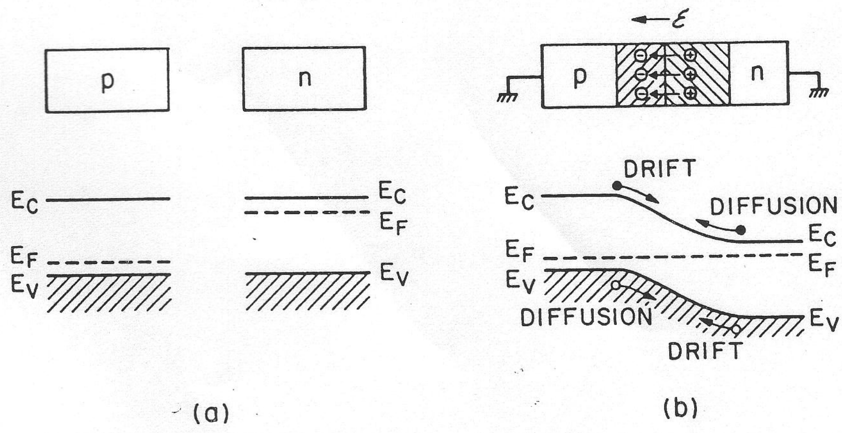
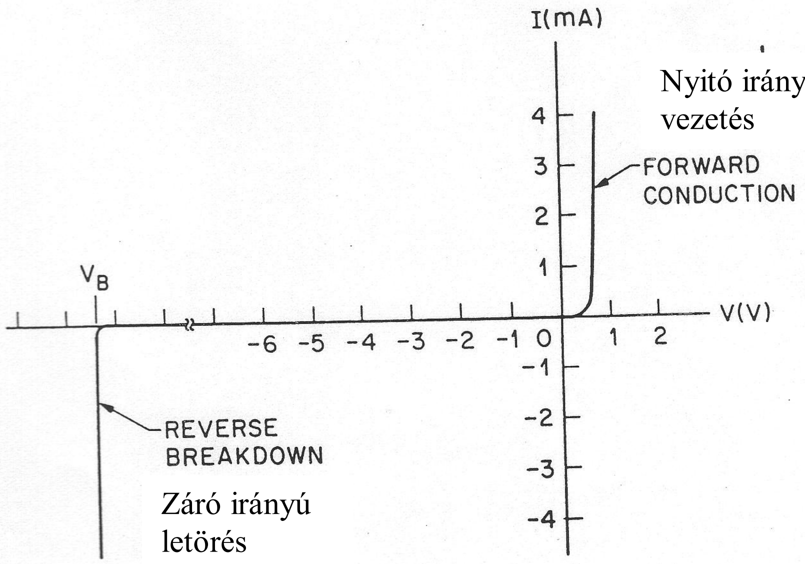
A p-n átmenet



Egyenletesen adalékolt *p* és *n* félvezető összekapcsolás előtt és után $\Rightarrow$ *p-n* átmenet termikus egyensúlyban

Kiürített réteg $\Rightarrow$ elektromos tér koncentráció gradiens



Tipikus *p-n* átmenet áram-feszültség jelleg görbéje (karakterisztikája)

Termikus egyensúlyban a *p-n* átmeneten át nem folyik áram

$$J_p = J_p(drift) + J_p(diff) = q\mu_p p\vec{E} - qD_p\frac{dp}{dx}$$

$$= q\mu_p p\left[\frac{1}{q}\cdot\frac{dE_i}{dx}\right] - kT\mu_p\frac{dp}{dx}$$

$$\vec{E} \equiv -\frac{d\psi}{dx} = \frac{1}{q}\cdot\frac{dE_i}{dx}$$

E_i intrinsic Fermi-szint

$$D_p = kT\mu_p Iq$$

mivel $p = n_i \cdot e^{\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right)}$

deriváltja: $\dfrac{dp}{dx} = \dfrac{p}{kT}\left[\dfrac{dE_i}{dx} - \dfrac{dE_F}{dx}\right]$

$$J_p = \mu_p p\frac{dE_F}{dx} = 0 \Rightarrow \frac{dE_F}{dx} = 0$$

$$J_n = \mu_n n\frac{dE_F}{dx} = 0$$

Fermi energia állandó a szerkezetben termikus egyensúlyi esetben!

Tértöltés eloszlás és potenciál (Poisson-egyenlet)

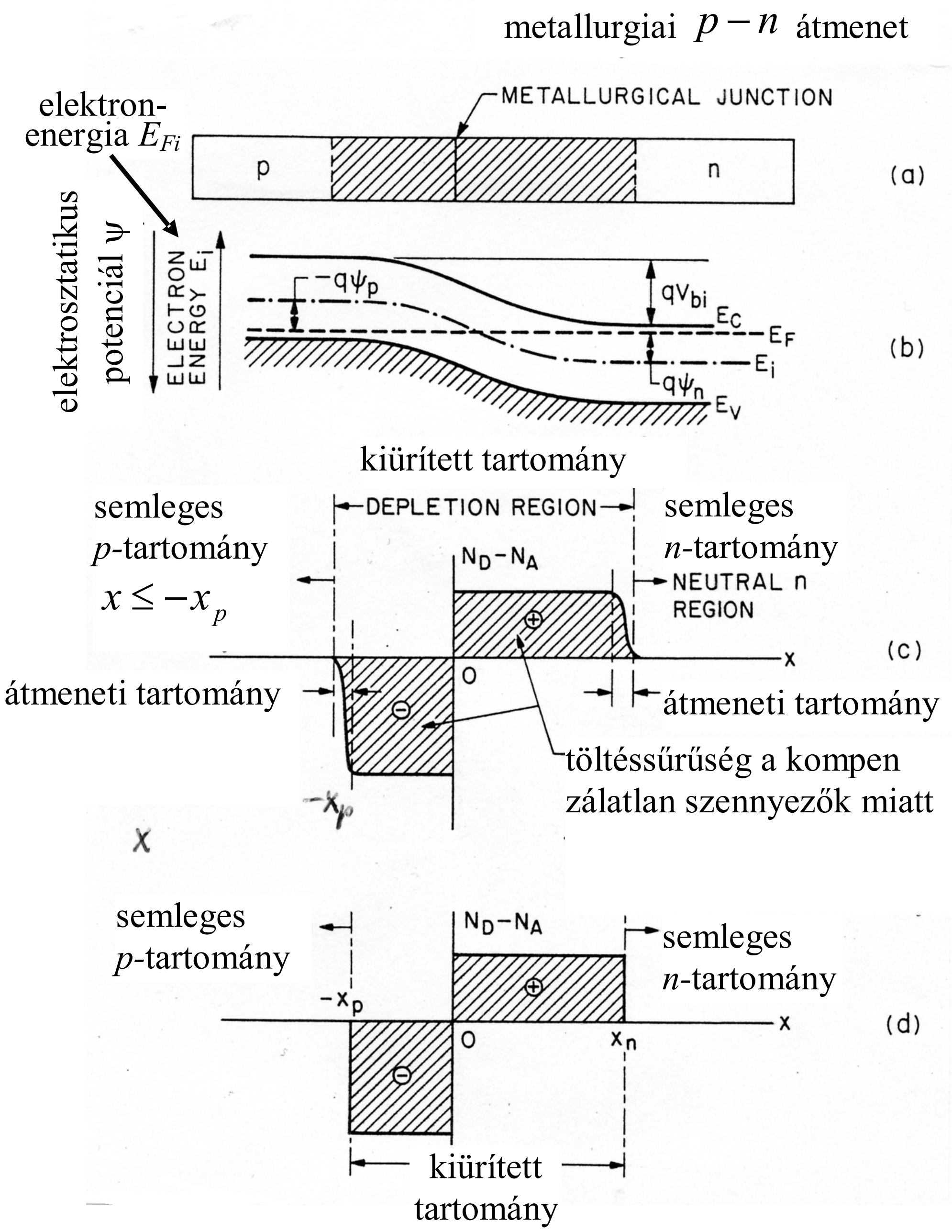
$$\frac{d^2\psi}{dx^2} \equiv -\frac{d\vec{E}}{dx} = -\frac{\rho_s}{\varepsilon_s} = -\frac{q}{\varepsilon_s}\left(N_D - N_A + p - n\right)$$

