



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI



Instrumente Structurale
2007-2013



Platformă de e-learning și curriculum e-content pentru învățământul superior tehnic

Elemente de Electronică Analogică

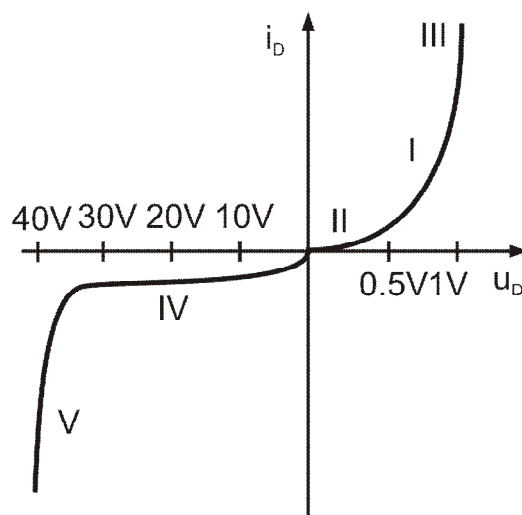
5. Circuite elementare cu diode

Caracteristica diodei reale

➤ Caracteristica ideală a diodei:

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

➤ Caracteristica unei diode reale:



- **zona I** – zona caracteristicii ideale;
- **zona II** – zona curenților mari - contează rezistențele zonelor neutre – apare o tendință de liniarizare a caracteristicii;
- **zona III** – zona curenților direcți de valoare mică – nu se mai pot neglija fenomenele de generare-recombinare din regiunea de trecere (care crește); se obține o caracteristică de tipul $e^{\frac{qu_D}{2kT}}$; mai corect, $e^{\frac{qu_D}{\eta kT}}$ cu valori pentru η de circa 1,2 (pentru Ge) și, respectiv de 1- 1.5 (pentru Si)

- **zona IV** – zona tensiunilor inverse mici (normale); curentul invers are mai multe componente:
 - curentul de saturație al joncțiunii (constant);
 - curentul de generare din regiunea de trecere (crește odată cu creșterea valorii inverse a tensiunii aplicate);
 - curentul de pierderi la suprafață (dependent de tensiunea aplicată)

Ponderile acestor componente sunt diferite în funcție de material.

- **zona V** – zona tensiunilor inverse mari, în care curentul invers crește nelimitat (poate fi limitat numai de circuitul exterior). Sunt 2 fenomene:
 - fenomen Zener – smulgerea de purtători din rețea prin câmp electric;
 - fenomen de multiplicare în avalanșă – producere de purtători prin generare sau prin câmp electric, accelerarea acestora, ciocnirea cu rețeaua și smulgerea altor purtători.

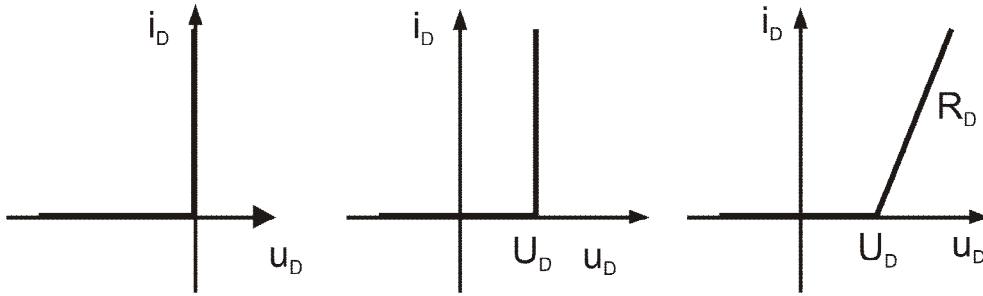
$|i_{invers} = MI_0|$ coeficient de multiplicare în avalanșă:

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{u_D}{U_{str}}\right)^m}$$

U_{str} tensiune de străpungere – dependentă de concentrațiile de impurități;

m exponent dependent de material: 3 pentru Ge tip P+N, 4-7 pentru Ge tip PN+, Si.

