

## Diode Semiconductoare

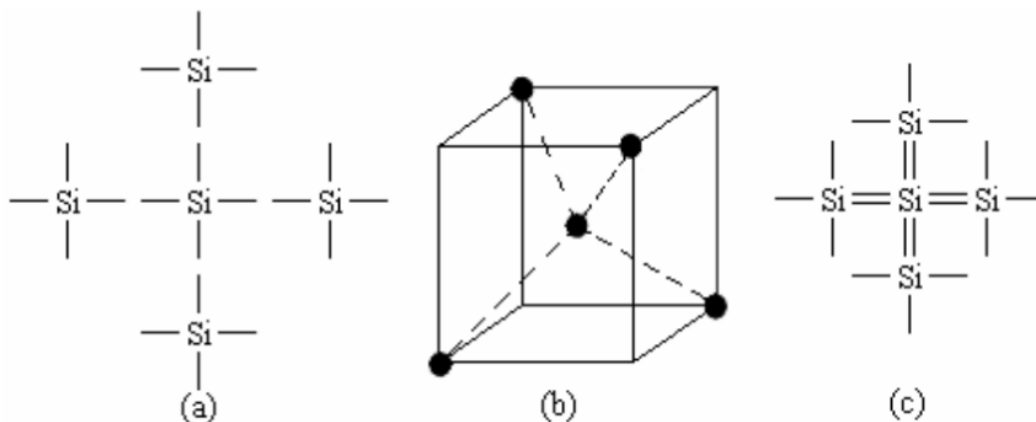
### Modulul MCM3-EV

Un semiconductor este un solid cu structură cristalină tridimensională regulată. Acesta este obținut prin repetarea unei celule sau a unui cristal elementar. Atomii celulelor sunt conectați prin legături covalente. Configurația este stabilă și atomii schimbă continuu electronii de pe orbitele lor externe, respectiv electronii de valență. Elementele din tabelul periodic sunt grupate în funcție de numărul atomilor de valență, conform porțiunii prezentate în *Tabelul I01.1*.

Siliciul (Si) și Germaniul (Ge) sunt semiconductoare simple. Galiu-Arsen (GaAs) este semiconductor compus situat în grupa III-IV.

**Tabelul I01.1**

III	IV	V
B	C	
Al	Si	P
Ga	Ge	As



**Fig. I01.1** Atomii de siliciu în celula cristalină.

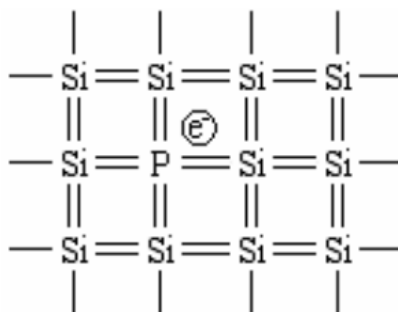
Conductivitatea semiconductorilor depinde de temperatură. Astfel la creșterea temperaturii unele legături covalente se rup și ca urmare un anumit număr de electroni devin liberi să se miște sub acțiunea câmpului electric.

Semiconductorii tind să se comporte ca izolatorii la temperatură mică și ca niște conductori la temperatură înaltă. La temperatura camerei conductivitatea lor este situată între cea a izolatorilor și cea a conductorilor, de unde vine și denumirea lor.

### Semiconductori dopati

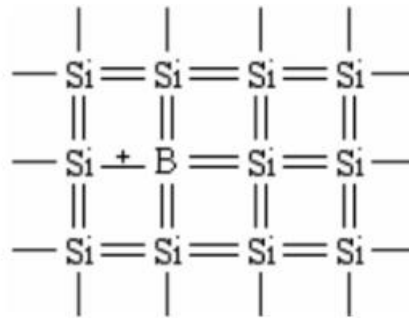
Deoarece conductivitatea semiconductorilor puri este foarte mică la temperatura camerei, pentru creșterea acesteia este necesară introducerea unor impurități în cristal. Impuritățile sunt în general de două feluri.

Impurități de atomi din grupa V a tabelului periodic al elementelor, precum fosforul P, arseniul As sau stibiul Sb, care au 5 electroni de valență și pot astfel crea în rețea un electron liber, fapt pentru care sunt denumite donori. Semiconductorii dopați cu aceste tipuri de impurități sunt de tip N (negativ). Excesul de electroni este exemplificat în *fig. 101.6*.



**Fig. 101.6** Semiconductor impurificat cu atomi donori.

Impurități de atomi din grupa III a tabelului periodic, precum borul B, galiul Ga sau aluminiul Al, care aduc în rețea atomi care pot capta un electron liber și sunt denumite acceptori. Semiconductorii dopați cu aceste tipuri de impurități sunt de tip P (pozitiv). Excesul de goluri este exemplificat în *fig. 101.7*.



**Fig. 101.7** Semiconductor impurificat cu atomi acceptori.

Ambele tipuri de semiconductori dopați sunt neutre electric, atomi adăugați contribuie la purtătorii liberi dar sunt atomi neutri electric.