ψ az elektrosztatikus potenciál

Feltétel: minden **donor** és **akceptor ionizált**

Töltéssemlegesség távol a $p-n$ átmenettől adott:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = 0 \qquad\qquad N_D - N_A + p - n$$



Semleges tartományra:

***p*-típusú félvezető**:

$$N_D = 0; \quad p >> n$$

$$\psi_p \equiv -\frac{1}{q}\left(E_{Fi} - E_F\right)\Big|_{x\le -x_p}$$

$$\psi_p = -\frac{kT}{q}\ln\frac{N_A}{n_i}$$

***n*-típusú félvezető**:

$$N_A = 0; \quad n >> p$$

$$\psi_n \equiv -\frac{1}{q}\left(E_{Fi} - E_F\right)\Big|_{x\ge x_n}$$

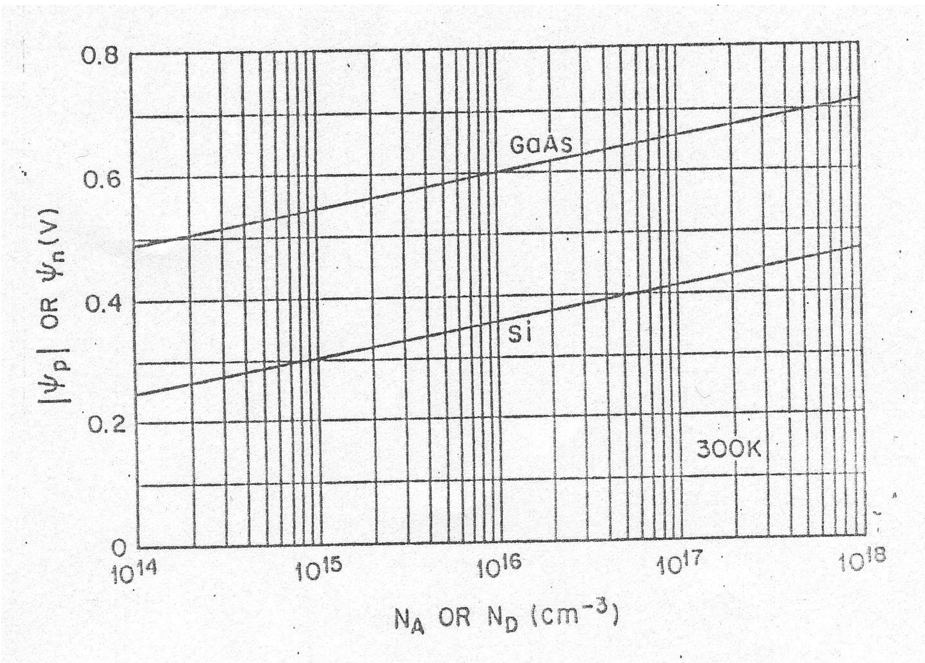
$$\psi_p = \frac{kT}{q}\ln\frac{N_D}{n_i}$$

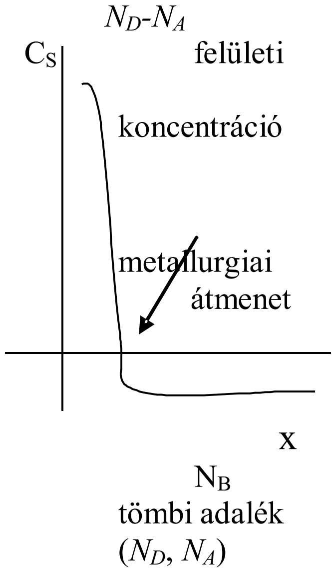
Elektrosztatikus (beépített) potenciál:

$$V_{bi} = \psi_p - \psi_n =$$

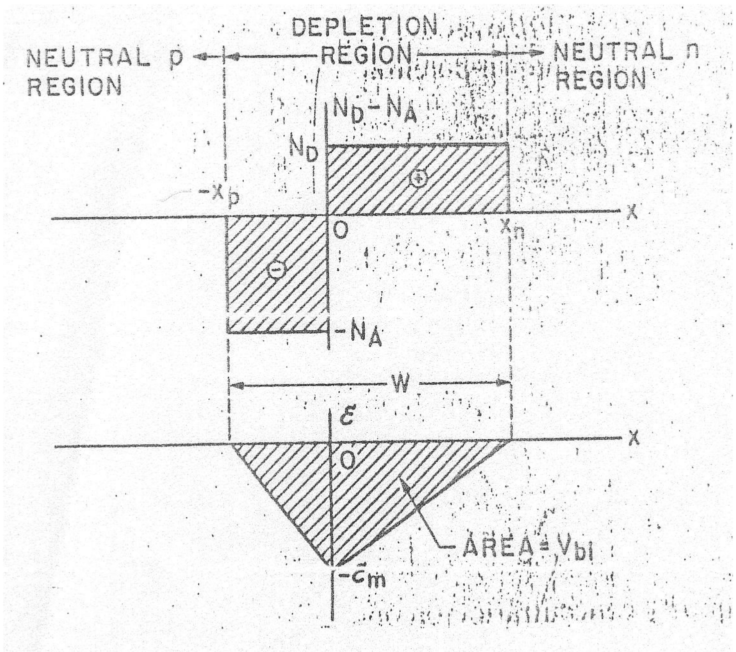
$$= \frac{kT}{q}\ln\frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

