

Capitolul 2

2. DIODA SEMICONDUCTOARE

2.1. Joncțiunea pn cu tensiune aplicată din exterior

Dispozitivele semiconductoare care conțin joncțiuni pn sunt utilizate ca elemente de circuit, când la bornele joncțiunii se aplică o diferență de potențial prin intermediul unor contacte metalice.

O diodă se realizează prin doparea unui cristal de material semiconductor în așa fel încât o regiune de tip p și o altă regiune de tip n sunt alăturate. Suprafața de separație dintre regiuni formează joncțiunea pn . Electroful conectat la regiunea p se numește *anod* (A) iar electroful conectat la regiunea n se numește *catod* (K) (fig. 2.1).



Fig. 2.1.

Tensiunea aplicată din exterior se obține de la o sursă de tensiune continuă E_A , care poate fi legată cu borna + la anod și cu borna – la catod (joncțiunea pn polarizată direct), sau cu borna + la catod și cu borna – la anod (joncțiunea pn polarizată invers).

- a) Joncțiunea pn polarizată direct (fig. 2.2). Joncțiunea pn conduce și prin joncțiune apare un curent I_A datorat purtătorilor de sarcină majoritari.

$$U_A = E_A \quad U_A > 0 \quad I_A \neq 0$$

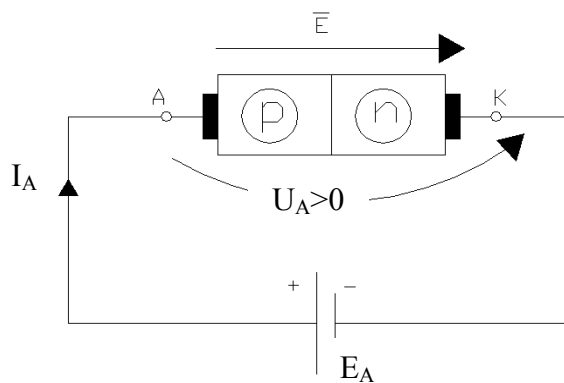


Fig. 2.2.

b) Joncțiunea *pn* polarizată invers (fig. 2.3). Joncțiunea *pn* nu conduce și prin joncțiune curentul I_A este de valoare foarte mică (aproximativ egal cu zero). Curentul invers prin joncțiune este curentul invers de saturație I_S .

$$U_A = -E_A \quad U_A < 0 \quad I_A \cong 0 \quad I_A = I_S$$

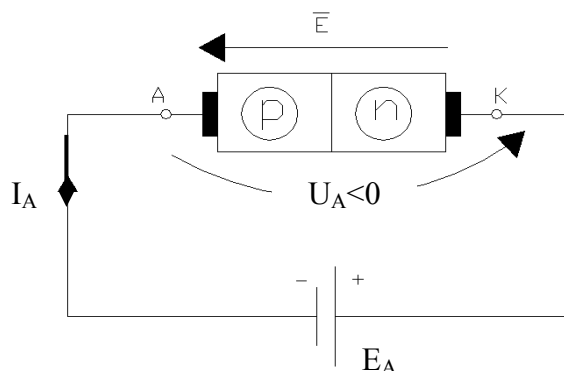


Fig. 2.3.

2.2. Ecuația curent – tensiune a unei joncțiuni *pn* ideale

Teoria demonstrează, conform [DCE- TD, Electronică - Vasilescu, Clement S.], că în cazul unei joncțiuni *pn* ideale este valabilă următoarea ecuație:

$$I_A = I_S \cdot \left(e^{U_A / U_T} - 1 \right). \quad (2.1)$$

În ecuația (2.1) s-au notat: I_A curentul prin joncțiune, I_S curentul invers de saturație al joncțiunii, U_A diferența de potențial aplicată joncțiunii, U_T tensiunea datorată temperaturii.

Tensiunea U_T se calculează cu relația

$$U_T = \frac{kT}{e} \quad (2.2)$$

în care k este constanta lui Boltzmann ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$), T este temperatura absolută exprimată în grade kelvin și e sarcina electrică elementară (sarcina electronului $e = -1,6 \cdot 10^{-19} C$). La o temperatură obișnuită de $25^{\circ}C$, tensiunea datorată temperaturii are valoarea $U_T = 26mV$.

2.3. Caracteristica curent-tensiune a joncțiunii pn

Reprezentarea grafică a relației (2.1) este dată în figura 2.4 și reprezintă caracteristica statică ideală a joncțiunii pn.

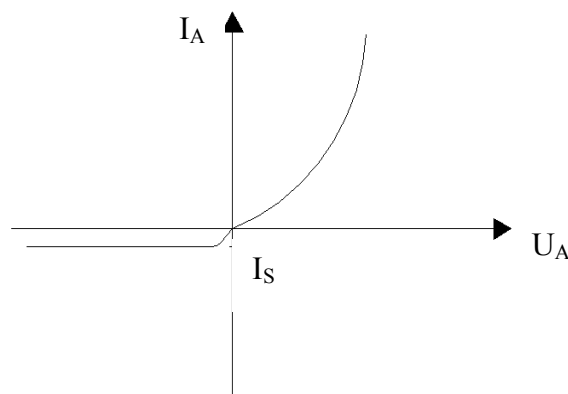


Fig. 2.4.

