

CAP. V ELEMENTE DE FIZICA SEMICONDUCTOARELOR

V.1.Introducere

Definiție...clasificare...model clasic al conducției electrice

V.2. Joncțiunea p-n

O joncțiune p-n este formată prin alăturarea a două semiconductoare extrinseci cu purtători majoritari având sarcini electrice de semne opuse (Fig.VI.1). Semiconductorul din stânga este de tip p având concentrația de impurități acceptoare N_a , iar semiconductorul din stânga este de tip n având concentrația de impurități donoare N_d . Se consideră: $p \cong N_a$ și $n \cong N_d$. De asemenea, presupunem că regiunile respective sunt dopate uniform, iar “trecerea” p-n este abruptă. Această structură se numește *joncțiune p-n abruptă*.

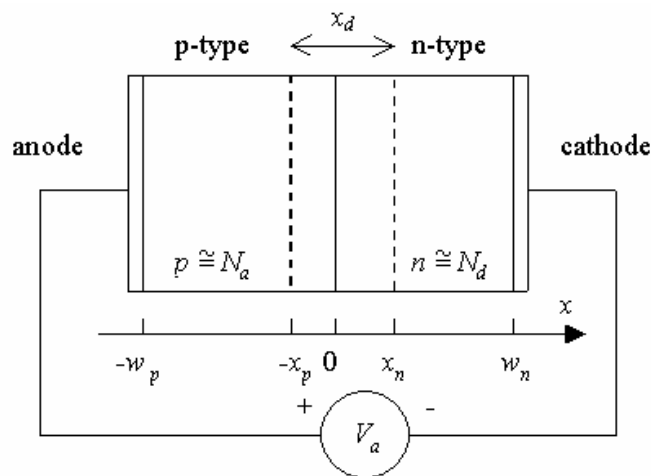


Fig. VI.1. Secțiune transversală printr-o joncțiune p-n abruptă.

În cele mai multe cazuri se lucrează cu joncțiuni p-n în care una din regiuni este semnificativ mai dopată decât cealaltă. Atunci, trebuie considerată numai regiunea slab dopată deoarece ea va determina, în principal, proprietățile caracteristice dispozitivului. O astfel de structură se numește *joncțiune p-n lateral-abruptă*.

The junction is biased with a voltage V_a as shown in Figure 4.2.1. We will call the junction forward-biased if a positive voltage is applied to the p -doped region and reversed-biased if a negative voltage is applied to the p -doped region. The contact to the p -type region is also called the anode, while the contact to the n -type region is called the cathode, in reference to the *anions* or positive carriers and *cations* or negative carriers in each of these regions.

Pentru a atinge echilibrul termic, electronii/golurile din apropierea joncțiunii metalurgice difuzează prin joncțiune în regiunea de tip p , respectiv n unde sunt puțini electroni, respectiv puține goluri. Prin acest proces rezultă donori/acceptori ionizați și, în

consecință, apare o regiune săracă în purtători de sarcină electrică. Această regiune, cuprinsă între $-x_p$ și x_n se numește *strat de baraj*. Sarcina electrică a ionilor acceptori și donori produce un câmp electric care, la rândul lui, generează o deplasare a purtătorilor în direcție opusă. Difuzia purtătorilor continuă până când curentul de drift devine egal cu cel de difuzie. Astfel se atinge echilibrul termic (indicat de un nivel Fermi constant).

