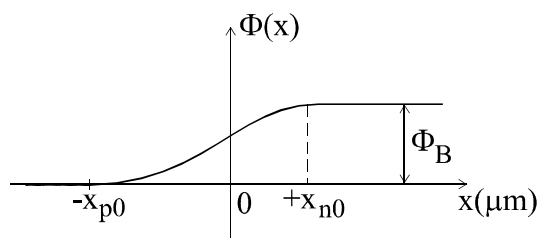


Figura 3.5. Distribuția potențialului electric în regiunea golită a joncțiunii abrupte

Diferența internă de potențial a joncțiunii pn este egală, conform figurii 3.4, cu aria delimitată de graficul variației câmpului electric intern:

$$\Phi_B = \text{ARIA} = (x_{n0} + x_{p0})|E_m|/2 \equiv W_0|E_m|/2 \quad (3.3)$$

Un caz particular al joncțiunii abrupte, este joncțiunea *abruptă asimetrică* (joncțiunea cu o singură parte), la care concentrația de impurități de o parte a joncțiunii este mult mai mare decât cea din partea opusă. În acest mod, se definesc joncțiunile de tipul p^+n , dacă $N_A \gg N_D$ și n^+p , dacă $N_D \gg N_A$. Din condiția $N_A x_p = N_D x_n$ (relația 3.2), se obține: $x_n \gg x_p$, pentru o joncțiune p^+n , respectiv $x_p \gg x_n$, pentru o joncțiune n^+p .

O joncțiune difuzată superficial (de adâncime mică, de exemplu, 1 μm), poate fi aproximată cu o joncțiune abruptă asimetrică.

3.3. Aproximația joncțiunii liniar gradată

Joncțiunea liniar gradată se obține dacă se realizează schimbarea gradată a tipului de impurități. În cadrul acestei aproximații concentrația netă de impurități, $(N_D - N_A)$, variază liniar de la regiunea n la regiunea p , conform relației (fig. 3.6; W_0 reprezintă lățimea regiunii de sarcină spațială, la polarizare zero, extinsă aproximativ egal în cele două părți ale joncțiunii):

$$N_D - N_A = ax, \quad \text{tg} \alpha = a, \quad (3.4)$$

unde a reprezintă *gradientul concentrației impurităților la joncțiune*. Această aproximație este folosită pentru joncțiunile difuzate adânci.

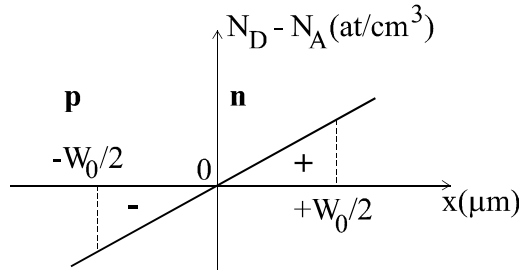


Figura 3.6. Distribuția impurităților în cele două regiuni ale joncțiunii liniar gradată

Distribuția câmpului electric intern este ilustrată în figura 3.7.

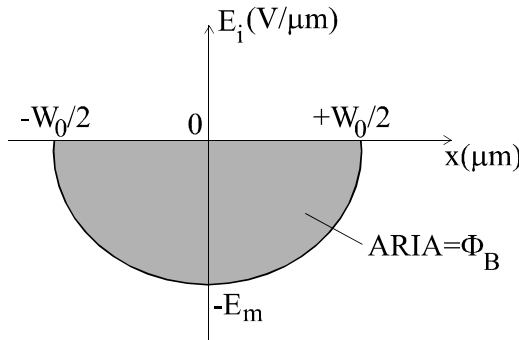


Figura 3.7. Distribuția câmpului electric intern în regiunea golită a joncțiunii liniar gradată

Diferența internă de potențial a joncțiunii se poate exprima ca fiind egală cu aria delimitată de graficul variației câmpului electric intern (fig. 3.7):

$$|E_m| = |E_i(x=0)| = (qa/2\epsilon_s)/(W_0^2/4). \quad (3.5)$$

de unde rezultă pentru lățimea regiunii de sarcină de sarcină spațială, la polarizare zero, relația:

$$W_0 = (12\epsilon_s\Phi_B/qa)^{1/3}. \quad (3.6)$$

3.4. Polarizarea joncțiunii pn

Dacă pe regiunea *n* se aplică un potențial *negativ* față de regiunea *p*, diferența totală de potențial pe joncțiune, scade, față de cazul polarizării zero. Scăderea potențialului este însoțită și de micșorarea intensității câmpului electric și a lățimii regiunii de sarcină spațială. În aceste condiții, datorită scăderii componenteii curentului de drift, echilibrul dinamic este perturbat, rezultând un curent net prin joncțiune (*curentul direct*). Joncțiunea se află în stare de *conducție*. Câmpul electric datorat polarizării externe diminuează câmpul intern al joncțiunii, dar câmpul electric net este îndreptat tot spre regiunea *p*. Purtătorii majoritari din ambele regiuni difuzează prin joncțiune; după trecerea de joncțiune, ei devin purtători minoritari (fig. 3.8). Joncțiunea se află în condiții de *injecție* de purtători minoritari (pentru regiunea *p*: $p_p \cdot n_p > n_i^2$).

Dacă pe regiunea *n* se aplică un potențial *pozitiv* față de regiunea *p*, diferența totală de potențial pe joncțiune, crește, față de cazul polarizării zero. Creșterea potențialului este însoțită și de creșterea intensității câmpului electric și a lățimii regiunii de sarcină spațială. În aceste condiții, toate golurile generate în regiunea *n*, care ajung, prin difuzie, la marginea regiunii de sarcină spațială, sunt preluate de câmpul electric favorabil și de valoare mare, fiind trecute în regiunea *p* (fig. 3.9). Joncțiunea se află în condiții de *extracție* de purtători

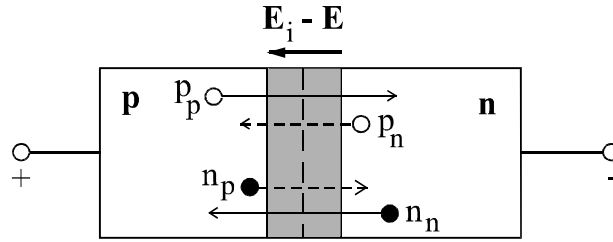


Figura 3.8. Joncțiunea pn la polarizare directă (linia *plină* - componenta de *difuzie*, linia *punctată* – componenta de *drift*) (Sursa: după Lakatoș [9])

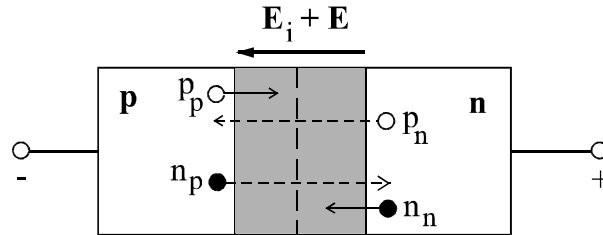


Figura 3.9. Joncțiunea pn la polarizare inversă (linia *plină* - componenta de *difuzie*, linia *punctată* – componenta de *drift*) (Sursa: după Lakatoș [9])

minoritari ($p_n \cdot n_n < n_i^2$). Datorită scăderii componentei de difuzie a curentului, curentul total scade foarte mult, dar nu devine nul. Joncțiunea se află în stare de *blocare*.

Densitatea curentului crește cu temperatura conform relației:

$$J_F \approx \exp(-(E_g - qV)/kT), \quad (3.7)$$

în cazul polarizării directe și conform relației:

$$J_R \approx \exp(-E_g/kT), \quad (3.8)$$

în cazul polarizării inverse.

Caracteristica curent-tensiune ideală, a joncțiunii pn este reprezentată în figura 3.10.

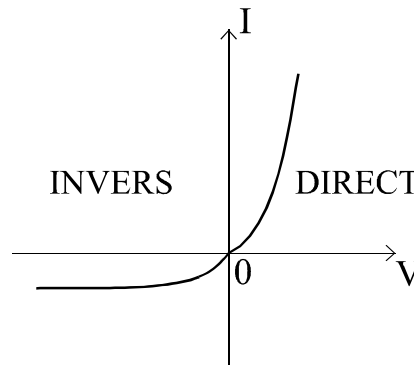


Figura 3.10. Caracteristica I-V ideală a joncțiunii pn

4. TEHNOLOGII DE REALIZARE A STRUCTURILOR SEMICONDUCTOARE CU JONCȚIUNI pn

Figura 4.1 prezintă etapele importante ale tehnologiilor de bază pentru fabricarea dispozitivelor semiconductoare cu joncțiuni pn . Ordinea prezentării ilustrează cronologia dezvoltării acestor tehnologii [10].

Metoda alierii este un caz particular al metodei generale de încălzire a unei probe semiconductoare în contact cu o substanță impurificatoare. Un exemplu de aplicare al acestei metode este ilustrat în figura 4.1.a. O bobită de aluminiu este plasată pe suprafața unei plachete din material semiconductor (siliciu monocristalin de tip n). Sistemul este încălzit

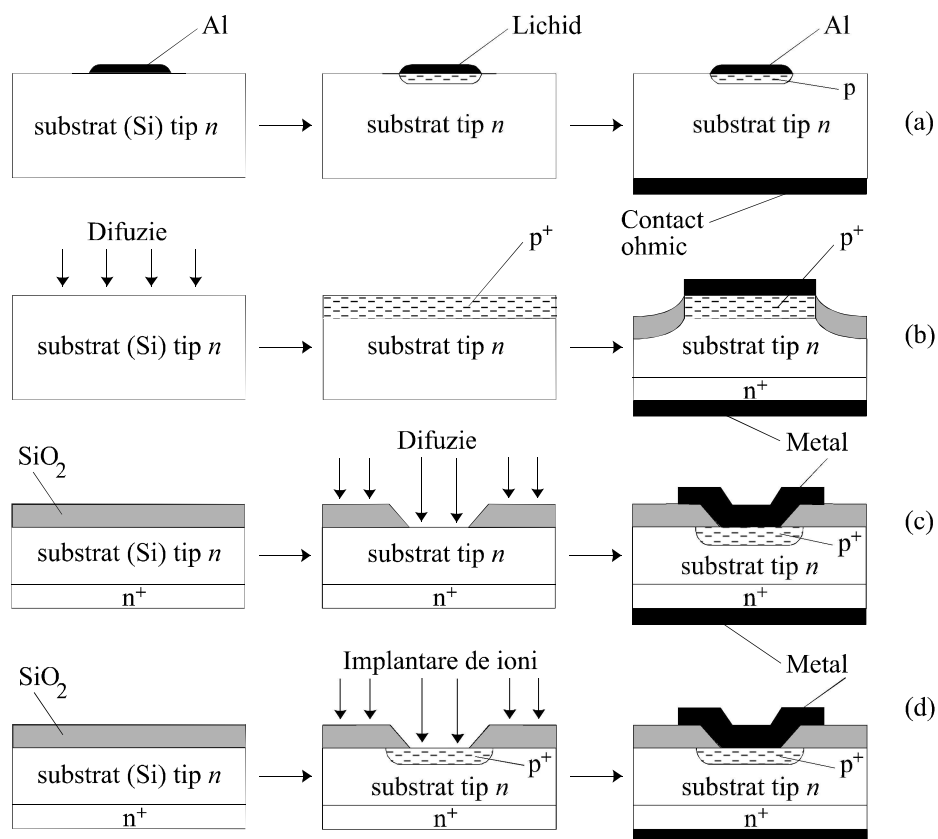


Figura 4.1. Tehnologii de realizare a jonctiunii pn: (a) jonctiune aliată; (b) jonctiune difuzată; (c) jonctiune planară; (d) jonctiune planară obținută prin implantare de ioni (*Sursa: prelucrat după Sze [10]*)

până la temperatura eutectică pentru sistemul Al-Si ($T = 580^{\circ}\text{C}$), în condiții care să excludă procesele de oxidare (atmosferă de hidrogen). La temperatura de aliere, aluminiul topit atacă foarte repede siliciul, formându-se o soluție lichidă de siliciu și aluminiu. Siliciul continuă să se dizolve în aluminiu până când se atinge limita de saturație la temperatura la care are loc procesul. Încălzirea durează 1 - 15 minute, la temperaturi cuprinse între 600°C și 850°C , conform tipului de dispozitiv care se dorește să se obțină (în general jonctiuni semiconductoare cu tensiunea de străpungere cuprinsă între 3 V și 6 V), după care sistemul este răcit până la temperatura mediului ambiant. În timpul răcirii, soluția siliciu-aluminiu cristalizează în același tip de rețea ca a siliciului solid. Apare astfel o regiune de tip *p* (aluminiul în siliciu este acceptor), pe substratul de tip *n*. Jonctiunea *pn* este formată la granița dintre regiunile *p* și *n*. Profilul de impurități obținut prin metoda alierii depinde foarte mult de parametrii ciclului de aliere (temperatură – timp – viteză de răcire a sistemului) și este dificil de controlat, acest fapt constituind un dezavantaj major al acestei metode. De altfel, metoda nu mai este folosită la ora actuală. Metoda a fost folosită la fabricarea primelor structuri de diode și tranzistoare pe bază de germaniu și a continuat să reprezinte o metodă în producția de serie până când aplicațiile care se dezvoltau au cerut performanțe mărite ale acestor dispozitive¹⁷ [8].

Metoda nu se putea aplica atunci când se dorea obținerea unor dispozitive performante din punct de vedere al tensiunilor de străpungere, atât din punct de vedere al reproductibilității tehnologice cât și din punct de vedere al valorilor tensiunilor de străpungere.

¹⁷ Metoda *jonctiunii aliate* a fost inventată de John Saby (laboratoarele General Electric) și dezvoltată pentru producția de masă de RCA. În anul 1951 a fost realizat tranzistorul cu jonctiuni aliate, de tip *pnp*, prin alierea *indiului* pe ambele fețe ale unui strat subțire de *germaniu* de tip *n* [50 Years of Electron Devices, 2002, IEEE].

Tehnologia care a înlăturat principalul dezavantaj al metodei alierii, imprecizia controlului asupra profilului de impurități și deci al localizării joncțiunilor pn , a fost *difuzia în solide*. Această tehnologie a fost dezvoltată începând cu anul 1956 și a condus la dezvoltarea metodei de realizare a *joncțiunilor difuzate*. Metoda joncțiunii difuzate *tip mesa* este ilustrată în figura 4.1.b. Impurități de tip p sunt difuzate în volumul stratului semiconductor (siliciu de tip n). După difuzie se realizează o corodare chimică printr-o mască metalică ($Ni-Au$, de exemplu), rezultând structura cu *profil mesa* (formă concavă a marginii structurii).

O îmbunătățire a gradului de control privind geometria laterală a joncțiunilor difuzate, s-a realizat o dată cu dezvoltarea *tehnologiei planare*, care se poate defini pe scurt ca reprezentând difuzia prin mască de oxid, pe o singură față a plachetei semiconductoare (fig. 4.1.c). Această tehnologie combină performanțele joncțiunilor difuzate cu posibilitatea de creștere a *bioxidului de siliciu* pentru definirea foarte precisă a geometriei dispozitivului. Un strat de bioxid de siliciu este crescut pe fața plachetei de siliciu (grosime $\cong 0,5 \mu m$). Cu ajutorul *tehnicilor litografice* (fotolitografie, litografie cu raze X, fascicol de ioni sau fascicol de electroni) se realizează ferestre în stratul de oxid, rezultând configurațiile geometrice dorite ale structurii respective. Prin aceste ferestre are loc difuzia de impurități (din sursă lichidă sau gazoasă). Această tehnologie a stat la baza dezvoltării tehnologiilor de fabricație a circuitelor integrate. Avantajele implementării acestei tehnologii au fost: creșterea performanțelor electrice ale dispozitivelor (sensibilitatea la acțiunea factorilor externi a scăzut, crescând stabilitatea caracteristicilor electrice), realizarea structurilor *MOS (metal-oxid-semiconductor)* și a tranzistoarelor cu efect de câmp cu structură MOS (*TECMOS*). Există însă și un avantaj economic major, care a determinat dezvoltarea tehnologiei planare, anume costul de realizare al unui circuit integrat. Dacă se consideră o dimensiune a ferestrei în oxid de $0,2 \times 0,2 \mu m^2$, numărul de joncțiuni cu această dimensiune, având distanța dintre ele de $0,2 \mu m$, pe o plachetă cu diametrul de 30,48 cm (12 inch), este de ordinul a 10^{12} . Capacitatea de fabricare simultană a mii de dispozitive a reprezentat de fapt cheia avantajului economic al tehnologiei planare.