- Pentru tensiuni de polarizare directă $U_A > 0$, la temperaturi în jurul valorii $T_0 = 300K$, $U_A \geq 4 \frac{kT}{e} \cong 0,1V$. În relația (2.1) predomină termenul

exponențial și curentul direct prin joncțiunea pn se poate determina cu relația

$$I_A \approx I_S \cdot e^{U_A/U_T}. \quad (2.3)$$

- Pentru tensiuni de polarizare inverse $U_A < 0$, la temperatura $T_0=300K$, $|U_A| \geq \frac{4kT}{e} \cong 0,1V$, în relația (2.1) termenul exponențial poate fi neglijat și curentul invers prin joncțiunea pn are valoarea

$$I_A \cong -I_S. \quad (2.4)$$

Relația (2.4) arată că valoarea curentului invers prin joncțiune are o valoare constantă începând de la tensiuni negative, de aproximativ $-0,1V$.

2.4. Dioda redresoare

O diodă constă dintr-o joncțiune pn protejată de o capsulă metalică sau de o capsulă din plastic. Cele două terminale sunt fixate pe contactele ohmice ale celor două zone p și n și se numesc anod (A), respectiv catod (K).

Simbolurile utilizate în schemele electronice pentru reprezentarea diodelor redresoare sunt prezentate în figura 2.5.

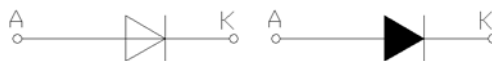


Fig. 2.5.

Diodele redresoare se bazează pe proprietatea de conducție unilaterială a joncțiunii pn . O diodă redresoare ideală are o rezistență internă r_i egală cu zero dacă e polarizată direct și o rezistență internă r_i infinită la polarizarea inversă.

Caracteristica curent-tensiune a unei diode redresoare ideale se prezintă în figura 2.6.

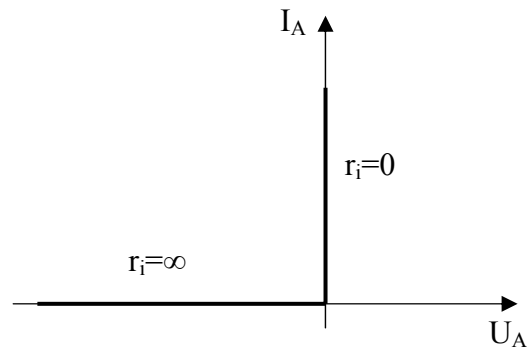


Fig. 2.6.

Caracteristica curent-tensiune a unei diode redresoare reale (din siliciu) se prezintă în figura 2.7, unde s-au delimitat patru zone notate I, II, III, IV.

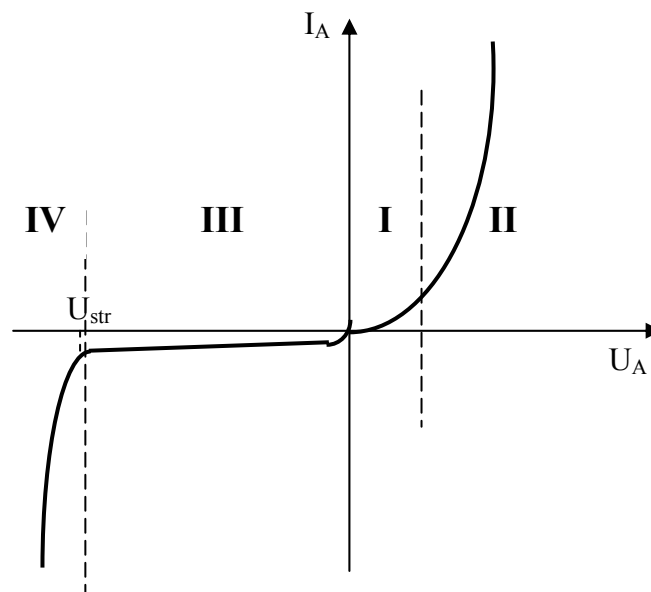


Fig. 2.7.

Analizând caracteristica curent-tensiune se observă că prin diodă nu circulă nici un curent (dioda este blocată) cât timp tensiunea anod-catod (U_A) este cuprinsă între zero și un anumit prag de tensiune de aproape 0,7V. Aceasta este zona I, adică zona tensiunilor directe de polarizare mici. Dincolo de acest

prag, dioda începe să conducă (zona II), iar curentul I_A prin ea crește foarte rapid pe măsură ce tensiunea anod-catod U_A crește. O mică creștere a tensiunii dintre anod și catod duce la creșterea substanțială a intensității curentului prin diodă.

Pentru tensiuni U_A negative, se observă că intensitatea I_A a curentului prin diodă are valori neglijabile (zona III). Pe măsură ce tensiunea U_A devine din ce în ce mai mare în valoare absolută, intensitatea curentului prin diodă crește (în valoare absolută), însă foarte lent. La o anumită valoare a tensiunii inverse, intensitatea curentului invers devine brusc foarte mare (zona IV). Tensiunea catod-anod la care apare acest fenomen se numește *tensiunea inversă de străpungere* (U_{str}), sau tensiunea inversă maximă pe care o poate suporta dioda fără să se defecteze.

