

1.2 DIODA SEMICONDUCTOARE DE PUTERE.

1.2.1 STRUCTURĂ.

În fig.1.13 este prezentată o secțiune longitudinală prin structura unei diode de putere, grosimile straturilor fiind cele tipice. Stratul p^+ , numit stratul anodului, este înalt impurificat, $10^{19}/\text{cm}^3$, iar stratul n^+ , numit stratul catodului, tot cu $10^{19}/\text{cm}^3$. Stratul n^- , cu o impurificare

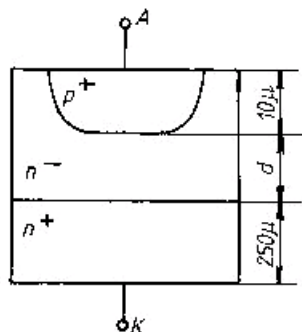


Fig.1.13 Secțiune printr-o diodă de putere.



Fig.1.14 Simbolul diodei.

redușă, $10^{14}/\text{cm}^3$, are rolul discutat în capitolul anterior, grosimea d fiind variabilă, în funcție de tensiunea inversă necesară. Simbolul diodei, același cu al diodei de semnal, este prezentat în fig.1.14, cei doi electrozi, anod și catod, fiind simbolizați prin literele A, respectiv K.

1.2.2 CARACTERISTICA STATICĂ.

Caracteristica statică reprezintă dependența dintre curentul care trece prin diodă în funcție de tensiunea la bornele acesteia. Caracteristica are două ramuri: în cadranul unu pentru polarizare directă și în cadranul trei pentru polarizare inversă (fig.1.15). Pentru polarizarea directă, ca urmare a prezenței stratului n^- , caracteristica statică se aproximează printr-o dreaptă pentru tensiuni $v_F > V_{T0}$, V_{T0} fiind numită tensiune de prag. Ea reprezintă tensiunea peste valoarea căreia

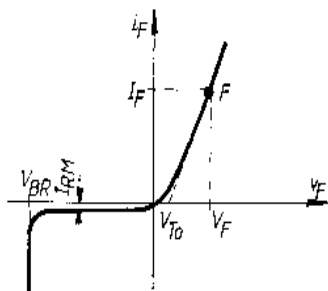


Fig.1.15 Caracteristica statică.

se amorsează conducția prin diodă. Pentru majoritatea diodelor de putere $0,7 \leq V_{T0} \leq 1\text{V}$, sensibil mai mare ca la o joncțiune pn obișnuită. Porțiunea pentru tensiuni $v \leq V_{T0}$ nu interesează d.p.d.v. al aplicațiilor. Un punct de funcționare oarecare F este caracterizat prin perechea I_F și V_F interesând în aplicații din două considerente. Primul se referă la căderea de tensiune pe diodă, care, pentru variații ale curentului în limite admisibile, poate căpăta valori maxime de 1,4 ... 1,6 V, indicând faptul că modificarea căderii de tensiune V_F este relativ redusă, iar rezistența diodei în sens direct redusă ca valoare, de ordinul $\text{m}\Omega$. Cel de al doilea aspect se referă la pierderea de putere în diodă

$$P_F = v_F \cdot i_F \quad (1.9)$$

care va determina regimul termic al joncțiunii. Ecuația indică faptul că regimul termic este determinat esențial de curentul i_F prin dioda, întrucât v_F se modifică relativ puțin.

Ramura caracteristicii statice pentru polarizare inversă este caracterizată prin două mărimi. Pentru

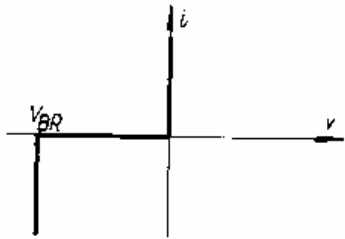


Fig.1.16 Caracteristica statică ideală.