Beépített potenciál az abrupt átmenet p- és n- oldalán





Tértöltés eloszlás a kiürített rétegben termikus egyensúlyban



$N_A x_p = N_D x_n$

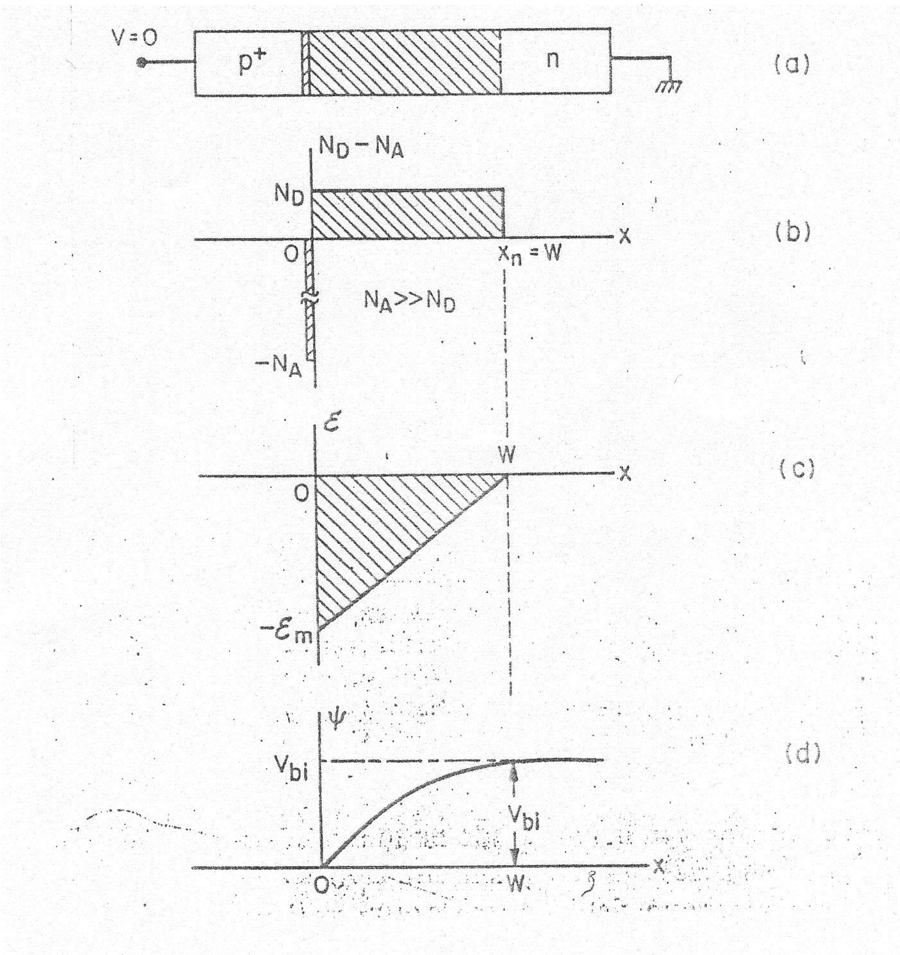
$W = x_p + x_n$

W: a kiürített réteg vastagsága

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\left[\frac{N_A + N_D}{N_A \cdot N_D}\right] \cdot V_{bi}}$$

A kiürített réteg teljes vastagsága a beépített potenciál V_{bi} függvényében

Egyoldalú abrupt p-n átmenet



Termikus egyensúlyban
$N_A >> N_D$

Tértöltés eloszlás a kiürített rétegben

Elektromos téreloszlás a kiürített rétegben

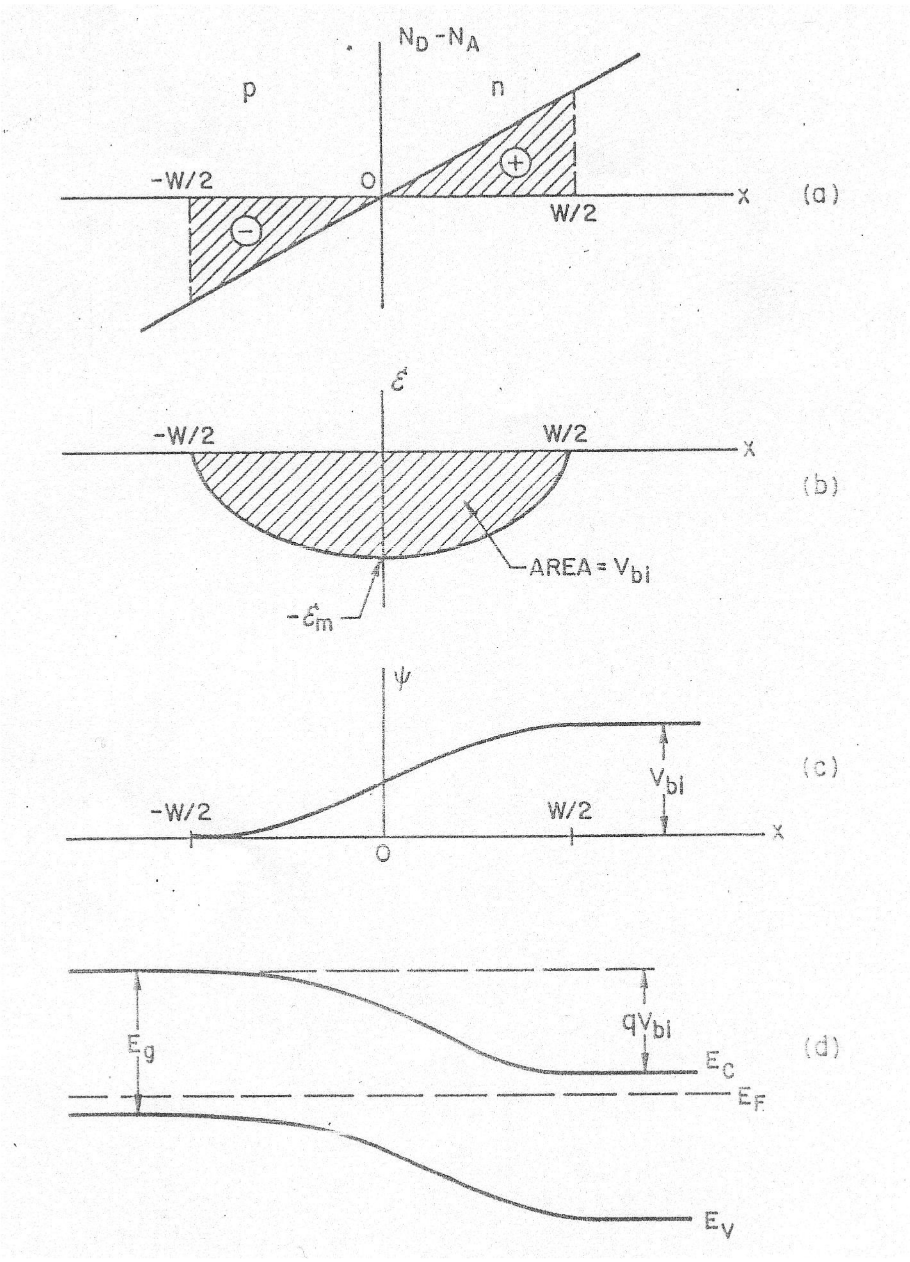
Potenciáleloszlás az átmenettől mért távolság függvényében

Kiürített réteg vastagság: $$W \cong x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s V_{bi}}{qN_D}}$$

Maximális térerősség: $$E_m = \frac{qN_B W}{\varepsilon_S}$$

Potenciál eloszlás: $$\psi(x) = \frac{W_{bi}x}{W}\left[2 - \frac{x}{W}\right]$$

Lineáris fokozatos átmenet



Termikus egyensúly

Tértöltés eloszlás

Elektromos tér

Potenciálmenet

Sávdiagram

Kiürített réteg vastagság: $W = \left[\dfrac{12\varepsilon_s V_{bi}}{q \cdot a} \right]^{1/3}$