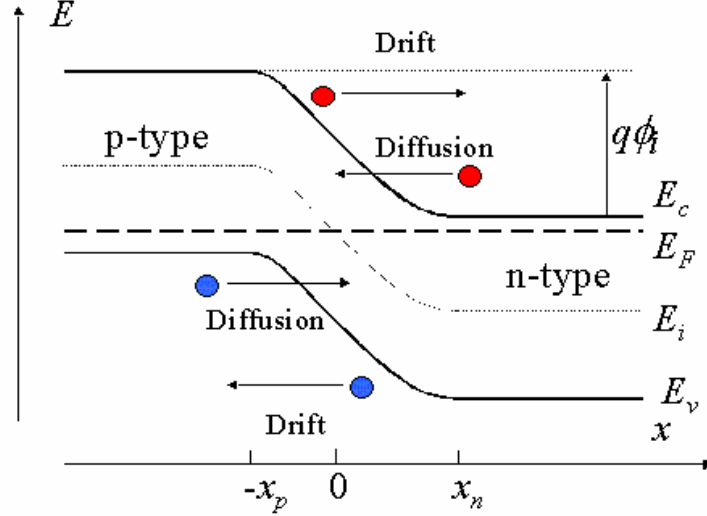


Fig. VI.2. Diagrama benzilor de energie pentru o joncțiune p-n la echilibru termic.

Deși la echilibru termic nu se aplică niciun câmp electric extern între regiunile p și n, există totuși un potențial intern, ϕ_i , generat de diferența dintre lucrurile mecanice dintre cele două tipuri de semiconductoare. Acesta este egal cu potențialul propriu, adică cu potențialul creat de stratul de baraj la echilibru termic.

Since thermal equilibrium implies that the Fermi energy is constant throughout the p-n diode, the built-in potential equals the difference between the Fermi energies, E_{Fn} and E_{Fp} , divided by the electronic charge. It also equals the sum of the bulk potentials of each region, ϕ_n and ϕ_p , since the bulk potential quantifies the distance between the Fermi energy and the intrinsic energy. This yields the following expression for the built-in potential.

$$\phi_i = V_t \ln \left(\frac{N_d N_a}{n_i^2} \right) \quad (\text{VI.1})$$

Alimentare directă și inversă

We now consider a p-n diode with an applied bias voltage, V_a . A forward bias corresponds to applying a positive voltage to the anode (the p-type region) relative to the cathode (the n-type region). A reverse bias corresponds to a negative voltage applied to the cathode. Both bias modes are illustrated with Fig. VI.3. The applied voltage is proportional to the difference between the Fermi energy in the n-type and p-type quasi-neutral regions.

As a negative voltage is applied, the potential across the semiconductor increases and so does the depletion layer width. As a positive voltage is applied, the potential across the semiconductor decreases and with it the depletion layer width. The **total potential** across the semiconductor equals the built-in potential minus the applied voltage, or:

$$\phi = \phi_i - V_a \quad (\text{VI.2})$$

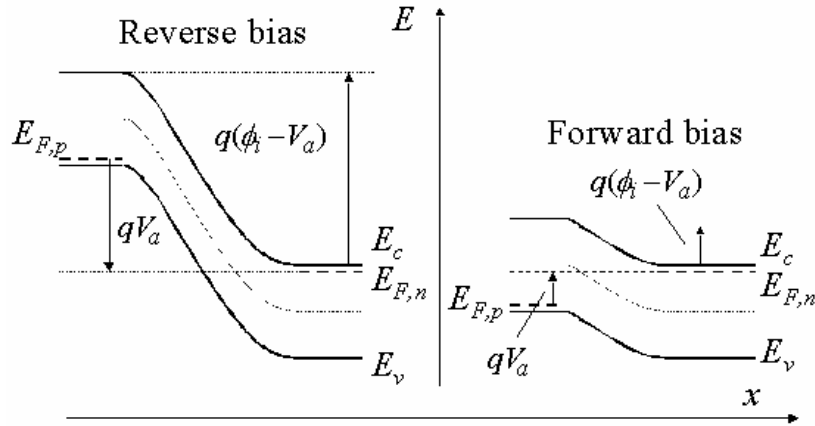


Fig. VI.2. Diagrama benzilor de energie pentru o joncțiune p-n alimentată direct și invers.

Analiza electrostatică a unei diode p-n

The electrostatic analysis of a p-n diode is of interest since it provides knowledge about the charge density and the electric field in the depletion region. It is also required to obtain the capacitance-voltage characteristics of the diode.

