A FÉLVEZETŐ DIÓDA

A diffúziós potenciál számítása

$$U_D = U_T \ln\frac{N_d N_a}{n_i^2}$$

PÉLDA **Egy abrupt Si dióda adalék adatai: $N_d=10^{18}/cm^3$, $N_a=10^{16}/cm^3$.**

Határozzuk meg a diffúziós potenciál értékét szobahőmérsékleten.

$$U_D = 0.026\cdot\ln\frac{10^{18}\cdot 10^{16}}{10^{20}}0.026\cdot\ln 10^{14} = 0.838\ V$$

Nyilván $U_D < U_g$, általában 70-80 %-a.

A dióda kapacitásai

PÉLDA **Számítsuk ki a Si dióda tértöltési kapacitását, ha a kiürített réteg szélessége 0,33 μm és a dióda felülete 0,02 mm².**

$$C_T = \varepsilon\frac{A}{S} = 11.8\cdot 8.86\cdot 10^{-12}\,\frac{2\cdot 10^{-8}}{0.33\cdot 10^{-6}} = 6.34\cdot 10^{-12}\,F = 6.34\ pF$$

Számítsuk ki a diffúziós kapacitást az I=1 mA munkapontban, ha τ=100 ns.

$$C_D = \tau\frac{I}{U_T} = 10^{-7}\,\frac{10^{-3}}{0{,}026} = 3{,}85\cdot 10^{-9}\,F = 3{,}85\,nF$$

Az ideális dióda karakterisztika

$$I = I_0\left(\exp(U/U_T)-1\right) \qquad U = U_T\ln(I/I_0+1)$$

PÉLDA **Egy Si dióda telítési árama $I_0=10^{-13}$ A.**
Mekkora a nyitófeszültség, ha az áram 10 mA?

$$U \cong 0{,}026\cdot\ln(10^{-2}/10^{-13}) = 0{,}658\ V$$

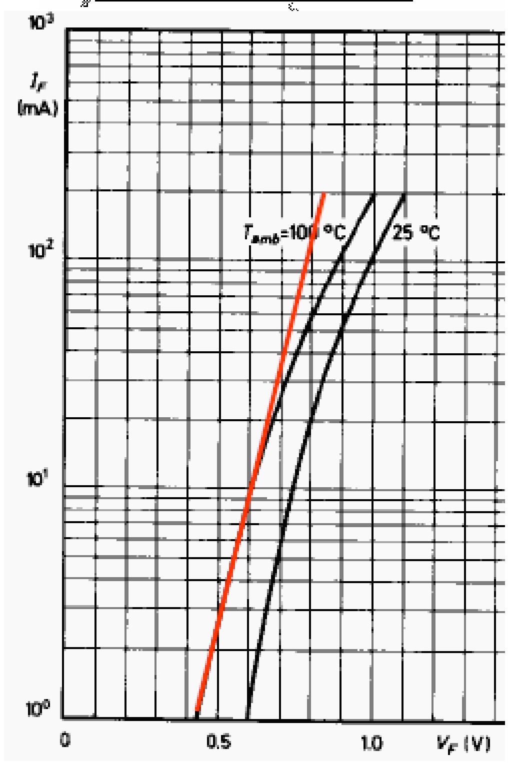
PÉLDA **Mennyivel kell a nyitó feszültséget növelnünk ahhoz, hogy a nyitó áram tízszeres legyen?**

$$\Delta U = U_2 - U_1 \cong U_T\left(\ln(I_2/I_0) - \ln(I_1/I_0)\right) = U_T\ln(I_2/I_1)$$

$$\Delta U = 0{,}026\cdot\ln 10 \cong 0{,}06\ V = 60\ mV$$

Számítsuk ki a dióda soros ellenállását a 100°C karakterisztika alapján!

$$\Delta U = 160\ mV$$
$$I = 200\ mA$$
$$r_s = 160/200 = 0{,}8\,\Omega$$



Számítások a kiürített rétegre vonatkozóan

$$S_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{qN_a}}\sqrt{U_{np}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{qN_a}}\sqrt{U_D - U} \qquad S_n = \frac{N_a}{N_d} S_p$$

PÉLDA **Egy abrupt Si dióda adalék adatai: $N_d=10^{18}/cm^3$, $N_a=10^{16}/cm^3$.**

Határozzuk meg a kiürített rétegek szélességét!

