

C U R S U L 9

ELECTROKINETICA (5)

2.8. CURENTUL CONTINUU ÎN VID ȘI ÎN GAZE

Vidul și gazele sunt izolanți foarte buni, dar în anumite condiții (temperatură ridicată, câmp electric intens, ionizare etc.) permit trecerea curentului electric.

2.8.1. Emisiunea electronică

Electronii liberi din metale se găsesc într-o continuă mișcare fără a putea părăsi metalul datorită forțelor de atracție a ionilor pozitivi din rețeaua cristalină. Smulgerea electronilor din metal s-ar putea face printr-un lucru mecanic de extracție $L = q_e U$, unde U este diferența de potențial pe care trebuie să o parcurgă electronul de sarcină q_e , pentru ca energia sa cinetică să fie suficientă pentru ieșirea lui din metal. **Fenomenul de părăsire a suprafeței metalului de către electroni se numește emisiune electronică a metalelor.**

Electronii pot căpăta energia necesară pentru smulgerea lor din metal, prin încălzirea metalului, iradierea lui sau introducerea lui într-un câmp electric puternic.

Energia W_0 necesară electronului pentru a învinge forțele de atracție ce-l atrag spre interiorul metalului se numește **energie de ieșire**. Se definește **potențialul de ieșire** astfel:

$$V_0 = \frac{W_0}{q_e} \text{ [V] .} \quad (2.79)$$

În tabelul 1 se indică pentru unele metale, potențialele de ieșire.

Tabelul 1

Metalul	Ta	W	Mo	Pt	Ba	Na	Cu	Cs
Poten- țialul (V)	4,1- 4,12	4,5- 4,63	4,16- 4,27	5,29- 5,32	2,29- 2,52	2,34	4,47- 5,0	1,87- 1,89

Pentru a părăsi suprafața metalului, electronul trebuie să efectueze un lucru mecanic, deci între suprafața metalului și interiorul lui există o diferență de potențial care poartă numele de **barieră de potential**.

2.8.2. Emisiune termoelectronică.

Dacă metalul este încălzit, agitația termică a electronilor liberi crește, crește și energia lor cinetică și ca urmare numărul de electroni emiși crește. Dacă se consideră electronii că ar forma un gaz perfect, electronii pot părăsi metalul numai dacă energia lor cinetică devine mai mare decât lucrul mecanic de extracție:

$$\frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{3}{2} k T \geq q_e U , \quad (2.80)$$

de unde rezultă temperatura absolută necesară:

$$T \geq \frac{2 q_e U}{3k} . \quad (2.81)$$

Numărul electronilor emiși crește mult la temperaturi peste 1.000° C. Electronii emiși de metalul adus la incandescență, vor forma un nor cu sarcină negativă, care va împiedica emisiunea celorlalți electroni. Aplicând o tensiune electrică din exterior, electronii emiși vor fi accelerați și vor forma un curent electric.

S-a stabilit teoretic de către Richardson că variația densității curentului cu temperatura este de forma:

$$J_e = AT^2 e^{\frac{b}{T}}, \quad (2.82)$$

în care:

- J_e este densitatea curentului electric emis de metal la temperatura T;
- A este o constantă care depinde de starea suprafeței metalului;
- b este o constantă care depinde de valoarea energiei de ieșire.

Pe emisiunea termoelectronică se bazează funcționarea tuburilor electronice.

2.8.3. Emisiunea fotoelectronică.

Dacă suprafața unui metal este supusă unui flux de energie radiantă, energia cinetică a electronilor liberi crește și deci emisia electronilor este mai mare. La căderea unui flux luminos asupra unei suprafețe metalice se constată o emisiune de electroni numită **emisiune fotoelectronică**. Smulgerea electronilor din metal este posibilă numai dacă frecvența undelor luminoase depășește o anumită valoare f_0 denumită **prag fotoelectric**. Pragul fotoelectric depinde de substanța corpului iradiat. Metalele alcaline (Na, K, Li etc.) au pragul fotoelectric în zona vizibilă a spectrului. Viteza electronilor emiși depinde de lungimea de undă a luminii și nu de intensitatea luminoasă. Intensitatea luminii are influență asupra debitului de electroni emiși. Dispozitivele în care are loc efectul fotoelectric se numesc **fotoelemente**.

2.8.4. Emisiunea autoelectronică.

Dacă două metale se încarcă cu sarcini electrice, metalul **A** cu sarcină pozitivă iar metalul **B** cu sarcină negativă, între cele două conductoare apare un

câmp electrostatic. Dacă acest câmp este puternic, se constată că electronii liberi din metalul **B** (catod) sunt smulși din metal trecând prin mediul înconjurător îndreptându-se spre metalul **A** (anod). Acest fenomen de smulgere a electronilor liberi din metal sub acțiunea unui câmp electric puternic se numește **emisiune autoelectronică**.

2.8.5. Descărcări electrice în gaze

Gazele în condiții normale sunt dielectrice. În anumite condiții, gazele pot deveni bune conducătoare de curent electric. Conductibilitatea gazelor se poate realiza prin ionizarea lor. Cauzele care pot produce ionizarea gazelor sunt:

- ridicarea temperaturii gazelor;
- iradierea gazului cu ajutorul radiațiilor Roentgen, ultraviolete sau cosmice;
- trecerea prin gaz a unui flux de electroni obținuți prin emisiunea termoelectronică a unui metal incandescent;
- acțiunea unui câmp electric puternic.

În gaze, curentul electric constă într-o deplasare ordonată a ionilor pozitivi în sensul curentului și a ionilor negativi în sens contrar. Când ajung la electrozi, ionii cedează sarcina electrică, devenind molecule neutre. Pentru a menține un curent electric prin gaze este necesar ca ionizarea să fie menținută permanent.

Ionizarea gazului constă în acțiunea de descompunere a moleculelor gazului în ioni pozitivi, ioni negativi și electroni. Ionii negativi și cei pozitivi se pot recombină dând naștere moleculelor neutre. După o perioadă de timp, se stabilește o stare statistic staționară, când numărul perechilor de ioni ce se recombină este egal cu numărul perechilor de ioni ce se formează prin ionizare.

Considerăm un gaz ionizat ce se găsește între doi electrozi la care se aplică o tensiune electrică. Sub acțiunea câmpului electric ionii pozitivi ai gazului sunt

transportați la catod, iar ionii negativi la anod, unde ionii vor ceda surplusul de sarcină electrică transformându-se în molecule neutre.

