

2.1. Materialele semiconductoare și joncțiunea p-n

2.1.1. Structura materialelor semiconductoare

Materialele semiconductoare au conductivitatea electrică intermediară între materialele izolante și materialele bune conductoare. Sunt utilizate pentru construcția dispozitivelor semiconductoare iar cel mai folosit este siliciul. Un atom de siliciu are 4 electroni pe ultimul înveliș și siliciul în stare pură (numit și material *intrinsec*), din

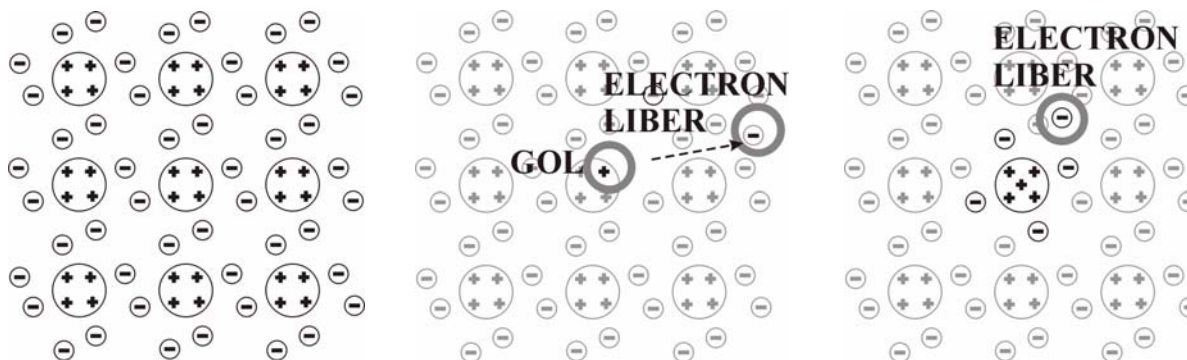
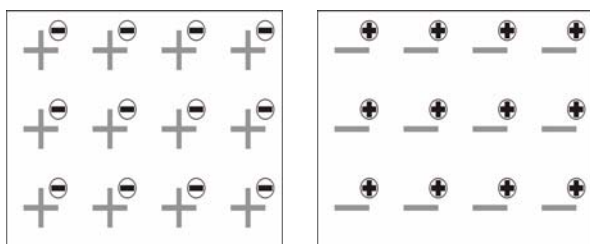


Fig. 2.1. Structura siliciu pur. Fig. 2.2. Generarea perechi electron liber-gol. Fig. 2.3. Material *n*.

motive de stabilitate chimică (2 sau 8 atomi pe ultimul înveliș), este structurat în așa fel încât un atom este legat de încă 4 atomi vecini, cu fiecare cumulând câte doi electroni, unul propriu, altul vecin, ajungând la un total de 8 (figura 2.1, reprezentând doar nucleul și ultimul înveliș). Întreaga structură este neutră electric, motiv pentru care s-a figurat și sarcina pozitivă corespundătoare din nucleu.

Siliciul este astfel stabil și între particule sunt legături puternice. Cu toate acestea, o dată cu creșterea temperaturii sau în urma iradierii, unii electroni se desprind din legături, devenind *electroni liberi*. Concomitent, (figura 2.2.) zona părăsită rămâne încărcată pozitiv, se poate deplasa (din aproape în aproape) și se numește *gol*. Electronii liberi și golurile (generate în perechi) pot da naștere curenților electrici. Similar cu procesul de *generare*, există și un proces invers, numit *recombinare*. Numărul purtătorilor rămâne însă mic, materialul intrinsec fiind mai apropiat de materialele izolante.



a) Material tip *n*.

b) Material tip *p*.

Fig. 2.4. Reprezentarea simplificată a materialelor semiconductoare.

