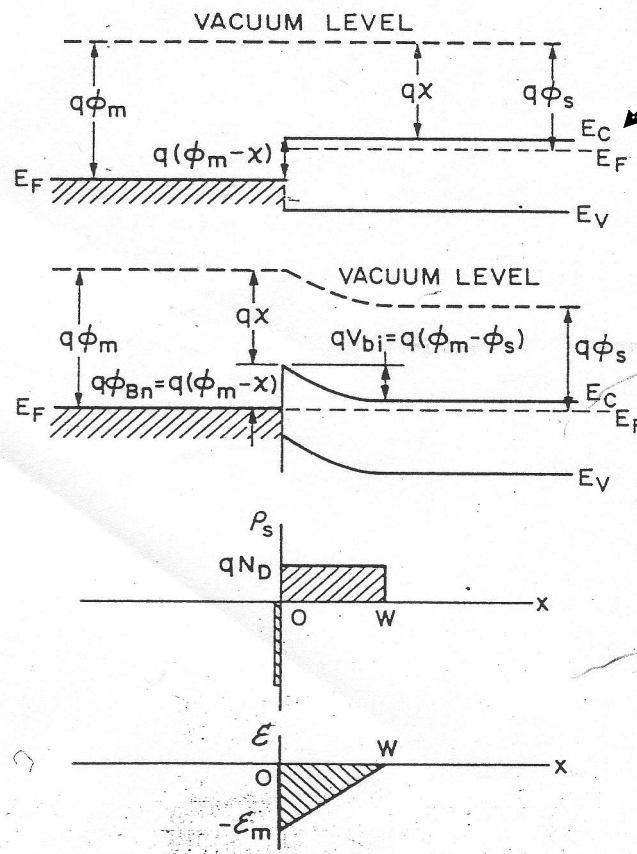
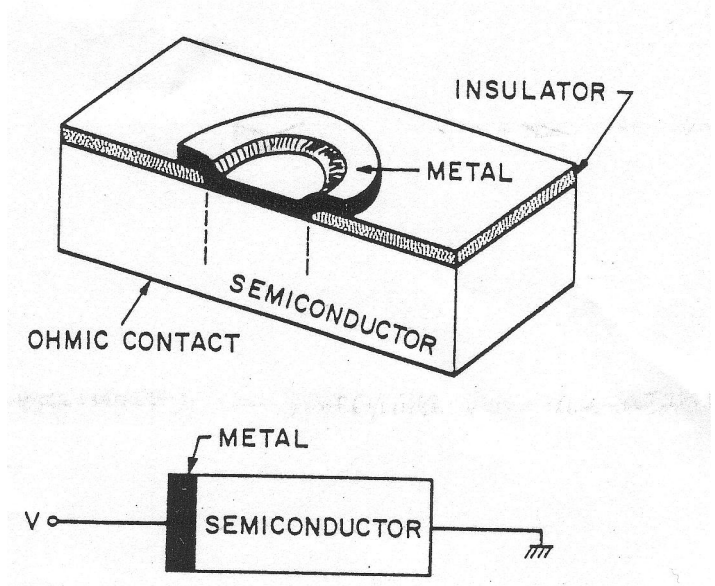


Fém-félvezető kontaktus

Schottky (1938) – gát (barrier)

- potenciálgát az átmeneten
⇒ egyenirányítási jelleg
- nem egyenirányító ⇒
ohmos fém-félvezető kontaktus



Fém és tőle elszigetelt *n* – típusú félvezető sávdigramja **nem-egyensúlyi** állapotban

$q\Phi_m$ - fém kilépési munkája

$q\Phi_s$ - félvezető kilépési munkája

közvetlen kontaktus (fém-félvezető) **termikus** egyensúlyban

$q\chi$ - elektron affinitás

Töltés eloszlás a fém-félvezető átmenetén

Az elektromos tér eloszlása a (félvezető oldali) kiürített ≡ tértöltési rétegben

Φ_B - potenciálgát magassága a határfelületen ideális esetben

n – típusú félvezető:

$$q\Phi_{Bn} = q(\Phi_m - \chi)$$

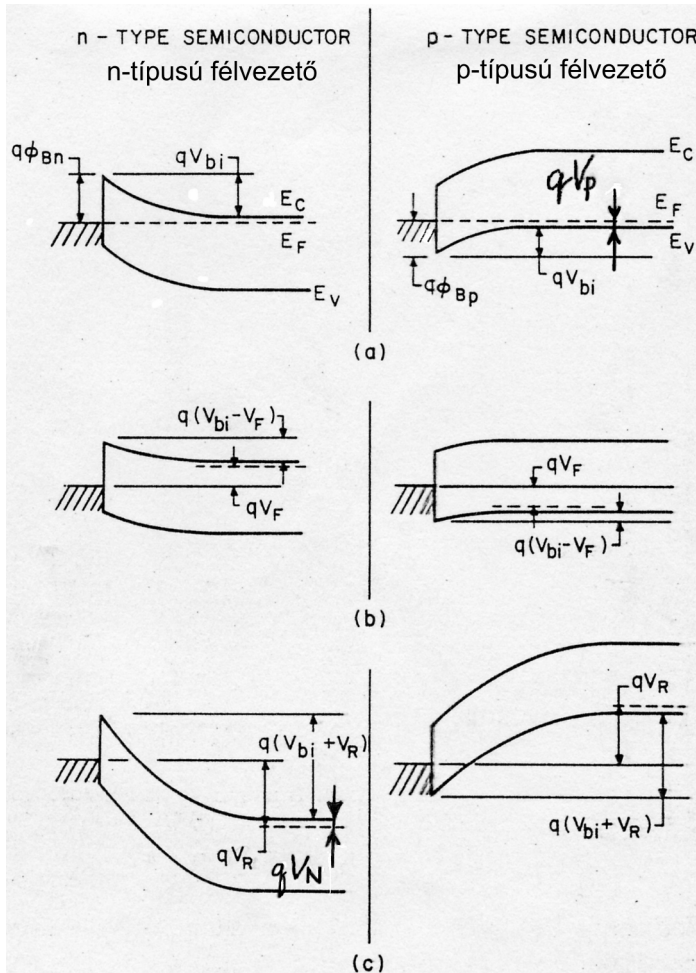
p – típusú félvezető:

$$q\Phi_{Bp} = E_g - q(\Phi_m - \chi)$$

Adott félvezető esetén ⇒ $E_g = q(\Phi_{Bn} + \Phi_{Bp})$ valamennyi fémre

Fém-félvezető kontaktus (Schottky-dióda)

Fém- n -típusú félvezető, illetve fém- p -típusú félvezető kontaktus energia sávdigramja



termikus egyensúlyban

nyitó irányú előfeszítésnél

záró irányú előfeszítésnél

A beépített potenciál értéke:

$$V_{bin} = \phi_{Bn} - V_n$$

$$V_{bip} = \phi_{Bp} - V_p$$

Abrupt átmenet közelítéssel (n -típusú félvezető esetén): $\rho_s \cong qN_D$

Ha $x < W$, akkor $\rho_s = 0$, ha $x > W$, akkor $d\psi/dx = 0$

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_D} (V_{bi} - V)}$$

$$\left| \mathcal{E}_n(x) \right| = \frac{qN_D}{\epsilon_s} (W - x) = \mathcal{E}_m - \frac{qN_D}{\epsilon_s} x$$

$$\psi(x) = \frac{qN_D}{\epsilon_s} \left(Wx - \frac{1}{2} x^2 \right) - \phi_{Bn}$$

Fém-félvezető kontaktus (Schottky-dióda)

Az elektromos mező térerőségének maximális értéke:

$$\mathcal{E}_m = \mathcal{E}(x=0) = \sqrt{\frac{2qN_D}{\epsilon_s}(V_{bi} - V)} = \frac{2(V_{bi} - V)}{W}$$

Tértöltés (space charge): $Q_{sc} = qN_D W = \sqrt{2q\epsilon_s N_D (V_{bi} - V)}$ [C/cm²]

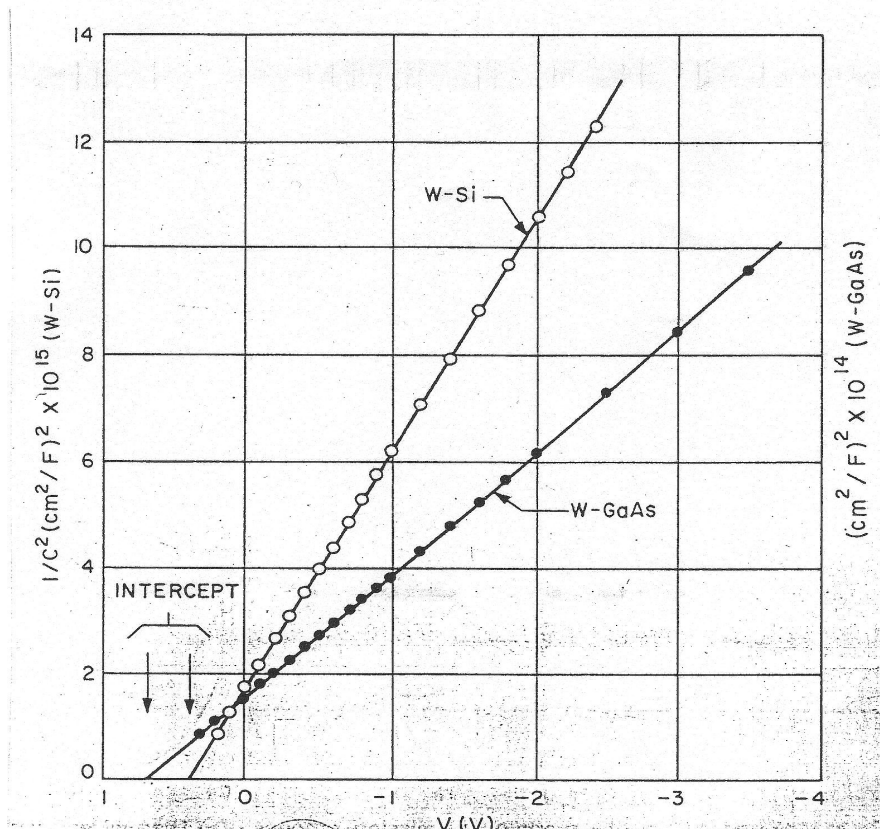
Tértöltés réteg kapacitás: $C = \left| \frac{\partial Q_{sc}}{\partial V} \right| = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} - V)}} = \frac{\epsilon_s}{W} \sqrt{2(V_{bi} - V)}$ [F/cm²]