Maximális térerősség: $E_m = \dfrac{q \cdot a \cdot W^2}{8\varepsilon_s}$

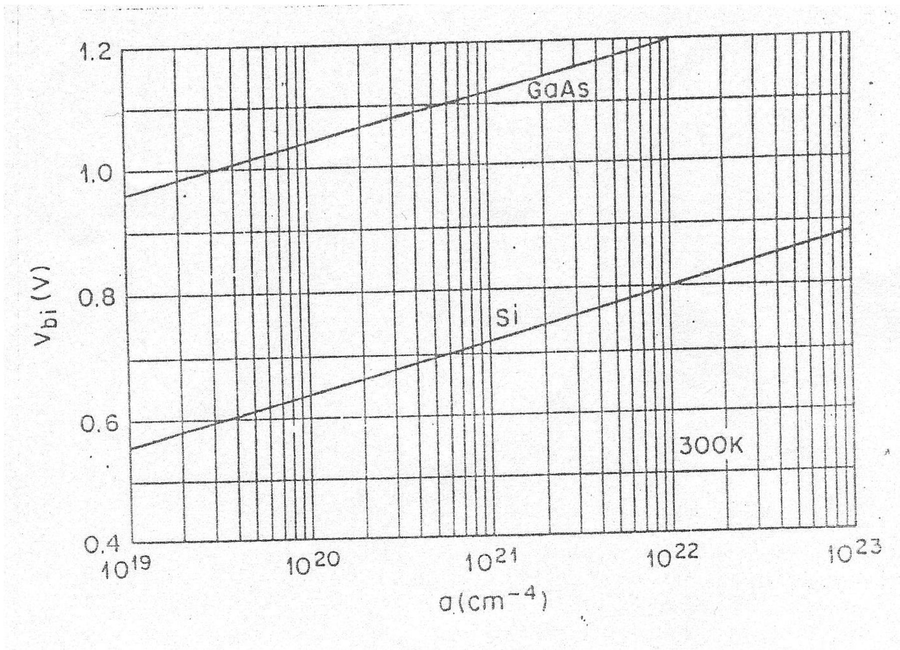
Potenciál menetből: $V_{bi} = \dfrac{2kT}{q} \cdot \ln\left[\dfrac{a \cdot W}{2n_i} \right]$

Beépített potenciál:

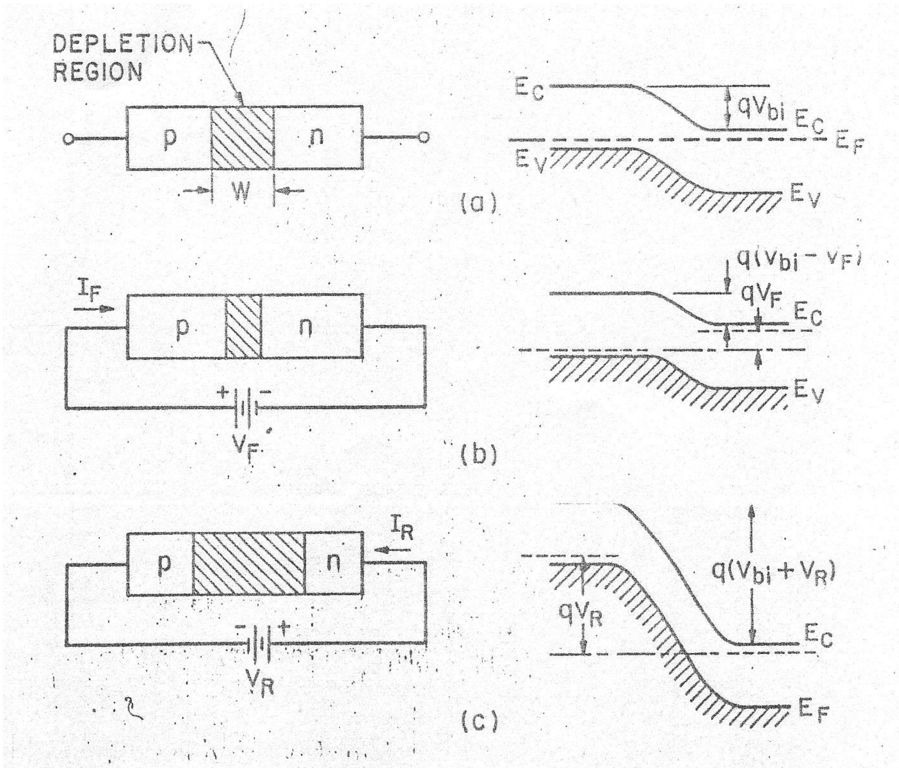
$$V_{bi} = \frac{q \cdot a \cdot W^3}{12\varepsilon_s}$$

a [cm^{-4}] szennyező gradiens (lineáris átmenet)

Lineáris gradiensű átmenetek beépített potenciálja a szennyező gradiens függvényében



Nem egyensúlyi állapot abrupt átmenet esetében: $W = \sqrt{\dfrac{2\varepsilon_s (V_{bi} - V)}{qN_B}}$



Termikus egyensúlyban

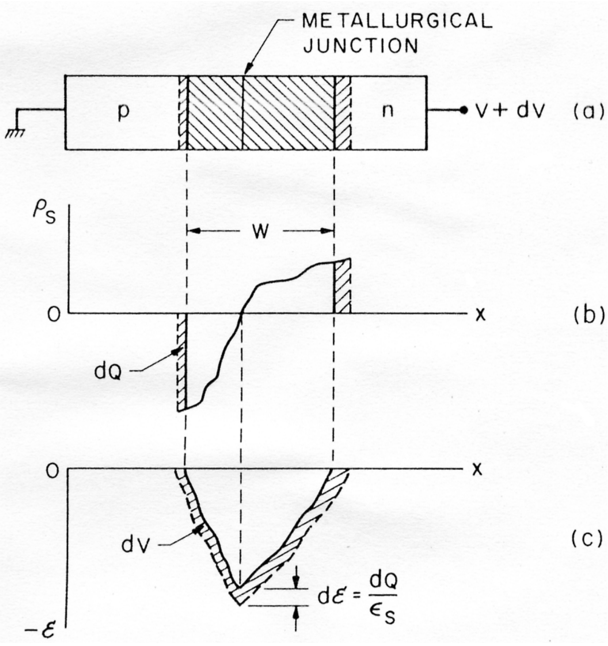
Nyitóirányú előfeszítésnél (V_F>0) V_{bi} - V_F – hat $\longrightarrow$ W csökken

Záróirányú előfeszítés (V_R>0) V_{bi} + V_R hat $\longrightarrow$ W nő

F Forward (nyítóirányú)

R Reverse (záróirányú)

A kiürített réteg kapacitása



általános $p-n$ átmenet (tetszőleges adalékprofil)

tértöltés-eloszlás változás a záró előfeszítés következtében

az elektromos tér eloszlásának megfelelő változása

j =junction - átmenet

A kiürített réteg kapacitása:

$$C_j \equiv \frac{dQ}{dV} = \frac{dQ}{W\dfrac{dQ}{\varepsilon_s}} = \frac{\varepsilon_s}{W} \quad \left[F/cm^2\right]$$

$$\frac{1}{C_j^2} = \frac{2(V_{bi}-V)}{q\varepsilon_s N_B} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{C_j^2} \sim f(V)$$

meredeksége: $1/N_B$

Speciális eset (abrupt $p-n$ átmenet):

$$C_j = \frac{\varepsilon_s}{W} = \sqrt{\frac{q\varepsilon_s N_B}{2(V_{bi}-V)}}$$

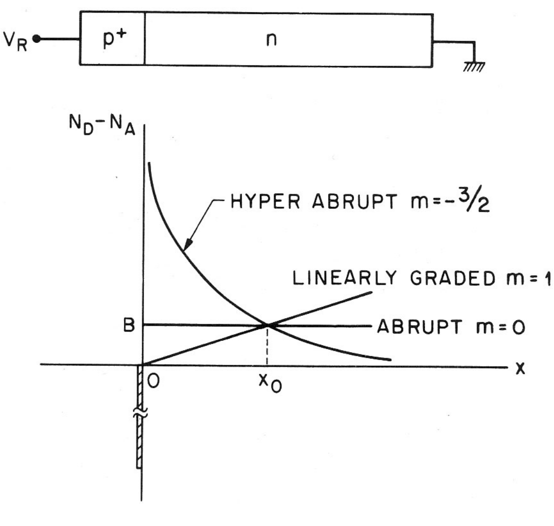
egyenes vonal abrupt $p-n$ átmenet esetén

