

LUCRAREA NR. 2

DIODA SEMICONDUCTOARE

Scopul lucrării - Ridicarea caracteristicilor și determinarea principalilor parametri ai diodelor semiconductoare; studiul comportării diodei semiconductoare în circuite elementare.

1. Caracteristica statică

$$i_D = I_0 (e^{\frac{qu_D}{kT}} - 1) \quad (2.1)$$

Reprezintă dependența curent-tensiune, teoretică, a unei diode *semiconductoare* dedusă prin analiza fenomenelor fizice în joncțiunea PN ideală ce au loc la aplicarea unei tensiuni din exterior.

Semnificația mărimilor din formulă este:

I_0 - curentul de saturație al diodei;

u_D - tensiunea de polarizare;

k - constanta lui Boltzman;

q - sarcina electronului;

T - temperatura în Kelvini;

γ - constantă.

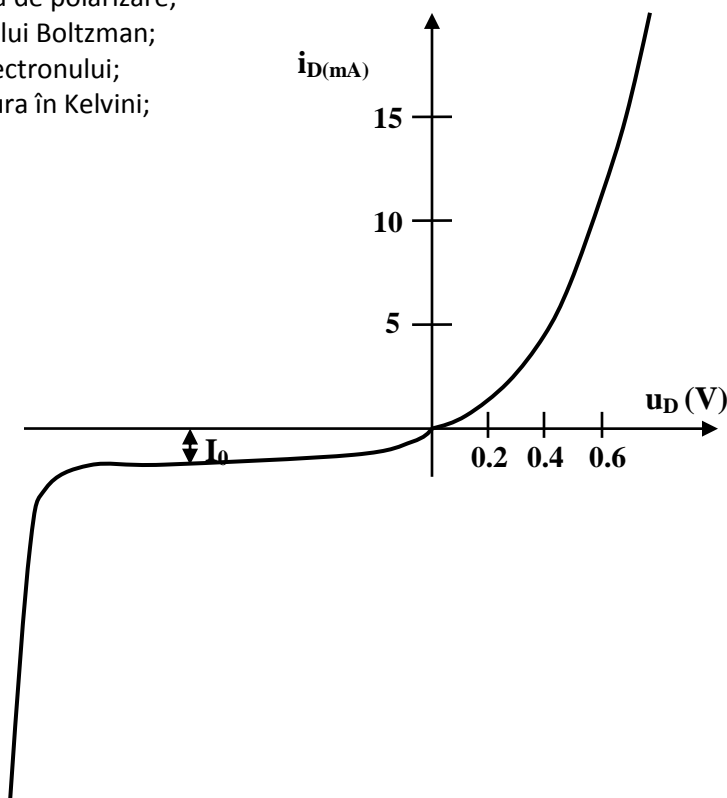


Fig 2.1 Caracteristica statică a diodei semiconductoare

Curentul de saturație I_0 este dependent de parametrii fizici, tehnologici și geometrici ai joncțiunii PN:

$$I_0 = qn_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right) A \quad (2.2)$$

A - suprafața joncțiunii;

n_i - concentrația intrinsecă de purtători;

D_p, D_n - constantele de difuzie;

L_p, L_n - lungimile de difuzie ale purtătorilor de sarcină;

N_D, N_A - concentrațiile de impurități.

Valori uzuale ale curentului de saturație: 10÷100 nA pentru dioda din siliciu de mică putere; 1 ÷100 μ A pentru dioda din germaniu.

La curenți direcți de ordinul 1÷10 mA (valori des întâlnite în practică) *tensiunea directă* pe diodă este de **0,2 – 0,3 V** pentru diodele din **germaniu** respectiv **0,6 – 0,8 V** pentru diodele din **siliciu**.

Constanta γ – este un coeficient cuprins între 1 și 2 (pentru germaniu este mai apropiat de 1 iar pentru siliciu mai aproape de 2). Rezultă din considerarea efectului de recombinare din zona de sarcină spațială la tensiuni de polarizare directe mici (efect cu importanță mai mare la diodele din siliciu la temperatura camerei).

