

# Laboratorul 2.

## Dioda Semiconductoare.

### 1 Scopul lucrării

Determinarea principalilor parametri ai diodelor semiconductoare, trasarea caracteristicii curent-tensiune pentru polarizare directă și inversă precum și studiul comportării lor în circuitele elementare.

### 2 Noțiuni teoretice

Circuitele electrice sunt, într-o anumită măsură, similare celor pneumatice sau hidraulice. O funcție esențială în aceste circuite este permiterea curgerii "fluidului" (curentului electric) numai într-un anumit sens. Ea este realizată cu dispozitive numite "supape" (dioda). De unde știu supapele sensul în care fluidul are tendința să circule pentru a decide dacă să-l lase sau nu să treacă? Simplu: fluidul curge de la presiune (potențial) mare la presiune mică, iar supapele sesizează tocmai această diferență de presiune (diferență de potențial), deoarece ea este proporțională cu forța netă exercitată de fluid asupra supapei. Dacă forța are sensul corect și dacă mărimea ei depășește o anumită valoare de prag, supapa se deschide și fluidul poate să treacă. Simbolurile diodei sunt prezentate în Figura 1.

Explicația prezentată, prin comparația modului de funcționare al diodei cu modul de funcționare al supapelor în sistemele hidraulice, reprezintă o simplificare a comportamentului diodei în circuite de joasă frecvență.

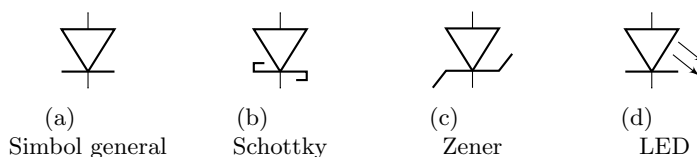


Figura 1

În circuitele electronice, în mod ideal, diodele permit trecerea curentului într-un singur sens.

Dioda sunt elemente de circuit polarizate de tip dipol - cu două terminale numite anod, respectiv catod. Simbolul electric al diodei este realizat dintr-o săgeată ce indică sensul curentului electric la polarizare normală (de la anod la catod). Prin convenție, în sensul arătat de săgeată este măsurată căderea

de tensiune pe diodă la polarizare directă. Săgeata este urmată de o linie perpendiculară pe aceasta, linie ce definește catodul diodei.

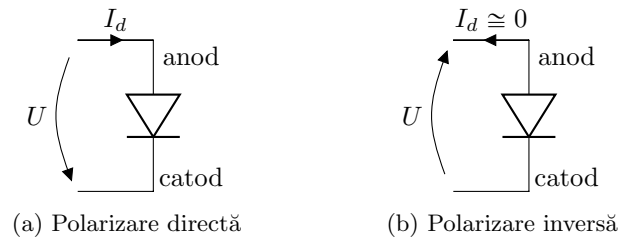


Figura 2

## 2.1 Caracteristica statică a diodei semiconductoare

Din punct de vedere al caracteristicii curent-tensiune, pe lângă modelul matematic real al diodei, care prezintă o caracteristică exponențială și 5 zone de funcționare, mai sunt utilizate 3 modele simplificate (ideale) ale diodei, care se apropie mai mult sau mai puțin de modelul real.

## 2.2 Dioda ideală fără cădere de tensiune

Definiția cea mai simplă a diodei, menționată anterior, este de element de tip dipol care permite trecerea curentului electric într-un singur sens. Din caracteristica volt-amperică prezentată mai jos, putem observa că diodele se comportă ca un întrerupător care permite trecerea curentului electric doar pentru tensiuni pozitive (se comportă precum un conductor ideal, fără cădere de tensiune pe el).

