

**UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" BUCURESTI
DEPARTAMENTUL DE FIZICA**

**LABORATORUL DE FIZICA ATOMICA SI FIZICA SOLIDULUI
BN 120 A**

DIODA TUNEL

BUCURESTI / 2004

DIODA TUNEL

1. Scopul lucrării

Această lucrare de laborator are următoarele scopuri :

- cunoașterea și înțelegerea funcționării unei diode tunel ;
- efectuarea de măsurători pentru ridicarea caracteristicii (experimentale) curent - tensiune a acestui dispozitiv ;
- efectuarea de calcule pentru stabilirea valorii unor constante specifice ;
- reprezentarea (utilizând valorile constantelor calculate mai înainte) unei caracteristici teoretice curent - tensiune pentru dioda tunel măsurată anterior ;
- compararea (vizualizarea diferențelor) între caracteristica experimentală și cea teoretică ;
- calculul rezistenței diferențiale negative a diodei tunel utilizate în experiment.

2. Teoria lucrării

Dioda tunel este un dispozitiv electronic, cu proprietăți diferite de cele ale unei diode obișnuite.

Primul pas în realizarea ei a fost reprezentat de descoperirea - în 1957, de către fizicianul japonez Leo Esaki - a "efectului tunel" al electronilor, manifestat într-o joncțiune semiconductoare **p - n**, în cazul în care cele două regiuni au fost puternic dopate (concentrația atomilor donori în regiunea **n** și a celor acceptori în regiunea **p** fiind de ordinul $10^{19} \div 10^{20}$ atomi/cm³, aproape de concentrația purtătorilor de sarcină din metale). Pe baza acestui efect el a realizat (în 1958) dispozitivul cu semiconductori, cunoscut astăzi sub numele de **dioda Esaki** sau **dioda tunel**¹. În această diodă banda interzisă joacă rolul barierei de potențial (studiată în mecanică cuantică).

Despre etapele descoperirii sale autorul ei povestește (în articolul "*Călătorie lungă în tunelare*", apărut la 12 decembrie 1973 în revista "Physics Today") :

*"...Astfel, înainte de toate, am încercat să preparăm joncțiuni **p - n** de **Ge** puternic dopat. Ambele concentrații, a donoșilor și a acceptoșilor, erau suficient de mari astfel ca partea respectivă a joncțiunilor să fie degenerată, adică energiile Fermi să fie localizate destul de adânc în banda de conducție sau de valență... Lățimea calculată a joncțiunii la polarizare nulă era de aproximativ 200 Å, fapt confirmat prin măsurătorile de capacitate.*

Prin îngustarea mai departe a joncțiunii (adică descreșterea drumului de tunelare), prin creșterea nivelului de dopare, rezistența negativă a fost observată clar la orice temperatură. Caracteristica a fost analizată în termenii tunelării interbandă. În procesul de tunelare, dacă acesta este elastic, energia electronului se conservă. Figura 1 arată diagramele de energie ale diodei tunel pentru polarizare zero și cu tensiunile aplicate U_1 , U_2 și respectiv U_3 .

*Pe măsură ce polarizarea crește până la tensiunea U_p curentul de tunelare interbandă continuă să crească, cum se arată în figura 1.b. Totuși, crescând mai departe tensiunea aplicată, cum se arată în figura 1.c, pe măsură ce banda de conducție din domeniul de tip **n** nu se mai încrucișează cu banda de valență din domeniul de tip **p**, curentul descrește datorită lipsei stărilor permise de energie corespunzătoare pentru tunelare. Când tensiunea atinge U_v sau mai mult, va domina curentul normal de difuzie (sau termic) ca în cazul diodelor **p - n** obișnuite."*

Caracteristica curent - tensiune a unei diode tunel este indicată în figura 2. Se pot observa cele trei zone distincte de funcționare : A-B (normală), B-D (în care creșterea tensiunii produce o scădere a curentului) și D-E (normală).

¹ În 1973 Leo Esaki și I. Giaver au obținut premiul Nobel în fizică pentru "descoperirea experimentală a efectului tunel în semiconductori, respectiv în supraconductori".