2.1.2. Materiale semiconductoare p și n

Numărul purtătorilor liberi poate fi mărit în mod artificial printr-un proces de impurificare realizat în două variante. În prima variantă se introduc în structura siliciului un număr de atomi ai unui element din grupa a 5-a (arseniu, stibiu), cu 5 electroni pe ultimul înveliș. Acest atom se fixează în structura siliciului, la fel ca atomul de siliciu, cu

4 dintre electronii de pe ultimul înveliș, cel de-al 5-lea devenind electron liber (fig. 2.3.). Zona părăsită de acesta rămâne încărcată pozitiv dar nu mai este mobilă. Prin impurificarea de acest tip se obține materialul semiconductor tip *n*, care se poate reprezenta electric (fig. 2.4.a) printr-o structura de sarcini pozitive fixe, dublată de un număr egal de electroni liberi. Aceștia sunt numiți și *purători majoritari* deoarece concomitent există și un număr, mult mai mic, de goluri rezultate din procesul de generare termică, numiți *purători minoritari* (care nu sunt reprezentați aici). Analog, prin impurificare cu atomi ai unui element din grupa a 3-a (aluminiu, indiu), se obține materialul semiconductor tip *p*, care se poate reprezenta electric (fig. 2.4.b) printr-o structura de sarcini negative fixe, dublată de un număr egal de goluri. Materialele semiconductoare tip *n* și *p* se numesc și materiale *extrinseci*.

2.1.3. Curenți în materiale semiconductoare

Existența purătorilor liberi, majoritari și minoritari, permite, în anumite condiții, deplasarea acestora, adică apariția curenților electrici. După mecanismul generator există curenți de câmp și curenți de difuzie.

Curentul de câmp apare când materialul este supus unui câmp electric \vec{E} și are densitatea $\sigma\vec{E}$. Curentul de difuzie apare atunci când densitatea purătorilor este neomogenă și are loc fenomenul de difuzie, adică deplasarea purătorilor din zonele cu densitate mai mare spre zonele cu densitate mai mică până când distribuția purătorilor devine omogenă. În figura 2.5. este ilustrat fenomenul de difuzie prezentând o secțiune a unui material semiconductor în două momente de timp. Inițial există o distribuție neomogenă a purătorilor, apare un curent de difuzie iar în final distribuția este omogenă și curentul devine zero. Dacă există un mecanism de generare continuă a purătorilor într-o zonă anumită, cum e de exemplu generarea prin iluminare, se poate asigura un curent permanent, așa cum este cazul fotocelulelor.

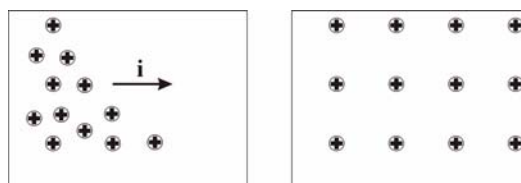


Fig. 2.5. Fenomenul de difuzie.

2.1.4. Joncțiunea p-n

Tehnologii speciale permit alăturarea intimă a celor două tipuri de materiale semiconductoare *p* și *n*, despărțite de o zonă îngustă de trecere și formând o structură denumită *joncțiunea p-n* (fig. 2.6.). Joncțiunea p-n are proprietăți speciale și stă la baza majorității dispozitivelor semiconductoare și implică a electronicii moderne.

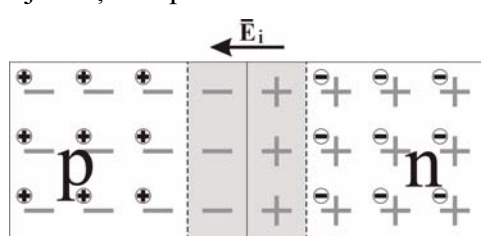


Fig. 2.6. Joncțiunea p-n.

În momentul inițial distribuția de purători liberi este accentuat neuniformă, cu multe goluri în zona *p* și mulți electroni liberi în zona *n*. Tendința naturală a purătorilor liberi, fie ei electroni liberi sau goluri, corespunzătoare fenomenului de difuzie, este să se deplaseze din zonele unde sunt în exces spre zonele sărace. Golurile se vor deplasa din zona *p* spre zona *n* iar electronii liberi în sens

contrar. De fapt începe un proces de recombinare și perechi de purtători dispar începând de la suprafața de separație. Se creează o zonă fără purtători liberi, marcată pe figură și denumită *zonă de sarcină spațială*, fiind formată din două straturi încărcate cu sarcină de semn contrar. Se creează concomitent un câmp electric intern cu sensul din figură, câmp ce se opune difuziei și recombinării în continuare și se ajunge la o stare de echilibru.