$|v_F| < |V_{BR}|$, curentul invers prin diodă are o valoare constantă, I_{RM} , fiind determinat de curentul invers de saturație. Valoarea acestui curent depinde de mărimea diodei, având valori de la zeci de μA până la zeci de mA , I_{RM} fiind cu atât mai mare cu cât curentul nominal al diodei este mai mare. Corespunzător valorii I_{RM} , rezistența în sens invers, R_{OFF} , are valori de ordinul zecilor de $M\Omega$. Atingerea tensiunii V_{BR} , tensiune de prăbușire inversă, conduce la deteriorarea ireversibilă a diodei. Rezultă că la polarizarea inversă puterea disipată pe diodă este nesemnificativă, în timp ce inegalitatea $|v_F| < |V_{BR}|$ este esențială pentru integritatea diodei. La nivelul caracteristicii ideale, diodă fără pierderi, fig.1.16, dioda se comportă ca un întreruptor ideal, pentru $v > 0$ fiind închis, iar

pentru $v < 0$ fiind deschis. În aplicațiile din electronica de putere, unde curenții și tensiunile sunt de ordinul sutelor sau miilor de amperi și volți, caracteristica ideală aproximează destul de bine caracteristica reală.

1.2.3 CARACTERISTICI DINAMICE.

Comutația cuprinde două regimuri: trecerea din stare blocată în stare de conducție și invers. Variațiile curentului i_F și tensiunii v_F în funcție de timp pentru aceste regimuri reprezintă caracteristicile dinamice ale diodei. Caracteristicile de comutație interesează din următoarele motive:

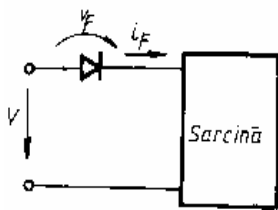


Fig.1.17 Circuit pentru analiza regimurilor dinamice.

- mărimea timpului de intrare în conducție, notat prin t_{ON} , și a timpului de ieșire din conducție (blocare), t_{OFF} ;
- apariția supratensiunilor sau supracurenților ;
- pierderile de putere în diodă generate de aceste regimuri.

În fig.1.17 este prezentat circuitul în care este inclusă dioda, iar în fig.1.18 caracteristicile de comutație corespunzătoare. Se consideră că la momentul $t=0$ dioda este polarizată invers cu o tensiune $-V_R$, care se regăsește integral în bariera de potențial, adică pe stratul n^- . La $t > 0$ tensiunea $-V_R$ este modificată sub formă de treaptă la $+V$. În primul interval, t_1 , sarcina spațială, stocată în stratul n^- ca urmare a tensiunii inverse $-V_R$, este recombinată prin creșterea curentului i_F în sens direct. Când această sarcină este anihilată, joncțiunea capătă polarizare directă și începe injecția de purtători de sarcină în stratul de sărăcire. În acest interval gradientul de curent di_F/dt este, în general, determinat de proprietățile sarcinii, respectiv de inductivitatea acesteia, fiind mult mai mic decât cel maxim admis de diodă. În intervalul

t_2 sarcina spațială din stratul n^- crește, ca urmare a injecției de purtători, la valoarea de regim staționar. Valoarea tipică a timpului de intrare în conducție,

$$t_{ON} = t_1 + t_2 \quad (1.10)$$

este de ordinul microsecundelor. Pierderile de putere pe diodă în intervalul t_{ON} sunt relativ mari ca urmare a valorilor apreciabile ale curentului I_F și tensiunii V_F . Datorită valorii reduse a lui t_{ON} energia disipată în diodă este însă redusă. Dacă dioda funcționează la frecvențe de comutație mici energia disipată pe t_{ON} este nesemnificativă în raport cu cea de regim staționar și se neglijează în calculul regimului termic. Pentru funcționarea la frecvențe mari cele două energii devin comparabile și ca urmare se iau în considerație ambele componente. Comutația din starea de

conducție în starea de blocare începe cu intervalul t_3 prin modificarea tensiunii de alimentare de la