(ε_r=11,8, U=0V)

$$S_p = \sqrt{\frac{2\cdot 11{,}8\cdot 8{,}86\cdot 10^{-12}}{1{,}6\cdot 10^{-19}\cdot 10^{22}}}\sqrt{0{,}838} = 0{,}331\mu m \qquad S_n = 0{,}003\mu m$$

És ha U= -100V ?

$$S_p = 0{,}331\cdot\sqrt{\frac{0{,}838+100}{0{,}838}} = 3{,}63\mu m$$

A dióda differenciális ellenállása

PÉLDA **Egy dióda soros ellenállása 2 ohm. Számítsuk ki a differenciális ellenállását az I=1 mA, 10 mA, 100 mA munkapontokban!**

$$r_d\big|_{1mA} = \frac{26}{1} + 2 = 28\,\Omega$$

$$r_d\big|_{10mA} = \frac{26}{10} + 2 = 4{,}6\,\Omega$$

$$r_d\big|_{100mA} = \frac{26}{100} + 2 = 2{,}26\,\Omega$$

FÉLVEZETŐFIZIKAI ÖSSZEFOGLALÓ

A töltéshordozó sűrűségek számítása

PÉLDA **Si, T = 300 K, a donor adalék sűrűsége N_d = 10^{17} /cm³**

1. Mennyi az elektron- és a lyuksűrűség értéke?

$n = N_d = 10^{17}$ /cm³

$p = n_i^2 / n = 10^{20}/10^{17} = 10^3$/cm³

2. Mekkora az adalék atomok relatív sűrűsége?

Egy cm³ szilíciumban $5\cdot 10^{22}$ atom van, tehát $10^{17}/ 5\cdot 10^{22} = 2\cdot 10^{-6}$, vagyis a Si tisztasága 0,999998

A töltéshordozó sűrűség függése a hőmérséklettől

PÉLDA

Si, T = 300 K, a donor adalék sűrűsége N_d = 10^{17} /cm³
$n = N_d = 10^{17}$ /cm³
$p = n_i^2 / n = 10^{20}/10^{17} = 10^3$/cm³

Hogyan változik n és p, ha T 25 fokkal nő?

$n = N_d = 10^{17}$/cm³ - változatlan!

$n_i^2 = 10^{20}\cdot 1{,}15^{25} = 33\cdot 10^{20}$

$p = n_i^2 / n = 33\cdot 10^{20}/10^{17} = 3{,}3\cdot 10^4$/cm³

Csak a kisebbségi hordozók sűrűsége nőtt!

ΔT=16,5 °C → 10×

FÉLVEZETŐ TRANZISZTOROK

Számoljuk ki egy MOS tranzisztor telítési áramát U_{GS}=5V esetében, ha

$$K = \frac{\mu_n \varepsilon_{ox}}{t_{ox}} = 110 \mu A / V^2$$

V_T =1V, és a geometriai méretek

a) W= 5µm, L=0.4µm ,
b) W= 0.8µm, L=5µm !

a) $$I_D = \frac{W}{L}\frac{K}{2}(U_{GS} - V_T)^2 = \frac{5}{0.4}\frac{110}{2}10^{-6}(5-1)^2 = 11 \cdot 10^{-3} A = \underline{11 mA}$$

b) $$I_D = \frac{W}{L}\frac{K}{2}(U_{GS} - V_T)^2 = \frac{0.8}{5}\frac{110}{2}10^{-6}(5-1)^2 = 141 \cdot 10^{-6} A = \underline{141 \mu A}$$

A W/L arány változtatásával a drain áram nagyságrendekkel változtatható

PÉLDA **Egy MOS struktúra adatai: N_a = 4·10¹⁵ /cm³, a Si relatív dielektromos állandója 11,8, az oxidé 3,9, az oxid vastagsága d_{ox} = 0,03 µm, Φ_{MS} = 0,2 V, Q_{SS}-t elhanyagoljuk.**