Dacă tensiunea care se aplică celor doi electrozi este mică, intensitatea curentului electric este de asemenea mică. Dacă sursa de ionizare își încetează acțiunea, curentul se anulează. Avem în acest caz o **descărcare neautonomă** (dependentă de sursa de ionizare).

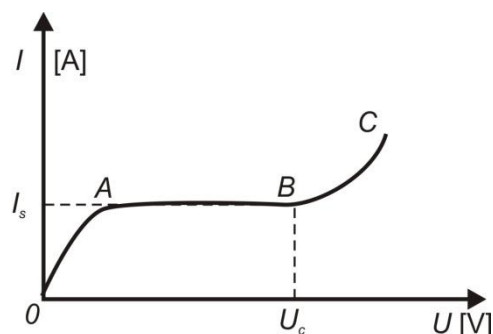


Fig.2.37 - Dependența curentului din gaz de tensiunea aplicată electrozilor.

Mărind tensiunea dintre electrozi (fig.2.37), curentul crește la început aproape proporțional cu tensiunea (porțiunea OA), iar apoi tinde spre o valoare constantă, numită **curent de saturație I_s** când aproape toți ionii produși de agentul ionizator sunt transportați la electrozi și nu se mai recombina (ramura AB din figura 2.37). Dacă se continuă creșterea tensiunii, se ajunge la o valoare critică a tensiunii (U_c), respectiv a intensi-

tății câmpului electric, când intensitatea curentului electric începe din nou să crească rapid (ramura BC din fig.2.37). Creșterea curentului electric se poate explica prin ionizarea gazului prin șoc. Datorită câmpului electric intens, ionii din gaz sunt puternic accelerați și capătă energii cinetice mari. În mișcarea lor spre electrozi, acești ioni lovesc moleculele neutre ale gazului smulgând acestora electroni și formând astfel perechi de ioni. Acești ioni noi formați vor fi și ei accelerați și vor descompune și ei la rândul lor alte molecule neutre. Se produce o ionizare în avalanșă, o creștere puternică a concentrației ionilor, ceea ce duce la o creștere rapidă a curentului electric. În acest stadiu, factorul ionizator extern poate să-și înceteze acțiunea, curentul electric va continua să treacă datorită ionizării în avalanșă. Are loc o **descărcare autonomă (independentă)**.

Chiar în stare neutră, în lipsa agentului de ionizare, gazele conțin un număr mic de ioni. Acești ioni în cantitate mică pot apărea ca urmare a acțiunilor

radiațiilor cosmice. Dacă se aplică un câmp electric intens, acești ioni devin agenți de ionizare și ca urmare este posibilă trecerea curentului electric prin gaz.

Descărcarea autonomă poate să apară sub mai multe forme dintre care amintim:

a) **descărcarea obscură** care constituie faza premergătoare aprinderii descărcărilor autonome și se produce la presiunea atmosferică normală și nu este însoțită de fenomene luminoase. Valoarea intensității curentului electric este de ordinul a 10^{-11} A;

b) **efectul Corona** care constituie faza de trecere de la descărcarea obscură la cea luminescentă. La presiunea atmosferică normală această descărcare are loc în apropierea părților ascuțite ale conductoarelor, unde câmpul electric este mai intens sau în jurul conductoarelor cu diametrul mic, supuse la tensiuni ridicate. Intensitatea curentului electric este de ordinul 10^{-6} A, iar trecerea curentului este însoțită de o lumină slabă, albastruie și de zgomote;

c) **descărcările luminescente** care iau naștere în tuburile cu gaze rarefiate. În figura 2.38 sunt redate schematic principalele zone ale unei descărcări luminescente. Lângă catodul **K** se găsește un spațiu obscur 1 apoi o regiune luminoasă 2, un nou spațiu obscur 3 și apoi o coloană luminoasă (plasmă) 4 ce se întinde până la anodul **A**. Această zonă este în general stratificată. Culoarea coloanei luminoase depinde de natura gazului: roșu pentru neon, albastru pentru argon, verde pentru bioxid de carbon, cărămiziu pentru hidrogen etc.

Descărcările luminescente sunt folosite pentru reclame și semnalizatoare optice. Pentru iluminat se folosesc de asemenea descărcările luminescente din tuburile fluorescente.

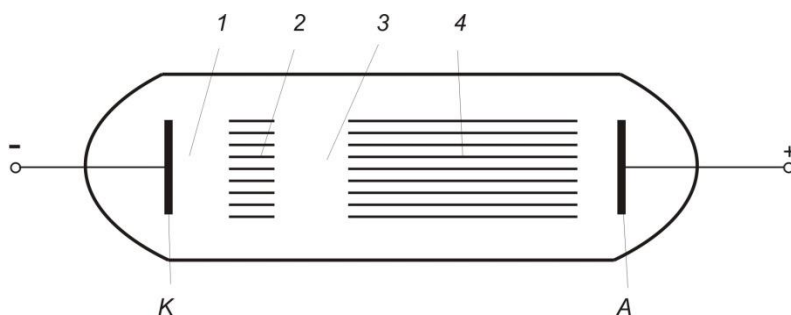


Fig.2.38. Zonele descărcării luminescente.

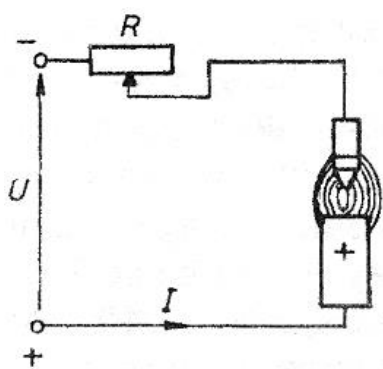
Aceste tuburi sunt umplute cu vapori de mercur la presiune joasă. Pereții tuburilor sunt acoperiți cu substanțe luminofoare. În timpul descărcărilor electrice

are loc o emisie de radiații vizibile și ultraviolete. Luminoforii au proprietatea de a emite sub acțiunea acestor radiații, o lumină foarte apropiată de lumina zilei. Aceste tuburi au randamentul mai mare decât al becurilor electrice cu filament ($\approx 15...20\%$);

d) descărcările prin scântei au loc între doi electrozi reci la o presiune atmosferică normală și la o diferență de potențial foarte mare. Descărcarea are loc intermitent;

e) descărcările în arc apar când electrodul negativ este în stare de incandescentă, iar curentul electric are valori foarte mari. Descărcarea în arc ia naștere dintr-o descărcare luminiscentă, când tensiunea dintre electrozi depășește o anumită valoare. Între electrozi apare o coloană de descărcare electrică puternic luminată numită **arc electric**.