2.1.5. Joncțiunea p-n cu tensiune exterioară (polarizată)

O tensiune continuă poate fi aplicată joncțiunii p-n prin intermediul a doi electrozi conectați la capete. Acțiunea este denumită curent *polarizare* și există două situații distincte, *polarizare inversă* (fig. 2.7.) când plusul este la zona p și *polarizare directă*, cu plusul la zona n.

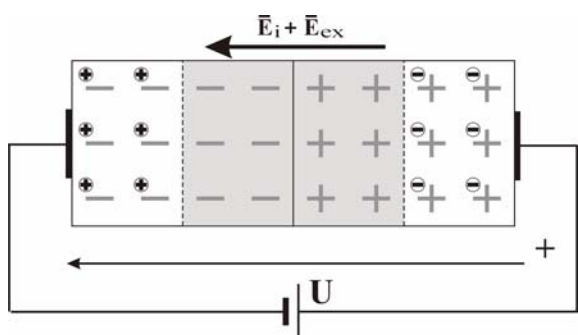


Fig. 2.7. Joncțiunea p-n polarizată

Când joncțiunea este polarizată invers, sursa de tensiune creează în joncțiune un câmp electric extern care are același sens cu cel intern. Câmpul total este suma lor și duce la lărgirea zonei de sarcină spațială, zonă fără purtători liberi, cu rezistivitate mare. Nu există circulație de purtători majoritari și curentul este practic zero. În realitate există o circulație de purtători minoritari și în consecință un curent, foarte mic, denumit și curent invers.

Atunci când este polarizată direct, sursa de tensiune creează în joncțiune un câmp electric extern care are sens contrar celui intern, favorizând deplasarea purtătorilor majoritari și conduce la apariția unui curent direct important.

2.2. Diode semiconductoare

2.2.1. Structura și simbol

Diodele semiconductoare sunt joncțiuni p-n cu două terminale (borne, pini) conectate la cele două zone. Terminalul conectat la zona p se numește anod (A) iar cel conectat la zona n se numește catod (K).

Proprietatea principală a unei diode este aceea că permite circulația curentului într-un singur sens, fiind un dispozitiv unidirecțional. Structura și simbolul diodei sunt prezentate în figura 2.8. Sensul săgeții este și sensul posibil al curentului prin diodă.

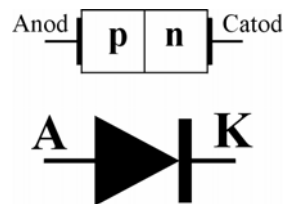


Fig. 2.8. Structura și simbolul diodei semiconductoare

2.2.2 Dependența curent-tensiune

Curentul prin diodă depinde de tensiunea la borne după relația exponențială:

$$i = I_s(e^{ku} - 1) \quad (2.1)$$

I_S (curentul de saturatie al diodei) si k sunt doua mărimi care depind, printre altele, de temperatura. Constanta e este baza logaritmilor naturali.

Prin reprezentarea grafica a relatiei 2.1 se obtine caracteristica grafica curent-tensiune a diodei. Aceasta, desenata pentru scari diferite ale curentului si tensiunii, poate fi urmarita in figura 2.9.

In cazul polarizarii directe a diodei (tensiune pozitiva anod-catod, $u > 0$, dioda deschisa sau in conductie) curentul creste exponential cu tensiunea. El devine insa semnificativ doar daca tensiunea depaseste un prag U_D numit tensiune de deschidere a diodei, situat in jurul valorii de 0,7 volti pentru diodele pe siliciu. In continuare curentul creste foarte mult iar tensiunea foarte putin. Intr-o prima aproximare se considera ca tensiunea unei diode polarizate direct este constanta, egala cu 0,7 V. In numeroase situatii si aceasta valoare de 0,7 V este neglijabila (cum se poate deduce urmarind a treia varianta din figura 2.9), tensiunea pe o dioda deschisa fiind considerata zero.