Pentru realizarea primelor tranzistoare planare și a primelor circuite integrate se foloseau în procesul de fabricație numai etape de fotomascare și de difuzie. Circuitele integrate realizate numai prin difuzie aveau limitări severe în comparație cu componentele discrete de circuit. De exemplu, pentru tranzistorul triplu difuzat, regiunea colectorului este formată printr-o difuzie de tip n în placheta (substratul) de tip p . Unul dintre dezavantajele acestei structuri era dat de valoarea mare a rezistenței serie a colectorului, datorită concentrației mici de dopare a substratului, rezultând o regiune de rezistivitate mare. Prin urmare, era necesar ca substratul aflat sub joncțiunea colectorului să aibă o concentrație mare de dopare. În acest mod structura de tranzistor triplu difuzat trebuia să aibă un nou substrat, de concentrație mare în care să se realizeze difuzia de colector. Deoarece un astfel de profil de concentrație nu putea fi realizat numai prin difuzie, a fost dezvoltată tehnica de *creștere epitaxială* [12].

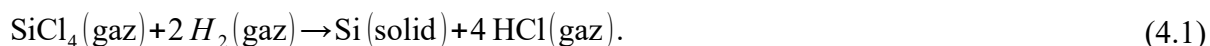
Metoda industrială pentru obținerea straturilor epitaxiale este cea a creșterii din *fază de vapori (depunere chimică din fază de vapori = chemical vapour deposition (CVD))*, tehnologie dezvoltată începând cu anul 1957). Cu această tehnică se pot depune straturi: metalice (de exemplu, aluminiu), izolatoare (de exemplu, bioxid de siliciu) și semiconductoare (de exemplu, siliciu). Cel mai important proces este reprezentat de creșterea unui strat semiconductor *monocristalin* pe un substrat monocristalin, având următoarele proprietăți: același tip de semiconductor (structura cristalină a stratului crescut este identică cu cea a substratului); același tip de conductivitate sau tip diferit; același dopaj sau dopaj diferit.

În figura 4.1.c este ilustrat stratul epitaxial n , crescut pe substratul n^+ . Cuvântul *epitaxie*, derivat din cuvintele grecești *epi* = pe și *taxis* = aranjament, descrie tehnica de creștere pe un

substrat monocristalin, a altui strat, tot monocristalin, având structura cristalină identică cu cea a substratului. În acest fel se asigură continuitatea monocristalină la interfața dintre cele două straturi.

În esență, procesul fizico – chimic de epitaxie constă în transportul atomilor dintr-o fază solidă, lichidă sau gazoasă, la suprafața unui substrat monocristalin și ocuparea unor poziții ordonate în urma difuziei la suprafață, astfel încât stratul monocristalin crescut să continue structura cristalină a substratului. Concentrația de impurități din stratul epitaxial poate fi controlată independent de concentrația substratului, putând fi mai mare sau mai mică. Grosimea straturilor epitaxiale utilizate în fabricația circuitelor integrate variază de la 1 μm la 20 μm [12]. Epitaxia este folosită în unele procese CMOS și în majoritatea proceselor BiCMOS.

În cazul folosirii siliciului ca material semiconductor de bază, creșterea straturilor epitaxiale se realizează prin plasarea plachetelor de siliciu în atmosferă de *tetraclorură de siliciu* (SiCl_4) sau *silan* (SiH_4), la temperatură ridicată. Are loc o reacție chimică prin care rezultă siliciu care se depune pe suprafața plachetei. Reacția chimică de bază este (reducerea în fază de vapori a tetraclorurii de siliciu):



Tipic, stratul de siliciu este crescut cu o viteză de 1 $\mu\text{m}/\text{min}$, la 1200°C.

Dacă condițiile din timpul procesului tehnologic sunt controlate în mod corespunzător, stratul de siliciu crescut are o structură cristalină cu foarte puține defecte. Un astfel de strat este potrivit ca material de start pentru fabricația tranzistoarelor bipolare.

Utilizarea creșterii epitaxiale a însemnat un pas important în tehnologia planară, în special în tehnologia circuitelor integrate, stratul epitaxial fiind stratul în care se realizează întregul proces tehnologic. Calitatea straturilor epitaxiale este, de regulă, mai bună decât cea a straturilor difuzate. Tehnologia de *creștere epitaxială* a fost dezvoltată începând cu anul 1960.

Figura 4.1.d arată formarea joncțiunii *pn* prin *tehnica implantării de ioni*. Folosită în special pentru obținerea joncțiunilor superficiale (de la mai puțin de 0,1 μm până la aproximativ 0,6 μm), cu împrăștiere laterală redusă, această metodă s-a impus ca procedeu de impurificare controlată în tehnologia circuitelor integrate (în special a circuitelor MOS integrate pe scară mare), deoarece reprezintă tehnica care controlează cel mai bine profilul de impurități (concentrația și adâncimea de localizare a impurităților), în anumite cazuri fiind de neînlocuit în comparație cu metodele clasice de formare a joncțiunilor *pn* (doparea din topitură, difuzia, doparea în timpul creșterii epitaxiale). Implantarea de ioni (atomi ionizați) este o tehnică care permite introducerea directă a atomilor de impuritate în plachetele semiconductoare.

Implantarea de ioni reprezintă o alternativă a procedurii difuziei în solide, pentru impurificarea controlată a unui substrat semiconductor. Procedeu constă în accelerarea ionilor (de la o sursă de ioni), până la atingerea unei viteze suficient de mare (echivalent, a unei energii cinetice), care să facă posibilă pătrunderea atomilor ionizați în volumul substratului semiconductor, până la anumite adâncimi. În condiții care se pot controla, ionii pătrunși în volumul semiconductorului, ocupă poziții în rețea astfel încât să se comporte ca impurități donoare sau acceptoare.

Această tehnică de impurificare controlată este folosită cu succes în tehnologia circuitelor MOS integrate pe scară mare, datorită posibilității controlului riguros al concentrației de impurități în siliciu (10^{14} ÷ 10^{21} at/cm³) și al adâncimii de pătrundere a impurităților. Foarte important este faptul că procesul are loc la temperatura camerei, fiind un proces foarte curat (se realizează în atmosferă vidată). Defectele structurale de rețea induse în urma procesului,

sunt înlăturate printr-un tratament termic realizat ulterior, la temperatura de 700°C sau mai jos. Metoda de dopare a semiconductorilor prin implantarea de ioni nefiind un proces termic, are o serie de avantaje. Tratamentele termice aplicate ulterior sunt realizate la temperaturi mult mai coborâte decât cele la care se fac dopările prin difuzie. În felul acesta, profilele concentrațiilor de impurități obținute în urma proceselor de difuzie anterioare, nu sunt afectate. O particularitate importantă a dopării semiconductorilor prin această metodă constă în aceea că introducerea unei anumite concentrații de impurități nu depinde de proprietățile substratului, ci de sistemul extern (natura și energia ionilor incidenți). Concentrația impurităților introduse prin metoda implantării ionice nu depinde de solubilitatea acestora în semiconductorul care trebuie dopat.

În continuare sunt descrise pe scurt principalele procese tehnologice care alcătuiesc fluxurile tehnologice de fabricație ale dispozitivelor microelectronice și circuitelor integrate. Procesul de difuzie este descris în două capitole separate.

4.1. Oxidarea termică

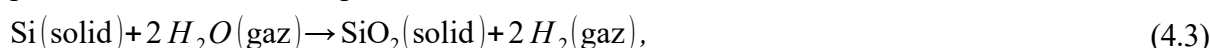
Dezvoltarea procesului de oxidare termică a avut o dublă însemnătate: pe de o parte, posibilitatea dezvoltării tehnologiei planare, pe de altă parte, posibilitatea folosirii siliciului ca material semiconductor de bază pentru dispozitivele semiconductoare, în locul germaniului, datorită ușurinței procesului de realizare a *bioxidului de siliciu* (SiO_2). În tehnologia planară, bioxidul de siliciu este folosit în mai multe scopuri: pentru realizarea *măștilor* necesare în timpul operațiilor de difuzie sau implantare, rezultând *ferestre* pentru trecerea speciei de dopare, în vederea realizării joncțiunilor *pn* (stratul de oxid constituie un paravan în calea speciei dopante), pentru împiedicarea procesului de exdifuzie al impurităților în timpul proceselor termice, ca mască pentru corodarea selectivă a unor straturi, în scopul pasivării și protecției structurilor, ca element constructiv de bază al dispozitivelor *MOS*, pentru izolarea dielectrică a componentelor unui circuit [13].

Există trei metode de obținere a bioxidului de siliciu: *depunerea din fază de vapori*, *oxidarea electrochimică* (anodizarea) și *oxidarea termică*. Metoda cea mai folosită în practica industrială o reprezintă oxidarea termică, datorită proprietăților bune ale bioxidului de siliciu obținut cu ajutorul acestei metode. Pentru funcționarea corespunzătoare a dispozitivelor și circuitelor electronice este necesar: controlul precis al *grosimii* stratului de SiO_2 , controlul purității SiO_2 , cunoașterea *cineticii procesului de oxidare*. De asemenea, fenomenele care apar în procesul de oxidare sunt importante pentru determinarea caracteristicilor electrice ale dispozitivelor planare pe bază de siliciu [8].

Creșterea straturilor de bioxid de siliciu pe suprafața plachetelor de siliciu constituie o etapă importantă a tehnologiei planare și reprezintă principala caracteristică a acestei tehnologii. De regulă, orice etapă de realizare a unor straturi dopate în mod controlat, printr-una din cele două metode, difuzie sau implantare ionică, este precedată de o etapă de oxidare și o etapă de deschidere de ferestre în oxid, prin metoda fotogravurii. Metoda oxidării termice are două variante de realizare: oxidarea termică *uscată* sau *umedă*. Reacțiile chimice de bază sunt:



pentru oxidarea uscată, respectiv:



pentru oxidarea umedă.

Procesul de oxidare termică constă în expunerea plachetelor de siliciu la un agent oxidant (oxigen sau vapori de apă). Principiul procesului de oxidare termică este reprezentat de formarea de legături covalente între oxigen și siliciu. Cu ajutorul metodelor experimentale s-a stabilit că procesul de oxidare are loc prin difuzia speciei oxidante prin oxid spre interfața *Si-SiO₂*, unde are loc una din reacțiile chimice arătate mai sus. Stratul de oxid crește peste stratul de siliciu,

prin consumul unui strat de siliciu cu grosimea aproximativă de 0,45 din grosimea stratului de oxid crescut (fig. 4.2) [13].

Pentru toată gama de temperaturi folosite în procesul de oxidare, se remarcă faptul că oxidarea umedă este mai rapidă decât oxidarea uscată.

Metode de măsurare a grosimii stratului de oxid

În general, metodele de estimare și măsurare a grosimii stratului de oxid se bazează pe fenomenele optice, polarizarea și interferența luminii.

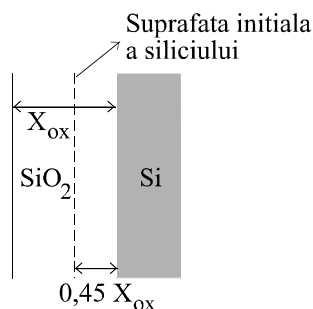


Figura 4.2. Stratul de oxid crește prin consumul unui strat de siliciu

Metoda cea mai simplă și, în același timp cea mai rapidă, de *estimare* a grosimii stratului de oxid este *metoda culorilor*. Datorită interferenței undelor luminoase, placheta oxidată, privită perpendicular, în lumină albă, are o anumită culoare, în funcție de grosimea oxidului. Deoarece culorile se repetă în grupe aproximativ identice, la aproximativ 2500 Å, grosimea oxidului se determină comparând culoarea plachetei cu cele ale unor plachete *etalon*, la care grosimea oxidului a fost măsurată cu altă metodă mai precisă. Pentru folosirea acestei metode, este necesară cunoașterea domeniului în care se află grosimea oxidului de măsurat.

Metoda picăturii de acid fluorhidric (*HF*) este folosită ca alternativă la metoda culorilor. O picătură de acid fluorhidric pusă pe suprafața oxidului, atacă oxidul, formând inele concentrice de diferite culori (în funcție de grosimea oxidului), apărând succesiunea de culori corespunzătoare spectrului luminii albe, de la suprafața inițială a oxidului crescut, până la suprafața siliciului (fig. 4.3).

Metoda profilometrului constă în măsurarea unei trepte, realizată în stratul de oxid (prin corodare cu acid fluorhidric, prin mască de fotorezist), prin deplasarea unui palpator calibrat (fig. 4.4). Metoda este folosită pentru măsurarea straturilor groase.

Elipsometria este metoda utilizată pentru măsurarea straturilor de oxid subțiri. Principiul metodei constă în modificarea polarizării unei raze laser, prin reflexia pe suprafața stratului de oxid. Pentru aplicarea acestei metode, este necesar să se cunoască ordinul de mărime al grosimii stratului care se măsoară.

Metoda interferenței optice se bazează pe fenomenul de interferență a luminii pe o lamă cu fețe plan paralele. O rază de lumină având o lungime de undă fixă, suferă fenomenele de reflexie și refracție, la întâlnirea unei lame plan paralele (stratul de oxid în cazul de față). Diferența de *drum optic*¹⁸ dintre raza reflectată și raza refractată, depinde de grosimea și indicele de refracție al stratului de oxid. În figura 4.5 este ilustrat principiul metodei interferenței optice pe lama cu fețe plan paralele.

¹⁸ *Drum optic*, (l): produsul dintre drumul geometric, l , străbătut de o rază de lumină printr-un mediu transparent și indicele de refracție al mediului, n .

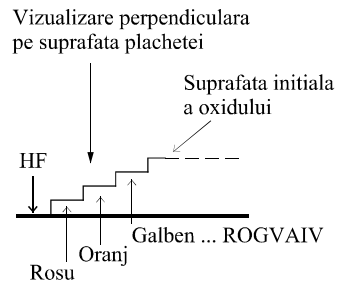


Figura 4.3. Metoda picăturii de HF pentru măsurarea grosimii stratului de oxid

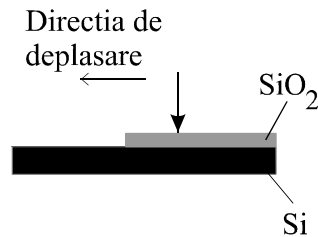


Figura 4.4. Metoda profilometrului pentru măsurarea grosimii stratului de oxid

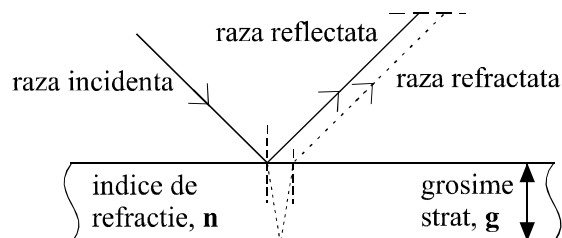


Figura 4.5. Principiul metodei interferenței optice pe lama cu fețe plan paralele pentru măsurarea grosimii stratului de oxid

4.2. Epitaxia

Creșterea epitaxială reprezintă metoda de formare a straturilor semiconductoare pe substraturi semiconductoare de același tip (siliciu pe siliciu, de exemplu). Așa cum s-a arătat, stratul se numește *epitaxial* dacă rețeaua cristalină a stratului crescut continuă rețeaua cristalină a substratului.

Tehnologia folosită pentru realizarea primelor tranzistoare bipolare planare prezenta un dezavantaj major: rezistența serie a colectorului era mare, datorită concentrației mici a impurităților din stratul colectorului. Soluția a fost dată de dezvoltarea procesului epitaxial, prin care se poate realiza stratul colectorului cu o concentrație și o grosime convenabilă, în funcție de cerințele circuitului integrat respectiv. Practic, întreaga structură a tranzistorului bipolar este realizată pe un substrat semiconductor de bază, având concentrația de dopare mare, ceea ce determină rezistența serie a colectorului, mică (fig. 4.6).