➤ Aproximarea caracteristicilor:

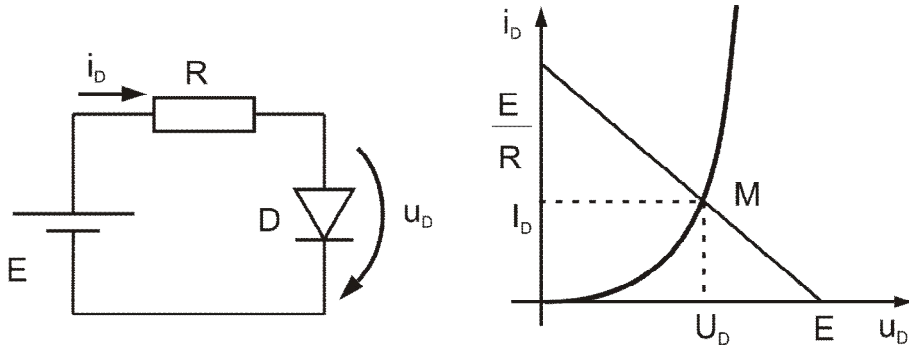


- dioda ideala ;
- dioda idealizată, cu tensiune de prag, U_D cu valori de 0,2-0,3V pentru Ge și 0,6V pentru Si (la curenți relativ mici);
- dioda idealizată cu tensiune de prag și cu rezistență serie.

Curentul invers se neglijează, practic, întotdeauna; eventual se ține seama de rezistența de pierderi, de valoare foarte mare.

Regimul dinamic al joncțiunii pn

➤ Circuit de polarizare:



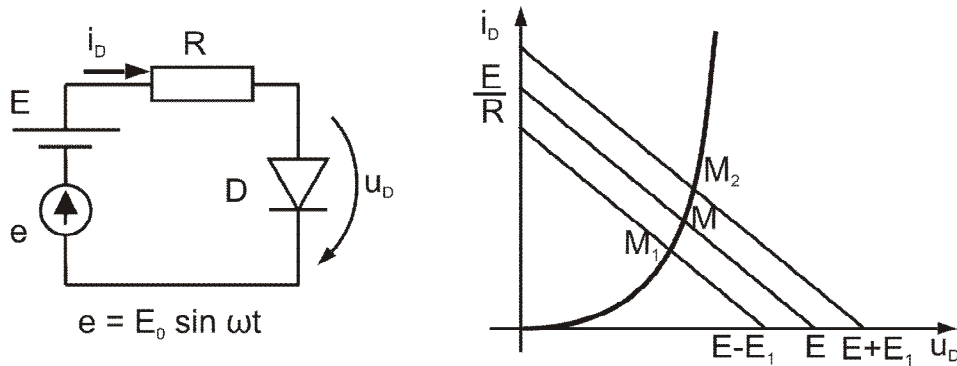
➤ Determinarea PSF: (U_D, I_D)

Ecuatii:

$$E = Ri_D + u_D \quad \text{dreapta de funcționare statică} \rightarrow \text{PSF}$$

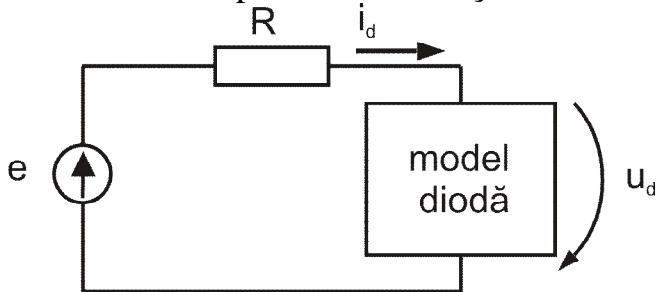
$$i_D = i_D(u_D) \quad M(I_D, U_D)$$

Regimul dinamic se aplică peste regimul de curent continuu. Punctul de funcționare se deplasează în jurul PSF iar pentru semnale variabile suficient de mici, comportarea diodei poate fi considerată liniară.



Este necesar un *model* (o *schema echivalentă*) valabil pentru regimul dinamic și anume pentru determinarea curentului prin circuit și a tensiunii la bornele diodei.

- a) la **frecvențe joase** – se pot neglija fenomenele reactive și modelul va fi caracterizat printr-o **rezistență dinamică**.



