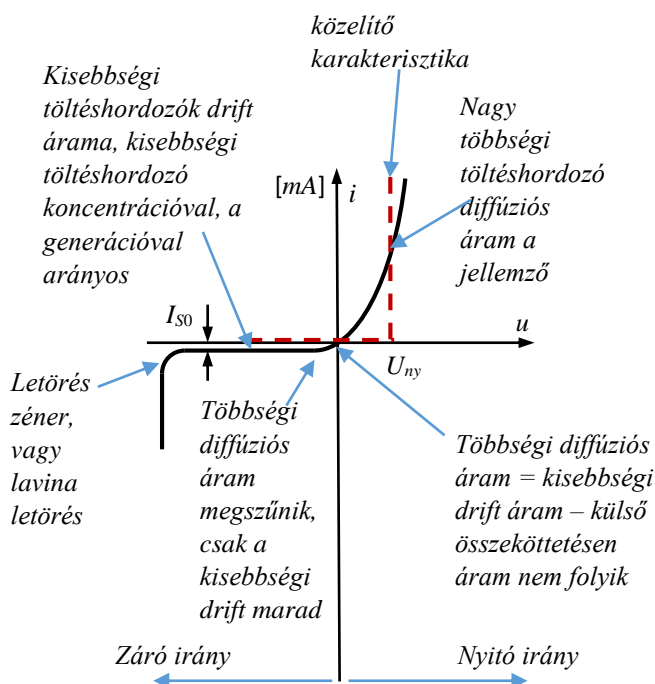
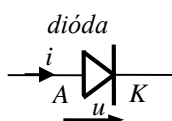


pn dióda karakterisztika:

$$i = I_{S0} \left(e^{\frac{u_{BE}}{U_T}} - 1 \right) \quad I_{S0} \approx 10^{-13} \text{ A}$$

$$U_T = \frac{kT}{q} \Big|_{T=300K^0} = 26 \text{ mV}$$

$$\text{Pld.: } e^{\frac{600\text{mV}}{26\text{mV}}} \cong 10^{10}, i = 1\text{mA}$$



Nyitó irányra jellemző:

- Exponenciális áram karakterisztika, amit gyakran közelítünk egy egyszerű nyitó feszültség (U_{ny}) paraméteres modellel. (pl. szilícium dióda nyitófeszültsége kb. 0.6 V)
- Diffúziós kapacitás, arányos a nyitó irányú árammal: $C_D = konst * I_{ny}$

Záró irányra jellemző:

- Kicsi, záró irányú feszültségtől független záró irányú áram, amit a hő hatásra, fény besugárzásra létrejövő generációval keletkező kisebbségi töltéshordozók tartanak fenn.
- A dióda kiürített rétegének vastagsága a zárófeszültség gyökével arányos. Így változtatva a zárófeszültséget a p illetve n rétegben elmozdulni képes töltéshordozók távolságát szabályozni tudjuk. Ez ahhoz hasonló, mintha egy síkkondenzátor lemezeit mozgatnánk, tehát annak kapacitását változtatnánk. Az így létrejövő kapacitás annál kisebb, minél nagyobb a záró irányú u feszültség. (U_D a diffúziós potenciál):

$$C_T = \frac{konst}{\sqrt{U_D - u}} \quad (u \leq 0)$$

- A záró irányú feszültséget növelve egy bizonyos – típusfüggő feszültségnél bekövetkezik a hirtelen áram növekedés, a letörés. Ez lehet zener letörés, amit a kiürített rétegben előálló nagy térerősség okoz. Ennek a nagy térnek a hatására kiszakadnak elektronok a kötésekben, elektron – lyuk párokat létrehozva. Lehet lavina letörés, amikor a kiürített rétegben nagy sebességre gyorsuló elektronok további elektronokat bombáznak ki a rácsból. Ez a két jelenség egyidejűleg is fennállhat egy félvezetőben.

Diódák a gyakorlatban

1.) Szilícium dióda

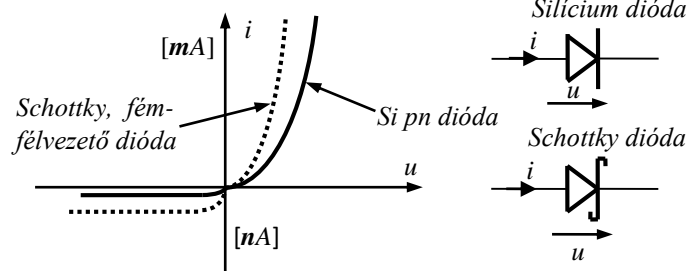
Tipikus nyitó feszültség a

kis áramú (mondjuk max. 100mA – es)

diódák esetén $\sim 0.6V$.

Kicsi záró irányú áram jellemzi.

A leggyakoribb dióda típus.



2.) Schottky dióda

Nem PN dióda, hanem *fém-félvezető* dióda, pl. arany és n típusú félvezető dióda. Ebben a diódában nincs diffúzióval létrejövő kisebbségi töltéshordozó injekció, tehát *nincs diffúziós kapacitása*. Ez a tény nyitó irányból záró irányba történő üzemmód váltás esetén *gyorsabb* működést eredményez, nem kell eltávolítani a diffúziós töltéseket, csak a tértöltés kapacitás feltöltése követel időt. Lásd LTspice

Nyitó feszültsége tipikusan $0.2.. 0.3 V$, jóval kisebb a tipikus szilícium diódákénál.

Hasonló áramú szilícium diódához képest nagyobb záró irányú áram jellemzi.