Számítsuk ki a Fermi potenciált, az oxid kapacitást, a bulk állandót és a küszöb-feszültséget U_{SB} = 0 V mellett!

$$\Phi_F = U_T \ln \frac{N_a}{n_i} = 0{,}026 \cdot \ln \frac{4 \cdot 10^{15}}{10^{10}} = 0{,}335\, V$$

$$C_0 = \frac{\varepsilon_{ox}}{d_{ox}} = \frac{8{,}86 \cdot 10^{-12} \cdot 3{,}9}{3 \cdot 10^{-8}} = 1{,}1 \cdot 10^{-3}\ F/m^2 = 1100\ pF/mm^2$$

$$P = \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_a}}{C_0}$$

$$P = \frac{\sqrt{2 \cdot 8{,}86 \cdot 10^{-12} \cdot 11{,}7 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 4 \cdot 10^{21}}}{1{,}1 \cdot 10^{-3}} = 0{,}331\ V^{1/2}$$

$$V_T = 2\Phi_F + \Phi_{MS} - \frac{Q_{SS}}{C_0} + \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_a}}{C_0}\sqrt{2\Phi_F + U_{SB}}$$

$$V_T = 2 \cdot 0{,}335 + 0{,}2 + 0{,}331\sqrt{2 \cdot 0{,}335} = 1{,}14\, V$$

TÉRVEZÉRELT TRANZISZTOROK

PÉLDA **Határozzuk meg egy Si JFET elzáródási feszültségét, ha a csatorna vastagsága d = 4 µm és adalékolása N_d = 10¹⁵/cm³ !**

$$\boxed{U_0 = \frac{qN_d}{8\varepsilon} d^2}$$

$$U_0 = \frac{1{,}6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{21}}{8 \cdot 11{,}8 \cdot 8{,}86 \cdot 10^{-12}}(4 \cdot 10^{-6})^2 = 3{,}06\, V$$

BIPOLÁRIS TRANZISZTOR

A beépített tér számítása

$$U_B = U_T \ln \frac{N_B(0)}{N_B(w_B)}$$

PÉLDA **Számítsuk ki a bázis beépített potenciálját az alábbi adatok ismeretében:**

$N_B(0)$ = 10^{17} /cm³, $N_B(w_B)$ = 10^{15} /cm³

$$U_B = 0{,}026 \cdot \ln \frac{10^{17}}{10^{15}} = 0{,}026 \cdot \ln 100 = 0{,}12\,V = 120\,mV$$

Az Early hatás

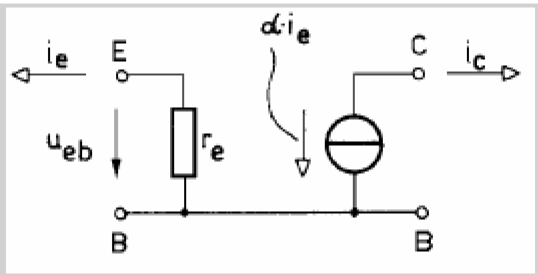
PÉLDA

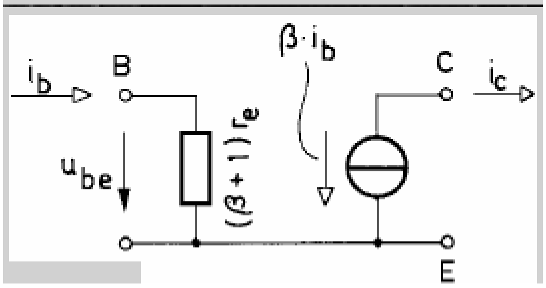
Mekkora a földelt emitteres kimeneti ellenállása a tranzisztornak, ha az Early feszültség 80 V és a munkaponti kollektoráram 5 mA?

$$r_{ki} = \frac{U_E}{|I_C|} \qquad r_{ki} = \frac{80\,V}{5\,mA} = 16\,k\Omega$$

Kisjelű fizikai helyettesítőképek

PÉLDA **Egy tranzisztor kisjelű áramerősítési tényezője az I_E = 1 mA munkapontban β = 200. Határozzuk meg a kételemes közös bázisú és közös emitteres helyettesítőkép elemértékeit!**