La tensiuni directe mai mari, caracteristica statică tinde să se liniarizeze datorită căderilor de tensiune pe zonele neutre ale joncțiunii PN, care nu mai pot fi neglijate.

2. Dependența de temperatură a caracteristicii statice a unei diode semiconductoare este foarte puternică, înregistrându-se o dublare a curentului de saturație la fiecare 10°C pentru diode din germaniu, respectiv la fiecare 6°C pentru diodele din siliciu. Această dependență poate fi pusă în evidență și prin coeficientul de variație a tensiunii directe de pe diodă cu temperatura, la curent constant. Teoretic, această variație este de circa –2 mV per grad Celsius, pentru ambele tipuri de material utilizate curent pentru realizarea diodelor semiconductoare.

3. Determinarea mărimilor I_0 și γ

Se reprezintă ecuația diodei semiconductoare la scară semilogaritmică (ca în *figura 2.2*).

Pe abscisă se reprezintă tensiunea aplicată pentru conducție directă la scară liniară și pe ordonată curentul prin diodă la scară logaritmică.

Panta dreptei astfel obținute permite deducerea coeficientului γ . În relația (2.1) se neglijează $-I_0$ și se logaritmează, după care se face separarea de variabile pentru obținerea relației lui γ :

$$\gamma = \frac{q}{kT} \frac{1}{2,3} \frac{\Delta u_D}{\Delta \lg i_D} \quad (2.3)$$

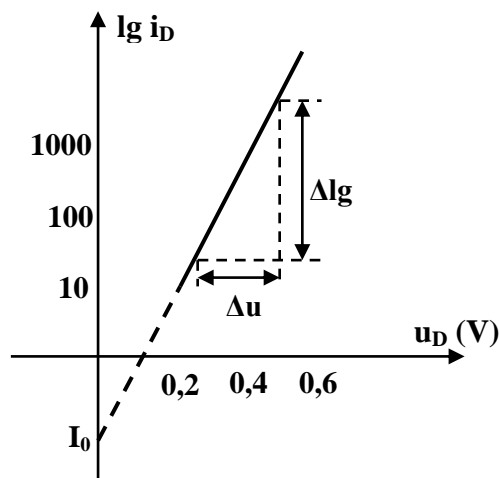


Fig. 2.2 - Caracteristica statică a diodei la polarizare directă, la scară semilogaritmică

Prin prelungirea aceleiași drepte, la intersecția cu axa ordonatei se obține curentul de saturație I_0 .

4. Punctul static de funcționare

În circuitele electronice, diodele semiconductoră pot îndeplini mai multe funcțiuni (redresare, detecție, limitare, etc.), în multe situații fiind necesară stabilirea unui regim static de funcționare.

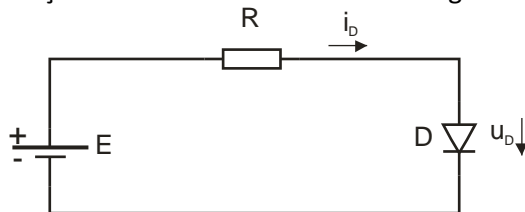


Fig. 2.3 – Circuit pentru determinarea punctului static de funcționare al diodei

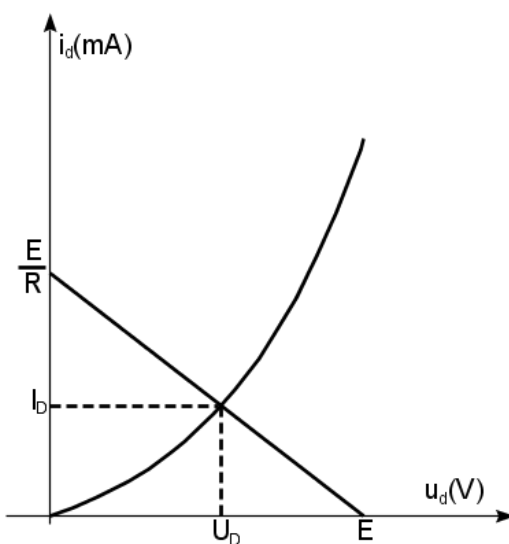


Fig. 2.4 Determinarea teoretică a punctului static de funcționare al diodei

Pentru circuitul elementar din figura 2.3 punctul static de funcționare se determină prin rezolvarea grafoanalitică a sistemului de ecuații format din ecuația caracteristicii statice a diodei (2.1) și ecuația dreptei statice de funcționare :