Existența zonei B-D, în care o variație pozitivă a tensiunii ($\Delta U > 0$) produce o variație negativă a curentului ($\Delta i < 0$) permite să se spună că **dioda tunel este un dispozitiv electronic cu rezistență dinamică negativă**.

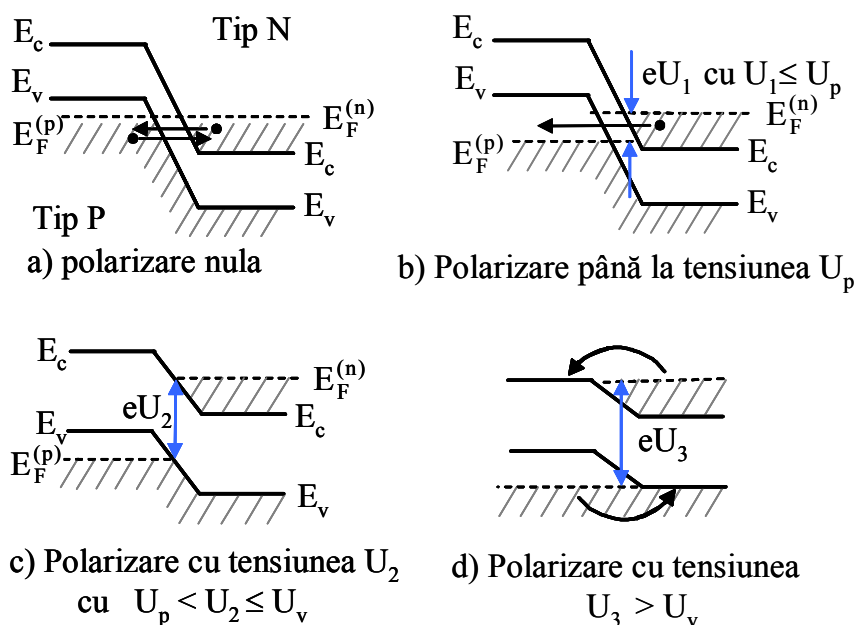


Figura 1

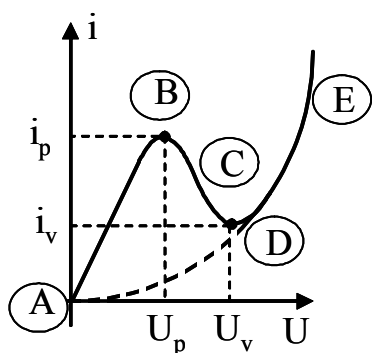


Figura 2

În figura 2 notațiile i_p și U_p desemnează curentul și respectiv tensiunea **de pic** (de vârf, maximă) iar notațiile i_v și U_v corespund curentului, respectiv tensiunii **de vale** (minime).

Deoarece efectul de tunelare este un efect cuantic, dioda tunel își păstrează proprietățile (caracteristica) până la frecvențe foarte înalte (de ordinul GHz), ceea ce o face extrem de utilă în aplicații din domeniul microundelor sau în construcția circuitelor rapide de impulsuri (inclusiv în tehnica de calcul) ca generatoare de semnal.

În literatura de specialitate (dispozitive electronice, [2]) se poate citi despre utilizarea diodei tunel în circuite de amplificare, oscilație și comutație. Ea se realizează - la ora actuală - folosind și alte materiale semiconductoare (în plus față de Ge, utilizat inițial) : Si, InSb, GaAs, PbTe, GaSb, SiC, etc.

