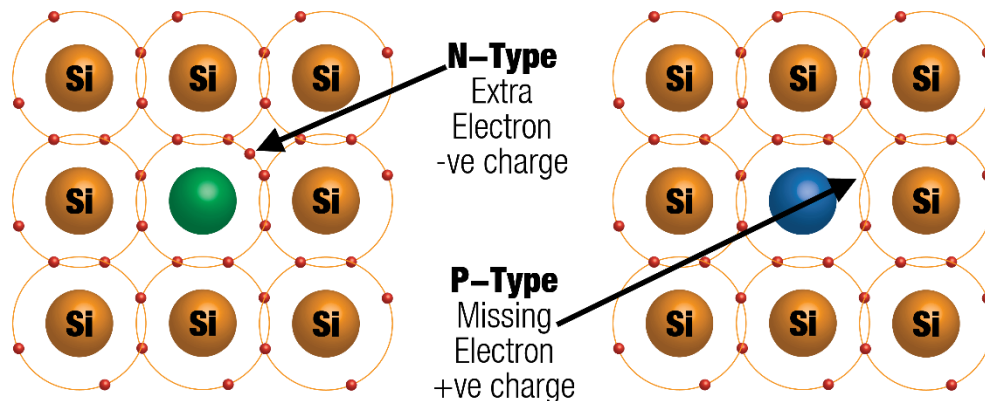


Teljesítményelektronika Félvezetők



Félvezető alapok

- Elektromos szempontból a szilárd anyagok:
 - Vezetők pl.: réz, vas, szén
 - Szigetelők pl.: porcelán, üveg, műanyag
 - Félvezetők pl.: Germánium (Ge), Szilícium (Si) Gallium Arzenid (GaAs)
- A félvezető anyagokat szennyezik (tisztán ritkán használatosak). A szennyezéssel szabad töltéshordozók sűrűsége nő.
- Szilícium (4 vegyérték elektron)
 - Donor szennyezés (5 vegyértékű szennyező – „szabad e^- ”; pl. Foszfor (P))
 - Akceptor (3 vegyértékű szennyező – „lyukak”,; pl.: Bór (B), Gallium (Ga))

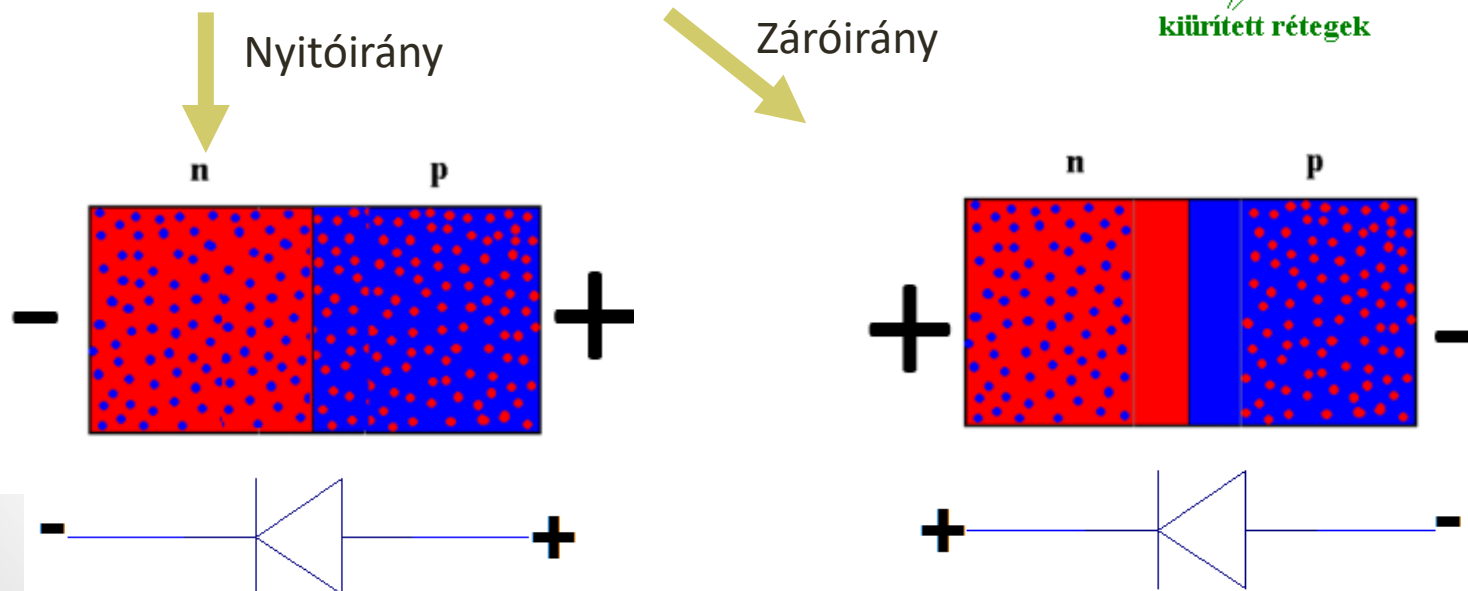
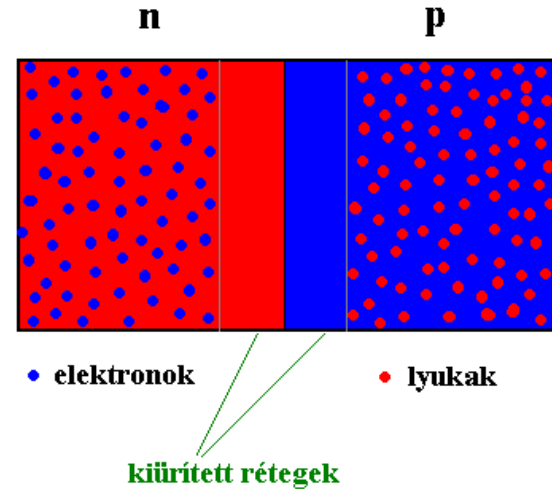


Félvezetőkkel kapcsolatos alapfogalmak

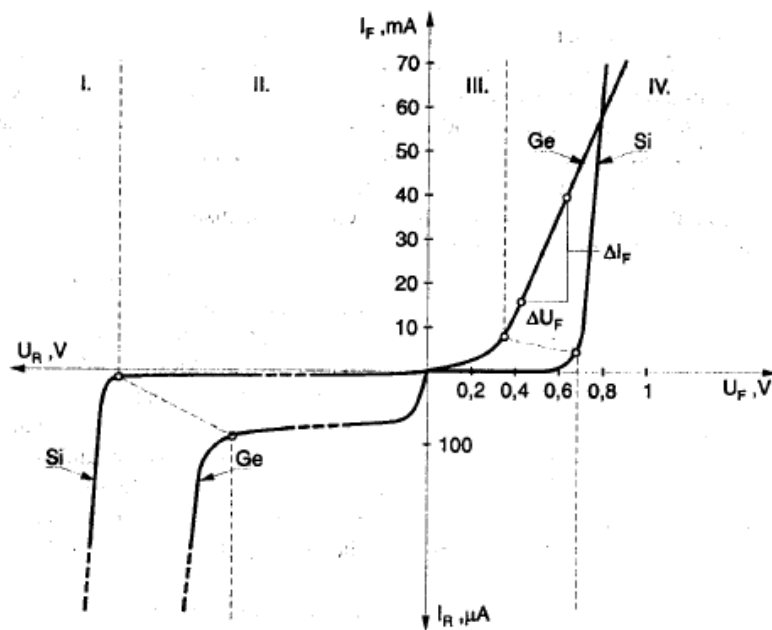
- Külső energia-közléssel – pl. magasabb hőmérsékleten, a hőmozgás következtében – elérhető, hogy egy-egy elektron kilép a kötésből és átmenetileg szabaddá válik. A kötésből kilépő elektronok helyén elektronhiány – lyuk – keletkezik. A szabad elektronok és lyukak állandóan keletkeznek, illetve egyesülnek, **rekombinálódnak**.
- Drift áram: A „klasszikus” értelemben áram, amit feszültségkülönbség kelt. Ez jellemző pl. a fém vezetékekre.
- Diffúziós áram: A töltéshordozók egyenletlen eloszlása okozza. A töltéshordozók egyenletes eloszlásra törekszenek.

PN átmenet

- Az n típusú félvezetőben az elektronok a többségi töltéshordozók, míg a p típusú rétegben a lyukak
- Kiürített réteg (N-be lyukak, P-ben e^-), rekombináció
- A PN átmenet a rákapcsolt feszültség függvényében:



Félvezető dióda (nyitóirány)

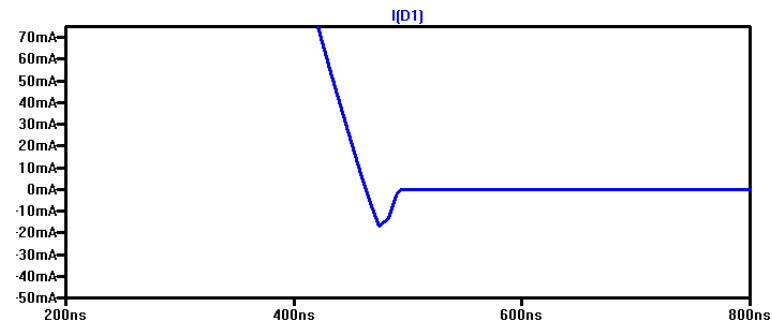
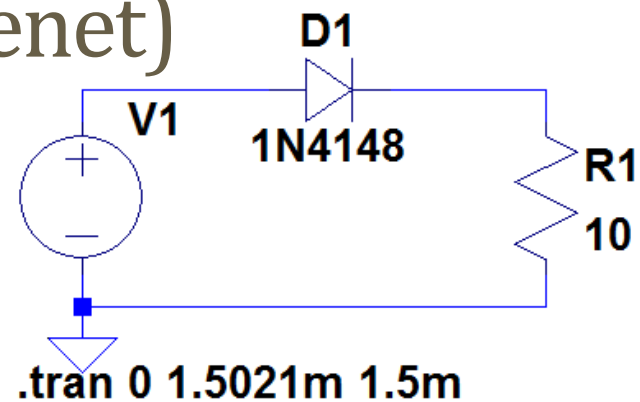
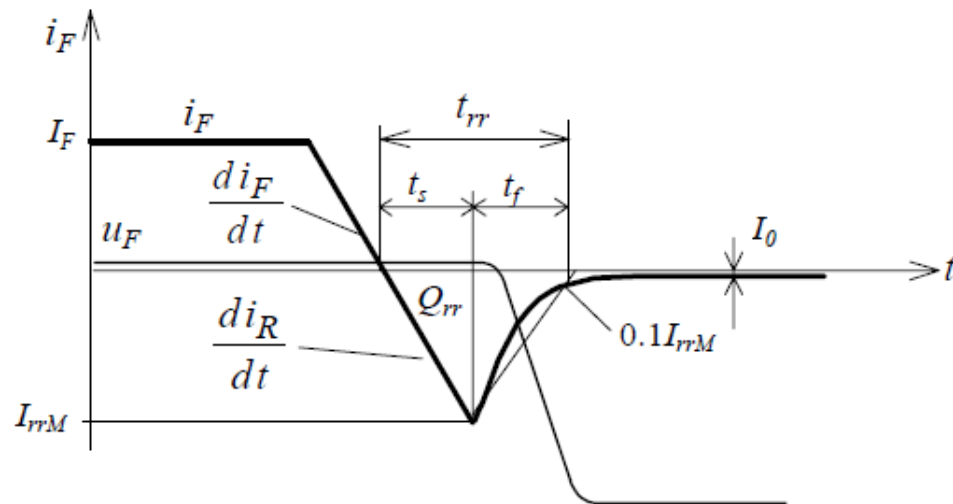


Az ideális dióda nyitóirányban 0Ω ellenállású, míg záróirányban $\infty\Omega$

EGYENIRÁNYÍTÁS
Schottky dióda

Paraméter	Si	Ge
Nyitófeszültség	0,6 – 0,7V	0,2 – 0,3V
Maximális hőmérséklet	150 – 200°C	80 – 90°C
Záróirányú ellenállás	0,1 – 10M Ω	1 – 3000M Ω
Nyitó irányú ellenállás	5 - 10 Ω	2 - 50 Ω
Max. zárófeszültség	~200V	~3000V

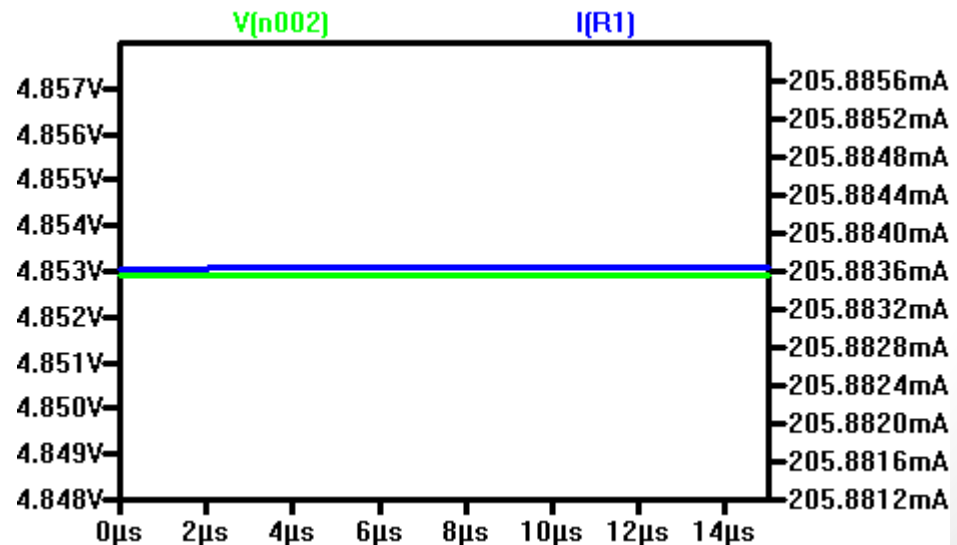
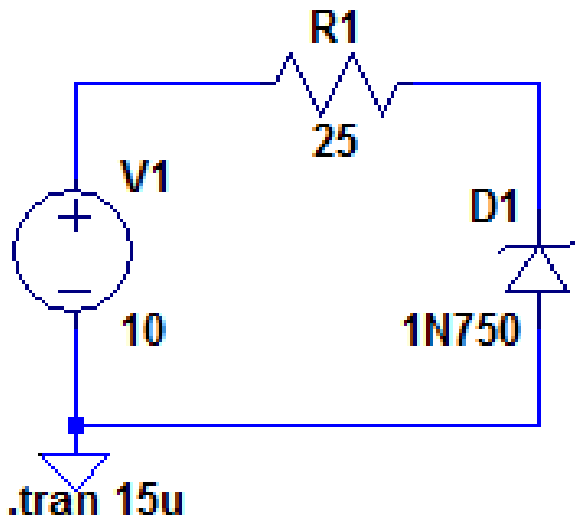
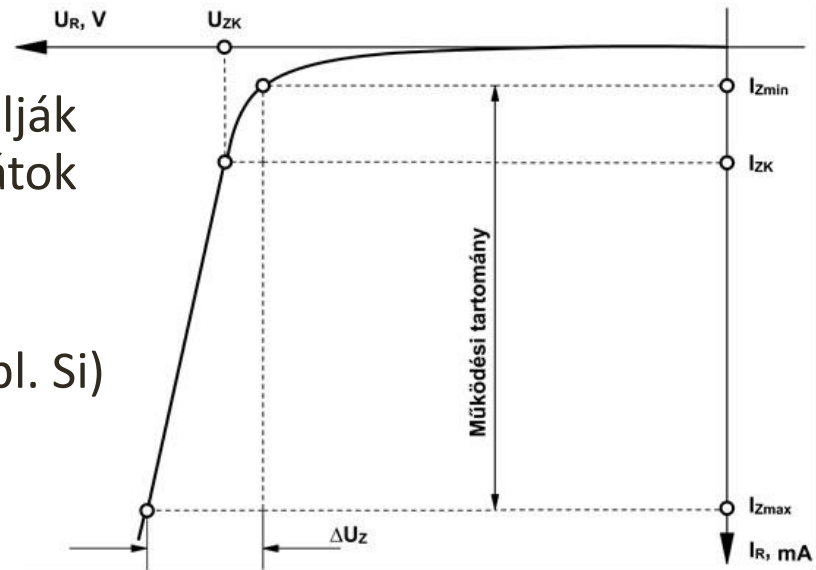
Félvezető dióda (Vezetésből zárásba történő átmenet)