Despre zonele delimitate pe graficul din figura 2.7 se pot face următoarele precizări:

- ✓ Zona I, zona tensiunilor directe de polarizare mici, $I_A = I_S \cdot \left(e^{U_A/U_T} - 1 \right)$;
- ✓ Zona II, zona tensiunilor directe de polarizare mari, $I_A \approx I_S \cdot e^{U_A/U_T}$;
- ✓ Zona III, zona tensiunilor de polarizare inversă, $I_A \cong -I_S$;
- ✓ Zona IV, zona de străpungere a diodei.

Caracteristica diodei reale nu este o dreaptă, motiv pentru care se poate spune că dioda este o componentă electronică *neliniară*.

Liniarizarea caracteristicii diodei redresoare

Este util să se aproximeze caracteristica neliniară a diodei redresoare, de obicei prin două segmente de dreaptă. În figura 2.8 a), rezistența internă a diodei $r_i = 0$, iar dioda se modelează printr-o baterie echivalentă tensiunii de prag U_0 . Tensiunea de prag U_0 se definește și în figura 2.8 b) și are valoarea (0,2 ÷ 0,4)V la diodele din germaniu și de (0,5 ÷ 0,8)V la diodele din siliciu. Porțiunea caracteristicii din zona II, a tensiunilor directe de polarizare mari se aproximează, printr-un segment de dreaptă a cărui pantă este determinată de rezistența internă r_i a diodei.

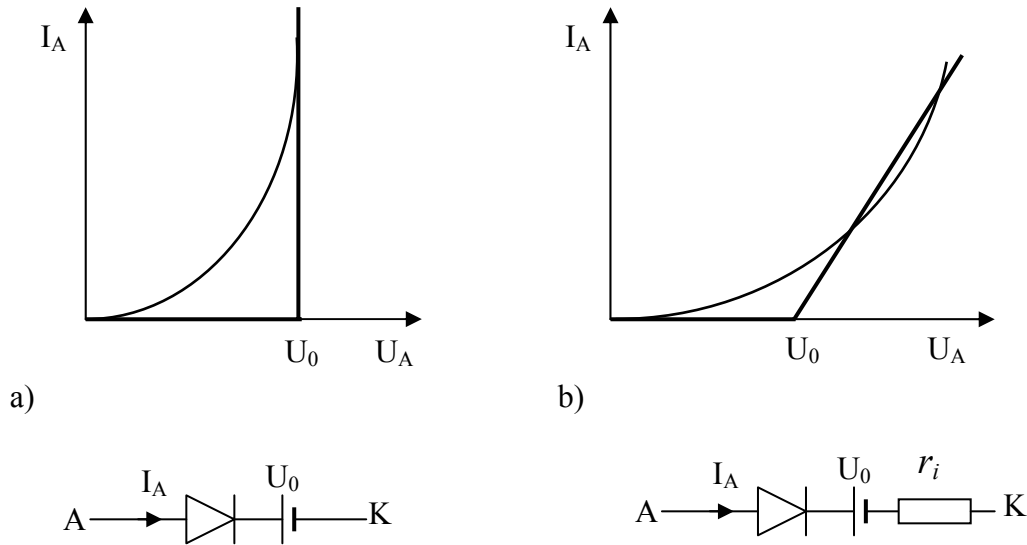


Fig. 2.8.

Diodele redresoare se construiesc din siliciu (Si) sau germaniu (Ge). În prezent, cea mai mare parte a aplicațiilor din domeniul electronicii folosesc diode cu siliciu.

Diodele redresoare trebuie să aibă caracteristici statice cât mai apropiate de caracteristica ideală, adică să se deschidă la tensiuni de prag U_0 cât mai mici și atunci când sunt blocate să aibă curentul invers de saturație I_S cât mai mic.

Comparația între diodele cu siliciu și cele cu germaniu, destinate a fi folosite în aceeași gamă de tensiuni și curenți, se realizează cu ajutorul caracteristicilor statice pentru diodele de putere mică (fig. 2.9).

Când o diodă cu germaniu se află în conducție, tensiunea anod – catod (U_A) este, pentru curenți I_A uzuali, aproximativ egală cu $0,2 \div 0,3$ V, față de $0,6 \div 0,8$ V la dioda cu siliciu. Pentru valori mari și foarte mari ale curenților direcți I_A , căderile de tensiune pot ajunge la $0,7$ V la germaniu și la $1,4$ V la siliciu.

Tensiunea de străpungere U_{str} este mai mare la diodele din siliciu comparativ cu diodele din germaniu.

Temperatura de lucru maximă admisă pentru joncțiune este de $(200 \div 220)^\circ\text{C}$ la siliciu și de $(85 \div 90)^\circ\text{C}$ la germaniu.