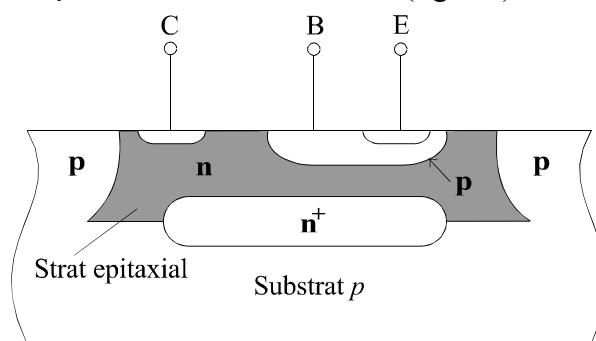
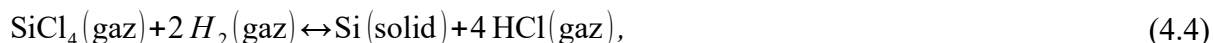


Figura 4.6. Secțiune prin structura de tranzistor bipolar realizată în strat epitaxial
(Sursa: prelucrat după Gray și Meyer [12])

Epitaxia este folosită la: realizarea joncțiunilor pn (între substrat și stratul epitaxial), realizarea de straturi n (epi) – n^+ (substrat) sau straturi p (epi) – p^+ (substrat). Cu acest proces tehnologic se realizează controlul riguros al concentrației impurităților din stratul epitaxial (independent de concentrația impurităților din substrat), prin controlul concentrației impurităților din *gazul de proces* (vapori din incinta de proces), realizarea *profilelor abrupte* approximate de aproximația joncțiunii abrupte asimetrice (distribuția reală a sarcinii este foarte apropiată de această aproximație). Pentru realizarea procesului de creștere epitaxială, se folosesc două metode.

Prima se referă la *reducerea* din fază de vapori a *tetraclorurii de siliciu* ($SiCl_4$):



care are utilizare industrială. Reacția chimică este reversibilă, astfel încât, în anumite condiții poate avea loc corodarea siliciului. Procesul are loc la temperaturi relativ mari, pentru care viteza de depunere este mare, cuprinse între 1150°C și 1200°C (în general, mai mari de 1000°C). Valoarea ridicată a temperaturii este necesară pentru obținerea unui strat având caracteristici cristaline apropiate de ale substratului. Scăderea temperaturii are ca efect reducerea mobilității atomilor depuși, rezultând creșterea concentrației de defecte în stratul crescut, stratul putând să piardă calitatea de strat *cristalin*.

Concentrația de $SiCl_4$ influențează condițiile de depunere. Dacă concentrația este foarte mare, are loc corodarea substratului de siliciu, chiar dacă concentrația de acid clorhidric (HCl) în gazul de la intrarea în reactor, este mică. În mod obișnuit, procesul de creștere are loc la concentrații scăzute, cu o viteză tipică de $1 \mu\text{m/min}$, viteza de creștere depinzând aproximativ liniar de *fracțiunea molară* de $SiCl_4$ în amestecul de gaz [8].

A doua metodă folosește reacția chimică de descompunere a *silanului* (SiH_4):



la temperaturi cuprinse 1050°C și 1150°C .

Doparea straturilor epitaxiale se realizează *in situ* prin introducerea în proces a unor compuși hidrogenați ai elementelor de dopare. De exemplu, pentru doparea cu fosfor se folosește *fosfina* (PH_3), care este absorbită la suprafața stratului epitaxial, se descompune, fosforul fiind încorporat în stratul epitaxial, în timpul creșterii [13].

Reactoarele folosite la creșterea epitaxială sunt de două tipuri: verticale și orizontale. Reactoarele verticale prezintă avantajul uniformității grosimii straturilor, datorită rotirii *susceptorului* (suportul pe care sunt plasate plachetele de siliciu, fig. 4.7). Chiar și în absența rotirii susceptorului, datorită distribuției uniforme a fluxului de gaze, uniformitatea grosimii stratului depus este mai bună decât în cazul reactoarelor orizontale.

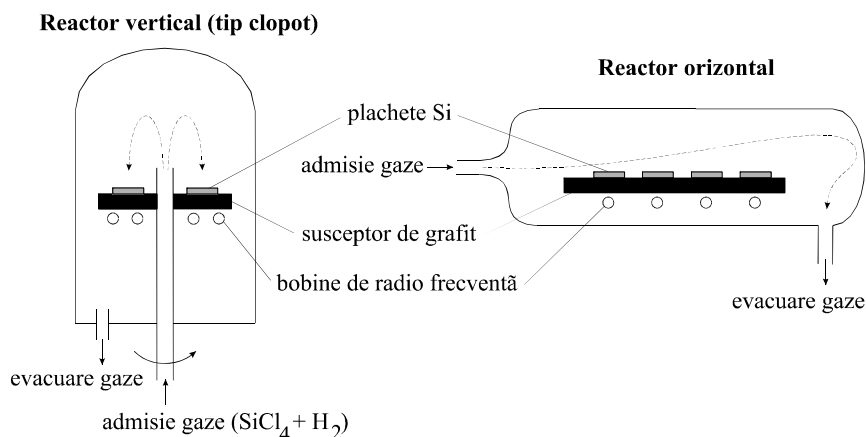


Figura 4.7. Schema reactoarelor verticale și orizontale pentru creșterea epitaxială

O componentă importantă a instalației de creștere epitaxială este reprezentată de *distribuitorul de gaze*, cu ajutorul căruia se realizează controlul concentrației produșilor de reacție, prin controlul debitului gazelor (fig. 4.8).

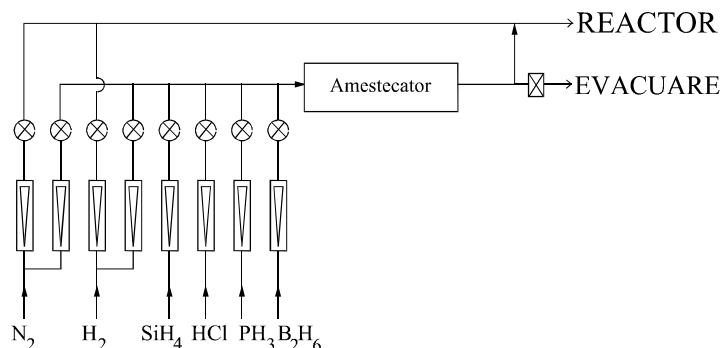


Figura 4.8. Schema distribuitorului de gaze

4.3. Implantarea de ioni

Metoda implantării de ioni constă în accelerarea ionilor (de la o sursă de ioni), până la atingerea unei viteze suficient de mare pentru a pătrunde în proba semiconductoră. În condiții care se pot controla, ionii pătrunși în volumul semiconductorului ocupă poziții în rețea astfel încât se comportă ca atomi de impuritate, donori sau acceptori [11].

Plachetele sunt plasate într-o incintă vidată iar ionii speciei dorite de impurități sunt trimiși spre plachetă cu viteză mare (adâncimea de pătrundere a ionilor de impuritate este funcție de viteza lor, cu alte cuvinte de energia cinetică pe care ionii o au la intrarea în volumul plachetei semiconductoră). În final, plachetele sunt tratate termic la o temperatură moderată (de exemplu 10 minute la 800°C). În acest fel se realizează rearanjarea ionilor implantați în rețeaua cristalului și, de asemenea, are loc refacerea rețelei cristaline care a avut de suferit din cauza implantării [12].

Doparea semiconductorilor prin implantarea de ioni nu este, practic, un proces termic (tratamentele termice ulterioare procesului de implantare au loc la temperaturi mai coborâte decât cele la care se fac dopările prin metoda difuziei), de aici rezultând un avantaj tehnologic important și anume posibilitatea ajustării valorii tensiunii de prag a tranzistoarelor MOS, la o valoare diferită de cea proiectată. Această ajustare se realizează în cursul procesului tehnologic, prin implantarea de impurități la suprafața regiunii în care se formează canalul indus. Astfel, pentru un tranzistor MOS canal *indus* de tip *n*, tensiunea de prag poate fi mărită prin implantarea de impurități de tip *p*; dimpotrivă, prin implantarea în regiunea canalului a impurităților de tip *n*, se obține o structură de tranzistor MOS cu canal *inițial* de tip *n* (canal conductor la tensiunea $V_{GS} = 0$ [12]. Avantajul major este dat de faptul că acest proces de ajustare nu perturbă profilele joncțiunilor realizate prin metoda difuziei.

O particularitate importantă și utilă a straturilor implantate cu ioni este aceea că maximul profilului concentrației de impurități se poate plasa sub suprafața plachetelor semiconductoră (spre deosebire de straturile difuzate, la care acest maxim este, de regulă, la suprafața substratului semiconductor). Această caracteristică permite fabricația de structuri de tranzistoare bipolare și cu efect de câmp cu grilă joncțiune, având caracteristici mai bune decât cele ale dispozitivelor difuzate [12].

Alte caracteristici importante ale acestei metode sunt: introducerea unei anumite concentrații de impurități nu depinde de proprietățile substratului ci de sistemul extern (natura și energia ionilor incidenti); concentrația impurităților introduse nu depinde de solubilitatea acestora în materialul semiconductor care trebuie dopat.

Echipamentul pentru realizarea implantării de ioni constă într-un accelerador de ioni, prevăzut cu un sistem de analiză de masă și dozimetrie (*implantator*). Principalele părți componente ale implantatorului sunt: generatorul de înaltă tensiune, sursa de ioni, acceleradorul de ioni (asigură ionilor energii cuprinse între 30 keV și 200 keV), separatorul de masă (pentru selectarea ionilor cu masa dorită), sisteme de colimare și deflexie a fasciculului de ioni. Sursele de ioni folosite sunt *fluoruri* ale elementelor chimice folosite pentru impurificarea controlată: BF_3 , pentru dopantul bor (B), PF_5 , pentru dopantul fosfor (P), AsF_3 , pentru dopantul arsen (As).

Fiecare ion implantat suferă ciocniri cu atomii și electronii țintei cristaline care îi reduc treptat energia până la repaus complet [14]. Ionul implantat crează defecte punctuale și liniare sau microzone amorfe (fig. 4.9).

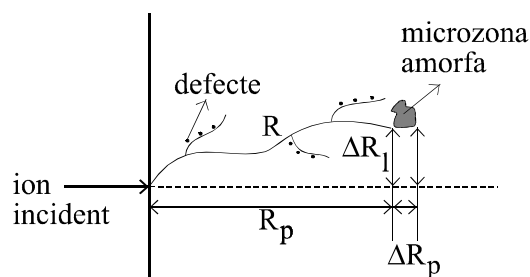


Figura 4.9. Traiectoria ionilor implantați într-o țintă solidă (*Sursa:* prelucrat după Bârsan [13])

Datorită numărului diferit de ciocniri ale ionilor pe aceeași distanță în țintă (mai mic sau mai mare decât numărul mediu de ciocniri), pentru probabilitatea de localizare a atomilor de impuritate se obține o *distribuție statistică*, modelul cel mai simplu fiind *distribuția Gauss*.

Forma distribuției de impurități implantate este prezentată în figurile 4.10 și 4.11, în funcție de tipul joncțiunii, superficială sau adâncă.

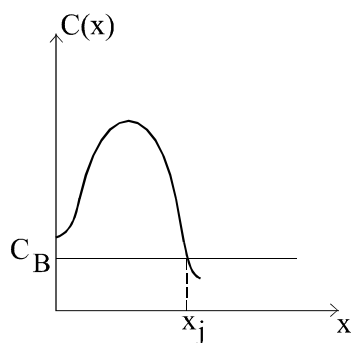


Figura 4.10. Formarea joncțiunii în cazul implantării superficiale de ioni

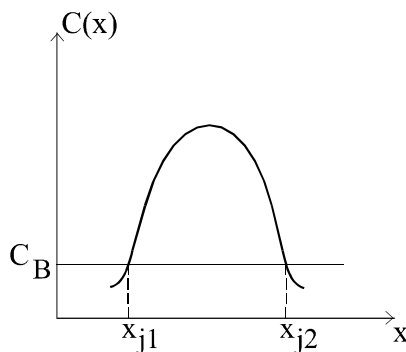


Figura 4.11. Formarea joncțiunii în cazul implantării adânci de ioni

Dispersia laterală a implantării de ioni are importanță practică deoarece pe baza ei se poate calcula *lungimea efectivă* a canalelor tranzistoarelor MOS (cu joncțiunile sursei și drenei realizate prin implantare de ioni), fiind inferioară difuziei laterale.

Distribuția laterală (pe direcția y) de impurități după implantarea printr-o fereastră cu lățimea $2a$ (lungime infinită) este ilustrată în figura 4.12.

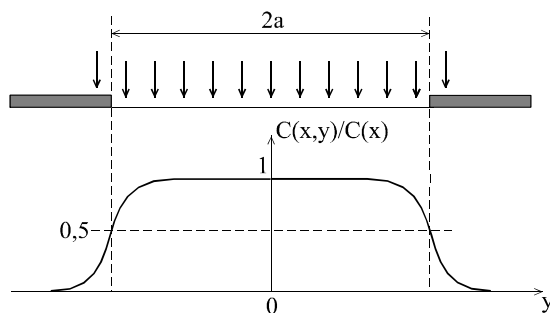


Figura 4.12. Profilul lateral de impurități implantate printr-o fereastră cu lățimea $2a$ și lungime infinită
(Sursa: prelucrat după Bârsan [13])

Orice monocristal (siliciul) se comportă ca o țintă *amorfă* dacă fasciculul de ioni este dezaliniat față de direcțiile cristalografice cu $6 \div 7^\circ$. În caz contrar, profilul implantat este puternic modificat datorită efectului de *canalizare* (pătrunderea ionilor în spațiul liber dintre rândurile de atomi - canale) [13]. Rezultă ghidarea ionilor prin centrul canalelor, datorită acțiunii forțelor atomice, ionii parcurgând distanțe mai mari.

Unghiul minim de înclinare a țintei față de fascicol, pentru minimizarea canalizării, se numește *unghi critic* și depinde de: tipul ionilor implantați, energia lor, orientarea monocristalului. Unghiul de dezaliniere este un parametru important deoarece o dezaliniere mică determină o pătrundere mai adâncă a ionilor implantați.

Implantarea pentru ajustarea tensiunii de prag a tranzistoarelor MOS oferă posibilitatea alegerii dopării inițiale a substratului, fără să se țină cont de valoarea dorită a tensiunii de prag (se ține cont numai de performanțele optime ale structurii – caracteristica curent-tensiune - urmând ca valoarea tensiunii de prag să fie ajustată ulterior). Relația de calcul a variației tensiunii de prag, funcție de doza implantată, este:

$$\Delta V_T = qC/C_{ox}. \quad (4.6)$$

În aproximația relației (4.6) este ignorată adâncimea implantării, aproximație acceptată în practica proiectării (fig. 4.13, [15]).

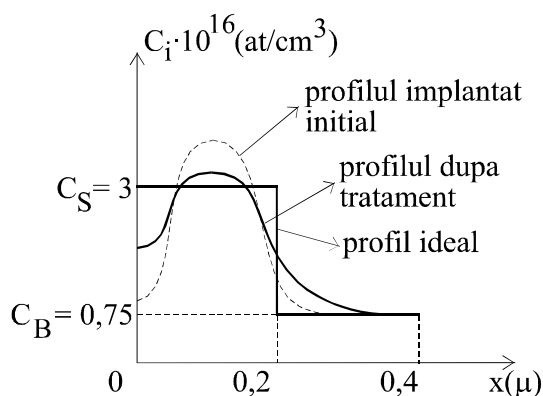


Figura 4.13. Profilul de impurități implantate sub stratul de oxid al porții. Profilul ideal este folosit pentru estimarea variației tensiunii de prag obținută în urma implantării de ioni (Sursa: prelucrat după Wolf [15])

5. BAZELE TEORETICE ALE DIFUZIEI

5.1. Ecuația de difuzie

Termenul *difuzie* se referă la migrarea atomilor unei substanțe (atomii de impuritate), în volumul altei substanțe (corpul solid *gazdă*), datorită gradientului de concentrație existent între două regiuni ale corpului gazdă (de la suprafața plăchetei semiconductoare spre volumul ei). Acest fenomen este accelerat dacă procesul are loc la temperaturi ridicate.