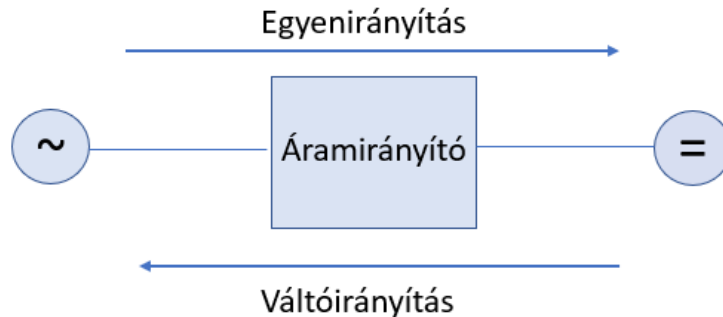
- Az áram az áramkör impedanciája szerint csökken (d_{i_F}/dt)
- A diódán mindaddig nyitóirányú feszültség van, amíg el nem éri I_{rrM} -et
- Q_{rr} a PN átmenetben lévő töltés mennyisége (jellemzően ns)
- t_{rr} záróirányú szabaddáválási idő (jellemzően ns nagyságrend)
- I_0 záróirányú nyugalmi áram

Zener dióda

- A záróirányú letörési tartományt használják ki (stabil feszültség), bizonyos áramkorlátok között
- Hátrányok!
- Nyitóirányban megegyeznek a normál (pl. Si) diódákkal



Egyenirányítás (AC/DC átalakítók)



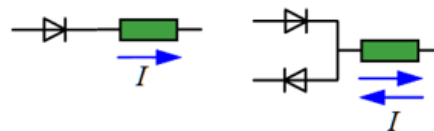
EGYENIRÁNYÍTÁS

VEZÉRLÉS JELLEGE SZERINT:

- **VEZÉRELETLEN** (természetes kommutációjú)
- **VEZÉRELT**

ÚTSZÁM SZERINT:

- 1 UTAS (FÉLHULLÁMÚ)
- 2 UTAS (EGÉSZHULLÁMÚ)



ÜTEMSZÁM SZERINT:

- 1 ÜTEMŰ
- 2 ÜTEMŰ
- 3 ÜTEMŰ
- 6 ÜTEMŰ



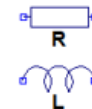
FÁZISSZÁM SZERINT

- 1 FÁZISÚ
- 3 FÁZISÚ

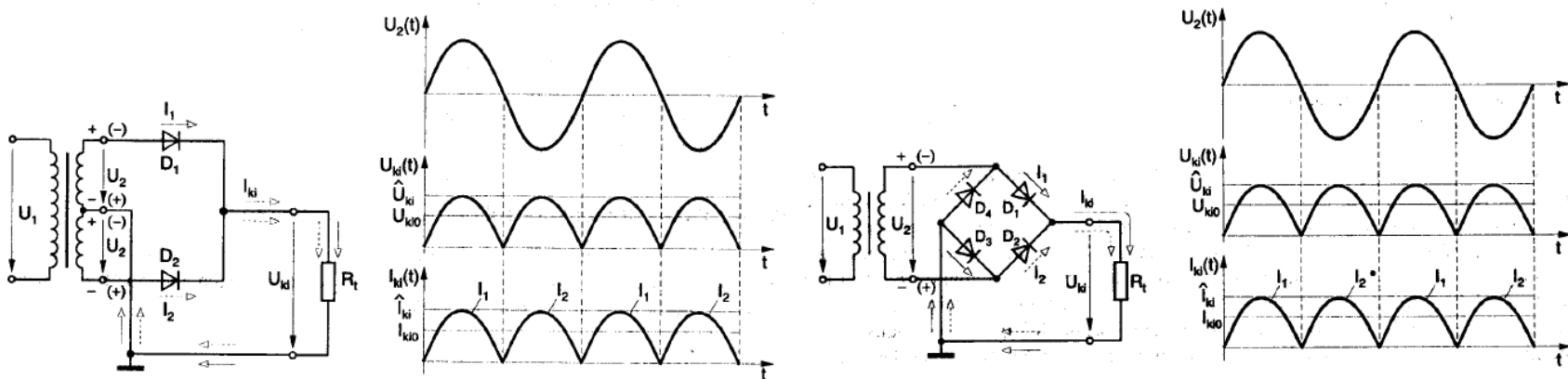


TERHELÉS JELLEGE SZERINT:

- **REZISZTÍV TERHELÉS**
- **INDUKTÍV TERHELÉS**



Egyenirányító áramkörök

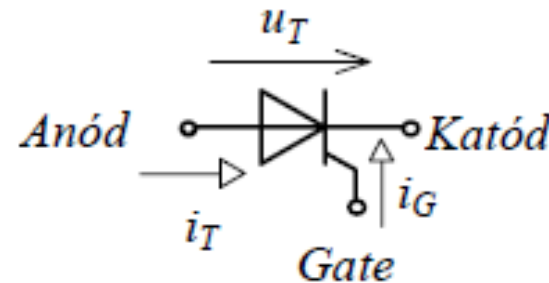
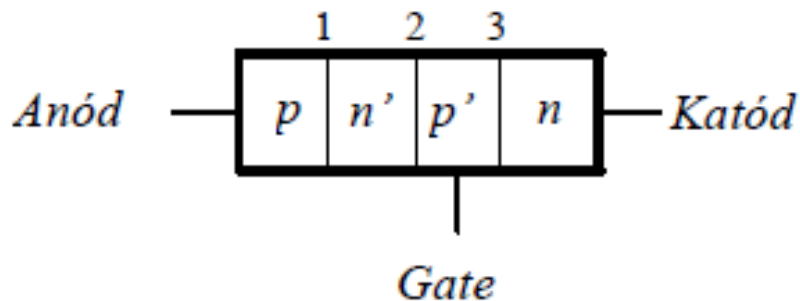
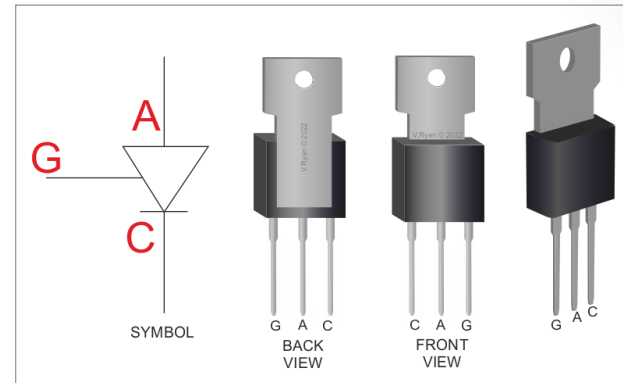


- Az egyenirányítók a váltakozó feszültséget alakítják egyenfeszültséggé
- A bemeneti feszültség hasznosítása szempontjából két nagy csoportra oszth
 - Egyutas egyenirányítók
 - Kétutas egyenirányítók (utóbbival foglalkozunk részletesebben)
- A kétutas egyenirányítók kevésbé hullámosak
- Itt két alapkapcsolást különböztetünk meg:
 - Középkivezetéses (szimmetrikus transzformátor esetén) kétutas egyenirányító
 - Graetz típusú

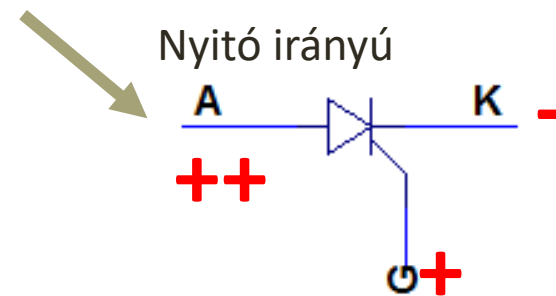
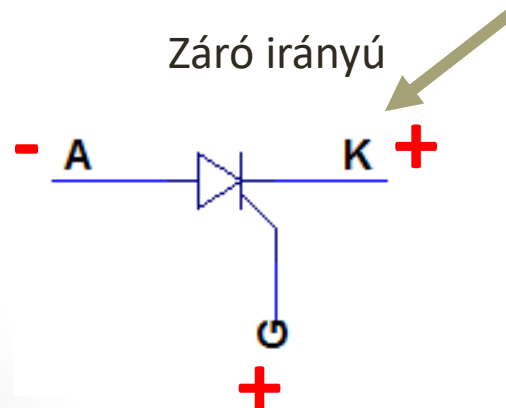


Tirisztorok (SCR)

- 4 rétegű diódák
- Vezérelhető (gate) Si diódák

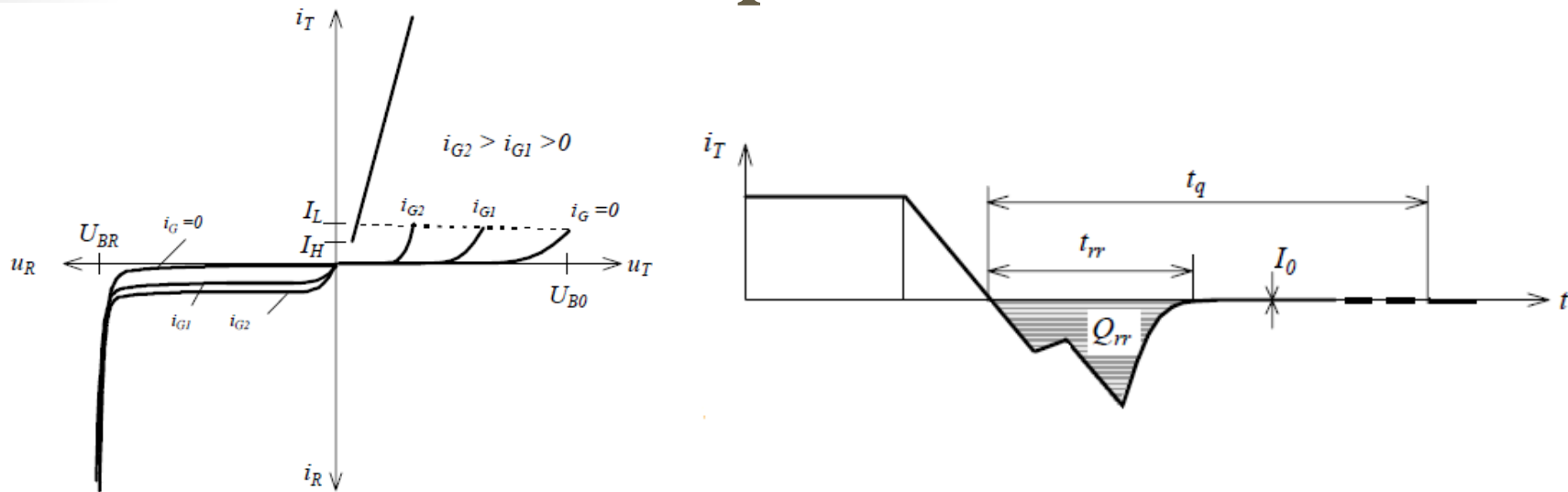


- A rákapcsolt feszültség függvényében két üzemmód adódik:



A bekapcsolás hőmérséklettől függ!
Tisztán hőmérséklettel is
bekapcsolható ($T_{\text{körny}} > T_{\text{billenő}}$)!