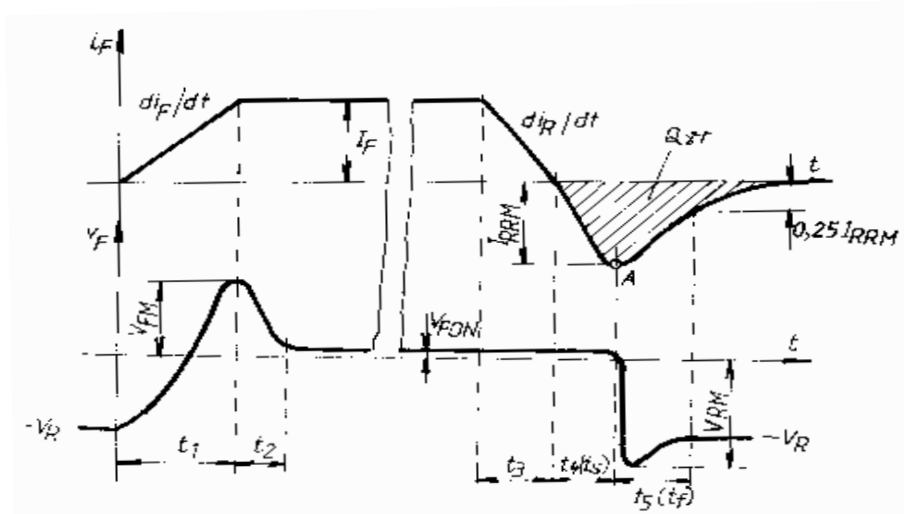


Fig.1.18 Caracteristicile dinamice ale diodei.

+V la $-V_R$. În intervalul t_3 , ca urmare a inversării tensiunii curentul se micșorează cu un gradient di_R/dt determinat de proprietățile sarcinii și sursei, la fel ca pe intervalul t_1 . Tensiunea pe diodă rămâne la valoarea V_{FON} ca urmare a sarcinii stocate în straturile diodei în starea de conducție. Pentru obținerea stării de blocare, prin refacerea barierei de potențial, este necesar ca sarcina spațială din joncțiune, care a constituit suportul curentului în sens direct, să se recombine și anihileze. Acest lucru se realizează în intervalul t_4 prin inversarea sensului curentului prin joncțiune. La sfârșitul intervalului t_4 procesul de recombinare diminuează ca urmare a faptului, cea mai mare parte a sarcinii spațiale din straturi fiind recombinată. Ca urmare curentul invers se micșorează tinzând spre cel invers de saturație I_{RM} . La sfârșitul intervalului t_5 se poate considera că bariera de potențial și capacitatea de blocare pentru tensiuni inverse au fost realizate. Intervalul de timp

$$t_{rr} = t_4 + t_5 \quad (1.11)$$

se numește timp de restabilire inversă, fiind o mărime cu importanță deosebită în electronica de putere. După valoarea timpului de restabilire inversă, t_{rr} , diodele de putere se împart în două categorii:

- diode standard sau de rețea, pentru care $t_{rr} \geq 10 \mu\text{sec}$;
- diode rapide sau de comutație, pentru care t_{rr} este cuprins între $0,2 \dots 1 \mu\text{sec}$.

Timpul total al blocării conducției are valoarea

$$t_{OFF} = t_3 + t_5 + t_f \quad (1.12)$$

și este sensibil mai mare decât t_{rr} , depinzând de t_3 , deci de proprietățile circuitului. La sfârșitul intervalului t_4 are loc o modificare spectaculoasă a gradientului de curent di_R/dt , corespunzător punctului A din fig.1.18. Această modificare, prin fenomenul de autoinducție din inductivitățile circuitului, produce creșterea bruscă a tensiunii inverse la valoarea V_{RM} . Mărimea acesteia precum și gradientul de creștere pot afecta integritatea diodei. Dacă $V_{RM} > V_{BR}$, dioda se străpunge în sens invers. Gradientul dv_R/dt poate produce efecte secundare în capacitățile parazite din joncțiune prin apariția unor curenți necontrolați. Menținerea tensiunii V_{RM} la valori mai mici decât V_{BR} se asigură fie prin proiectare, fie prin prevederea unor circuite speciale de protecție, care reduc atât V_{RM} cât și gradientul dV_R/dt . Puterea disipată în diodă are valori mai mari în intervalul t_f , ca urmare a

valorilor relativ mari ale curentului invers și tensiunii. Luarea în considerație a pierderilor de putere are aceleași aspecte ca în cazul intrării în conducție.