## Jonctiunea P-N

### Curenții de difuzie, câmp și barieră

Se consideră două regiuni de semiconductor dopate, una de tip P și alta de tip N, alăturate formând o jonctiune la interfața lor, așa cum este prezentat în *fig. 102.1-a*.

Datorită prezenței atomilor acceptori având concentrația  $N_A$  în regiunea P și a atomilor donori de concentrație  $N_D$  în regiunea N, *fig. 102.1-b*, există o diferență de concentrație în regiunea jonctiunii. Aceasta produce o migrare sau difuzie a electronilor liberi din zona N către zona P și o deplasare similară pentru goluri în direcția opusă, *fig. 102.1-a*.

Golurile care au traversat jonctiunea se combină cu electronii zonei N și similar electronii care au traversat jonctiunea se combină cu golurile din zona P. Deoarece electronii negativi și golurile pozitive se anulează reciproc în zona din vecinătatea jonctiunii nu sunt purtători liberi de sarcină. Acest fapt creează o zonă izolatoare sau sărăcită de sarcină în jurul jonctiunii, fapt ce se evidențiază în reprezentarea liniară a concentrației de purtători, *fig. 102.1-c*.

La echilibru datorită migrației sarcinii există o sarcină negativă în zona P și o sarcină pozitivă în zona N cum este prezentat în *fig. 102.1-a* și evidențiat în reprezentarea logaritmică a concentrațiilor de purtători din *fig. 102.1-b*.

Aceste zone de sarcini produc un câmp electric  $E_0$  de-a lungul jonctiunii și o barieră de potențial sau diferență internă de potențial  $\Phi_{B0}$  care se opune și oprește procesul de migrare al purtătorilor liberi, ca în *fig. 102.1-a*, respectiv *fig. 102.1-g*. Distribuția densității de volum a sarcinii electrice este prezentată în *fig. 102.1-e*, iar distribuția câmpului electric  $E_0$  și a potențialului  $U_0$  sunt prezentate în *fig. 102.1-f*, respectiv *fig. 102.1-g*.

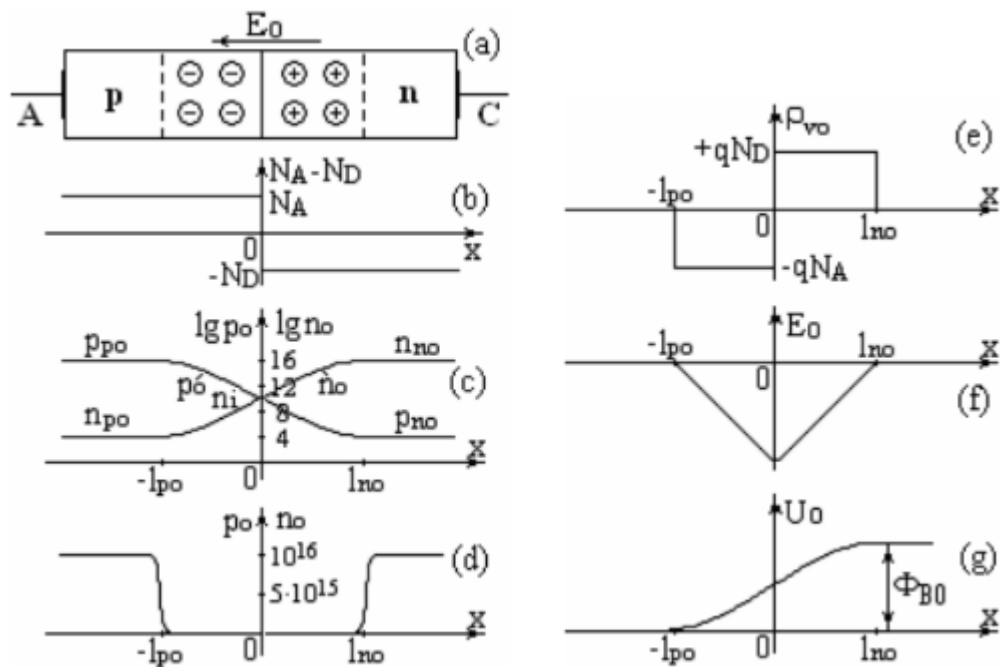


Fig. 102.1 Joncțiunea PN.

Tensiunea produsă cu polaritatea indicată în fig. 102.1-g se opune migrării golurilor de la P la N și a electronilor de la N la P, în timp ce ajută trecerea golurilor de la N la P și a electronilor de la P la N.

Sarcinile electrice ale purtătorilor minoritari generați termic, pot traversa liber joncțiunea, creând un curent electric denumit curent de purtători minoritari sau curent de câmp.

În circuit deschis curenții de difuziune și cei de câmp sunt în echilibru perfect astfel încât curentul total prin joncțiune este zero.