In cazul polarizarii inverse a diodei (tensiune negativa anod-catod, $u < 0$, dioda blocata) curentul invers este foarte mic si tinde spre valoarea I_S numită curent de saturatie al diodei. Acest curent invers este in majoritatea cazurilor neglijat, considerat

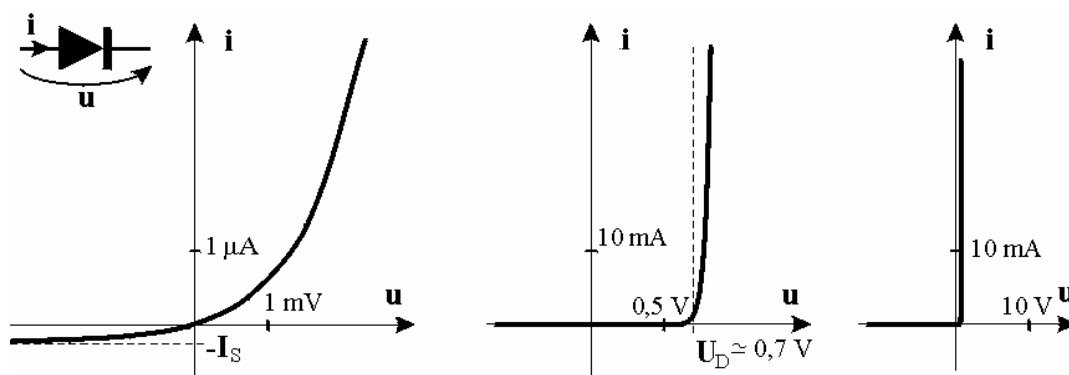


Fig. 2.9. Caracteristica grafica a diodei pentru diferite scari ale curentului si tensiunii.

zero.

2.2.3. Valori limita principale

Diodele sunt fabricate in numeroase variante, fiecare varianta fiind caracterizata printr-un numar de parametri specifici si printr-un cod dat de fabricant (un exemplu: 1N4007). Cei mai importanti parametrii sunt valorile limita sau valorile maxime. Exista un curent direct maxim prin dioda, I_M , a carui depasire provoaca supraincalzirea si distrugerea diodei. Exista deasemenea o tensiune inversa maxima, U_M , a carei depasire provoaca o strapungere a diodei, urmata de cresterea abrupta a curentului invers, supraincalzirea si deasemenea distrugerea diodei. Aceste valori, cat si multe altele, sunt precizate de fabricanti in cataloagele de produse.

2.2.4. Influenta temperaturii

Temperatura influenteaza mult functionarea diodelor, ca de altfel a tuturor dispozitivelor semiconductoare. Temperatura de 200 grade Celsius este o valoare limita maxima pentru dispozitivele semiconductoare pe siliciu.

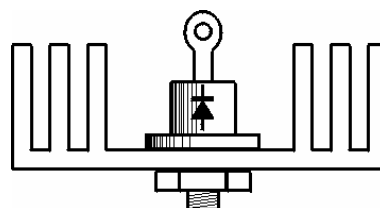


Fig. 2.10. Dioda montata pe radiator

Temperatura diodelor se modifica atat ca urmare a variatiei temperaturii mediului cat si ca urmare a pierderilor prin efect Joule. Acestea din urma cresc odata cu cresterea valorii curentului sau a frecventei de functionare.

Cand puterile de pierderi sunt mari diodele sunt mentinute sub limita temperaturii maxim admisibile prin montarea lor pe radiatoare cu suprafata radianta mare care permite disiparea in mediul exterior a caldurii rezultate prin efect Joule (figura 2.10). In numeroase situatii se utilizeaza suplimentar racirea fortata a radiatoarelor, fie cu ventilatoare, fie cu circuit de racire cu lichid.