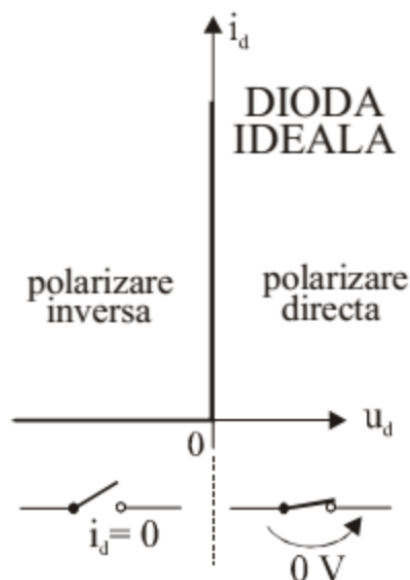


Figura 3: Dioda ideală fără căderi de tensiune

### 2.3 Dioda ideală cu o cădere de tensiune de valoare fixă

Spre deosebire de modelul ideal, în realitate, la trecerea unui curent electric printr-o diodă, se manifestă o cădere de tensiune. Această cădere de tensiune este de ordinul sutelor de milivolți sau de ordinul volților (pentru curenți mari la diode de putere). În cazul diodelor de siliciu de uz general, la curenți de ordinul zecilor de miliamperi, căderea de tensiune este de aproximativ  $0.6 - 0.7V$ . Acest model de diodă permite trecerea curentului electric numai dacă tensiunea de polarizare este mai mare decât o tensiune minimă, numită tensiune de deschidere a diodei. Dacă tensiunea de polarizare este mai mică decât această limită, curenții prin diodă sunt de 10-100 de ori mai mici față de cazul în care dioda se consideră "deschisă" și sunt neglijabili.

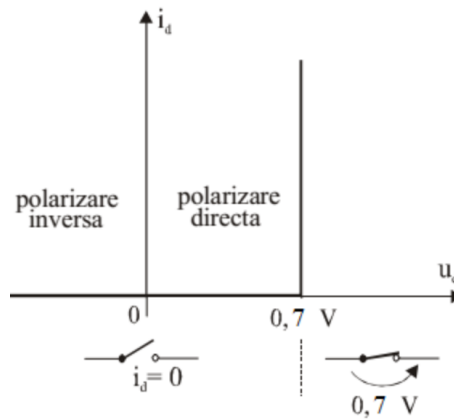


Figura 4: Dioda ideală cu cădere de tensiune

### 2.4 Dioda ideală cu limită a tensiunii de deschidere și caracteristică rezistivă

Acest model este cel mai apropiat, din punct de vedere al comportamentului, de modelul real al diodei semiconductoare. Pe lângă aproximarea menționată anterior (dioda permite trecerea curentului electric pentru o tensiune de polarizare mai mare decât o valoare minimă), acest model conține și aproximarea de comportament rezistiv al diodei. Deși caracteristica reală a diodei este una exponențială pentru zona curenților mari, la polarizare directă se observă o liniarizare a acesteia.

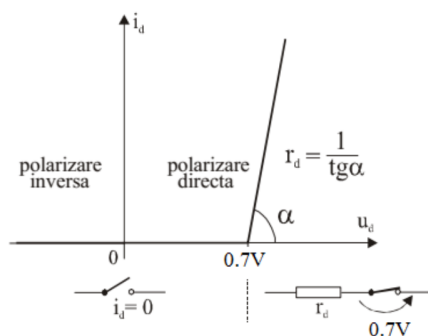


Figura 5: Dioda ideală cu tensiune de deschidere și caracteristică rezistivă

## 2.5 Modelul matematic al diodei de siliciu

$$i_D = I_0 \left( e^{\frac{q u_D}{\gamma k T}} - 1 \right) = I_0 \left( e^{\frac{u_D}{\gamma u_T}} - 1 \right) \quad (1)$$

Caracteristica statică reprezintă dependența curent-tensiune a unei diode semiconductoare, dedusă prin analizarea fenomenelor fizice din joncțiunea PN ideală ce au loc la aplicarea unei tensiuni din exterior (ecuația 1).

Semnificația mărimilor din formulă este:

- $I_0$  - curentul de saturație al diodei
- $u_d$  - căderea de tensiune pe diodă măsurată de la anod la catod
- $k$  - constanta lui Boltzmann
- $q$  - sarcina electronului
- $T$  - temperatura exprimată în Kelvin
- $\gamma$  - constantă de material
- $u_T$  - tensiunea termică (  $u_T = q/kT$  )