$$u_D = E - R \cdot i_D \quad (2.4)$$

Punctul static de funcționare M are coordonatele $M(U_D, I_D)$, iar în acest punct de funcționare dioda este caracterizată din punct de vedere al semnalelor lent variabile (ce pot fi aplicate în serie cu tensiunea continuă E) printr-o rezistență dinamică, pentru care se deduce relația :

$$r_d = \gamma \frac{kT}{qI_D} \quad (2.5)$$

Rezistența dinamică r_d se determină experimental prin calculul pantei caracteristicii statice, în punctul static de funcționare M conform relației:

$$r_d = \left. \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} \right|_M \quad (2.6)$$

5. Polarizare inversă

La polarizare inversă, conform ecuației teoretice (2.1), curentul este constant și egal cu $-I_0$, așa cum se constată în *figura 2.1*, pentru partea de tensiuni negative. În realitate, la polarizare inversă, regiunea de sarcină spațială se mărește și apare un *curent de generare*, dependent de tensiunea aplicată, cu valori relative importante pentru diodele din siliciu (în *figura 2.1* contribuția acestui curent la caracteristica diodei a fost reprezentată punctat).

La tensiuni de polarizare inversă mai mari, datorită fenomenului Zener și fenomenului de multiplicare în avalanșă (predominant de obicei), curentul invers crește, valoare lui fiind limitată numai de circuitul exterior.

Observație: Fenomenul Zener reprezintă smulgerea de purtători din rețea prin câmpul electric impus. Fenomenul de multiplicare în avalanșă se suprapune peste fenomenul Zener și presupune creșterea semnificativă a numărului de purtători de sarcină. Acest lucru se întâmplă prin generarea de purtători în semiconductor (dioda), accelerarea lor în câmpul electric impus și ciocnirea cu alți electroni. Rezultatul este transfer de energie, care înseamnă creșterea numărului total de astfel de purtători de sarcină.

Tensiunile de străpungere, la care apare această creștere a curentului, sunt dependente de natura materialului semiconductor, din care este realizat dispozitivul, precum și de concentrațiile de impurități, fiind cu atât mai mici cu cât concentrațiile de impurități sunt mai mari.

6. Dioda Zener (stabilizatoare de tensiune)

Diodele stabilizatoare de tensiune (impropriu dar frecvent denumite diode Zener) sunt caracterizate printr-o tensiune de străpungere bine definită (datorită efectului de multiplicare în avalanșă care determină o creștere foarte puternică a curentului invers în zona de străpungere). Tensiunea de străpungere este controlată prin concentrația de impurități. Funcționarea normală a diodei se face în zona reprezentată în *figura 2.5* (caracteristica statică, atât cea directă cât și cea inversă). Aceasta permite înțelegerea noțiunii de tensiune stabilizată, U_Z , precum și determinarea rezistenței dinamice a diodei, r_Z , conform relației:

$$r_Z = \left. \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} \right|_{I_Z = ct.} \quad (2.7)$$