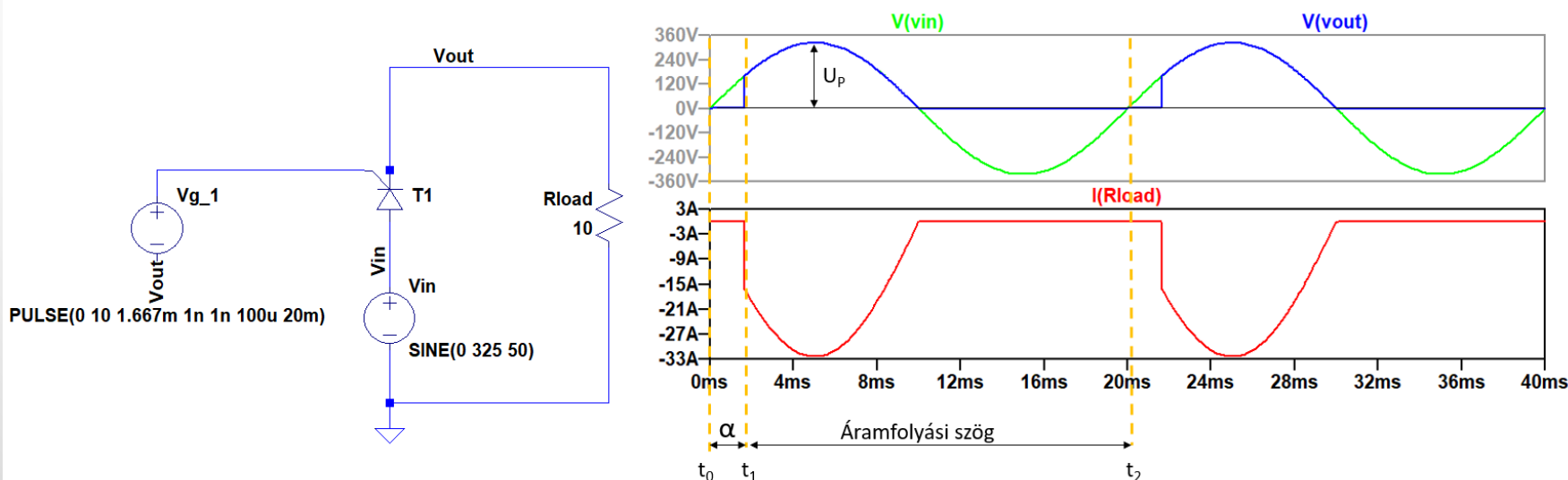
Karakterisztika, be és kikapcsolás



- A bekapcsoláshoz tehát pozitív gate feszültség és vezérlőáram szükséges (i_G)
- Bekapcsolás után a főáram a gate árammal többé nem vezérelhető, de léteznek kikapcsolható tirisztorok is (GTO; Gate Turn Off Thyristor)
- A tirisztor kikapcsolásához főáramot I_H tartóáram alá kell csökkenteni (EC103D1 esetén ez 0,5mA)
- Kikapcsolás ➔
 - Záróirányú záróképesség (t_{rr})
 - Nyitóirányú záróképesség (t_q)

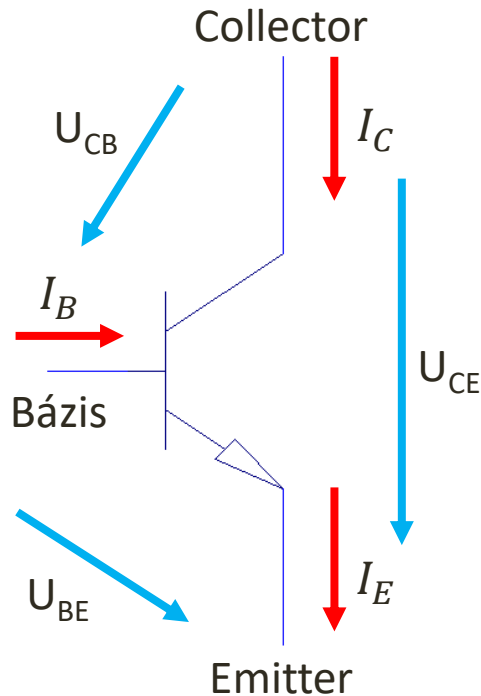
Tirisztorok felhasználása

- Többnyire teljesítmény szabályozásra
- Az ábrán egy egyfázisú, együtemű, egyutas vezérelt egyenirányító látható
- A gyújtáskésleltetési szög 30°
- A kimeneti feszültséget leíró összefüggés:
- $$U_{\text{átlag}} = \frac{U_P}{2\pi} (1 + \cos(\alpha))$$

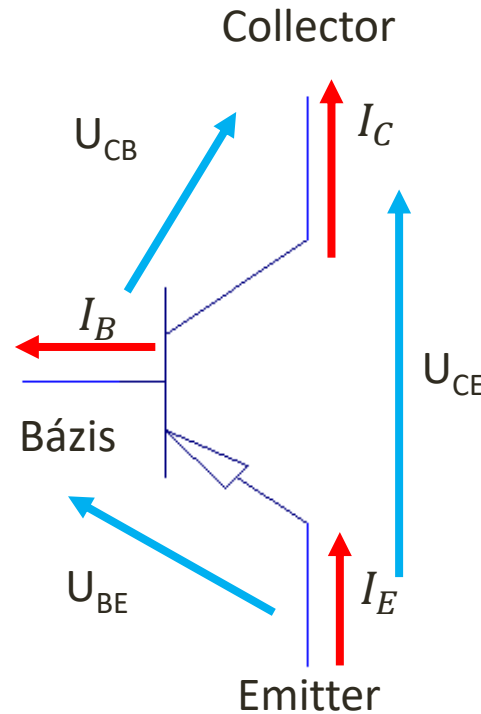


Bipoláris tranzisztorok (BJT)

NPN

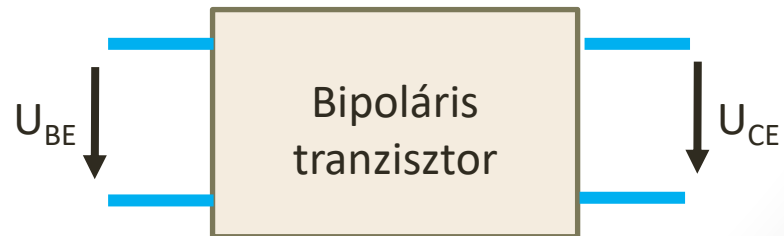


PNP



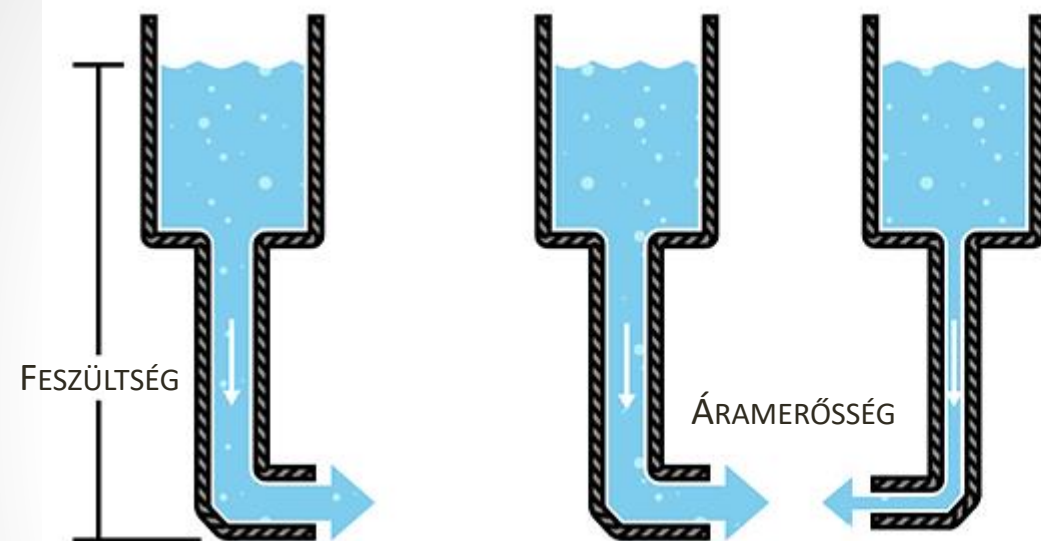
Alapegyenletek

- $I_E = I_C + I_B$
- $I_C = \beta I_B$
- $h_{21} = \beta$
- $U_{BE} \geq 0,6V$

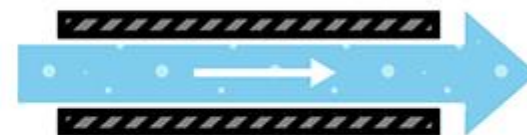


Áramvezérelt eszközök!

Tranzisztorok szemléltetése



COLLECTOR-ÉMIITER ÁRAM
NAGY BÁZISÁRAM ESETÉN



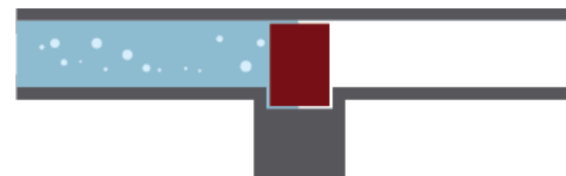
COLLECTOR-ÉMIITER ÁRAM
KIS BÁZISÁRAM ESETÉN



Normál aktív

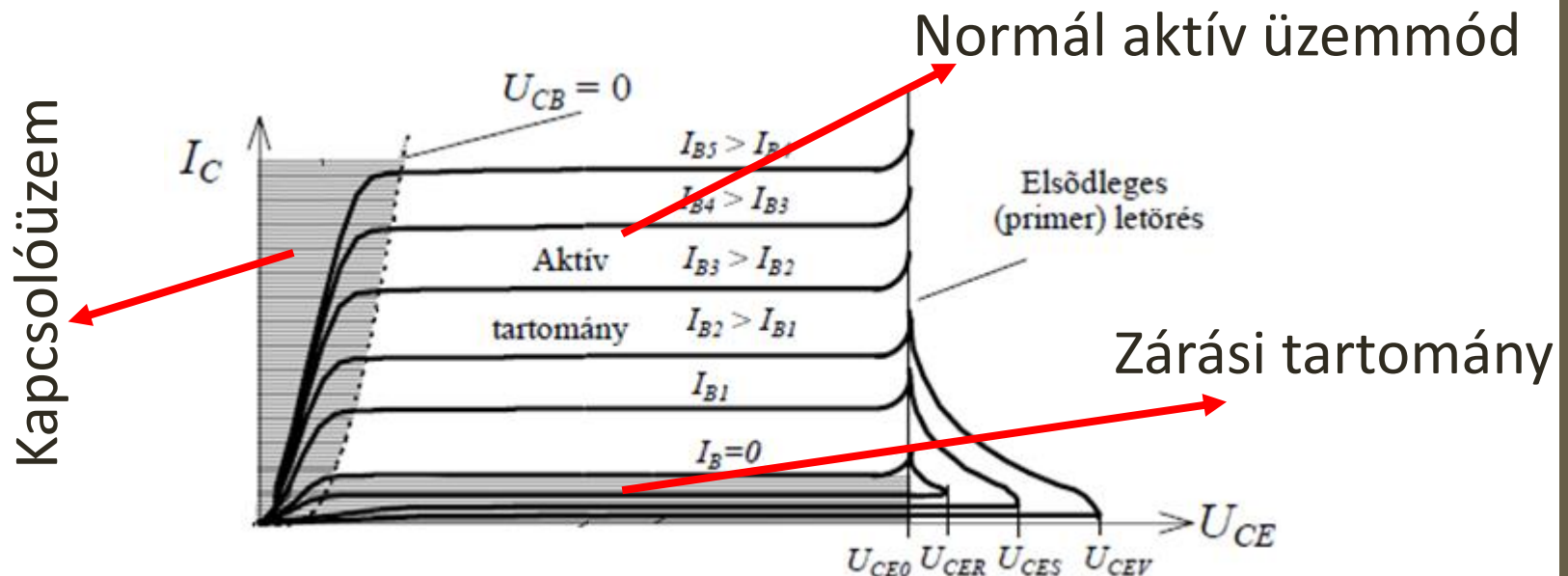


Telítési



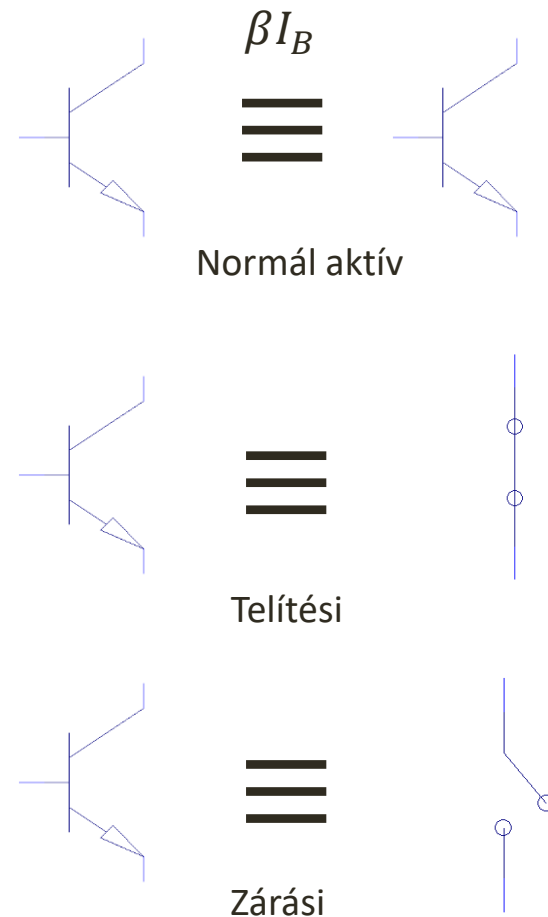
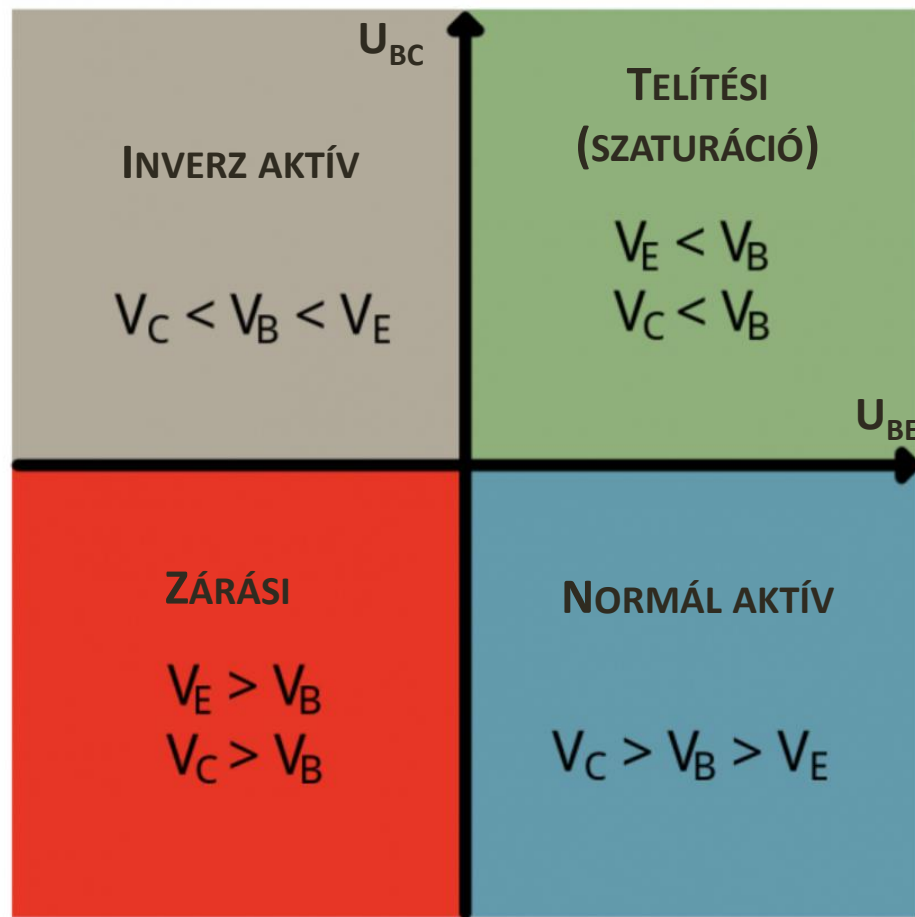
Zárási