FB:

$$r_e = \frac{U_T}{I_E} = \frac{26\,mV}{1\,mA} = 26\,\Omega$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta+1} = \frac{200}{201} = 0{,}995$$

FE:

$$r_e(\beta+1) = 26 \cdot 201 \cong 5200\,\Omega$$

Emitter- és transzporthatásfok

PÉLDA **Számítsuk ki az alábbi adatokkal rendelkező, homogén bázisú tranzisztor emitter- és transzport hatásfokát, valamint áramerősítését!**

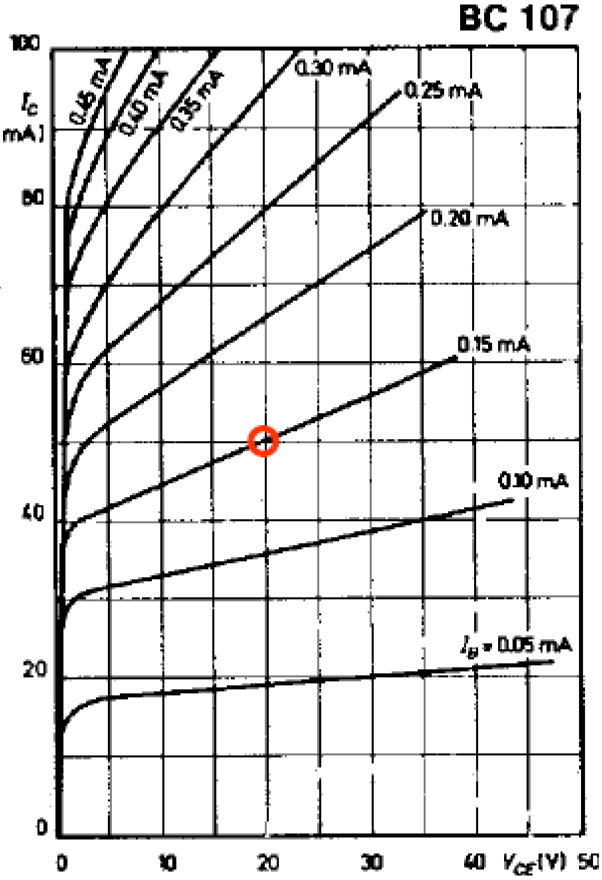
N_E = 10^{19} /cm³, w_E = 2 μm,
N_B = $4{\cdot}10^{16}$ /cm³, w_B = 1,5 μm,
D_n =0,0026 m²/s, D_p = 0,0011 m²/s, τ_n = 10^{-6} s.

$$\eta_e = 1 - \frac{D_p}{D_n}\frac{w_B N_B}{w_E N_E} = 1 - \frac{0{,}0011}{0{,}0026}\frac{1{,}5}{2}\frac{4\cdot10^{16}}{10^{19}} = 0{,}9987$$

$$\boxed{A = \eta_e\,\eta_{tr} = 0{,}9982}$$

$$\eta_{tr} = 1 - \frac{1}{2}\frac{w_B^2}{D_n\tau_n} = 1 - \frac{1}{2}\frac{(1{,}5\cdot10^{-6})^2}{0{,}0026\cdot10^{-6}} = 0{,}99957$$

Collector current versus collector-emitter voltage
$I_C = f(V_{CE})$, I_B = parameter
(common emitter configuration)



Határozzuk meg a h_{21e} és a h_{22e} paramétereket az I_C=50 mA, U_{CE}=20 V munkapontban!

$$h_{21e} = \frac{66 - 36\ mA}{0{,}2 - 0{,}1\ mA} = 300$$

$$h_{22e} = \frac{57 - 44\ mA}{30 - 10\ V} = 0{,}65\ mS$$

A BD 442 tranzisztorra P_{dmax} = 36 W, U_{CEmax} = 80 V, I_{Cmax} = 4 A. Mekkora az optimális terhelő ellenállás és mekkora a maximális kapcsolható teljesítmény? Legalább mekkora bázisáram kell a bekapcsoláshoz, ha B=80?