Pornim de la ecuația Poisson:

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_s} = -\frac{q(p - n + N_d^+ - N_a^-)}{\epsilon_s} \quad (\text{VI.3})$$

unde densitatea de sarcină electrică ρ este scrisă în funcție de concentrațiile electronilor, golurilor, donatorilor și acceptorilor.

To solve the equation, we have to express the electron and hole density, n and p , as a function of the potential, ϕ , yielding:

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{2qn_i}{\epsilon_s} \left(\sinh \frac{\phi - \phi_F}{V_t} + \sinh \frac{\phi_F}{V_t} \right) \quad (\text{VI.4})$$

unde:
$$\sinh \frac{\phi_F}{V_t} = \frac{N_a^- - N_d^+}{2n_i} \quad (\text{VI.5})$$

în condiții particulare (de ex. sărăcire deplină de purtători în stratul de baraj), folosind relațiile:
$$N_d x_n = N_a x_p \quad \text{și} \quad x_B = x_n + x_p \quad (\text{VI.6; 6'})$$

unde x_B este lățimea totală a stratului de baraj, x_n și x_p lățimile straturilor de baraj din regiunile n, respectiv p, rezultă:

$$x_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) (\phi_i - V_a)} \quad (\text{VI.7})$$

$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q} \frac{N_a}{N_d} \left(\frac{1}{N_a + N_d} \right) (\phi_i - V_a)} \quad (\text{VI.8})$$

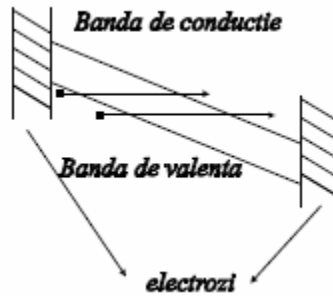
$$x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q} \frac{N_d}{N_a} \left(\frac{1}{N_a + N_d} \right) (\phi_i - V_a)} \quad (\text{VI.9})$$

Efectul Zener

este un mecanism care explică posibilitatea creșterii conductivității în câmpuri electrice intense. Pe baza unor considerente de mecanică cuantică rezultă că energia electronului se modifică în fiecare punct din semiconductor când asupra acestuia acționează un câmp electric. Deoarece energia electronului variază după legea:

$$-\frac{\partial(eU)}{\partial x} = e\mathcal{E}$$

are loc o înclinare a benzilor energetice (Fig. VI...)



Presupunând un astfel de mecanism, un electron din banda de valență poate ajunge în banda de conducție prin *efect tunel*. Probabilitatea de tunelare depinde de lărgimea zonei interzise ΔE_g și de lărgimea barierei a . Pe de altă parte, aceasta depinde de intensitatea câmpului electric deoarece $\Delta E_g = ae\mathcal{E}$, din care: $a = \Delta E_g / (e\mathcal{E})$.

Probabilitatea de tunelare pentru o astfel de barieră este:

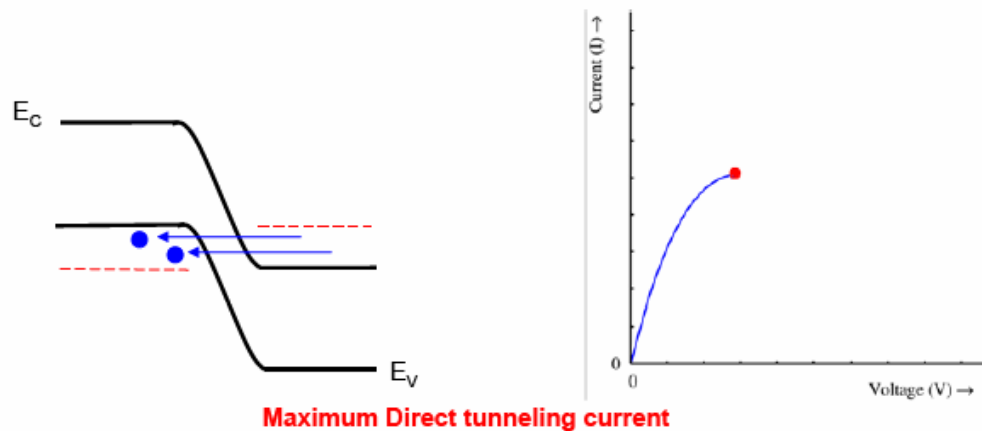
$$T = T_0 \exp\left(\frac{\sqrt{m^*} \Delta E^{3/2}}{eh}\right)$$