Fie: $\begin{cases} u_D = U_D + u_d \\ i_D = I_D + i_d \end{cases}$ componente PSF și componente variabile;

$$\begin{aligned} i_D &= I_0 \left(e^{\frac{qu_D}{kT}} - 1 \right) = I_0 \left(e^{\frac{q(U_D + u_d)}{kT}} - 1 \right) = I_0 \left(e^{\frac{qU_D}{kT}} e^{\frac{qu_d}{kT}} - 1 \right) = \\ &= I_0 \left(e^{\frac{qU_D}{kT}} \left(1 + \frac{qu_d}{kT} \right) - 1 \right) = I_0 \left(e^{\frac{qU_D}{kT}} - 1 \right) + I_0 \frac{qu_d}{kT} e^{\frac{qU_D}{kT}} \end{aligned}$$

Rezultă:

$$i_d = I_0 \frac{qu_d}{kT} e^{\frac{qU_D}{kT}}$$

➤ **Rezistența dinamică:**

$$r_d = \frac{u_d}{i_d} = \frac{kT}{q} \frac{1}{I_0 e^{\frac{qU_D}{kT}}} = \frac{kT}{q(I_D + I_0)}$$

- La polarizare directă: $U_D > 0$, $U_D \gg \frac{kT}{q} = 0,026 V$

$$r_d = \frac{kT}{q(I_D + I_0)} \cong \frac{kT}{qI_D} = \frac{v_T}{I_D}$$

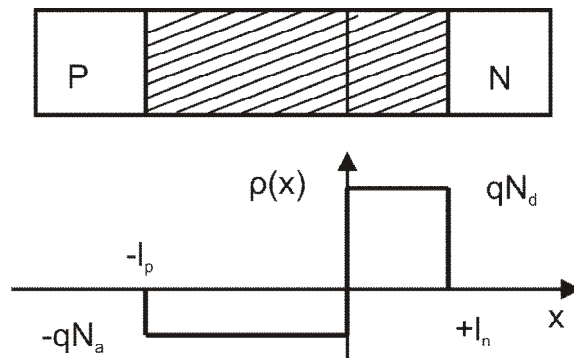
$$r_d = \frac{v_T}{I_D} = \frac{26}{I_D}; \quad [\Omega] = \frac{[mV]}{[mA]}$$

- La polarizare inversă: $U_D < 0$, $|U_D| \gg \frac{kT}{q}$

$$r_d = \frac{kT}{qI_0} \quad \text{foarte mare}$$

- b) la **frecvențe înalte** apar elemente capacitive:
- datorită sarcinilor fixe din regiunea de trecere
 - datorită sarcinilor mobile din zonele în care are loc difuzia de purtători de sarcină

b1) **capacitatea de barieră**



Sarcina acumulată în regiunea de trecere (sarcină electron \times concentrație \times volum):

$$Q_b = -qN_a A L_p = -qN_a A \frac{n_n}{n_n + p_p} l$$

$$Q_b = -qN_a A \frac{n_n}{n_n + p_p} l_0 \sqrt{1 - \frac{u_D}{U_0}}$$

$$\Delta u_D \Rightarrow \Delta Q_b \Rightarrow C_b$$

$$C_b = \left. \frac{dQ_b}{du_D} \right|_M = -qN_a A \frac{n_n}{n_n + p_p} l_0 \left(-\frac{1}{2} \frac{1}{U_0} \right) \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{U_D}{U_0}}}$$

$$C_b = \frac{C_{b0}}{\sqrt{1 - \frac{U_D}{U_0}}}; \quad C_{b0} = \frac{qN_a A \frac{n_n}{n_n + p_p} l_0}{2U_0}$$

- C_{b0} este proporțional cu aria joncțiunii;
- În funcție de profilul de impurități se obțin relații de forma:

$$C_b = \frac{C_{b0}}{\left(1 - \frac{u_D}{U_0}\right)^m} \quad \text{cu } m \text{ având valori cuprinse între } 0,3 \text{ și } 0,5.$$

De regulă, are efect negativ (întârzie răspunsul la frecvențe înalte).