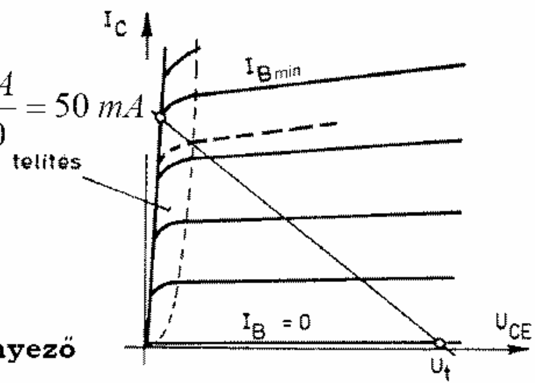
$$R_{topt} = \frac{U_{CE\max}}{I_{C\max}} = \frac{80\ V}{4\ A} = 20\ \Omega$$

$$P_{\max} \cong U_{CE\max} \cdot I_{C\max} = 80\ V \cdot 4\ A = 320\ W$$

$$P_d \approx 4\ A \cdot 0{,}1 \ldots 0.3\ V = 0{,}4 \ldots 1{,}2\ W$$

$$I_{B\min} = \frac{I_{C\max}}{B} = \frac{4\ A}{80} = 50\ mA$$

$$n = \frac{I_B}{I_{B\min}} = 2 \ldots 5$$

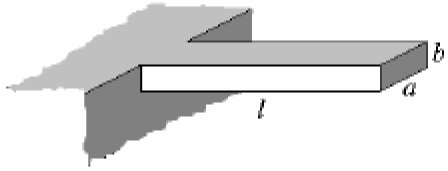


n: túlvezérlési tényező

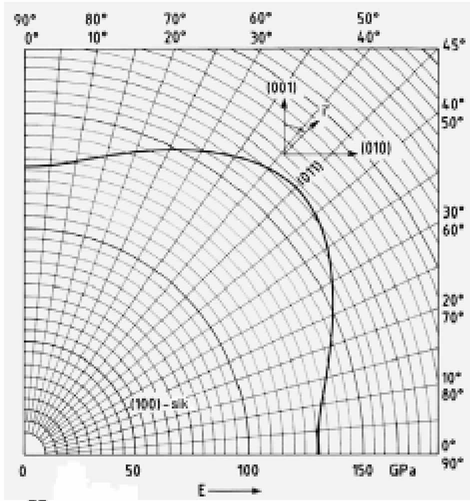
Hajlításra terhelt konzol (cantilever)

Példa. Számoljuk ki a vázolt, Si egykristályból készült konzol rugó-engedékenységét! A kristály felülete az (100) síkba esik, a konzol tengelye (010) irányú. A méretek:

a = 50 µm
b = 6 µm
l = 400 µm.



$$I = \frac{ab^3}{12} = \frac{50\cdot 10^{-6}\cdot 6^3\cdot 10^{-18}}{12} = 9\cdot 10^{-22} m^4$$



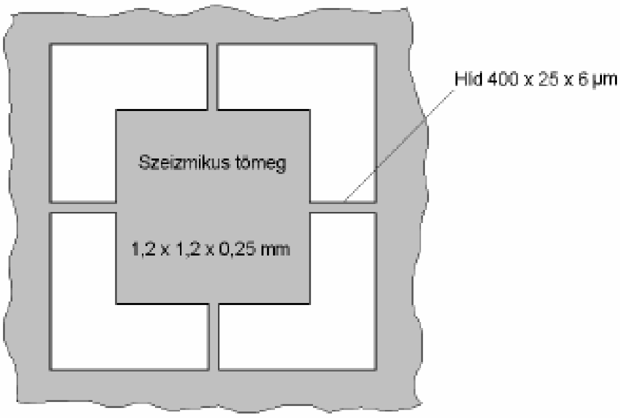
A diagramból $E = 1{,}3\cdot 10^{11}$ N/m²

$$S = \frac{l^3}{3EI} = \frac{4^3\cdot 10^{-12}}{3\cdot 9\cdot 10^{-22}\cdot 1{,}3\cdot 10^{11}} = 0{,}182\, m/N$$

Gyorsulás érzékelő

Példa

Számoljuk ki az érzékenységet és a rezonancia frekvenciát!