Bipoláris tranzisztorok üzemmódjai

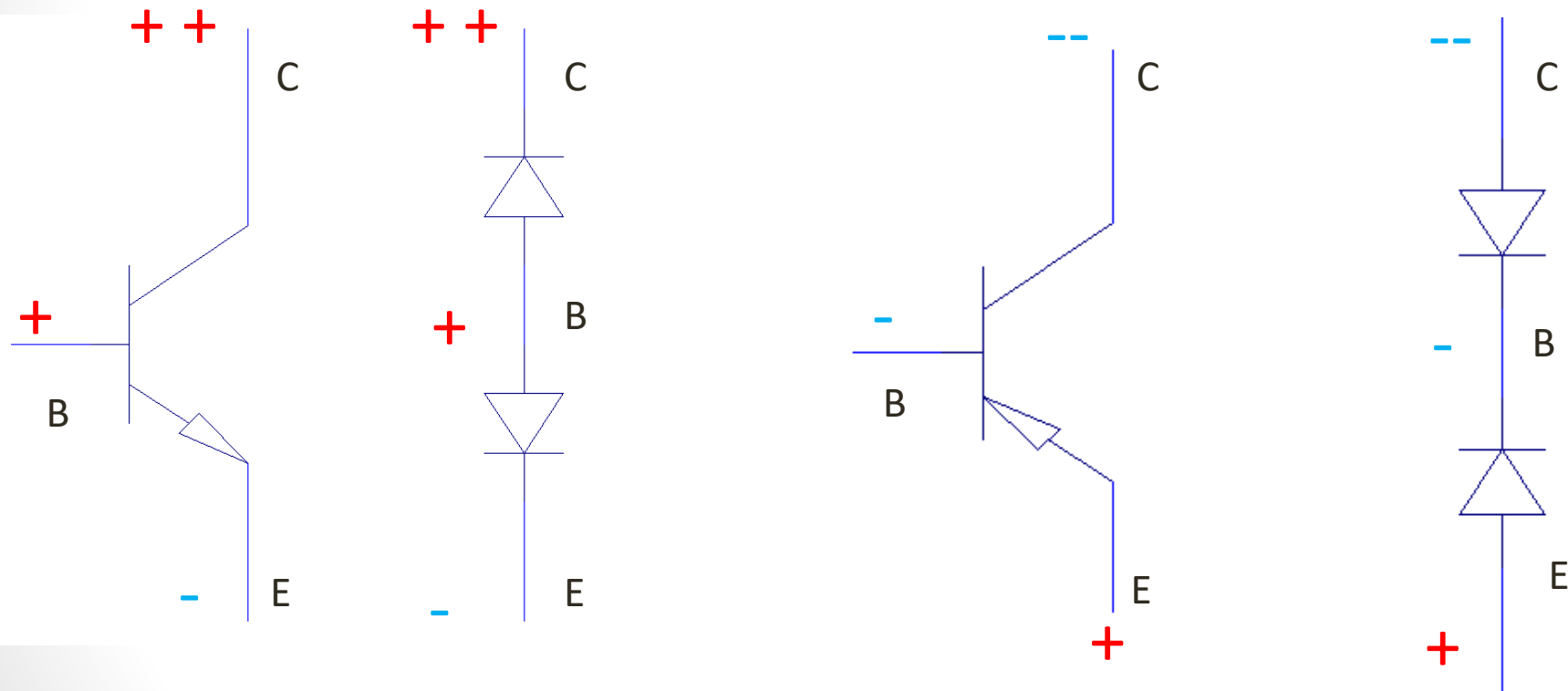


BE-dióda	BC-dióda	Üzemmód	Hol, mire használható
Nyitott	Zárt	Normál aktív	Erősítés
Nyitott	Nyitott	Telítési	Kapcsolóüzem
Zárt	Zárt	Zárási	Kapcsolóüzem

Bipoláris tranzisztorok üzemmmódjai

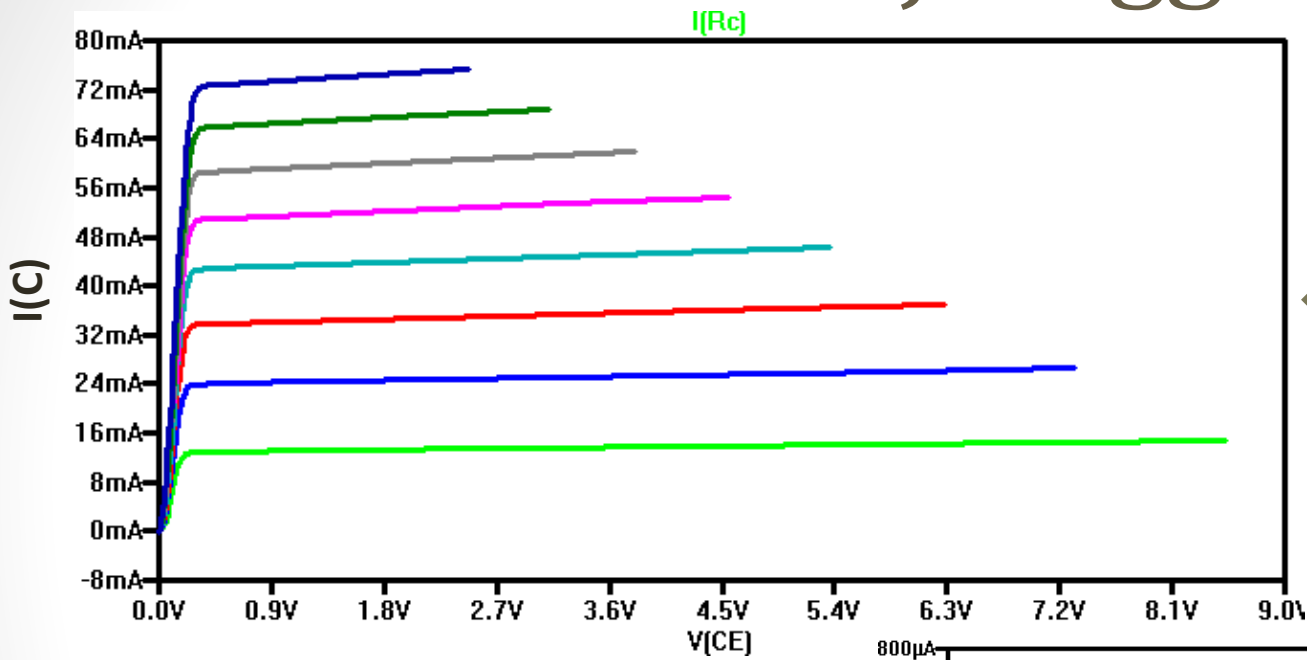


Bipoláris tranzisztorok előfeszítése, normál aktív üzemmódban



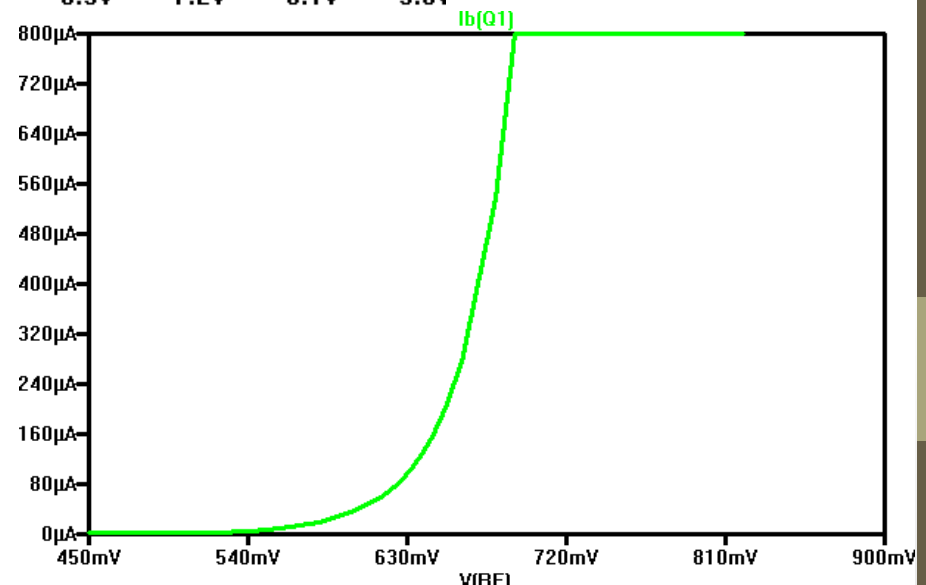
$$U_{BE} > 0,6V$$

Tranzisztor jelleggörbéi

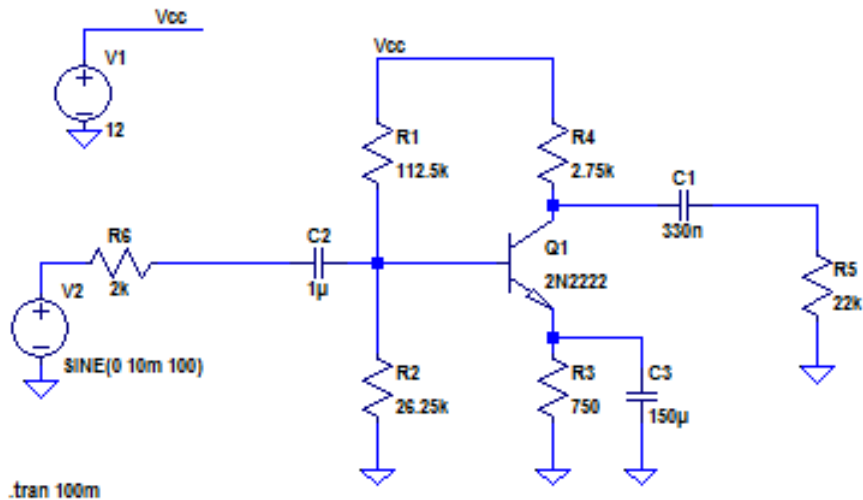


Kimeneti karakterisztika

Bemeneti karakterisztika

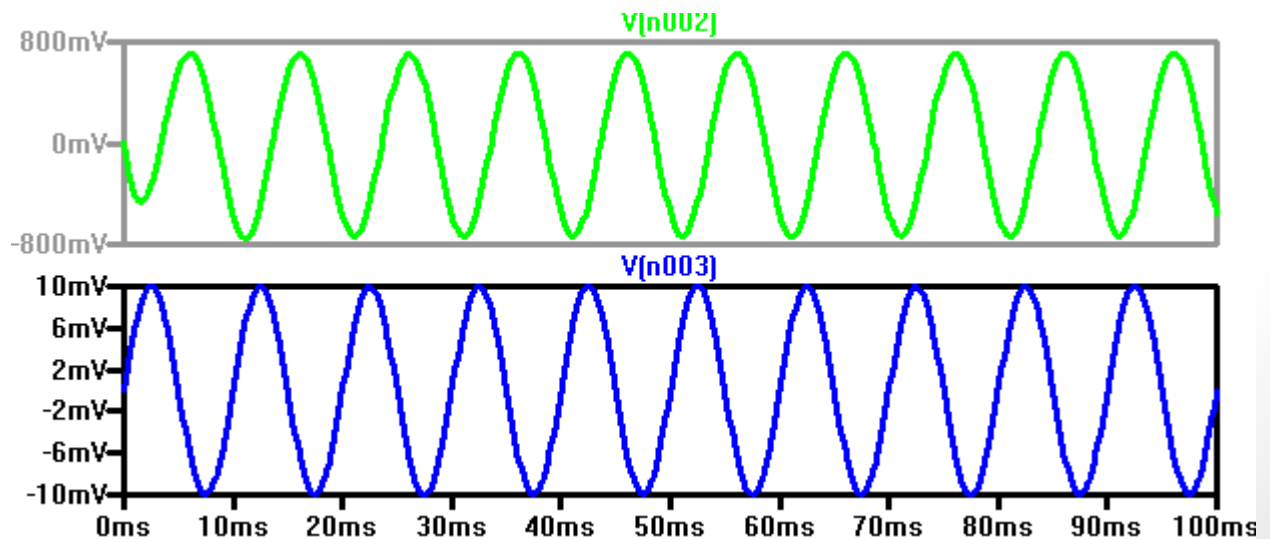


Tranzisztor alkalmazása normál aktív üzemmódban – erősítő-

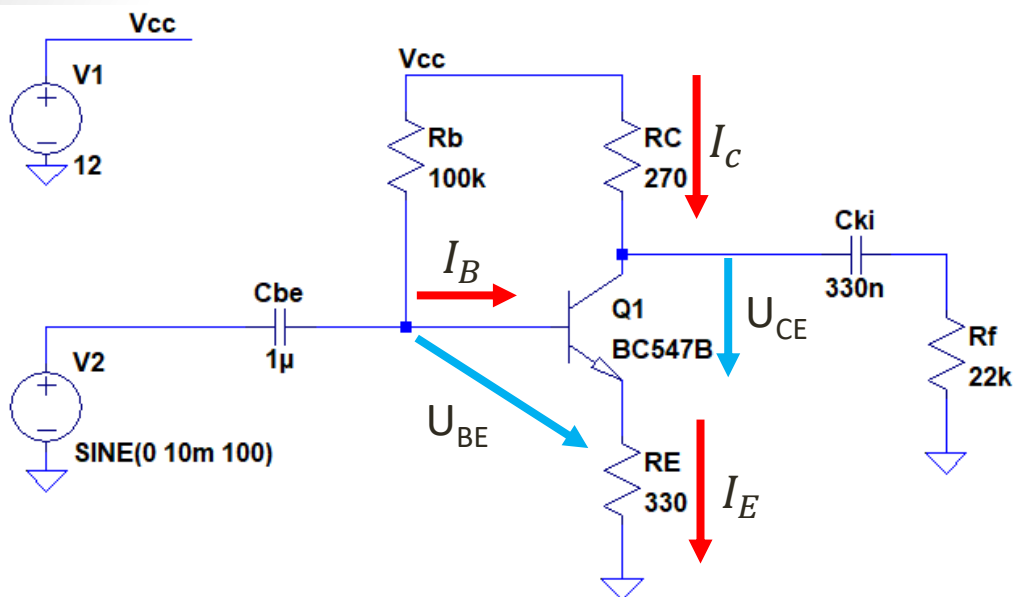


- A tranzisztor munkapontja az normál aktív tartományba van beállítva:
 - Bázisáram megtáplálású
 - Bázis feszültségosztós
- Alapkapcsolások
 - Közös emitteres
 - Közös kollektoros
 - Közös bázisú kapcsolás