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi} - V)}{q\epsilon_s N_D} \quad \text{vagy} \quad \frac{-d(1/C^2)}{dV} = \frac{2}{q\epsilon_s N_D}$$

Ebből meghatározzuk az adalékkoncentráció szintet:

$$N_D = \frac{2}{q\epsilon_s} \left[\frac{-1}{d(1/C^2)/dV} \right]$$

$N_D = \text{const}$ az egész kiürített tartományban.



x – tengelymetszet

$1/C^2 = 0$ -nál kiadja

V_{bi} értékét



$$\Phi_{Bn} = V_{bi} + V_n$$

potenciálgát

meghatározása

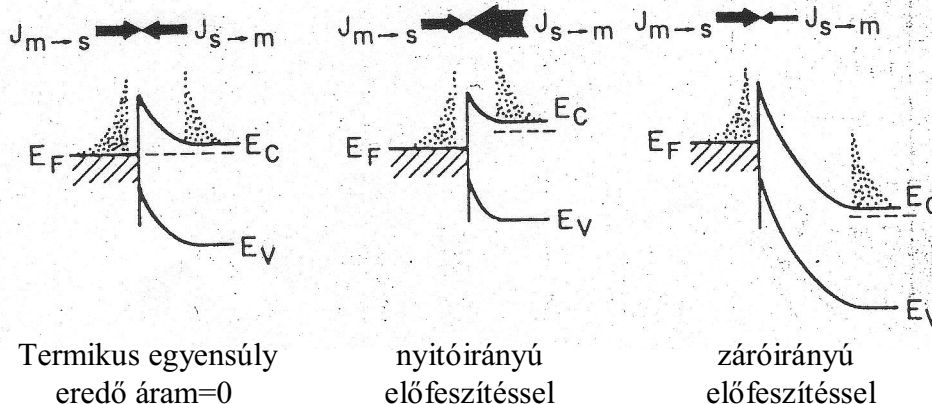
Schottky-diódán

Shottky-dióda áram-feszültség karakterisztikája

Áramtranszport termikus emisszióval: **döntően többségi töltéshordozó** (ellentétben a $p-n$ átmenettel, ahol döntően a kisebbségi töltéshordozó) számít.

$$N_D \leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$T = 300 \text{ K}$$



A félvezető felületén az **elektronkoncentráció**:

$$n_s = N_D \left(-\frac{qV_{bi}}{kT} \right) = N_D \exp\left(-\frac{q(\phi_{Bn} - V_n)}{kT} \right) = N_c \exp\left(-\frac{q\phi_{Bn}}{kT} \right),$$

ahol N_c **állapotsűrűség** a vezetési sávban.

Áramsűrűség:

$$\text{nyitó irányban: } J = J_{s \rightarrow m} - J_{m \rightarrow s} = C_1 N_c e^{-q\phi_{Bn}/kT} \left(e^{qV_F/kT} - 1 \right),$$

$$\text{záró irányban: } J = J_{m \rightarrow s} - J_{s \rightarrow m} = C_1 N_c e^{-q\phi_{Bn}/kT} \left(e^{-qV_R/kT} - 1 \right),$$

ahol C_1 arányossági tényező. A gyakorlatból: $C_1 N_c = A^* T^2$.

Itt A^* az ún. **effektív Richardson-állandó** (mértékegysége [A/cm^2]).

$n-\text{Si}$ esetén $A^* = 110 \text{ A}/\text{cm}^2$, $p-\text{Si}$ esetén $A^* = 32 \text{ A}/\text{cm}^2$.

$n-\text{GaAs}$ esetén $A^* = 8 \text{ A}/\text{cm}^2$, $p-\text{GaAs}$ esetén $A^* = 74 \text{ A}/\text{cm}^2$.

$$J = J_s \left(e^{qV/kT} - 1 \right) \quad \left. \begin{array}{l} V > 0 \text{ nyitóirányú} \\ V < 0 \text{ záróirányú} \end{array} \right\} \text{ előfeszítésnél}$$

$$J_s \equiv A^* T^2 e^{-q\phi_{Bn}/kT} \quad \text{telítési áramsűrűség.}$$

A jelenlévő lyukinjekció nagyságrendekkel kisebb, mint az elektroninjekció, ezért elhanyagolható, így a **Schottky-dióda unipoláris eszköznek** tekinthető.

Ohmos kontaktus

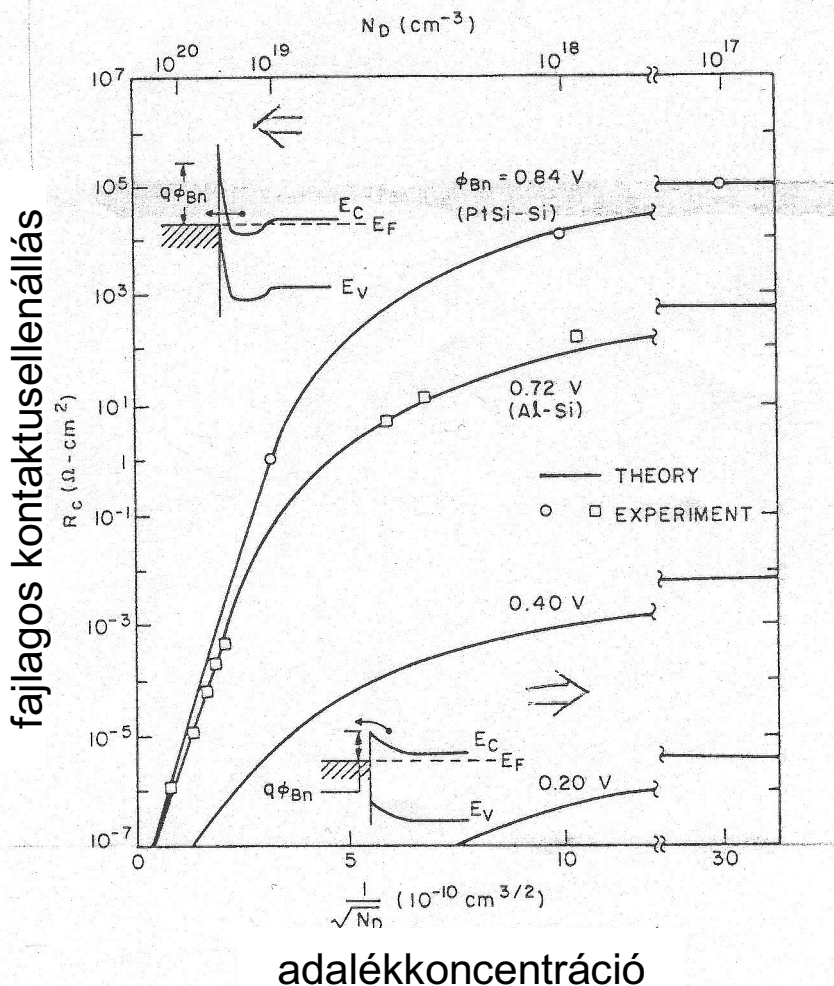
fém-félvezető kontaktus, mely elhanyagolhatóan kis ellenállással bír a félvezető tömbi vagy soros ellenállásához képest.

Fajlagos kontaktusellenállás:

$$R_c \equiv \left(\frac{\partial J}{\partial V} \right)_{V=0}^{-1} [\Omega \cdot \text{cm}^2]$$

$$R_c = \frac{k}{qA^*T} \exp\left(\frac{q\phi_{Bn}}{kT}\right).$$

A ϕ_{Bn} értéke minimalizálendő a kis R_c érdekében termikus emisszióval. Az erősen adalékolt ($N_D \geq 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) félvezető felületén a potenciális gát vastagsága csökken.



Ilyenkor az „**alagútazás**” („**tunnelezés**”, tunneling) lehetősége áll fenn, melynek valószínűsége:

$$I \sim \exp\left(\frac{-C_2(\phi_{Bn} - V)}{\sqrt{N_D}}\right),$$

$$C_2 = 2 \sqrt{m_n \epsilon_s} / \hbar.$$

A kontaktusban az alagútáram dominál.

A kontaktusellenállás magas adalékolásnál:

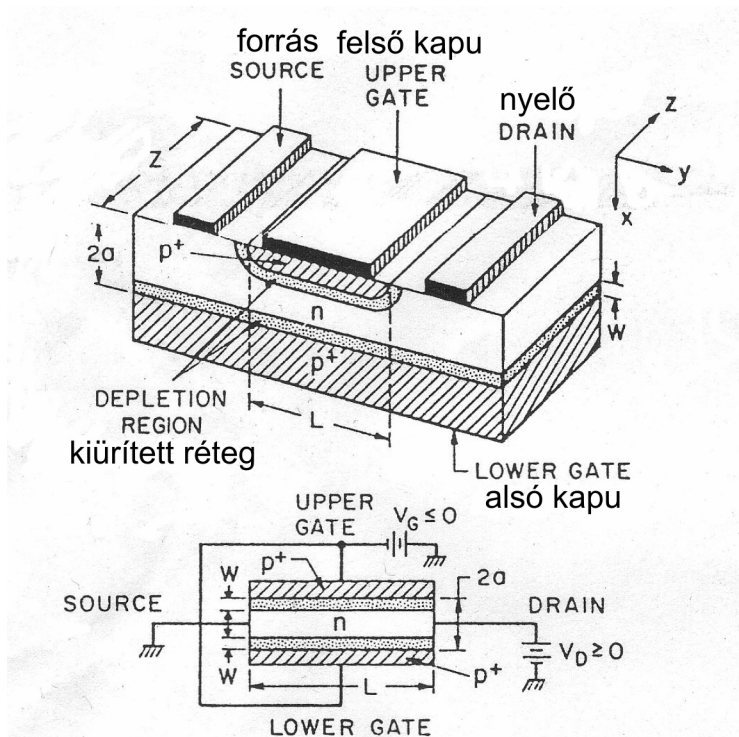
$$R_c \sim \exp\left(\frac{C_2 \phi_{Bn}}{\sqrt{N_D}}\right)$$

$N_D \geq 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ -nál az **alagútmisszió** dominál.

$N_D < 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ -nál a **termikus emisszió** a meghatározó (adalék független).

Gyakorlati szempont technológia-tervezésnél (ohmos kontaktus létrehozásánál)!!

Zárórétegű tervezérlésű tranzisztor JFET (1952)



Unipoláris eszköz, mivel csak egyfajta töltéshordozók (a többségi) vesznek részt az áramvezetésben.

