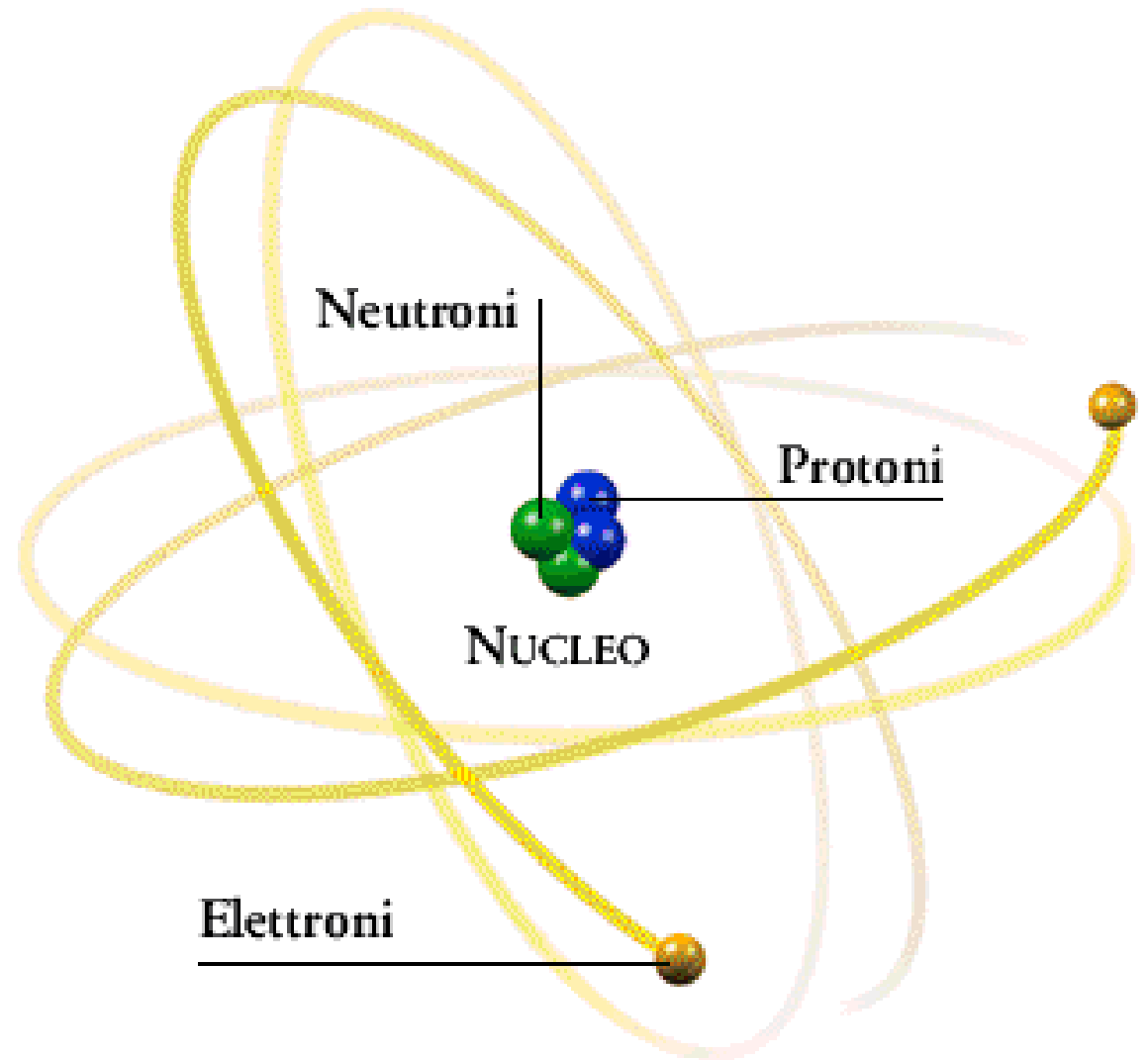


DISPOZITIVE ELECTRONICE ÎN ELECTRONICA APLICATĂ

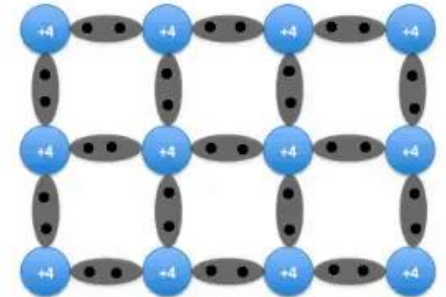
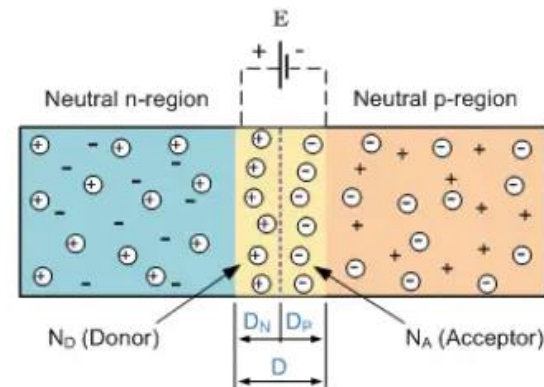
Tema 2:
**ELEMENTE DIN FIZICA
SEMICONDUCTOARELOR.**



Semiconductoare

- Dacă rezistoarele reprezintă componenta pasivă cea mai elementară în circuitele electrice sau electronice, atunci trebuie să considerăm dioda de semnal ca fiind cea mai elementară componentă activă.
- Dar, spre deosebire de un rezistor, o diodă nu se comportă linear cu tensiunea aplicată deoarece are o relație exponențială I-V și, prin urmare, nu poate fi descrisă pur și simplu prin utilizarea legii lui Ohm ca pentru rezistoare.
- Diodele sunt dispozitive semiconductoare unidirectionale de bază care vor permite curentului să treacă prin ele într-o singură direcție, acționând mai mult ca o supapă electrică cu o singură cale (cu condiția de polarizare directă).
- Diodele sunt realizate dintr-o singură bucată de material **semiconductor** care are o "regiune P" pozitivă la un capăt și o "regiune N" negativă la celălalt și care are o valoare de rezistivitate undeva între cea a unui conductor și a unui izolator. Dar ce este un material "**semiconductor**"?

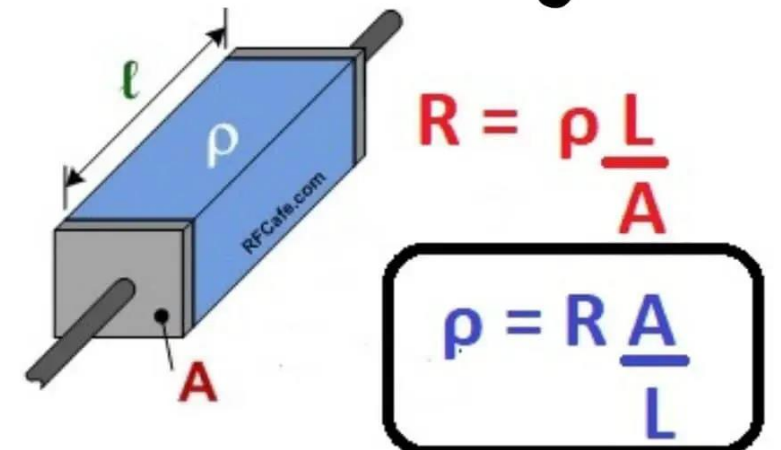
What is a Semiconductor?