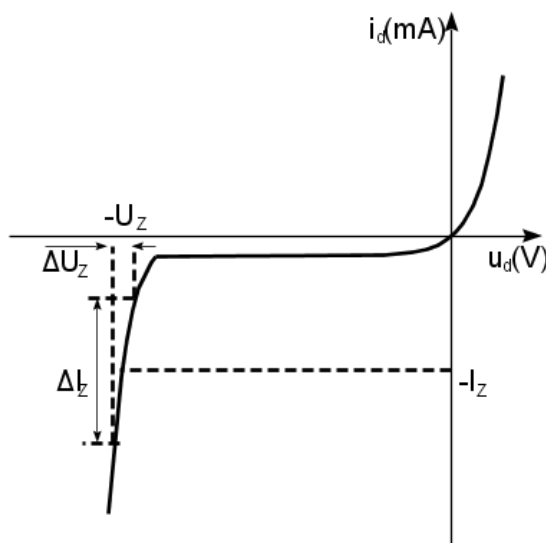


Fig. 2.5 Caracteristica statică a diodei Zener

7. Dioda Schottky

Diodele Schottky se realizează prin contact metal-semiconductor de tip redresor. La contactul metal-semiconductor se formează o barieră de potențial și o regiune de sarcină spațială extinsă numai în semiconductor. Astfel, dioda Schottky funcționează numai cu purtători majoritari, electroni în cazul semiconductorului de tip N și goluri pentru P .

La echilibru termodinamic, curentul prin diodă este nul.

La polarizare directă ($u_D > 0$) bariera de potențial se micșorează și apare un curent prin joncțiune, prin deplasarea electronilor din semiconductor în metal.

$$i_D = I_0 (e^{\frac{qu_D}{\eta kT}} - 1), \text{ cu } \eta \cong 1. \quad (2.8)$$

La polarizare inversă ($u_D < 0$) bariera de potențial crește, iar fluxul de electroni de la semiconductor spre metal scade foarte mult. Nu există curent rezidual.

Proprietăți:

- cădere de tensiune directă mai mică (0,4V Schottky, 0,75V diodă de Siliciu) în comparație cu o diodă semiconductoare de tip PN;
- funcționare foarte bună la frecvențe mari și timpi de comutație foarte mici (mai mici de 100 ps).

8. Dioda electroluminiscentă (LED – Light Emitting Diode)

LED-urile sunt realizate din joncțiuni GaAs, semiconductor având banda interzisă de circa 1,6 – 1,7 eV. Ca urmare a recombinărilor directe, se emit cuante de lumină în spectrul vizibil, cu diferite culori, în funcție de lungimea de undă a luminii emise. Diferite lungimi de undă se obțin prin adăugarea de impurități în procesul de dopare. Diodele electroluminiscente funcționează doar la polarizare directă, la curenți de ordinul a 20 mA.

Culori și materiale RGB

Culoare	Lungime de undă (nm)	Tensiune (V)	Material
Roșu (R)	$610 < \lambda < 760$	$1,63 < \Delta V < 2,03$	AlGaAs GaAsP AlGaInP GaP
Verde (G)	$500 < \lambda < 570$	$1,9 < \Delta V < 4$	InGaN / GaN GaP AlGaInP AlGaP
Albastru (B)	$450 < \lambda < 500$	$2,48 < \Delta V < 3,7$	ZnSe InGaN SiC ca substrat

Se poate observa că tensiunea directă corespunzătoare este mai mare decât cea a diodelor de siliciu.

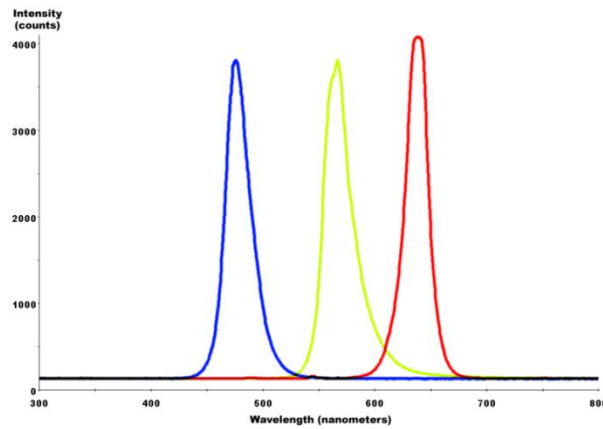


Fig. 2.6 Curbe spectrale pentru LED albastru, galben-verzui și roșu.

(en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting-diode)

DESFĂȘURAREA LUCRĂRII

Se identifică montajul din *figura 2.7*, în care se folosește o schemă electrică ajutătoare ca sursă de curent reglabil cu ajutorul potențiometrului P.

Alimentat în curent continuu între bornele 3 (+18 V (tensiunea efectivă de alimentare a circuitului, după elementele de protecție, este de 12V)) și 2 (masă), circuitul furnizează la borna 4 un curent reglabil între 0 și 50 mA.