Cresterea temperaturii are un dublu efect asupra diodelor, care este prezentat in figura 2.11. In primul rand se mareste curentul invers. Acesta se dubleaza la fiecare crestere de aproximativ 10 grade a temperaturii. Al doilea efect este micsorarea tensiunii pe dioda in conductie. Micsorarea este de aproximativ 0,002 V/grad C si este uneori utilizata pentru masurarea temperaturii, dioda fiind folosita drept senzor de temperatura.

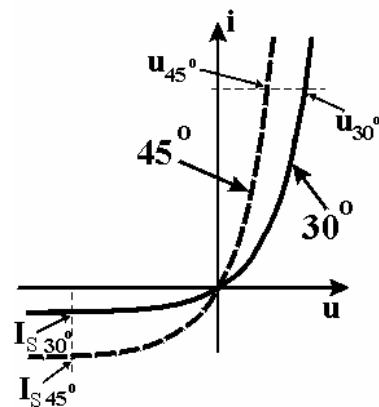


Fig. 2.11. Influenta temperaturii asupra diodelor

2.2.5. Modele pentru diode

Dioda este un element neliniar de circuit. Pentru calculul circuitelor cu diode se poate utiliza relatia analitica (2.1) sau se poate utiliza metoda grafica, folosind caracteristica grafica curent-tensiune a diodei. Metodele de mai sus sunt rar utilizate, fiind complicate sau chiar inoperante in cazul circuitelor cu mai multe elemente. Din acest motiv cea mai utilizata metoda este liniarizarea diodei, adica inlocuirea acesteia cu o schema echivalenta formata cu elemente liniare. In functie de precizia dorita a calculului, dioda poate fi echivalata cu o schema mai simpla sau mai complicata. Dupa inlocuirea diodei cu schema echivalenta, calculul urmeaza cursul obisnuit pentru circuitele liniare.

Sunt utilizate trei nivele de aproximare liniara a diodelor. In figura 2.12 sunt prezentate atat modelele cat si caracteristica grafica a acestora.

Cel mai simplu si mai folosit model este un comutator, K (2.12.a). Acesta este deschis (rezistenta infinita), cand tensiunea anod-catod este mai mica sau egala cu zero ($u_{AC} \leq 0$) si este inchis (rezistenta zero), cand tensiunea anod-catod este mai mare

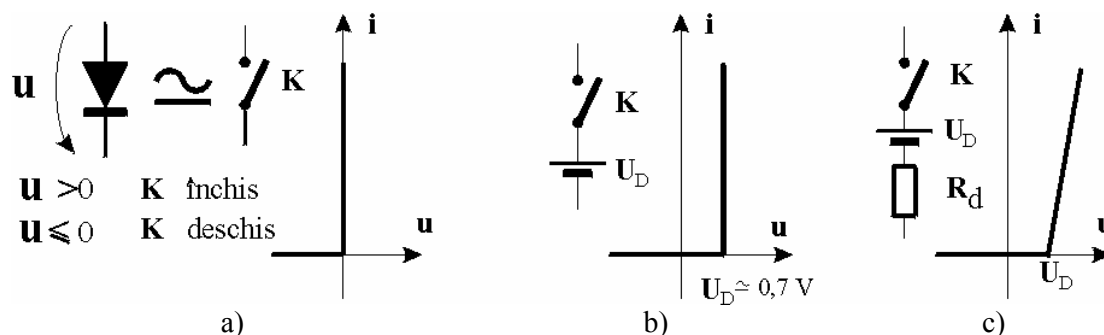


Fig. 2.12. Modele liniare pentru diode

decat zero ($u_{AC} > 0$).

Un al doilea model tine cont de tensiunea de deschidere $U_D \cong 0,7V$ (2.12.b).

In sfarsit, modelul cel mai precis (2.12.c) tine cont si de rezistenta diodei in zona de conductie, R_d , iar panta caracteristicii grafice este mai mica de 90 grade.