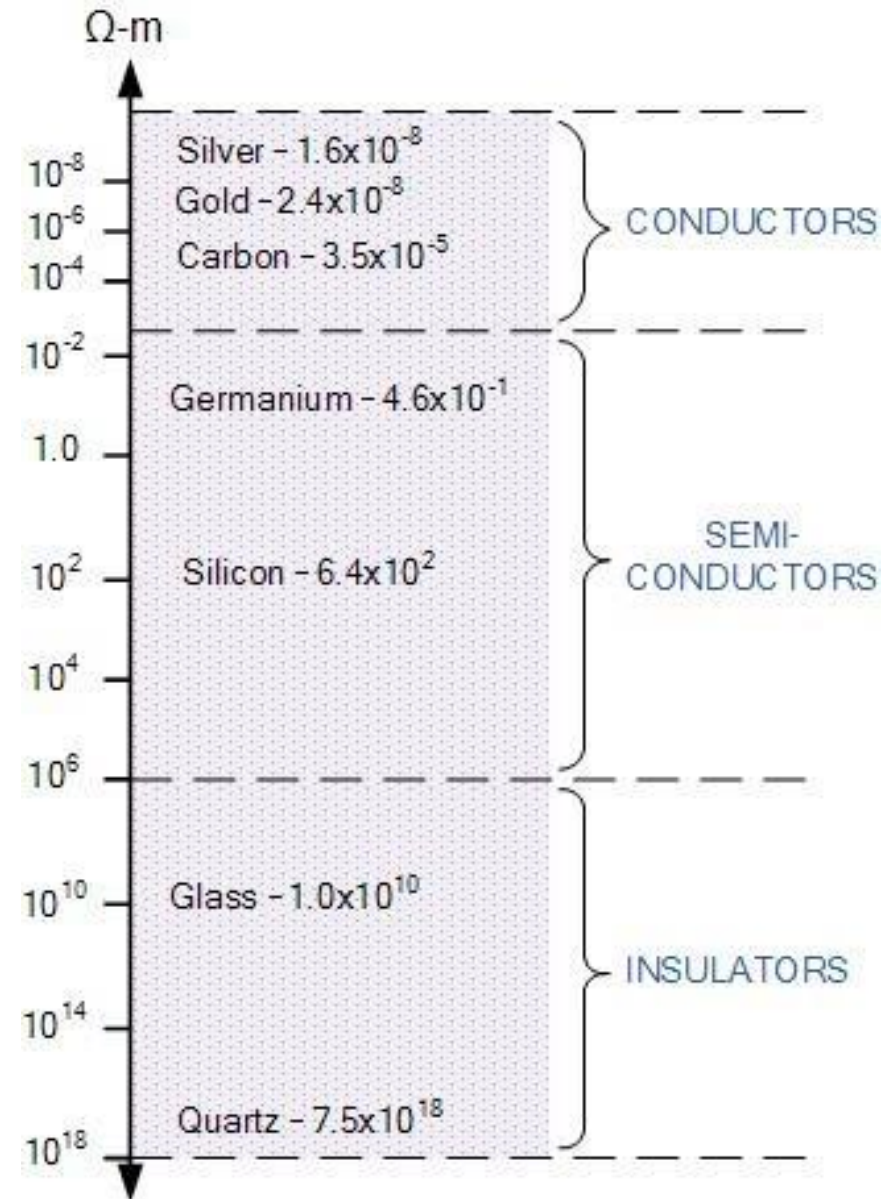
Rezistivitatea

- **Rezistența** electrică a unui component sau a unui dispozitiv electric sau electronic este, în general, definită ca fiind raportul dintre diferența de tensiune pe el și curentul care trece prin el, conform [legii lui Ohm](#). Problema utilizării rezistenței pentru o măsurătoare este aceea că depinde foarte mult de dimensiunea fizică a materialului măsurat, precum și de materialul din care este fabricat. De exemplu, dacă am spori lungimea materialului (făcându-l mai lung), rezistența acestuia ar crește și ea proporțional.
- De asemenea, dacă am crescut diametrul sau mărimea (făcându-l mai gros), valoarea rezistenței sale ar scădea. Așadar, vrem să definim materialul astfel încât să indice capacitatea lui de a conduce sau de a se opune curentului electric prin el, indiferent de mărimea sau forma acestuia.
- Cantitatea care este folosită pentru a indica această rezistență specifică se numește **rezistivitate** și este dată de simbolul grec ρ , (Ro). Rezistivitatea este măsurată în Ohm-metri ($\Omega \cdot m$). Rezistivitatea este inversul conductivității.
- Dacă se compară rezistivitatea diferitelor materiale, acestea pot fi clasificate în trei grupe principale: conductoare, izolatoare și semiconductoare, după cum se arată mai jos.

What is Electrical Resistivity?



Clasificare rezistivitate



- Observați că există o marjă foarte mică între rezistivitatea conductoarelor, cum ar fi argintul și aurul, comparativ cu o marjă mult mai mare pentru rezistivitatea izolatoarelor dintre sticlă și cuarț.
- Rețineți, că rezistivitatea tuturor metalelor, în orice moment, depinde de temperatura lor ambiantă, deoarece metalele sunt, de asemenea, conductoare bune de căldură.

Conductoarele

- **Conductoarele** sunt materiale care au valori foarte scăzute ale rezistivității, de obicei în micro-ohmi pe metru. Această valoare scăzută le permite să treacă cu ușurință un curent electric, datorită faptului că există o mulțime de electroni liberi care circulă în interiorul structurii atomice de bază. Dar acești electroni vor curge printr-un conductor doar dacă există ceva care să le stimuleze mișcarea, și așa ceva este o tensiune electrică.
- Atunci când un potențial de tensiune pozitiv este aplicat materialului, acești "electroni liberi" părăsesc atomul lor parental și călătoresc împreună prin material formând un curent de electroni. Cum se pot deplasa acești electroni "liberi" printr-un conductor depinde de cât de ușor se pot elibera de atomii lor constituenți când se aplică o tensiune. Atunci, cantitatea de electroni care circulă depinde de valoarea rezistivității pe care o are conductorul.
- Exemple de conductoare bune sunt, în general, metale cum ar fi cupru, aluminiu, argint sau nemetale, cum ar fi carbonul, deoarece aceste materiale au foarte puțini electroni în "stratul de valență" exterior, ceea ce duce la scoaterea lor ușoară de pe orbita atomului.
- Aceasta le permite să circule liber prin material până când se alătură altor atomi, producând un "efect de domino" prin material, creând astfel un curent electric. Cuprul și aluminiul sunt conductoarele principale utilizate în cablurile electrice, așa cum se arată.
- În general, majoritatea metalelor sunt bune conductoare de energie electrică, deoarece au valori foarte mici de rezistență, de obicei în zona micro-ohmi pe metru ($\mu\Omega/m$).
- În timp ce metalele cum ar fi cuprul și aluminiu sunt conductoare foarte bune de energie electrică, ele încă mai au o anumită rezistență la fluxul de electroni și, prin urmare, nu conduc perfect.
- Energia pierdută în procesul de trecere a unui curent electric apare sub formă de căldură, motiv pentru care conductoarele și în special rezistoarele devin fierbinți. De asemenea, rezistivitatea conductoarelor crește cu temperatura ambiantă, deoarece metalele sunt, de asemenea, bune conductoare de căldură în general.