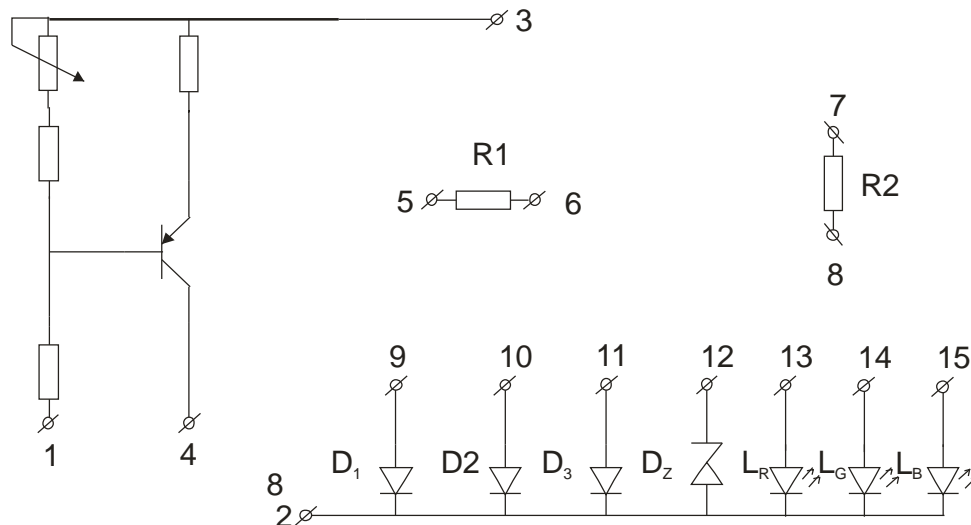


Fig. 2.7 – Montajul de laborator

Conectarea bornelor pentru sursa de curent:

+18V la borna 3, borna 1 la masă;

1. Se conectează diodele pe rând la borna 4. Borna 2 se conectează la borna 1. Se trasează caracteristicile statice la polarizarea directă pentru diodele:

D_1 - 1N4148 (diodă din siliciu, de viteză) (borna 9 este anodul);

D_2 - EFR 135 (diodă redresoare din germaniu) (borna 10 reprezintă anodul);

D_3 - 1N5819 (diodă Schottky) (borna 11 reprezintă anodul);

D_4 - BZX 85 C5V6 (diodă stabilizatoare de tensiune) (anodul este borna 2).

L_R - LED roșu (anodul la borna 13);

L_G - LED verde (anodul la borna 14);

L_B - LED albastru (anodul la borna 15).

Ridicarea caracteristicilor directe se face cu montajul din *figura 2.8*; curentul prin diodă se măsoară cu un miliampermetru, pe o scară corespunzătoare de curenți, iar tensiunea la bornele diodei cu un voltmetru electronic (de preferință voltmetru numeric). Curentul se va regla la valori pentru care se poate face o reprezentare comodă la scară logaritmică adică multiplii și submultiplii zecimali ai numerelor 1, 2 și 5 (ai căror logaritmi zecimali sunt, aproximativ, 0, 0,3 respectiv 0,7). Mai exact, setul de valori se va folosi setul de valori: 0,1mA, 0,2mA, 0,5mA, 1mA, 2mA, 5mA, 10mA, 20mA.

Pentru realizarea montajului, sursa de curent (borna 4) se conectează la (+)-ul miliampermetrului, borna (-) a miliampermetrului la (+)-ul diodei (bornele 9, 10, 11, 13, 14, 15). Borna 2 se cuplează la masă (borna 1). Voltmetrul se conectează între borna de (+) a diode și masă (borna 1).

Atenție! Dioda BZX 85 C5V6 (diodă stabilizatoare de tensiune) este montată cu (-) –ul la borna 12! Montajul va fi diferit față de montajul folosit la celelalte diode (borna 2 va fi decuplată de la masă, borna 12 dusă la masă, iar (-)-ul ampermetrului va fi cuplat la borna 2).