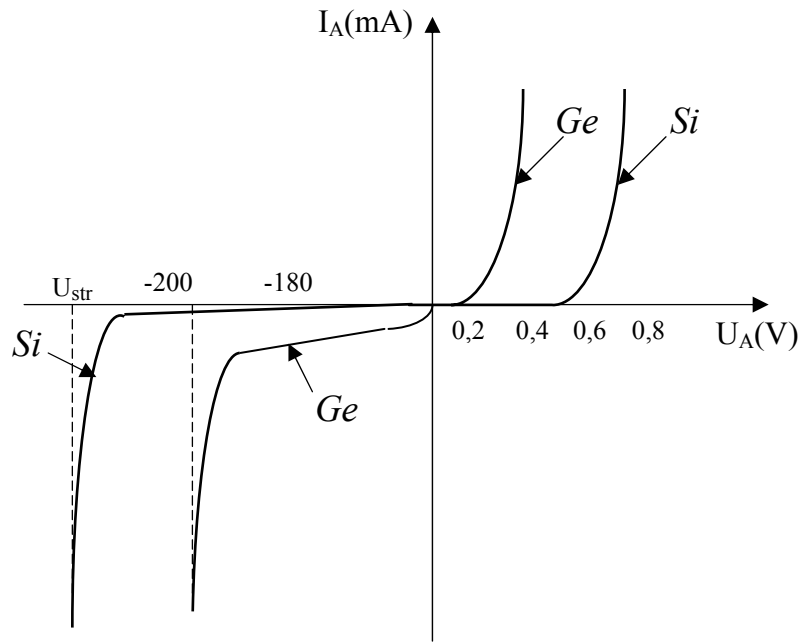


Fig. 2.9.

Dezavantajul principal al diodelor cu germaniu în raport cu diodele cu siliciu este că au curentul invers mai mare decât cel al diodelor cu siliciu. Singurul avantaj al diodelor cu Ge îl constituie valoarea mai scăzută a căderii de tensiune directă.

2.5. Analogie mecano-hidraulică pentru o diodă

Dioda este un dispozitiv electronic (semiconductor sau tub electronic) necomandat care permite trecerea curentului electric într-un singur sens, de la anod către catod, atunci când este polarizată corespunzător (pozitiv pe anod și negativ pe catod).

O diodă acționează similar unei *supape hidraulice* și de aceea se poate spune că dioda este o *supapă electronică* (fig. 2.10).

Atunci când potențialul anodului diodei devine mai mare (cu $0,6 \div 0,8V$ pentru dioda cu siliciu, sau cu $0,2 \div 0,4V$ pentru dioda cu germaniu) decât potențialul catodului, dioda începe să conducă deoarece sa depășit tensiunea de prag. Când potențialul catodului este mai mare decât cel al anodului, dioda este

blocată și prin ea circulă un curent de intensitate foarte mică (curentul invers sau curentul de scurgere). Dacă potențialul catodului V_K devine mult mai mare decât potențialul anodului V_A , diferența potențialelor poate atinge tensiunea de străpungere a diodei indicată de producător în catalog $V_K - V_A \geq U_{str}$ și dioda se distruge.

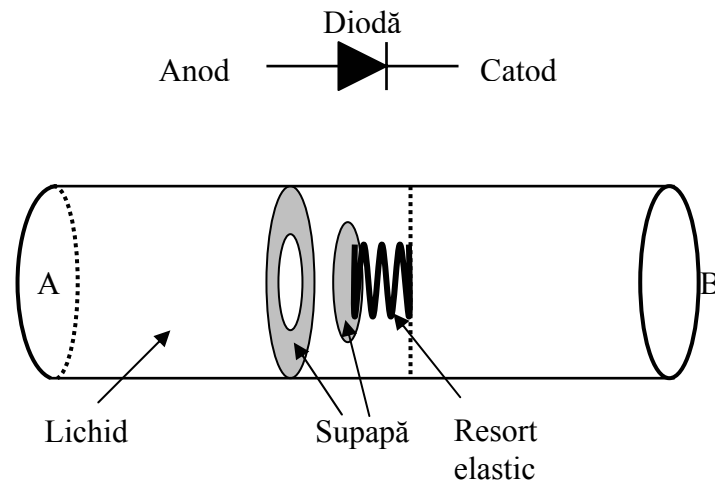


Fig. 2.10.

Conform analogiei stabilite în figura 2.10, supapa hidraulică se deschide și lichidul curge de la A spre B atunci când presiunea p_A în punctul A al conductei este mai mare decât presiunea p_B în punctul B cu o anumită valoare necesară pentru a învinge forța elastică a resortului elastic al supapei [?-Bistriceanu]. Dacă presiunea în B este mai mare decât în A, $p_B > p_A$, supapa este închisă datorită acțiunii resortului elastic. Această închidere nu poate fi perfectă datorită imperfecțiunilor de execuție a supapei hidraulice și există o mică scurgere de lichid de la B spre A. Dacă diferența de presiune $p_B - p_A$ atinge valori mai mari decât valoarea limită maximă impusă de fabricant, atunci supapa se distruge.

2.6. Verificarea diodelor cu ohmmetrul

Ohmmetrul este un aparat de măsură electric sau electronic, nelipsit din trusa de scule a electronistului practician, cu care se pot măsura valorile rezistențelor electrice cel mai simplu și cu o precizie de măsură satisfăcătoare. De obicei se utilizează un aparat de măsură universal care poate deveni după dorință voltmetru, ampermetru sau ohmmetru.