## Polarizarea directă a joncțiunii PN

Zona P a unei joncțiuni PN este denumită anod și este notată cu A, iar zona N catod și este notată cu C, *fig. 102.1-a*. Dacă joncțiunea este polarizată direct, prin aplicarea unei tensiuni externe cu minusul pe catod și plusul pe anod, tensiunea de barieră sau diferența internă de potențial este redusă, la fel ca și dimensiunea zonei de sarcină spațială. Prin creșterea tensiunii externe aplicate la un moment dat aceasta anulează diferența internă de potențial și apare conducția prin dispozitiv. Din punctul de vedere al caracteristicilor IV diferența internă de potențial corespunzătoare câmpului electric intern  $E_0$  se numește tensiunea de deschidere a diodei sau tensiune de prag  $V_P$ , *fig. 102.2*.

Deschiderea diodei permite electronilor din zona N să se deplaseze către plusul tensiunii externe aplicate (bateriei) și a golurilor din zona P către minus, rezultând un curent prin joncțiune pe direcția  $P \rightarrow N$  a cărui valoare crește la creșterea tensiunii externe aplicate pe joncțiune, *fig. 102.2*.

## Polarizarea inversă a joncțiunii PN

La inversarea polarității tensiunii externe aplicată joncțiunii, tensiunea de barieră sau diferența internă de potențial crește corelat cu extinderea zonei de sarcină spațială de la joncțiune către terminale. Astfel sarcinile pozitive din zona P și electronii din zona N sunt respinși de către joncțiune și curentul de difuzie este blocat, *fig. 102.1-a*.

Curentul prin joncțiune rămâne doar curentul dat de purtătorii minoritari de sarcină și este foarte mic. Acesta are direcția de la  $N \rightarrow P$  și este denumit curent invers sau curent rezidual. Este în general independent de tensiunea aplicată și valorile maxime nu depășesc câțiva microamperi pentru germaniu și nanoamperi pentru siliciu, *fig. 102.2*.

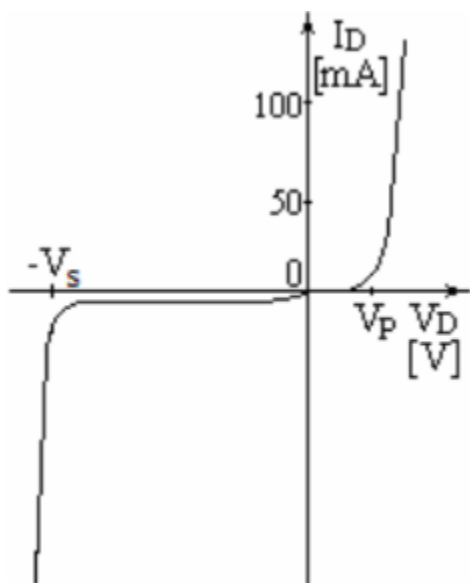
## Efectul de avalanșă și efectul Zener

Când tensiunea inversă de polarizare a joncțiunii atinge valori foarte mari, apare o creștere rapidă a curentului, tensiunea inversă pe joncțiune rămânând aproximativ constantă. Această comportare este datorată efectului de avalanșă, efectului Zener sau a ambelor efecte.

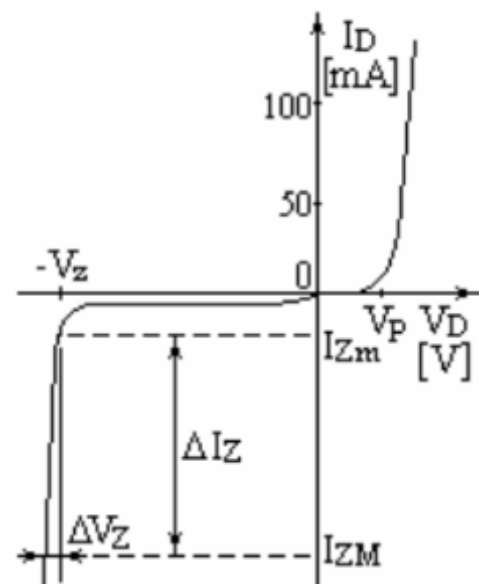
În efectul de avalanșă, electronii capătă viteze mari datorită tensiunii aplicate. Astfel atomii din cristal loviți de electronii cu viteză mare sunt ionizați și electroni suplimentari sunt eliberați. Aceste sarcini sub acțiunea câmpului pot ioniza alți atomi pornindu-se o reacție în lanț care conduce la creșterea rapidă a curentului.

În efectul Zener, la numite valori ale tensiunii, câmpul electric este puternic rupând anumite legături covalente, producând o mare creștere a purtătorilor minoritari și astfel a curentului invers.

Caracteristica tipică a joncțiunii PN reprezintă dependența curentului prin diodă  $I_D$  în funcție de tensiunea aplicată pe diodă  $V_D$ , *fig. 102.2* ( $V_S$  reprezintă tensiunea de străpungere a joncțiunii în polarizare inversă), iar caracteristica unei diode Zener în *fig. 102.3* ( $V_Z$  reprezintă tensiunea de străpungere prin efect Zener).