A két kapuelektroda potenciállal vezérelt kiürített rétegekkel határolt **vezető csatorna** a „forrás” és „nyelő” közt

$$V_S = 0, \quad V_D \geq 0, \quad V_G \leq 0$$

Alapkapcsolás

(az áramfolyás keresztmetszet a csatorna közepén)

Csatorna **hossz**: L

Csatorna **szélesség**: Z

Csatorna **vastagság**: $2a$

Csatorna **ellenállás**: R

$$R = \rho \frac{L}{A} = \frac{L}{q\mu_n N_D A} = \frac{L}{2q\mu_n N_D Z(a - W)}$$

$$A = 2Z(a - W)$$

Elzáródás (a drain oldalon): $W = a$

Abrupt közelítéssel:

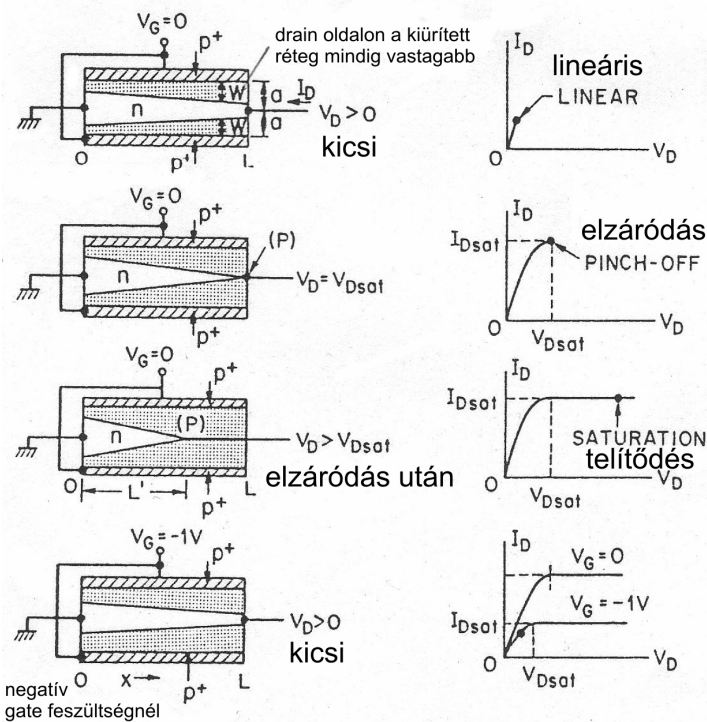
$$V_G = 0$$

$$V_{Dsat} = \frac{qN_D a^2}{2\epsilon_s} - V_{bi}$$

$$V_G < 0$$

$$V_{Dsat} = \frac{qN_D a^2}{2\epsilon_s} - V_{bi} - V_G$$

V_{bi} a gate átmenet beépített potenciálja.



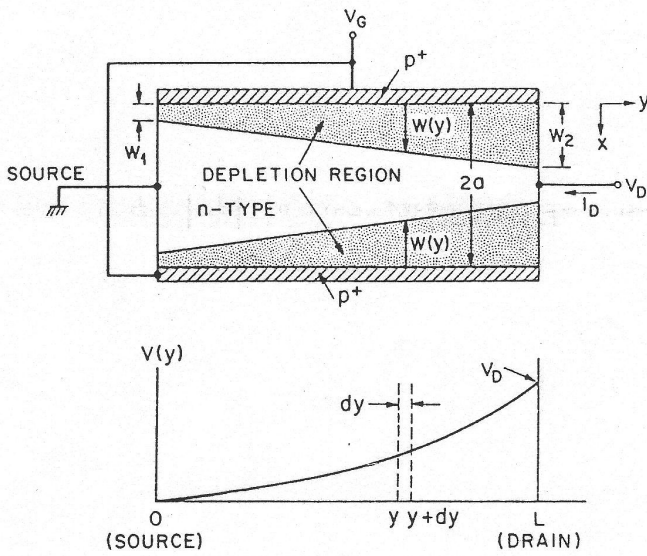
keresztmetszet

üzemmódok

Elzáródási pont a **source** felé mozog

V_G csökkenti az elzáródáshoz szükséges drainfeszültséget

A JFET áram-feszültség karakterisztikái



$$V_P = V_D + V_G + V_{bi}, \text{ ahol } W_2 = a$$

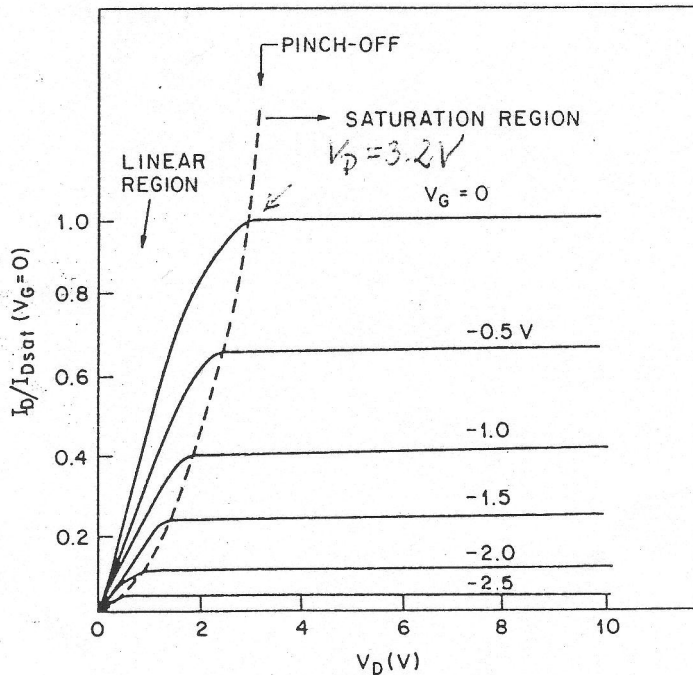
$$I_D = \frac{1}{L} \int_{W_1}^{W_2} 2q\mu_n N_D Z(a - W) \frac{qN_D}{\epsilon_s} W dW$$

$$I_D = I_P \left[\frac{V_D}{V_P} - \frac{2}{3} \left(\frac{V_D + V_G + V_{bi}}{V_P} \right)^{3/2} + \frac{2}{3} \left(\frac{V_G + V_{bi}}{V_P} \right)^{3/2} \right]$$

$$I_P \equiv \frac{Z\mu_n q^2 N_D^2 a^3}{\epsilon_s L}$$

$$V_P \equiv \frac{qN_D a^2}{2\epsilon_s}$$

pinch off
vagyis
átszúrás



V_D alacsony: $0 \leq V_D \leq V_{Dsat}$
($V_D \ll V_G + V_{bi}$)

Lineáris tartomány

$$I_D \cong \frac{I_P}{V_P} \left[1 - \sqrt{\frac{V_G + V_{bi}}{V_P}} \right] V_D$$

$$g_D \equiv \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_D} \right|_{V_G = \text{const}}$$

Csatorna konduktancia:

$$g_D = \frac{I_P}{V_P} \left[1 - \sqrt{\frac{V_G + V_{bi}}{V_P}} \right]$$

$$V_D \geq V_{Dsat}$$

Telítési tartomány

$$I_{Dsat} = I_D \left[\frac{1}{3} - \left(\frac{V_G + V_{bi}}{V_P} \right) + \frac{2}{3} \left(\frac{V_G + V_{bi}}{V_P} \right)^{2/3} \right]$$

$$V_{Dsat} = V_P - V_G - V_{bi}$$

$$g_m = \frac{I_P}{V_P} \left[1 - \sqrt{\frac{V_G + V_{bi}}{V_P}} \right]$$

Transzkonduktancia:

$$g_m \equiv \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_G} \right|_{V_D = \text{const}}$$

$$g_m = \frac{I_P}{2V_P^2} \sqrt{\frac{V_P}{V_G + V_{bi}}} V_D$$

JFET kisjelű helyettesítő kapcsolása

$$\tilde{i}_D + I_D(V_D, V_G) = I_D(V_D + \tilde{v}_D, V_G + \tilde{v}_G)$$

$$\tilde{i}_D = I_D(V_D + \tilde{v}_D, V_G + \tilde{v}_G) - I_D(V_D, V_G) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \tilde{i}_D = g_D \tilde{v}_D + g_m \tilde{v}_G = \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_D} \right|_{V_G} \cdot \tilde{v}_D + \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_G} \right|_{V_D} \tilde{v}_G$$

A gyakorlatban soros source és drain ellenállással: (R_S, R_D)

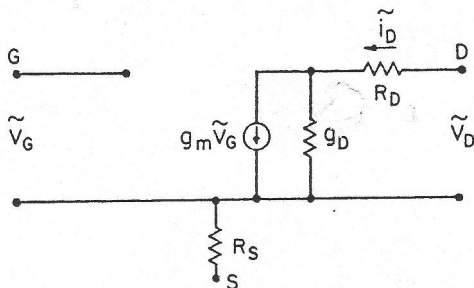
$$g'_m = \frac{g_m}{1 + R_S g_m + (R_S + R_D) g_D}$$

$$g'_D = \frac{g_D}{1 + R_S g_m + (R_S + R_D) g_D}$$

a konduktanciák értéke az ideálishoz képest csökken!

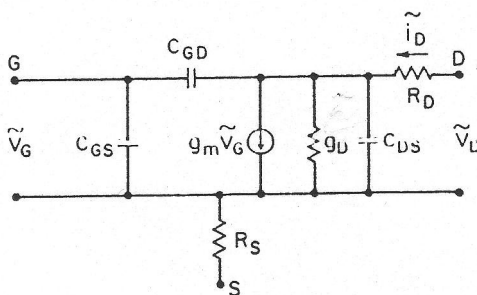
Kisjelű helyettesítő kép:

- baloldal nyitott \rightarrow JFET bemenő ellenállása $\rightarrow \infty$



Nagyfrekvenciás helyettesítő kép:

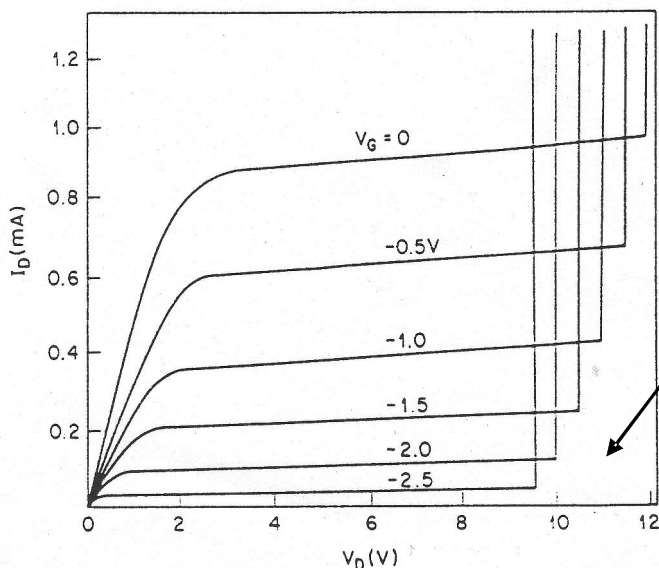
- átmenetek kapacitásai: C_{GS}, C_{GD}, C_{DS}



Levágási frekvencia ($C_G = C_{GS} + C_{GD}$):

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi C_G} \leq \frac{I_P/V_P}{2\pi ZL\epsilon_S\mu_n}$$

$$f_T = \frac{2\mu_n q N_D a^2}{\pi \epsilon_S L^2}$$



Magas frekvenciás működéshez nagy töltéshordozó mozgékonyosság és rövid csatornahossz szükséges.