Se folosește sub forma de **diodă Varicap**.

b2) *capacitatea de difuzie*

Este determinată de surplusul de sarcină obținut prin difuzie:

$$\begin{aligned}
Q_d^p &= qA \int_{l_n}^{\infty} p_{exces} dx = qA \int_{l_n}^{\infty} p_n \left(e^{\frac{qu_D}{kT}} - 1 \right) e^{-\frac{x-l_n}{L_p}} dx = \\
&= qAp_n \left(e^{\frac{qu_D}{kT}} - 1 \right) \left(-L_p \right) e^{-\frac{x-l_n}{L_p}} \Big|_{l_n}^{\infty} = qAp_n L_p \left(e^{\frac{qu_D}{kT}} - 1 \right)
\end{aligned}$$

$$\Delta u_D \Rightarrow \Delta Q_d^p \Rightarrow C_d$$

$$C_d^p = \left. \frac{dQ_d^p}{du_D} \right|_M = qAp_n L_p \frac{q}{kT} e^{\frac{qu_D}{kT}}$$

componenta determinată de goluri; la fel pentru electroni.

Capacitatea totală de difuzie:

$$C_d = \frac{Aq^2(p_n L_p + n_p L_n)}{kT} e^{\frac{qu_D}{kT}} = ct \cdot I_D \quad (\text{din PSF}).$$

Pentru o jonctiune P+N:

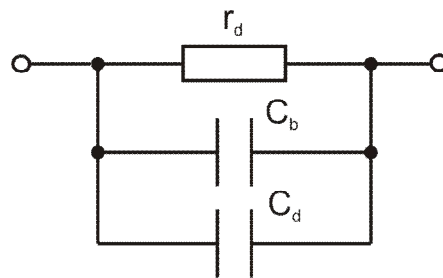
$$\begin{cases} N_a \gg N_d; p_{p2} \gg n_n; \\ n_p = \frac{n_i^2}{p_p} \ll \frac{n_i^2}{n_n} = p_n \end{cases}$$

$$C_d \cong C_d^p = \frac{Aq^2 p_n L_p}{kT} e^{\frac{qU_D}{kT}} = \frac{q}{kT} \frac{qAp_n D_p}{L_p} \frac{L_p^2}{D_p} e^{\frac{qU_D}{kT}};$$

$$C_d = \frac{q}{kT} \tau_p I_D$$

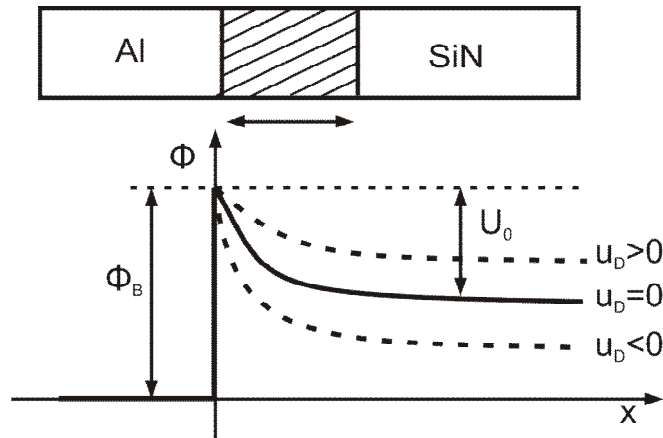
- Capacitatea de difuzie este proporțională cu curentul direct prin diodă.
- Capacitatea de difuzie este mai importantă decât capacitatea de barieră în conducție directă și este neglijabilă la polarizarea inversă a diodei.

➤ **Circuitul echivalent la semnale mici al diodei va fi:**



Variante constructive ale diodelor

- Se pot realiza și **diode Schottky**, cu funcții asemănătoare diodelor realizate cu joncțiuni pn.
Diodele Schottky se realizează prin contact metal-semiconductor de tip redresor, de obicei Al cu SiN slab dopat cu impurități ($<10^{17} / \text{cm}^3$)



- la contact se formează o barieră de potențial și o regiune de sarcină spațială extinsă numai în semiconductor. Rezultă că dioda Schottky funcționează numai cu purtători majoritari.
- la echilibru termodinamic curentul prin diodă este nul prin compensarea celor două componente de electroni ce depășesc cele două bariere de potențial, Φ_B și U_0 .
- la polarizare directă ($u_D > 0$) bariera semiconductor-metal se micșorează și crește numărul de electroni ce trec din semiconductor în metal; apare curent direct care ascultă de relația:

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

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

Proprietăți:

- căderea de tensiune directă este mai mică (circa la jumătate) decât la o diodă bazată pe joncțiune pn (regiunea de trecere se extinde numai în semiconductor);
- în regim dinamic contează numai rezistența diamică și capacitatea de barieră (capacitatea de difuzie nu există deoarece nu sunt purtători minoritari de sarcină) → funcționare foarte bună la frecvențe mari și în comutație (timpuri de comutație mai mici de 100 ps).