Probabilitățile de tunelare din banda de valență în banda de conducție și invers sunt identice. Totuși, deoarece concentrația electronilor este mai mare în banda de conducție, electronii care sunt implicați în efectul Zener provin din banda de valență. Efectul este observabil în câmpuri de ordinul a 10^5 V/cm și este asemănător efectului autoelectronic.

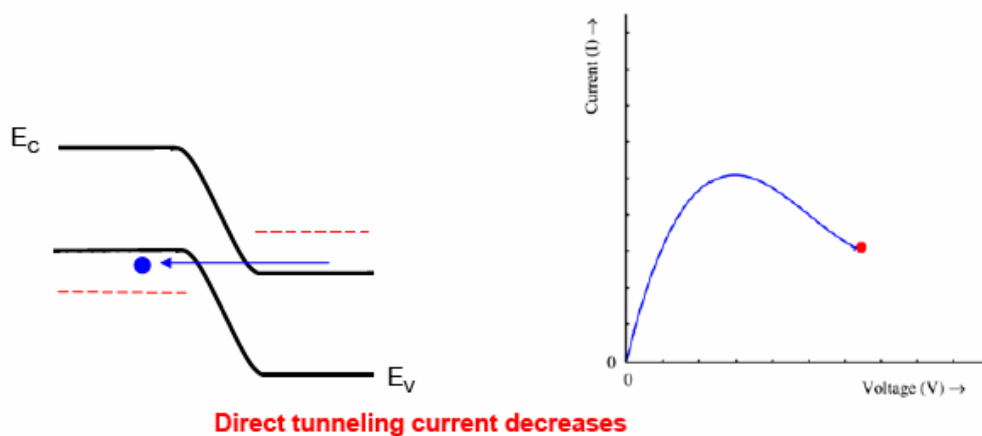
Un alt mecanism propus pentru a explica comportarea semiconductoarelor în câmpuri electrice intense este *ionizarea prin impact*. Un electron (sau un gol) care are o energie foarte mare poate ioniza un atom de impuritate sau un atom din rețeaua cristalină. Ca urmare a ciocnirii cu o astfel de particulă “fierbinte” poate fi generat un purtător de sarcină adițional care, la rândul său, este accelerat de câmp până când, printr-o altă ciocnire, generează un nou purtător. În consecință, numărul de purtători crește. Dacă se ține seamă de faptul că mărirea numărului purtătorilor de sarcină are loc odată cu creșterea proceselor de recombinare, este firesc să admitem că, la un anumit moment, se realizează o stare staționară în care conductivitatea este constantă, având însă o valoare foarte mare. În cazul în care procesele de recombinare nu mai pot compensa generarea de purtători, concentrația purtătorilor va crește în avalanșă și în semiconductor se va produce un proces ireversibil, străpungerea.