3.) Zener dióda

A zener diódát meghatározott

letörési feszültségre tervezik, és

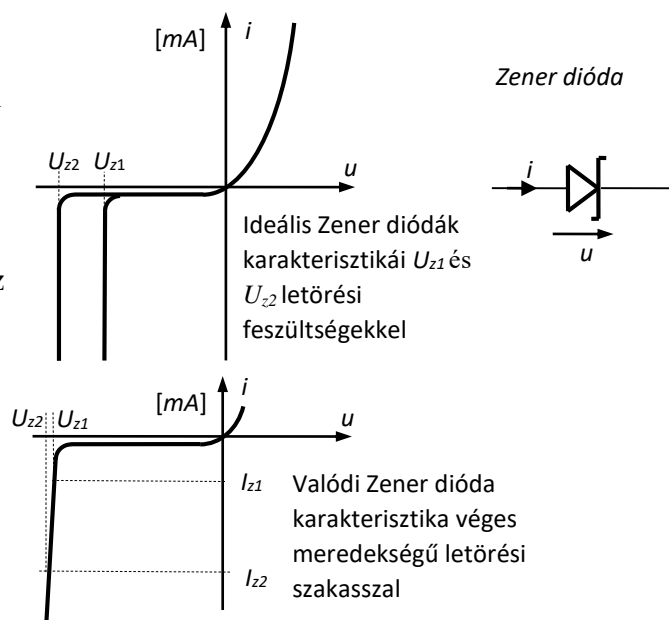
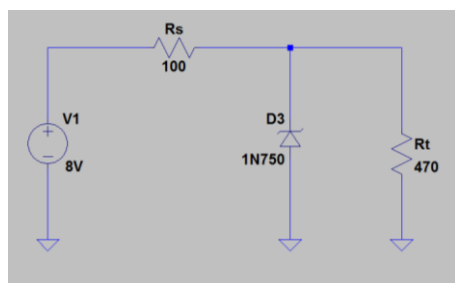
záró irányban, ebben a letörési üzemmódban

használjuk. Mivel a letörési karakterisztika

nagyon meredek, alkalmas

feszültség stabilizálásra. Ha a kapcsolási rajz

szerinti V_1 feszültség, és/vagy az R_t



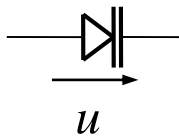
terhelő ellenállás vagyis a terhelő áram változik, a Zener diódán lévő letörési feszültség ideális esetben állandó marad, hiszen hiába változik meg a dióda árama is, az U_z zener feszültség állandó. (Nem ideális, valós zener dióda U_z feszültsége az áram függvényében kis mértékben változik, azaz a karakterisztika meredeksége, azaz a belső ellenállása véges, ez azt jelenti, hogy a kimenő feszültség kis mértékben változik.)

4.) Varicap dióda

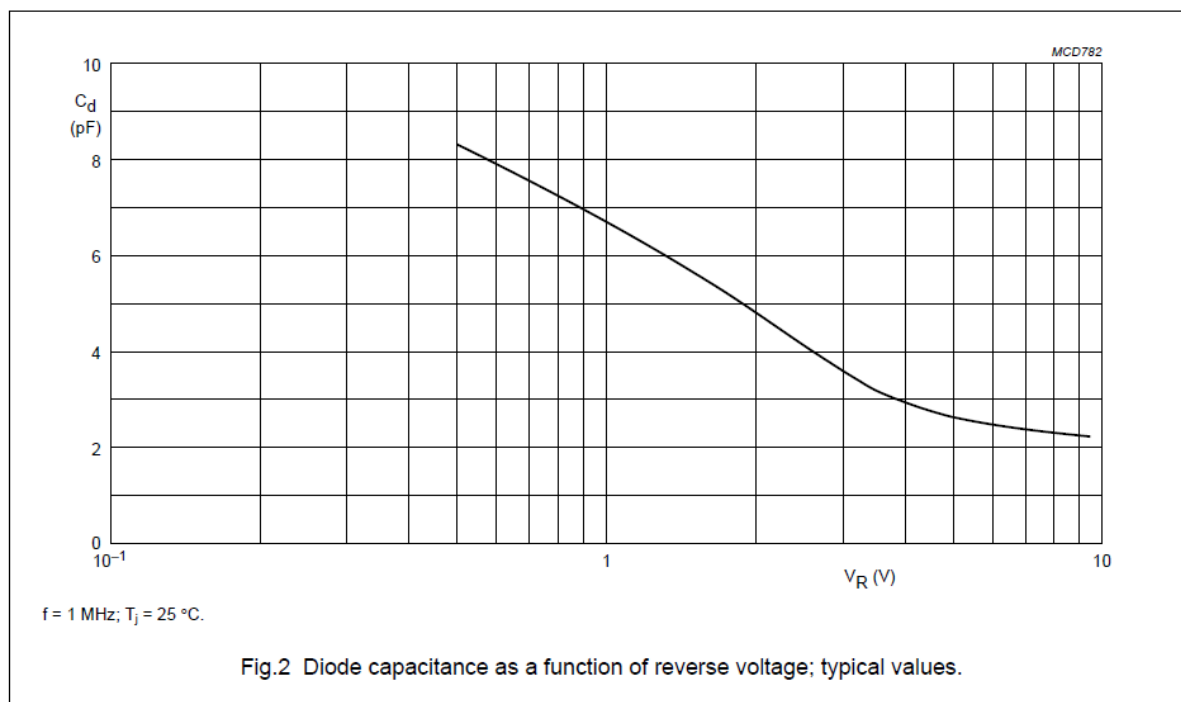
Záró irányú u egyen feszültséggel hangolható kondenzátort valósít meg.

A záró irányú tértöltés kapacitást hasznosítjuk vele. A tértöltés kapacitás közelítése:

$$C_T = \frac{\text{konst}}{\sqrt{U_D - u}} \quad (u \leq 0)$$



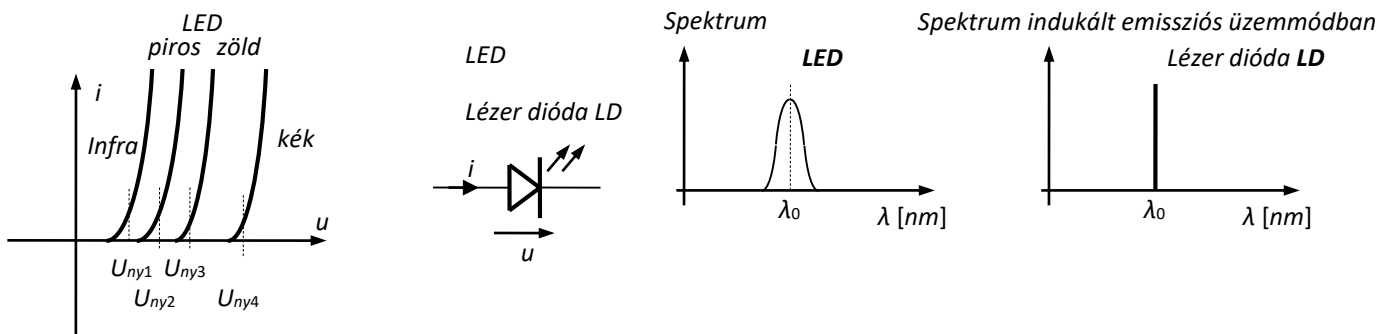
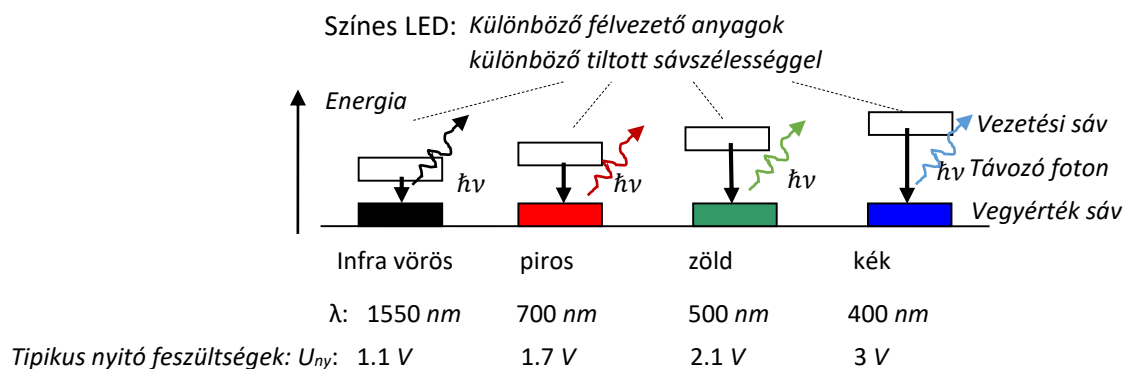
A BB145B varicap dióda kapacitásának záró irányú feszültség függvénye:



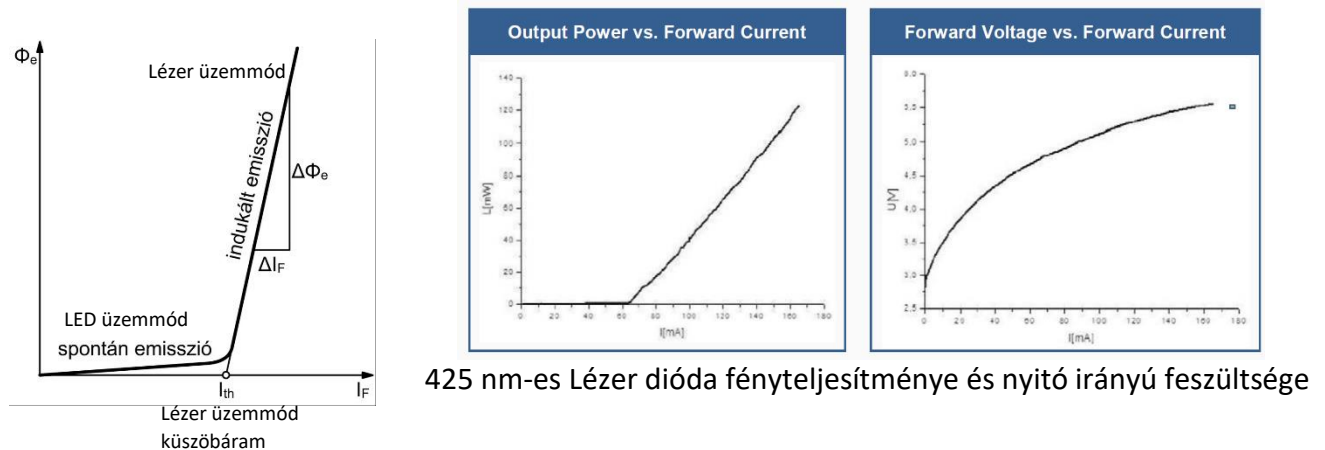
5.) LED (Light Emitting Diode), LD (Laser Diode - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

A nyitó irányban előfeszített diódában lezajló rekombinációkor a vezetési sávból, az alacsonyabb energiájú vegyértéksávba kerül az elektron, miközben leadja a tiltott sávnak megfelelő energiáját. A különböző félvezető anyagok különböző tiltott sáv szélességgel rendelkeznek, legkisebb távolságra az infra LED, legnagyobb távolságra a kék LED sávjai vannak. Ennek megfelelően adnak le kis energiát, kis frekvenciájú, (vörös), vagy nagy energiát, nagy frekvenciájú, kék szín fotonját előállítva.

A lézer dióda (LD) specialitása a keskeny spektrumú fény, az egyetlen frekvenciájú fény. Stabil, szabályozott nyitó irányú áram meghajtást, stabil, szabályozott hőmérsékletet kíván.

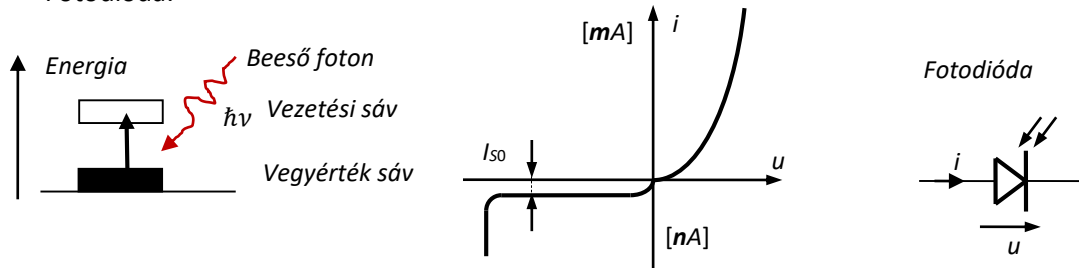


Lézer dióda üzemmódjai, fénytéljesítménye a nyitóirányú áram függvényében



6.) Fotodióda

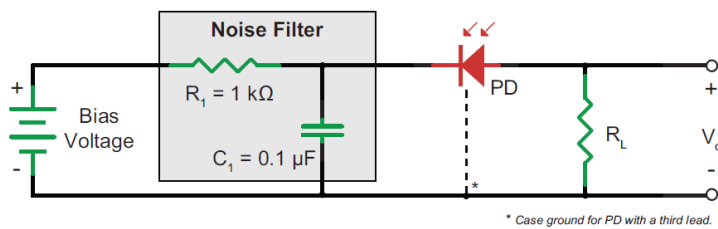
Fotodióda:



A fotodiódát záró irányban feszítjük elő, záró irányú árama (I_{S0}) a generáció által meghatározott kisebbségi töltéshordozó koncentrációtól függ, ami pedig függ a fény besugárzás intenzitásától. Ha beérkezik a $h\nu$ energiájú foton, és ez az energia nagyobb, mint a fotodióda félvezetőjének tiltott sávja, akkor elektron szakadhat ki a félvezető kristályrácsának kötéséből és létrejön egy elektron lyuk pár – ez a folyamat a *generáció*. Az így megnövekedő kisebbségi töltéshordozó koncentráció jól érzékelhető a záró irányú áram megnövekedésével.