**Fig. I02.2** Caracteristica I-V a joncțiunii PN.



**Fig. I02.3** Caracteristica I-V a diodei Zener.

## Desfasurarea lucrarii

### Caracteristicile Diodelor

O diodă este un dispozitiv semiconductor constând dintr-o joncțiune PN.

Mărimile mai importante prezentate în *fig. 102.2* sunt:

- Tensiunea de străpungere  $V_S$ , la care apare efectul de avalanșă. La această tensiune apare o creștere rapidă a curentului care nu este limitată de către dispozitiv și poate conduce la distrugerea diodei.
- Tensiunea de prag  $V_P$  la care dioda începe să conducă puțin. La polarizări peste această valoare curentul crește rapid conform cu ecuația următoare:

$$I_D = I_0 \cdot \left( e^{\left( \frac{q \cdot V}{n \cdot K \cdot T} \right)} - 1 \right),$$

unde:

$I_0$  este curentul în polarizare inversă

$q$  este sarcina elementară a electronului  $1,63 \cdot 10^{-19}$  C

$V$  este tensiunea anod-catod

$n$  este factorul de exponențialitate și depinde de tipul de semiconductor

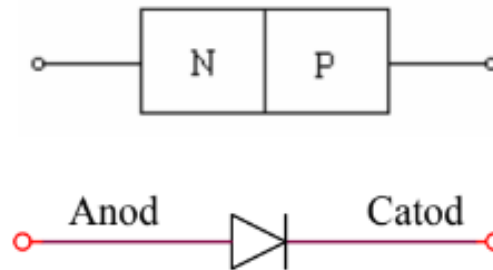
$K$  este constanta Boltzmann  $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K

$T$  este temperatura semiconductorului în grade Kelvin

Din această relație se observă dependența curentului prin diodă de tensiunea de alimentare și de temperatură. Aceasta este valabil pentru toți semiconductorii și din aceste considerente proprietățile electronice ale acestora sunt măsurate la o temperatură fixă.

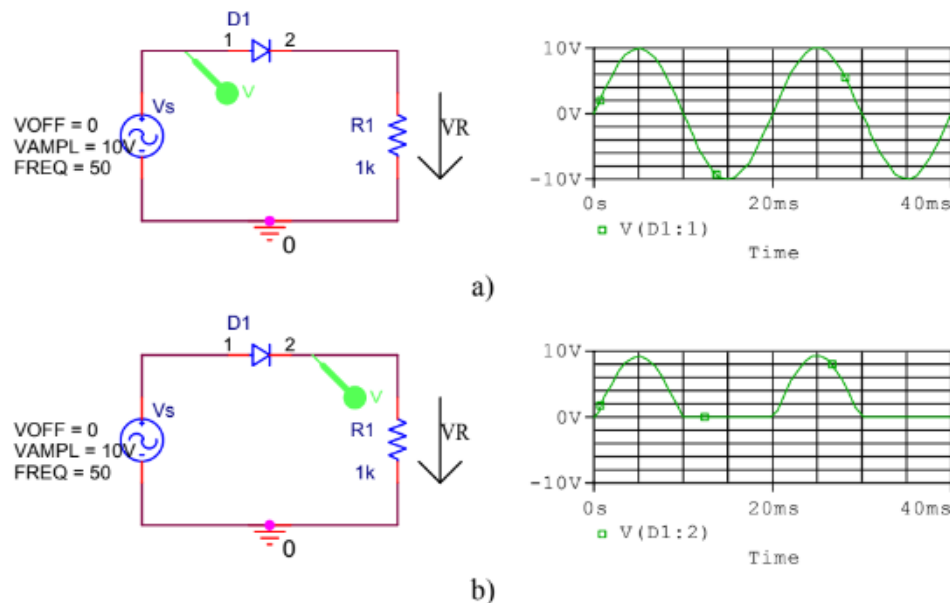
Un alt parametru important al unei diode semiconductoare este rezistența diferențială  $r_d$ . Aceasta este definită ca raportul dintre o mică variație a tensiunii și variația corespunzătoare a curentului, în jurul punctului static de funcționare.





**Fig. I03.2** Simbolul și terminalele joncțiunii PN.

O diodă conduce numai când este polarizată direct și foarte puțin la polarizarea inversă. Dacă o diodă este alimentată în alternativ atunci ea va determina trecerea curentului numai o semialternanță în timp ce semialternanța negativă este blocată. Un circuit simplu de redresare cu o diodă este prezentat în *fig. I03.3*.



**Fig. I03.3** Formele de undă pentru redresarea monoalternanță:  
 a) tensiunea furnizată de generator ; b) tensiunea redresată

Curentul trece prin circuit pe jumătatea unei perioade și produce o semialternanță pozitivă pe sarcină.