2.1. Caracteristica curent - tensiune a unei diode tunel

În figura 2 se observa că este extrem de complicat de formulat o relație matematică, care să descrie simultan dependența dintre curent și tensiune în toate cele trei zone mai sus menționate. Din acest motiv - în practică - se folosește o relație empirică, având forma :

$$i = C \cdot U \cdot e^{-\alpha U} + B \cdot (e^{\beta U} - 1) \quad (0)$$

unde notațiile C , α , B și β desemnează constante de material pozitive. Primul termen din dependența $i(U)$ (adică $C \cdot U \cdot e^{-\alpha U}$) desemnează curentul tunel, iar al doilea curentul de conducție obișnuit dintr-o diodă semiconductoare. Valoarea acestora se calculează prin

intermediul valorilor experimentale i_p , U_p , i_v și U_v , folosindu-se setul de relații prezentat în anexă:

Prin urmare **algoritm** care permite stabilirea **caracteristicii teoretice** a unei diode tunel implică următoarele etape :

- efectuarea de măsurători pentru reprezentarea grafică a caracteristicii experimentale curent - tensiune (curent în funcție de tensiunea aplicată) ;
- citirea (de pe grafic) a valorilor experimentale i_v , U_v , i_p și U_p ;
- calcularea constantelor de material α , C , β și B ;
- folosind aceste constante în relația (1) se trece la calcularea curentului teoretic pentru diferite valori ale tensiunii (aceleași valori care au fost utilizate în măsurători pentru caracteristica experimentală) ;
- reprezentarea grafică $i_{teoretic} = f(U)$.

3. Descrierea montajului experimental

Pentru determinarea caracteristicii experimentale curent - tensiune se folosește montajul din figura 3, cu următoarele precizări :

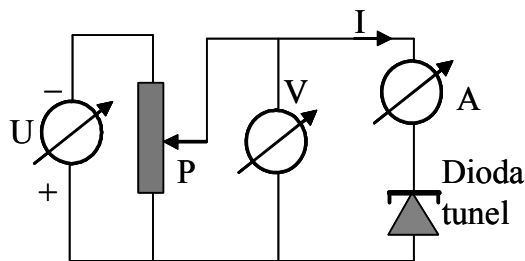


Figura 3

U reprezintă o sursă de tensiune stabilizată (în domeniul $0 \div 24$ V) ;

P este potentiometrul sursei (cu două reglaje de selecție : BRUT și FIN) care permite reglarea (impusă) a tensiunii de polarizare a diodei ;

V este un voltmetru care înregistrează valorile tensiunii de polarizare (este deja fixat pe **scala de 25 V** / se recomandă a nu se umbla la comutatorul de scală !) ;

A este un **miliampermetru** care - pentru efectuarea măsurătorilor - **a fost deja fixat pe scala de 24 mA.**

4. Modul de lucru și prelucrarea datelor experimentale

Deoarece trebuie parcurse toate etapele specificate de algoritmul precizat mai sus, primul lucru care trebuie făcut constă în efectuarea experimentului.

I. Se modifică tensiunea de polarizare aplicată pe dioda tunel și se citesc valorile corespunzătoare ale curentului. Datele se trec în primele două coloane ale Tabelului 1.

Deoarece pe miliampermetru se citesc - atunci când se efectuează experimentul - valori exprimate în diviziuni, trecerea la valorile din cea de-a treia coloană a tabelului se face ținându-se cont de factorul de scală.

În principiu orice factor de scală se calculează prin aplicarea regulii de trei simplă (bazată pe directă proporționalitate dintre mărimile implicate) : "dacă la N diviziuni care corespund capului de scală al aparatului corespunde valoarea maximă A a capului de scală, la o singură diviziune cât corespunde ?"

$$N (= 150 \text{ div}) \dots\dots\dots A (\text{în cazul nostru } 24 \text{ mA})$$

$$1 \text{ div} \dots\dots\dots x \text{ (mA)}$$

$$\Rightarrow x = \frac{A}{N} = \frac{24 \text{ mA}}{150 \text{ div}} = 0,16 \frac{\text{mA}}{\text{div}}$$

Prin urmare, toate valorile exprimate în diviziuni trebuie înmulțite cu x , care reprezintă așa-numitul factor de scală. *Ca exemplu* : o valoare de 30 div pe scala de 24 mA înseamnă :

$$30 \text{ div} \cdot x = 30 \text{ div} \cdot 0,16 \frac{\text{mA}}{\text{div}} = 4,8 \text{ mA}$$

Tabelul 1

Date experimentale			Valori calculate (teoretice)
U (V)	i (div)	i (mA)	i _{teoretic} (mA)
0			
0,5			
1			
1,5			
2			
2,5			
3			
3.5			
4			
.....			
21			
21,5			

II. Se reprezintă grafic dependența experimentală $i = f(U)$ / Atenție : valorile tensiunii U se distribuie pe axa Ox (pe abscisă) în timp ce valorile curentului i se distribuie pe axa Oy (pe ordonată).