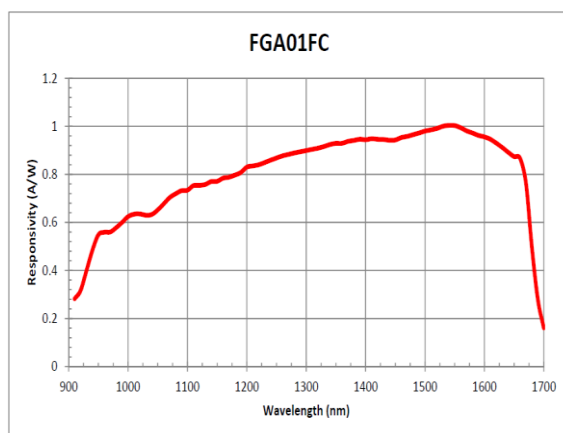
Az ábra a záró irányú árammal arányos feszültség előállítását mutatja:

Recommended Circuit



A fotodióda fő jellemző paramétere a fény hatására létrejövő záró irányú áram a beeső fényteljesítményhez képest - érzékenység, mértékegysége az A/W (záró irányú áram/beeső fényteljesítmény). Egy telekommunikációs hullámsávon (1550 nm, a fényvezető szálak ezen a hullámhosszon jól átengedik a fényt) használatos fotodióda (FGA01C) érzékenysége a hullámhossz függvényében:

Typical Spectral Intensity Distribution

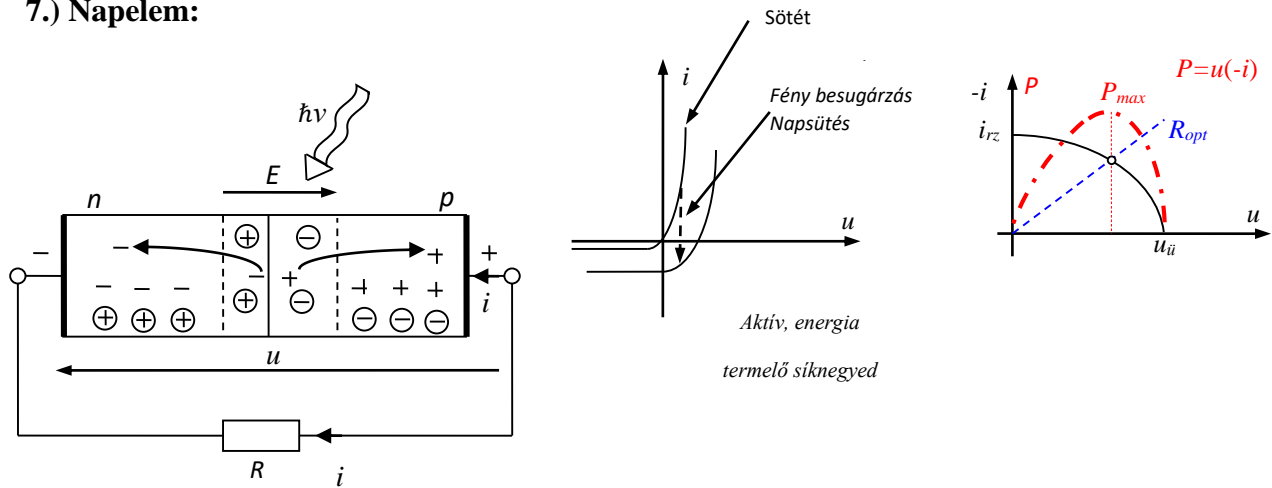


InGaAs High Speed Photodiode
with FC/PC Bulkhead

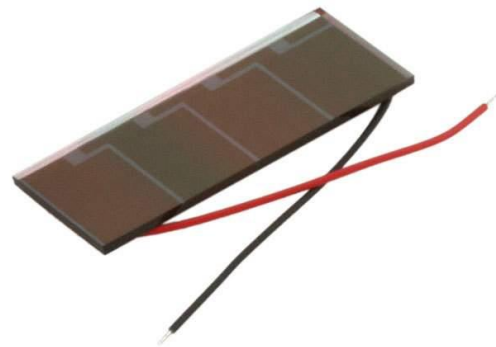
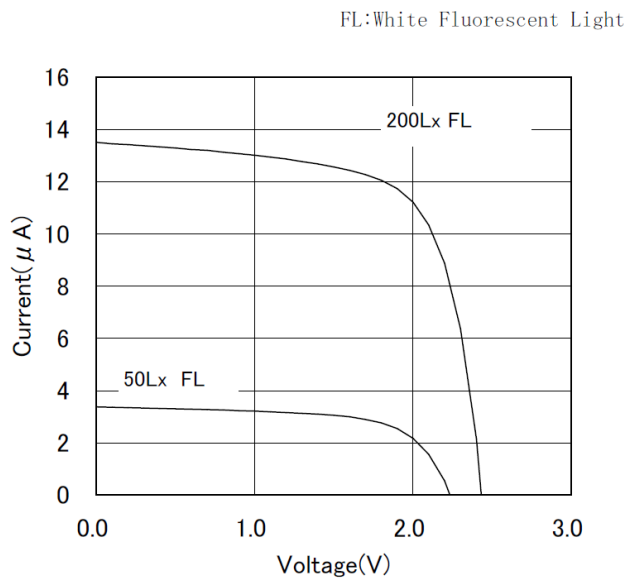
FGA01FC



7.) Napelem:



A Panasonic AM-1417 típusú négycellás napelem képe és energiatermelő síknegyedbeli dióda karakterisztikája 50Lux és 200Lux megvilágításnál:

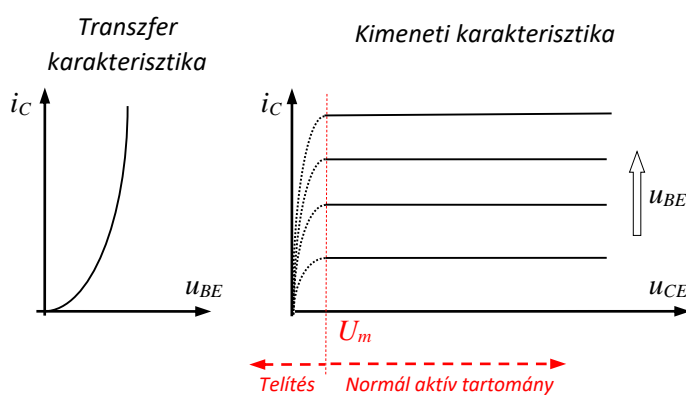


7.) Egyfotonos lavina fotodióda (Single Photon Avalanche Diode SPAD)

Záró irányban előfeszített dióda, ahol n+, p+ szennyezéseket alakítanak ki, így a kiürített réteg vékony, még nagy záró feszültség esetén is. Emiatt az anyagban nagy térerősség alakul ki, és a foton beütés hatására keletkező töltéshordozó pár nagy sebességre tesz szert ebben a térben. A nagy sebességgel ütköző elektronok újabb elektronok kiválását idézi elő a rácsból (lavina hatás), így egyre több töltéshordozó keletkezik egyetlen foton beütésének hatására.

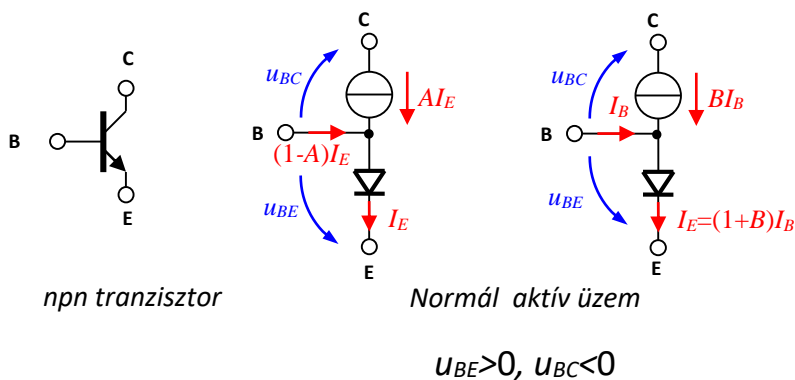
Bipoláris tranzisztor (Bipolar Junction Transistor) üzemállapotok, karakterisztikák

<i>B-E dióda</i>	<i>B-C dióda</i>	Üzemi állapotok:
Nyit	Zár	Normál aktív ($u_{BE} > 0, u_{BC} < 0, u_{CE} > U_m$)
Zár	Zár	Lezárt (Nem folyik áram) ($u_{BE} \leq 0, u_{BC} < 0, u_{CE} \geq U_m$)
Nyit	Nyit	Telítés (Szaturáció) ($u_{BE} > 0, u_{BC} > 0, u_{CE} < U_m$)
Zár	Nyit	Inverz aktív (nem használt)



Az NPN bipoláris tranzisztor (BJT Bipolar Junction Transistor)

Múlt órán megismert kapcsolási rajz szimbóluma és *nagyjelű* helyettesítő képei:

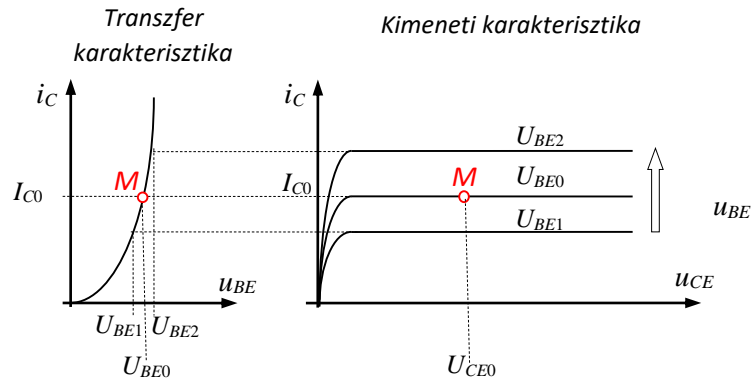


Adatlapokban: $A = \frac{I_C}{I_E} < 1$ $A = h_{FB}$ (közel 1) $B = \frac{I_C}{I_B}$ $B = h_{FE}$ (néhány 100)

$$A = \frac{B}{1+B} \qquad B = \frac{A}{1-A}$$

Bipoláris tranzisztorok alkalmazása

- **lineáris erősítő áramkörök**
 - *Munkapont*
 - *Kivezérlés*
- kapcsoló áramkörök
 - *lezárt*
 - *telítés közeli*
- egyebek



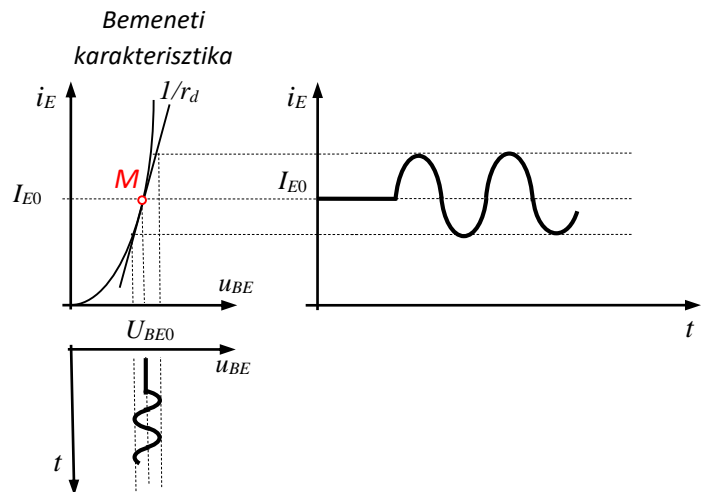
$$i_E = I_{S0} \left(e^{\frac{u_{BE}}{U_T}} - 1 \right) \cong I_{S0} e^{\frac{u_{BE}}{U_T}}$$