Egy hídra S = 0,091 m/N

Négy hídra S = 0,0227 m/N

A tömeg $m = \rho V = 2330\ \mathrm{kg/m^3}\cdot 1{,}2\cdot 1{,}2\cdot 0{,}25\cdot 10^{-9}\ \mathrm{m^3} = 8{,}4\cdot 10^{-7}\ \mathrm{kg}$

Az érzékenység $K = 0{,}0227\ \mathrm{m/N}\cdot 8{,}4\cdot 10^{-7}\ \mathrm{kg} = 1{,}9\cdot 10^{-8}\ \mathrm{s^2}$

10 g gyorsulás ⟶ ≈ 1,9 µm elmozdulás

A sajátfrekvencia $$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{mS}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{K}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{1{,}9\cdot 10^{-8}}} = 1158\ Hz$$

Az elektrosztatikus erőhatás

Példa

Számítsuk ki egy síkkondenzátornak tekinthető mikroszerkezet két elektródája közötti erőhatást! Az elektródák felülete A=0,01 mm^2, távolságuk s=2 μm, a feszültség 100V.

$$\boxed{F = \frac{1}{2}U^2\frac{dC}{dx}} \qquad C = \varepsilon_0\frac{A}{s} \qquad \frac{dC}{ds} = -\varepsilon_0\frac{A}{s^2}$$

$$|F| = \frac{1}{2}U^2\varepsilon_0\frac{A}{s^2}$$

$$F = \frac{1}{2}10^4 \cdot 8{,}86 \cdot 10^{-12}\frac{10^{-8}}{4 \cdot 10^{-12}} = 1{,}11 \cdot 10^{-4}\ N$$

A méretcsökkentéssel az elektrosztatikus erőhatás egyre hatékonyabbá válik!

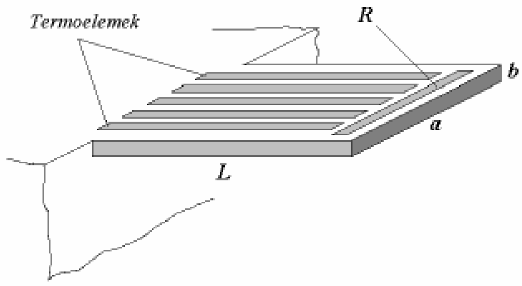
A termikus elvű effektív érték mérő

Példa. **Számítsuk ki az effektív érték mérő érzékenységét az alábbi adatokkal:**

a **= 100 μm,** ***b*** **= 5 μm,** ***L*** **= 120 μm,**

λ = 150 W/mK, S = 10^{-3} V/W,

R = 2 kΩ, N = 12



$$R_{th} = \frac{1}{\lambda}\frac{L}{a \cdot b} = \frac{1}{150}\frac{120 \cdot 10^{-6}}{100 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = 1600\ \ K/W$$

$$U_{ki} = N \cdot S \cdot R_{th}\frac{1}{R}U_{be}^2 = 12 \cdot 10^{-3} \cdot 1600\frac{1}{2000}U_{be}^2$$

$$\boxed{U_{ki} = 9{,}6 \cdot 10^{-3}U_{be}^2}$$

Például U_{be} = 10 V → U_{ki} = 0,96 V

Példa. **Számítsuk ki az imént tárgyalt effektív érték mérő határfrekvenciáját!**

Adatok: *a* = 100 μm, *b* = 5 μm, *L* = 120 μm, c_v = 1,6·10^6 Ws/m^3

$$R_{th} = 1600 K/W \qquad C_{th} = 5 \cdot 100 \cdot 120 \cdot 10^{-18} \cdot 1{,}6 \cdot 10^6 = 9{,}6 \cdot 10^{-8} \quad Ws/K$$

Az első töréspont $\omega = \dfrac{2{,}5}{1600 \cdot 9{,}6 \cdot 10^{-8}} = 1{,}63 \cdot 10^4 \quad 1/s$ $\qquad f = 2600\ Hz$