Pentru formarea descărcării în arc este necesar ca pe lângă ionizarea gazului dintre electrozi, ionii pozitivi, ciocnindu-se de catod, să producă o pată



incandescentă numită **pată catodică**. Arcul poate apărea între doi electrozi aflați la o anumită distanță, dacă tensiunea dintre ei

este foarte mare, însă după aprindere, arcul poate fi menținut cu o tensiune redusă datorită ionizării puternice prin șoc a aerului cât și datorită temperaturii înalte.

Fig.2.39 - Stabilizarea arcului electric.

Arcul poate fi amorsat și prin punerea în contact a celor doi electrozi pentru a provoca o încălzire locală puternică, după care electrozii se îndepărtează, între ei apărând arc electric.

Când electrozii ard în aer, ei se consumă treptat (se topesc) și anume mai rapid cel pozitiv. Dacă electrozii sunt din cărbune, cărbunele pozitiv se

dimensionează cu un diametru mai mare decât cel negativ (arc electric în curent continuu).

Arcul electric are largii aplicații tehnice: ca sursă de lumină la proiectoare, sursă de căldură la sudarea metalelor și ca sursă de căldură în cuptoarele cu arc, unde temperatura poate ajunge la valoarea de $4\,000^{\circ}\text{C}$.

2.9. CURENTUL CONTINUU ÎN SEMICONDUCTOARE

Datorită proprietăților lor electrice speciale, semiconductoarele sunt utilizate foarte mult în tehnică. Semiconductoarele din punct de vedere electric ocupă un loc intermediar între conductoare și dielectrici, loc determinat de structura lor internă și de particularitățile lor chimice. Metalozii sunt caracterizați prin legătura covalentă, adică prin existența unui număr de electroni aparținând la doi atomi. Acești electroni nu au posibilitatea deplasării de la o moleculă la alta, motiv pentru care metalozii și substanțele cu legătură covalentă nu conduc curentul electric, sunt izolatoare. La metalele în stare lichidă sau solidă, legătura chimică este metalică, electronii de valență aparțin tuturor atomilor și din acest motiv se numesc electroni liberi. Electronii liberi au posibilitatea de mișcare și din acest motiv metalele în stare solidă și lichidă conduc curentul electric. Metalele în stare gazoasă sunt izolanti. Metalozii supuși la presiuni foarte mari devin buni conducători de electricitate (de exemplu fosforul la presiuni de peste 12.000 atm este bun conducător de electricitate).

2.9.1. Conductibilitatea electrică a semiconductoarelor.

Se numesc **semiconductoare** substanțele care ocupă din punct de vedere al conductibilității electrice o poziție intermediară între substanțele conductoare și cele izolante, ca de exemplu germaniu, siliciu etc.

Într-un atom izolat, cu mai mulți electroni, conform principiului excluziunii al lui **W. Pauli** (1900-1958), pe un nivel de energie se pot afla cel mult doi electroni diferiți prin spin.

Dacă se consideră doi atomi ai unui corp, situați la o distanță mare unul de altul și față de alți atomi vecini, electronii fiecăruia dintre atomi nu interacționează practic cu electronii celuilalt. În acest caz, nivelurile de energie ale unui atom se pot reprezenta ca în figura 2.40a și sunt ocupate de cel mult doi electroni. Dacă atomii se apropie, interacțiunea electronilor din atomul vecin nu mai poate fi neglijată și conform principiului excluziunii, perechile omoloage de electroni, care în atomii izolați se găseau pe niveluri egale de energie, trebuie să se găsească în noile condițiuni, pe niveluri energetice diferite. Acest lucru este posibil deoarece la apropierea atomilor, nivelurile de energie din atomul izolat, *se despică* în două niveluri, în sensul că fiecăruia dintre nivelurile de energie ale atomului izolat, îi corespund două niveluri în sistemul format din doi atomi (fig.2.40b). În cazul general în care se consideră N atomi ce formează un cristal al unui corp solid, nivelurile de energie ale unuia dintre atomi din starea izolată a acestuia *se despică* în N niveluri distincte, dacă cei N atomi sunt suficient de apropiați, ca electronii să interacționeze. Nivelurile de energie ale atomului izolat se transformă în **benzi**, care se lărgesc și se pot întrepătrunde pe măsură ce distanța d dintre atomi se micșorează (fig.2.40b). Aceste benzi se numesc **benzi permise de energie** ale cristalului, deoarece nivelurile de energie corespunzătoare pot fi ocupate de electroni.

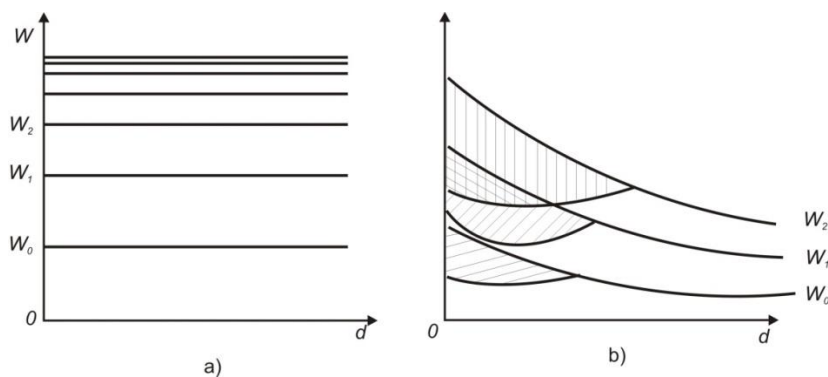


Fig.2.40. Nivelurile energetice pentru: a) un atom singur; b) doi atomi vecini.

Zonele care separă una de alta benzile permise, se numesc **benzi interzise**, deoarece electronii din atomi nu pot avea o valoare a energiei cuprinsă în interiorul acestora.

Stratificarea în benzi de energie se realizează în special la nivelele superioare ale electronilor, dintre care cele mai importante din punct de vedere al conducției sunt banda de **conducție** și **banda de valență** (fig.2.41). Între cele două benzi există o zonă numită **banda interzisă**. În funcție de lățimea benzii interzise (ΔW), substanțele se clasifică în conductoare, semiconductoare și izolatoare.

Corpurile conductoare sunt caracterizate prin lipsa benzii interzise dintre banda de valență și banda de conducție (fig.2.41a). Din acest motiv electronii de valență pot deveni, cu o energie minimă, electroni de conducție.