$$\left. \frac{di_E}{du_{EB}} \right|_{u_{BE}=U_{BE0}} \cong \frac{1}{U_T} I_{S0} e^{\frac{U_{BE0}}{U_T}} = \frac{I_{E0}}{U_T} = \frac{1}{r_d}$$

$$r_d = \frac{U_T}{I_{E0}}$$

Pld.: $I_{E0} = 1 \text{ mA}, \quad U_T = 26 \text{ mV}$

$$r_d = 26 \text{ } \Omega$$



M: munkapont

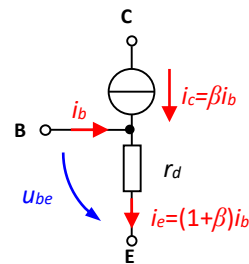
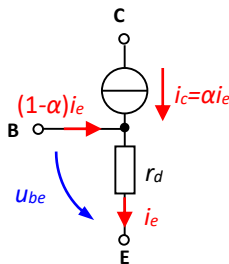
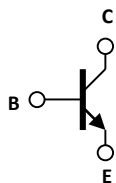
A tranzisztor rajzjele és *kisjelű* helyettesítő képe, adott munkapontban érvényes:

általános áram=munkaponti áram+váltó áram:

$$i_E(t) = I_{E0} + i_e(t)$$

$$i_C(t) = I_{C0} + i_c(t)$$

$$i_B(t) = I_{B0} + i_b(t)$$



katalógusban: $\alpha = h_{fb} \quad \beta = h_{fe}$

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

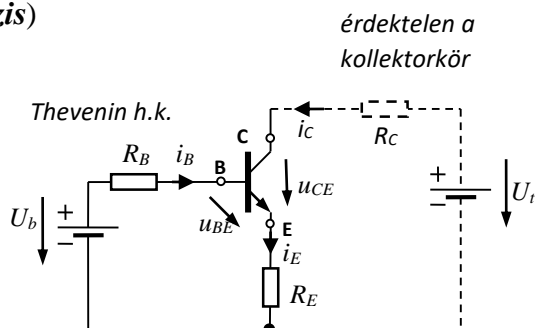
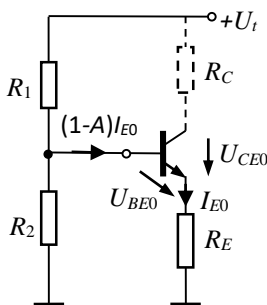
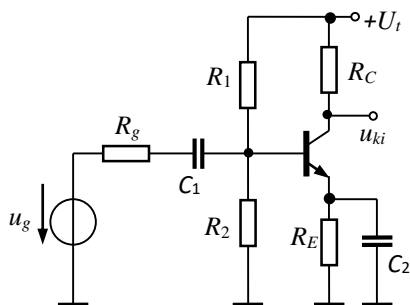
$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

Bipoláris tranzisztorok munkapont beállítása, a munkapont hőmérséklet függése

A kapcsolás:

Munkapont számításhoz:

($u_g=0$, egyenáramú analízis)



$$U_b = U_t \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad R_B = R_1 \times R_2$$

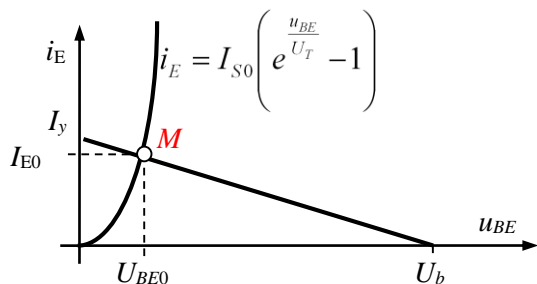
Normál aktív tartomány: $u_{BE} > 0$, $u_{BC} < 0$, $u_{CE} > U_m > 0$, $i_E > 0$

A munkapont meghatározása:

Két egyenlet, két ismeretlen: (i_E , u_{BE})

$$U_b = i_B R_B + u_{BE} + i_E R_E = ((1-A)R_B + R_E)i_E + u_{BE} \quad (*)$$

$$i_E = I_{S0} \left(e^{\frac{u_{BE}}{U_T}} - 1 \right) \quad U_T = 26 \text{ mV}$$



Megoldás: $u_{BE} = U_{BE0} = 0.6 \text{ V} \rightarrow i_E = I_{E0} = \frac{U_b - U_{BE0}}{R_E + (1-A)R_B}$

A munkapont hőmérséklet (T) függése:

(*)-ból: $U_b = ((1-A)R_B + R_E)i_E(T) + u_{BE}(T)$ /deriváljunk T szerint!

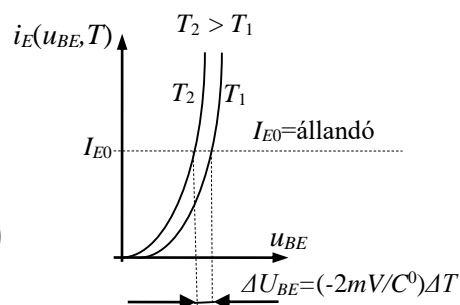
$$\frac{dU_b}{dT} = 0 = ((1-A)R_B + R_E) \frac{di_E(T)}{dT} + \frac{du_{BE}(T)}{dT}$$

$$\frac{du_{BE}(i_E(T), T)}{dT} \text{ teljes differenciálja: } \frac{du_{BE}}{dT} = \frac{\partial u_{BE}}{\partial i_E} \bigg|_{I_{E0}} \frac{di_E(T)}{dT} + \frac{\partial u_{BE}(T)}{\partial T} \bigg|_{I_{E0}}$$

mivel: $\frac{\partial u_{BE}}{\partial i_E} \bigg|_{U_{BE0}} = r_d$ és $\frac{\partial u_{BE}}{\partial T} \bigg|_{i_E=\text{állandó}} = -2 \text{ [mV/C}^0\text{]}$