X-tengely metszet: $V_{bi}\left(\dfrac{1}{C_j^2}=0\right)$

Adalékprofil mérés

$$dV \cong (dE)W = \left(\frac{dQ}{\varepsilon_s}\right)W = \frac{qN(W)d\left(W^2\right)}{2\varepsilon_s}$$

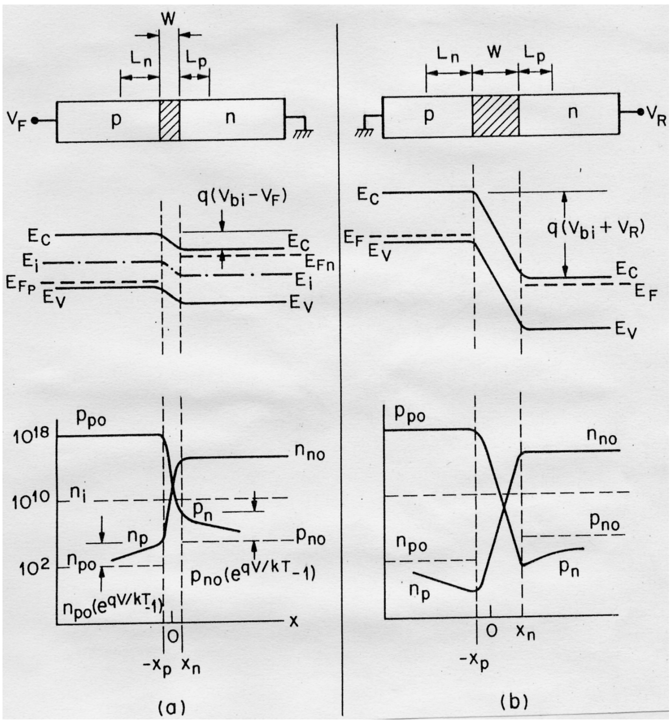
feszültségnövelés hatása $\rightarrow dW$



$$N(W) = \frac{2}{q\varepsilon_s}\left[\frac{1}{d\left(1/C_j^2\right)/dV}\right]$$

$$C_j = \frac{\varepsilon_s}{W} \sim (V_R)^{-\frac{1}{m+2}}$$ (kiürített réteg kapacitás)

Áram – feszültség jelgörbe



kiürített réteg

sávdiagram

töltéshordozó eloszlás

V_F nyitóirányú előfeszítés

V_R záróirányú előfeszítés

Ideális esetben:

- abrupt kiürített réteg, határán kívül a félvezető semleges;
- töltéshordozó sűrűség a határfelületeken az átmeneten eső feszültség függvénye;
- alacsonyszintű injekció $\rightarrow$ alacsony kisebbségi töltéshordozó sűrűség injekció a többségihez képest;
- nincs generáció-rekombináció a kiürített rétegben;
- az elektron-lyuk áram állandó a kiürített rétegben.

Termikus egyensúlyban: $p_{p0} \cong N_a, \quad n_{n0} = N_d$

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_{p0} n_{n0}}{n_i^2} = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_{n0}}{n_{p0}}$$

$$n_{n0} = n_{p0} \exp\left(\frac{qV_{bi}}{kT}\right)$$ elektronsűrűség a kiürített réteg határán

$$p_{p0} = p_{n0} \exp\left(\frac{qV_{bi}}{kT}\right)$$ lyuksűrűség a kiürített réteg határán

V_{bi} elektrosztatikus potenciálkülönbség a kiürített rétegen át

Áram – feszültség jelgörbe

Nyitóirányú előfeszítés esetén: V_{bi} csökken $\rightarrow V_{bi} - V_F$, ha $V_F > 0$.

Záróirányú előfeszítés esetén: V_{bi} nő $\rightarrow V_{bi} + V_R$, ha $V_R < 0$.

$n_n = n_p \exp\left(\frac{q(V_{bi} - V)}{kT}\right)$ nemegyensúlyi elektronsűrűség a kiürített réteg határán az $n-$ és $p-$ oldalon

$n_n \cong n_0 \quad \leftarrow$ az alacsonyszintű injekció miatt

$x = -x_p$ $\quad n_p = n_{p0} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$ $\quad x = x_n$ $\quad p_n = p_{n0} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$

$(p - \text{oldal})$ $\quad n_p - n_{p0} = n_{p0} \exp\left(\frac{qV}{kT} - 1\right)$ $\quad (n - \text{oldal})$ $\quad p_n - p_{n0} = p_{n0} \exp\left(\frac{qV}{kT} - 1\right)$

Nyitóirányú előfeszítés: kisebbségi töltéshordozó sűrűség jóval egyensúlyi érték felett van mindkét oldalon;

Záróirányú előfesítés: kisebbségi töltéshordozó sűrűség az egyensúlyi érték alatt van.

Mivel nincs **generáció-rekombináció** a kiürített rétegben $\rightarrow$ nincs elektromos tér, az áramok azonosak a $-x_p$; x_n határon

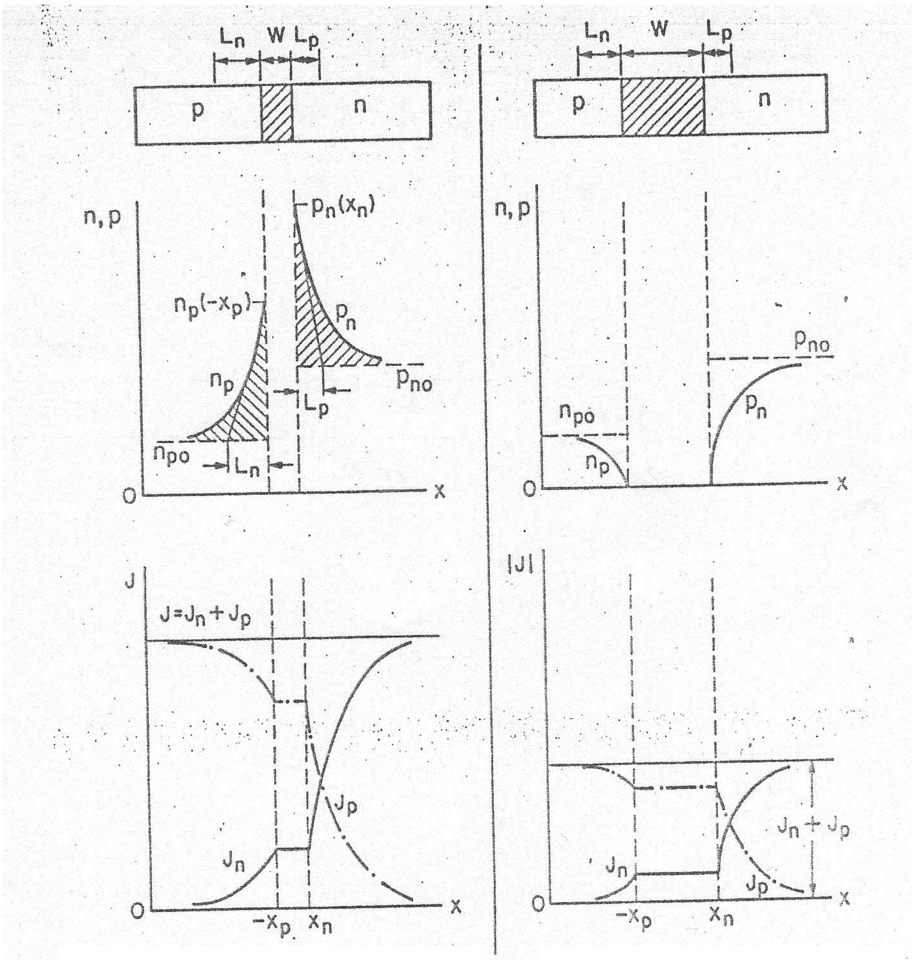
$$\frac{d^2 p_n}{dx^2} - \frac{p_n - p_{n0}}{D_p \tau_p} = 0 \qquad p_n(x = \infty) = p_{n0}$$