Starea de bună funcționare sau starea de defect a unei diode se poate stabili cu ajutorul ohmmetrului. Dacă dioda este în stare bună de funcționare, atunci ohmmetrul ne poate ajuta să stabilim care din cele două terminale este anodul și care este catodul [?-Bistriceanu].

O diodă în stare bună de funcționare, atunci când este conectată la un ohmmetru într-un anumit mod, trebuie să prezinte o rezistență electrică mică între terminale și o rezistență mare (de cel puțin zece ori mai mare decât cea precedentă) atunci când este conectată la ohmmetru în modul opus celui precedent. În caz contrar, adică dacă rezistența electrică între terminalele diodei este aceeași indiferent de modul de conectare, dioda se află în starea de defect.

Starea de defect a unei diode poate fi de două feluri:

- ✓ dioda scurtcircuitată, dacă rezistența măsurată de ohmmetru este apropiată de zero indiferent de modul cum se conectează dioda la ohmmetru;
- ✓ dioda întreruptă, dacă rezistența măsurată de ohmmetru rămâne la o valoare mare indiferent de modul cum se conectează dioda la ohmmetru.

Fiecare utilizator trebuie să-și cunoască aparatul de măsură pe care îl folosește, deoarece la unele aparate de măsură universale atunci când lucrează ca ohmmetru, borna notată cu plus (+) pe corpul aparatului este de fapt borna minus (-), adică borna legată la polul minus (-) al bateriei electrice care alimentează ohmmetrul. Pentru a se stabili polaritatea bornelor ohmmetrului se recomandă folosirea unui voltmetru de curenți continuu.

2.7. Dioda stabilizatoare de tensiune (Dioda Zener)

Diodele stabilizatoare de tensiune utilizează proprietatea joncțiunii pn de a avea o tensiune inversă la borne aproximativ constantă, atunci când lucrează în regiunea de străpungere a caracteristicii statice. Efectul străpungerii unei joncțiuni pn la tensiuni inverse aplicate diodei se caracterizează printr-o creștere rapidă a intensității curentului la o tensiune aproximativ constantă. Străpungerea se datorează efectului Zener sau efectului de multiplicare în avalanșă a purtătorilor de sarcină, care este un proces reversibil dacă creșterea curentului este limitată de circuitul exterior diodei.

Simbolurile utilizate în schemele electronice pentru dioda Zener sunt arătate în figura 2.11, iar caracteristica curent – tensiune a unei diode Zener este trasată în figura 2.12 (o diodă Zener se folosește totdeauna polarizată invers).

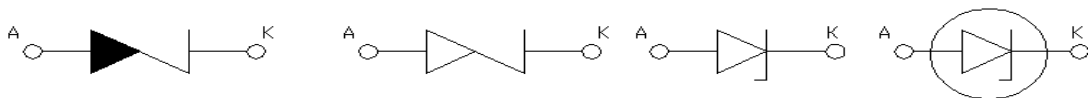


Fig. 2.11.

Diodele Zener se utilizează în circuitele electronice, conform [?-DCE-T. Dănilă], la realizarea surselor de tensiune continuă constantă cu valori ale tensiunii cuprinse între $3 \div 400$ V și puteri cuprinse între $0,25 \div 50$ W.

Diodele Zener se utilizează numai în regim de polarizare inversă, adică tensiunea aplicată diodei $U_Z = -U_A$ și din caracteristica statică a diodei se utilizează doar porțiunea din cadranul trei, acolo unde tensiunea aplicată este negativă. Curentul invers prin diodă poartă numele de *curent nominal* prin diodă, se notează cu I_Z , străbate dioda de la catod către anod și are valori importante față de curentul invers de saturație I_S al diodei redresoare. Acest curent trebuie să atingă valori cuprinse între I_{Zmin} și I_{Zmax} (variații mari ΔI_Z) astfel încât punctul static de funcționare al diodei Zener să se găsească după cotul

caracteristicii (la stânga cotului). Numai astfel *tensiunea Zener* U_Z la bornele diodei rămâne aproximativ constantă (are variații mici $\Delta U_Z = U_{Zmax} - U_{Zmin}$) și astfel se asigură stabilizarea tensiunii la bornele diodei Zener.