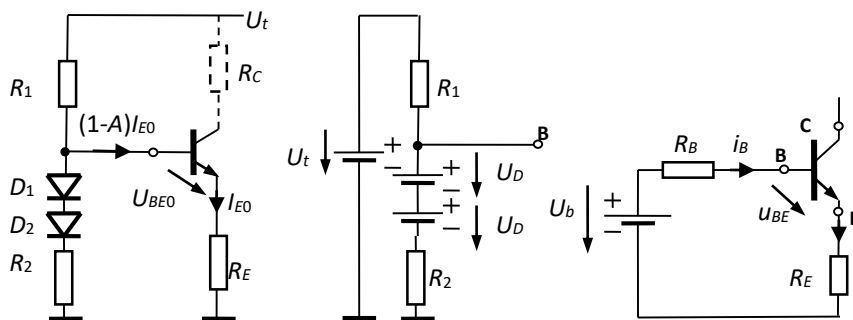
Véges differenciákkal:

$$0 = ((1-A)R_B + R_E + r_d) \frac{\Delta i_E(T)}{\Delta T} + (-2 \text{ mV/C}^0) \Delta T$$



amiből:

$$\Delta i_E = \Delta I_{E0} = \frac{-(-2mV/C^0)\Delta T}{R_E + r_d + (1-A)R_B}$$

Lehetséges hőmérséklet független munkapont?

$$U_b = U_t \frac{R_2}{R_1 + R_2} + 2U_D \frac{R_1}{R_1 + R_2} = U_t L_2 + 2U_{BE0} L_1$$

Ahol:

$$R_B = R_1 \times R_2 \quad L_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad L_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_b = u_{BE} + [R_E + (1-A)R_B] i_E$$

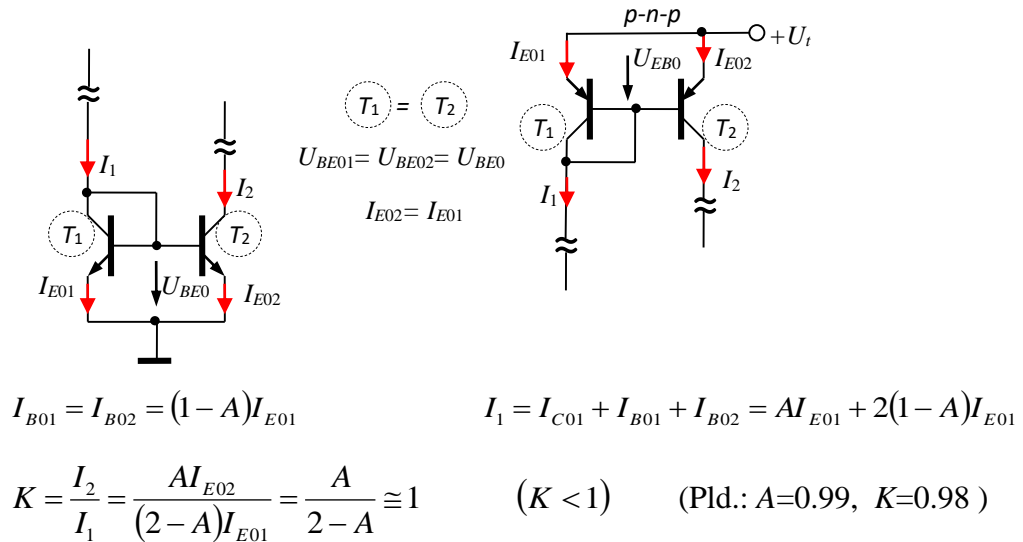
$$i_E = I_{E0} = \frac{U_b - U_{BE0}}{R_E + (1-A)R_B} = \frac{U_t L_2 + 2U_{BE0} L_1 - U_{BE0}}{R_E + (1-A)R_B}$$

Ha $R_1 = R_2$ akkor $L_1 = L_2 = 1/2$ és $i_E = I_{E0} = \frac{U_t / 2}{R_E + (1-A)R_B}$

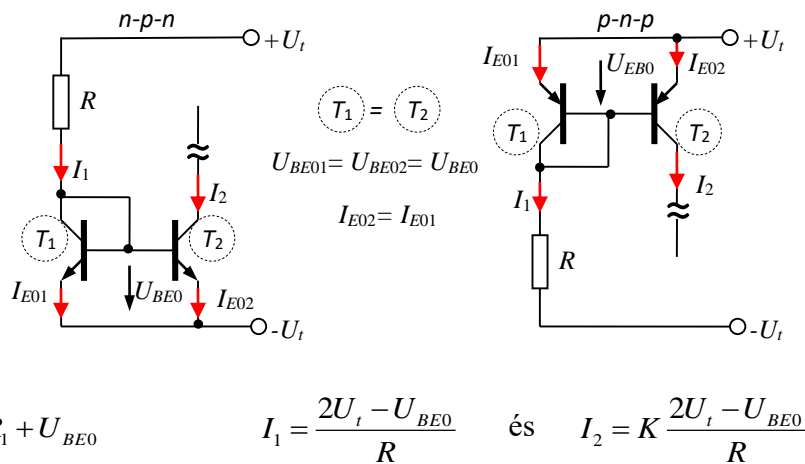
már független U_{BE0} -tól, és így a hőmérséklettől.

Az áramtükör:

Egy hőmérséklet stabil bemeneti munkaponti áram, illetve erre rászuperponálódó váltó áram (I1) átmásolása egy emitter ellenállás nélkül is stabil munkapontú (I2) T2 tranzisztorba:



Jó hőmérséklet stabilitású egyenáramú npn és pnp tranzisztorokkal.



Jó hőmérséklet stabilitás: (Stabil áramgenerátor)

$$U_{BE0}(T_0 + \Delta T) = U_{BE0}(T_0) + (-2mV / C^0) \Delta T$$

$$I_2(T_0 + \Delta T) = K \frac{2U_t - U_{BE0}(T_0 + \Delta T)}{R} = I_2(T_0) + K \frac{(2mV / C^0) \Delta T}{R}$$

Kivezérelhetőség:

A kivezérelhetőség témaköre azzal foglalkozik, hogy egy tranzisztoros kapcsolás kimenetén a nyugalmi munkaponti állapothoz képest mekkora kimenőfeszültség változása a tranzisztor nyitása (nagyobb kollektoráram), illetve zárása (kisebb kollektoráram) esetén.

Egyszerűsítő feltevés: $\mathbf{A=1} \rightarrow i_C = i_E$

A kapcsolásból kivesszük a tranzisztor!

A C-E kapu: lineáris hálózat.