III. Se identifică punctul B (unde se citesc valorile lui U_p și i_p) și punctul D (unde se citesc valorile U_v , i_v). Se efectuează calculele necesare, utilizând setul de relații din anexă.

Datele se completează în referat sub forma :

$$\left. \begin{array}{l} i_p = \dots \\ U_p = \dots \\ i_v = \dots \\ U_v = \dots \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \alpha = \dots \\ C = \dots \\ \varphi_1 = \dots \\ \varphi_2 = \dots \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \beta = \dots \\ B = \dots \end{array} \right.$$

Atenție : **a nu se uita** precizarea unităților de măsură și a ordinelor de mărime pentru fiecare dintre mărimile fizice și respectiv constantele care intervin în calcule.

IV. Se calculează (folosind datele astfel obținute și relația (0)) valorile curentului teoretic pentru aceleași valori ale tensiunii (utilizate experimental), care sunt deja trecute în prima coloană a tabelului. Rezultatele calculelor se trec în tabel în cea de-a treia coloană, desemnată i_{teoretic} .

V. Pe un alt grafic se reprezintă caracteristica teoretică. Se fac aprecieri calitative în ceea ce privește aspectul comparativ al celor două curbe.

VI. In zona B-D a caracteristicii teoretice (zona corespunzătoare rezistenței negative), pe porțiunea relativ liniară - se alege un punct C (vezi figura 2). In acest punct se calculează :

$$R_d = \frac{\Delta U}{\Delta i}$$

Se compară această valoare cu cea obținută - procedând asemănător - de pe caracteristica experimentală.

VII. Se compară toate rezultatele obținute teoretic și experimental (curenți, tensiuni, constante de material, aspectul curbelor, etc)

6. Intrebări

1. Cum se comportă o diodă "normală" (cum arată caracteristica ei la polarizare directă și inversă) ? Care sunt elementele comune și diferențele dintre o diodă "normală" și dioda tunel ?
2. Cum credeți că se modifică caracteristica diodei tunel la creșterea temperaturii ? Dar în cazul unei diode "normale" ?
3. O aplicație importantă în cazul diodelor "normale" este redresarea curentului în regim alternativ. Credeți că o diodă tunel poate fi folosită în acest scop ?
4. Ce credeți că înseamnă - prin prisma bilanțului de putere într-un circuit electronic - rezistența dinamică negativă ?

7. Bibliografie

- [1] L.J. Giacoletto, "Electronics Designers' Handbook. Section 10", McGraw-Hill Book Company, New York, 1977
- [2] Em. Vasiliu, "Inițiere în dispozitive semiconductoare", Editura Tehnică, București, 1970
- [3] D. Dascălu, M. Profirescu, A. Rusu, I. Costea, "Dispozitive și circuite electronice", Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982
- [4] Ioan - Ioviț Popescu, I. Dima, "Premiile Nobel pentru fizică. 1901 - 1998", Editura Academiei Române, București, 1998

Anexa
Determinarea parametrilor din
caracteristica curent - tensiune a unei diode tunel

În figura 2 se observa că este extrem de complicat de formulat o relație matematică, care să descrie simultan dependența dintre curent și tensiune în toate cele trei zone mai sus menționate. Din acest motiv - în practică - se folosește relația empirică, de forma :

$$i(U) = C \cdot U \cdot e^{-\alpha U} + B \cdot (e^{\beta U} - 1) \quad (1)$$

unde notațiile **C**, **α** , **B** și **β** desemnează constante de material pozitive. Valoarea acestora se calculează prin intermediul valorilor experimentale punctelor de extrem-maximul de curent din punctul B și minimul de curent din punctul D din fig. 2 - caracterizate de coordonatele