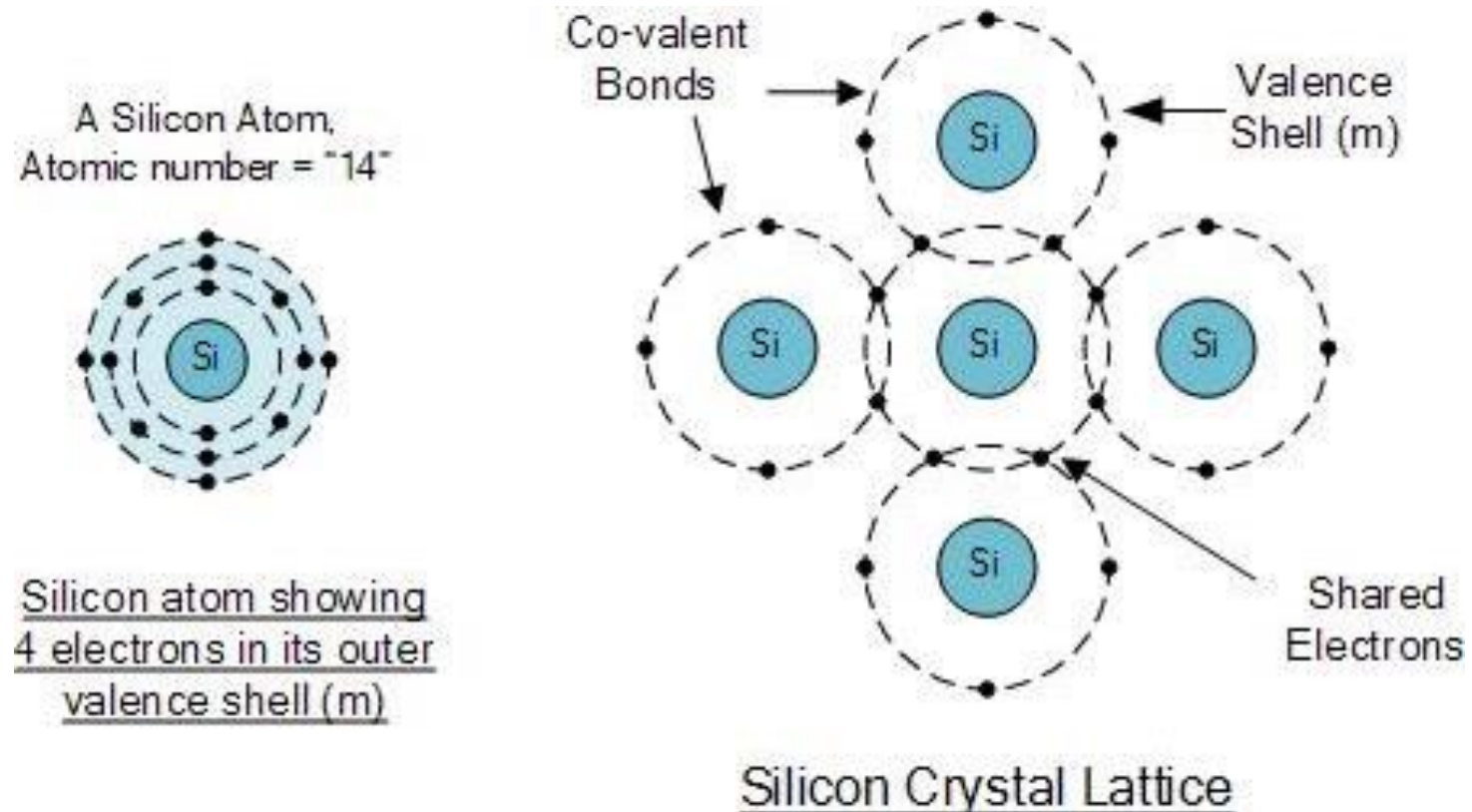
Izolatoare

- **Izolatoarele**, pe de altă parte, sunt exact opusul conductoarelor. Acestea sunt realizate din materiale, în general nemetale, care au foarte puțini sau nu au "electroni liberi" care circulă în interiorul structurii atomice de bază, deoarece electronii din stratul exterior de valență sunt puternic atrași de nucleul interior încărcat pozitiv.
- Cu alte cuvinte, electronii sunt blocați la atomul părinte și nu se pot mișca liber, în așa fel încât, dacă se aplică o potențială tensiune pe material, nu va circula curent, deoarece nu există "electroni liberi" disponibili pentru a se deplasa și care dă acestor materiale proprietăți izolatoare.
- Izolatoarele au, de asemenea, rezistențe foarte ridicate, milioane de ohmi pe metru și, în general, nu sunt afectate de schimbările normale de temperatură (deși la temperaturi foarte ridicate lemnul devine cărbune și se schimbă de la un izolator la un conductor). Exemple de bune izolatoare sunt marmura, cuarț topit, materiale plastice, cauciuc etc.
- Izolatoarele joacă un rol foarte important în circuitele electrice și electronice, deoarece fără ele circuitele electrice s-ar scurtcircuita împreună și nu ar funcționa. De exemplu, izolatoarele din sticlă sau din porțelan sunt utilizate pentru izolarea și susținerea cablurilor de transmisie suspendate, în timp ce materialele rășinoase din sticlă epoxidică sunt folosite pentru a face plăci de circuite imprimare, PCB-uri etc., în timp ce PVC este folosit pentru a izola cablurile electrice, așa cum se arată.



Principiile semiconductoarelor

- Materialele **semiconductoare**, cum ar fi siliciu (Si), germaniu (Ge) și arseniura de galiu (GaAs), au proprietăți electrice undeva la mijloc, între cele ale unui „conductor“ și un „izolator“. Ele nu sunt bune conductoare și nici bune izolatoare (de aici și numele lor "semiconductoare"). Ele au foarte puțini "electroni liberi", deoarece atomii lor sunt strâns grupați împreună într-un model cristalin numit "structură de cristal", dar electronii sunt încă capabili să circule, dar numai în condiții speciale.



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: și . De asemenea, presupunem că regiunile respective sunt dopate uniform, iar “trecerea” p-n este abruptă. Această structură se numește joncțiune pn abruptă.

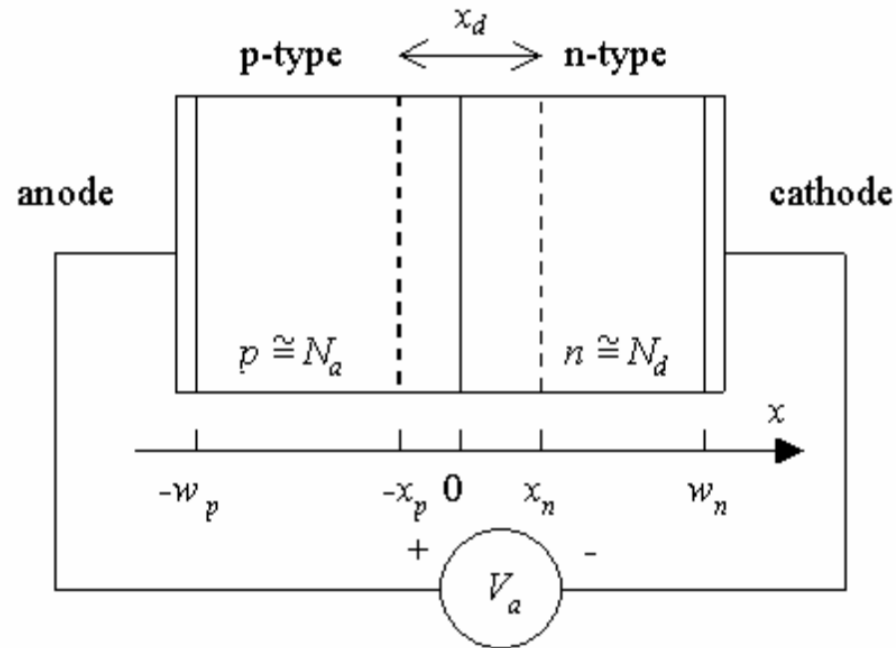


Fig. VI.1. Secțiune transversală printr-o joncțiune p-n abruptă.

Joncțiunea p-n

- 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.

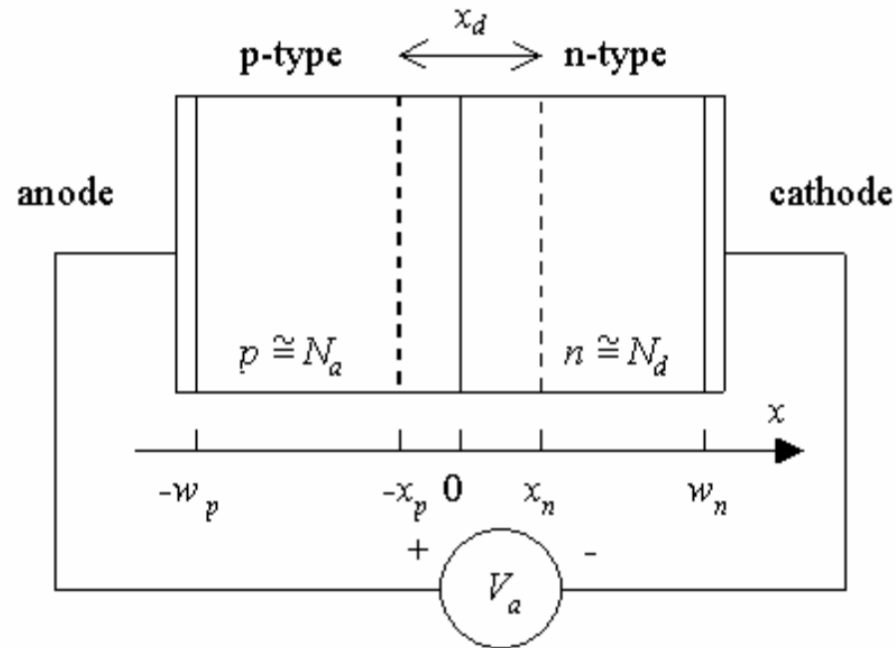


Fig. VI.1. Secțiune transversală printr-o joncțiune p-n abruptă.

Joncțiunea p-n

- 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).

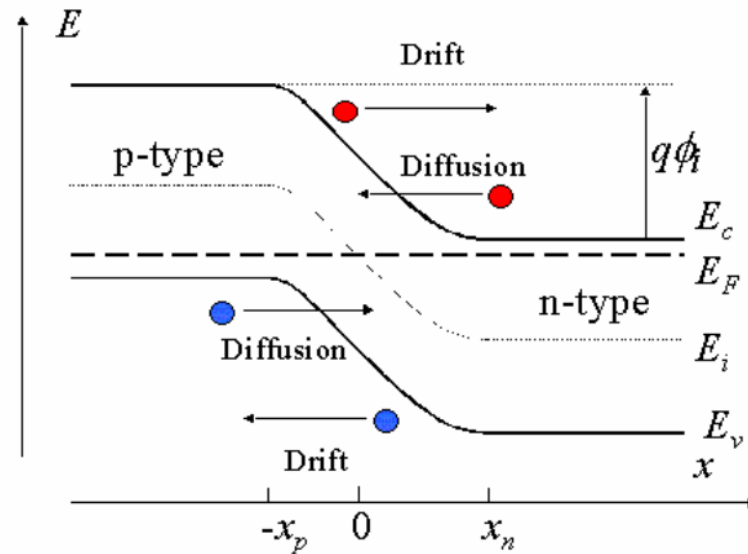


Fig. VI.2. Diagrama benzilor de energie pentru o joncțiune p-n la echilibru termic.

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.