O definiție în sens mai larg se poate da folosind un exemplu din termodinamică (fig. 5.1). La deschiderea robinetului de legătură dintre două recipiente, datorită diferenței de presiune, are loc migrarea moleculelor de gaz dintr-un recipient în celălalt, până la egalarea presiunilor, obținându-se amestecul celor două gaze.

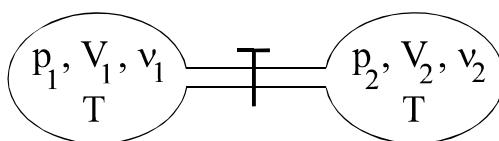


Figura 5.1. Amestecul de două gaze

Scopul principal al tehnologiilor de difuzie pentru materialele semiconductoare este de a controla tipul și concentrația de impurități în regiuni specifice ale cristalului semiconductor. Calea cea mai practică pentru atingerea acestui scop este *difuzia în solide*.

Fluxul $F(x, t)$ al unei specii oarecare se definește ca fiind numărul de particule (atomi sau molecule) care trec prin unitatea de arie în unitatea de timp. Fie $C(x, t)$ concentrația de atomi ai speciei difuzante (impurități) de un anumit tip (tipul 1), plasate în volumul unei substanțe de bază, care constă din atomi de un alt tip (tipul 2). Dacă distribuția atomilor de tipul 1 nu este uniformă (există un gradient al concentrației impurităților), deci $C(x, t)$ depinde de poziție, atomii tind să ajungă în starea finală de echilibru, când vor fi distribuiți uniform (fig. 5.2).

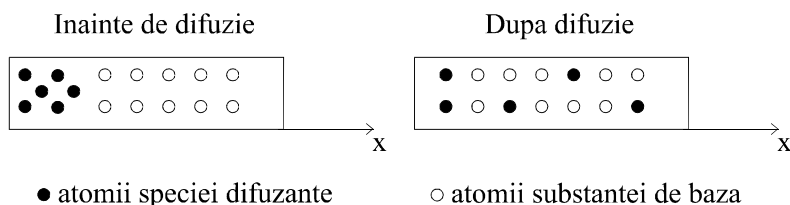


Figura 5.2. Modelul de difuzie

Acest fenomen natural este accelerat în condiții de temperatură *mare*. Considerând un plan la distanța x , se notează fluxul atomilor de tipul 1 cu $F(x, t)$, astfel încât:

$F(x, t)$ = numărul de atomi de tipul 1 care traversează unitatea de arie a planului în unitatea de timp în direcția $+x$ (sensul pozitiv).

Dacă atomii de tipul 1 sunt distribuiți uniform, $F(x, t) = 0$. Dacă nu sunt distribuiți uniform, atunci $F(x, t)$ este proporțional cu gradientul concentrației de impurități:

$$F(x, t) = -D \frac{\partial C(x, t)}{\partial x}. \quad (5.1)$$

Coeficientul de proporționalitate D se numește *coeficient de difuzie* al atomilor de tipul 1. Deoarece, în volumul de substanță (atomi de tipul 2), numărul total de atomi de tipul 1 se conservă, variația în timp a concentrației de impurități trebuie să fie egală cu variația cu distanța a fluxului de difuzie, considerată cu semn negativ. Matematic, aceasta înseamnă:

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = -\frac{\partial F(x, t)}{\partial x}. \quad (5.2)$$

Ecuatia care *modelează* fenomenul de difuzie este o ecuație cu derivate parțiale de forma (*ecuația de difuzie*):

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2}. \quad (5.3)$$

5.2. Soluția ecuației de difuzie

În urma procesului de difuzie, se dorește determinarea caracteristicilor de difuzie, pornind de la o lege cunoscută. Aceste caracteristici sunt: concentrația la suprafață a speciei difuzante (impurități), cantitatea de substanță introdusă în timpul dat (*cantitatea de impurități difuzată*), adâncimea de difuzie, gradientul concentrației dopantului (impurității) la joncțiune. Pentru determinarea acestor caracteristici, este necesară cunoașterea profilului concentrației speciei difuzante, fapt care va conduce la cunoașterea soluției ecuației diferențiale (5.3), cu o condiție inițială și două condiții la limită impuse.

Condiția inițială este dată de concentrația la $t = 0$; ea depinde de mediul ambiant în care este plasat materialul semiconductor (placheta semiconductoare). Condițiile la limită sunt date de concentrațiile de impurități la suprafață ($x = 0$) și la distanță mare în raport cu adâncimea difuziei ($x \rightarrow \infty$), condiție admisă în cazul unui semiconductor semi-infinit, în care difuzia începe de la suprafața stratului semiconductor. Soluțiile ecuației (5.3) se caută numai pentru cazurile practice, corespunzătoare condițiilor la limită întâlnite în procesele reale. Două dintre aceste cazuri sunt interesante:

- a) cazul concentrației de impurități la suprafață, constantă;
- b) cazul concentrației de impurități la suprafață, limitată.

5.2.1. Difuzia din sursă constantă. Etapa de predifuzie

Procesul de impurificare prin difuzie pentru formarea joncțiunilor *pn* este format din două etape. În prima etapă, etapa de *predifuzie*, atomii de impuritate sunt transportați de la o sursă de impurități la suprafața plachetelor de siliciu. În urma unui tratament termic, rezultă un strat puțin adânc (adiacent suprafeței substratului semiconductor de bază, cu adâncimea cuprinsă între câteva zecimi de micron și câțiva microni, în funcție de tipul dispozitivului), având concentrația atomilor de impuritate mare. Caracteristica acestei etape este faptul că sursa de impurități menține constantă concentrația de impurități la suprafața plachetelor de siliciu, pe toată durata procesului. La același rezultat se poate ajunge implantând ionii de impuritate în substratul semiconductor (§ 4.3).

Deoarece prin predifuzie, *concentrația la suprafață* a impurității, C_s , rămâne constantă, ecuația de difuzie (6.3) se rezolvă impunând condițiile la limită [8]:

$$C(0, t) = C_s, \quad C(\infty, t) = 0, \quad (5.4)$$

și condiția inițială:

$$C(x, 0) = 0. \quad (5.5)$$

Soluția care satisface ecuația de difuzie, în condițiile de mai sus, este dată de *funcția complementară de eroare*, *erfc* [16]:

$$C(x, t) = C_s \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}. \quad (5.6)$$

Soluția (5.6) nu este practic verificată decât pentru adâncimi de difuzie de mai mulți microni. În concluzie, relația (5.6) descrie distribuția de impurități datorată difuziei din sursă exterioară plachetei de semiconductoare, admitând valoarea constantă a concentrației dopantului la suprafața plachetelor semiconductoare. Fizic, C_s nu poate să depășească valoarea *solubilității solide* a impurității respective (concentrația maximă a impurității în solid), în materialul semiconductor, la temperatura la care are loc procesul.

Profilul concentrației impurității obținut în urma procesului de predifuzie este ilustrat în figura 5.3. Se observă că odată cu creșterea timpului de predifuzie, impuritatea pătrunde mai adânc în volumul materialului semiconductor.

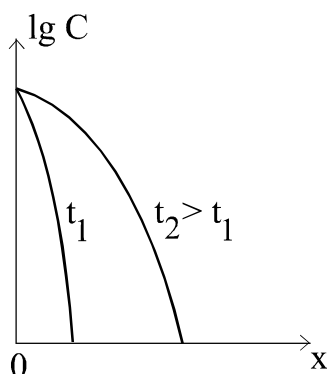


Figura 5.3. Distribuția erfc

5.2.2. Difuzia din sursă limitată. Etapa de difuzie

În urma predifuziei se obțin concentrații la suprafață egale cu solubilitatea solidă a impurității la temperatura la care a avut loc predifuzia. În cele mai multe cazuri, pentru realizarea unui profil de impurități convenabil dispozitivului respectiv, este necesar să se transporte impuritățile mai adânc în volumul semiconductorului, concomitent cu scăderea valorii concentrației la suprafață, fără să se mărească cantitatea totală de impurități difuzată în volumul materialului semiconductor. Această cerință se poate realiza printr-un tratament termic ulterior, la temperaturi și timpi mai mari decât cele ale primei etape, într-o atmosferă curată, lipsită de impurități. Distribuția de impurități după etapa de *difuzie* este dată de soluția ecuației de difuzie care satisface condițiile la limită [8]:

$$\partial C / \partial x|_{(0,t)} = 0, C(\infty, t) = 0. \quad (5.7)$$

Aceste condiții determină o valoare constantă a cantității totale de impurități din semiconductor, în timpul etapei de difuzie.

Profilul concentrației de impurități după etapa de difuzie este dat de *distribuția Gauss*:

$$C(x, t) = C_s(t) e^{-\frac{x^2}{4Dt}}. \quad (5.8)$$

Ecuația (5.8) descrie distribuția de impurități datorată difuziei din sursa prezentă în stratul de suprafață al plachetei semiconductoare. Pe baza relației (5.8) se obține reprezentarea grafică din figura 5.4, unde se observă extinderea profilului concentrației de impurități spre volumul semiconductorului, concomitent cu scăderea concentrației la suprafață, pe măsura creșterii timpului de difuzie.

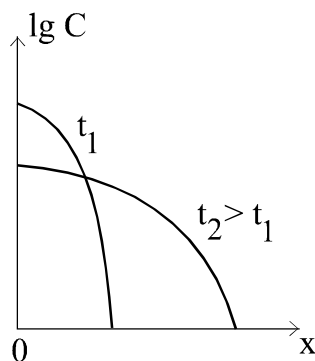


Figura 5.4. Distribuția Gauss

În figura 5.5 sunt ilustrate profilele concentrației de impurități pentru cele două etape ale procesului de difuzie.

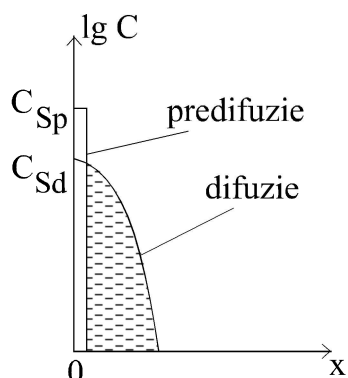


Figura 5.5. Profilele concentrației de impurități pentru cele două etape ale procesului de difuzie. Ariile delimitate de cele două profile sunt egale (C_{Sp} – concentrația la suprafață după etapa de predifuzie; C_{Sd} – concentrația la suprafață după etapa de difuzie)

Cele două soluții analitice ale ecuației de difuzie (relațiile 5.6 și 5.8) au fost folosite pentru modelarea difuziei impurităților în siliciu, începând cu anii '60, în *tehnologia bipolară* folosită la fabricarea circuitelor integrate *pe scară medie*. Tranzistoarele bipolare erau realizate prin procesul dublei difuzii, aceste soluții prezicând cu o bună aproximație profilele de difuzie obținute [17].

5.3. Mecanisme de difuzie

Așa cum s-a arătat, difuzia, ca fenomen general, este mecanismul prin care atomii de impuritate se deplasează în rețeaua cristalină a unui corp solid.

Tipurile de impurități (dopanți) folosite pentru realizarea straturilor difuzate de tip *p* sau *n*, în cazul folosirii siliciului ca material semiconductor de bază, sunt date în tabelul de mai jos.

Tipuri de dopanți

Strat de tip <i>p</i>	Strat de tip <i>n</i>
B	P
Ga	Sb
Al	As

Dacă se studiază tabelul valorilor coeficienților de difuzie funcție de temperatură, pentru diferiți atomi care pot să difuzeze în siliciu, se observă o bandă de valori neocupată între elementele chimice care pot să difuzeze *rapid* (de exemplu *Ni*, *Li*, *Fe*), având coeficientul de difuzie $D = 10^{-10} \div 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ (la $T = 1000^\circ\text{C} - 1200^\circ\text{C}$) și elementele chimice mai *lente*, din grupele III și V (*Al*, *Ga*, *B*, *In*, *P*, *As*, *Sb*), cu $D = 10^{-18} \div 10^{-15} \text{ m}^2/\text{s}$ (la $T = 1000^\circ\text{C} - 1200^\circ\text{C}$). Această bandă de valori este ocupată în parte de *Au* și *Pt*, numite elemente chimice *hibride*, ($D = 10^{-14} \div 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, la $T = 1000^\circ\text{C} - 1200^\circ\text{C}$) [18, 19].

Pentru estimări aproximative privind soluțiile ecuației de difuzie, coeficientul de difuzie se consideră constant în tot volumul stratului și pe toată durata procesului de difuzie.

La temperaturi înalte, atomii rețelei cristaline vibrează în jurul nodurilor rețelei. Anumiți atomi au suficientă energie pentru a părăsi nodurile rețelei, devenind atomi *interstițiali* (se plasează în spațiul dintre noduri, fig. 5.6.a), lasând în urmă câte o *vacanță*. Dacă un atom de impuritate migrează spre locul unei vacanțe, mecanismul se numește *difuzie prin vacanțe* sau *substituțională* (elementele chimice ale grupelei a V-a, fig. 5.7).

Elementele chimice ale grupei a III-a migrează printre nodurile rețelei cristaline, își schimbă, temporar, poziția substitucională cu una interstițială (fig. 5.6.b), reocupând o poziție într-un nod al rețelei, prin trimiterea unui atom al rețelei de bază într-o poziție interstițială (fig. 5.6.c). Mecanismul de difuzie se numește *interstițial* [19].

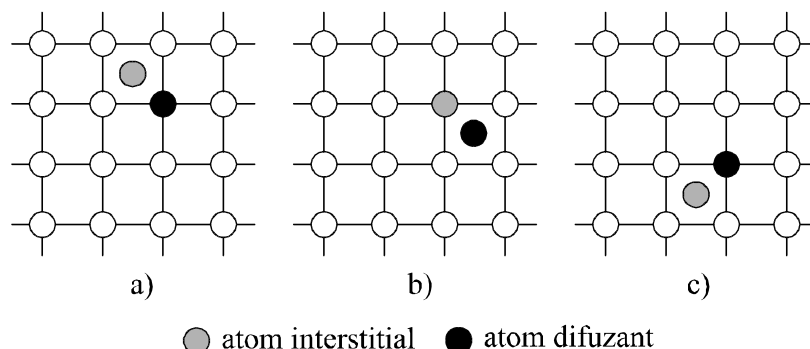


Figura 5.6. Mecanism de difuzie interstițial (Sursa: prelucrat după Frank [19])

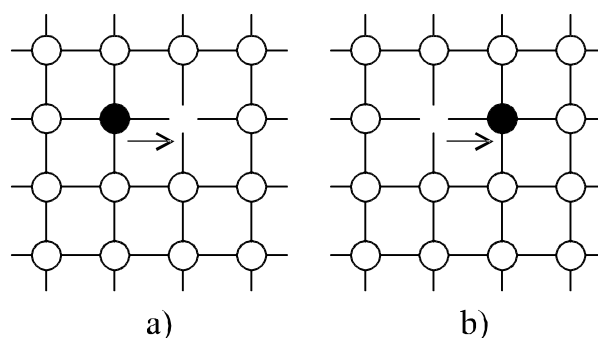


Figura 5.7. Mecanism de difuzie prin vacanțe de rețea (Sursa: prelucrat după Frank [19])

6. REALIZAREA STRATURILOR DIFUZATE

6.1. Procesul de difuzie

Fenomenul fizic de difuzie prezintă o importanță deosebită în tehnologia dispozitivelor semiconductoare deoarece constituie, pe de o parte, o metodă foarte practică de impurificare *controlată* a materialelor semiconductoare (realizarea joncțiunilor *pn*), iar, pe de altă parte, un fenomen inevitabil la temperaturi înalte, modificând distribuția impurităților în materialele semiconductoare.

Difuzia în solide este procedeul cel mai folosit în tehnologia de realizare a *straturilor difuzate* în substraturi semiconductoare. Materialul semiconductor cel mai folosit și în momentul de față în industria microelectronică este *siliciul monocristalin* obținut prin metoda *tragerii din topitură*¹⁹. Deoarece siliciul *dopat* se comportă din punct de vedere electric ca un material semiconductor de tip *p* sau *n*, în funcție de tipul de impuritate prezentă în cristal, rezultă că prin difuzie se pot forma, în volumul materialului semiconductor, *regiuni* de tip *p* sau *n*.