Corpurile izolatoare au lățimea benzii interzise mai mare de 1 electron-volt (1 eV) (fig.2.41c). La temperatura obișnuită, un număr foarte mic de electroni de valență au energie suficientă pentru a trece în banda de conducție. Energia medie a unui electron de valență la temperatura obișnuită este aproximativ de 0,26 meV, deci insuficientă ca să sară în banda de conducție. Din acest motiv izolatoarele nu permit trecerea curentului electric.

Corpurile semiconductoare au structura benzilor de energie asemănătoare cu a izolatoarelor, numai că lățimea benzilor interzise este mai mică (0,76 eV pentru germaniu și 1,1 eV pentru siliciu, figura (2.42b)). Structura energetică a benzilor explică valorile rezistivității electrice ρ de ordinul $10^{-6} \Omega\text{m}$ pentru metale, $10^{16} \Omega\text{m}$ pentru izolatoare și între aceste

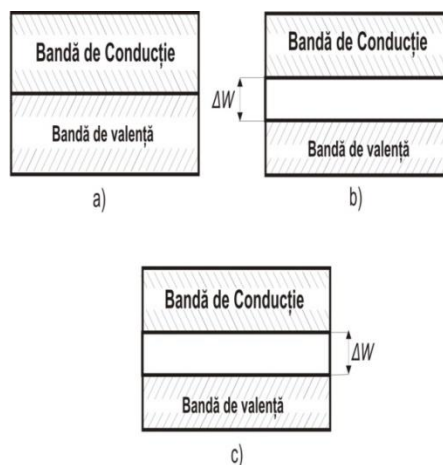


Fig.2.41. Lățimea benzii interzise la: a) conductoare; b) semiconductoare; c) izolanti.

valori extreme pentru semiconductoare.

Atât germaniul cât și siliciul au patru electroni pe ultimul strat, adică au patru electroni de valență. Într-un cristal pur, un atom de germaniu sau siliciu își formează legături covalente cu patru atomi vecini (fig.2.42).

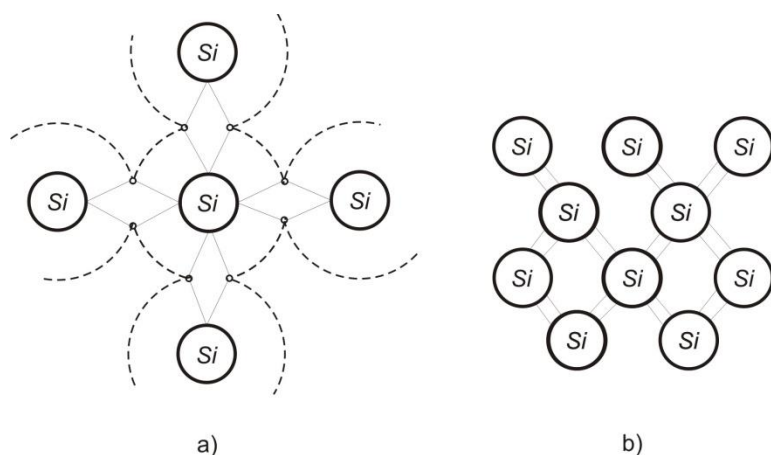


Fig.2.42. Legăturile covalente la cristalul de siliciu .

După modul în care se asigură conductibilitatea electrică, semiconductoarele se clasifică în: **semiconductoare cu conductibilitate intrinsecă** și **semiconductoare cu conductibilitate extrinsecă**.

Conductibilitatea electrică intrinsecă apare la semiconductoarele chimic pure. În acest caz, fenomenul trecerii curentului electric printr-un cristal semiconductor, are loc astfel: o parte din electronii atomilor posedând o energie suficientă sar din banda de valență în banda de conducție, lăsând în urma lor un nivel neocupat, o sarcină pozitivă, numită **gol**. În semiconductoarele pure, numărul de electroni liberi și de goluri este practic același și acest tip de conductibilitate se numește **intrinsecă**, iar semiconductorul se numește de tip **i**. Trebuie observat că la aplicarea unui câmp electric exterior, electronii se deplasează într-un sens (sens contrar câmpului electric), iar golurile în sens contrar electronilor (în sensul câmpului electric), atomii corespunzători rămânând nemișcați, întrucât aceștia sunt fixați în rețeaua cristalină. Fenomenul de conductibilitate prin electroni și goluri este ilustrat în figura 2.43 în care s-a desenat un număr de atomi învecinați.

Fenomenul de conducție electrică are loc în felul următor: dacă primul atom pierde un electron, atunci se crează un gol (loc vacant) ce poate fi ocupat de un electron al unui atom vecin. La rândul său acest electron completând golul din primul atom, lasă un loc liber, adică un gol în atomul al doilea, care este ocupat la rândul său de un electron ce provine de la atomul al treilea etc.

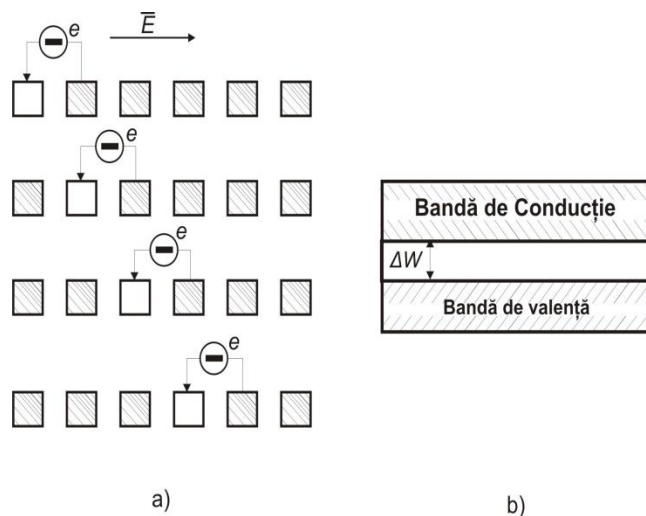


Fig.2.43. Explicativă pentru conducția în semiconductori de tip intrinsec.

Lucrurile se petrec ca și cum electronii s-ar deplasa de la un atom la altul în sens contrar câmpului electric \vec{E} , în timp ce golurile se deplasează în sens opus, în sensul câmpului electric, producându-se o recombinare neconținută a perechilor electron-gol. Trebuie remarcat faptul că procentul de perechi electron-gol într-o substanță semiconductoare pură este extrem de mic și că sarcina totală este nulă. Numărul golurilor intrinseci p_i și a electronilor intrinseci n_i , depinde foarte mult de temperatură (T):

$$p_i = n_i = K T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{\Delta W}{2kT}}, \quad (2.85)$$

unde T este temperatura absolută.