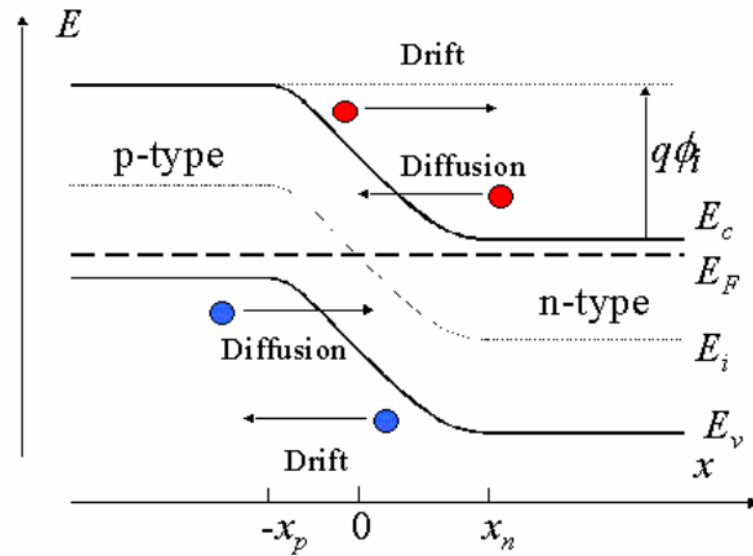


Fig. VI.2. Diagrama benzilor de energie pentru o joncțiune p-n la echilibru termic.

Echilibru termic

- Deoarece echilibrul termic implică faptul că energia Fermi este constantă pe tot parcursul p-n diodă, potențialul încorporat este egal cu diferența dintre energiile Fermi, E_{Fn} și E_{Fp} , împărțit la taxa electronică. De asemenea, este egal cu suma potențialelor în vrac ale fiecărei regiune, ϕ_n și ϕ_p , deoarece potențialul vrac cuantifică distanța dintre Fermienergia și energia intrinsecă. Acest lucru conduce la următoarea expresie pentru încorporat potențial.

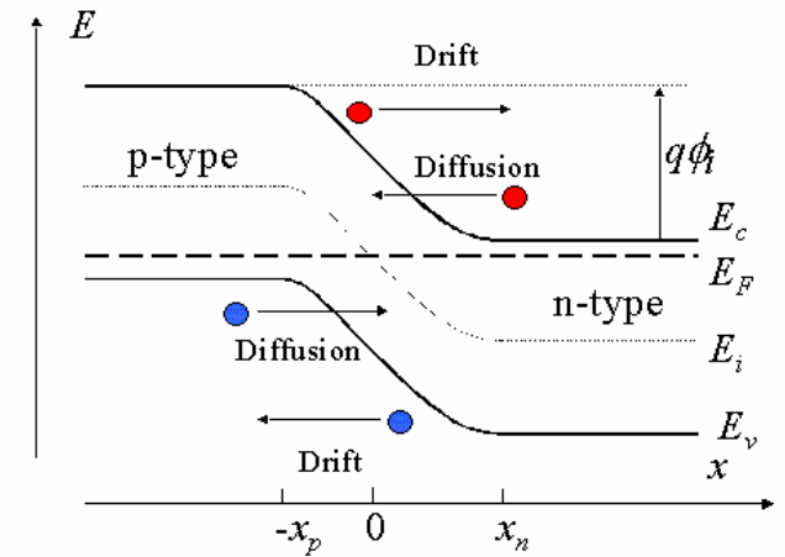


Fig. VI.2. Diagrama benzilor de energie pentru o joncțiune p-n la echilibru termic.

$$\phi_i = V_t \ln \left(\frac{N_d N_a}{n_i^2} \right)$$

Alimentare directă și inversă

- Considerăm acum o diodă p-n cu o tensiune de polarizare aplicată, V_a . O prejudecată înaintecorespunde aplicării unei tensiuni pozitive anodului (regiunea de tip p) relativ la catod (regiunea de tip n). O polarizare inversă corespunde unei tensiuni negative aplicate catodului. Ambele moduri de polarizare sunt ilustrate cu VI.3. Tensiunea aplicată este proporțională cu diferența dintre energia Fermi în regiunile cvasineutre de tip n și tip p. Pe măsură ce se aplică o tensiune negativă, potențialul pe semiconductor crește și astfel lățimea stratului de epuizare. Pe măsură ce se aplică o tensiune pozitivă, potențialul pe semiconductor scade și odată cu el și lățimea stratului de epuizare. Potențialul total de-a lungul semiconductorului este egal cu potențialul încorporat minus tensiunea aplicată sau: $\phi = \phi_i - V_a$

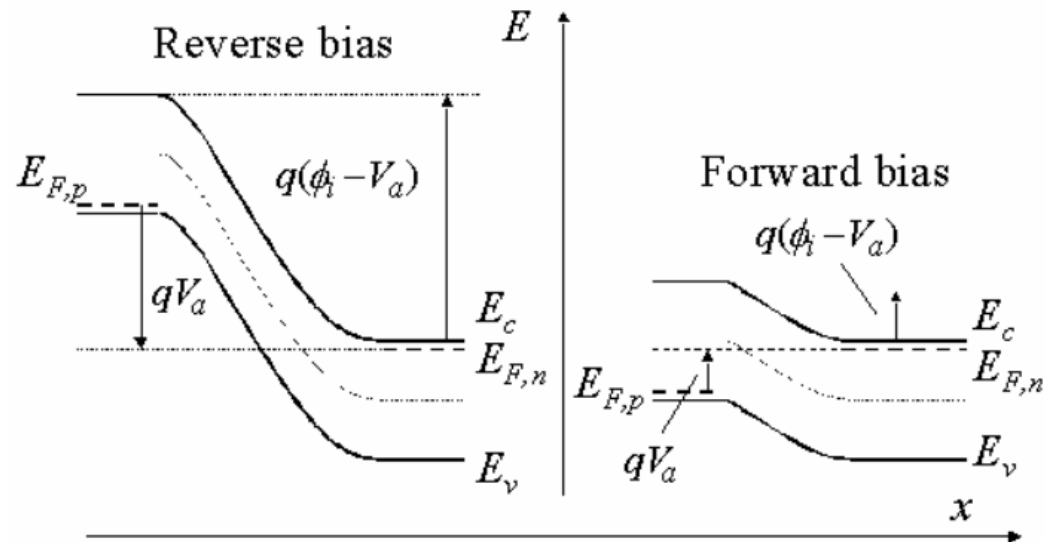


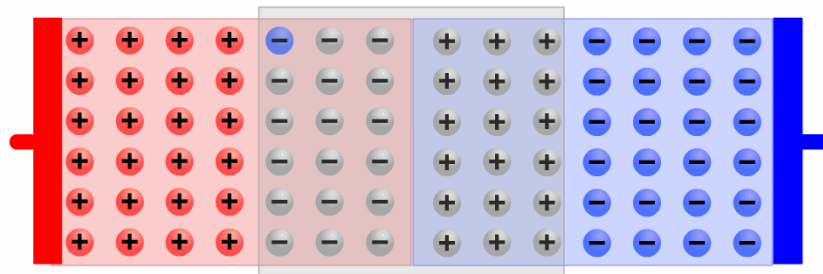
Fig. VI.2. Diagrama benzilor de energie pentru o joncțiune p-n alimentată direct și invers.

Analiza electrostatică a unei diode p-n

Analiza electrostatică a unei diode p-n este de interes deoarece oferă cunoștințe despre densitatea de sarcină și câmpul electric în regiunea de epuizare. De asemenea, se cere să obținem caracteristicile capacității-tensiune ale diodei.

Pornim de la ecuația Poisson:

U1
$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_s} = -\frac{q(p - n + N_d^+ - N_a^-)}{\epsilon_s}$$
 electrică ρ este scrisă în funcție de concentrațiile electronilor, golurilor, donatorilor și acceptorilor.