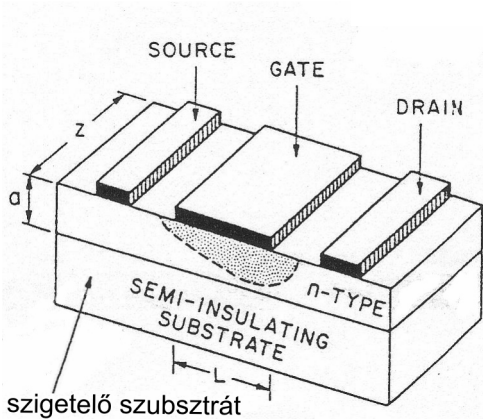
Gyakorlati jelleggörbe

Csatorna konduktancia \rightarrow telítés

Letörési feszültség:

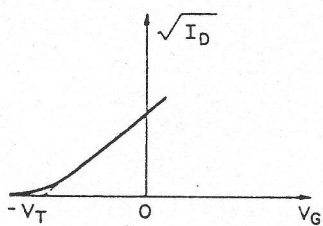
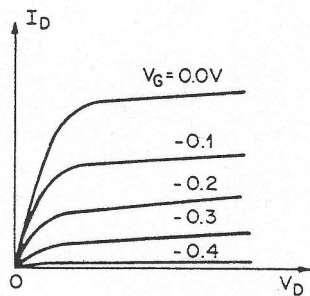
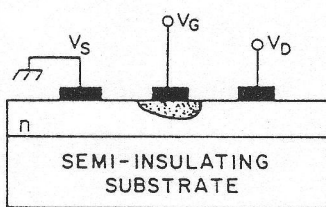
$$V_B = V_D + |V_G|$$

Fém-félvezető térvezérlésű tranzisztor (MESFET)



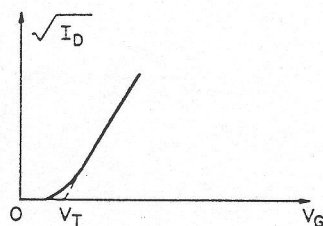
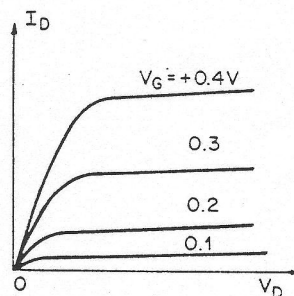
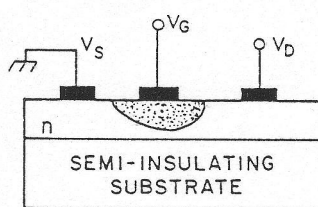
Működése analóg a JFET-tel
Gate egy egyenirányító Shottky-kontaktus

Alapállapotban nyitott (vezető)



kiürítéses

Alapállapotban lezárt



növekményes

MESFET

Kimeneti karakterisztikák

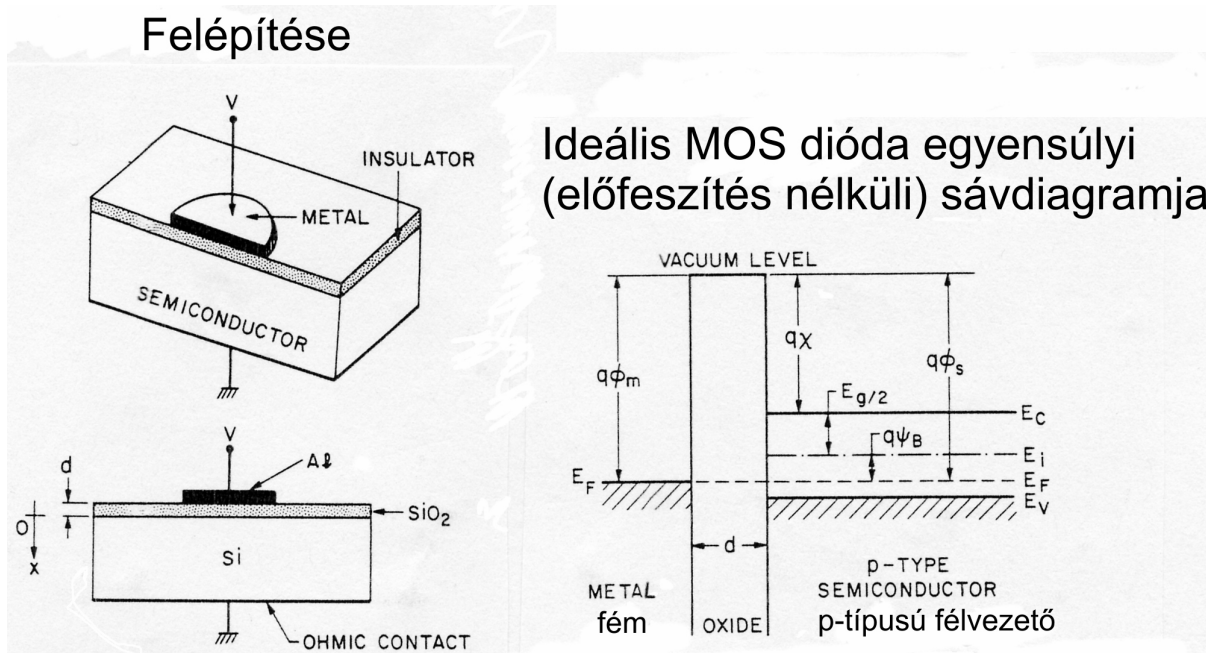
Bemeneti karakterisztikák

Többnyire III-V félvezetőn készül (**GaAs**)

- nagy elektron mozgékonyosság miatt kis soros ellenállásértékek (R_S , R_D)
- magas telítési sebesség miatt nő az f_T !

Heteroátmenetes MESFET – jobb vezérelhetőség, illetve csatorna konduktancia

Fém-oxid-félvezető (MOS, MIS) dióda



Kilépési munka különbség egyensúlyban:

$$q\phi_{ms} \equiv (q\phi_m - q\phi_s) = q\phi_m - \left(q\chi + \frac{E_g}{2} + q\psi_B \right),$$

ahol $q\chi$ a félvezető elektron affinitása és $q\psi_B = E_i - E_F$.

Flatband (előfeszítés nélküli), azaz síksáv állapot:

- egyenáramú előfeszítésnél nincs töltéstranszport az oxidon át, $R_{oxid} \rightarrow \infty$;
- a MOS diódában bármilyen előfeszítésnél csak olyan töltések vannak, melyek a félvezetőben és az oxiddal szomszédos fém felületén vannak. Ezeknek a töltéseknek ellentétes az előjelük, de azonos az értékük.

Ideális MOS diódában nem folyik áram!

A félvezetőben az előfeszítéstől függetlenül a **Fermi-szint konstans érték!**

A lyukkonzentráció a p -típusú félvezetőben:

$$p_p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right).$$

Ideális MOS dióda

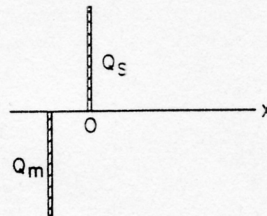
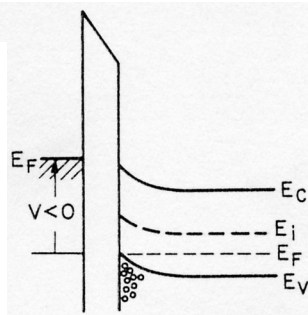
sávdiaagram

töltéseloszlás

$V < 0$ -nál

sávfelhajlás \Rightarrow

lyukfelhalmozódás a határfelületen



feldúsulás \equiv
akkumuláció

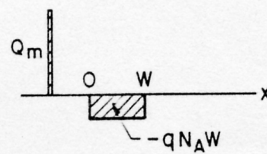
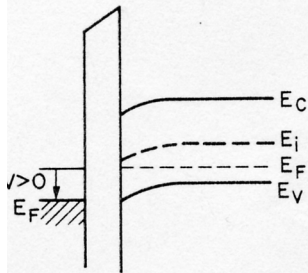
(többségi töltéshordozókra vonatkozik)

$V > 0$ -nál

sávlelhajlás \Rightarrow

többségi lyukak kiürülése a határfelületen

(W vastagságban)



kiürülés \equiv
depletion

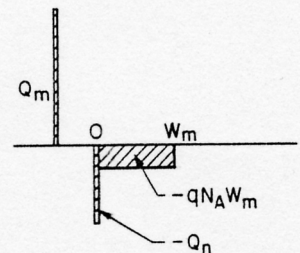
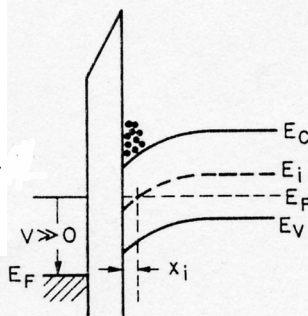
tértöltés

$$Q_{sc} = -qN_A W$$

$V \gg 0$ -nál

erős sávlelhajlás \Rightarrow

E_i keresztezi E_F



inverzió

kisebbségi (inverz) töltéshordozó megjelenése a határfelületen (néhány 10 \AA)

Elektronkoncentráció a p -típusú félvezetőben:

$$n_p = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right)$$

Mivel inverzióban: $E_F > E_i \Rightarrow n_p > n_i \Rightarrow p_p < n_i$

az x_i vastagságú inverz rétegben

Erős inverzióban: felületi kiürített réteg vastagsága W_m .