Kimeneti
feszültség



Példa munkapontbeállításra



- A tranzisztor adatai:
- $\beta = 260$
- $U_{BE} = 0,756V$

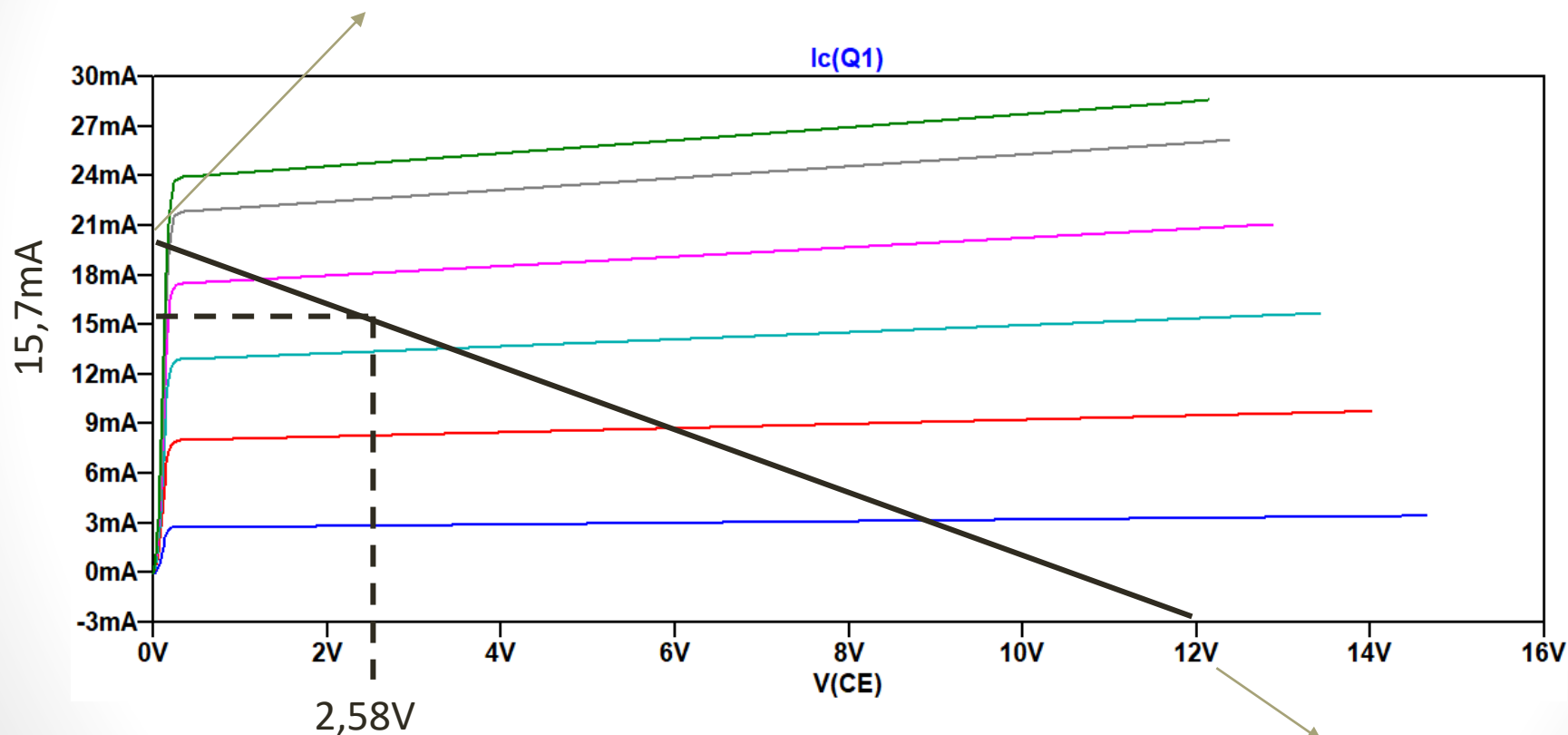
Munkaponti egyenletek

- $R_b I_b + U_{BE} + R_E I_E = V_{cc}$
- $R_b I_b + U_{BE} + R_E ((1 + \beta) I_B) = V_{cc}$
- $100k\Omega \cdot I_B + 0,756V + 330\Omega \cdot 261 \cdot I_b = 12V$
- $I_b \cong 60\mu A$
- $I_c = \beta I_B = 260 \cdot 60\mu A = 15,7mA$
- $I_c \cong I_B$
- $U_{RC} + U_{CE} + U_{RE} = V_{cc}$
- $I_C R_C + U_{CE} + I_E R_E = V_{cc}$

- $15,7mA \cdot 270\Omega + U_{CE} + 15,7mA \cdot 330\Omega = 12V$
- $U_{CE} \cong 2,58V$
- **Ellenőrzés:**
- $U_B = U_{RE} + U_{BE} = 5,181V + 0,756V \cong 5,94V$
- $U_{BE} > 0$
- $U_{BC} = U_B - U_C = 5,94V - 12V \cong -6V < 0$

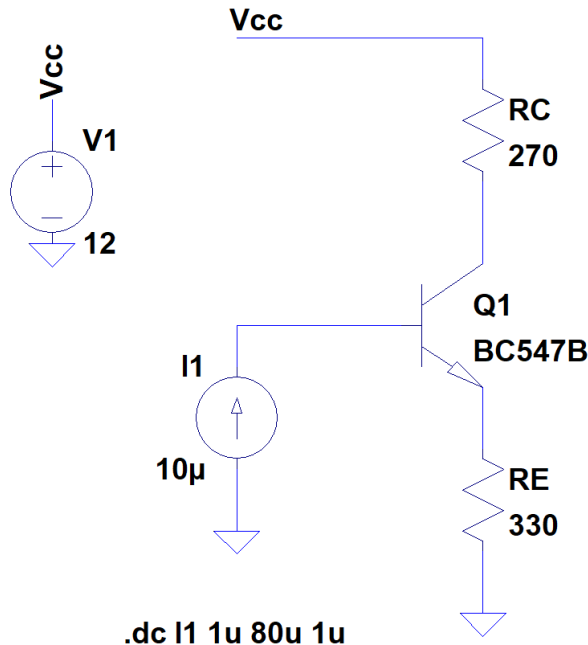
Példafeladat munkapontja

$$\frac{V_{CC}}{R_E + R_C} = \frac{12V}{270\Omega + 330\Omega} = 20mA$$

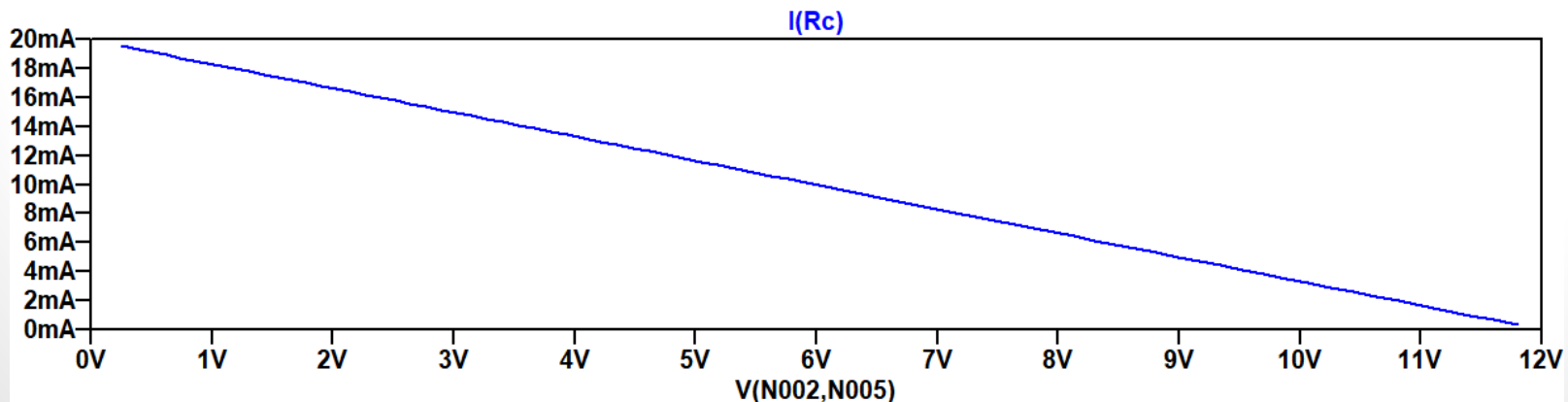


SZIMULÁCIÓ!

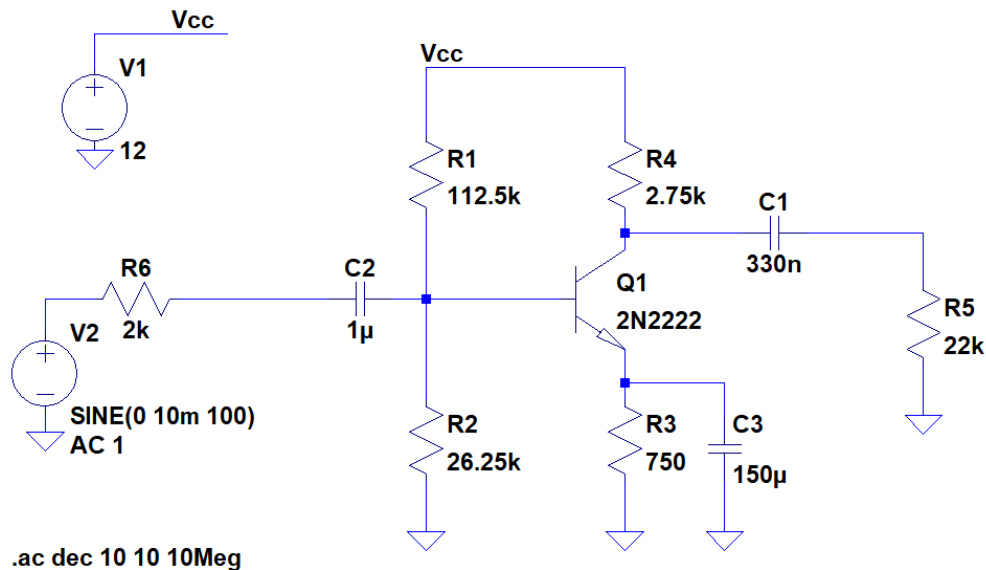
Példafeladat munkaegyenésének felvétele szimuláció segítségével



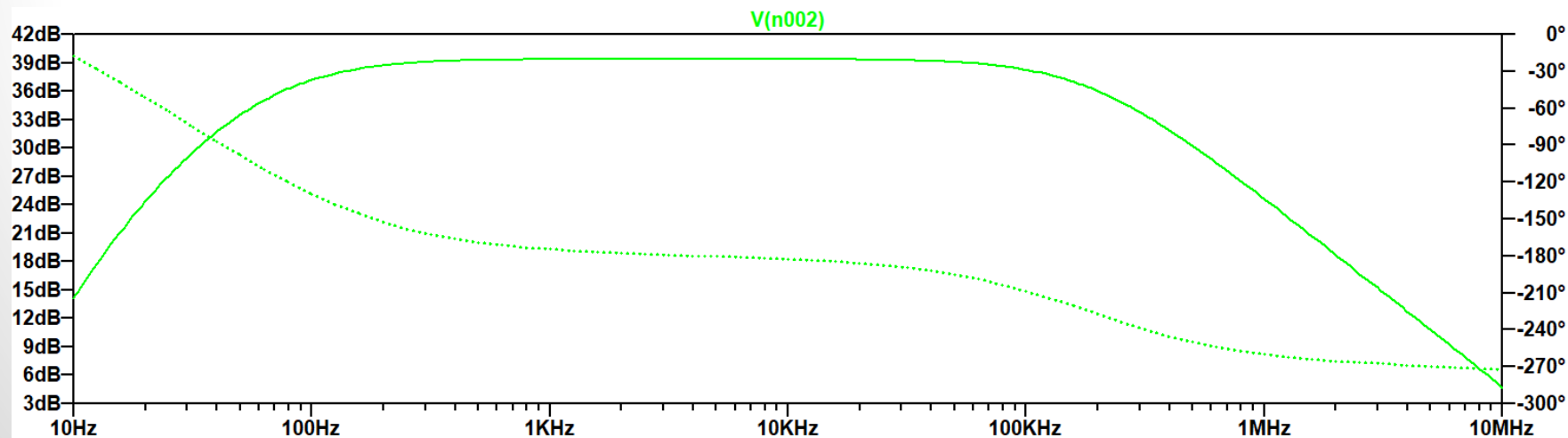
- A bázisáram parametrizálva van egy ideális áramgenerátorral
- I1 árama 1μA-tól 80μA-ig változik (ez a feladatból következik)
- A két szélső érték a számításnak megfelelően adódik



Átviteli függvény, töréspontok

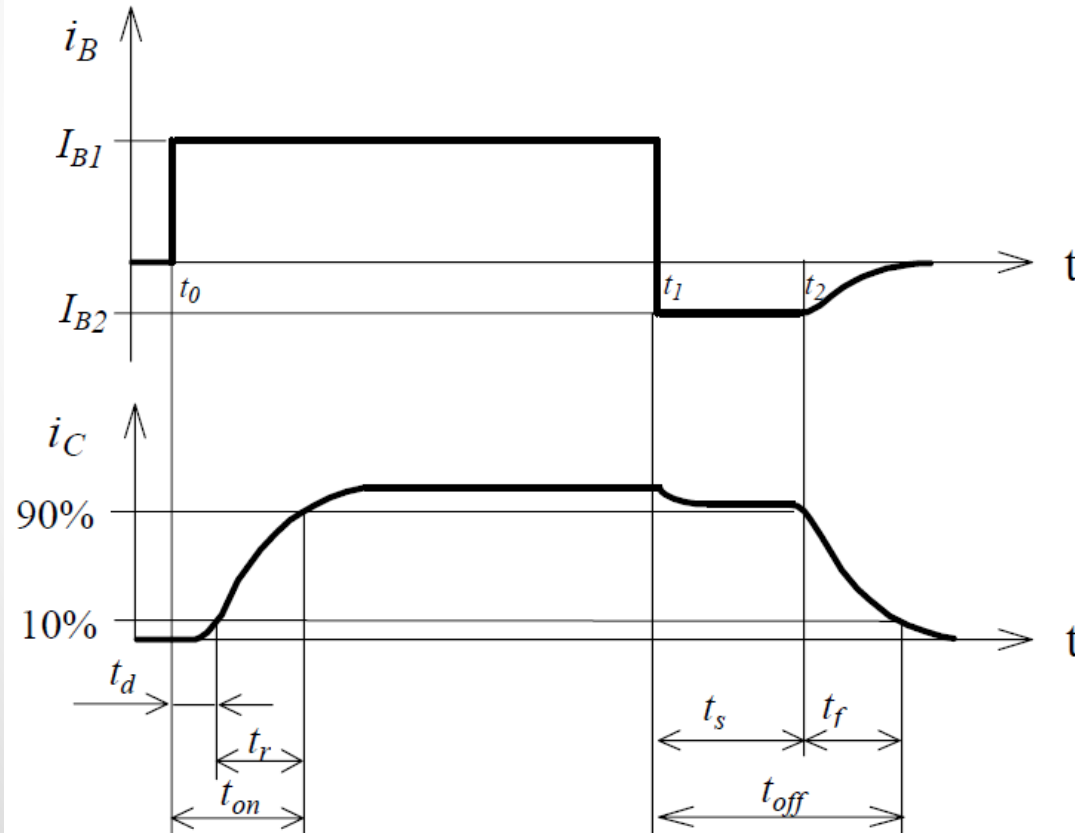


3dB-es töréspont!



Bipoláris tranzisztor kapcsolóüzeme

Ha a tranzisztor bázis-emitter átmenetének igénybevétele olyan, hogy statikus állapotban a munkaegyenesen a munkapont csak a telítési (*szaturáció*), vagy csak a zárási tartományban alakulhat ki, akkor a tranzisztor kapcsoló üzemmódban működik.