Analiza electrostatică a unei diode p-n

Pentru a rezolva ecuația, trebuie să exprimăm densitatea electronului și a găurilor, n și p , ca funcție de potențial, ϕ , rezultând:

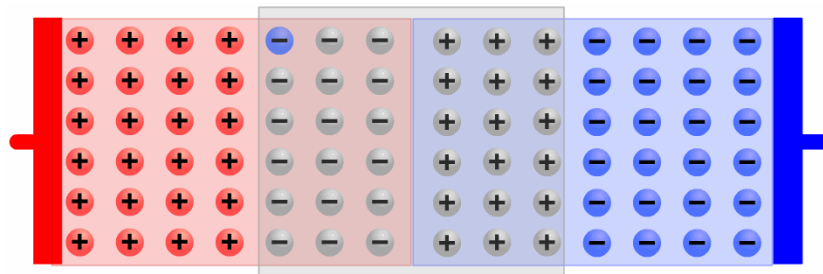
$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{2qn_i}{\epsilon_s} \left(\sinh \frac{\phi - \phi_F}{V_t} + \sinh \frac{\phi_F}{V_t} \right)$$

unde:

$$\sinh \frac{\phi_F}{V_t} = \frac{N_a^- - N_d^+}{2n_i}$$

În condiții particulare (de ex. sărăcire deplină de purtători în stratul de baraj), folosind relațiile:

$$N_d x_n = N_a x_p \quad \text{și} \quad x_B = x_n + x_p$$



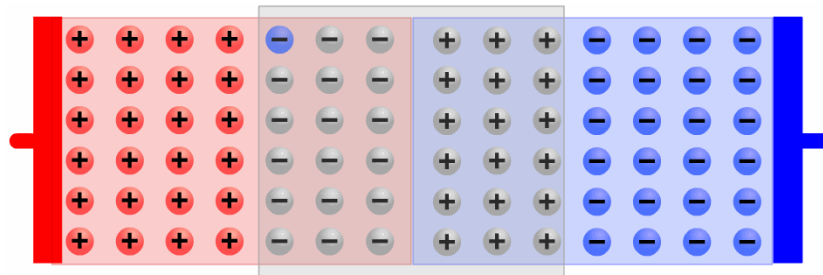
Analiza electrostatică a unei diode p-n

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:

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

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

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

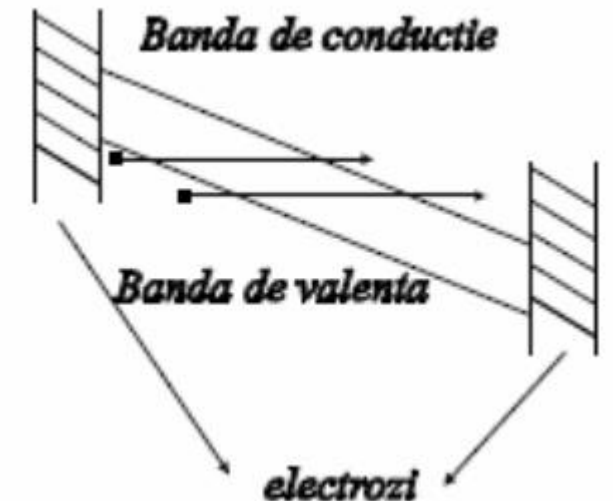
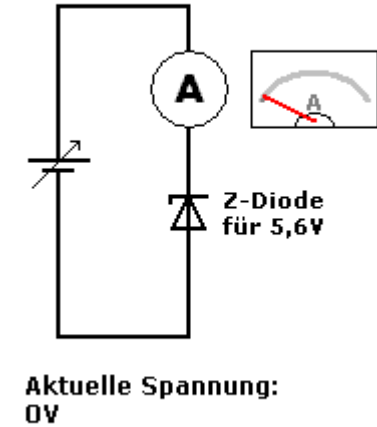


Efectul Zener

- 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:

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

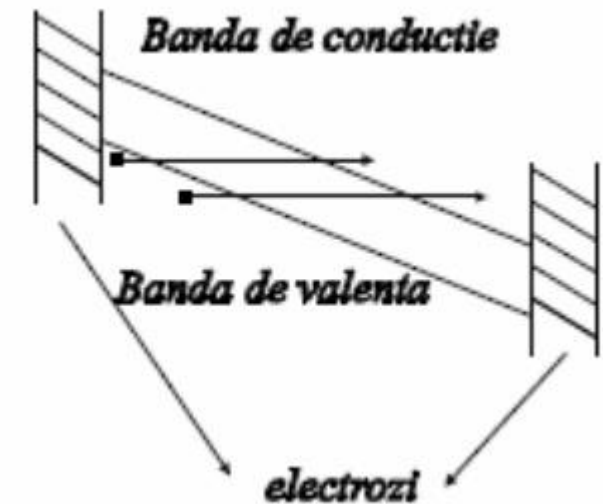
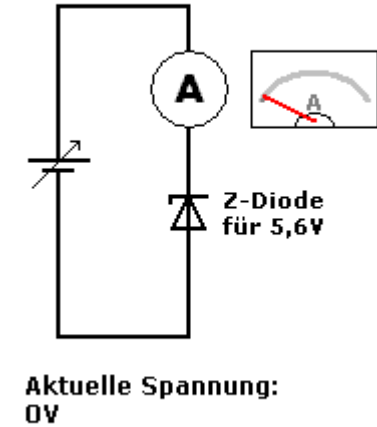
are loc o înclinare a benzilor energetice



Efectul Zener

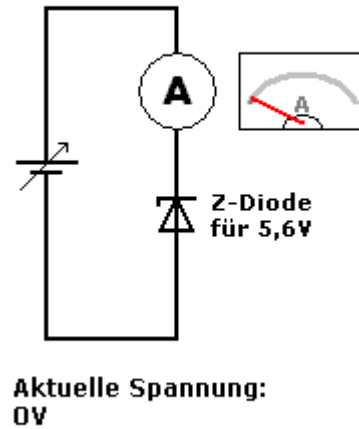
Presupunând un astfel de mecanism, un electron din banda de valență poate ajunge în banda de conducție prin efect tunel. Probabilitatea de tunelare depinde de lărgimea zonei interzise ΔE_g și de lărgimea barierei a . Pe de altă parte, aceasta depinde de intensitatea câmpului electric deoarece $\Delta E_g = aeE$, din care: $a = \Delta E_g \Delta / (eE)$. Probabilitatea de tunelare pentru o astfel de barieră este:

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



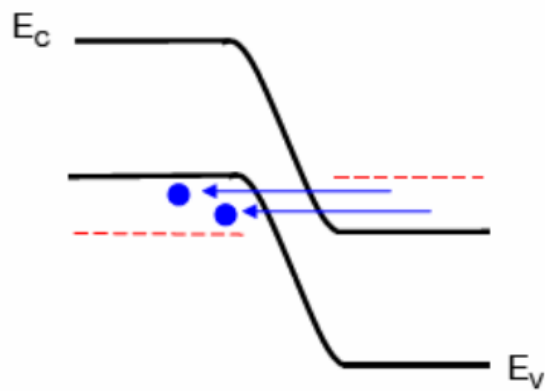
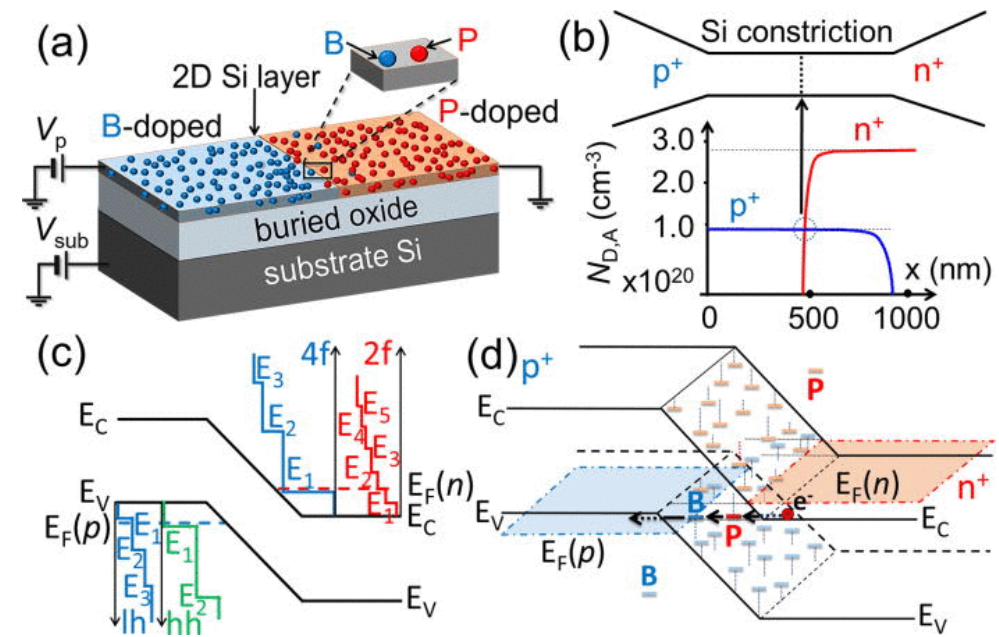
Efectul Zener

- 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.

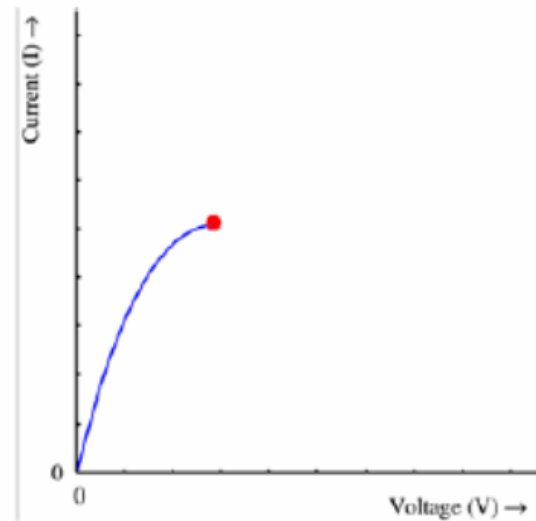


Dioda-tunel

Cu o tensiune mai mare, energia electronilor majoritari din regiunea **n** este egală cu stările libere (goluri) din banda de valență a regiunii **p**; aceasta va produce curent maxim de tunel.