$$\text{a tértöltés: } Q_s = Q_n + Q_{sc}$$

Az inverziós töltés leárnyékolja a fémelektroda terét, a kiürítés nem

folytatódhat $\Rightarrow W = W_m$ maximális kiürített réteg vastagság

$$Q_{sc} = -qN_A W_m$$

A felületi (határfelületi) kiürített réteg

Elektron-, illetve lyukkonzentráció potenciálokkal kifejezve:

$$n_p = n_i \exp\left(\frac{q(\psi - \psi_B)}{kT}\right) \quad \begin{cases} \psi > 0 & \text{ha sávelhajlás lefelé} \\ \psi < 0 & \text{ha sávelhajlás felfelé} \end{cases}$$

$$p_p = n_i \exp\left(\frac{q(\psi_B - \psi)}{kT}\right)$$

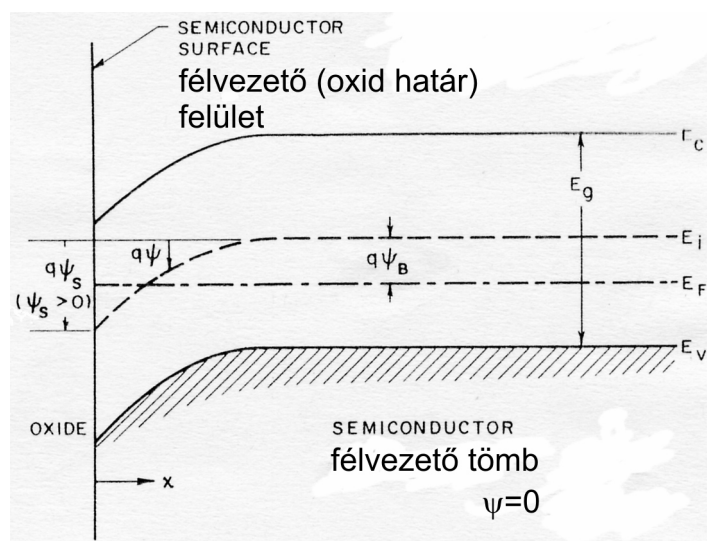
A félvezető felületén $\psi = \psi_s$. A ψ_s az ún. felületi potenciál.

A töltéshordozó sűrűség a félvezető felületén:

$$n_s = n_i \exp\left(\frac{q(\psi_s - \psi_B)}{kT}\right)$$

$$p_s = n_i \exp\left(\frac{q(\psi_B - \psi_s)}{kT}\right)$$

$$q\psi = E_i - E_{ix}$$



Sávdiaagram inverziós állapotban

- $\psi_s < 0$ lyukkakkumuláció – sávelhajlás felfelé
- $\psi_s = 0$ síksáv, azaz flatband állapot
- $\psi_B > \psi_s > 0$ lyukak kiürülése a felületen – sávelhajlás lefelé
- $\psi_s = \psi_B$ sávközépen $E_F = E_i \Rightarrow n_s = n_p = n_i$ inverzió kezdete
- $\psi_s > \psi_B$ inverzió – a sávok erősen lehajlanak

Poisson-egyenlet: $\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{\rho_s}{\epsilon_s}$, $\rho_s(x) =$ teljes tértöltés sűrűség

Kiürítéssel közelítéssel: $\rho_s = -qN_A$. Integrálva a Poisson-egyenletet, az elektrosztatikus potenciál eloszlás:

$$\psi = \psi_s \left(1 - \frac{x}{W}\right)^2 \quad \psi_s = \frac{qN_A W^2}{2\epsilon_s} \quad \text{ugyanaz, mint az abrupt } p-n \text{ átmenet esetén volt } (p^+ - n)$$

A felületi inverzió

A felület inverzé válik, mikor $\psi_s > \psi_B$ -nél.

Az inverziós töltések csak ún. erős inverzióban dominálnak:

$$\Rightarrow n_s = N_A, \quad N_A = n_i \exp\left(\frac{q\psi_B}{kT}\right)$$

erős inverzió kezdete:
$$\psi_s(\text{inv}) \cong 2\psi_B = \frac{2kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

maximális felületi kiürített réteg vastagság:
$$W_m = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \psi_s(\text{inv})}{qN_A}}$$

maximális tértöltés:
$$Q_{sc} = -qN_A W_m \cong -\sqrt{2q\epsilon_s N_A (2\psi_B)}$$

Ideális MOS C-V görbék

$V > 0$ fém előfeszítéssel:

$$V = V_{ox} + \psi_s$$

$$V_{ox} = E_{ox} d = \frac{|Q_s| d}{\epsilon_{ox}} \equiv \frac{|Q_s|}{C_o}$$

d - oxidvastagság;

Q_s - félvezető töltéssűrűség;

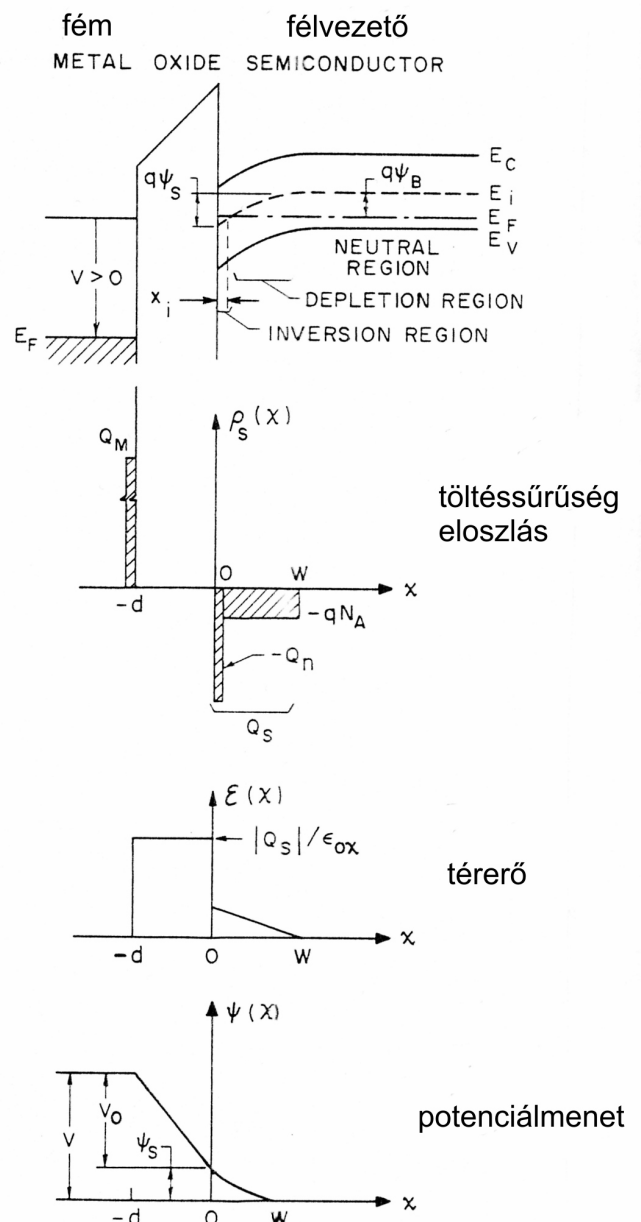
$C_{ox} = \epsilon_{ox}/d$ - oxidkapacitás egységnyi területen

MOS kapacitás: a C_{ox} és a C_j soros eredője

$$C = \frac{C_{ox} C_j}{C_{ox} + C_j}$$

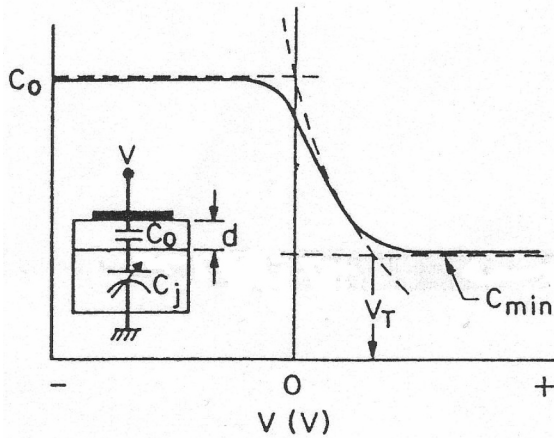
$$C_j = \frac{\epsilon_s}{W} \text{ (ideális } p-n \text{ átmenet)}$$

$$\frac{C}{C_{ox}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2\epsilon_{ox}^2 V}{qN_A \epsilon_s d^2}}}$$

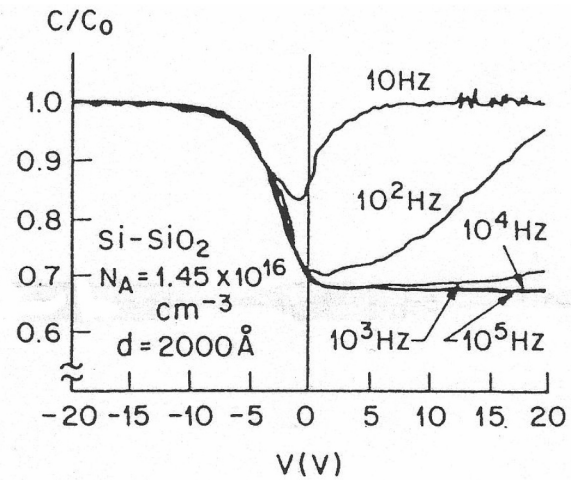


Nagyfrekvenciás C-V görbék

Ideális C-V görbe



Gyakorlati C-V görbék



Közelítő szegmensek (szaggatott egyenesek) a nagyfrekvenciás C-V görbén

C-V görbe frekvencia függése

Erős inverzió kezdete: $\psi_s \cong 2\psi_B$

$$V_T = \frac{qN_A W_m}{C_{ox}} + \psi_s(inv) \approx \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A (2\psi_B)}}{C_{ox}} + 2\psi_B$$

V_T - küszöbfeszültség (threshold voltage) =

Az erős inverzió feltételt a határfelületen beállító fémpon

Erős inverzióban (**árnyékolás**) a kapacitás nem változik:

$$C_{min} = \frac{\epsilon_{ox}}{d + (\epsilon_{ox}/\epsilon_s) \cdot W_m}$$

Nagyfrekvenciás viselkedés:

A mérőjel gyorsasága miatt nincs töltéscsere a felületi inverziós réteg és az alatta lévő kiürített réteg közt! $f \geq 1$ MHz. Csökkentve a mérőjel frekvenciáját a generáció-rekombináció a tértöltési tartományban csökkenti az inverziós töltést \Rightarrow árnyékoló hatás korlátozott, C_{min} nem konstans! Végül az erős inverziós kapacitás alacsony frekvencián az oxidkapacitással lesz egyenlő.