1.2.4 PARAMETRI DE CATALOG PENTRU DIODE.

Luând ca referință notațiile din fig.1.17 se definesc următorii parametri:

- Curentul instantaneu i_F cu o variație oarecare, depinzând de sursa de alimentare și sarcină.
- Curentul mediu pe o perioadă definit prin

$$I_{FAV} = \frac{1}{T} \int_0^T i_F(t) dt \quad (1.13)$$

Astfel pentru variația curentului din fig.1.19, caracteristică unei alimentări sinusoidale,

$$I_{FAV} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} \sqrt{2} I \sin \omega t dt = \frac{\sqrt{2} I}{\pi} \quad (1.14)$$

- Valoarea efectivă a curentului definită prin

$$I_{FRMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_F^2(t) dt} \quad (1.15)$$

Pentru exemplul din fig.1.19 valoarea efectivă este

$$I_{FRMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} [\sqrt{2} I \sin \omega t]^2 dt} = \frac{I}{\sqrt{2}} \quad (1.16)$$

Curentul direct mediu maxim, numit și nominal, I_{FAVM} , reprezintă valoarea medie maximă permisă pentru o diodă corespunzător unui curent direct, de formă sinusoidală sau dreptunghiulară, cu o durată de conducție de jumătate de perioadă și care determină o încălzire a diodei admisibilă.

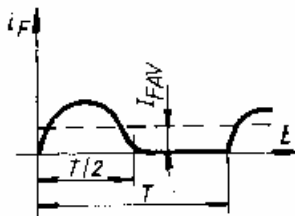


Fig.1.19 Calculul curentilor.

e) Valoarea de vârf maximă admisibilă a curentului direct I_{FSM} este constituită de valoarea de vârf a unei semialternanțe sinusoidale cu durată de 10 msec. I_{FSM} este indicat în cataloage pentru temperatura maximă a joncțiunii când are valoarea minimă.

- Integrala de curent $I^2 t$ reprezintă valoarea maximă a energiei care poate fi suportată de diodă, corespunzător curentului I_{FSM} , pe o durată $t_1 = 10$ msec.
- Curentul invers maxim I_{RRM} , definit în fig.1.18.
- Tensiunea directă maximă V_{FM} este tensiunea pe diodă în sens direct pentru un anumit curent direct și temperatură
- Tensiunea inversă de vârf repetitivă V_{RRM} , reprezentând cea mai mare tensiune inversă ce se poate aplica în mod repetat, periodic, fără a periclita integritatea diodei.
- Temperatura de funcționare a joncțiunii θ_j , reprezentând gama de temperaturi în care diodă este aptă de funcționare. Există o limită maximă, θ_{jM} , cuprinsă, în funcție de firma care produce dioda, între 125°C și 150°C.
- Rezistențele termice de transfer ale căldurii dinspre joncțiune spre exterior. Se definesc trei rezistențe termice:
 - rezistența termică joncțiune-capsulă, R_{thjc} , măsurabilă în °C/W;
 - rezistența termică capsulă-radiator, R_{thCR} ;

- rezistența termică suplimentară joncțiune-capsulă, ΔR , care depinde de forma curentului, sinusoidal sau dreptunghiular, și durata θ a acestuia pe o perioadă.

1.2.5 REGIMUL TERMIC AL DIODELOR.

Pentru orice diodă se indică ca dată nominală temperatura maximă admisibilă a joncțiunii, θ_{JM} . Păstrarea integrității diodei în orice regim de funcționare implică nedepășirea acestei temperaturi. Temperatura de la un moment dat a unei diode este determinată de mai mulți factori. Pe de o parte de sursa care produce încălzirea, reprezentată de pierderile de putere ca urmare a trecerii curentului în sens direct sau invers. O parte din căldura produsă se înmagazinează în structura diodei, capsulă și radiator, iar altă parte se transmite spre mediul exterior. Transmiterea căldurii spre mediu se face prin cele trei modalități: conducție, convecție și radiație. În cele mai multe din aplicațiile industriale, cu răcire cu aer, convecția este predominată. Se consideră cazul cel mai frecvent când dioda este montată pe un radiator, iar răcirea se face prin convecția naturală sau forțată a aerului. Pierderile de putere în joncțiune, P_j , se furnizează de fabricanți în funcție de valoarea medie a curentului în sens direct, forma, sinusoidală sau dreptunghiulară, și durata θ a impulsului de curent. O astfel de evaluare este prezentată în fig.1.20, pentru un regim în impuls dreptunghiular cu durata θ . Curentul I_{FAV} la care poate funcționa dioda este limitat superior prin linia întreruptă cu RMS, care reprezintă valoarea efectivă maxim admisă de diodă. O diagramă asemănătoare este data în cataloage pentru impulsuri sinusoidale. În regim staționar diferitele părți ale ansamblului diodă-radiator ajung în regim permanent, adică la temperaturi constante, întreaga căldură produsă în joncțiune evacuându-se spre mediul exterior.