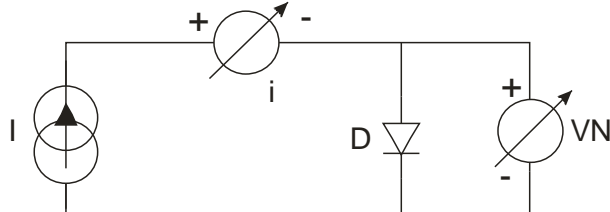


Fig. 2.8. Montaj pentru ridicarea caracteristicilor directe

Rezultatele măsurătorilor se vor trece într-un tabel de forma:

$I_D(\text{mA})$	$U_{Si}(\text{V})$	$U_{Ge}(\text{V})$	$U_{Schottky}(\text{V})$	$U_{Zener}(\text{V})$	$U_{LR}(\text{V})$	$U_{LG}(\text{V})$	$U_{LB}(\text{V})$
$I(\text{mA})$							

2. La curentul $I_0 = 5 \text{ mA}$ se încălzește (cu mâna) dioda 1N4148 și se constată, calitativ, modificarea tensiunii directe pe diodă.

3. Se trasează caracteristicile statice ale celor trei diode la scară semilogaritmică (ca în *figura 2.2*) și se determină parametrii I_0 și γ (care se vor trece într-un tabel).

$\lg I_D$	$U_{Si}(\text{V})$	$U_{Ge}(\text{V})$	$U_{Schottky}(\text{V})$	$U_{Zener}(\text{V})$	$U_{LR}(\text{V})$	$U_{LG}(\text{V})$	$U_{LB}(\text{V})$
...			

	Siliciu	Germaniu	Schottky	Zener	LED R	LED G	LED A
I_0							
γ							

4.1. Se vor trasa caracteristicile la scară liniară pe același grafic (numai în domeniul de curenți comun diodelor).

Pentru 1N4148 se va trasa și dreapta statică de funcționare (ecuația **(2.4)**, cu $E = 5\text{V}$ și $R = 1\text{k}\Omega$) și se va determina punctul static de funcționare M (prin precizarea coordonatelor sale, U_D și I_D). În punctul static de funcționare astfel stabilit, se va determina, grafic, rezistența dinamică (cu relația **(2.6)**); se va calcula și valoarea teoretică a rezistenței dinamice cu formula **(2.5)** în care $\frac{kT}{q} = 26 \text{ mV}$, γ are

valoarea dedusă la punctul anterior iar I_D are valoarea din punctul de funcționare și se vor compara rezultatele.

4.2. Se realizează circuitul din *figura 2.9* pentru fiecare diodă cu $E = 5 \text{ V}$ și $R1 = 1\text{k}\Omega$ și se măsoară mărimile caracteristice punctului static de funcționare, U_D (cu voltmetru numeric) și I_D (cu un

miliampermetru montat în serie cu dioda) și se compară cu rezultatele obținute prin metoda grafoanalitică, la punctul precedent. Se deconectează bornele 3 și 4. Se conectează sursa E la borna 5, iar anodul diodei la borna 6. (Atenție la conectarea diodei Zener!).

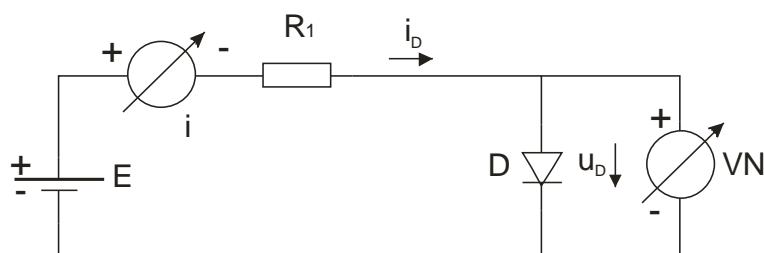


Fig. 2.9 – Circuit pentru determinarea PSF

5.1. Cu montajul din figura 2.10 se măsoară curentul invers prin dioda de Ge la tensiunile $E = 0, -5 \text{ V}, -10 \text{ V}, -20 \text{ V}$.