Alacsonyfrekvenciás C-V görbe $f < 100$ Hz \Rightarrow kvázisztatikus

A SiO₂ – Si MOS dióda

A kilépési munka különbség:

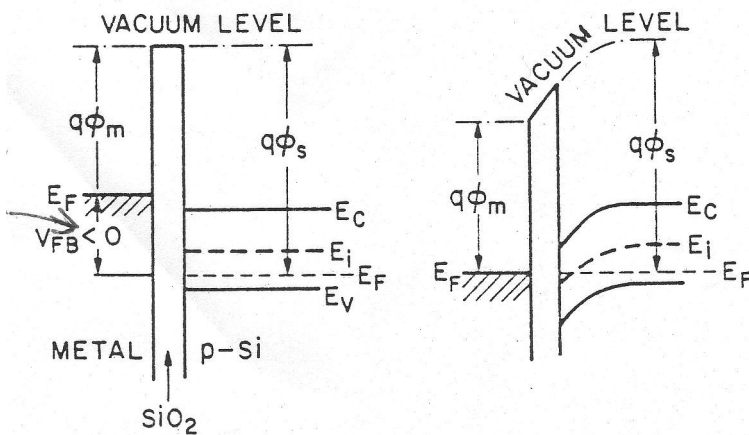
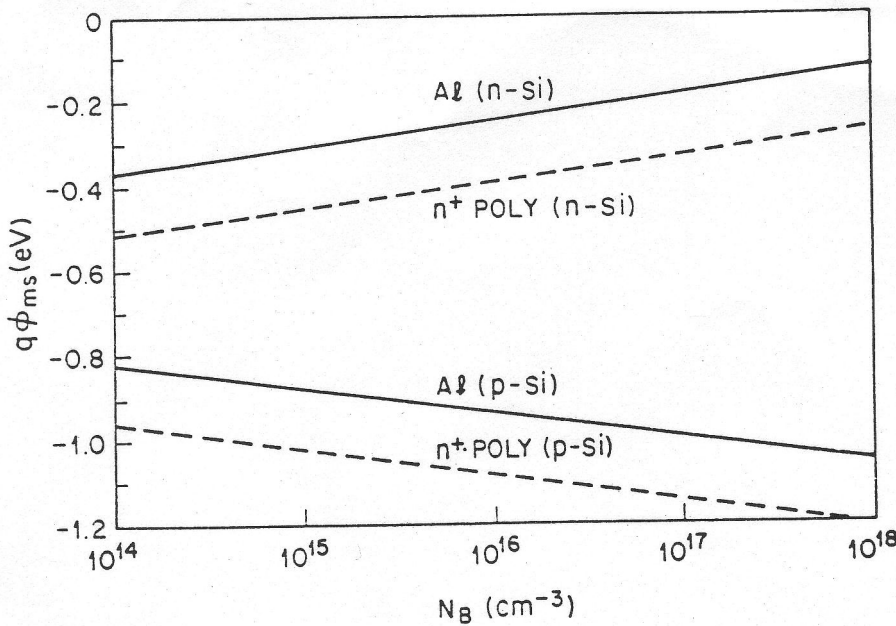
$$q\phi_{ms} = q\phi_m - q\phi_s$$

$$q\phi_{Al} = 4,1 \text{ eV}$$

$$q\phi_{n^+Si} = 3,95 \text{ eV}$$

Általában

$$q\phi_{ms} < 0 !$$



A MOS dióda sávdigramja

A fém elektrodán pozitív töltés alakul ki



$$q\phi_{ms} < 0$$

kompenzálás

Síksáv állapot
Flat-band állapot

MOS dioda termikus
egyensúlyban

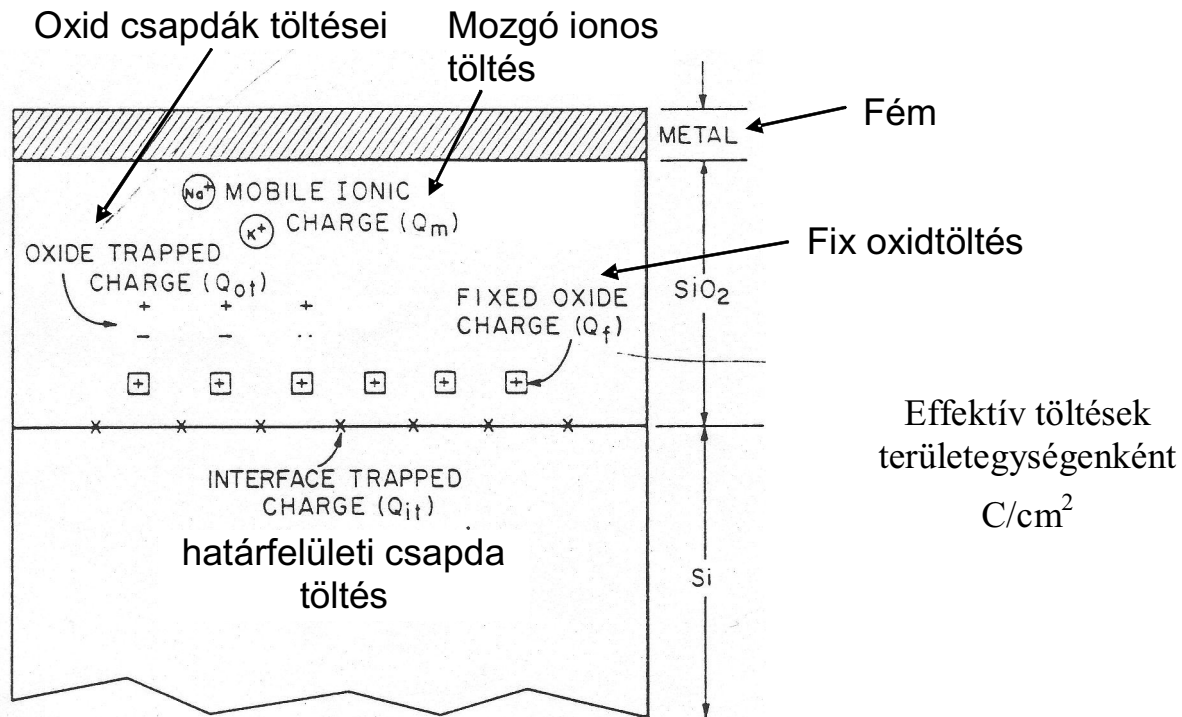
$$V_{FB} = \frac{q\phi_{ms}}{q} = \phi_m - \phi_s$$

sávelhajlás ⇒ lehajlás

flat-band voltage
síksáv feszültség



Határfelületi csapdák, töltések



Határfelületi állapotok (csapdák) töltése: Q_{it} – anizotrop

Si orientációfüggő: $\langle 100 \rangle < \langle 111 \rangle$

Csökkenthető: technológiailag \Rightarrow H_2 hőkezelés (450 °C)

$Q_{it} \langle 100 \rangle : < 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ (minden 100000-ik felületi atomon egy töltés)

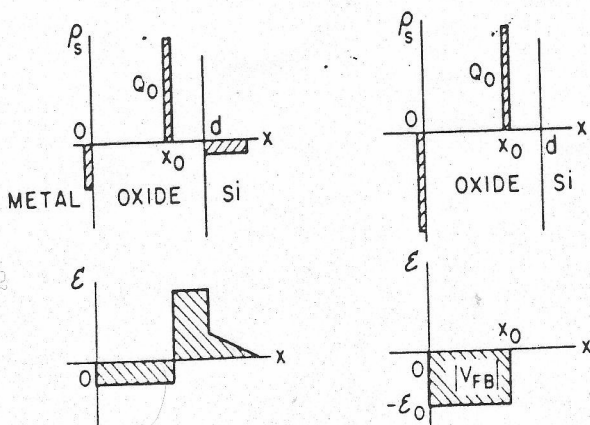
Fixtöltés (Q_f): 30 Angström-ön belül a határfelületen

$Q_f \Rightarrow$ pozitív töltés – anizotrop, oxidálás és hőkezelés függő

Mozgó ionos töltés (Q_m): alkáli ionok (Na^+ , Li^+) \Rightarrow $C-V$ görbék eltolása a feszültség tengely mentén

$V_G \approx 0$ síksáv

„Réteg töltés” hatása az oxidban:



Töltés sűrűség

Elektromos tér

Határfelületi csapdák, töltések

Síksáv állapothoz: (negatív potenciál a fémen)

$$V_{FB} = -\mathcal{E}_o x_o = -\frac{Q_o}{\epsilon_{ox}} x_o = -\frac{Q_o}{C_o} \cdot \frac{x_o}{d}, \text{ ha } x_o = d$$

$$V_{FB} = -\frac{Q_o}{C_o} \cdot \left(\frac{d}{d}\right) = -\frac{Q_o}{C_o}$$

$$V_{FB} = -\frac{1}{C_o} \left(\frac{1}{d} \int_0^d x \rho(x) dx \right)$$

$$V_{FB} = \phi_{ms} - \frac{Q_f + Q_m + Q_{ot}}{C_o}$$

Q_o - oxidréteg töltése

x_o - a fém-oxid határfelülettől mért távolság

$x_o = 0$ -nél minimális;