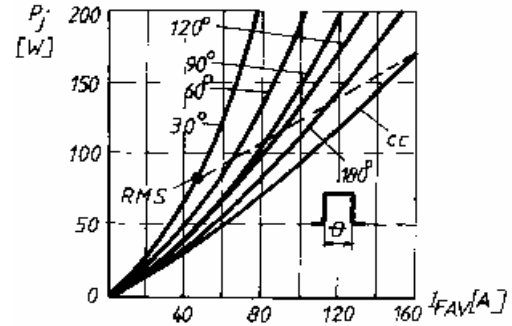


Fig.1.20 Pierderile de putere în diodă.

Prin analogie cu circuitele electrice, se realizează o schemă echivalentă termică, fig.1.21, unde:

- rezistențele termice sunt echivalente rezistențelor electrice;
- puterea disipată prin generator de curent electric;
- temperaturile prin tensiuni și potențiale electrice.

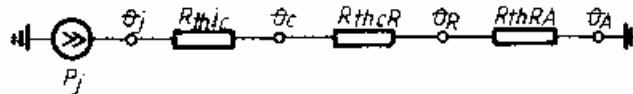


Fig.1.21 Schema echivalentă pentru regimul termic permanent.

În fig. 1.21 θ_j , θ_C , θ_R și θ_A sunt temperaturile joncțiunii, capsulei, radiatorului și mediului ambiant, iar R_{thRA} – rezistența termică radiator-aer.

Determinarea temperaturii joncțiunii θ_j pentru o funcționare dată se face după

$$\theta_j = \theta_A + P_j \sum R_{th}, \quad (1.17)$$

unde

$$\sum R_{th} = R_{thJC} + R_{thCR} + R_{thRA} + \Delta R \quad (1.18)$$

În cazul lucrului în frecvențe înalte, peste 1kHz pierderile de putere provocate de comutațiile ON-OFF și OFF-ON nu se mai pot neglija și se introduc în calcul.

1.2.6 ALEGEREA DIODELOR.

Alegerea diodelor utilizate într-un convertor se face din două puncte de vedere, în curent și tensiune. În curent alegerea constă în adoptarea unei diode cu un curent nominal

$$I_{FAVM} \geq k_S I_{FAV}, \quad (1.19)$$

unde I_{FAV} este curentul mediu prin diodă, valoarea lui depinzând de tipul și schema convertorului, iar k_S coeficient de suprasarcină admisibilă. În tensiune alegerea constă în stabilirea tensiunii inverse repetitive maxime, V_{RRM} , după

$$V_{RRM} \geq (1,5 \dots 2,5) V_{RW}, \quad (1.20)$$

unde V_{RW} este tensiunea inversă de vârf maximă ce poate apare pe diodă în mod repetat. Multiplicarea tensiunii V_{RW} cu 1,5 . . . 2,5 are în vedere supratensiunea de comutație ce apare în procesul de blocare și eficiența circuitului de protecție la supratensiuni interne. Astfel dacă se prevede un circuit de protecție la supratensiuni se iau valorile mici, iar în cazul absenței acestui circuit, situație mai des întâlnită în practică, valorile mari. Atât pentru I_{FAVM} cât și pentru V_{RRM} valorile sunt standardizate. Dacă pentru I_{FAVM} valorile nominale sunt diferite în funcție de firma producătoare, pentru V_{RRM} se fabrică diode cu tensiuni în trepte de 100V. După alegerea diodei se face verificarea termică în regim staționar avându-se în vedere funcționarea la o temperatură de regim a joncțiunii cât mai aproape de θ_{JM} . Verificarea termică are în vedere fie calcularea temperaturii θ_{JM} pentru un radiator ales, fie alegerea radiatorului pentru a se asigura funcționarea cât mai aproape de θ_{JM} .