În mod obișnuit în dispozitivele semiconductoare se folosește un alt tip de conductibilitate electrică, numită **extrinsecă** provocată prin adăugarea unor mici

cantități de adaosuri, adică substanțe străine care formează de fapt niște impurități pentru semiconductorul respectiv.

Dacă atomii acestor adaosuri pot să cedeze cu ușurință electroni, cum este cazul adaosului de stibiu sau arsen la cristalul de germaniu, atunci numărul de electroni va fi preponderent față de cel de goluri și în acest caz electronii vor constitui **purtătorii majoritari** de sarcină electrică. O astfel de conductibilitate electrică prin sarcini electrice negative se numește **conductibilitate de tip n**. În fig.2.44 este reprezentată structura unui semiconductor de tip **n**.

Atomul de impuritate are cinci electroni de valență. Patru din cei cinci electroni de valență participă la formarea celor patru legături covalente cu cei patru atomi vecini. Cel de-al cincilea electron nu mai are nici o legătură disponibilă la care să participe. Acest electron nefiind prins în nici o legătură și fiind atașat nu la doi atomi vecini ci la unul singur, poate să devină mult mai ușor liber. El poate părăsi relativ ușor atomul de impuritate de care aparține, devenind prin aceasta un electron liber. Energetic, formarea acestui electron liber se poate explica cu ajutorul figurii 2.44. Nivelul energetic al impurității donore se află situat în banda interzisă a materialului de bază, mai aproape de banda de conducție și poate astfel foarte ușor sări în banda de conducție. Atomul pentavalent se transformă într-un ion pozitiv fixat în rețeaua cristalină, prin plecarea electronului al cincilea din stratul de valență. Într-un semiconductor dotat cu impurități penta-valente (donore) sarcinile electrice sunt formate din $n_i = p_i$ de goluri și electroni formați prin mecanism intrinsec (numărul lor depinde de temperatură), $n = N_d$ electroni liberi formați prin plecarea celui de al cincilea electron de valență al impurității donore, N_d ioni pozitivi fixați în rețeaua cristalină (N_d este concentrația impurităților introduse în rețeaua cristalină a semiconductorului de bază $N_d \sim 10^{11} \dots 10^{13}$ atomi/cm³). Sarcina totală a semiconductorului este nulă.

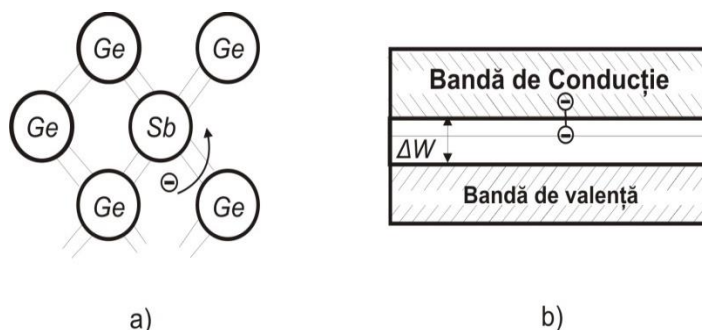


Fig.2.44. Semiconductorul de tip n.

La conducția curentului electric, participă purtătorii de sarcină electrică mobili formați prin mecanismul intrinsec n_i , și p_i , și electronii n formați prin mecanismul extrinsec. Purtătorii mobili care sunt în majoritate se numesc purtători majoritari. În acest caz electronii sunt purtători majoritari, numărul lor fiind $n_i + N_d \sim N_d$, (deoarece $n_i \ll N_d$), iar golurile formează purtătorii minoritari, numărul lor fiind p_i . Acest semiconductor la care conducția se face prin electroni se numește de tip **n**. Purtătorii majoritari depind de concentrația cu impurități donore N_d

Prin dotarea unui semiconductor cu impurități trivalente cum ar fi galiu (Ga) se obține un semiconductor de tip **p**. Nivelul energetic al impurității se află mai aproape de banda de valență deci poate primi la temperatura obișnuită ușor un electron de la materialul de bază, completându-și electronii covalenți la o formație stabilă de patru. Atomul de impuritate devine ion negativ fix în rețeaua cristalină, iar în atomul materialului de bază de la care s-a luat electronul se formează un gol (fig.2.45).

La conducția curentului electric participă purtătorii mobili formați prin mecanismul intrinsec n_i și p_i și golurile p formate prin mecanismul extrinsec. Purtătorii majoritari sunt în acest caz golurile (aproximativ egale cu numărul de impurități acceptoare) iar purtătorii minoritari sunt electronii. Semiconductorul care are conductibilitatea prin goluri se numește **semiconductor de tip p**.

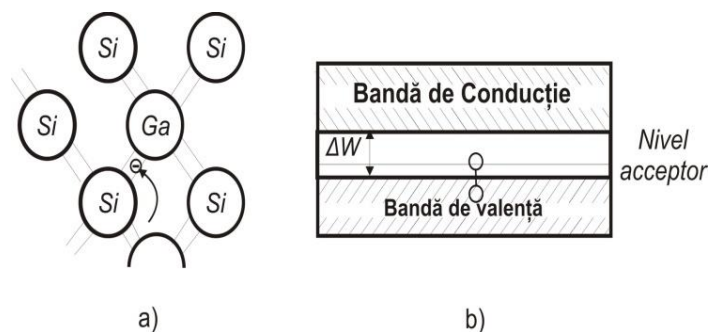


Fig.2.45. Semiconductorul de tip p.

Procesului de formare de purtători îi corespunde un proces opus de recombinare a purtătorilor, astfel că la o anumită temperatură se ajunge la niște valori de concentrații de echilibru termic notate cu n_0 și p_0 . Intervalul de timp din momentul formării unui purtător până în momentul recombinării se numește timp de viață al purtătorului. Timpul de viață este micșorat de defectele din rețeaua cristalină, de suprafețele de separație, de impurități etc.

Dacă într-un semiconductor se aplică un câmp electric \overline{E} , atunci peste mișcarea dezordonată a purtătorilor de sarcină, se suprapune o mișcare ordonată a purtătorilor de sarcină pe direcția câmpului electric (golurile în sensul câmpului electric, iar electronii în sens contrar). Cu toate că mișcarea purtătorilor de sarcină are sensuri opuse, curenții determinați de deplasarea lor se adună, deoarece acești purtători posedă sarcini electrice de semne contrare. Curentul electric care apare ca urmare a aplicării unui câmp electric, se numește **curent de câmp**.