Procesul de realizare a unei joncțiuni *pn* prin difuzie, este ilustrat în figura 6.1. Se presupune că placheta de siliciu conține inițial o concentrație uniformă de impurități de tip *n* (concentrația C_B). În prima etapă, printr-un mijloc oarecare, pe una din fețele plachetei de

¹⁹ Metoda *Czochralski* sau metoda CZ, după numele chimistului polonez Jan Czochralski, care a inventat această metodă de obținere a siliciului monocristalin, aplicată în industria electronică începând cu anul 1952. Reprezintă metoda cea mai folosită pentru obținerea siliciului folosit ca material de bază în microelectronică. Lingourile de siliciu monocristalin au proprietăți mecanice (diametru, suprafață), fizice (perfecțiune cristalină, rezistivitate) și chimice (conținut de oxigen, carbon, metale grele) foarte bine controlate.

siliciu se depun atomii unei impurități de tip *p* (etapa de predifuzie sau *predepunere*). Impuritatea de tip *p* cea mai des utilizată în fabricația dispozitivelor semiconductoare pe bază de siliciu, este *borul*. Distribuția impurităților după etapa de predifuzie este ilustrată în figura 6.1.a. În a doua etapă, placheta de siliciu este supusă unui tratament termic la o temperatură mai mare decât cea a tratamentului de predifuzie, de ordinul a 1100°C - 1200°C, pentru un timp de ordinul zecilor de minute sau orelor. Ca urmare, impuritățile difuzează (se *redistribue*) în volumul plachetei de siliciu, pe o adâncime mai mare (fig. 6.1.b).

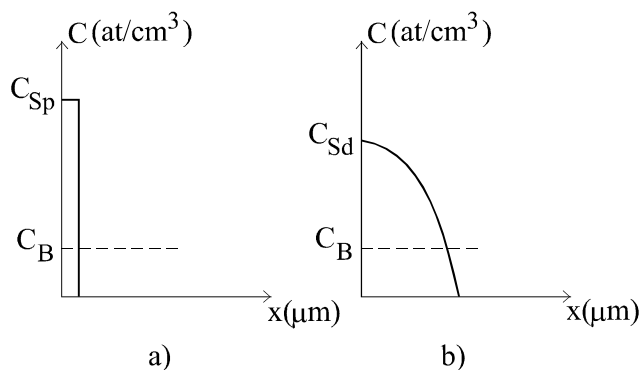


Figura 6.1. Principiul procesului de realizare a unei joncțiuni *pn* prin difuzie: a) etapa de predifuzie; b) etapa de difuzie

Procesul de difuzie determină formarea unei joncțiuni *pn* în volumul materialului semiconductor (siliciu), fără a fi afectată continuitatea rețelei cristaline a materialului de bază. Adâncimea joncțiunii, măsurată de la suprafața plachetei semiconductoare (substratului semiconductor), este cuprinsă între 0,1 μm și 20 μm , pentru difuziile necesare realizării circuitelor integrate pe bază de siliciu [12].

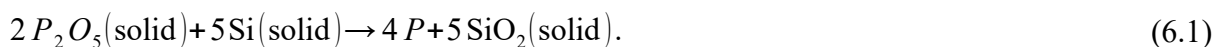
Tehnologia de impurificare controlată prin difuzie se poate realiza prin *difuzie din fază de vapori* sau prin *difuzie dintr-un strat sursă dopat*, la temperaturi înalte.

6.2. Predifuzia

Metoda cea mai des folosită în practica tehnologică pentru realizarea predifuziei este cea a *gazului purtător* în care un flux de gaz inert (N_2 , Ar), un gaz oxidant sau reducător, antrenează impuritatea respectivă care reacționează chimic cu plachetele din material semiconductor (siliciu), plasate în tubul de proces (tub de cuarț transparent). Întregul ansamblu este încălzit la temperaturi înalte, cuprinse între 900°C și 1100°C. Impuritățile pot fi introduse în gazul purtător în câteva moduri, în funcție de tipul de sursă.

În cazul folosirii *surselor solide*, impuritatea este introdusă în gazul purtător de la o sursă solidă care se evaporă. Dacă la sursă se atinge echilibrul, atunci presiunea parțială a impurității conținută în gaz va fi egală cu presiunea ei de vapori la temperatura la care se află sursa.

O sursă solidă poate fi folosită în predifuzia majorității impurităților. Materialul sursei este de obicei un oxid al impurității respective, de exemplu: P_2O_5 pentru *fosfor*, B_2O_3 pentru *bor*, As_2O_3 pentru *arsen*, Sb_2O_4 pentru *stibiu*, Ga_2O_3 pentru *galiu*. Oxidul este transportat la suprafața plachetei semiconductoare de către gazul purtător unde este redus. De exemplu, la suprafața plachetei de siliciu are loc reacția chimică (pentru predifuzia fosforului) [20]:



Prin urmare, în timpul predifuziei, la suprafața plachetei de siliciu se formează un strat de oxid (*sticlă dopată*) care constituie și ea o sursă de difuzie, pe lângă impuritatea introdusă în volumul plachetei de siliciu, pentru etapa a doua a procesului.

Un compus *lichid* poate să fie de asemenea folosit ca sursă de impurități dacă gazul purtător este trecut prin vasul care conține lichidul respectiv. Vasul este menținut la temperatură constantă într-o incintă termostatăă. Gazul inert care barbotează prin lichid atinge echilibrul cu lichidul. Gazul care părăsește vasul este compus din gazul inert purtător și vapori ai impurității respective, a căror presiune parțială este egală cu presiunea de vapori a lichidului la temperatura lui (fig. 6.2).

Sursele lichide disponibile și utilizate frecvent sunt: oxiclorigura de fosfor ($POCl_3$) pentru predifuzia *fosforului* (joncțiuni n^+p) și tribromura de bor (BBr_3) pentru predifuzia *borului* (joncțiuni p^+n).

În cazul predifuziei fosforului, în prezența oxigenului are loc reacția chimică:



La suprafața plachetei de siliciu are loc reacția chimică:

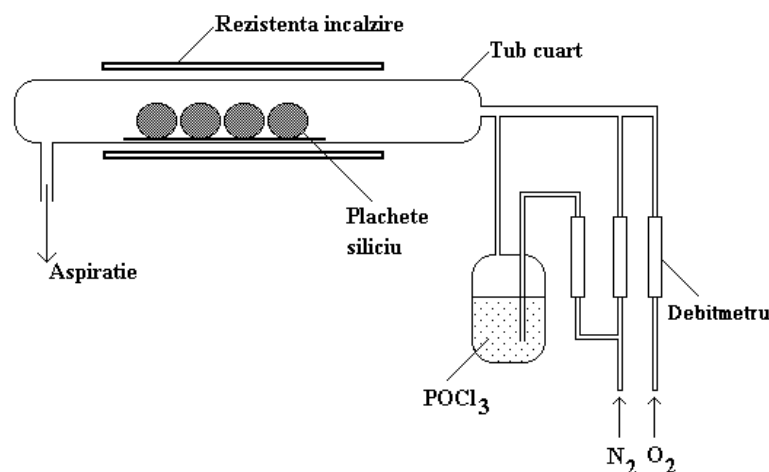


Figura 6.2. Schema de principiu a unei instalații de difuzie fosfor (sursă lichidă)
(Sursa: după Lakatoș [21])

Ca și în cazul surselor solide, în prezența oxigenului (gaz component al atmosferei din tubul de proces) se formează o *sticlă de fosfor* (respectiv *bor*) care constituie sursa de difuzie pentru etapa următoare a procesului (etapa de difuzie).

Pentru obținerea difuziei de fosfor din sursă gazoasă, se poate folosi *fosfina* (PH_3). Gazul purtător este azotul sau argonul, fosfina din butelie fiind deja diluată în proporție de 0,5 % – 0,3 %, în azot sau argon. Un debit mic de oxigen este necesar pentru ca reacția chimică să fie completă în tubul de proces. La contactul cu placheta de siliciu și în prezența oxigenului au loc reacțiile chimice:



6.3. Difuzia

După cum s-a arătat, în urma predifuziei se obțin concentrații la suprafața plachetelor semiconductoare care nu pot să depășească valoarea solubilității solide a impurității, corespunzătoare temperaturii la care a avut loc procesul. De regulă, este necesar să se scadă concentrația la suprafața plachetei semiconductoare de la valoarea inițială, concomitent cu transportul impurităților mai adânc în volumul semiconductorului (cantitatea totală de impurități rămânând constantă). Ambele cerințe pot fi realizate printr-un tratament termic

ulterior, la o temperatură mai mare, într-o atmosferă care nu conține nici o impuritate. În practica tehnologică, acest tratament termic adițional se realizează într-un mediu oxidant. Astfel, stratul de oxid care rezultă va tinde să închidă impuritățile în volumul materialului, deoarece oxidul acționează ca o *mască* împotriva difuziei acestor impurități în exteriorul plăchetei semiconductoare.

6.4. Caracterizarea straturilor difuzate

Straturile semiconductoare *dopate*, realizate prin *difuzie*, sunt *caracterizate* și *caracterizabile* de (cu) următoarele mărimi: *concentrația la suprafață* a materialului dopant la sfârșitul procesului de difuzie, C_s , cantitatea de dopant introdusă în volum într-un timp dat, $Q(t)$, *adâncimea de difuzie* (*adâncimea joncțiunii* sau *grosimea stratului difuzat*), x_j , *gradientul concentrației la joncțiune*, a . Dintre acestea, mărimile importante din punct de vedere al proiectării dispozitivului, sunt: C_s , x_j , a . Determinarea acestor mărimi presupune cunoașterea profilului distribuției de impurități. *Parametrii* importanți (și suficienți) pentru caracterizarea straturilor difuzate sunt: C_s , x_j . Dintre cele două mărimi numai a doua este o mărime măsurabilă direct. Alte mărimi măsurabile direct, cu ajutorul cărora se pot caracteriza straturile difuzate, sunt: *rezistivitatea medie a stratului difuzat*, $\bar{\rho}$ și *raportul V/I* (tensiune pe curent). După cum se va vedea, această ultimă mărime este foarte importantă deoarece metoda de măsură este foarte rapidă și reprezintă o informație indirectă privind concentrația la suprafață a materialului dopant (cu ajutorul căruia s-a realizat joncțiunea) și rezistivitatea medie a stratului difuzat.

Parametrul electric cel mai utilizat pentru caracterizarea straturilor difuzate este *rezistența pe pătrat*. Pentru a defini această mărime se consideră rezistența pe care o are o probă de siliciu, *uniform* dopată, având o concentrație de atomi de impurități C , de lungime L , lățime W și grosime g (curentul electric are direcția lungimii L , fig. 6.3):

$$R = \frac{\rho L}{gW} \equiv \frac{1}{\sigma} \frac{L}{gW}. \quad (6.5)$$

sau:

$$R = \frac{1}{q\mu C} \frac{L}{gW} = \frac{L}{W} \frac{1}{q\mu Cg} = \frac{L}{W} R_{\square}. \quad (6.6)$$

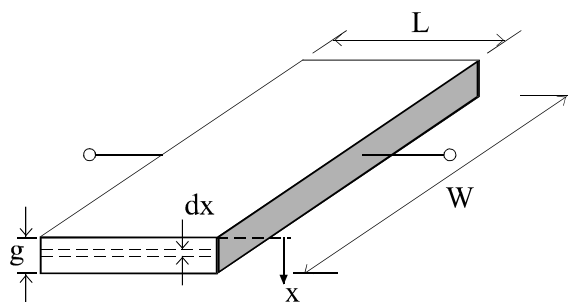


Figura 6.3. Calculul rezistenței unui strat difuzat (Sursa: prelucrat după Gray și Meyer [12])

Mărimea $R_{\square}$ reprezintă rezistența pe pătrat a stratului semiconductor și se măsoară în Ω sau *ohm/pătrat* ($\Omega/\square$) (strat de formă pătrată și grosime g). Rezistența pe pătrat se poate exprima în funcție de rezistivitatea materialului semiconductor:

$$R_{\square} = \frac{1}{q\mu Cg} \equiv \frac{\rho}{g}. \quad (6.7)$$

În cazul realizării joncțiunilor difuzate, stratul rezultat este *neuniform* dopat.

Mărimea x_j reprezintă distanța de la suprafața stratului difuzat până la marginea regiunii de sarcină spațială a joncțiunii, dar ea se poate aproxima cu joncțiunea metalurgică. Rezistența pe pătrat este folosită pentru caracterizarea electrică a straturilor difuzate, fiind și un parametru important în proiectarea rezistențelor integrate.

Măsurarea raportului V/I prin *metoda celor patru sonde* reprezintă o metodă precisă și rapidă. Măsurătorile se fac până la o adâncime care să depășească adâncimea joncțiunii. Practic, acest fapt este semnalat printr-o creștere foarte bruscă a valorilor raportului V/I . Principiul de măsurare este următorul: pe suprafața plachetei semiconductoare sunt așezate patru sonde în linie, distanța dintre ele fiind de maxim 1,5 mm; curentul I trece prin sondele marginale, iar căderea de tensiune V , dată de trecerea curentului, este măsurată de sondele din mijloc (fig. 6.4). În acest mod, problemele legate de rezistența de contact dintre sonde și suprafața plachetei, sunt eliminate.

O expresie a rezistivității medii a stratului difuzat practică și ușor de folosit este de forma:

$$\bar{\rho} = 4,532 \cdot \frac{V}{I}(x=0) \cdot x_j. \quad (6.8)$$

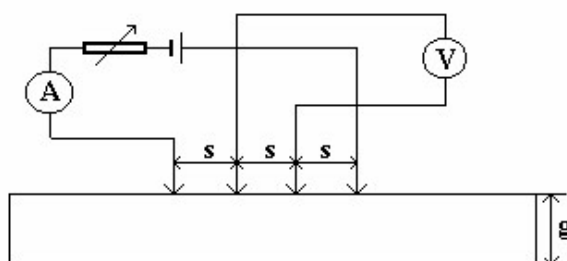


Figura 6.4. Principiul măsurării raportului V/I

Rezultatul exprimat de relația (6.8) este obținut în cazul straturilor cu dimensiuni laterale mari și grosimea x_j mică, în comparație cu distanța dintre sonde. Deoarece o distanță tipică dintre sonde este $s = 1000 \mu\text{m}$, această condiție este îndeplinită pentru straturile difuzate. De asemenea, plachetele semiconductoare fiind tăiate la grosimi de $200 \mu\text{m}$ până la $400 \mu\text{m}$, relația (6.8) poate fi folosită și pentru a calcula rezistivitatea plachetelor, folosind metoda celor patru sonde, substituind în locul mărimii x_j grosimea plachetelor, g [8].

Folosind relațiile (6.7) și (6.8), se obține relația de calcul, pe bază experimentală, a rezistenței pe pătrat a unui strat difuzat:

$$R_{\square} = \frac{\bar{\rho}}{x_j} = 4,532 \cdot \frac{V}{I}(x=0) \equiv 4,532 \cdot \frac{V}{I}. \quad (6.9)$$

Calibrarea procesului de difuzie, pentru o anumită tehnologie, presupune determinări precise ale profilelor de difuzie, în urma cărora se obțin valorile rezistenței pe pătrat. Ulterior, în practica tehnologică, pentru caracterizări relative a straturilor difuzate, se folosește direct raportul V/I . Datorită legăturii indirecte între concentrația la suprafață și raportul V/I , calculul rezistenței pe pătrat, folosind relația (6.9), furnizează informații privind procesul de difuzie, controlând în acest fel procesul respectiv. Măsurarea rezistenței pe pătrat la diverse adâncimi ale stratului dopat, folosind relația (6.9), este o metodă mai laborioasă și nepractică.

În general, măsurarea rezistenței pe pătrat și a adâncimii joncțiunii asigură o bună monitorizare a procesului de difuzie. În cazul necesității calibrării unui proces de difuzie sau implanatare de ioni, este necesar să se cunoască exact profilul de impurități.