$$p_n - p_{n0} = p_{n0} \exp\left(\frac{qV}{kT} - 1\right) \exp\left(\frac{-(x - x_n)}{L_p}\right) \qquad L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

$$J_p(x_n) = -qD_p \left.\frac{dp_n}{dx}\right|_{x_n} = \frac{qD_p p_{n0}}{L_p}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right)$$

$$n_p - n_{p0} = n_{p0} \exp\left(\frac{qV}{kT} - 1\right) \exp\left(\frac{x - x_p}{L_n}\right) \qquad L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

$$J_n(-x_p) = -qD_n \left.\frac{dn_p}{dx}\right|_{-x_p} = \frac{qD_n n_{p0}}{L_n}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right)$$



Nyitó előfeszítés

Záró előfeszítés

Kiürített réteg

Kissebbségi töltéshordozó eloszlás

Elektron és lyukáramok

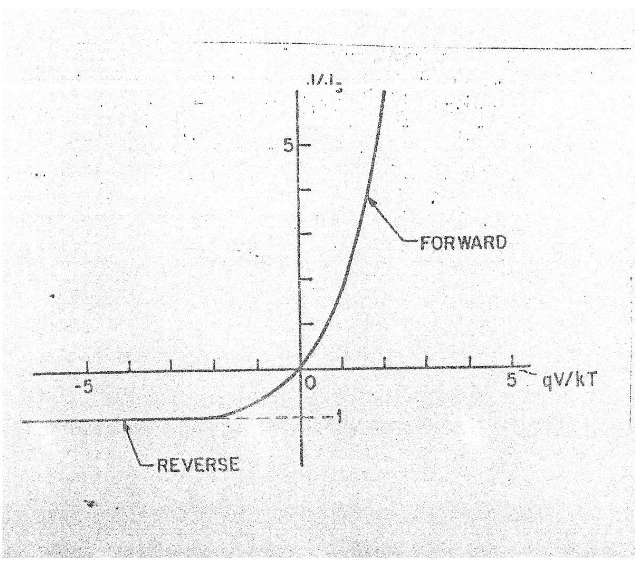
$$= J_p(x_n) + J_n(-x_p) = J_s\left(\exp\frac{qV}{kT} - 1\right)$$

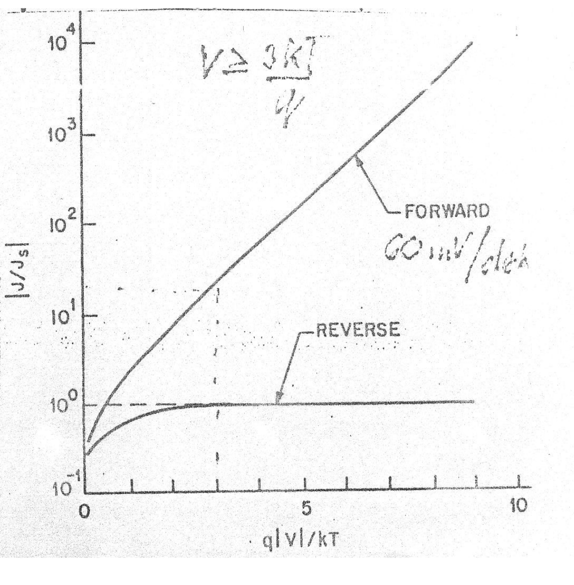
Teljes áramsűrűség (a kiürített rétegen át)

$$= \frac{qD_p p_{n_0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p_0}}{L_n}$$

Telítési áramsűrűség

<u>IDEÁLIS DIÓDAEGYENLET!</u> Jelleggörbe **I-V**: (**Ge**)



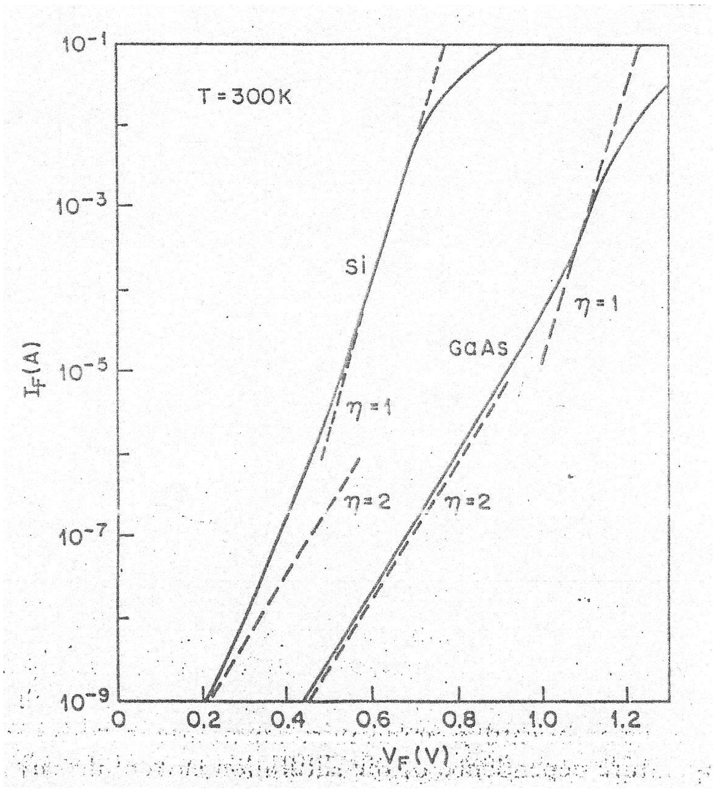


Si és **GaAs** esetében a **Generáció-Rekombináció** <u>nem elhanyagolható</u>

Záróáram:

$$J_R \cong \underbrace{q\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}}\cdot\frac{n^2}{N_D}}_{\substack{\text{Nagy } n_i \text{ esetén} \\ \text{(Ge) dominál}}} + \underbrace{\frac{q\cdot n_i\cdot W}{\tau_g}}_{\substack{\text{Kis } n_i \text{ (Si, Ga, As) esetén} \\ \text{generáció dominál}}}$$

$$J_F \sim \exp\left[\frac{qV}{\eta kT}\right] \qquad \eta \quad \text{idealitási tényező}$$



Si és **GaAs** diódák nyitóáram-feszültség görbéje

Nagyáramú tartomány: $\eta = 1$ (diffúziós áram dominál)

Kisáramú tartomány: $\eta = 2$ (rekombinációs áram dominál)

Ha mindkét áram közel azonos, akkor $1 < \eta < 2$.