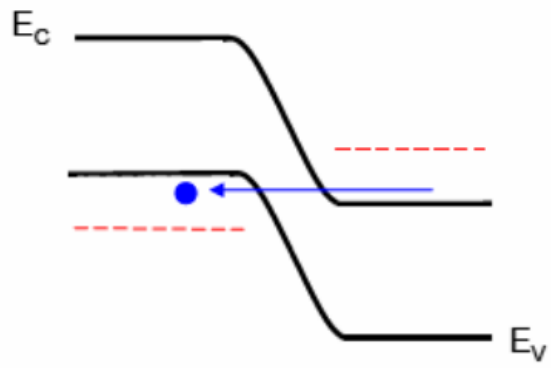
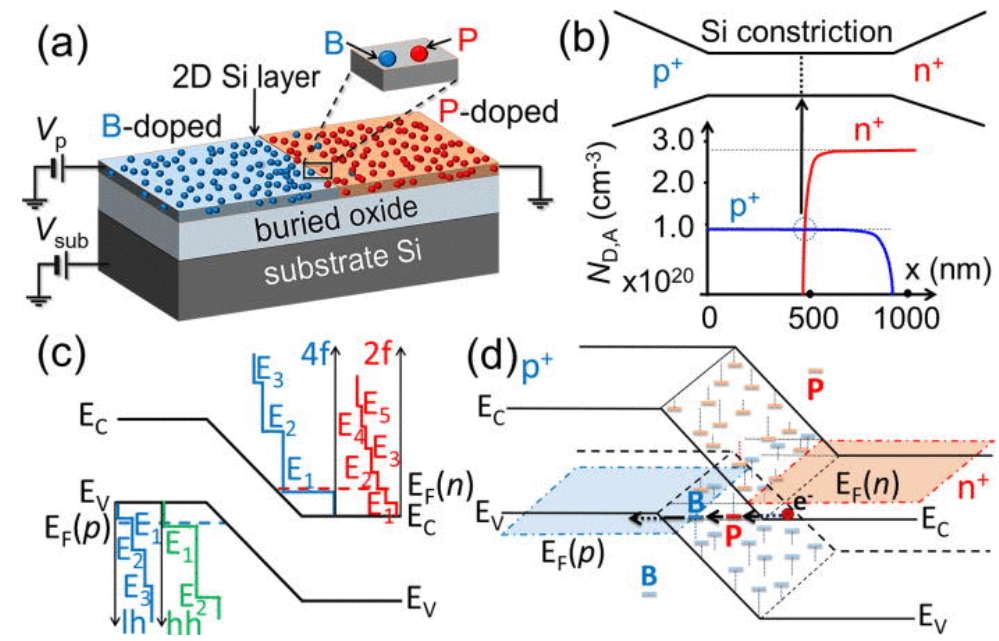


Maximum Direct tunneling current

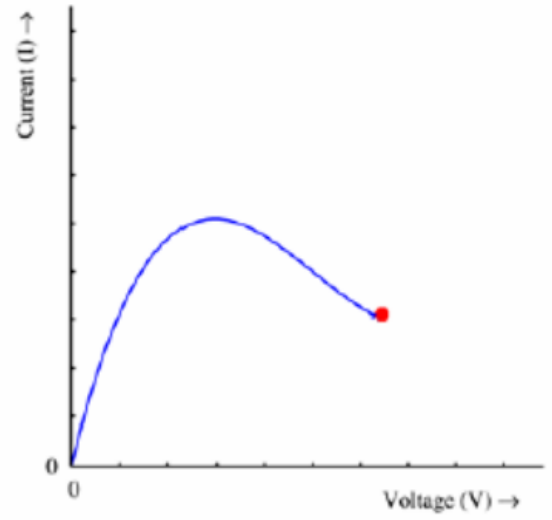


Dioda-tunel

Pe măsură ce polarizarea directă continuă să crească, numărul de electroni din partea **n** care sunt direct opuse stărilor libere din banda de valență (în ceea ce privește energia lor) scade. Prin urmare, va începe scăderea curentului de tunel.

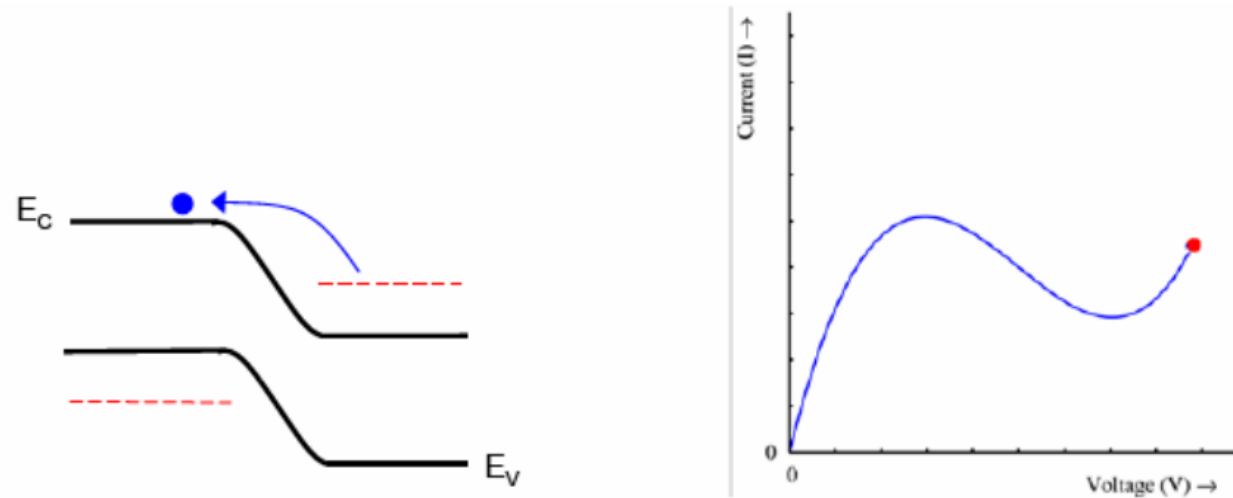
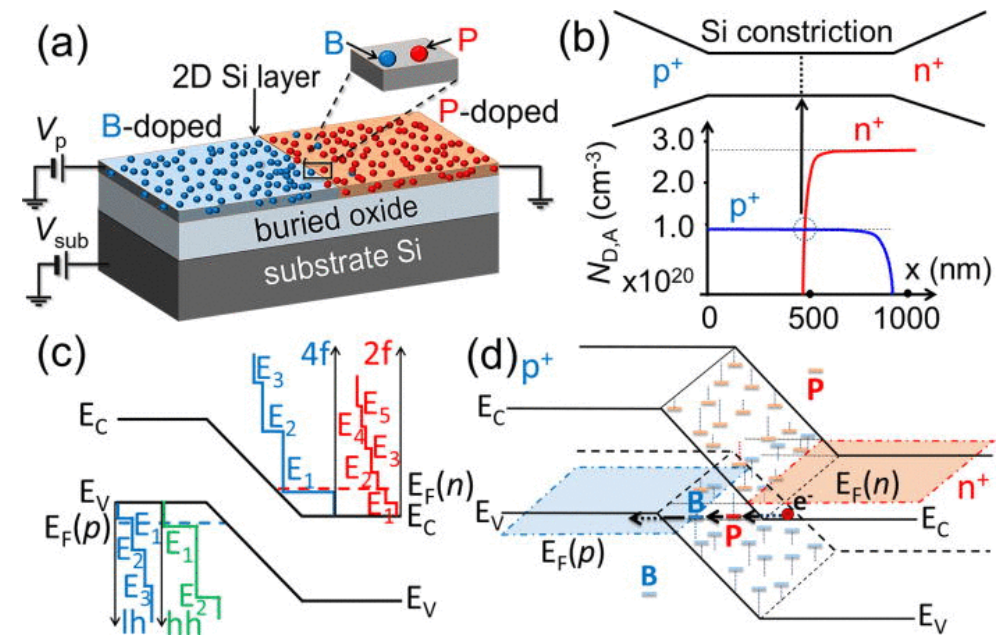