Determinări foarte precise ale profilelor de impurități, cu rezoluție mai mică de 5 nm, pot fi realizate prin *spectroscopia de masă a ionilor secundari*, pe scurt SIMS (*Secondary Ion Mass Spectroscopy*). În această tehnică, un fascicul de ioni, cu energia cuprinsă între 500 eV și 20 keV, pulverizează material de pe suprafața probei, iar componenta rezultată de ioni secundari este detectată și analizată, informația fiind folosită pentru trasarea profilului concentrației de impurități [22]. Metoda are o excelentă sensibilitate (detectarea la nivelul ppm-urilor, a celor mai multe elemente chimice), furnizând informații privind doza de implantare și adâncimea maximă de pătrundere a impurităților implantate.

7. FABRICAȚIA CIRCUITELOR INTEGRATE

Dezvoltarea tehnologiilor de fabricație a circuitelor integrate se datorează evoluției proceselor de *fotolitografie*, ale tehnicilor de fabricație și tendinței de micșorare a valorii tensiunii de alimentare a circuitelor integrate (de la ± 15 V sau ± 18 V la ± 5 V sau ± 3 V). Evoluția proceselor fotolitografice a condus la reducerea dimensiunii detaliului minim de la nivelul *zecilor de μm* la nivelul *submicronic*.

Un rol hotărâtor l-a avut dezvoltarea tehnicii implantării de ioni pentru etapa tehnologică de predepunere a atomilor de impuritate, datorită controlului precis permis de această tehnică.

Micșorarea tensiunilor de lucru a permis: o împachetare mai compactă a dispozitivelor pe *cip*, realizarea unor structuri mai superficiale capabile să lucreze la frecvențe foarte înalte și tensiuni de alimentare de cel mult 5 V (la tensiuni mici, regiunile de sarcină spațială ale joncțiunilor sunt mai înguste).

În diagrama din figura 7.1 sunt ilustrați principalii pași care trebuie parcurși pentru *proiectarea tehnologică* a unui circuit microelectronic. Sunt indicate domeniile care sunt implicate în proiectarea tehnologică: *fizica dispozitivului*, domeniul care influențează proiectarea dispozitivelor care alcătuiesc circuitul respectiv, *proiectarea circuitului* și proiectarea *tehnologiei* de realizare; toate cele trei domenii contribuie la alcătuirea *fluxului tehnologic* de realizare a circuitului integrat respectiv. Datorită interdependenței dintre diversele *proces tehnologice* care alcătuiesc un *flux tehnologic*, proiectarea tehnologică trebuie să țină seama de ansamblul tuturor proceselor, astfel încât validarea unui flux tehnologic să se facă numai după stabilirea parametrilor de proces pentru toate operațiile care alcătuiesc fluxul de fabricație respectiv. Orice modificare a parametrilor unui proces tehnologic individual, trebuie să se facă numai după verificarea întregului flux tehnologic. În acest sens, simularea cu ajutorul calculatorului, a fluxurilor tehnologice este foarte importantă, deoarece, pe de o parte este scurtat timpul de obținere a rezultatului final, pe de altă parte, sunt realizate importante economii ale costului final de fabricație.

Diagrama din figura 7.2. ilustrează, pe scurt, complexitatea proiectării unui *flux tehnologic*, prin pașii și parametrii care trebuie avuți în vedere în acest scop. Astfel, la proiectarea unui flux tehnologic trebuie să se aibă în vedere: modul de determinare a profilelor de impurități care formează joncțiunile *pn* ale dispozitivelor (prin măsurători SIMS) și tipurile de măsurători electrice pentru caracterizarea dispozitivelor și a circuitului, finalitatea fiind dată de posibilitățile de apreciere a performanțelor circuitului. Aceste date de proiectare împreună cu *modelele fizice* ale proceselor tehnologice, modelele fizice ale materialelor semiconductoare implicate în proces și *modelele de circuit*, alcătuiesc totalitatea parametrilor necesari pentru simularea dispozitivelor și circuitului integrat respectiv. Compararea parametrilor de proiectare cu cei obținuți în urma simulării, dă posibilitatea proiectantului de a opera optimizări ale fluxului tehnologic, în ansamblul lui, scopul final fiind cel al obținerii performanțelor dorite pentru circuitul respectiv. Simularea unui flux tehnologic are trei aspecte principale: simularea proceselor tehnologice, simularea dispozitivelor care alcătuiesc circuitul și simularea circuitului. Aceste etape pot fi parcurse cu

PROIECTAREA TEHNOLOGICĂ

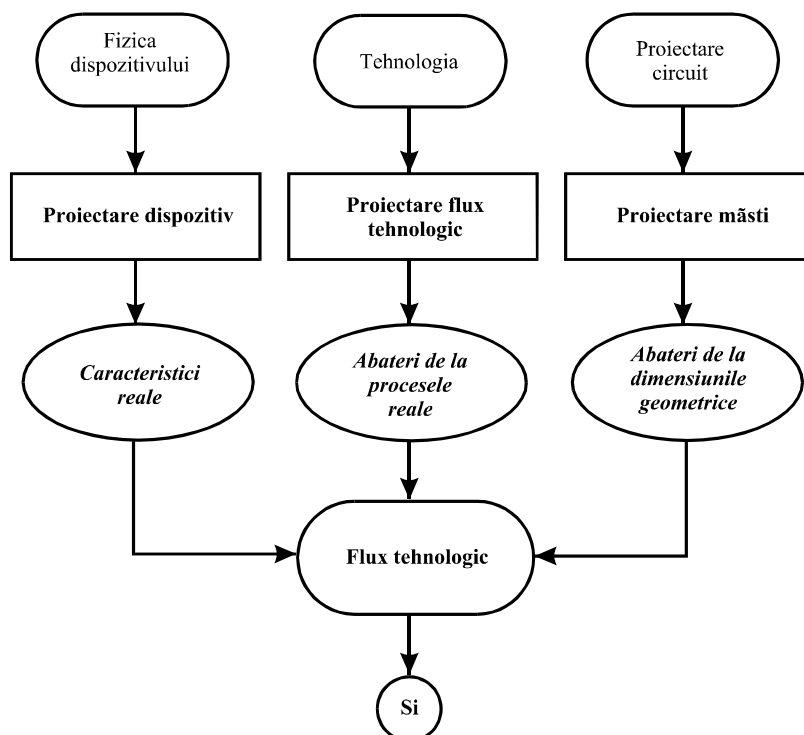


Figura 7.1. Principalii pași ai proiectării tehnologice

[http://www3.ntu.edu.sg/eee/eee6/lecturenotes/e425/notes/intro_physim.pdf]

un singur simulator, după algoritmul redat, pe scurt, în continuare. *Simulatorul de proces* conține modele pentru fiecare proces tehnologic. *Modelul*, în sensul proceselor tehnologice, reprezintă o descriere schematică sau o analogie a fenomenelor, care ține cont de proprietățile cunoscute sau presupuse. În sens mai larg, *a modela* înseamnă *a cunoaște*. Ori de câte ori este posibil, modelele folosite în microelectronică sunt bazate pe *fenomene fizice* bine cunoscute și explicate. Dacă fenomenul fizic nu este cunoscut, se apelează la un model bazat pe date *empirice*, rezultate din măsurători experimentale (*model empiric*). Modelele empirice (*fenomenologice*) sunt bazate pe date experimentale și reprezintă relații matematice între variabilele care descriu fenomenul, rezultate din prelucrarea datelor experimentale, fără substrat teoretic. Relațiile matematice cantitative sunt *fitate* pe datele experimentale. Metoda *empirică* constă în încercări repetate cu eliminarea sau îndreptarea erorilor. Ca exemplu de model empiric se poate da oxidarea siliciului pentru grosimi mai mici de 350 Å, caz în care modelul Deal-Grove nu mai este valabil. Chiar dacă modelele empirice sunt folosite în simulări (de procese sau dispozitive) atunci când modelele fizice nu sunt utilizabile sau sunt prea complexe, totuși, o temă majoră a cercetării în domeniul semiconductorilor a fost și este dezvoltarea de noi modele fizice care să înlocuiască modelele empirice [17].

Dezvoltarea inițială a proceselor tehnologice prin metoda empirică a reprezentat o metodă înceată de progres. Rata de progres a tehnologiilor a putut fi radical îmbunătățită prin combinarea investigațiilor empirice cu metodele de modelare, comportarea teoretică fiind dedusă din datele experimentale. Modelele proceselor au fost dezvoltate din aceste teorii. Aceste modele nu oferă numai o înțelegere a fenomenelor observate, oferind, de asemenea, și posibilitatea prezicerii derulării procesului în condiții care nu au fost testate experimental.

PROIECTARE FLUXURI TEHNOLOGICE

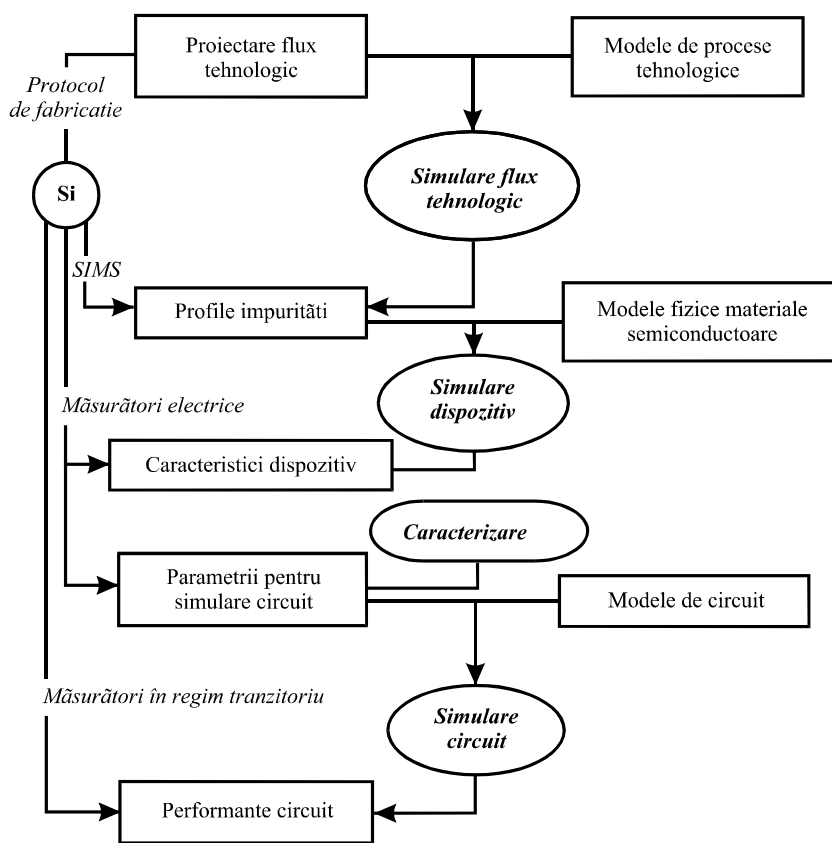


Figura 7.2. Complexitatea proiectării unui flux tehnologic [http://www3.ntu.edu.sg/eee/eee6/lecturenotes/e425/notes/intro_physim.pdf]

Modelele fizice sunt folosite în simulatoarele avansate pentru simularea 2D a proceselor tehnologice. În capitolele anterioare au fost discutate modelele fizice ale principalelor procese tehnologice care alcătuiesc fluxurile de fabricație ale circuitelor integrate: oxidarea, difuzia, implantarea de ioni, epitaxia. Modelele fizice sunt folosite pentru a oferi o perspectivă asupra procesului tehnologic nerealizat experimental. Aceste modele se bazează pe valorile determinate experimental, ale parametrilor din ecuațiile modelelor, ca de exemplu: mobilitatea purtătorilor, μ_n , μ_p , coeficientul de difuzie al impurităților, D (relația 5.3, legea a II-a a lui Fick) și pe diverși parametri de proces: *temperatură*, *energie de activare* pentru impuritățile de dopare, *timp* (relația 5.6, funcția complementară de eroare, relația 5.8, distribuția Gauss). Relația 5.3 reprezintă formularea matematică a modelului fizic pentru difuzia impurităților în siliciu.

În general, modelele fizice sunt folosite pentru a preda un proces fizic sau funcționarea unui nou dispozitiv, nerealizate experimental [17].

Modelul fizic pentru dispozitivele semiconductoare este reprezentat de ecuațiile fundamentale ale fizicii dispozitivelor semiconductoare. Acest model presupune că funcționarea dispozitivelor poate fi simulată prin rezolvarea setului de cinci ecuații fundamentale, neliniare, parțial diferențiale, care descriu distribuția de purtători, de curent și de câmp (ecuația Poisson, ecuațiile de continuitate, ecuațiile densităților de curenți). Aceste ecuații se pot rezolva în condiții de curent continuu sau în domeniul timp (regim tranzitoriu). O parte din parametri existenți în aceste ecuații se obțin prin rezolvarea unor ecuații auxiliare, de exemplu, ecuațiile concentrațiilor de purtători la echilibru sau prin folosirea unor

relații, de exemplu, vitezele nete de recombinare-generare ale purtătorilor de sarcină de neechilibru.

Ținta simulării funcționării dispozitivelor semiconductoare este *prezicerea* funcționării electrice a dispozitivelor. Pentru aceasta se folosesc caracteristici curent-tensiune. Dacă există o ecuație diferențială care descrie *cantitativ* modelul fizic corespunzător unui fenomen fizic (care descrie funcționarea unui dispozitiv sau a unui proces fizic), pentru obținerea unui rezultat predictiv cantitativ din acest model, trebuie să fie posibilă rezolvarea ecuației respective. Există două abordări disponibile pentru obținerea soluției: utilizând *tehnici analitice* sau *analiza numerică*.

Soluția analitică face posibilă găsirea *valorii exacte* pentru o variabilă *dependentă* funcție de valorile date ale variabilei *independente*. Metoda analitică necesită folosirea unor aproximări pentru rezolvarea ecuației respective, fără a se afecta foarte mult precizia calculelor. În plus, timpul de calcul este mult mai mic decât în cazul metodei numerice. Soluția analitică reprezintă o funcție continuă pe un interval de interes, ea putând fi folosită pentru obținerea unui set de valori ale variabilei dependente. Dacă soluția analitică furnizează o bună concordanță cu datele experimentale, rezultă că ea descrie (reproduce) foarte bine simularea funcționării dispozitivului respectiv. Un exemplu în acest sens este dat de structura MOS ideală, pentru care rezolvarea ecuației Poisson unidimensională în regiunea semiconductoare a structurii MOS, în ipotezele aproximației de golire și a dopării uniforme a semiconductorului, conduce la o relație foarte simplă a variației potențialului cu distanța (*modelul simplificat al regiunii de sarcină spațială*, [23]):

$$\Phi(x) = \Phi_s \left(1 - \frac{x}{W} \right)^2. \quad (7.1)$$

unde Φ_s reprezintă potențialul la interfața oxid-semiconductor. Relația (7.1) este folosită și pentru calculul potențialului electrostatic în structura tranzistorului MOS, canal lung, chiar și la tensiuni $V_{DS} \neq 0$. Pentru structuri cu lungimi de canal submicronice, această aproximație nu mai este bună.

Dacă, dimpotrivă, soluția analitică nu verifică datele experimentale, atunci soluția obținută folosind analiza numerică oferă o mai bună descriere a fenomenului simulat.

Pentru simulările care necesită o mare acuratețe (ca în cazul dispozitivelor submicronice), *modelele analitice* sunt înlocuite de simulări numerice care pot să reprezinte mai bine fenomenle complexe a căror modelare depinde de condiții neliniare sau condiții dependente de timp. *Soluțiile numerice* nu elimină folosirea soluțiilor analitice, mai ales în cazurile în care obținerea soluțiilor numerice necesită folosirea unor calculatoare foarte performante. Ca urmare, ori de câte ori este posibilă obținerea unei soluții analitice care descrie exact un fenomen fizic, așa cum a fost el *estimat*, soluțiile analitice respective vor fi folosite. Ca exemplu, se poate aminti folosirea modelelor pentru obținerea caracteristicilor curent-tensiune ale dispozitivelor semiconductoare, utilizând simulatoarele pentru analiza circuitelor (de tipul SPICE). Astfel, pentru simularea curentului de drenă al tranzistorului MOS, se folosesc (pentru o aproximare de nivel 1) modele analitice simple, rezultate din rezolvarea, cu diverse aproximări, a ecuațiilor fundamentale ale fizicii dispozitivelor semiconductoare. Efecte de ordin superior se pot obține folosind, în cadrul acestor modele, *parametrii fizici* și *empirici* care se constituie ca *parametrii de model* (modele analitice *semiempirice*), aceștia putând fi extrași din caracteristicile curent-tensiune măsurate [17].