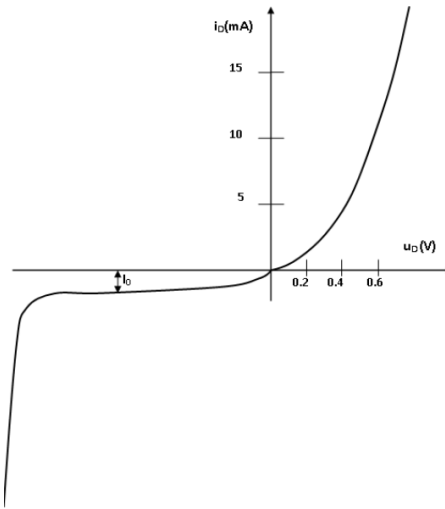


Figura 6: Caracteristica statică a diodei semiconductoare

Tensiunea termică  $u_T$  la temperatura camerei ( $25^\circ C$ ) este de  $25mV$ . Curentul de saturație  $I_0$  este dependent de parametri fizici, tehnologici și geometrici ai joncțiunii PN. Valorile uzuale ale curentului de saturație sunt:  $10 - 100nA$  pentru dioda de siliciu de mică putere și de ordinul microamperilor pentru dioda de germaniu.

## 2.6 Curentul de saturație

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

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

Semnificația mărimilor din formulă este:

- $A$  - 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

Observație:  $I_0$  este direct proporțional cu aria joncțiunii, drept urmare, pentru o diodă de putere mai mare (care are aria joncțiunii mai mare),  $I_0$  va avea o valoare mai mare.

La curenți direcți de ordinul  $1 - 100mA$  (valori des întâlnite în practică) căderea de tensiune pe diodă la polarizare directă ( $u_D$ ) este de  $0,2 - 0,3V$  pentru diodele de germaniu, respectiv  $0,6 - 0,8V$  pentru diodele de siliciu. În conducție

directă, **curentul crește exponențial, valoarea sa multiplicându-se cu 10 la fiecare creștere a tensiunii de 120mV** (la diodele din siliciu).

Coeficientul de emisie  $\gamma$  este cuprins între 1 și 2 (pentru siliciu este mai aproape de 2, pentru germaniu este mai aproape de 1). Această valoare diferă în funcție de mărimea curentului prin diodă.

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.

## 2.7 Determinarea mărimilor $I_0$ și $\gamma$

Se reprezintă ecuația diodei semiconductoare la scară semilogaritmică (ca în Figura 7).

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  $\gamma$ . În ecuația 1 se neglijează  $-I_0$  și se logaritmează, după care se face separarea de variabile pentru obținerea relației lui  $\gamma$  (ecuația 3).

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

$$\gamma = \frac{1}{u_T} \frac{1}{2.3} \frac{\Delta u_D}{\Delta \lg i_D} \quad (3)$$

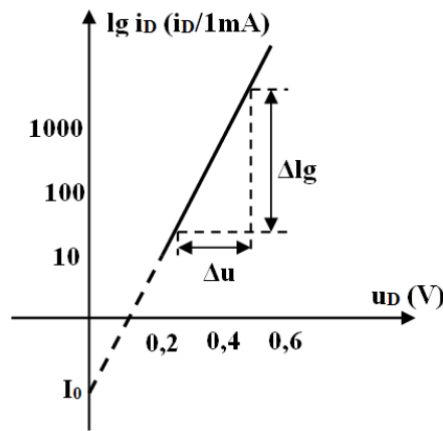


Figura 7: Caracteristica statică a diodei la polarizare directă, la scară semilogaritmică

## 2.8 Punctul static de funcționare

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

Pentru circuitul elementar din Figura 8 punctul static de funcționare se determină prin rezolvarea grafoanalitică a sistemului de ecuații format din ecuația caracteristicii statice a diodei (ecuația 1) și ecuația dreptei statice de funcționare:

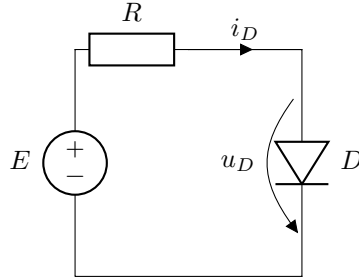


Figura 8: Circuit pentru determinarea punctului static de funcționare al diodei

$$u_D = E - R \cdot i_D \quad (4)$$

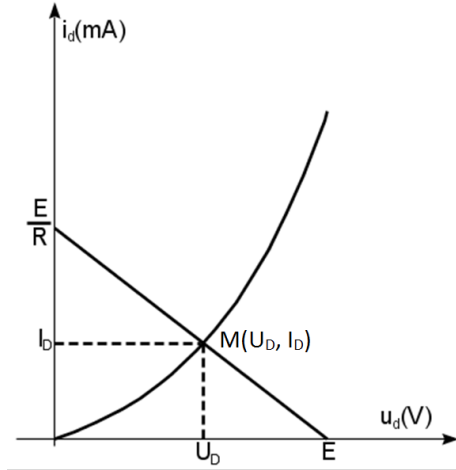


Figura 9: Determinarea teoretică a punctului static de funcționare

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 (care pot fi aplicate în serie cu tensiunea continuă  $E$ ) printr-o rezistență dinamică, pentru care se deduce relația:

$$r_d = \gamma \frac{kT}{qI_d} \quad (5)$$

## 2.9 Rezistența dinamică

Atunci când curentul suferă variații relativ mici ( $\frac{\Delta i_D}{i_D} \ll 1$ ), putem considera că porțiunea de caracteristică pe care se deplasează punctul static de funcționare este o linie dreaptă (Figura 10).

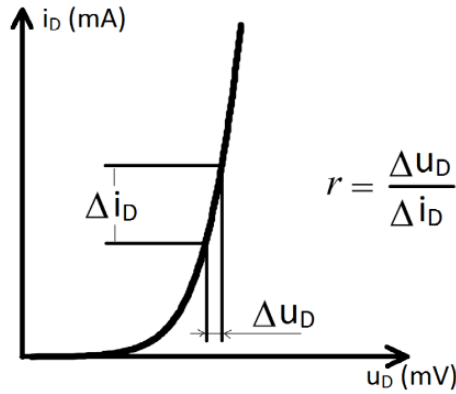


Figura 10: Determinarea rezistenței dinamice

Introducem **rezistența dinamică** folosind legea lui Ohm:

$$r = \frac{du_D}{di_D} = \frac{\gamma u_T}{i_D} \quad (6)$$

Observăm că aceasta este invers proporțională cu valoarea curentului de repaus (este curentul prin diodă la un moment în timp). La diodele din siliciu:

$$r \approx \frac{50mV}{i_D} \quad (7)$$

Pentru valori mici ale curenților ( $i_D = 1mA$ ), rezistența dinamică are valori mici: pentru  $\gamma = 2$ ,  $r = 50\Omega$ . La curenți mari ( $i_D = 100mA$ ) rezistența dinamică scade și mai mult, devenind  $r = 0.5\Omega$ .

**Atenție!** Rezistența dinamică a diodei se calculează cu ajutorul legii lui Ohm dacă și numai dacă  $i_D$  și  $u_D$  variază în funcție de punctul static de funcționare ( $U_D$  și  $I_D$ )!

Măsurarea rezistenței dinamice se poate face fie prin măsurarea căderii de tensiune și a curentului prin diodă pentru 2 puncte de funcționare apropiate (și aplicarea formulei menționate alături de graficul din Figura 10, fie prin utilizarea unui punct static de funcționare (în jurul căruia se definește rezistența dinamică) și aplicarea unui regim alternativ (introducerea variației) - metodă detaliată în cele ce urmează.

Condensatorul  $C_1$  realizează cuplarea semnalului alternativ și nu permite trecerea curentului continuu.

Sursa de tensiune DC și rezistența  $R_1$  sunt folosite pentru stabilirea PSF-ului. La acestea se adaugă sursa de tensiune AC (pentru a varia  $U_D$  și  $I_D$  în jurul PSF). Rezistența  $R_2$  este introdusă pentru a forma un divizor de tensiune rezistiv ce va facilita calculul rezistenței dinamice.

Formula de calcul a rezistenței dinamice se extrage din relația:

$$U_0 = \frac{AC_{RMS} \cdot (R_1 \parallel r)}{R_2 + R_1 \parallel r} \quad (8)$$



unde considerăm  $AC_{RMS} = \frac{A_{peak}}{\sqrt{2}} = \frac{A_{peak-peak}}{2\sqrt{2}}$

Observație: Pentru deducerea formulei 8 se folosește principiul superpoziției.