$x_o = d$ -nél maximális

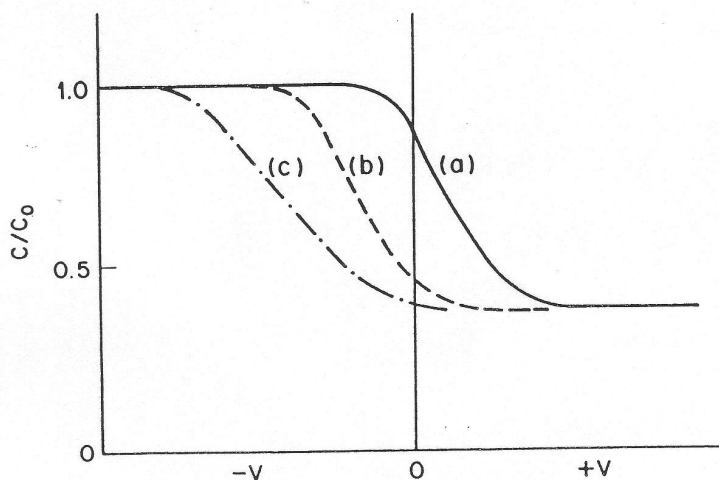
hatás a V_{FB} -re

$x_o = d$ -nél a Q_o töltés

helyzete a Q_f töltésekhez és a félvezetőhöz közeli

$\rho(x)$ - oxidtöltés sűrűség

Q_{ot} - oxidcsapdák által befogott töltés



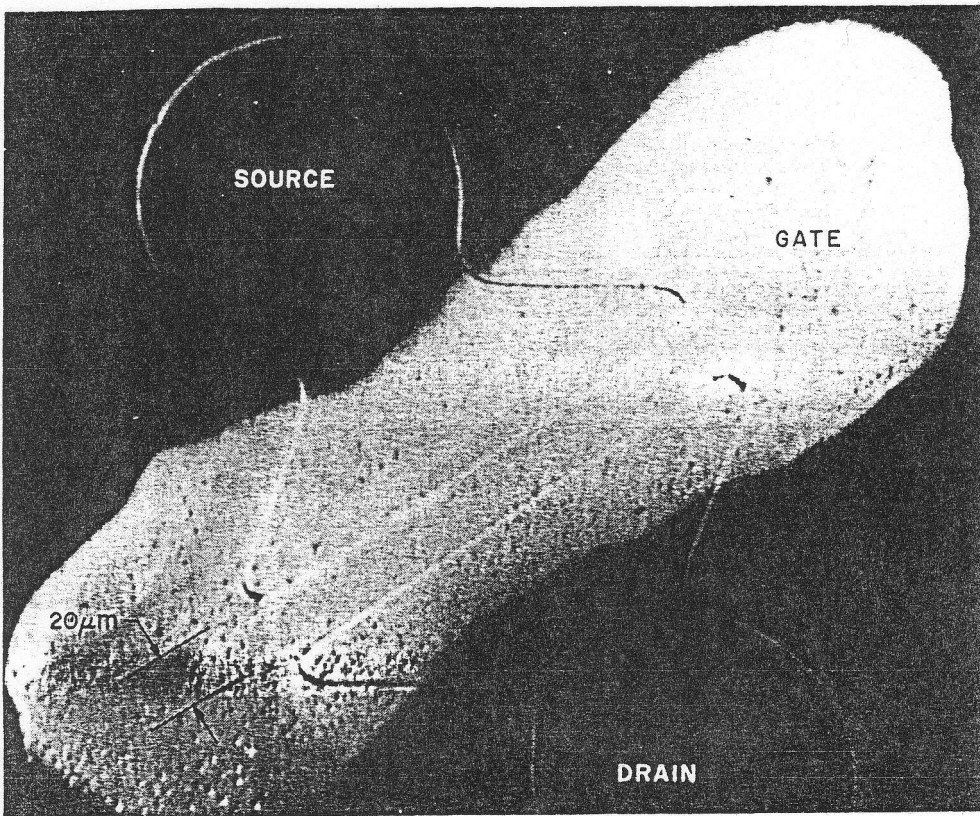
A fix oxidtöltés és a határfelületi csapdákban tárolt töltések hatása a $C - V$ karakterisztikára

(a) töltés mentes ideális görbe

(b) mivel ϕ_{ms} , Q_f , Q_m , Q_{ot} nem egyenlő nullával \Rightarrow párhuzamos eltolódás negatív irányban

(c) az interface, azaz határfelületi töltések a tiltott sávban inhomogén eloszlásúak \Rightarrow párhuzamos eltolódás helyett $C - V$ görbe torzulás

TECHNOLÓGIÁVAL befolyásolhatjuk a csapda koncentrációt!



Az első MOSFET:

>20 mm
csatornahossz

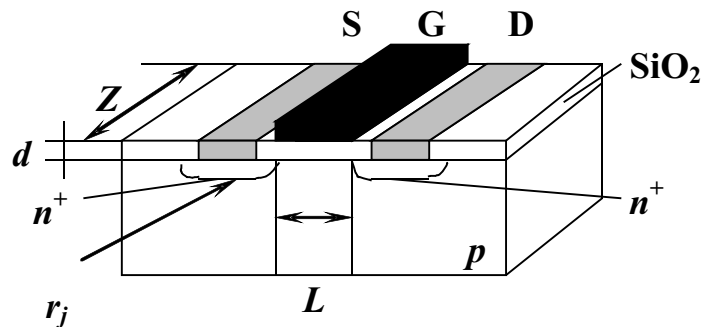
>100 nm a gate
oxidrétegnek
vastagsága

**Fém-oxid-félvezető
térvezérlésű
tranzisztor**

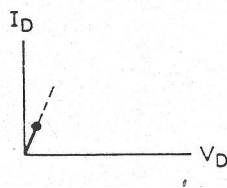
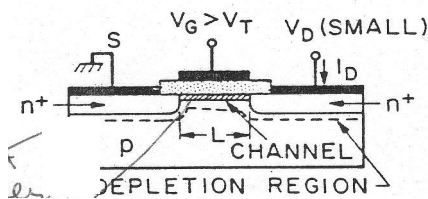
- L - csatornahossz
- Z - csatornaszélesség
- r_j - S, D átmenet
mélység
- d - oxid vastagság

Elektródák:

- S** – forrás (Source);
- G** – kapu (Gate);
- D** – nyelő (Drain)

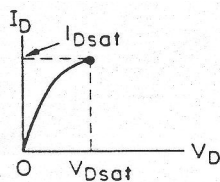
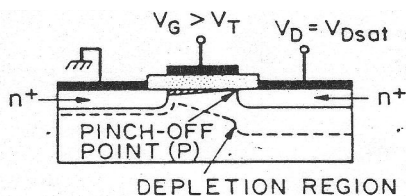


MOSFET



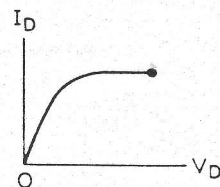
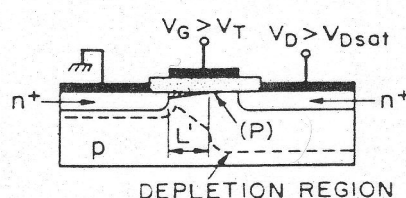
Lineáris tartomány:

(a) (kis drain feszültség V_D)



A telítés kezdete ($V_D = V_{Dsat}$):

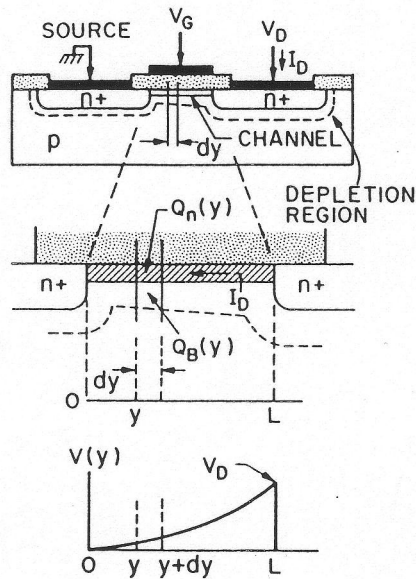
(b) (P pont, a csatornaelzáródás helye a drain oldalon)



A telítési tartomány ($V_D > V_{Dsat}$):

A P pont a source felé tolódik el.

MOSFET



MOSFET a lineáris tartományban

A csatornatartomány metszete

(Drain) – Feszültségeloszlás a csatorna mentén (hosszában vett metszeten)

A félvezetőben **indukált teljes töltés** (egységnyi területen)

$$Q_s(y) = -[V_G - \psi_s(y)]C_o,$$

ahol $\psi_s(y)$ - **felületpotenciál**, $C_o = \frac{\epsilon_{ox}}{d}$ **gate kapacitás** (egységnyi területen), y a **csatorna pont** (a sourcehoz való távolság)

$$Q_s(y) = Q_s(y) - Q_{sc}(y) = -[V_G - \psi_s(y)]C_o - Q_{sc}(y)$$

Inverziós esetben: $\psi_s(y) = 2\psi_B + V(y)$

Kiürített réteg töltése:

$$Q_{sc}(y) = -qN_A W_m \cong -\sqrt{2\epsilon_s qN_A (V(y) + 2\psi_B)}$$

$$Q_{sc}(y) \cong -(V_G - V(y) - 2\psi_B)C_o + \sqrt{2\epsilon_s qN_A (V(y) + 2\psi_B)}$$

Csatorna vezetőképesség:

$$\sigma(x) = qn(x)\mu_n(x)$$

$\mu_n = \text{const}$ esetén a **csatorna konduktancia:**

$$g = \frac{Z}{L} \int_0^{x_i} \sigma(x) dx = \frac{Z\mu_n}{L} \int_0^{x_i} qn(x) dx,$$

ahol x_i – inverziós csatorna vastagság.

MOSFET

Teljes töltés az inverziós csatornában: $|Q_n| = \int_0^{x_j} qn(x)dx$

A csatorna konduktancia:

$$g = \frac{Z\mu_n}{L}|Q_n|$$

A dy csatornaszegmens elemi ellenállása:

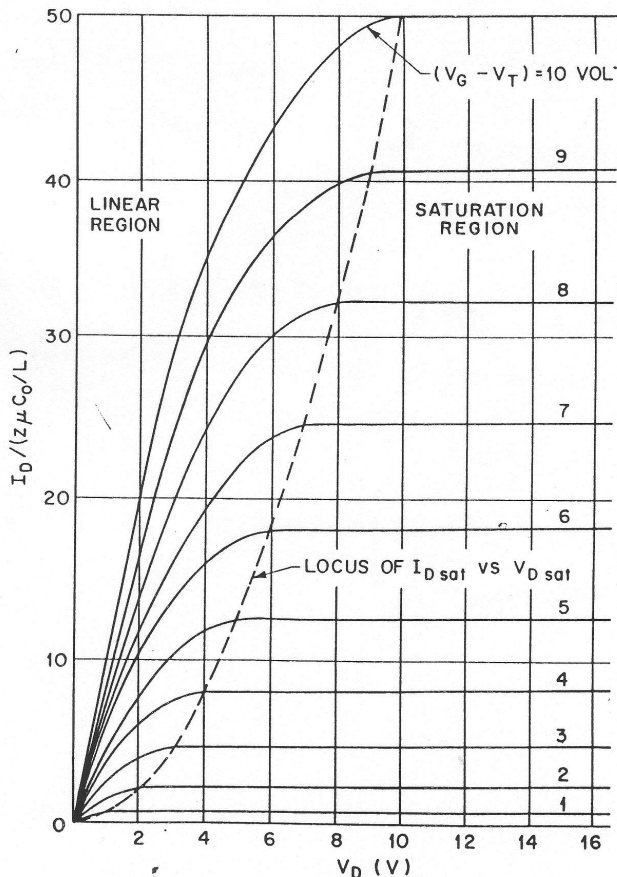
$$dR = \frac{dy}{gL} = \frac{dy}{Z\mu_n|Q_n(y)|}$$

Feszültségesés a dy elemi csatornaszegmens mentén:

$$dV = I_D dR = \frac{I_D dy}{Z\mu_n|Q_n(y)|},$$

ahol I_D - draináram. Integráljuk a felső egyenletet source-tól ($y = L, V = 0$) drain-ig ($y = L, V = V_D$):

$$I_D \approx \frac{Z}{L} \mu_n C_o \left\{ \left[V_G - 2\psi_B - \frac{V_D}{2} \right] V_D - \frac{2}{3} \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A}}{C_o} \left[(V_D + 2\psi_B)^{3/2} - (2\psi_B)^{3/2} \right] \right\}$$



Idealizált MOSFET kimeneti karakterisztika serege.