Modelele prezentate pana acum sunt utilizate atunci cand diodele sunt in regim de curent continuu sau in regim de curent alternativ de frecventa mica, de exemplu la 50 Hz, frecventa retelei. Cand diodele sunt utilizate in regim de curent alternativ cu amplitudine mica si frecventa mai mare, se foloseste un model al diodei, denumit model dinamic de semnal mic, care tine cont de capacitatea electrica a jonctiunii $p-n$, dioda fiind echivalata cu rezistenta dinamica (diferita pentru zona de conductie sau de blocare) in paralel cu capacitatea totala a jonctiunii (figura 2.13).

2.2.7. Tipuri de diode

Exista variante diverse de diode care se deosebesc prin particularitati functionale si destinatie. Principalele categorii sunt prezentate in continuare.

Diode redresoare

Sunt diode destinate utilizarii in circuite redresoare pentru retea de c.a. de 50 herti. Parametrii principali sunt curentul maxim, I_M si tensiunea inversa maxima, U_M . Plaja de valori ale acestor parametri este:

- amperi-zeci de mii de amperi, pentru I_M
- zeci volti- zeci de mii de volti pentru U_M .

Diodele de curenti mari sunt construite astfel incat sa le poata fi atasate radiatoare de racire. Diodele de curenti mici sunt inchise in capsule de plastic sau ceramica si au catodul marcat cu o banda alba sau neagra.

Diode de comutatie

Sunt diode destinate utilizarii in circuite functionand in comutatie sau la frecvente ridicate. Parametrii principali sunt timpii de comutatie.

Diode Schottky

Sunt diode realizate intr-o tehnologie speciala, de tip metal-semiconductor si au simbolul prezentat in figura 2.16

Avantajele acestor diode sunt:

- tensiune mica in conductie, aproximativ 0,3 V;
- timp de comutatie foarte mici.

Dezavantajul principal: - tensiune inversa maxima mica (zeci de volti).

Dioda varicap

Denumirea diodei vine de la expresia *capacitate variabila*. Simbolul este prezentat in figura 2.17 Dioda este utilizata in polarizare inversa si proprietatea principala este ca se comporta in aceasta situatie ca un condensator cu capacitate variabila, dependenta de tensiunea la borne. Toate diodele au aceasta proprietate dar diodele varicap sunt construite astfel incat dependenta capacitate-tensiune sa aiba

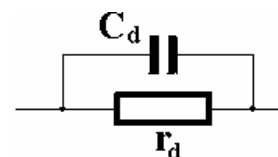


Fig. 2.13. Model de semnal mic



Fig. 2.16. Dioda Schottky



Fig. 2.17. Dioda varicap

un profil optim. Zona de variatie este in intervalul 1...100 picofarazi. Domeniul principal de utilizare sunt radiocomunicatiile, mai precis acordul circuitelor oscilante din emitatoare si receptoare.

Dioda Zener

Este o dioda construita pentru a fi utilizata in zona de strapungere inversa. Simbolurile utilizate pentru dioda Zener si caracteristica grafica sunt prezentate in figura 2.18.

In polarizare directa este similara diodelor redresoare. In polarizare inversa dioda se strapunge la o tensiune numita tensiune Zener, U_Z , constanta pentru o anumita dioda. In zona de strapungere curentul creste pana la o valoare maxim admisibila, i_M dar tensiunea ramane aproape constanta. Rezistenta dinamica r_Z in zona de strapungere este foarte mica, ohmi-zecimi de ohmi. Proprietatea de a mentine constanta tensiunea pe o plaja mare de curenti face ca dioda sa fie utilizata indeosebi in circuitele stabilizatoare de tensiune.

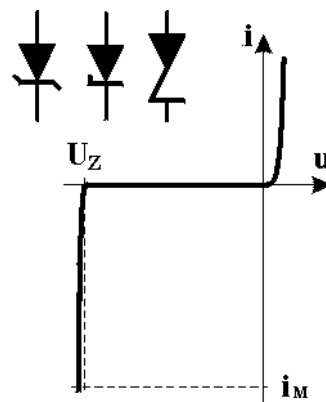


Fig. 2.18. Dioda Zener