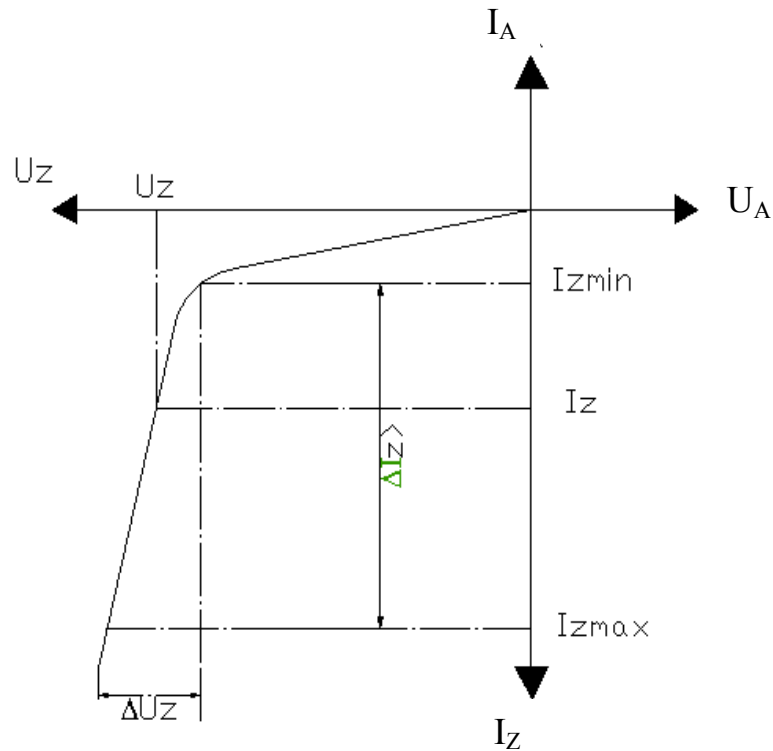


Fig. 2.12.

Funcționarea diodei Zener la curenți $I_Z > I_{Zmax}$ va conduce la distrugerea diodei.

Tensiunea Zener a unei diode stabilizatoare de tensiune este înscrisă de obicei pe corpul acesteia. De exemplu, dacă pe capsula unei diode este înscris $7V5$, atunci tensiunea Zener a acesteia este $7,5V$. Diodele care se găsesc pe piață au tensiuni Zener cuprinse între câțiva volți și 200 de volți.

Puterea P disipată de o diodă Zener este dată de relația

$$P = U_Z \cdot I_Z \quad (2.5)$$

în care U_Z este tensiunea Zener și I_Z curent nominal prin diodă. La proiectarea stabilizatoarelor de tensiune trebuie avut grijă ca puterea nominală din catalog a diodei alese să fie mai mare decât puterea care reiese prin calcul cu relația (2.5).

2.8. Alte tipuri de diode

2.8.1. Dioda Varicap

Dioda Varicap este un tip de diodă construit special pentru a înlocui condensatorul variabil care, după cum se știe, prezintă mai multe inconveniente cum ar fi gabaritul mare, capacitatea mică, fiabilitate redusă datorită pieselor mecanice în mișcare.

Simbolurile utilizate pentru reprezentarea diodei Varicap în schemele electronice sunt prezentate în figura 2.13.

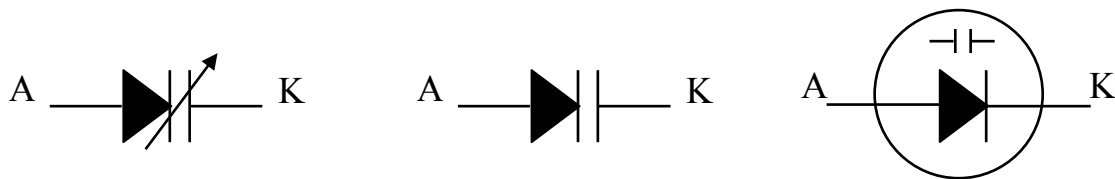


Fig. 2.13.

Dioda Varicap, polarizată invers (potențialul anodului să fie mai mic decât cel al catodului), se comportă ca o capacitate a cărei valoare depinde de tensiunea aplicată. Capacitatea dintre terminalele unei diode Varicap este cu atât mai mare cu cât tensiunea aplicată între catod și anod (tensiunea inversă) este mai mică. În figura 2.14 se arată dependența capacității diodei Varicap în raport cu tensiunea inversă U_{KA} aplicată din exterior.

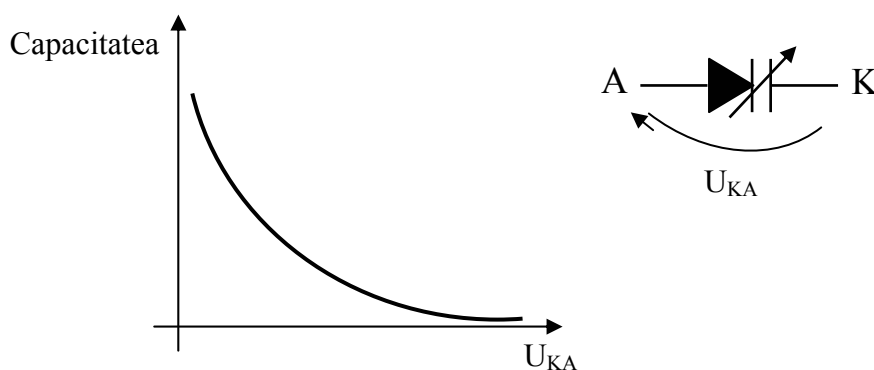


Fig. 2.14.

Dioda Varicap, polarizată direct, se comportă ca o diodă obișnuită.

Dioda Varicap este un dispozitiv semiconductor de bază pentru realizarea oscilatoarelor controlate în tensiune. Frecvența de oscilație se controlează prin tensiunea inversă aplicată diodei Varicap. Deci, principala aplicație a diodei Varicap o constituie acordul circuitelor rezonante din componența radiourilor sau televizoarelor.