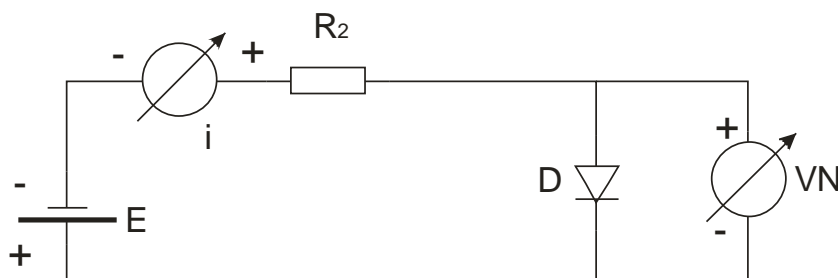


Fig. 2.10 – Montaj pentru măsurarea curentului invers

Pentru aceasta, se conectează 7 la minusul sursei de tensiune (prin intermediul unui miliampermetru) și 2 la plusul sursei de tensiune. Borna 8 se conectează la anodul diodei. Bornele 1 și 2 sunt și ele cuplate.

5.2. Se măsoară caracteristica inversă a diodei stabilizatoare de tensiune BZX 85 C5V6 cu montajul din figura 2.11, pentru curenți între 0,1 mA și 20 mA. Pentru aceasta, generatorul de curent se alimentează cu +18 V (la borna 3), bornele 4 și 12 se conectează împreună printr-un miliampermetru iar tensiunea se măsoară cu un voltmetru (bornele 1 și 2 sunt și ele cuplate).

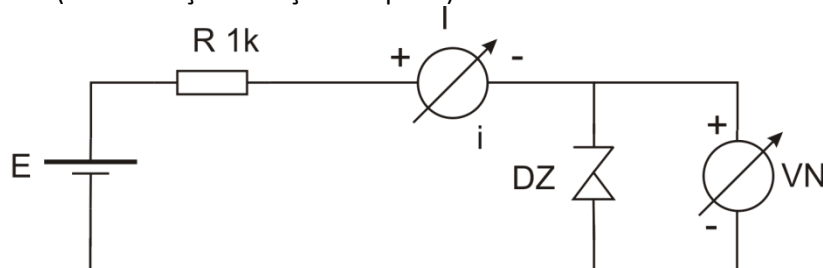


Fig. 2.11 – Montaj pentru determinarea caracteristicii diodei Zener

Se trasează caracteristica inversă a diodei stabilizatoare la scară liniară pe un grafic pe care se trasează, spre comparație și caracteristica directă. În punctul static de funcționare caracterizat prin $I_Z =$

10 mA, se determină rezistența dinamică cu relația (2.7), măsurând tensiunea pe diodă la curenții: $I_Z = 5 \text{ mA}$ și $I_Z = 15 \text{ mA}$.

Referatul va conține:

- schemele de principiu pentru ridicarea caracteristicilor directe și inverse ale diodelor (1p);
- tabelele cu rezultatele măsurărilor (2p);
- graficele și determinările făcute pe baza acestora (3p);
- rezultatele teoretice (1p)
- simularea circuitului (schemă și valori) (2p);
- compararea datelor experimentale cu cele teoretice (1p).

Exemple de datasheet-uri pentru diodele folosite:

- <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/15021/PHILIPS/1N4148.html> (D₁)
- <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/2818/MOTOROLA/1N5819.html> (D₃)
- <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/good-ark/BZX85C6V8.pdf> (D₄)
- <http://www.led-lights.co.uk/datasheets/YZ-RV5N30N.pdf> (LED roșu)
- <http://www.led-lights.co.uk/datasheets/YM-GZ5S15Y.pdf> (LED verde)
- <http://www.led-lights.co.uk/datasheets/YM-BV5S15Y.pdf> (LED albastru)

Caracteristici principale pentru EFR 135 (D₂):

$$\begin{aligned}I_{D\text{Max}} &= 5\text{ A} \\V_{\text{inv max}} &= 100\text{ V} \\I_0 &= 100\text{ }\mu\text{A} \\V_d &< 0,6\text{ V}\end{aligned}$$