$B(i_p, U_p)$ respectiv $D(i_v, U_v)$. Punctele de extrem sunt date de ecuația $\frac{di}{dU} = 0$, adică:

$$\frac{di}{dU} = C \cdot e^{-\alpha U} - C \cdot \alpha \cdot U \cdot e^{-\alpha U} + B \cdot \beta \cdot e^{\beta U} \quad (2)$$

Deoarece determinarea directă a celor 4 coeficienți C, α , B și β este dificilă, vom folosi o metoda aproximativă, a cărei valabilitate va fi verificată în final. Admițând ca pentru tensiuni $U \leq U_p$ curentul tunel este dominant în comparație cu curentul de conducție, adică avem:

$$C \cdot U \cdot e^{-\alpha U} \approx B \cdot (e^{\beta U} - 1) \quad (3)$$

ecuația de extrem pentru maximul B devine:

$$\frac{di}{dU} = C \cdot e^{-\alpha U} (1 - \alpha \cdot U) = 0 \quad (4)$$

Rezultă:

$$\alpha = \frac{1}{U_p} \quad (5)$$

Deoarece în punctul B avem aproximativ $i_p = i(U_p) \approx C \cdot U_p \cdot e^{-\alpha U_p} = \frac{C \cdot U_p}{e}$, obținem:

$$C = e \cdot \frac{i_p}{U_p} \quad \text{unde } e \cong 2,72 \quad (6)$$

Punctul de minim D este dat de condiția completă de extrem (2); introducând α , C din (5) respectiv (6), rezultă condiția de extrem :

$$\left. \frac{di}{dU} \right|_{U=U_v} = \frac{e \cdot i_p}{U_p} e^{-\frac{U_v}{U_p}} - \frac{e \cdot i_p}{U_p^2} \cdot U_v \cdot e^{-\frac{U_v}{U_p}} + B \cdot \beta \cdot e^{\beta U_v} = 0 \quad (7)$$

În punctul D avem $i(U_v) = i_v$, adică:

$$i_v = e \cdot i_p \cdot \frac{U_v}{U_p} \cdot e^{-\frac{U_v}{U_p}} + B \cdot (e^{\beta U_v} - 1) \quad (8)$$

Relațiile (7) și (8) reprezintă un sistem de ecuații din care putem afla parametrii B și β :

$$\begin{cases} B \cdot (e^{\beta U_v} - 1) = i_v - e \cdot i_p \cdot \frac{U_v}{U_p} \cdot e^{-\frac{U_v}{U_p}} \\ B \cdot \beta \cdot e^{\beta U_v} = e \cdot i_p \cdot \frac{1}{U_p} \cdot e^{-\frac{U_v}{U_p}} \cdot \left(\frac{U_v}{U_p} - 1 \right) \end{cases} \quad (9)$$

Cu notațiile:

$$\phi_1 = i_v - e \cdot i_p \cdot \frac{U_v}{U_p} \cdot e^{-\frac{U_v}{U_p}} \quad (10.1)$$

$$\phi_2 = e \cdot i_p \cdot \frac{1}{U_p} \cdot e^{-\frac{U_v}{U_p}} \cdot \left(\frac{U_v}{U_p} - 1 \right) \quad (10.2)$$

sistemul (9) capătă o formă compactă:

$$\begin{cases} B \cdot (e^{\beta \cdot U} - 1) = \phi_1 \\ B \cdot \beta \cdot e^{\beta \cdot U_v} = \phi_2 \end{cases} \quad (11)$$

Eliminând necunoscuta B din prima ecuație în a doua, obținem ecuația în β :

$$\frac{\beta \cdot e^{\beta \cdot U_v}}{e^{\beta \cdot U} - 1} = \frac{\phi_1}{\phi_2}$$