Nagyáramú injekciónál eltérés van az $\eta = 1$ meredekségtől. **Okok**:

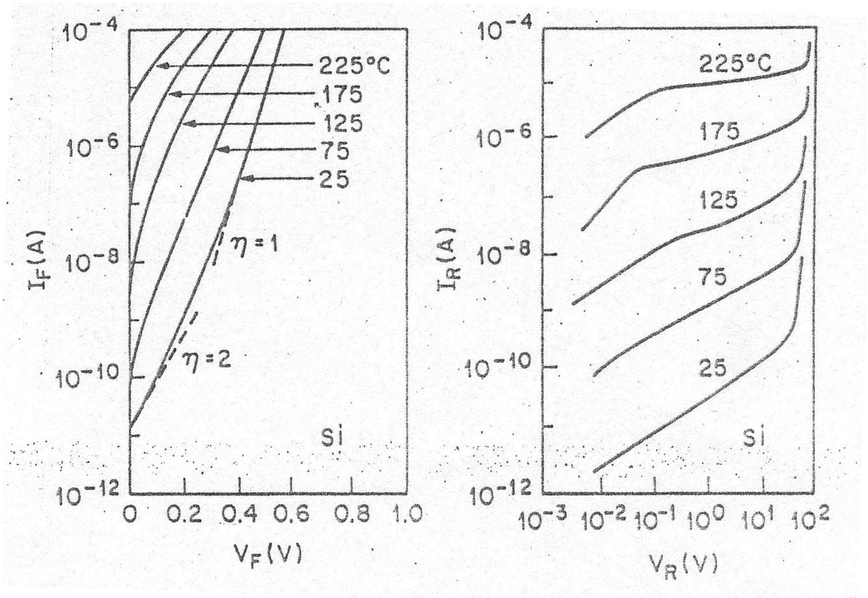
– **soros ellenállás hatása**

$$I \cong I_s\cdot\exp\left[\frac{q(V - IR)}{kT}\right]$$

– **nagyszintű injekció** (az $I - V$ jelleggörbének csökken a meredeksége):

$$p_n(x = x_n) \cong n_n \Rightarrow I \sim \exp\frac{qV}{2kT}$$

Hőmérsékleti hatás



Nyitó **Záró**

Si dióda ***I-V*** görbe hőfokfüggése

$$J_s \approx \frac{q \cdot D_p \cdot p_{n_o}}{L_p} \sim n_i^{\,2} \sim \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right]$$

Aktivációs energia: $J_s = f\left(\dfrac{1}{T}\right)$ meredeksége $\rightarrow$ $\boldsymbol{E_g}$ sávszélesség

$$\frac{I_{diff}}{I_{gen}} = \frac{n_i L_p}{N_D W} \cdot \frac{\tau_g}{\tau_p} \sim n_i$$

növekvő $\boldsymbol{T}$ $\rightarrow$ diffuzió dominál

alacsony $\boldsymbol{T}$ $\rightarrow$ generáció dominál

Töltéstárolás és tranziens viselkedés

Injektált kisebbségi töltéshordozó a semleges tartományban - **tárolás**

$$Q_p = q\int_{x_n}^{\infty}(p_n - p_{n0})dx \to qL_p p_{n0}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)$$

$$Q_p = \frac{L_p^2}{D_p}J_p(x_n) = \tau_p J_p(x_n)$$ lyuktárolás az $n-$oldalon

τ_p kisebbségi töltéshordozó élettartam

$J_p(x_n)$ kisebbségi töltéshordozó áram

Diffuziós kapacitás:

– kiürített réteg kapacitás záróirányú előfeszítésnél
– átrendeződés, töltéstárolás nyitóirányú előfeszítésnél

$$C_d = A\frac{dQ}{dV}$$ kisebbségi töltéshordozó diffuzió a semleges tartományban – töltéstárolás Q_p

$$C_d = \frac{Aq^2 L_p p_{n0}}{kT}\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$$ lyuktárolás az $n-$oldalon + elektrontárolás a $p-$oldalon, de p^+-n **átmenetre**, $p_{n0} >> n_{p0}$, ezért az **elektrontárolás elhanyagolható**

Záró irányban ($V = V_R < 0$):

$C_d \sim \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)$, emiatt a **diffuziós kapacitás záró irányban elhanyagolható**

$p-n$ **átmenet helyettesítő képe** (*equivalent cirquit*) kis amplitúdójú szinuszos bemenőjel esetén:

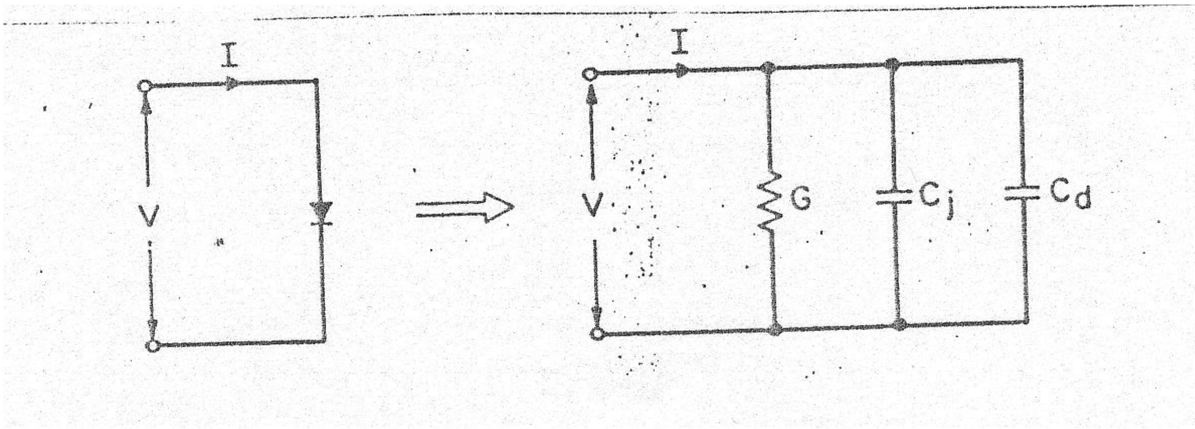
C_j a teljes kiürített réteg kapacitása

C_d a diffuziós kapacitás

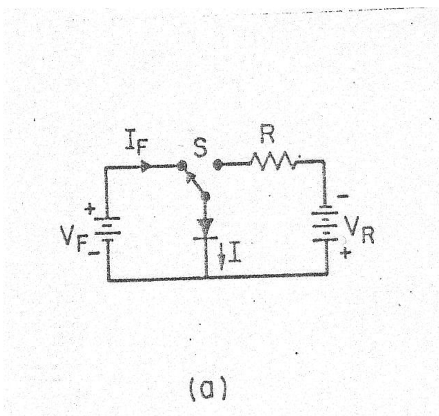
G a konduktancia (áram a diódán át)

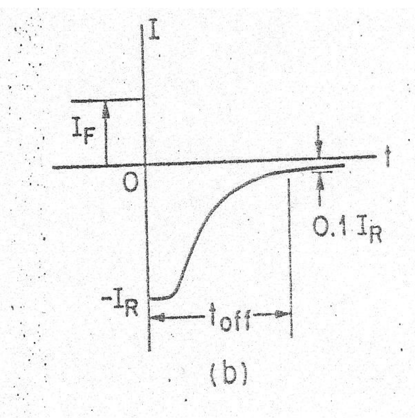
$$G = \frac{AdI}{dV} = \frac{qA}{kT}J_s\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) = \frac{qA}{kT}(J_s + J) \cong \frac{qI}{kT}$$

Kisjelű helyettesítő kapcsolás:



Tranziens viselkedés





$t < 0, \quad -I = I_F$

$t = 0, \quad I_R \approx \dfrac{V}{R}$ kezdeti záró áram

$t_{off} - 0{,}1 \cdot I_R$ eléréséhez szükséges idő

Alapkapcsolás

Kapcsolási (nyitóból-záró irányba) tranziens az áramban

$$t_{off} \cong \frac{Q_p A}{I_{R_{átl.}}}$$

$$Q_p = \tau_p \cdot J_p = \tau_p \frac{I_F}{A}$$

$$t_{off} = \tau_p \left[\frac{I_F}{I_{R_{átl.}}} \right]$$

A kapcsoló eszközökben τ_p kissebbségi töltéshordozó élettartamot csökkenteni kell!!!