Direct tunneling current decreases



Diode-tunel

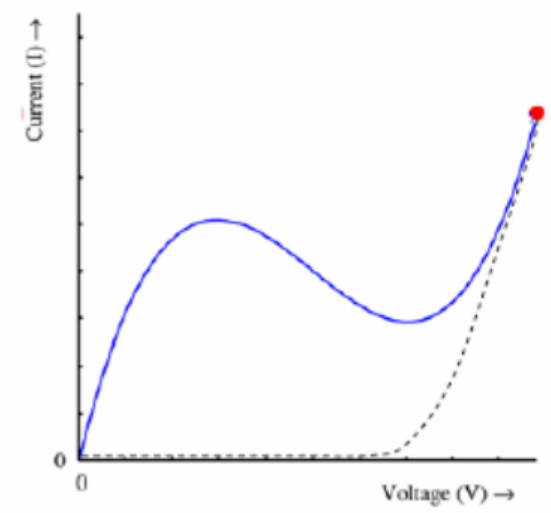
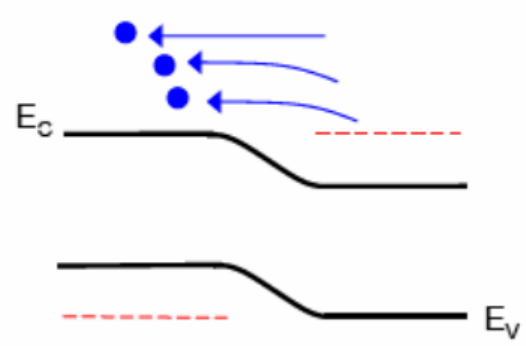
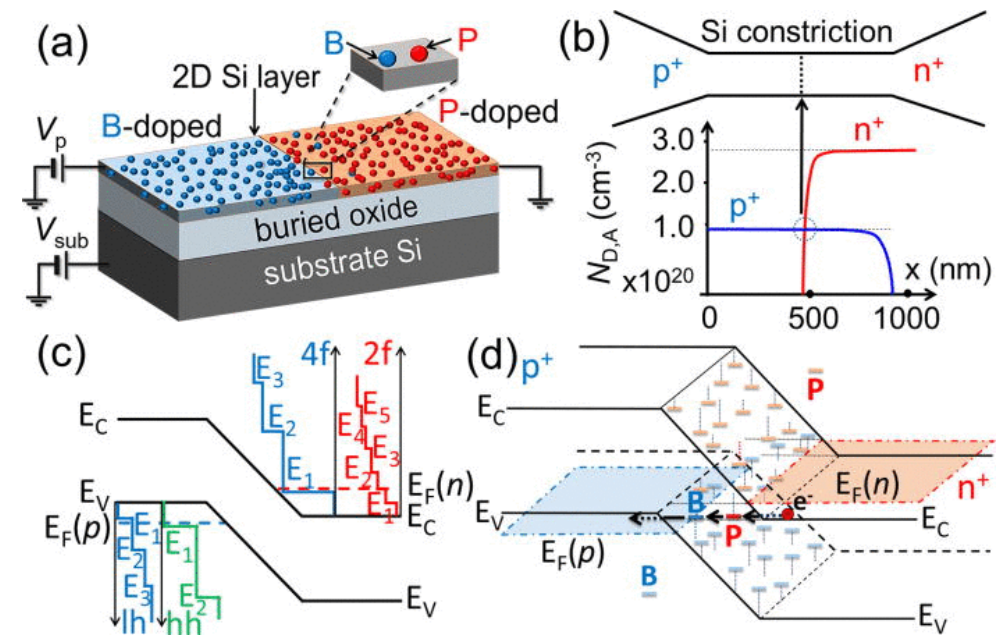
Pe măsură ce se aplică mai multă tensiune directă, curentul de tunel scade la zero. Dar curentul direct al diodei obișnuit din cauza injecției electron – gol crește datorită barierei de potențial mai scăzute.



No tunneling current; diffusion current starts growing

Dioda-tunel

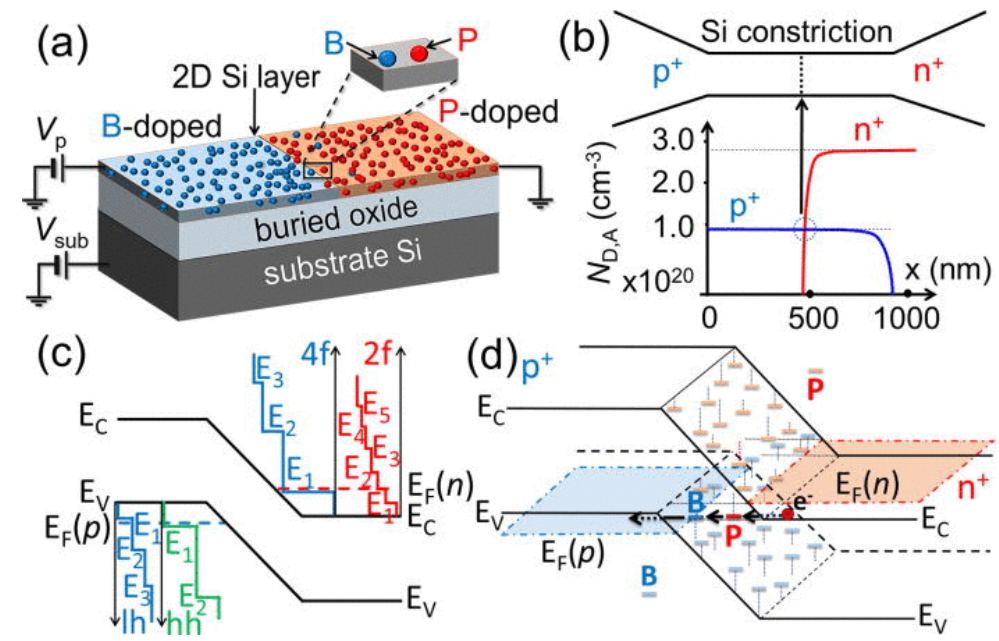
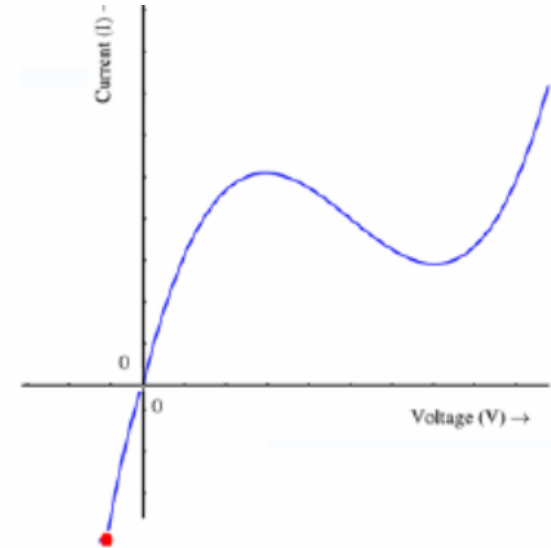
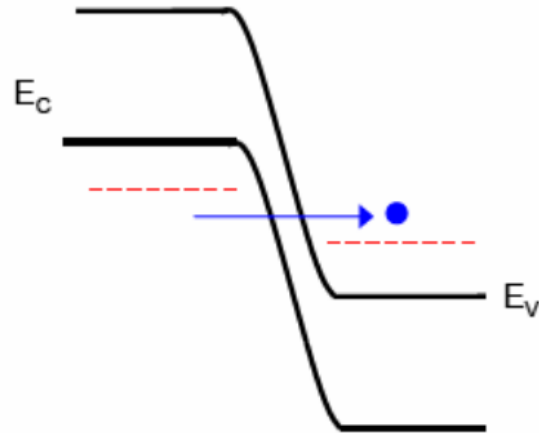
Cu o creștere suplimentară a tensiunii, caracteristica I-V a diodei tunel este similară cu cea a unei diode p-n obișnuite.



Dioda-tunel

În cazul polarizării inverse, electronii din banda de valență a regiunii **p** tunelează direct către stările libere prezente în banda de conducție a regiunii **n** creând un curent de tunel mare care crește odată cu aplicarea sau tensiunea inversă.

I-V invers TD este similar cu dioda Zener cu tensiune de defectare aproape zero.