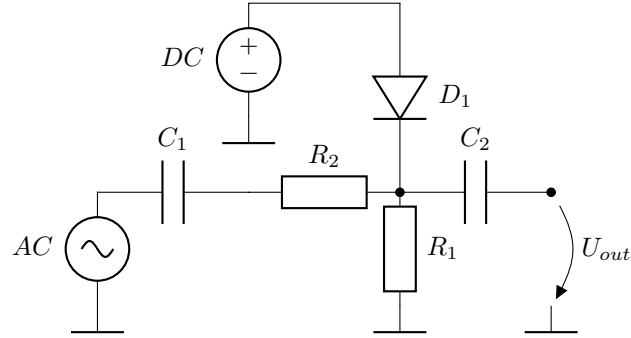
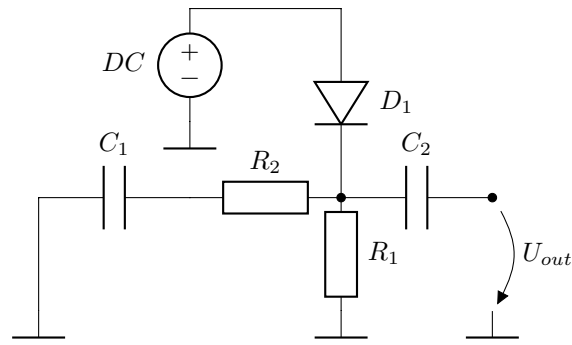
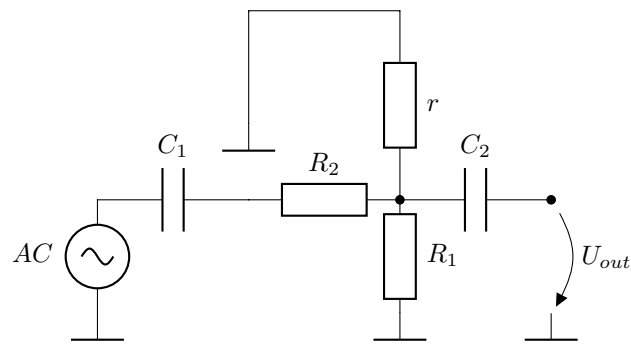


Figura 11: Circuit pentru determinarea rezistenței dinamice folosind cuplajul în AC



(a) Regim static



(b) Regim dinamic

Figura 12: Circuite echivalente obținute prin aplicarea principiului superpoziției

## 2.10 Polarizare inversă

La polarizare inversă, curentul prin dioda ideală este nul. În realitate, la polarizare inversă, regiunea de sarcină spațială se mărește și apare un curent de generare, dependent de tensiunea aplicată, astfel că, în conducție inversă, curentul unei diode variază cu tensiunea aplicată (putând crește de câteva ori). Curenții inverși sunt de ordinul zecilor de nanoamperilor pentru diodele de siliciu și de ordinul microamperilor pentru diodele de germaniu.

Dacă modulul tensiunii inverse depășește o valoare numită **tensiune de străpungere**, curentul invers  $I_0$  crește brusc (Figura 6), valoarea lui fiind limitată doar de circuitul exterior. Există două mecanisme care contribuie la fenomenul de străpungere: **efectul Zener** (dominant pentru tensiuni de străpungere mai mici de  $5V$ ) și **efectul de multiplicare în avalanșă** (dominant dacă tensiunea de străpungere este mai mare de  $8V$ ). Când tensiunea de străpungere este între  $5$  și  $8V$ , fenomenul are loc prin ambele mecanisme.

**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 (diodă), accelerarea lor în câmpul electric impus și ciocnirea cu alți electroni.

## 2.11 Dioda Zener (stabilizatoare de tensiune)

Diodele stabilizatoare de tensiune (impropriu, dar frecvent denumite diode Zener) sunt caracterizate printr-o tensiune de străpungere bine definită, ca urmare a efectului de multiplicare în avalanșă ce 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 13 (caracteristica statică, atât cea directă cât și cea inversă). Determinarea rezistenței dinamice a diodei,  $r_Z$ , se face conform relației:

$$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} \quad (9)$$

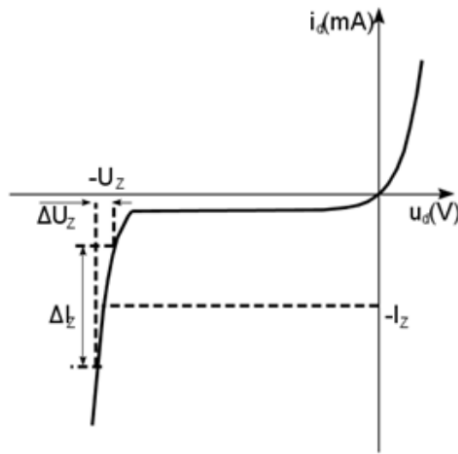


Figura 13: Caracteristica statică a diodei Zener

## 2.12 Dioda Schottky

Diodele Schottky se realizează prin joncțiune metal-semiconductor. 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.