Valoarea medie a tensiunii redresate este:

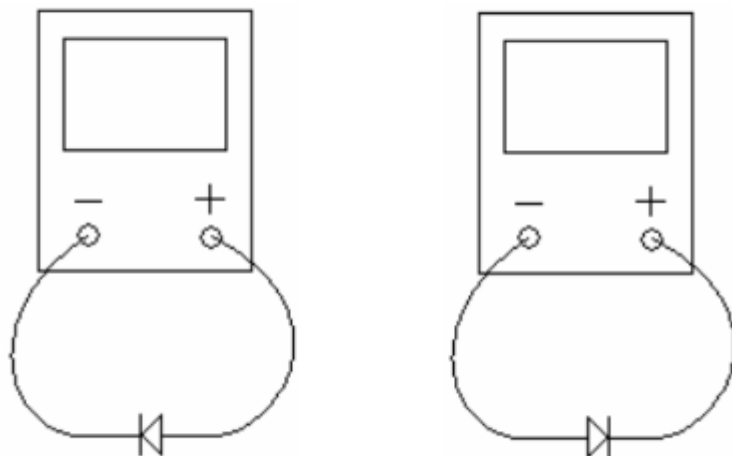
$$V_m = V_M / \pi = 0,314 \cdot V_M$$

Valoarea rms (root means square) a tensiunii este:

$$V_{rms} = V_M / 2$$

Si		Ge	
Direct	Invers	Direct	Invers
4.5 ohm	6 ohm	3.02 ohm	1.02 ohm

Tabelul I03.1: Masurarea rezistentelor directe si inverse ale diodelor



**Fig. I03.4** Măsurarea rezistenței directe (stânga) și inverse (dreapta) a diodei.

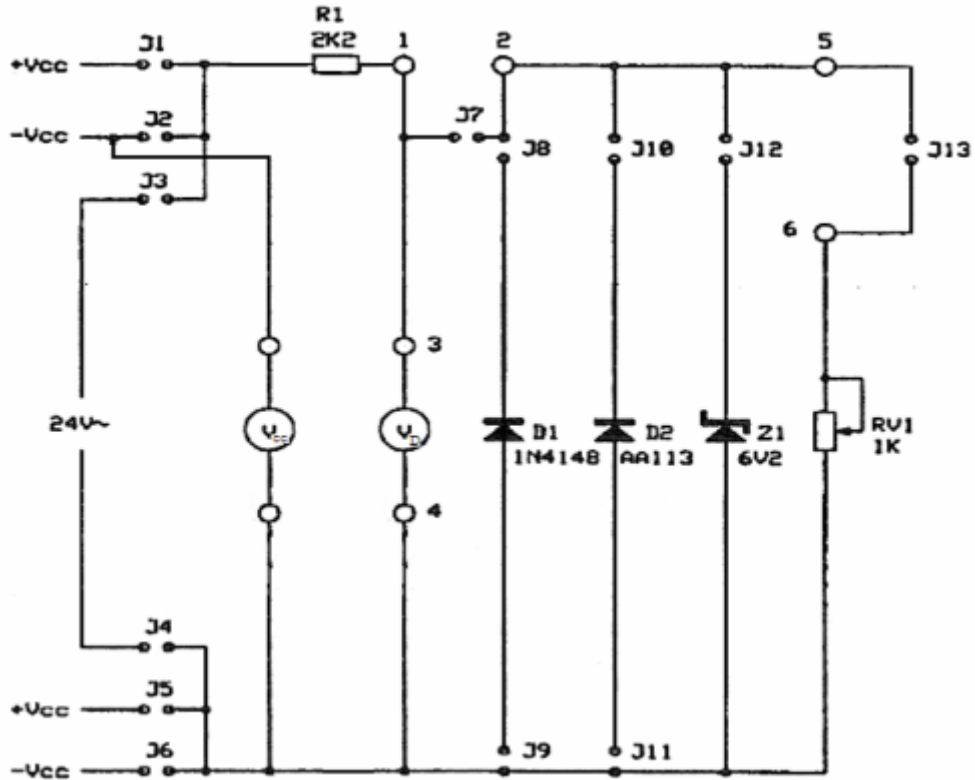


Fig. 103.5 Modulul din stânga-sus al plăcii MCM3.