- t_r : felfutási idő (rise time)
- t_f : lefutási idő (fall time)
- t_d : késési idő (delay time)
- t_s : tárolási idő (storage time)

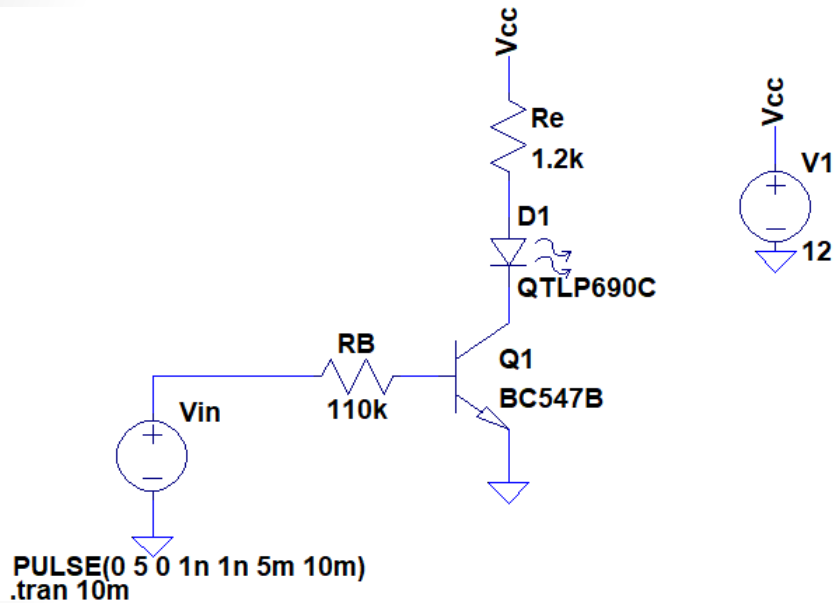
Bipoláris tranzisztor kapcsolóüzeme

- Mit szeretnénk elérni?
 - Rövid be és kikapcsolási idő
 - Kis veszteség
- Előnyös tulajdonságok:
 - Kis vezérlőteljesítmény
 - Rövid kapcsolási idők (μs)
 - Periodikus kapcsolásra alkalmas
 - Bekapcsolt állapotban kis ellenállás ($\text{m}\Omega$ nagyságrendű), illetve kis szaturációs feszültség
 - Kikapcsolt állapotban nagy ellenállás ($\text{M}\Omega$ nagyságrendű)

Mi is az a szaturációs feszültség?  Telítési üzemmód esetén a V_{CE} feszültség nem 0V. Ez katalógusadat. Például 2N3055 esetén:

Collector-Emitter Saturation Voltage ($I_{\text{C}} = 4.0 \text{ Adc}$, $I_{\text{B}} = 400 \text{ mAdc}$) ($I_{\text{C}} = 10 \text{ Adc}$, $I_{\text{B}} = 3.3 \text{ Adc}$)	$V_{\text{CE(sat)}}$	-	1.1 3.0	Vdc
--	----------------------	---	------------	-----

Bipoláris tranzisztor kapcsolóüzemben –példa-



- Adatok:

- LED feszültség: $V_{LED} = 1,8V$
- LED áram: $I_{LED} = 10mA$
- Kapcsolási frekvencia:
 $f_{sw} = 1kHz$
- Kitöltési tényező: $D = 0,5$
- $U_{BE} = 0,756V$
- $\beta = 175$

- A LED előtét ellenállása:

- $$R_e = \frac{V_{CC} - V_{LED}}{I_{LED}} = \frac{12V - 1,8V}{10mA} \cong 1k\Omega$$

- R ellenállás méretezése:

- $$R_B = \frac{V_{in} - V_{BE}}{\frac{I_C}{(1+\beta)}} = \frac{5V - 0,756V}{\frac{10mA}{175}} \cong 75k\Omega$$

- Kapcsolóüzem ellenőrzése:

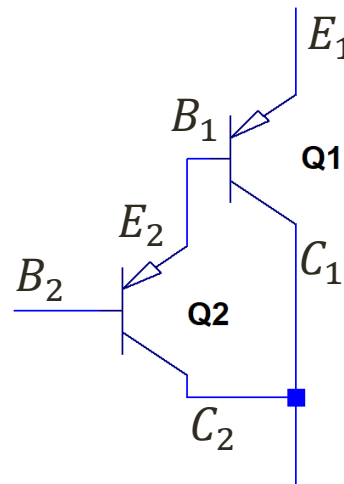
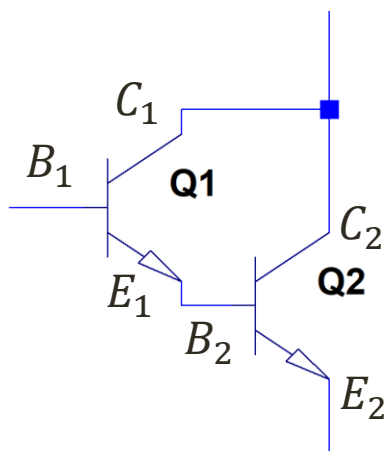
- $U_{BE} = 0,756 > 0$

- $U_C = V_{CC} - V_{Re} - V_{LED} = 12V - 10mA \cdot 1k\Omega - 1,8V = 0,2V$

- $U_B = 0,756V > V_C = 0,2V$

Darlington kapcsolás

- Darlington kapcsolás esetén több paramétert is előnyösen befolyásolhatunk:
 - Az eredő h_{11} paraméter (bemeneti ellenállás) növekszik
 - Az áramerősítési tényező (β) összeszorzódik ($h_{21}^{(Q1)} \cdot h_{21}^{(Q2)}$)
 - (Az eredő disszipáció megoszlik a tranzisztorok között)
- Darlington kapcsolás esetén azonos típusú tranzisztorokat kapcsolunk össze
- A későbbiekben látni fogjuk, hogy ez a megoldás térvezérlésű tranzisztorok esetén is működik, illetve hibrid formában is:
 - Bemenet: Térvezérlésű tranziszzor
 - Kimenet: Bipoláris tranzisztor



Térvezérlésű tranzisztorok

Záróréteges J-FET (junction
Field-Effect Transistor)

Szigetelt vezérlőelektrodás MOSFET
(Metal-Oxide-Semiconductor Field-
Effect Transistor)

N-csatornás

P-csatornás

Kiürítéses

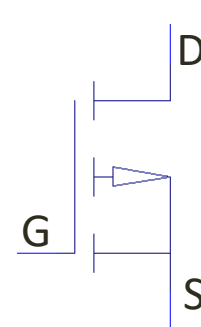
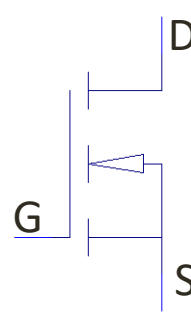
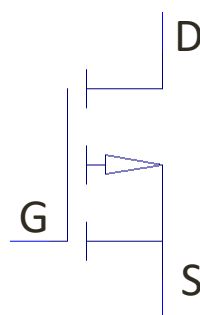
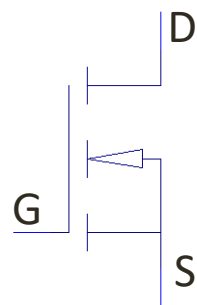
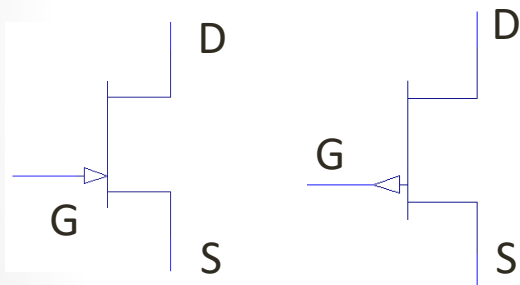
Növekményes

N-csatornás

P-csatornás

N-csatornás

P-csatornás



G – GATE (kapu)

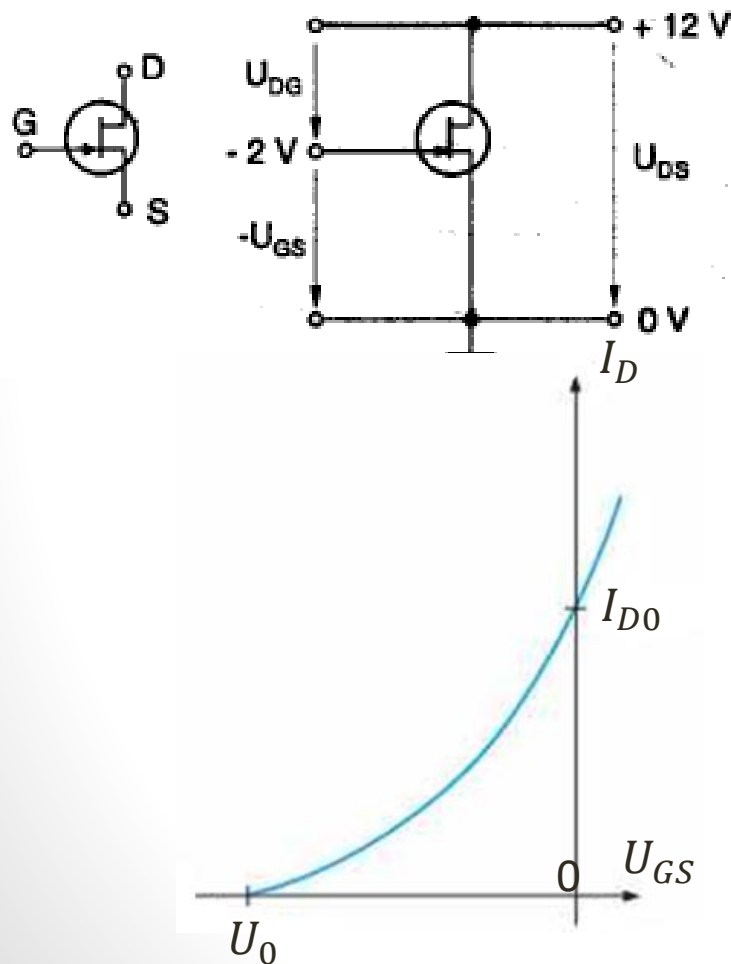
S – SOURCE (forrás)

D – DRAIN (nyelő)

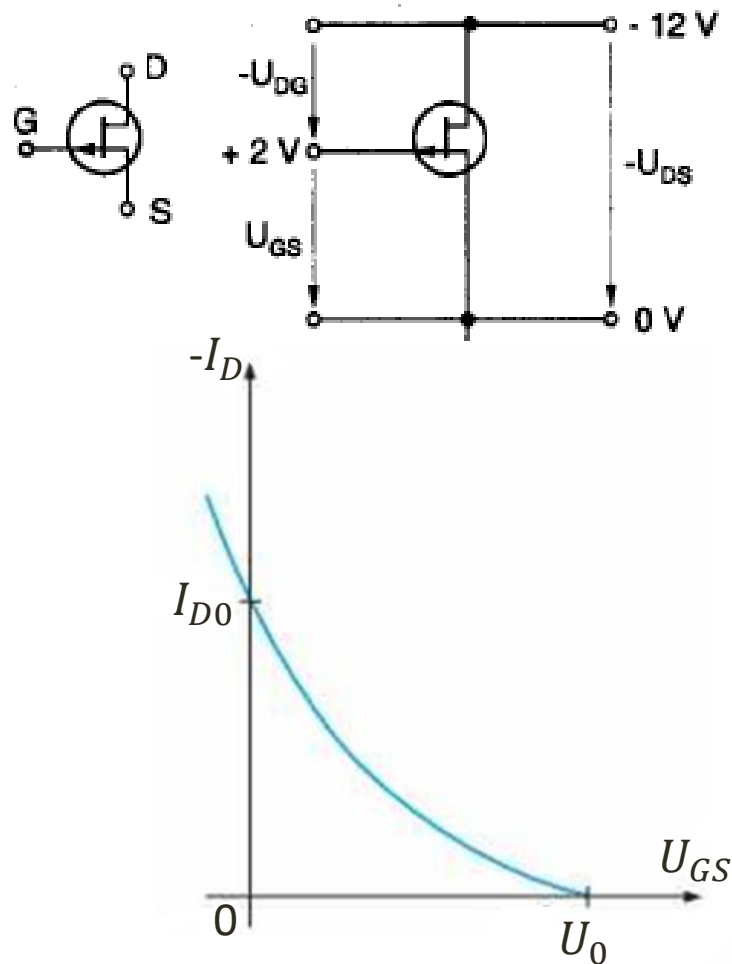
FESZÜLTÉSÉGEL vezéreltek (GS lábakon!)

j-FET (Field-Effect Transistor)