2.8.2. Dioda Schottky

Dioda Schottky se realizează prin contactul dintre un metal (de obicei aluminiu) și un semiconductor de tip n . Prin comparație cu dioda semiconductoră obișnuită care conține o joncțiune pn , în locul regiunii de tip p , dioda Schottky are o regiune metalică (fig. 2.15). Acest tip de diodă utilizează proprietățile contactului dintre un metal și un semiconductor [? DCE, Dănilă]



Fig. 2.15.

La o joncțiune pn din siliciu, căderea de tensiune directă la borne este de $(0,6 \div 0,8)V$, iar capacitatea diodei, timpul de răspuns și frecvența de lucru au anumite valori care se precizează în catalogul firmei producătoare. La o diodă Schottky căderea de tensiune directă este de numai $(0,3 \div 0,5)V$, capacitatea este mult mai mică, timpul de răspuns este mai mic, frecvențele la care poate lucra sunt foarte mari.

Diodele Schottky se folosesc în structurile circuitelor integrate logice rapide.

2.8.3. Fotodiada

Fotodiada este un dispozitiv optoelectronic receptor de lumină care transformă radiația electromagnetică în energie electrică [? DCE Dănilă, ?]

Electronică Vasilescu]. Simbolurile de reprezentare în schemele electronice sunt date în figura 2.16.

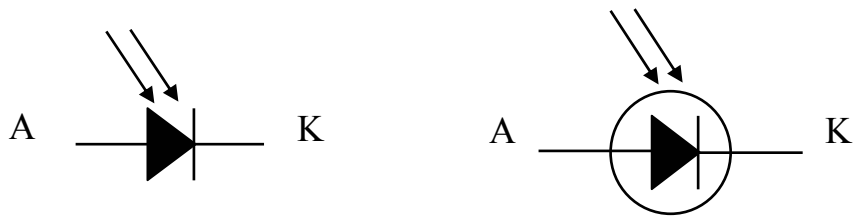


Fig. 2.16.

La această diodă, joncțiunea pn din siliciu este amplasată într-o capsulă transparentă total sau parțial, cu posibilitatea ca la nivelul joncțiunii să acționeze un flux luminos.

În aplicațiile realizate cu acest dispozitiv electronic se disting două tipuri de regimuri de funcționare: regimul de fotodiodă și regimul de fotoelement (sau de celulă fotovoltaică).

1. Dacă joncțiunea pn este polarizată invers prin aplicarea unei tensiuni continue din exterior (fig. 2.17), atunci funcționarea este în *regim de fotodiodă*. Curentul care se stabilește prin circuit (curentul invers prin diodă) depinde de nivelul fluxului luminos la nivelul joncțiunii.

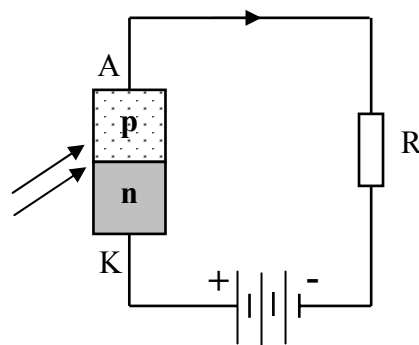


Fig. 2.17.

2. Dacă joncțiunea pn nu este polarizată din exterior (sursa de tensiune continuă lipsește) iar între anod și catod este conectată o rezistență R , atunci sub acțiunea fluxului luminos va apare o tensiune U la bornele

rezistenței (fig. 2.18 a). Fotodioda funcționează în *regim de fotoelement* sau de *celulă fotovoltaică* (simbolul în figura 2.18 b), adică devine o sursă de tensiune continuă.

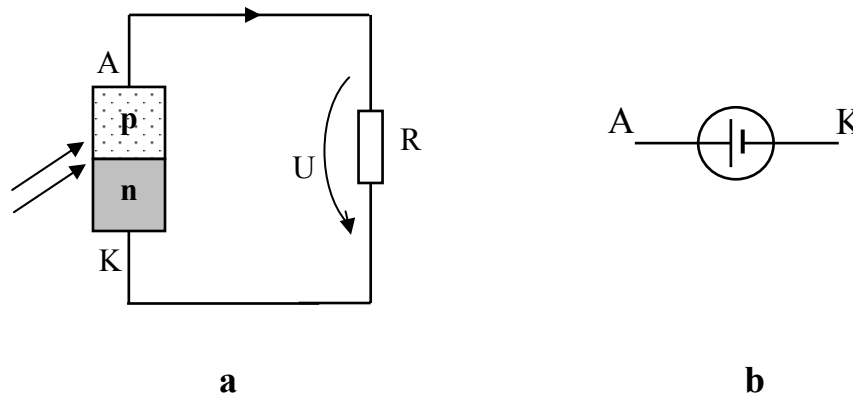


Fig. 2.18.

2.8.4. Dioda electroluminiscentă (LED)

Dioda electroluminiscentă este cunoscută frecvent sub numele de LED, adică **L**ight **E**missive **D**iode și este o diodă construită astfel încât transformă o parte din energia electrică primită în energie luminoasă. Randamentul transformării este de $1 \div 5 \%$, iar lumina emisă are culoarea roșie, galbenă, verde, etc. Există LED-uri care emit în infraroșu și radiația emisă de acestea nu este percepută de ochiul omului. Se bazează pe fenomenul invers celui care se manifestă la fotodiodă și joncțiunea diodei se polarizează în sens direct.