Rezultatele furnizate de simulatorul de proces se regăsesc sub forma profilelor de dopare și sunt folosite, ca date de intrare, pentru *simulatorul de dispozitive*.

Folosirea modelelor analitice poate să conducă la profile de dopare care aproximează foarte bine procesele de dopare controlată (de exemplu: implantarea cu doze mici sau

difuzia). În cazul difuziei, dacă legea a II-a a lui Fick este folosită în varianta unidimensională și coeficientul D este considerat constant în tot volumul substratului și pe toată perioada procesului de difuzie, rezultă ecuația *liniară* parțial diferențială dată de relația (5.3). Așa cum s-a arătat [§ 5.2], există două soluții analitice ale acestei ecuații, cu anumite condiții la limită și inițiale: funcția *erfc*, care modelează procesul de *predepunere chimică* (predifuzia) și distribuția Gauss, care modelează procesul de difuzie. În cazul în care coeficientul de difuzie D nu este constant (depinde de concentrația substratului dopat), relația (5.3) nu mai este valabilă. Ecuația care trebuie rezolvată în acest caz, este de forma:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D(C) \frac{\partial C}{\partial x} \right], \quad (7.2)$$

care este o ecuație *neliniară* parțial diferențială [17].

Modelarea a reprezentat și reprezintă o modalitate rapidă de progres în tehnologia microelectronică, în condițiile unor costuri scăzute. Chiar dacă, în mod evident, simularea nu poate să înlocuiască *fabricația*, simularea reduce numărul de încercări și erori necesare obținerii unui proces performant și stabil. În general, funcționarea dispozitivelor semiconductoare poate fi mai bine simulată decât procesele necesare fabricării circuitelor integrate, deoarece fizica dispozitivelor semiconductoare este bine cunoscută, permițând folosirea unor modele fizice foarte bune.

Rezultatele secvenței a doua de simulare (simulatorul de dispozitive) se grupează în două categorii: rezultate care privesc fenomenele fizice care caracterizează funcționarea dispozitivelor (distribuția potențialului, distribuția de sarcină, distribuția de curent) și rezultate care privesc caracteristicile electrice ale dispozitivului (tensiunea de prag, câștigul în curent, caracteristicile curent-tensiune). Pe baza acestor rezultate, se pot extrage parametrii de model, caracteristici fiecărui dispozitiv, ca de exemplu: tensiune de prag, parametru de transconductanță, parametru de modulație a lungimii canalului, curent de saturație, câștig în curent, tensiune Early. Cu aceste date se alcătuiesc modele ale dispozitivelor care alcătuiesc circuitul respectiv. În final, cu ajutorul modelelor de dispozitive, se alcătuiește modelul circuitului (circuitul echivalent) care va servi la *simularea circuitului* (folosind softul de simulare SPICE). Rezultatele simulării circuitului se regăsesc sub forma diversilor parametrii care caracterizează circuitul respectiv, ca de exemplu: punct static de funcționare, caracteristici curent-tensiune, caracteristici de transfer, timp de comutare, putere consumată, răspuns în frecvență.

Pe parcursul fabricației, măsurătorile au în vedere două categorii de parametrii: parametrii de proces, pentru operațiile tehnologice și parametrii electrice, pentru circuitul respectiv. Parametrii de proces se măsoară pe plachete *martori*, care sunt procesate împreună cu lotul respectiv de plachete. De exemplu, pe aceste plachete martori se măsoară: grosimea oxidului, raportul V/I , rezistivitatea pe pătrat, tensiunea de prag a capacitivelor MOS. Parametrii electrice ai circuitului, se măsoară pe *cipuri test* existente pe fiecare plachetă. Acest control electric asigură eliminarea plachetelor care nu se încadrează, din punct de vedere al performanțelor electrice, în limitele tehnologiei respective.

În continuare sunt prezentate, pe scurt, principalele fluxuri tehnologice folosite în fabricația circuitelor integrate.

7.1. Fabricația circuitelor integrate bipolare de tensiune mare

Fabricația circuitelor integrate bipolare de tensiune mare reprezintă fluxul tehnologic de bază folosit inițial pentru fabricarea circuitelor integrate de tensiune mare. Prin descrierea lui sunt descrise procesele de bază ale fabricației circuitelor integrate [12]. Structurile de tranzistori sunt izolate între ele prin tehnica *izolării cu joncțiuni*.

Suportul mecanic pe care se realizează circuitul integrat este placheta de siliciu monocristalin. Caracteristicile de bază ale plachetei suport sunt grosimea (250 μm , de exemplu), tipul de dopare (*substrat* tip p , concentrație de volum $C_B = 10^{16}$ at/cm³). Fluxul tehnologic pentru realizarea unui tranzistor bipolar $n\text{pn}$ de circuit integrat, este descris în continuare, prin enumerarea principalelor etape tehnologice.

Difuzia de strat îngropat include procese tehnologice de oxidare, fotogravură și difuzie. Rezultă un strat de tip n^+ , de rezistență mică (*strat îngropat*), rezistența pe pătrat având valoarea $R_{\square} = 20 \div 50 \Omega/\square$. Impuritățile folosite sunt: As , Sb (difuzanți lenți). Adâncimea joncțiunii este $x_j = 8 \mu\text{m}$.

Creșterea epitaxială include procese tehnologice de dezoxidare completă și creștere epitaxială (strat tip n). Grosimea și concentrația de impurități a stratului epitaxial determină tensiunea de străpungere a joncțiunii colector-bază (de exemplu: $x = 17 \mu\text{m}$, $\rho = 5 \Omega\text{cm}$).

Difuzia de izolare include procese tehnologice de oxidare, fotogravură, predepunere și difuzie *bor*. Scopul acestei etape este realizarea joncțiunilor de izolare a colectorului tranzistorului bipolar, cu joncțiuni pn polarizate invers. Caracteristicile procesului sunt: difuzie adâncă ($\geq 17 \mu\text{m}$), $t = \text{câteva ore}$, $T = 1200^\circ\text{C}$, $R_{\square} = 20 \div 40 \Omega/\square$.

Difuzia de bază include procese tehnologice de oxidare, fotogravură, predepunere și difuzie *bor*. Caracteristicile joncțiunii colector-bază sunt: adâncimea joncțiunii $x_j = 1 \div 3 \mu\text{m}$, $R_{\square} = 100 \div 300 \Omega/\square$.

Difuzia de emitor include procese tehnologice de oxidare, fotogravură, predepunere și difuzie (impurități de tip n). Simultan se realizează și contactul de *colector*. Caracteristicile joncțiunii emitor-bază sunt: adâncimea joncțiunii $x_j = 0,5 \div 2,5 \mu\text{m}$, $R_{\square} = 2 \div 10 \Omega/\square$.

Deschiderea ferestrelor de contact și metalizarea include procese tehnologice de oxidare, fotogravură și metalizare a contactelor de emitor, bază, colector (strat de aluminiu, grosime 1 μm). Secțiunea transversală prin structura finală este ilustrată în figura 7.3.

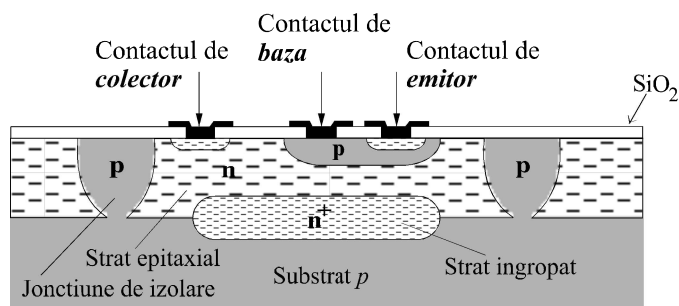


Figura 7.3. Secțiune transversală prin structura de circuit integrat bipolar de tensiune mare (Sursa: prelucrat după Gray și Meyer [12])

7.2. Flux tehnologic avansat pentru circuite integrate bipolare. Optimizări ale fluxului tehnologic de bază

Necesitatea creșterii frecvenței de tăiere (de la valoarea tipică de 500 MHz, la valoarea de 10 GHz), a determinat cerința de creștere a vitezei de comutare a tranzistoarelor. Această cerință a impus, pe de o parte, reducerea timpului de tranzit prin baza tranzistorului, care la rândul ei a însemnat un tranzistor cu baza mai subțire, iar pe de altă parte, a impus reducerea valorilor capacităților parazite, cerință echivalentă cu reducerea globală a dimensiunilor structurii de tranzistor. Reducerea dimensiunilor tranzistorului a implicat necesitatea scăderii proporționale a lățimii regiunilor de sarcină spațială, prin: utilizarea tensiunilor de polarizare inversă mai mici și creșterea concentrațiilor de impurități din straturile structurii.

În acest scop, față de fluxul tehnologic bipolar de bază, a fost dezvoltat unul nou, având caracteristicile: strat epitaxial mai subțire și mai puternic dopat, izolare cu oxid (nu cu

joncțiuni polarizate invers), strat de siliciu *policristalin* folosit ca *sursă* pentru doparea emitorului. În continuare se descriu principalele etape ale noului flux tehnologic.

Difuzia de strat îngropat include procesele tehnologice de oxidare, fotogravură, implantare. Rezultă un strat puternic dopat (tip n^+).

Creșterea epitaxială include procese tehnologice de dezoxidare completă și creștere epitaxială. Caracteristicile stratului sunt: strat de tip n , grosime $x = 1 \mu\text{m}$ (strat subțire), rezistivitate $\rho \approx 0,5 \Omega\text{cm}$.

Regiunile de izolare cu oxid gros se realizează cu tehnologia de *oxidare localizată* (LOCOS - LOCAL Oxidation of Silicon). Zonele cu oxid *subțire* reprezintă regiunea activă a dispozitivului; zonele cu oxid gros reprezintă regiunile de izolare, prin care se realizează izolarea electrică a dispozitivelor din circuitul integrat. Etapele acestui proces sunt următoarele: oxidare pe toată suprafața plachetei (oxid subțire), depunere *nitrură de siliciu* (Si_3N_4), fotogravură, îndepărtare nitrură din zonele în care se va forma oxidul gros, corodare selectivă a siliciului (în regiunile în care va crește oxidul gros), oxidare ($t = 2 \div 4 \text{ h}$, $T = 1000^\circ\text{C}$), rezultând oxid gros în zonele fără nitrură (grosime $x = 1 \mu\text{m}$; *oxidul de izolare*), îndepărtare nitrură.

Formarea regiunilor colectorului și bazei include următoarele procese tehnologice:

- pentru regiunea *colectorului*: fotogravură (definirea zonei colectorului), implantare n^+ (impurități de tip n , concentrație mare), redistribuție (rezultă o cale de rezistență mică către colectorul tranzistorului);

- pentru regiunea *bazei*: oxidare, fotogravură (definirea zonei bazei), implantare p (impurități de tip p).

Depunerea sursei pentru doparea emitorului include următoarele procese tehnologice: depunere strat de *polisiliciu* (siliciu policristalin) (dopat n^+ , impuritate arsen (As)), fotogravură, corodare selectivă pentru definirea regiunii *emitorului* (arsenul difuzează din stratul de polisiliciu rămas deasupra regiunii emitorului, în timpul proceselor termice ulterioare, formând regiunea subțire și puternic dopată a emitorului).

Implantarea bazei include procesul tehnologic de implantare p^+ (impurități de tip p (bor), concentrație mare), crescând în acest fel concentrația de dopare a bazei. Polisiliciul rămas reprezintă o mască pentru atomii de bor, regiunea emitorului nefiind contaminată.

Structura finală, după metalizare, este reprezentată în figura 7.4.

7.3. Modificări ale fluxului bipolar de bază. Procese compatibile pentru dispozitive active cu performanțe ridicate

Fluxul de fabricație a circuitelor integrate bipolare de tensiune mare se poate modifica, rezultând dispozitive speciale [12]. Astfel, în multe aplicații sunt necesare alte tipuri de dispozitive semiconductoare active, diferite de tranzistoarele bipolare de tip pnp sau npn,

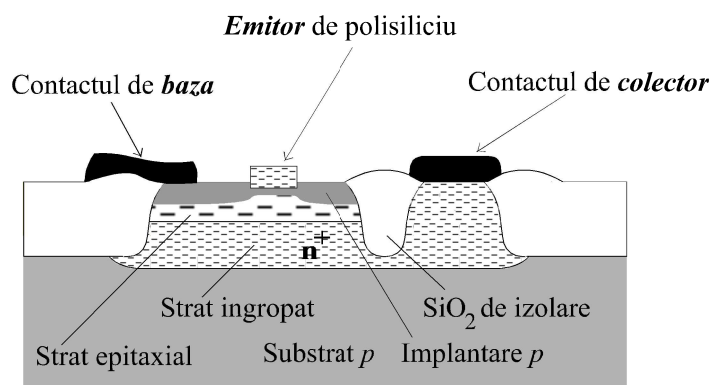


Figura 7.4. Secțiune transversală a structurii finale de tranzistor bipolar de circuit integrat
(Sursa: prelucrat după Gray și Meyer [12])

rezultate din fluxul de bază descris la începutul capitolului. În general, realizarea acestor dispozitive se face cu adăugarea unor etape de fotogravură la fluxul de fabricație de bază.

Tranzistorul cu efect de câmp cu grilă-joncțiune (TECJ) se poate fabrica pe același cip cu tranzistorul bipolar (TB). Astfel, un TECJ cu canal îngust, dublu difuzat, se poate fabrica pe același cip, prin adăugarea unei difuzii suplimentare la fluxul tehnologic de bază. Etapele principale ale fluxului tehnologic sunt: difuzia bazei, care reprezintă și canalul de tip p al TECJ, difuzia grilei superioare a TECJ, difuzia emitorului și contactelor pentru colectorul TB și grila inferioară a TECJ. Canalul TECJ rezultă mai îngust decât baza TB, datorită redistribuirii impurităților din regiunea grilei superioare, în timpul difuziei pentru obținerea emitorului TB. Structura finală este ilustrată în figura 7.5.

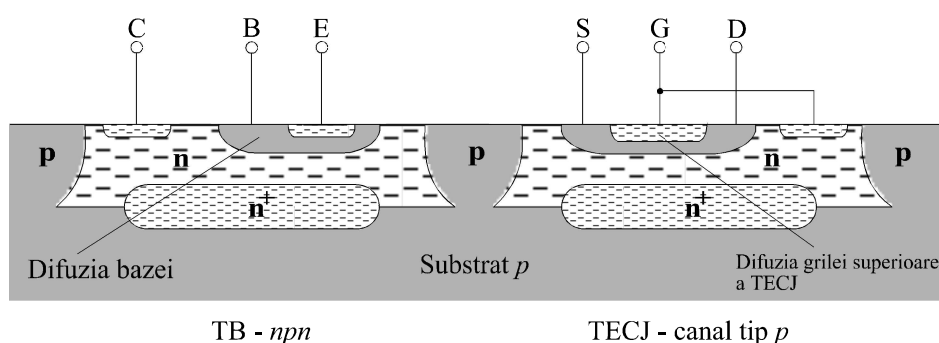


Figura 7.5. Structură de TECJ dublu difuzat realizată pe același cip cu structura de TB
(Sursa: prelucrat după Gray și Meyer [12])

Tranzistoarele MOS se pot realiza folosind, de asemenea, fluxul standard de fabricație al circuitelor analogice de tensiune mare, adăugând o etapă suplimentară de fotogravură. Conform reprezentării din figura 7.6, sursa și drenă tranzistorului pMOS sunt realizate în stratul epitaxial de tip n, folosind procesul de obținere a bazei tranzistorului bipolar (difuzia bazei) [12].