Introducând variabila adimensională $x = \beta \cdot U_v$, ecuația de mai sus ia forma:

$$\frac{x \cdot e^x}{e^x - 1} = U_v \cdot \frac{\phi_1}{\phi_2} = \lambda \quad (12)$$

unde am folosit notația $U_v \cdot \frac{\phi_1}{\phi_2} = \lambda$. Vom rezolva ecuația (12) pe cale grafică, folosind

reprezentarea funcției $f(x) = \frac{x \cdot e^x}{e^x - 1}$ de mai jos:

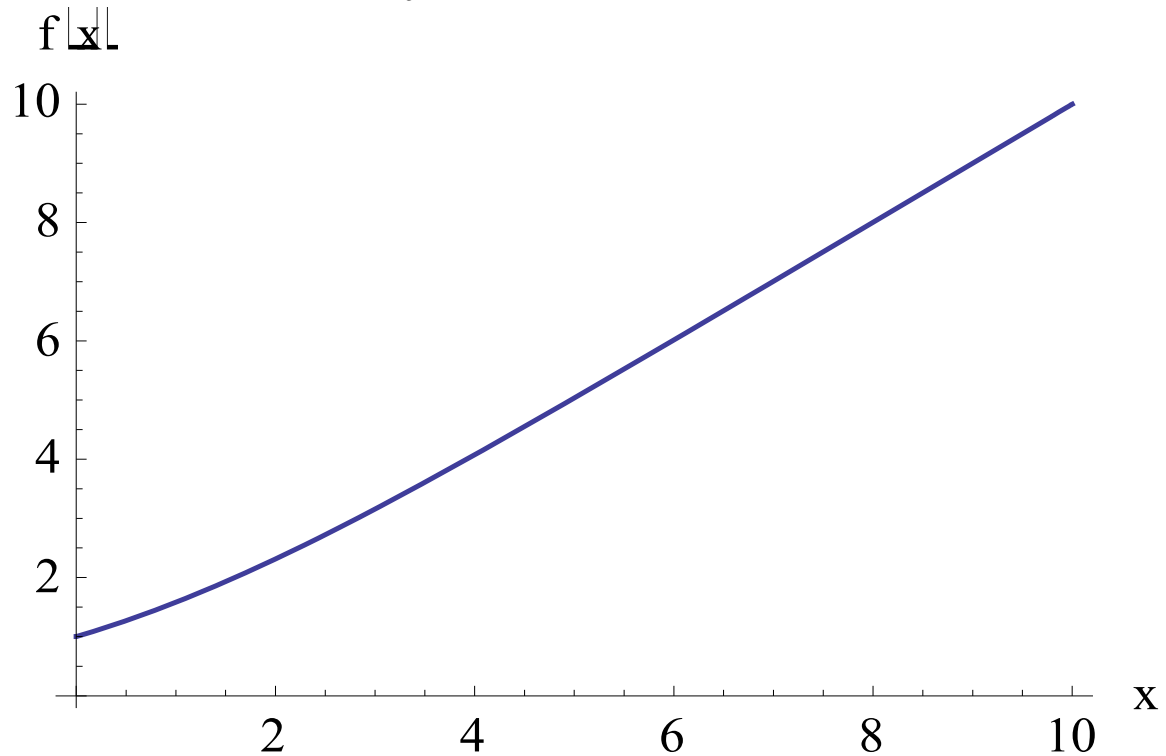


Fig.4 Reprezentarea funcției f(x)

După calculul parametrului $\lambda = U_V \cdot \frac{\phi_1}{\phi_2}$, se obține soluția x a ecuației (12), grafic, ca intersecție dintre graficul funcției și dreapta orizontală $f = \lambda = U_V \cdot \frac{\phi_1}{\phi_2}$; corespunzător, parametrul β devine:

$$\beta = x / U_V \quad (13)$$

Parametrul B poate fi calculat de exemplu din ecuația $B \cdot \beta \cdot e^{\beta \cdot U_V} = \phi_2$:

$$B = \frac{\phi_2}{\beta \cdot e^{\beta \cdot U_V}} \quad (14)$$