Egyenáramon:

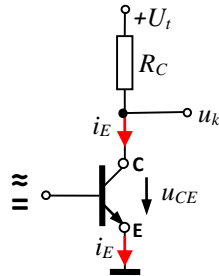
Telep + R-ek \rightarrow Thevenin h.k.

C: szakadás, L: rövidzár

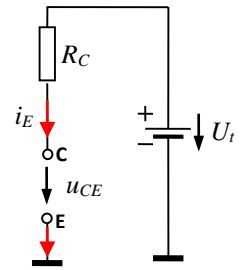
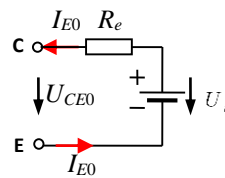
Váltóáramon:

Telep: rövidzár

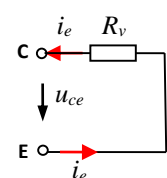
L: szakadás, C: rövidzár eredő: R_v



Egyenáramú h.k.



Váltóáramú h.k.



$$U_t^* = u_{CE} + R_e i_E \rightarrow i_E = -\frac{1}{R_e} u_{CE} + \frac{U_t^*}{R_e} \quad \text{Egyenáramú munka egyenes egyenlete.}$$

U_t^* jelölésben a redukált (leosztott) tápfeszültségre utalunk, ami abban az esetben áll fenn, ha ellenállás hálózaton a tápfeszültség leosztódik. Itt $U_t^* = U_t$

Egyenáramon:

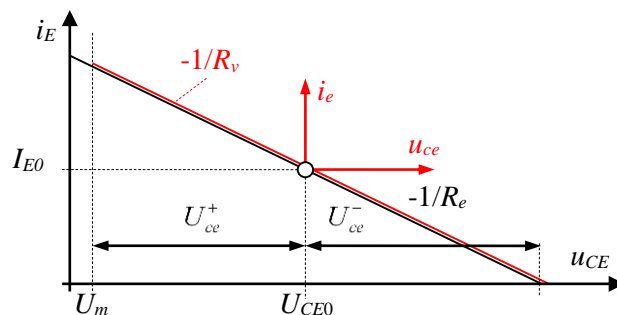
$$U_{CE0} = U_t^* - R_e I_{E0}$$

Váltóáramon:

$$u_{ce} = u_{CE} - U_{CE0}$$

$$i_e = i_E - I_{E0}$$

(koordináta transzformáció)



Váltóáramú munkaegyes egyenlete:

$$i_e = -\frac{1}{R_v} u_{ce}$$

A kivezérelhetőség:

A növekvő emitter áramhoz tartozó u_{ce} feszültség maximuma:

$$U_{ce}^+ = U_{CE0} - U_m = U_t^* - U_m - I_{E0} R_e$$

A csökkenő emitter áramhoz tartozó u_{ce} feszültség maximuma: $U_{ce}^- = R_v I_{E0}$

Esetünkben, mivel a kimeneti feszültség a kollektor-emitter feszültséggel megegyezik:

$$U_{ki}^\pm = U_{ce}^\pm$$

Optimális munkapont (szimmetrikus kivezérelhetőség): $U_{ce}^+ = U_{ce}^-$ z ehhez tartozó optimális

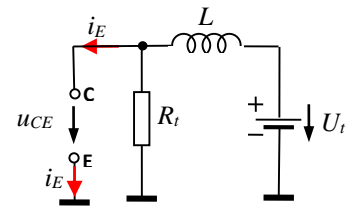
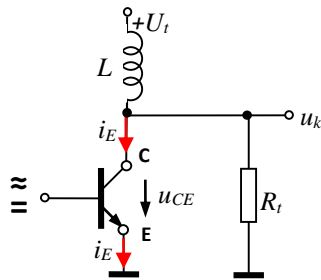
MP-i áram:
$$I_{E0opt} = \frac{U_t^* - U_m}{R_e + R_v}$$

Induktív csatolású terhelés esete

Egyenáramú h.k.

$$U_t^* = U_t \quad R_e = 0$$

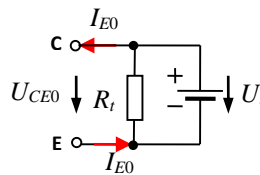
$$U_{CE0} = U_t$$



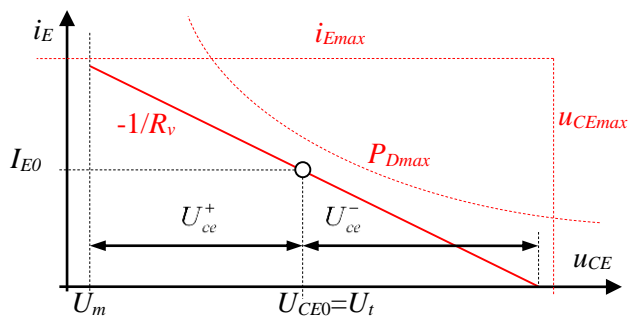
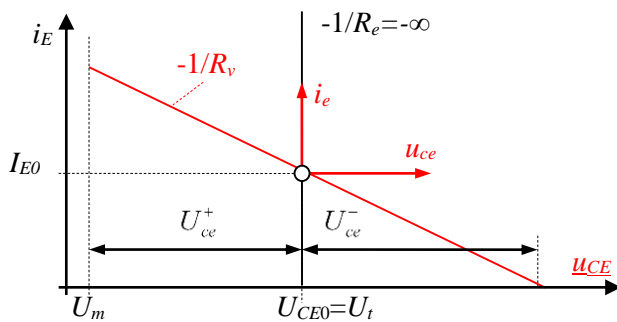
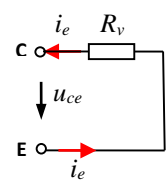
Váltóáramú h.k.

$$R_v = R_t$$

Egyenáramú h.k.



Váltóáramú h.k.



03. Előadás

Az órán tanult áramköröket tartalmazó erősítő kapcsolás hőmérséklet stabil munkapontú Q3 tranzisztorral, ennek kollektor áramát a Q1-be másoló áramtükörrel, amelynek induktív csatolású R1 terhelő ellenállása van, amelyen extrém nagy kimenőjel amplitúdó (19V csúcstól-csúcsig) érhető el (Lásd 3. Előadás LTspice szimuláció Kiv_L_C_full.asc).