7.4. Fabricația circuitelor integrate MOS

În comparație cu tehnologiile de realizare a circuitelor integrate cu tranzistoare bipolare, cele de realizare a circuitelor integrate MOS (cu tranzistoare cu efect de câmp cu structură MOS), sunt mai complexe și oferă performanțe mai bune. Tehnologiile integrate MOS se împart în două categorii: tehnologiile NMOS și CMOS. Cu ajutorul tehnologiilor NMOS se realizează două tipuri fundamentale de tranzistoare cu efect de câmp cu structură MOS și anume: cu canal *indus* de tip *n* și canal *inițial* de tip *n*. Tehnologiile NMOS/PMOS au fost dezvoltate începând cu anul 1960, primul tranzistor MOS (TECMOS) fiind realizat chiar în acest an.

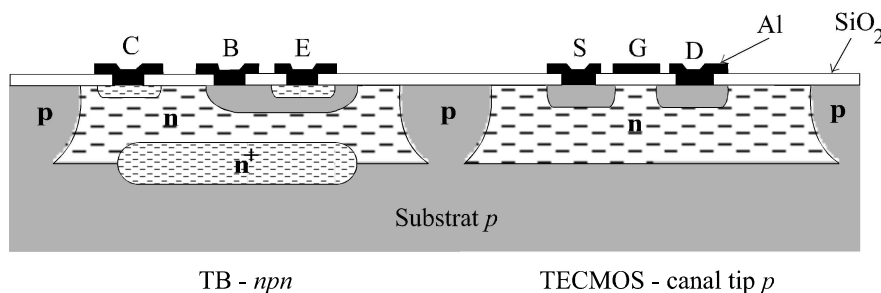


Figura 7.6. Tranzistor pMOS realizat simultan cu tranzistorul bipolar
(Sursa: prelucrat după Gray și Meyer [12])

Tehnologiile CMOS oferă posibilitatea realizării simultane, pe același *cip*, a ambelor tipuri de tranzistoare MOS cu canal indus de tip *n* (tranzistor *nMOS*) și tip *p* (tranzistor *pMOS*). Tehnologia CMOS a fost dezvoltată începând cu sfârșitul anilor '70. De la jumătatea anilor '70 a început să fie dezvoltată tehnologia *BiCMOS*, un proces complex care combină pe același *cip* structuri de tranzistoare bipolare și CMOS. În cadrul acestei tehnologii, izolarea dispozitivelor bipolare se realizează cu aceeași tehnică de oxidare localizată (oxidarea de câmp) folosită la tehnologia CMOS. Tranzistoarele bipolare sunt realizate prin tehnica implantării iar joncțiunile structurilor CMOS sunt superficiale. Prin adăugarea câtorva etape suplimentare de flux tehnologic, cele două tehnologii de fabricație, bipolar și CMOS, devin asemănătoare [12].

În continuare, se prezintă fluxul tehnologic pentru fabricarea structurii integrate CMOS cu *vană de tip n*. Substratul inițial, pe care se realizează întreaga structură, este placheta de siliciu, de tip p^+ . Pe acest substrat este crescut un strat epitaxial de tip *p*, având concentrația de impurități $C_B = 10^{14} \div 10^{15} \text{ at/cm}^3$. Stratul epitaxial reprezintă stratul semiconductor în care se realizează structura integrată. Principalele etape ale fluxului tehnologic sunt prezentate în continuare.

Realizarea zonei izolate (vană), în care se va forma tranzistorul complementar, *pMOS*, include operații tehnologice de fotogravură, implantare *n* (impurități de tip *n*, fosfor), difuzie. Concentrația la suprafață, după operația de difuzie, este $C_S = 10^{15} \div 10^{16} \text{ at/cm}^3$.

Definirea ariilor active și a zonelor de câmp (zonele care separă ariile dispozitivelor active), reprezintă etapa de definire a locației fiecărui tranzistor. Etapele acestei secvențe de flux sunt: depunere nitrură de siliciu (Si_3N_4), fotogravură (nitrura rămâne numai pe ariile active), implantare suplimentară a zonelor de câmp, prin care se crește concentrația la suprafață în aceste zone, care au comportamentul unor tranzistoare MOS parazite, cu oxidul de poartă gros. Creșterea concentrației la suprafață, în zonele de câmp, determină creșterea valorii tensiunii de prag a tranzistoarelor parazite [12].

Creșterea oxidului gros (oxidul de câmp) în zonele de câmp (fără nitrură), necesar izolării electrice a tranzistorilor între ei, se realizează prin metoda oxidării localizate.

Creșterea oxidului porții necesar realizării structurii MOS, structură care stă la baza funcționării tranzistorului cu efect de câmp cu structură MOS. Structura MOS reprezintă zona centrală a structurii de tranzistor MOS, aflată între sursă și drenă. Etapele acestei secvențe de flux sunt: îndepărtare nitrură de pe ariile active, implantare pentru creșterea concentrației substratului în care se vor forma canalele induse ale tranzistoarelor MOS, depunere strat de polisiliciu, fotogravură (definirea porților tranzistoarelor).

Formarea tranzistorului pMOS include următoarele procese tehnologice: fotogravură și implantare bor, rezultând regiunile de tip p^+ (puternic dopate) ale sursei și drenei.

Formarea tranzistorului nMOS se realizează similar cu tranzistorul *pMOS*, folosind pentru procesul de implantare, impurități donoare (*arsen* sau *fosfor*). Rezultă regiunile de tip n^+ (puternic dopate) ale sursei și drenei. La finalul acestei etape se aplică un tratament termic de refacere a rețelei cristaline.

Primul strat de metal (*Metal1*) este necesar pentru realizarea contactelor surselor și drenelor celor doi tranzistori MOS. Ulterior, sursele și drenenele vor fi interconectate în funcție de schema circuitului respectiv. Structura este acoperită cu un strat de oxid, obținut prin metoda CVD. Procesul nefiind termic, nu se consumă un strat de siliciu (ca în cazul oxidării termice) și nici nu are loc redistribuirea impurităților.

Deschiderea ferestrelor de contact include procese tehnologice de oxidare și fotogravură. Secțiunea prin structura CMOS după depunerea contactelor metalice ale surselor și drenelor este ilustrată în figura 7.7.

Al doilea strat de metal (**Metal2**) este necesar pentru realizarea interconectării surselor și drenelor între ele. Un exemplu este prezentat în figura 7.8, unde este realizată metalizarea pentru conectarea între ele a surselor celor doi tranzistori. Această etapă este precedată de o altă oxidare CVD.

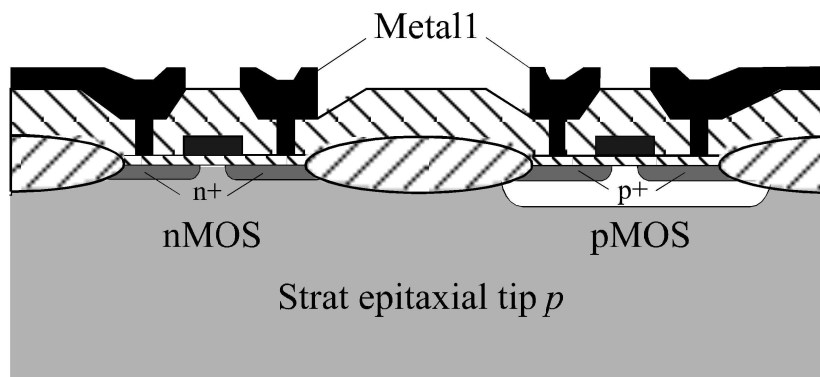


Figura 7.7. Secțiunea prin structura CMOS după depunerea contactelor metalice ale surselor și drenelor (Sursa: prelucrat după Uyemura [24])

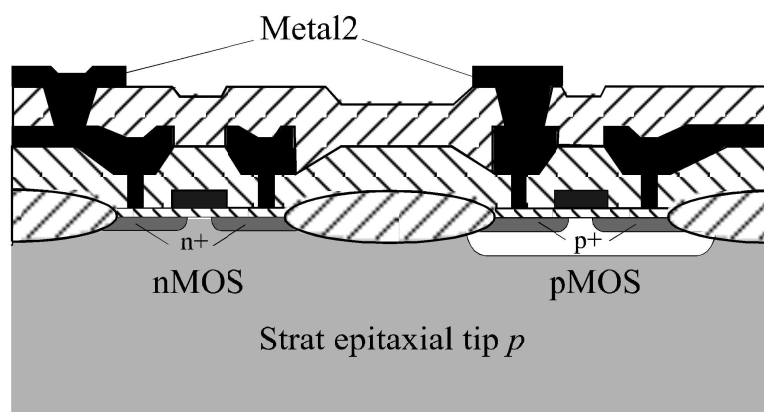


Figura 7.8. Interconectarea surselor celor doi tranzistori MOS (Sursa: prelucrat după Uyemura [24])

BIBLIOGRAFIE

1. Gamow, G., **Treizeci de ani care au zguduit Fizica. Istoria teoriei cuantice**, Editura Științifică, București, 1969.
2. Brown, Cl., **Tranzistoare. Întrebări și răspunsuri**, Editura Tehnică, București, 1976.
3. Budiu, M., **Nanotehnologia: o soluție pentru calculatoarele viitorului**, <http://www-2.cs.cmu.edu/~mihaib/articles/nano/nano-html.html>
4. Kittel, Ch., **Introducere în Fizica Corpului Solid**, Editura Tehnică, București, 1975.
5. Bunget, I., (coordonator), **Compendiu de Fizică pentru admiterea în învățământul superior**, Editura Științifică, București, 1971.
6. Ciobanu, Gh., Constantinescu, C., **Fizica Stării Solide**, Editura Tehnică, București, 1982.
7. Kireev, P. S., **Fizica semiconductorilor**, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1977.
8. Grove, A. S., **Fizica și tehnologia dispozitivelor semiconductoare**, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1977.
9. Lakatoș, E. Șt., **Dispozitive semiconductoare fundamentale**, Editura AGIR, București, 2008.
10. Sze, S. M., **Physics of Semiconductor Devices**, Publishing John Wiley & Sons, Inc., 1981.
11. Dolocan, V., **Fizica dispozitivelor cu corp solid**, Editura Academiei Române, București, 1978.
12. Gray, P. R., Meyer, R. G., **Circuite integrate analogice. Analiză și proiectare**, Editura Tehnică, București, 1997.
13. Bârsan, R. M., **Fizica și tehnologia circuitelor MOS integrate pe scară mare**, Editura Academiei Române, București, 1989.
14. Lindhardt, J., Sharff, M., Schiott, H., **Mat.-Fys. Med. Dan. Vidensk. Selsk. 33**, p.1, 1963.
15. Wolf, S., **Silicon Processing for the VLSI Era, vol. 2 - Process Integration**, Lattice Press, 1990.
16. Carslaw, H. S., Jaeger, J. C., **Conduction of Heat in Solids**, Oxford University Press, ediția a II-a, 1959.
17. Wolf, S., **Silicon Processing for the VLSI Era, vol. 3 - Process Integration**, Lattice Press, 1990.
18. Frank, W., Gosele, U., Mehrer, H., Seeger, A., **Diffusion in Crystalline Solids**, Academic Press, Orlando, 1984.
19. Frank, W., **Diffusion in Crystalline Silicon and Germanium – the State-of-the-Art in Brief**, Kluwer Academic Publishers, 1992.
20. Moroșanu, C. E., **Depunerea chimică din vapori a straturilor subțiri**, Editura Tehnică, București, 1981.
21. Lakatoș, E. Șt., **Teză de doctorat**, Universitatea din București, 1995.
22. Felch, S. B., Brennan, R., Corcoran, S. F., Webster, G., **Solid State Technology. 1**, p.45, 1993.
23. Drăgănescu, M., **Electronica corpului solid**, Editura Tehnică, București, 1972.
24. Uyemura, J. P., **Physical Design of CMOS Integrated Circuits using L-EDIT™**, PWS Publishing Company, 1995.
25. Lakatoș, E. Șt., **Rolul fizicii în dezvoltarea microelectronicii**, Editura ELECTRA, București, 2014.



Eugen Ștefan Lakatoș, s-a născut la 31 august 1954 la Arad, județul Arad. A absolvit liceul Ion Luca Caragiale din București în anul 1973 și Facultatea de Fizică, Universitatea din București, secția Fizica Corpului Solid, în 1979, an în care s-a angajat la I.P.R.S.-Băneasa, secția de diode și tiristoare (S2300). A deținut funcția de *șef atelier difuzie diode* (incluzând ca principale operații: oxidare, dopare controlată prin difuzie, tratamente termice, depunere chimică de nichel și aur, decupare chimică mesa) până la plecarea din I.P.R.S., în anul 1999. În anul 1996 i se conferă titlul de doctor în fizică pe baza tezei intitulate *Influența profilelor concentraționale de difuzie asupra efectului fotoelectromagnetic în structuri pin*. În continuare, pentru următorii 20 de ani, activează ca profesor universitar la Universitatea "VALAHIA" din Targoviște, Facultatea de Inginerie Electrică, Electronică și Tehnologia Informației, departamentul de electronică, telecomunicații și inginerie

energetică. A fost colaborator al departamentului de dispozitive, aparate și circuite electronice, din cadrul Facultății de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației, Universitatea "POLITEHNICA" din București. Activitatea de cercetare și didactică este concretizată prin brevete de inovație și invenție, 15 cărți și peste 80 de articole și lucrări științifice, publicate în reviste de specialitate sau prezentate la conferințe naționale și internaționale.

Notă

Articolul a fost publicat în revista E.E.A.-Electrotehnică, Electronică, Automatică nr. 4/2013, 1 – 4/2014, 1/2015.

Postfață

Când am decis să scriu acest articol, am vrut să furnizez informații, în special studenților de la electronică (microelectronică), dar nu numai, pentru a fi mai bine înțeleasă implicarea fizicii în domeniul microelectronicii.

Ca absolvent al specializării *fizica corpului solid* am putut să înțeleg foarte bine definiția *microelectronicii*: domeniu aflat la granița dintre fizică și electronică (sau invers). Oricum vrem să considerăm ordinea, am avut ocazia să enunț definiția de mai multe ori, în timpul celor 20 de ani petrecuți în învățământul superior, într-o catedră de electronică, când eram apelat cu titulatura de *inginer* iar eu replicam că pe diploma mea scrie *fizician* (probabil că apărea întrebarea: ce caută un fizician într-o catedră de electronică?). Și de ce nu, eram mândru că inventatorii tranzistorului bipolar au fost fizicieni (fizicieni au fost și *Hoerni*, inventatorul procesului planar, *Noyce*, inventatorul circuitului integrat monolitic). Și mai povesteam ceva cu acele ocazii: colectivul din care am făcut parte la I.P.R.S.-Băneasa era alcătuit din electorniști, fizicieni, chimiști (sunt mulți chimiști care și-au adus aportul la dezvoltarea tehnologiei planare), și nici nu se putea altfel. Ce făceam noi acolo avea nevoie de cunoștințe din toate aceste trei domenii. Și exact asta am încercat să evoc în articolul meu.

În timp ce articolul era publicat în revista E.E.A. (a apărut în 6 părți), redactora revistei, d-na Elena Popa, care se ocupa și de cărțile editate de editura Electra (aparține tot de ICPE-CA), mi-a propus să dezvolt articolul în vederea publicării unei cărți cu același titlu. Din păcate, tirajul a fost de 50 ex., o parte vânzându-se prin librăria AGIR. Datorită acestui tiraj mic, am căutat să distribui articolul cât mai multor persoane interesate de modul în care s-a dezvoltat microelectronica. Și a mai fost un motiv care m-a convins să scriu cartea: în ianuarie 2014 s-au implinit 50 de ani de când a devenit clar că microelectronica s-a instalat ca o ramură de vârf a electronicii, care urma să aibă o dezvoltare foarte rapidă, cu schimbări neașteptate, de-a lungul anilor. Am vrut să marchez acest lucru. Nu știu în ce măsură am reușit.

Articolul este un rezumat al materialul cărții cu același titlu. Cartea sintetizează experiența autorului, ca rezultat al activității desfășurată timp de 20 de ani la fosta Întreprindere de Piese Radio și Semiconductori (I.P.R.S.-Băneasa), ulterior S.C. Băneasa S.A., din București, precum și a activității didactice în învățământul superior, timp de 20 de ani, în domeniile proiectării și tehnologiei dispozitivelor semiconductoare, precum și a modelării dispozitivelor semiconductoare active.