Într-un semiconductor se poate produce și o deplasare a purtătorilor de sarcină electrică datorită unei diferențe de concentrație a purtătorilor din două regiuni învecinate (datorată câmpului imprimat de concentrație). Va rezulta un curent de difuzie datorită deplasărilor purtătorilor din regiunea cu concentrație mare spre regiunea cu concentrație mai scăzută.

Astfel, intensitatea curentului electric, care apare într-un semiconductor ce se află într-un câmp electric și care are o dotare neuniformă cu impurități, are două componente, componenta de câmp datorită câmpului electric și componenta de difuzie, datorită dotării neuniforme cu impurități în interiorul semiconductorului. Intensitatea curentului se obține prin însumarea componentelor corespunzătoare.

2.9.2. Dioda semiconductoare.

Dioda semiconductoare (fig.2.46) este un cristal semiconductor format din două regiuni, una **p** și una **n**. În regiunea **p** golurile sunt purtători majoritari, iar electronii purtători minoritari. În regiunea **n**, electronii sunt purtători majoritari, iar golurile purtători minoritari.

Când cele două regiuni sunt puse în contact, datorită diferenței de concentrație, apare fenomenul de difuzie dintr-o regiune în alta. Din regiunea **p** vor difuza în regiunea **n** goluri, care erau purtători majoritari în regiunea **p** și devin purtători minoritari în regiunea **n**. Prin plecarea golurilor din regiunea **p** apare în imediata

apropiere a suprafeței de separație o sarcină electrică negativă determinată de ioniile elementelor trivalente acceptoare. Din regiunea **n** vor difuza în regiunea **p** electroni, care erau purtători majoritari în regiunea **n** și vor deveni purtători minoritari în regiunea **p**. În imediata apropiere a suprafeței de separație va rămâne o sarcină electrică pozitivă necompensată datorită ionilor pozitivi ai impurității pentavalente fixați în rețeaua semiconductorului de tip **n**.

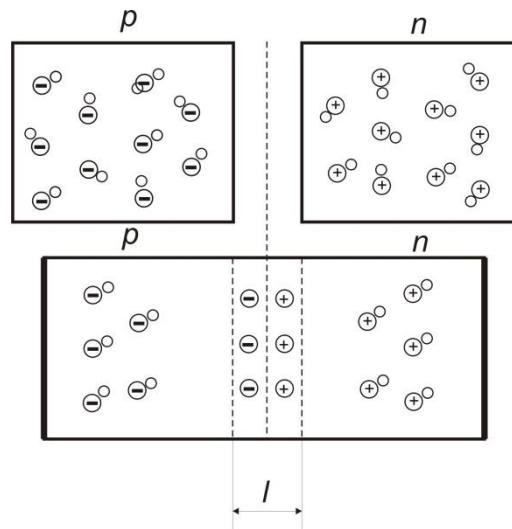


Fig.2.46. Dioda semiconductoare.

Rezultă că în vecinătatea joncțiunii, există o zonă cu sarcină electrică necompensată, numită **zonă de trecere**, lungimea ei este notată cu **l** (fig.2.46). Sarcina electrică necompensată din regiunea de trecere va produce o diferență de potențial în zona de trecere denumită **barieră de potențial** U_0 . În zona de trecere apare și un câmp electric intern \vec{E} îndreptat dinspre regiunea **n** spre regiunea **p**. Acest câmp electric va împiedica trecerea mai departe a electronilor majoritari din regiunea **n** în regiunea **p** și a golurilor majoritare din regiunea **p** în regiunea **n**. Vor trece dintr-o zonă în cealaltă numai acei purtători majoritari care au o energie suficientă să învingă bariera de potențial U_0 (fig.2.46). Câmpul electric va favoriza

trecerea dintr-o regiune în alta a purtătorilor minoritari adică a golurilor din regiunea **n** în regiunea **p** și a electronilor din regiunea **p** în regiunea **n**.

Ca urmare a acestor fenomene, se stabilesc prin joncțiunea **pn** curenți a căror sumă este zero. Acești curenți vor fi (fig.2.47): **curentul de goluri majoritare** i_{pM} , format de golurile care trec din regiunea **p** în regiunea **n**, **curentul de electroni majoritari** i_{nM} format din electronii majoritari care trec din regiunea **n** în regiunea **p** (sunt curenți de difuzie și depind de energia și concentrația purtătorilor), **curentul de electroni minoritari** i_{nm} format din electronii care trec din regiunea **p** în regiunea **n** (sunt curenți de difuzie și depind de energia și concentrația purtătorilor) și **curentul de goluri minoritari** i_{pm} , format din golurile care trec din regiunea **n** în regiunea **p** (acești curenți depind de intensitatea câmpului electric intern din regiunea de trecere).

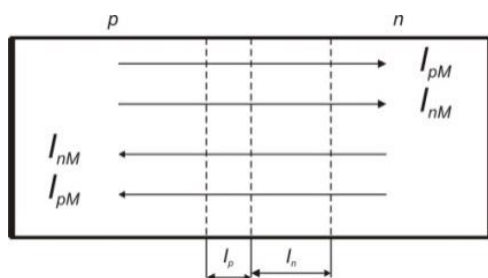


Fig.2.47. Curenții prin joncțiunea pn nealimentată.

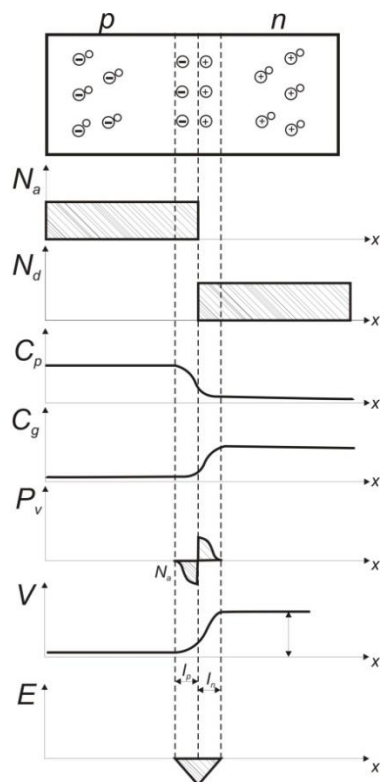


Fig.2.48. Producerea barierei de potențial și a câmpului electric intern la dioda semiconductoră.