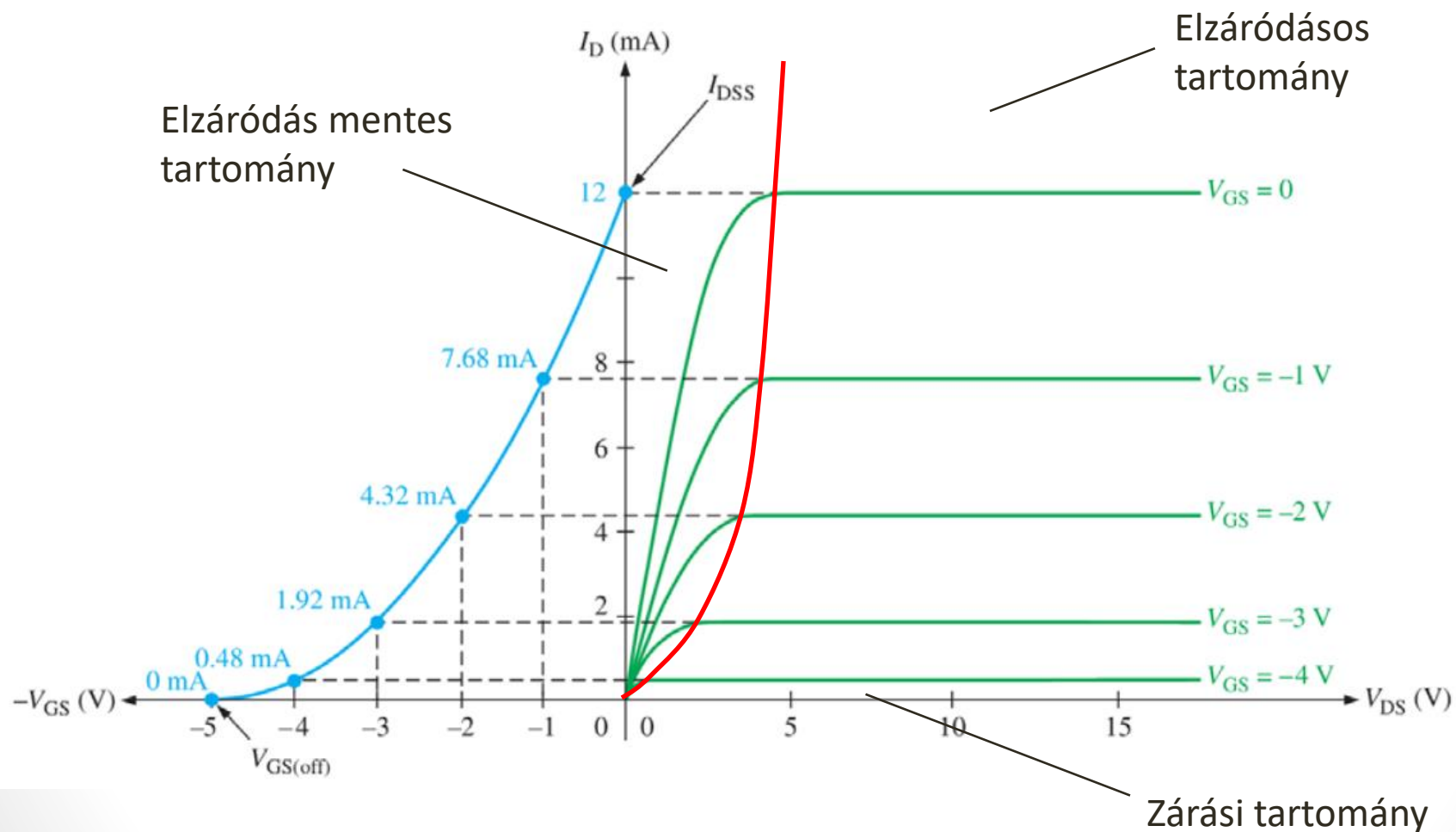
N CSATORNÁS



P CSATORNÁS



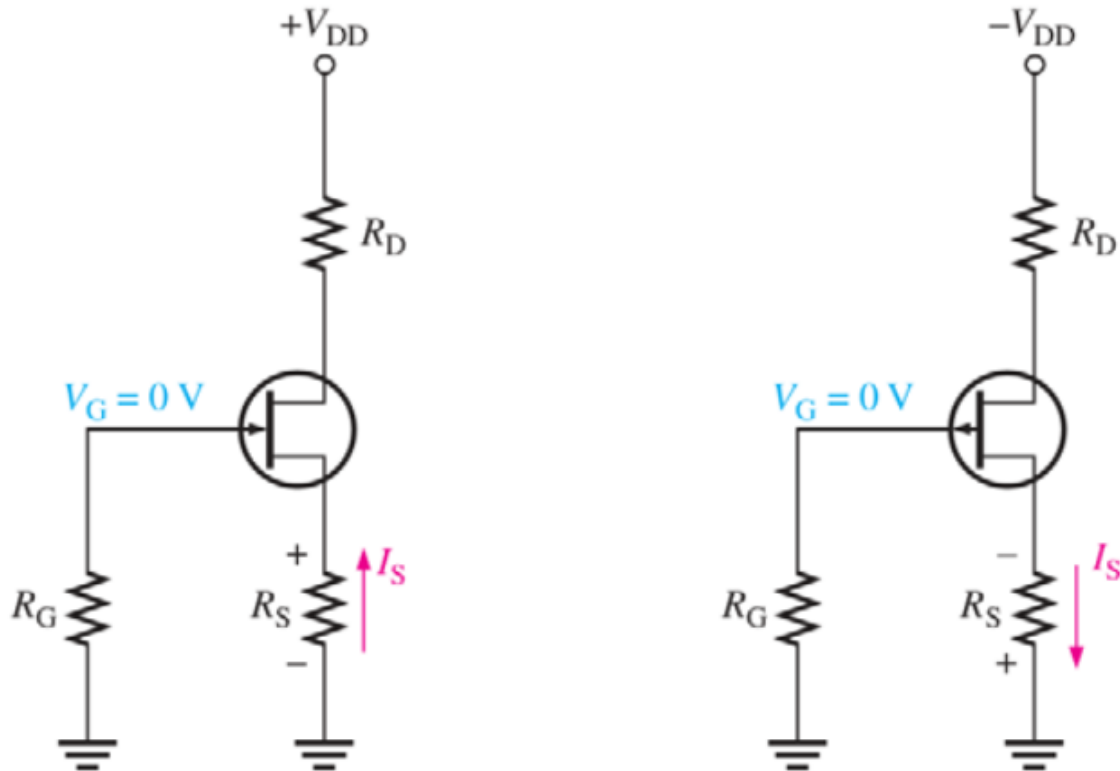
Karakterisztika (N-típusú)



Bemeneti karakterisztika

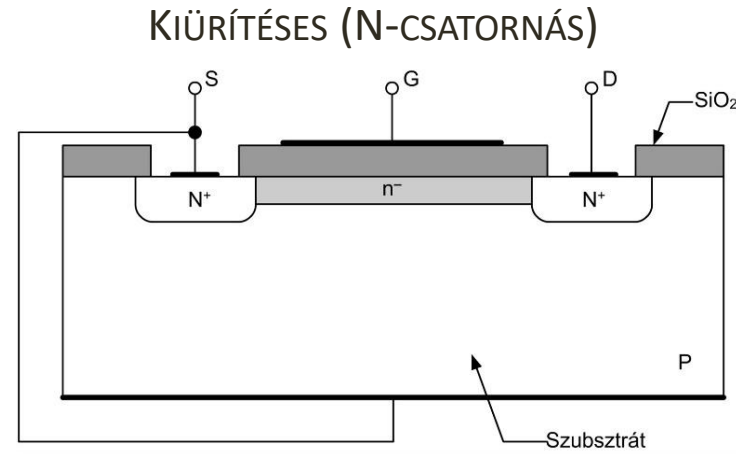
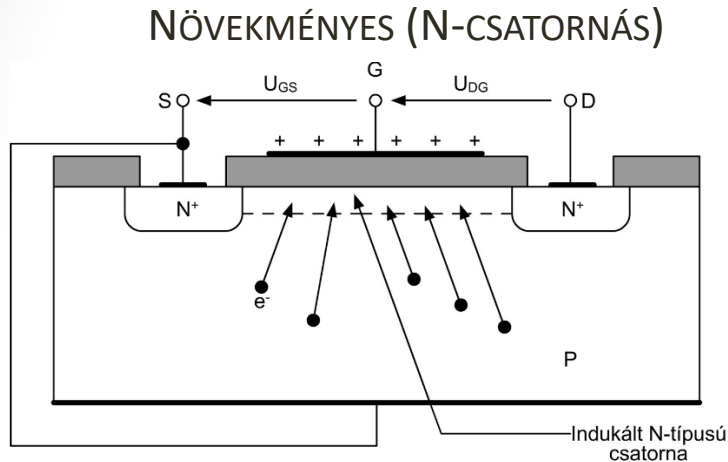
Kimeneti karakterisztika

Munkapontbeállítás



- R_G általában egy nagy értékű ($\text{M}\Omega$) nagyságrendű ellenállás

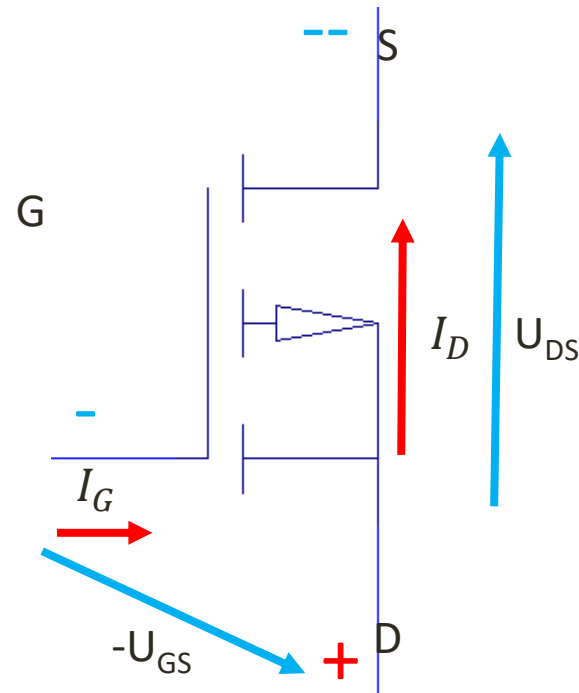
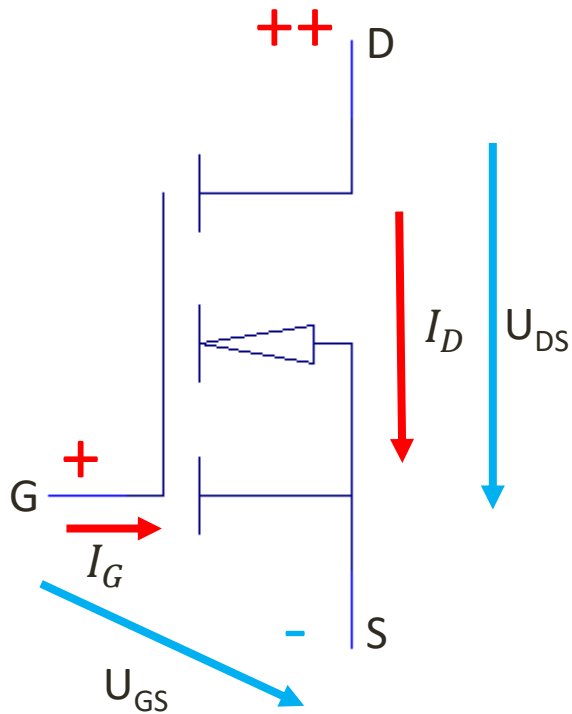
MOSFET: Kiürítéses, növekményes?!



- A G (gate) elektróda galvanikusan el van választva a szubsztráttól, egy SiO₂ szigetelőréteggel: a vezérlést az elektromos tér hozza létre (feszültséggel vezérelt eszközök)
- Növekményes, vagy önzáró MOSFET esetén megfelelő előfeszítést alkalmazva a Drain-Source csatornát létrehozuk: az előfeszítés mértékének megfelelően a szubsztrátban lévő kisebbségi töltéshordozók az SiO₂ szigetelőréteghez vándorolnak
- Kiürítéses, vagy önvezető MOSFET esetén, a logika fordított

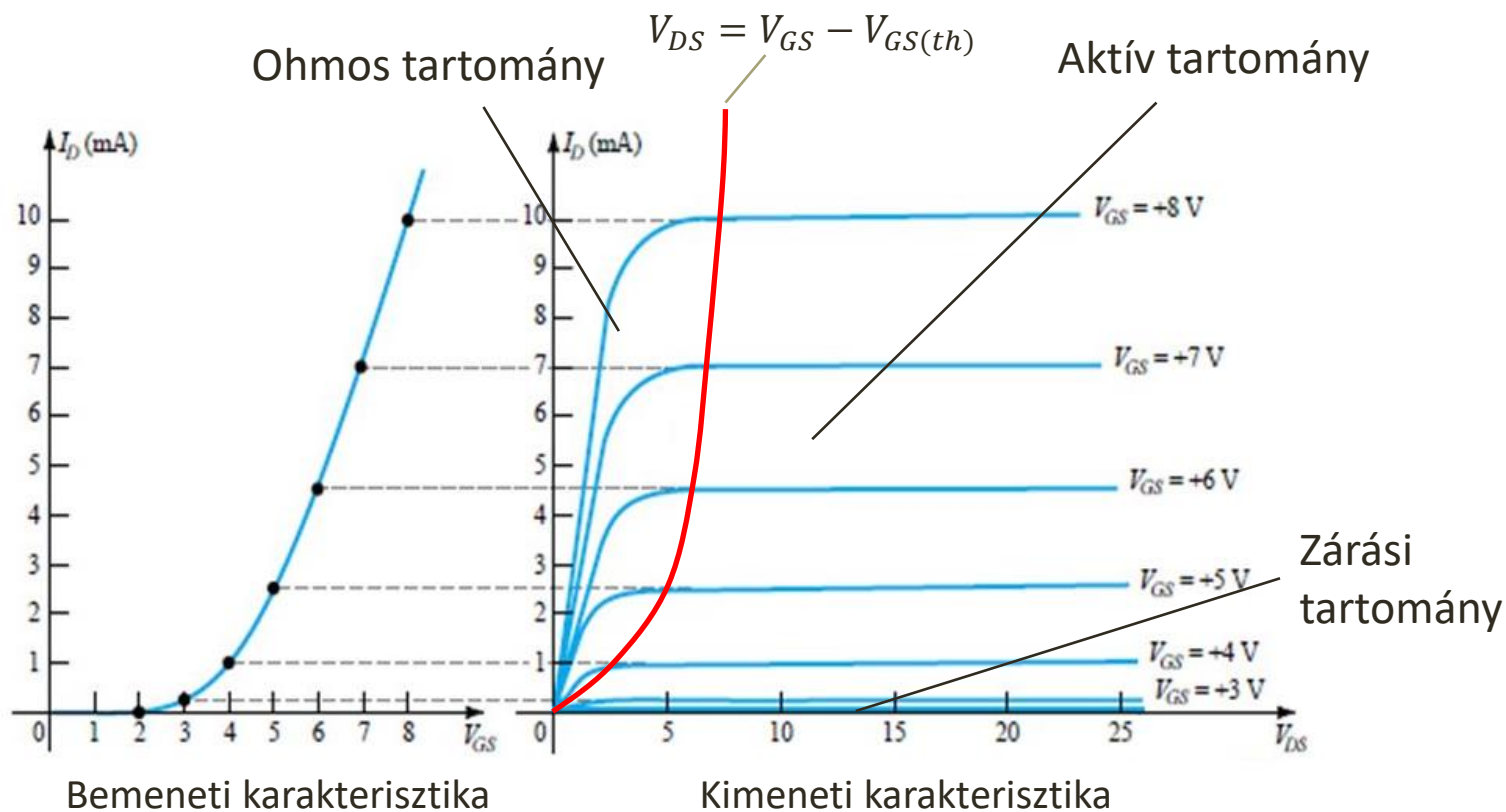
MOSFET előfeszítés normál aktív üzemódban

N-MOS



P-MOS

MOSFET karakterisztika (N-típusú)