Lineáris tartomány:

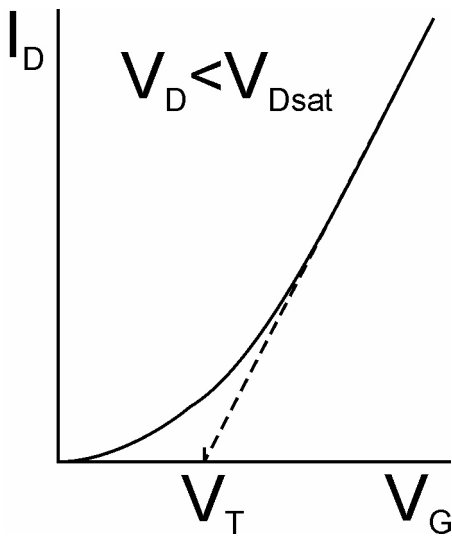
$$V_D \ll (V_G - V_T)$$

$$I_D \cong \frac{Z}{L} \mu_n C_o (V_G - V_T) V_D$$

Küszöbfeszültség:

$$V_T \cong \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A (2\psi_B)}}{C_o} + 2\psi_B$$

Küszöb feszültség meghatározása (MOSFET)



Lineáris bemeneti karakterisztika

Csatornakonduktancia:

$$g_D \equiv \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_D} \right|_{V_G = \text{const}} \cong \frac{Z}{L} \mu_n C_o (V_G - V_T)$$

Transzkonduktancia:

$$g_m \equiv \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_G} \right|_{V_D = \text{const}} \cong \frac{Z}{L} \mu_n C_o V_D$$

$y = L$ -nél $Q_n(y) = 0$. A drain-nél

bekövetkezik a csatorna elzáródás. Ebben a pontban elkezdődik a telítés: a telítési

feszültség és áram értéke V_{Dsat} , illetve I_{Dsat} .

$$V_{Dsat} \cong V_G - 2\psi_B + K^2 \left(-\sqrt{1 + 2V_G/K^2} \right)$$

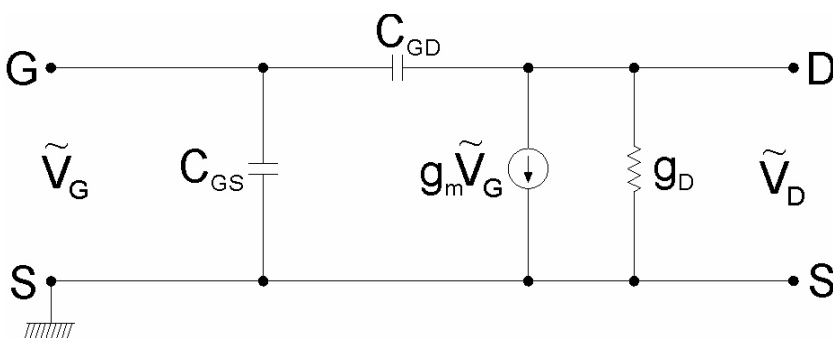
ahol $K \equiv \sqrt{\epsilon_s q N_A / C_o}$.

$$I_{Dsat} \cong \frac{Z \mu_n \epsilon_{ox}}{2dL} (V_G - V_T)^2$$

A telítési tartományban a csatornakonduktancia $g_D = 0$, a

transzkonduktancia pedig: $g_m \equiv \left. \frac{\partial I_D}{\partial V_G} \right|_{V_D = \text{const}} = \frac{Z \mu_n \epsilon_{ox}}{dL} (V_G - V_T)$.

A MOSFET ekvivalens áramköre:



kisjelű helyettesítő kép

MOSFET váltakozóáramú viselkedése

Bemeneti áram:

$$\tilde{i}_{in} = j\omega (C_{GS} + C_{GD}) \tilde{v}_G \cong j\omega (C_0 ZL) \tilde{v}_G$$

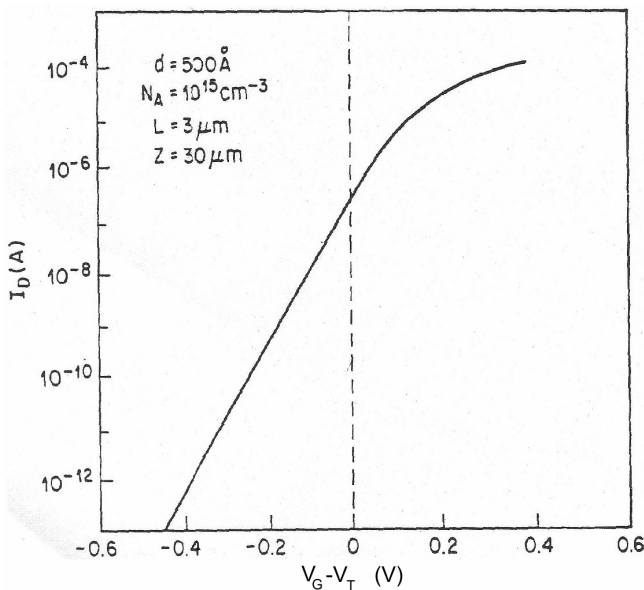
Kimeneti áram:

$$\tilde{i}_{out} = g_m \cdot \tilde{v}_G$$

Levágási frekvencia $A_{(i)} = \tilde{i}_{out} / \tilde{i}_{in} = 1$ áramerősítésnél, illetve $V_D \leq V_{Dsat}$ -nél

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi \cdot C_{in}} = \frac{\mu_n V_D}{2\pi \cdot L^2}$$

Küszöb(feszültség) alatti áram: $I_D \sim \exp\left(\frac{q(V_G - V_T)}{kT}\right)$



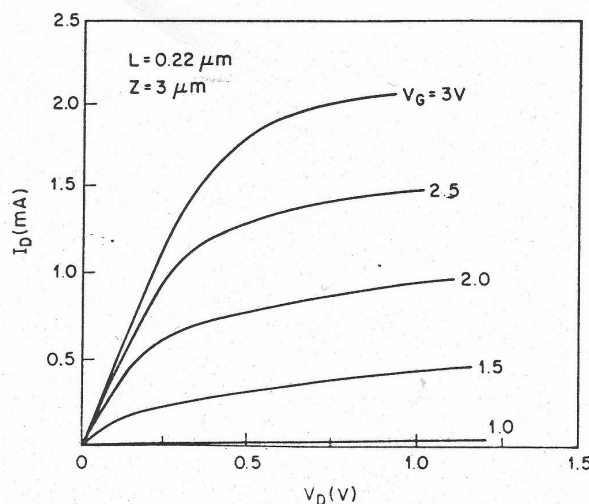
$V_G < V_T$ esetén

I_D exponenciális függése

$V_G - V_T$ -től

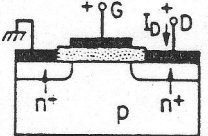
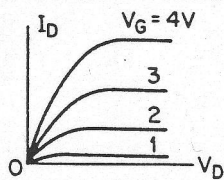
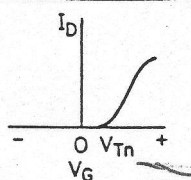
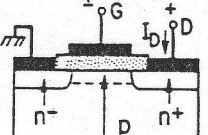
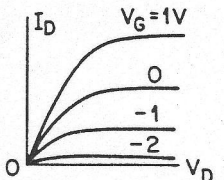
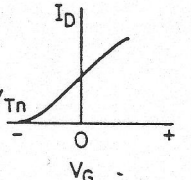
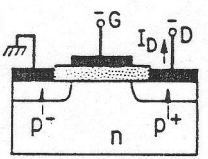
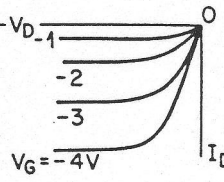
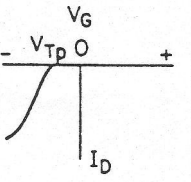
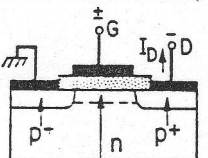
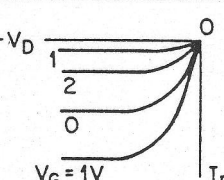
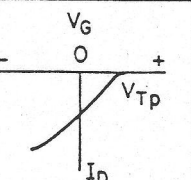
Mértékcsökkenés

(méretcsökkenés) hatása MOS tranzisztor viselkedésére:



- átszűrőhatás ($W_S + W_D = L$)
- töltéshordozó mozgékony-ság csökkenés
- küszöb alatti vezeték
- telítés nem ideális
- letörések csökkennek
- szivargások (Gate is!!) nőnek
- elektromos terek nőnek

MOSFET típusok

TYPE	CROSS SECTION	OUTPUT CHARACTERISTICS	TRANSFER CHARACTERISTICS
n-CHANNEL ENHANCEMENT (NORMALLY OFF)			
n-CHANNEL DEPLETION (NORMALLY ON)	 n-CHANNEL		
p-CHANNEL ENHANCEMENT (NORMALLY OFF)			
p-CHANNEL DEPLETION (NORMALLY ON)	 p-CHANNEL		

Jellemző tranzisztor paraméterek az arányos mérték (méret) csökkenés során

Table 1 MOSFET Miniaturization

Channel Length (μm)	Junction Depth (μm)	V_D (V)	V_T (V)	Gate Oxide (\AA)
0.75	0.30	5.0	1.0	400
0.5	0.20	4.0	0.7	250
0.25	0.10	2.5	0.5	160
0.1	0.05	1.0	0.2	100