Dioda-tunel

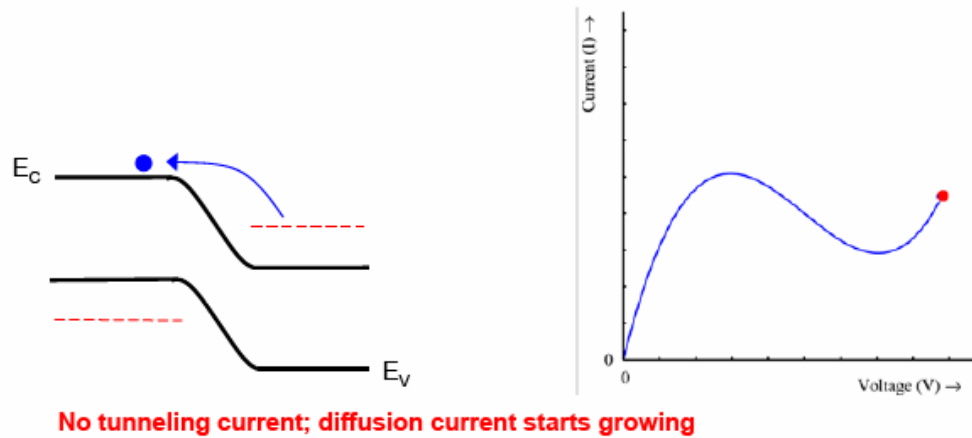
Step 3: With a larger voltage the energy of the majority of electrons in the n-region is equal to that of the empty states (holes) in the valence band of p-region; this will produce maximum tunneling current



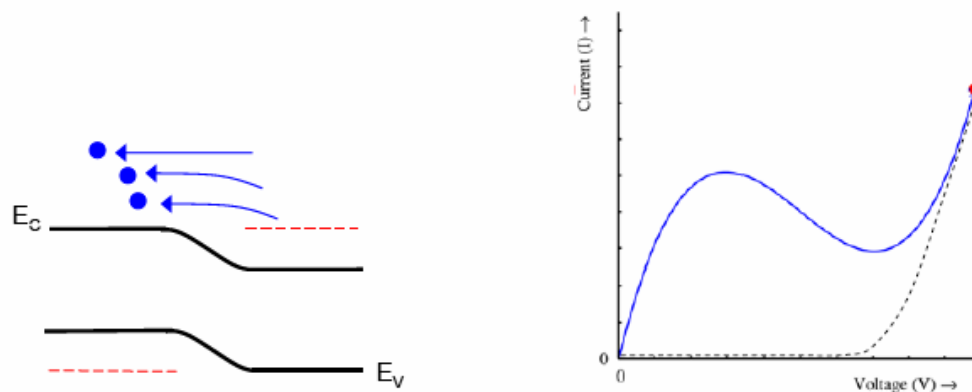
Step 4: As the forward bias continues to increase, the number of electrons in the n side that are directly opposite to the empty states in the valence band (in terms of their energy) decrease. Therefore decrease in the tunneling current will start.



Step 5: As more forward voltage is applied, the tunneling current drops to zero. But the regular diode forward current due to electron – hole injection increases due to lower potential barrier.



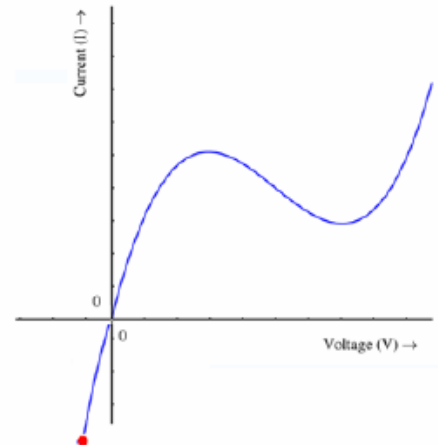
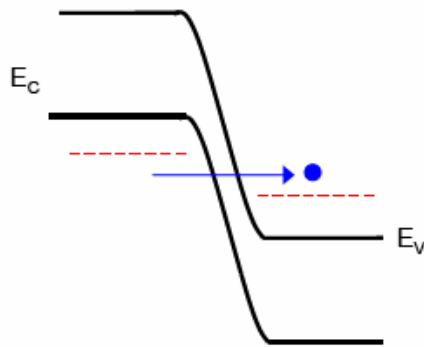
Step 6: With further voltage increase, the tunnel diode I-V characteristic is similar to that of a regular p-n diode.



Under Reverse Bias

In this case the, electrons in the valence band of the p side tunnel directly towards the empty states present in the conduction band of the n side creating large tunneling current which increases with the application of reverse voltage.