$\Downarrow$

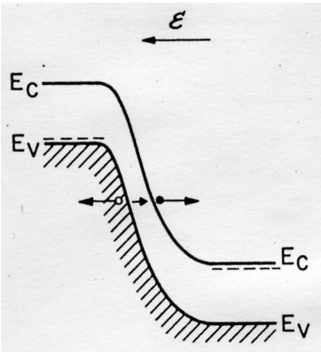
Rekombináció-**G**eneráció centrumok bevitele pl. **Au** diffúzió következtében mély szintek jönnek létre

p-n átmenet letörése

Túláram záró irányban elkerülendő, mert destruktív (termikus túlterhelés ellen ***R***)

Letörési mechanizmusok:

- **tunnelezés** (**alagút-hatás**, az a folyamat, mikor az elektron a tiltott sáv áthatolásával teszi meg a vegyérték – vezetési sávba történő átmenetet);



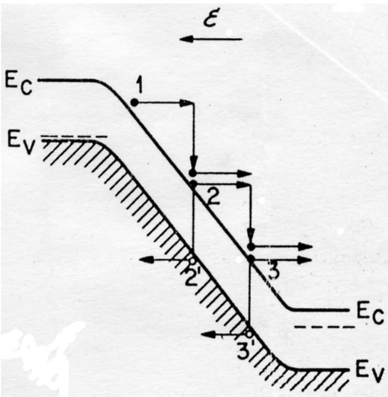
csak **extrém nagy elektromos tér** (**Si**, **GaAs** $E \geq 10^6\ V/cm$),

illetve

magas adalékkoncentráció (p és $n > 5 \cdot 10^{17}\ cm^{-3}$) esetén történik.

Alagút letörésnél a letörési feszültség, a $V_{BD} < 4E_g/q$.

- **lavinasokszorozódás** (**ütközéses ionizáció**)



$$M_n \equiv \frac{I_n(W)}{I_{n0}}$$ sokszorozódási (multiplikációs) tényező

Letörési feszültség esetén: $M_n \to \infty$

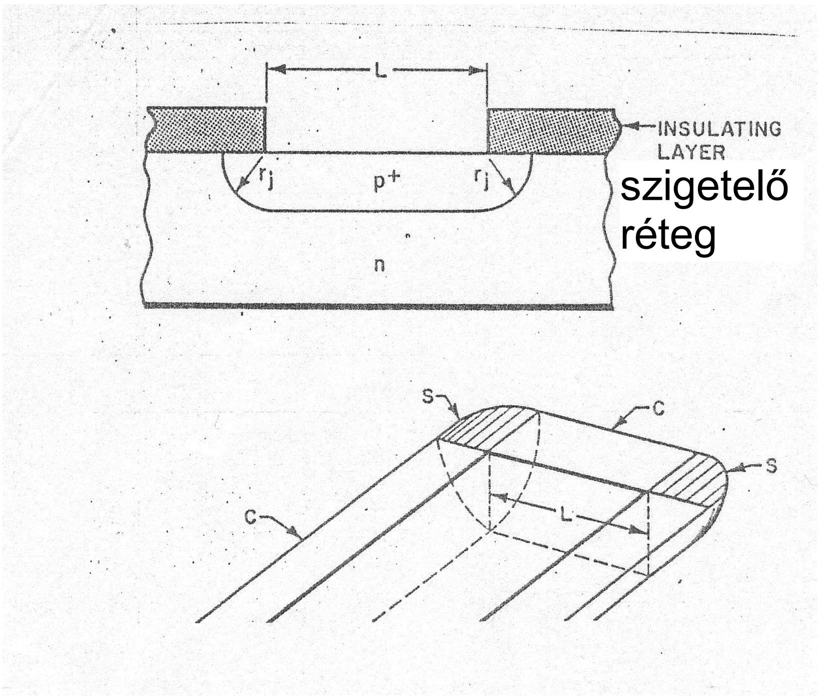
Lavina letörésnél a letörési feszültség, a $V_{BD} > 6E_g/q$.

Ha a letörési feszültség $4E_g/q$ és $6E_g/q$ közé esik, akkor a letörést mindkét letörési mechanizmus okozza.

Gyakorlati esetek:

$$V_{BD}\uparrow \left.\begin{array}{r}\text{planáris}\\ \text{hengeres}\\ \text{szférikus}\end{array}\right\} \text{tartományok} \to \text{kissugarú sarokgörbü letek kritikusak}$$

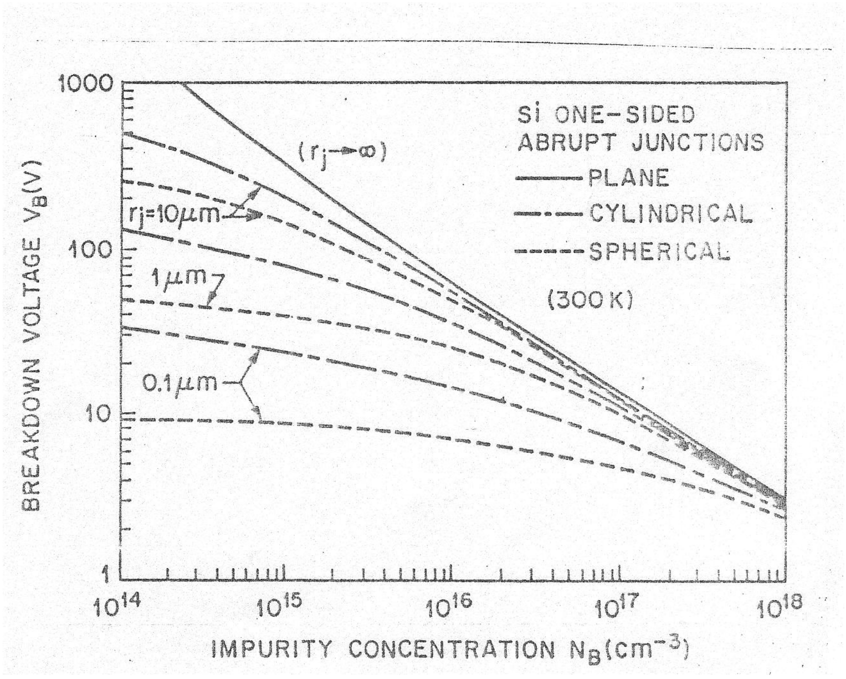
Adalékprofil hatása a letörési feszültség értékére



L a diffúziós terület szélessége maszkoló rétegben (nyitott ablak mérete)

A diffúziós terület térbeli metszete

s a szférikus sarok
c a cilindrikus görbület
r_j a görbületi sugár



Letörési feszültség függése az adalék koncentrációtól egyoldalú abrupt adalékolású profil esetén