- **Diode de semnal mic** – diverse utilizări
parametri: - curentul maxim direct admisibil – 50 - 100 mA
 - tensiunea invers maxim admisibilă – 20 – 100 V
 - putere disipată maxim admisibilă – 150 mW

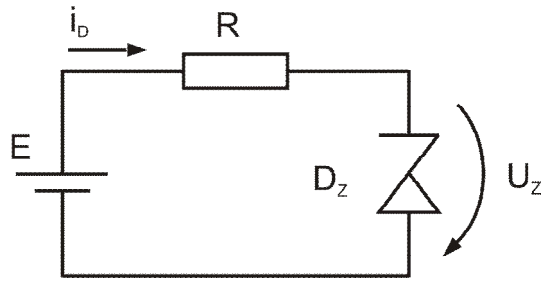
- **Diode redresoare** – utilizare în conversia *ca*→*cc* pentru frecvențe de până la 400 Hz
 - curentul maxim direct admisibil - 10 mA – 100 A
 - tensiunea invers maxim admisibilă – 10 – 1000 V
 - putere disipată maxim admisibilă – 0,1 – 100 W

(se pot utiliza și sub forma de punți redresoare)

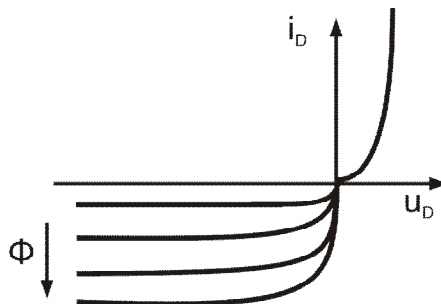
- **Diode de detecție** – demodularea semnalelor, funcționează la frecvențe mari și foarte mari, dar la puteri mici. Pot fi diode cu joncțiuni sau diode Schottky.
- **Diode varicap** – cu utilizare în circuite acordate, oscilatoare, filtre, la care se folosește dependența capacității de barieră a diodei de tensiunea inversă aplicată; capacitatea de barieră este proporțională cu aria joncțiunii:

$$C_b = \frac{C_{b0}}{\left(1 - \frac{U_D}{U_0}\right)^m}$$

- **Diode de comutație** utilizate în circuite de comutație; parametrii principali îi reprezintă *timpii de comutație directă și inversă*; de obicei, parametrii referitori la mărimile maxim admisibile nu sunt limitativi.
- **Diode Zener** se bazează pe fenomenul de multiplicare în avalanșă. tensiunea stabilizată este cuprinsă între 3V și 100V iar curentul prin diodă este de ordinul a 10 - 100 mA, în funcție de puterea diodei.



- **Diode Tunel** (Esaki) sunt de tipul P+N+ la care surplusul de purtători trece peste bariera de purtători prin efect tunel; are caracteristica cu rezistență negativă și se folosește în circuite care funcționează la frecvențe mari sau în circuite de comutație.
- **Fotodiode** (fotoelemente) sunt diode cu joncțiuni sau de tip Schottky la care radiațiile luminoase pot pătrunde prin capsulă și sunt absorbite de materialul semiconductor – ca urmare se intensifică procesul de generare de perechi electron-gol și se modifică curentul de saturație al diodei. Se folosește numai cu polarizare inversă.



- **Diode electroluminiscente** (LED) sunt realizate din joncțiuni de tipul GaAs, semiconductor cu banda interzisă de circa 1,6 -1,7 eV. În urma recombinărilor directe, se emit cuante de lumină în spectrul vizibil, cu diferite culori. Funcționează numai la polarizare directă.
- **Diode generatoare și amplificatoare de microunde** (IMPATT, TRAPATT, BARIT) – funcționează după alte principii fizice.