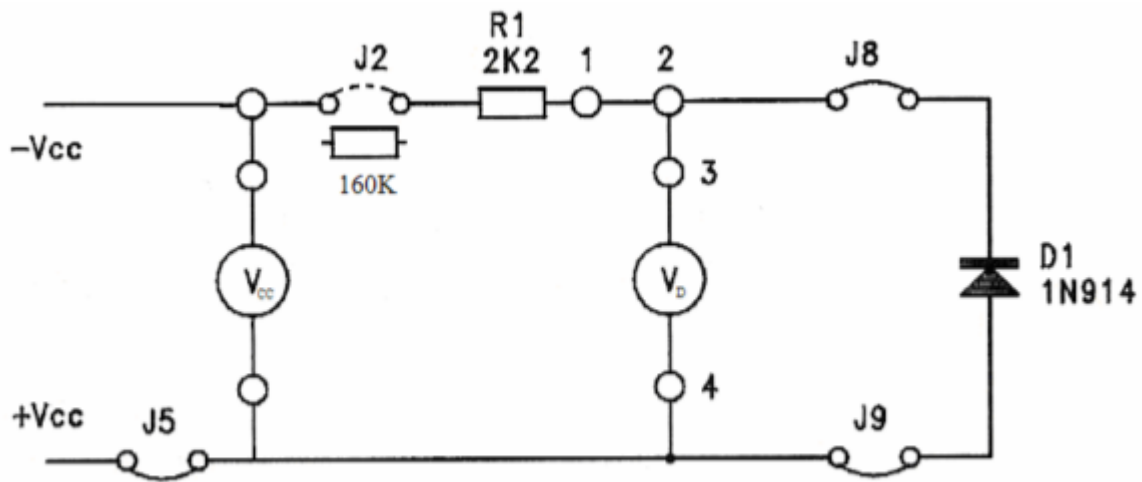


Fig. I03.6 Circuitul de măsură pentru dioda D1.

Dioda	Șunturi	Rezistența serie	Tensiune alimentare +Vcc-(-Vcc) (V)	Tensiunea pe diodă V <sub>D</sub> (V)	Curentul prin diodă I <sub>D</sub> (mA)
D1-Si	D1: J8, J9	R1=2k2 R <sub>J2</sub> =160k	4	0.44	0.0219
			8	0.47	0.0464
			12	0.49	0.0709
			16	0.51	0.0955
	Alimentare: R <sub>J2</sub> sau J2, J5	R1=2k2	1.5	0.58	0.4181
			2	0.60	0.6363
			3	0.62	1.0818
			12	0.71	5.1318
			24	0.75	10.5681
D1-Ge	D2: J10, J11	R1=2k2 R <sub>J2</sub> =160k	4	0.1	0.024
			8	0.12	0.0485
			12	0.13	0.0731
			16	0.14	0.0977
	Alimentare: J2, J5	R1=2k2	1.5	0.19	0.5954
			2	0.2	0.8181
			3	0.21	1.2681
			12	0.25	5.3409
			24	0.28	10.7818

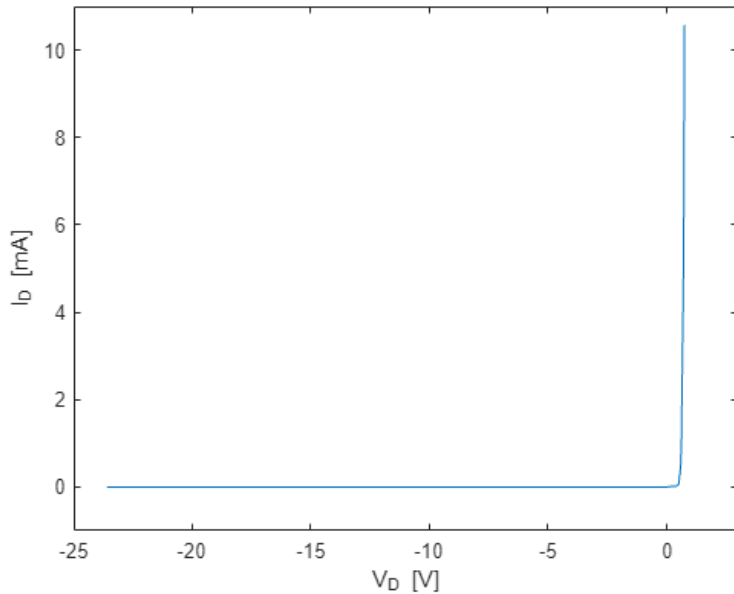
$$I_D = \frac{[+V_{cc} - (-V_{cc})] - V_D}{R_{serie}}$$

Tabelul I03.2: Regimul static (CC) a curentului diodei în funcție de tensiunea aplicată în polarizare directă

Dioda	Șunturi	Rezistența serie	Tensiune alimentare +Vcc-(-Vcc) (V)	Tensiune a pe diodă VD (V)	Curentul prin diodă ID (μA)
D1-Si	D1: J8, J9 Alimentare: R <sub>J1</sub> , J6	R1=2k2 R <sub>J1</sub> =150k	-5	-4.7	-0.0002
			-12	-11.9	-0.0007
			-24	-23.6	-0.0026
D2-Ge	D2: J10, J11 Alimentare: R <sub>J1</sub> , J6	R1=2k2 R <sub>J1</sub> =150k	-5	-0.17	-0.0317
			-12	-0.19	-0.0775
			-24	-0.21	-0.1563

Tabelul I03.3: Regimul static (CC) a curentului diodei în funcție de tensiunea aplicată în polarizare inversă