Regiunea de trecere se extinde inegal în cele două regiuni ale joncțiunii, dar sarcinile electrice care apar de o parte și de alta a joncțiunii trebuie să fie egale deci:

$$q = l_p N_p = l_n N_n. \quad (2.86)$$

Regiunea **p** de obicei este mai dotată decât regiunea **n** ($N_p > N_n$) și rezultă din relația 2.86 că:

$$l_p < l_n,$$

adică regiunea de trecere se extinde mai mult în semiconductorul mai puțin dotat.

Joncțiunea **pn** se spune că s-a polarizat direct dacă potențialul pozitiv al sursei de polarizare se aplică la regiunea **p** și potențialul negativ la regiunea **n**.

Aproape toată tensiunea sursei se aplică pe joncțiune în regiunea de trecere. Această tensiune exterioară notată cu u_A , duce la micșorarea barierei de potențial la valoarea $U_0 - u_A$ în cazul polarizării directe, ceea ce determină micșorarea câmpului electric E_i din regiunea de trecere (fig.2.49).

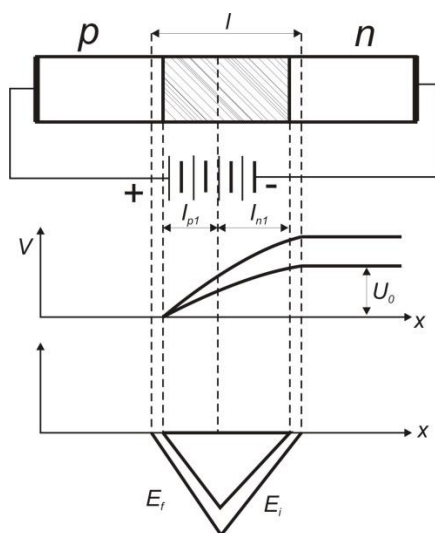


Fig.2.49. Micșorarea barierei de potențial și a câmpului electric la alimentarea directă.

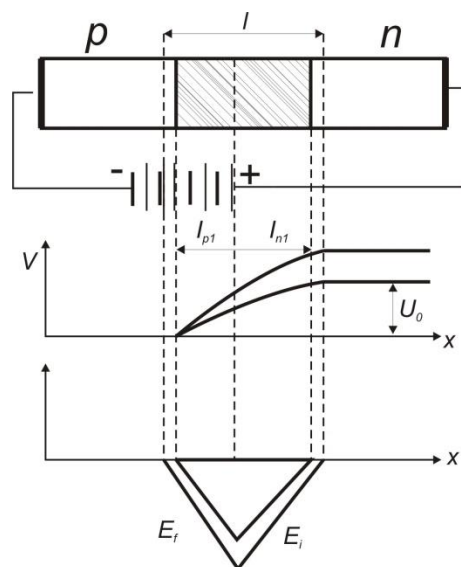


Fig.2.50. Mărirea barierei de potențial și a câmpului electric la alimentarea inversă.

Datorită scăderii barierei de potențial, crește numărul purtătorilor majoritari de sarcină electrică care traversează zona de trecere. Purtătorii majoritari care traversează zona de trecere, devin în regiunea în care au ajuns, purtători minoritari în exces și se vor recombină cu purtătorii majoritari existenți pe o distanță destul de mică de la regiunea de trecere. Numărul de purtători minoritari care trec în regiunea alăturată, sub acțiunea câmpului rezultat din regiunea de trecere, rămâne practic egal cu cel de la echilibrul termic. Rezultă că prin joncțiune avem un curent de difuzie mult mai mare decât la echilibrul termic și un curent foarte mic de câmp al purtătorilor minoritari.

Polarizarea inversă a joncțiunii **pn** se obține când se aplică potențialul pozitiv al sursei de t.e.m. la semiconductorul **n** și potențialul negativ la semiconductorul **p** (fig.2.50). În acest caz tensiunea exterioară u_A se adună la bariera de potențial U_0 rezultând o barieră de potențial mai mare, $U_0 + u_A$, ceea ce determină mărirea intensității câmpului electric E_i din regiunea de trecere. Numărul purtătorilor majoritari care pot învinge bariera de potențial mărită se va micșora mult. Curentul datorat purtătorilor minoritari rămâne ca și în cazul precedent practic neschimbat.

Curentul electric care circulă prin joncțiune este egal cu diferența dintre curentul de difuzie al purtătorilor majoritari, care este foarte mic și curentul de câmp al purtătorilor minoritari care are aceeași valoare ca și la echilibrul termic. Deoarece acest curent nu depinde de tensiune, se numește **curent de saturație** I_{sat} . Curentul de saturație este mult mai mic decât curentul de difuzie la polarizarea directă.

Din analiza celor două feluri de polarizare, se vede că la polarizarea directă joncțiunea **pn** are un curent electric mare în sens direct, grosimea zonei de trecere se micșorează, iar la polarizarea inversă joncțiunea are un curent foarte mic numit curent de saturație I_{sat} iar grosimea zonei de trecere se mărește. Cu creșterea temperaturii, valoarea curentului de saturație crește și el.

Caracteristicile statice ale diodelor semiconductoare, $I = f(U)$, caracterizează comportarea acestor elemente, indicând dependența curentului care trece prin diodă de tensiunea aplicată acesteia. În figura 2.51 se indică caracteristica statică a unei diode și simbolul diodei semiconductoare. Se poate observa caracterul neliniar al acestei caracteristici.

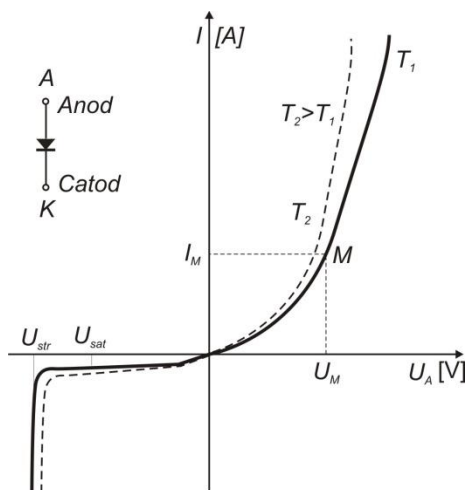


Fig.2.51. Caracteristica statică a diodei semiconductoare.

Se observă caracterul neliniar al diodei semiconductoare. Curentul în sens direct crește aproximativ exponențial cu tensiunea. Curentul în sens invers este foarte mic și este egal cu curentul de saturație I_{sat} (5... 10 mA pentru diodele de germaniu). Curentul în sens invers depinde foarte mult de variația temperaturii, astfel la o variație a temperaturii cu $7,5^{\circ}\text{C}$ curentul invers se dublează.