Dioda-tunel

Tunnel Diode I-V

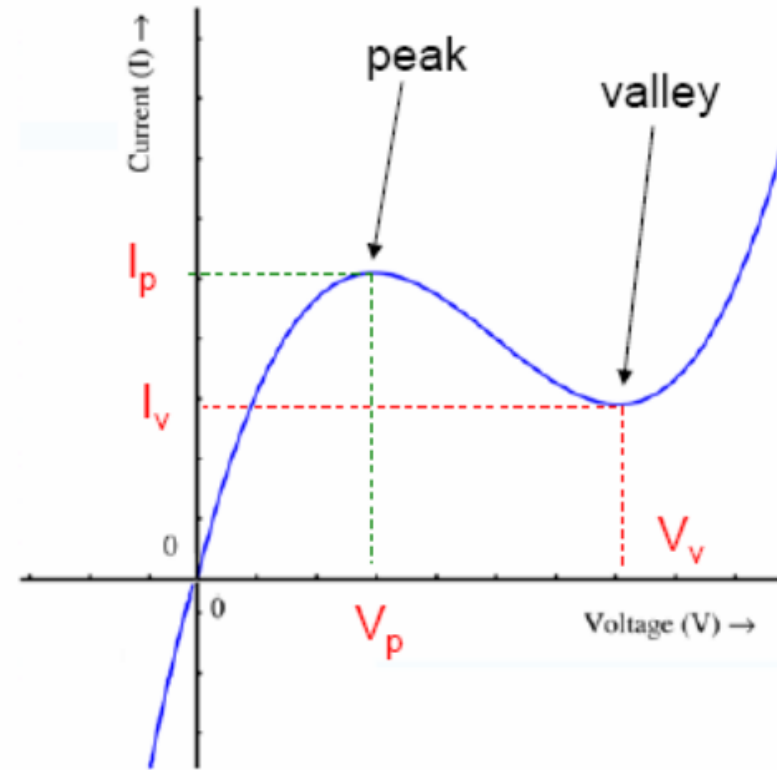
- The total current I in a tunnel diode is given by

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

- 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 $V_{\text{th}} = kT/q$



Dioda-tunel

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

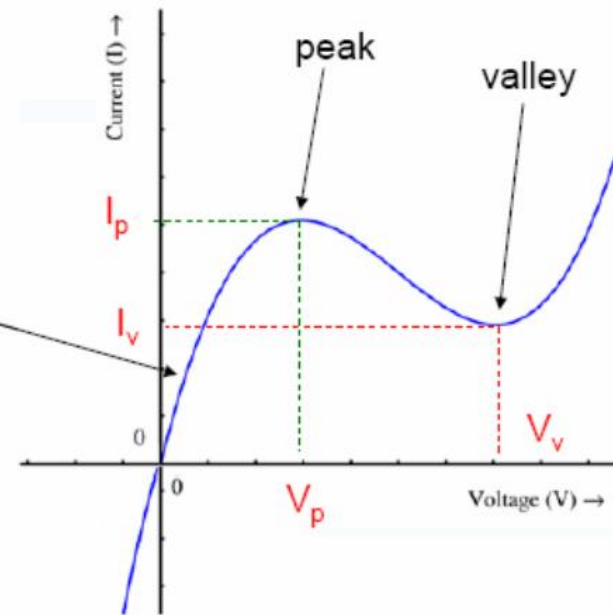
R_0 is the TD resistance in the ohmic region

The maximum |NDR| can be found as

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

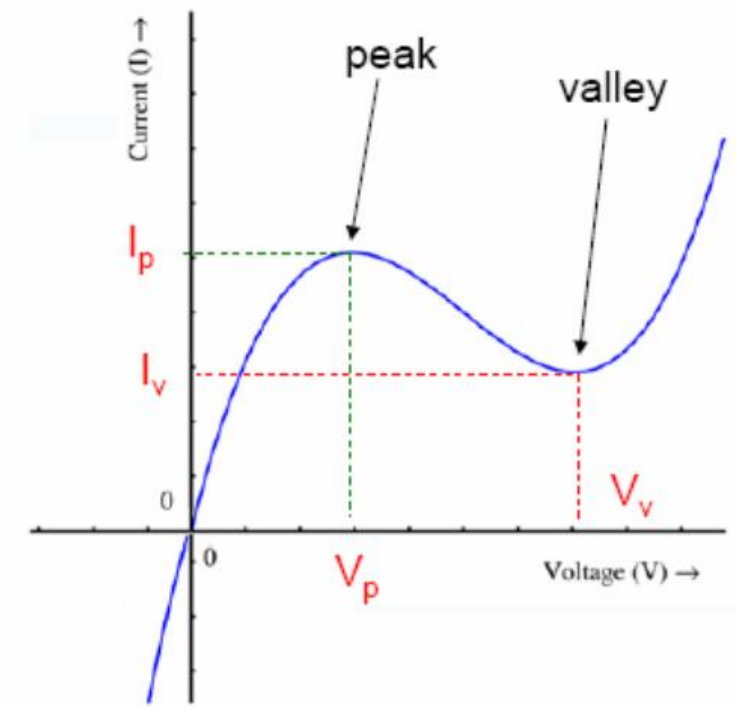
The peak voltage V_p :

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



Dioda-tunel

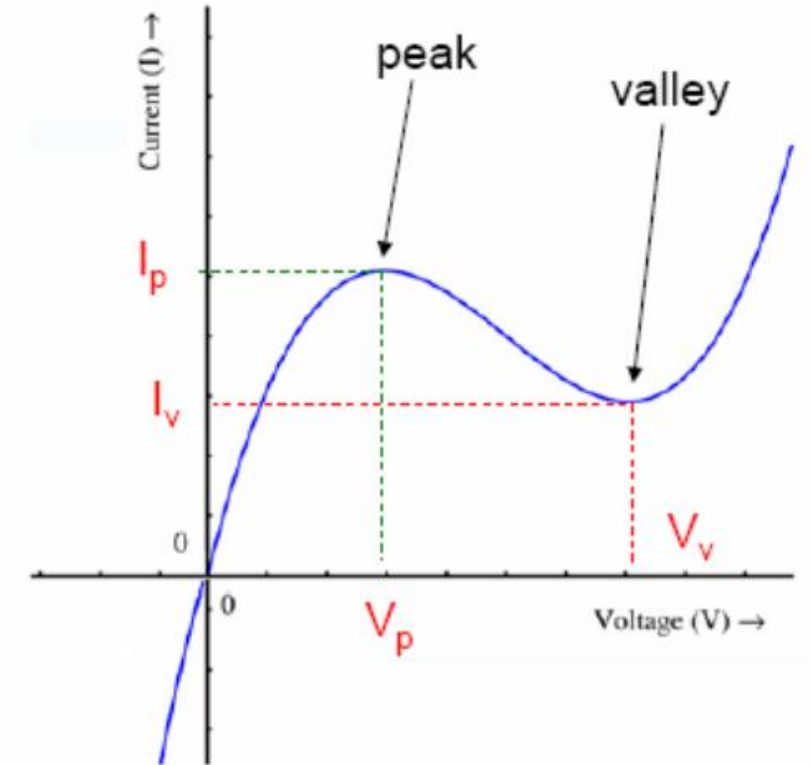
- Dioda tunel este un dispozitiv electronic, cu proprietăți diferite de cele ale unei diode obișnuite. Primul pas în realizarea ei a fost reprezentat de descoperirea - în 1957, de către fizicianul japonez Leo Esaki - a "efectului tunel" al electronilor, manifestat într-o joncțiune semiconductoră p-n, 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

Dioda-tunel

- In figura 2 notațiile i_p și U_p desemnează curentul și respectiv tensiunea de pic (de vârf, maximă) iar notațiile i_v și U_v 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. In 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.

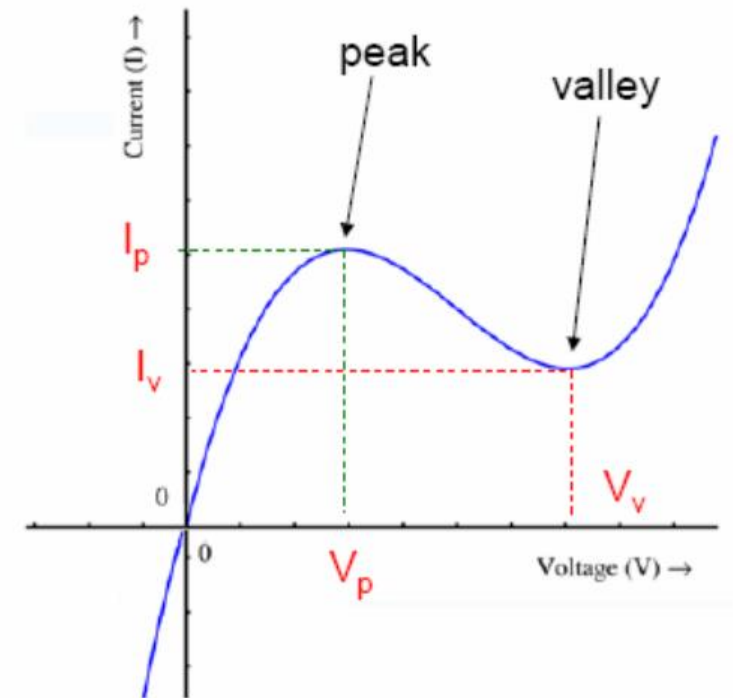


Caracteristica curent - tensiune a unei diode tunel

În figură 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.



Dioda-tunel

- Valoarea acestora se calculează prin intermediul valorilor experimentale i_p , U_p , i_v și U_v , folosindu-se următorul set de relații :

- a) polarizare nulă
- b) Polarizare până la tensiunea U_p
- c) Polarizare cu tensiunea U_2 cu $U_p < U_2 \leq U_v$ e U_3
- d) Polarizare cu tensiunea $U_3 > U_v$