Grafic I03.2-a: Caracteristica tensiune-curent a diodei de Si

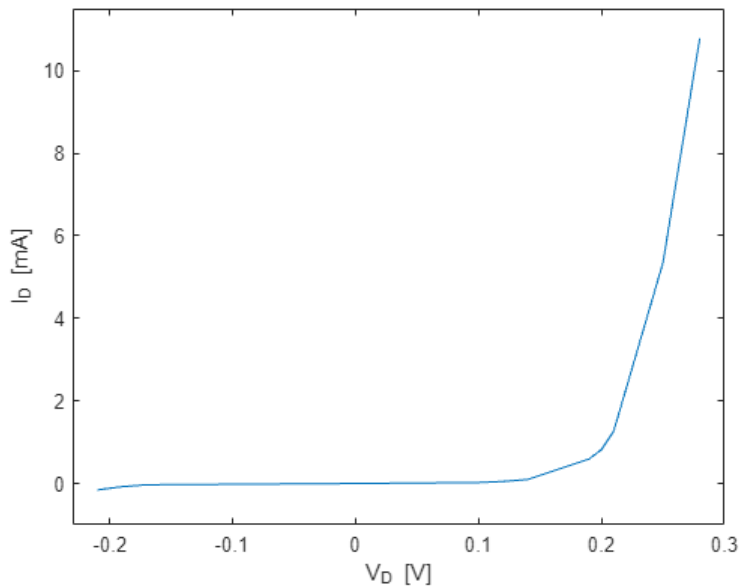


### Cod 1 in Matlab: Realizarea graficului I03.2-a

```
Vd = [-23.6 -11.9 -4.7 0 0.44 0.47 0.49 0.51 0.58 0.60 0.62 0.71 0.75];  
Id = [-0.0026 -0.0007 -0.0002 0 0.0219 0.0464 0.0709 0.0955 0.4181 0.6363 1.0818 5.1318 10.5681];  
plot(Vd,Id);  
axis([-25 3 -1 11]);  
title("Grafic I03.2-a: Caracteristica tensiune-curent a diodei" + ...  
      " de Si ", "FontSize", 10)  
ylabel("I_{D} [mA]");  
xlabel("V_{D} [V]");
```



Grafic I03.2-b: Caracteristica tensiune-curent a diodei de Ge



## Cod 2 in Matlab: Realizarea graficului I03.2-b

```
Vd = [-0.21 -0.19 -0.17 0 0.1 0.12 0.13 0.14 0.19 0.2 0.21 0.25 0.28];  
Id = [-0.1563 -0.0775 -0.0317 0 0.024 0.0485 0.0731 0.0977 0.5954 0.8181 1.2681 5.3409 10.7818];  
plot(Vd,Id);  
axis([-0.23 0.30 -1 11.5]);  
title("Grafic I03.2-b: Caracteristica tensiune-curent a diodei" + ...  
      " de Ge", "FontSize", 10)  
ylabel("I_{D} [mA]");  
xlabel("V_{D} [V]");
```

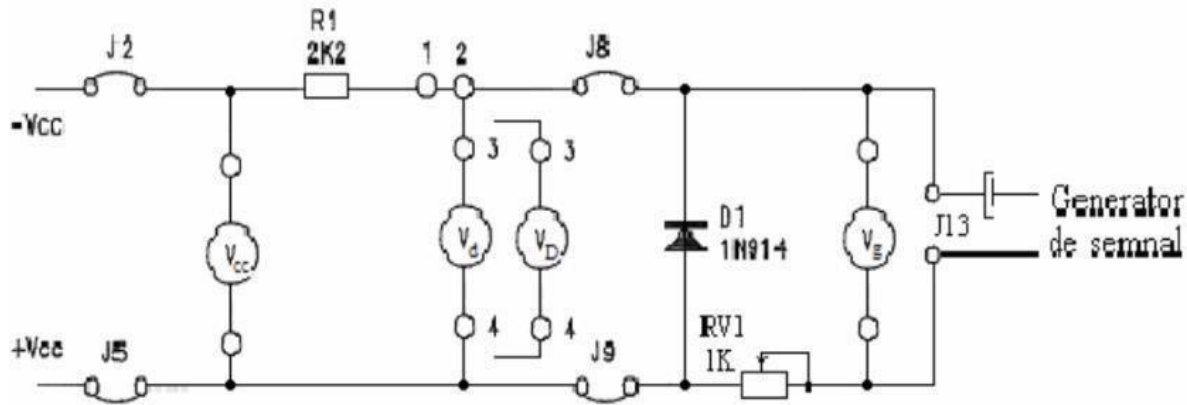


Fig. I03.9 Circuitul de masura a regimului dinamic al diodelor

Tabelul I03.4: Regimul dinamic de CA al diodelor de Si si Ge

Dioda	Şunt	R serie CC ( $\Omega$ )	R serie CA ( $\Omega$ )	Tens. CC alimentare +Vcc-(-Vcc) (V)	Tens. CC pe diodă VD (V)	Tens. CA pe diodă Vd (mV)	Tens. CA gen. Vg (V)	Ri ( $\Omega$ )
D1-Si	J10,J11	2200	1000	3.03	0.56	10	0.017	1428.57
				7.02	0.61	10	0.015	2000
				11	0.64	10	0.012	5000
D2-Ge	J8,J9	2200	1000	3	0.21	10	0.018	1250
				7	0.24	10	0.015	2000
				11.07	0.25	10	0.013	3333.33