$$i_D = I_0 \left( e^{\frac{q u_D}{\gamma k T}} - 1 \right), \text{ considerând } \gamma \cong 1 \quad (10)$$

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

### Proprietăți:

- Cădere de tensiune directă mai mică,  $0.3 - 0.4V$  Schottky (în comparație cu o diodă semiconductoare de siliciu cu cădere de tensiune de  $0.6V$ );
- Funcționare foarte bună la frecvențe mari (MHz, GHz) și timpi de comutație foarte mici (sub  $100ps$ ).

**Explicația:** Spre deosebire de diodele din siliciu care nu prezintă purtători de sarcină în regiunea golită, diodele Schottky nu au o astfel de regiune, rezultând că nu există recombinări între purtătorii de tip N și P, deci nu există zone golite de purtători de sarcină.

## 2.13 Dioda electroluminiscentă (LED - Light Emitting Diode)

LED-urile sunt realizate din joncțiuni GaAs, semiconductor care are banda interzisă de circa  $1.6 - 1.7eV$ . 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  $i_D = 20mA$ .

Culoare	Lungime de undă	Tensiune (V)
Infraroșu	850...940nm	$1.2 < \Delta V < 1.5$
Roșu	610...760nm	$1.63 < \Delta V < 2.03$
Verde	500...570nm	$1.9 < \Delta V < 4$
Albastru	450...500nm	$2.48 < \Delta V < 3.7$

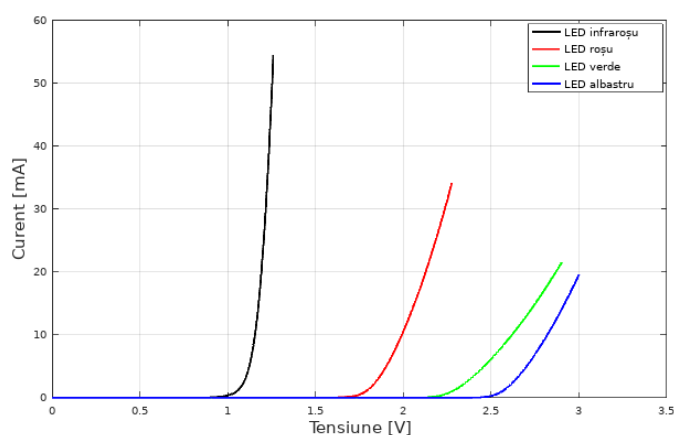


Figura 14: Caracteristicile LED-urilor

**Observație:** Deși capsulele de plastic ale LED-urilor sunt de obicei colorate în culoarea LED-ului, lungimea de undă a luminii emise de LED depinde de caracteristicile joncțiunii, nu de culoarea plasticului.

## 2.14 Puntea redresoare

Puntea redresoare (redresor bi-alternanță) este formată din 4 diode, poziționate ca în Figura 15, și unul sau mai multe condensatoare. Rolurile acestui circuit sunt de a menține polaritatea semnalului de ieșire indiferent de polaritatea semnalului de intrare și de a converti curentul alternativ în curent continuu.

În funcție de polaritatea tensiunii de intrare, diodele din circuit conduc și se blochează conform figurilor de mai jos:

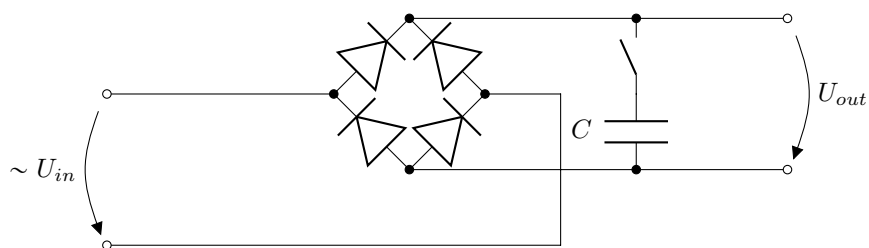


Figura 15: Redresorul bi-alternanță

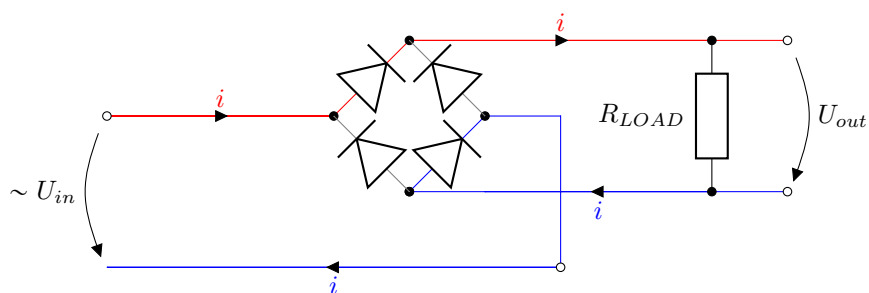


Figura 16: Funcționarea redresorului bi-alternanță - semialternanță pozitivă  $U_{in} > 0$

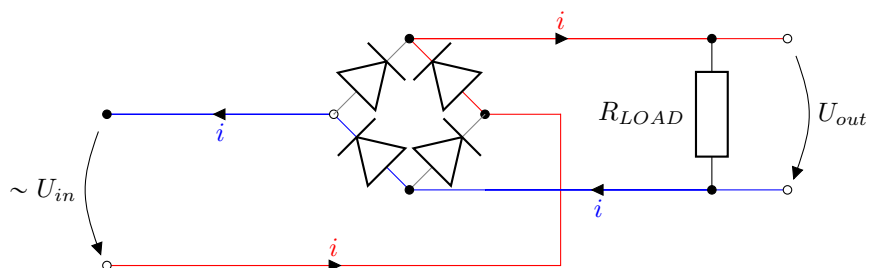


Figura 17: Funcționarea redresorului bi-alternanță - semialternanță negativă  $U_{in} < 0$

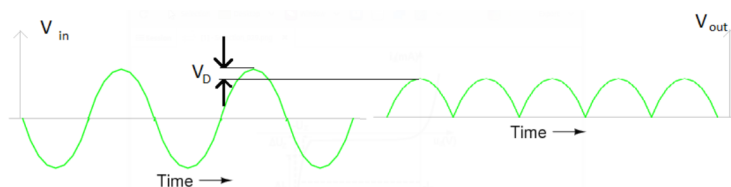


Figura 18: Efectul tensiunii directe de pe diode ( $V_D$ ) asupra amplitudinii

Observație: Acest circuit poate avea ca echivalent matematic funcția modul. Totuși, trebuie să ținem cont de căderile de tensiune de pe diodele din puntea redresoare. Acestea au ca efect reducerea amplitudinii semnalului de la ieșirea redresorului.



Figura 19: Semnal de ieșire  $V_{out}$  (cu condensator)

Reguli de alegere a valorii condensatorului:

$$R_{LOAD} \cdot C \gg \frac{1}{f} \quad (11)$$

Unde:

- $R_{LOAD}$  - rezistența echivalentă a circuitului conectat între bornele ( + ) și ( - ) ale circuitului de redresare (măsurată în  $\Omega$ );
- $C$  - valoarea capacității de la ieșirea circuitului (măsurată în  $F$ );
- $f$  - frecvența semnalului sinusoidal de intrare (masurată în  $Hz$ );

De asemenea, folosim formula:

$$\Delta V = \frac{I_{sarcina}}{2 \cdot f \cdot C} \quad (12)$$

Unde:

- $C$  - valoarea capacității de la ieșirea circuitului (măsurată în  $F$ );
- $f$  - frecvența semnalului sinusoidal de intrare (masurată în  $Hz$ );
- $I_{sarcina}$  - curentul de la ieșirea circuitului de redresare și depinde de  $R_{LOAD}$  (rezistența de sarcină conectată la ieșirea circuitului);
- $\Delta V$  - variația semnalului de ieșire și este egală cu diferența dintre valoarea sa maximă și cea minimă.



Figura 20: Fluctuația ieșirii în funcție de timp