The TD reverse I-V is similar to the Zener diode with nearly zero breakdown voltage.



Tunnel Diode I-V

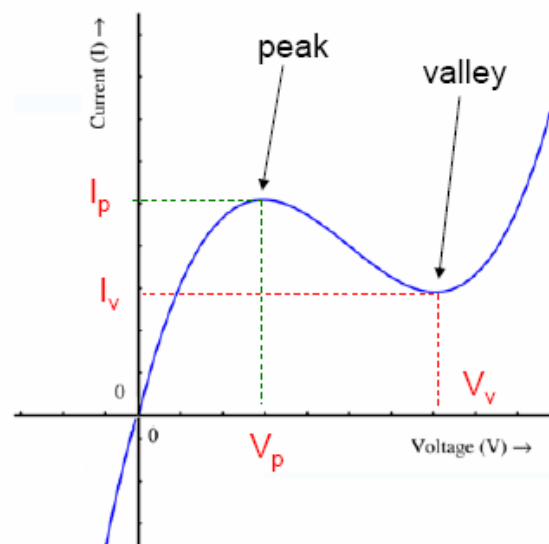
- The total current I in a tunnel diode is given by

$$I = I_{\text{tun}} + I_{\text{diode}} + I_{\text{excess}}$$

- The p-n junction current,

$$I_{\text{diode}} \approx I_s \exp \left[\left(\frac{V}{\eta V_{\text{th}}} \right) - 1 \right]$$

I_s saturation current, η is the ideality factor and $V_{\text{th}} = kT/q$



Tunnel Diode I-V

- The tunnel current,

$$I_{\text{tun}} = \frac{V}{R_0} \exp \left[- \left(\frac{V}{V_0} \right)^m \right]$$

Typically, $m = 1 \dots 3$; $V_0 = 0.1 \dots 0.5 \text{ V}$

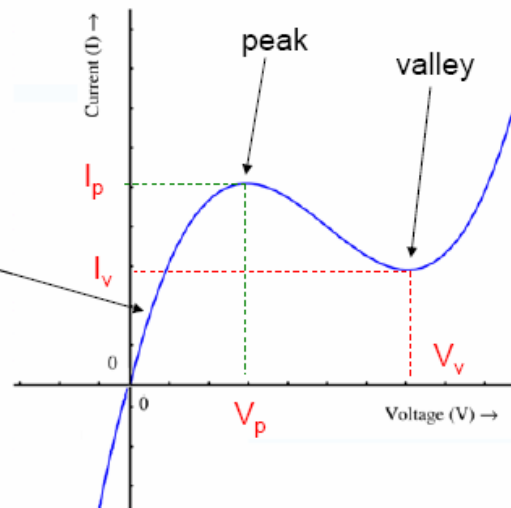
R_0 is the TD resistance in the ohmic region

The maximum |NDR| can be found as

$$|R_{d\text{max}}| = R_0 \frac{\exp \left(\frac{1+m}{m} \right)}{m}$$

The peak voltage V_p :

$$V_p = \left(\frac{1}{m} \right)^{1/m} V_0$$



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**. În această diodă banda interzisă joacă rolul barierei de potențial (vezi Cap. IV).

Caracteristica curent - tensiune a unei diode tunel este indicată în cele două figuri de mai sus. 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).

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**.

În figura 2 notațiile **ip** și **Up** desemnează curentul și respectiv tensiunea **de pic** (de vârf, maximă) iar notațiile **iv** și **Uv** 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.

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 :

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

unde notațiile **C**, **α** , **B** și **β** desemnează constante de material pozitive. Valoarea acestora se calculează prin intermediul valorilor experimentale **ip**, **Up**, **iv** și **Uv**, folosindu-se următorul set de relații :

a) polarizare nulă

b) Polarizare până la tensiunea **Up**

c) Polarizare cu tensiunea **U2**

cu $U_p < U_2 \leq U_v$

e^{U_3}

d) Polarizare cu tensiunea $U_3 > U_v$