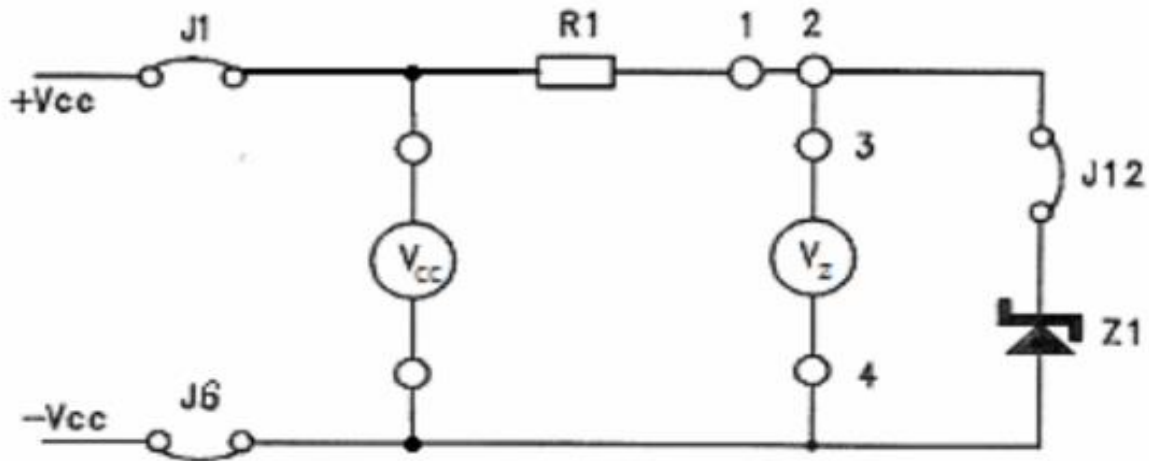
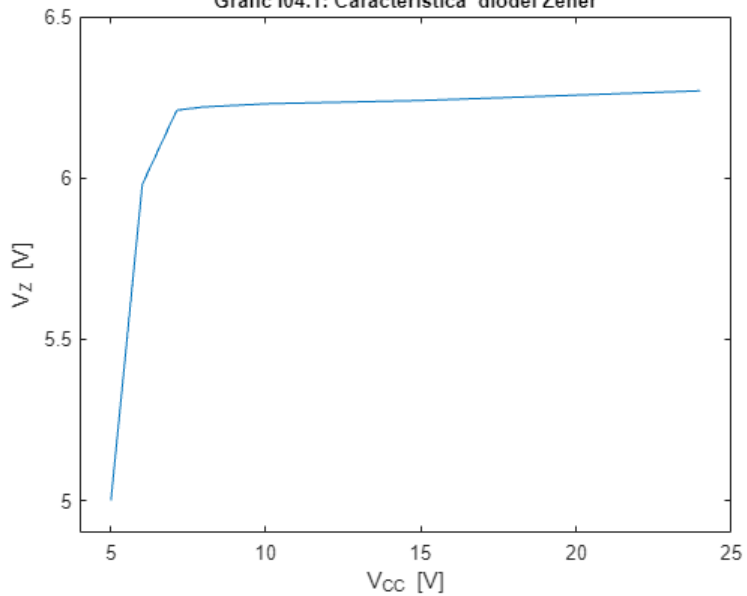


Fig. I04.6 Circuitul pentru determinarea caracteristici I-V a diodei Zener

Tabelul I04.1: Masurarea curentului Zener în functie de tensiunea de alimentare

Dioda	Şunturi	Rserie CC ( $\Omega$ )	Tens. Alimentare +Vcc – (-Vcc) (V)	Vz (V)	Iz (mA)
Z1	J1,J6,J12	2200	5.01	5	4.545
			6.02	5.98	1.818
			7.13	6.21	0.0004
			8	6.22	0.0008
			10.06	6.23	0.0017
			15	6.24	0.0039
			24	6.27	0.008

Grafic I04.1: Caracteristica diodei Zener



### Cod 3 in Matlab: Realizarea graficului I04.1

```
Vz = [5 5.98 6.21 6.22 6.23 6.24 6.27];  
Vcc = [5.01 6.02 7.13 8 10.06 15 24];  
plot(Vcc,Vz);  
axis([4 25 4.9 6.5]);  
title("Grafic I04.1: Caracteristica diodei Zener", "FontSize", 10)  
ylabel("V_{Z} [V]");  
xlabel("V_{CC} [V]");
```