În figura 2.51 s-a reprezentat cu linie întreruptă caracteristica statică la o temperatură $T_2 > T_1$. Se observă o creștere a curentului de saturație și a curentului direct pentru temperatura mai mare.

În cazul în care tensiunea inversă depășește o anumită valoare, numită **tensiune de străpungere** U_{str} , curentul invers crește brusc. Această creștere bruscă a curentului invers se datorează fenomenului de **multiplicare prin avalanșă**. Prin creșterea tensiunii aplicate pe joncțiune, crește foarte mult și câmpul din zona de trecere, care accelerează puternic purtătorii minoritari. Purtătorii minoritari având o viteză foarte mare, produc prin ciocnirea lor cu un atom din regiunea de trecere o pereche de electron-gol. Această pereche de purtători de sarcină electrică va fi și ea accelerată în continuare, procesul multiplicându-se și dând naștere unei avalanșe de purtători de sarcină electrică. Ca urmare, curentul electric invers prin joncțiune apare multiplicat.

Pentru un punct de funcționare M, se poate defini o **rezistență în curent continuu**:

$$R_{cc} = \frac{U_M}{I_M},$$

care este rezistența unui resistor care poate înlocui această diodă cu punctul de funcționare M, astfel încât curentul să rămână neschimbat.

Rezistența R_{cc} în sens invers are valori foarte mari, de ordinul a $10^6 \Omega$. Ideal valoarea ar trebui să fie infinită, astfel ca I_{sat} să fie zero (dioda să nu conducă în sens invers).

În regiunea de trecere a unei joncțiuni **pn** apar două srcini electrice egale și de semn contrar, de o parte și de alta a suprafeței de separație a celor două regiuni. Această repartiție poate fi echivalată cu un condensator plan având capacitatea C_b (**capacitatea barierei**) .

În regimul de conducție direct, alături de capacitatea barierei mai apare o **capacitate de difuzie** C_d , care se explică prin faptul că injectarea de purtători minoritari în regiunile opuse, duce la modificare concentrației față de echilibrul termic. Apare o stocare de purtători minoritari, care poate fi echivalată cu un condensator cu capacitatea C_d .

Schema echivalentă a unei diode într-un punct de funcționare este redată în figura 2.52a. În figură, L - reprezintă inductivitatea firelor de legătură, C_c – capacitatea capsulei în care este montată dioda, R_j - rezistența joncțiunii, R_s – rezistența regiunilor neutre.

Pentru funcționarea în curent alternativ la frecvențe joase, se pot neglija inductivitatea firelor de legătură L , capacitatea capsulei C_c și rezistența regiunilor neutre R_s , rezultând schemele echivalente din figurile 2.52b pentru polarizarea directă și 2.52c pentru polarizarea inversă.

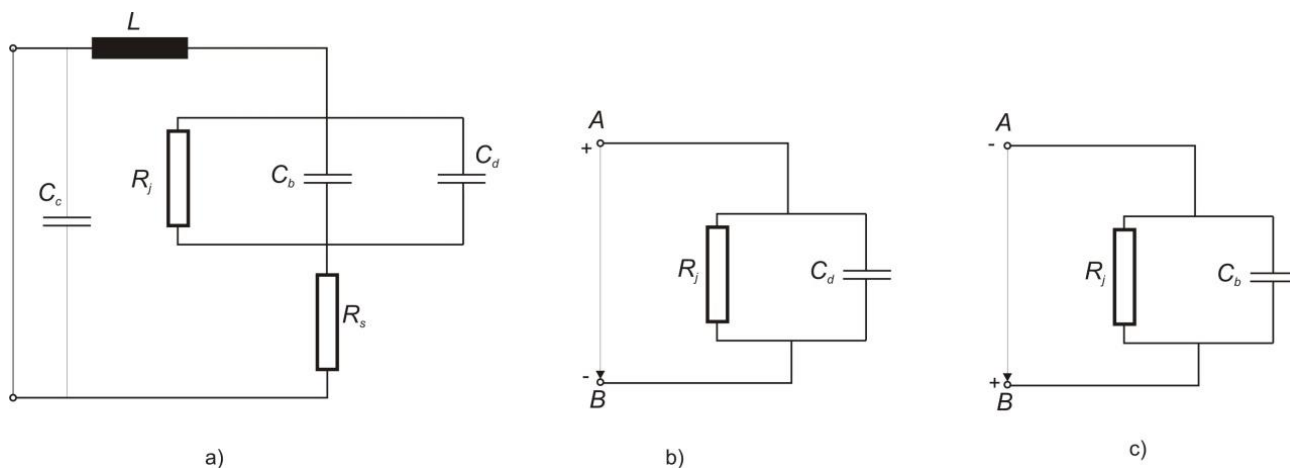


Fig.2.52. Schemele echivalente ale diodei: a) schema echivalentă generală; schemele echivalente simplificate pentru: polarizarea directă (b), polarizarea inversă (c).

TEME DE STUDIU

Test1.

Ce este emisiunea electronică a metalelor și unde se folosește ?.

Test 2.

Ce este emisiunea termoelectronică a metalelor și unde se folosește ?.

Test 3.

Ce este emisiunea fotoelectronică a metalelor și unde se folosește ?.

Test 4.

Ce este emisiunea autoelectronică a metalelor ?.

Test 5.

Ce este descărcarea în arc electric, ce cracteristici are și unde se folosește ?

Test 6.

Ce sunt materialele semiconductoare și ce cracteristici au ?.

Test 7.

Între ce limite se află valoarea rezistivității electrice a semiconductoarelor ?.

Test 8.

Ce sunt semiconductoarele intrinseci și ce sunt cele extrinseci ?.

Test 9.

Ce legături de valență au semiconductoarele ?.

Test 10.

Care este lățimea benzii interzise în cazul semiconductoarelor ?.

Test 11.

Care este lățimea benzii interzise în cazul materialelor electroconductoare ?.

Test 12.

Care este lățimea benzii interzise în cazul izolatoarelor ?.

Test 13.

Ce sunt semiconductoarele de tip **n** dar cele de tip **p** și ce fel de impurități au ?.

Test 14.

Ce sunt semiconductoarele de tip **p** și ce fel de impurități au ?.

Test 15

Ce este curentul electric de câmp ? . Ce este curentul electric de difuzie ?.

Test 16.

Care este concentrația impurităților în cazul semiconductoarelor extrinseci ?.

Test 17.

Cum arată caracteristica statică a unei diode ?.

Test 18

Care sunt schemele echivalente ale unei diode ?.