Simbolurile grafice prin care se reprezintă o diodă electroluminiscentă în schemele electronice sunt arătate în figura 2.19.

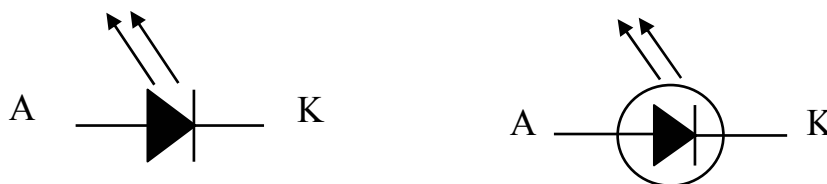


Fig. 2.19.

Emisia de lumină este posibilă prin recombinarea purtătorilor de sarcină aflați în număr mare de o parte și de alta a joncțiunii *pn* [? DCE, Dănilă, ? Electronică, Vasilescu].

Dioda electroluminiscentă se polarizează direct, tensiunea de polarizare are valoarea aproximativă de 2V, curentul direct prin dispozitiv are intensitatea $10 \div 20$ mA. Dacă se polarizează invers, prin diodă nu trece curent și nu va emite lumină.

Un LED se comportă ca și o diodă obișnuită, dar care suplimentar emite lumină atunci când este polarizat direct. Rezistența opusă trecerii curentului electric este mică în starea de conducție, adică în cazul polarizării directe și de aceea LED-ul trebuie înseriat cu o rezistență electrică care are rolul de limitare a intensității curentului care îl străbate. În absența rezistenței de limitare, LED-ul se va defecta („arde”) instantaneu.

Metodologia de calculare a rezistenței de limitare (de protecție) a unui LED se prezintă în [? Bistriceanu].

Aceste diode au timpi de răspuns foarte mici (de ordinul nanosecundelor), prezintă o bună robustețe mecanică și au o durată de viață foarte mare.

Dioda electroluminiscentă se folosește ca indicator luminos. Mai multe diode electroluminiscente special dispuse geometric se folosesc ca elemente de afișare pentru cifre sau litere. Cel mai cunoscut este elementul de afișare cu șapte segmente care permite afișarea tuturor cifrelor din baza de numerație zece. Detalii despre sisteme de afișare a informației se pot găsi în [?, Afișarea alfanumerică a inform.].

2.8.5. Cuploare optoelectronice

Cuplorul optoelectronic se realizează prin asocierea unei diode electroluminiscente LED (emițătorul), cu o fotodiodă (receptorul), ambele introduse în aceeași capsulă metalică sau din material plastic, opacă, cu patru terminale (fig. 2.20 a). Fotodioda poate fi înlocuită cu un fototranzistor (fig. 2.20 b).

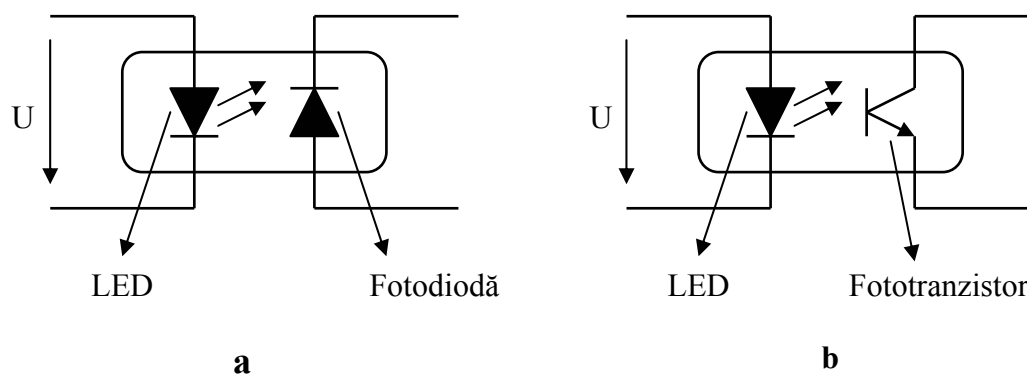


Fig. 2.20.

Cuploarele optoelectronice se utilizează atunci când este necesară separarea (izolarea) galvanică între două circuite electronice între care se transmit informații cu ajutorul semnalelor electrice. Izolarea se realizează prin plasarea emițătorului într-un circuit electronic și a receptorului în celălalt circuit electronic. Cuplajul între circuite este asigurat numai prin fotoni fără nici un conductor electric.

Un astfel de cuplor optoelectronic permite realizarea funcției unui releu (la apariția unui curent prin circuitul de intrare se comandă apariția unui curent prin circuitul de ieșire), sau a unui transformator (transmite semnal analogic, inclusiv componenta sa continuă).

Izolarea galvanică se impune echipamentelor electronice folosite pentru conducerea automată a proceselor. Pentru a proteja circuitele electronice de comandă la supratensiuni accidentale datorate conectării cu echipamentele amplasate în proces, pe canalele de intrare și de ieșire ale echipamentelor de conducere se amplasează optocuploare.