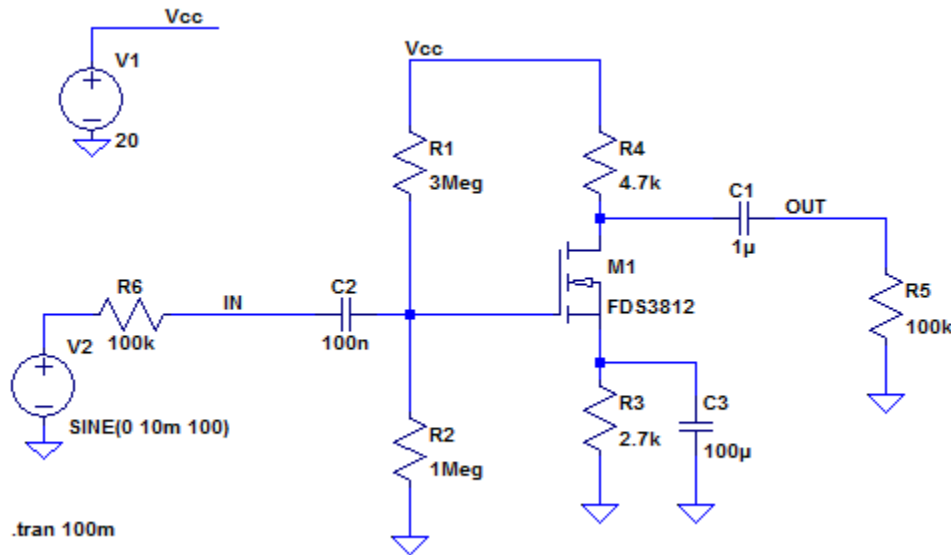


Normál aktív üzemmód: $0 < V_{GS} - V_{GS(th)} < V_{DS}$

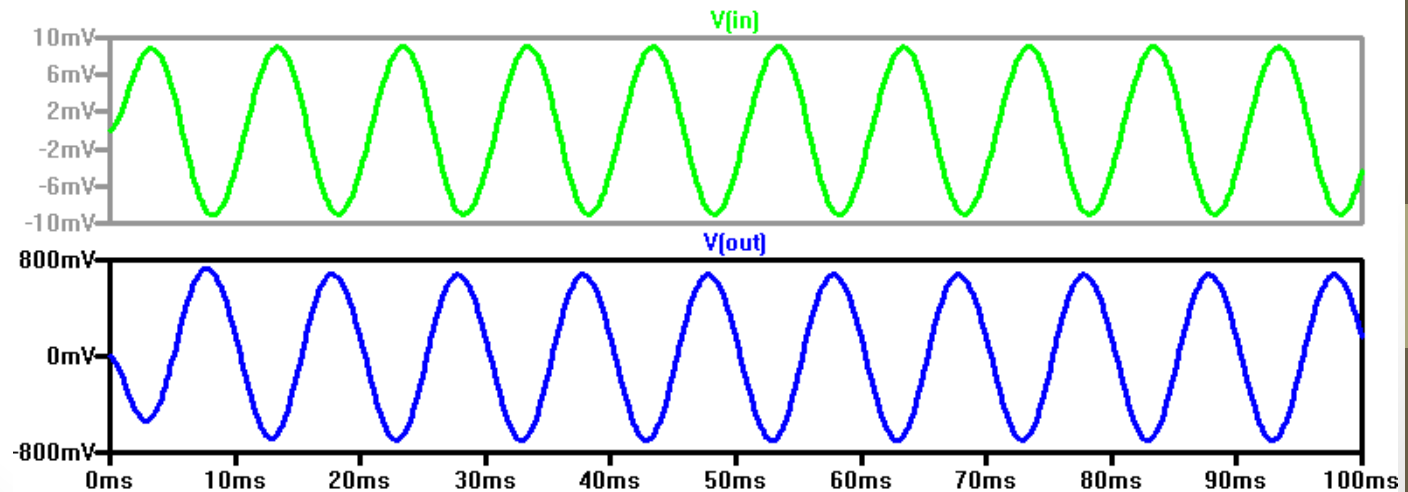
Zárási üzemmód: $V_{GS} - V_{GS(th)} < 0$

Kapcsolóüzem: $0 < V_{DS} < V_{GS} - V_{GS(th)}$

MOSFET normál aktív üzemmód

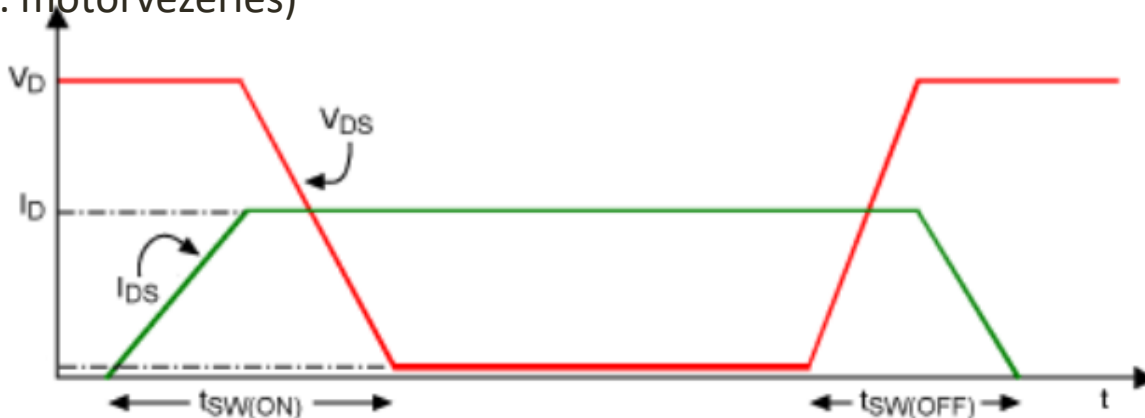
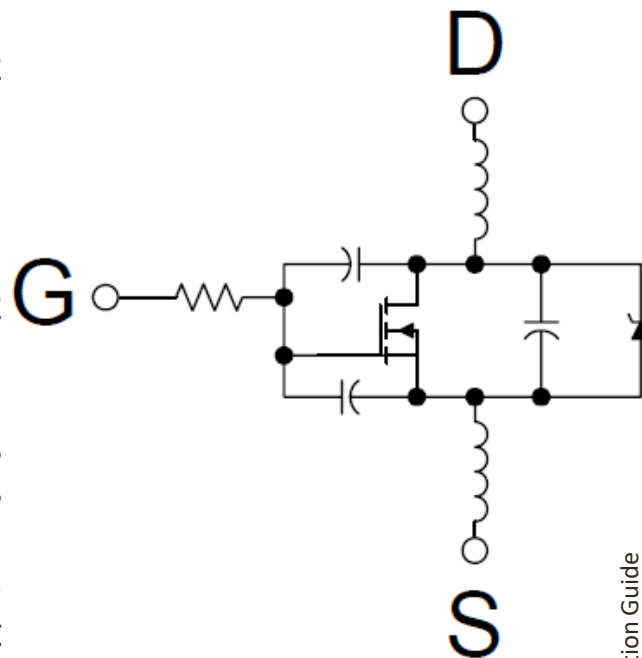


- A tranzisztor munkapontja az normál aktív tartományba van beállítva
- Alapkapcsolások
 - Közös source-ú
 - Közös drain-ű
 - Közös gate-ű



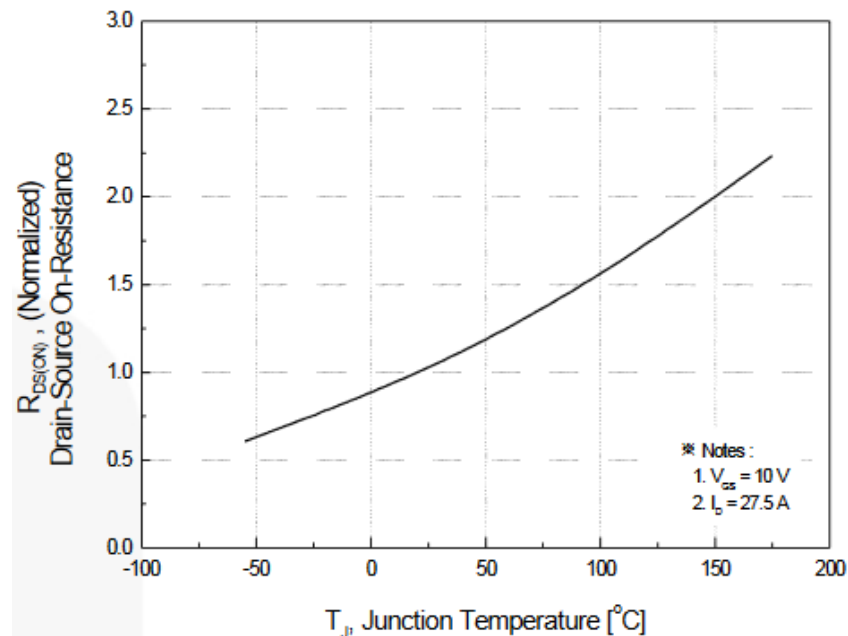
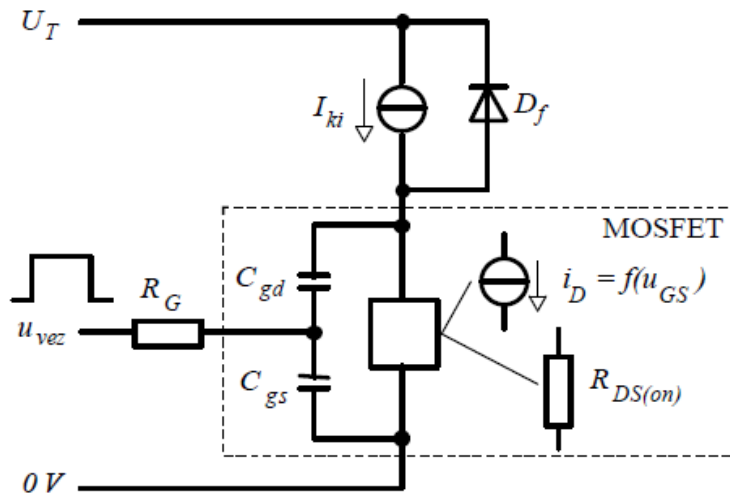
MOSFET kapcsolóüzemben

- Kapcsolóüzemű igénybevétel esetén a MOSFET az ohmos illetve a zárasi tartományban üzemel, hasonlóan a bipoláris tranzisztorhoz
- MOSFET segítségével sokkal nagyobb kapcsolási frekvenciát is elérhetünk (akár több száz kHz)
- Mivel a kapcsolást az elektromos tér hozza létre, így az eszköz kapacitásai kapcsolóüzemű igénybevétel esetén fontos szerepet játszanak
- Vezető állapotban a Drain-Source csatorna egy Ohmos ellenállással reprezentálható (innen jön az elnevezés is: ohmos tartomány): $R_{DS(on)}$
- A struktúra tartalmaz egy parazita (body, vagy test) diódát is, mely számos esetben hasznos funkciót láthat el (pl.: motorvezérlés)

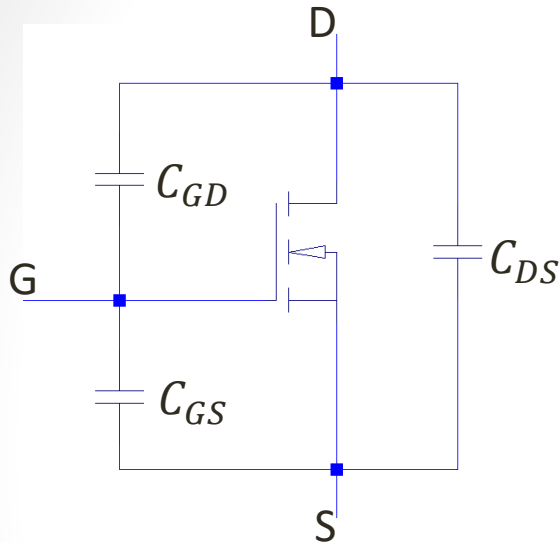


Csatornaellenállás ($R_{DS(on)}$)

- Ha a MOSFET az ohmos tartományban működik (kvázi teljesen nyitva van) a Drain-Source csatorna egy ohmos jellegű ellenállással reprezentálható
- Ez tipikusan $m\Omega$ - Ω nagyságrendbe estik, értékét az adatlap definiálja
- Az $R_{DS(on)}$ ellenállás hőmérsékletfüggő és pozitív tékájú (növekvő hőmérsékletre növeli az ellenállását)
- Ez a MOSFET-ek párhuzamosítása során egy előnyös tulajdonság lesz, továbbá nagyban egyszerűsíti a vezetési veszteség kiszámítását.



MOSFET kapacitásai



- Az eszköz legfontosabb kapacitásai:

- $C_{iss} = C_{GS} + C_{GD}$ Bemeneti kapacitás

- $C_{oss} = C_{DS} + C_{GD}$ Kimeneti kapacitás

- $C_{rss} = C_{GD}$ Átmeneti kapacitás

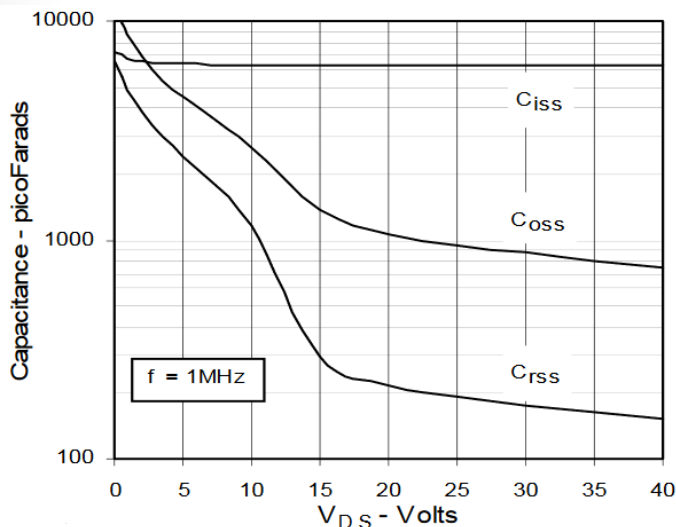
- CGD további két részkapacitásra bontható:

- $C_{GD} = C_{GD1} + C_{GD2}$

- Az értékváltás az ohmos tartomány határán történik

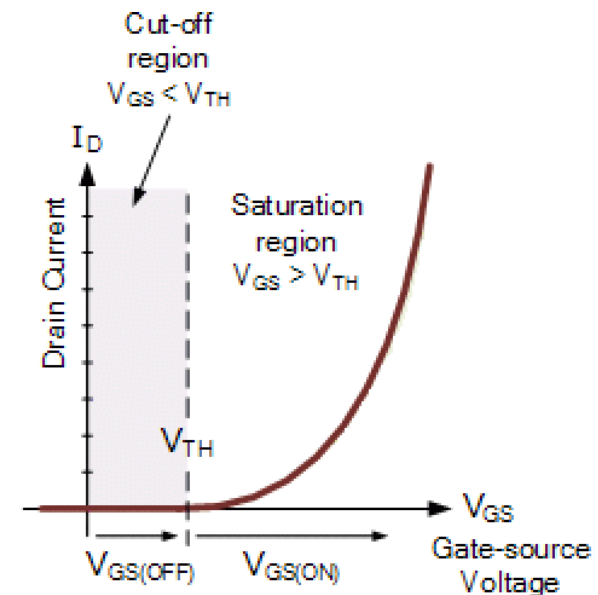
- A kapacitások hőmérsékletfüggetlenek, de nagyban függenek a feszültségtől

- A be és kikapcsolási folyamatok során a meghatározott kapacitásokat kell kisütni: töltéseket kell mozgatni, ezt a töltésnagyságot a gyártó a félvezető adatlapján Q_g -vel, vagy Q_{sw} -el jelöli



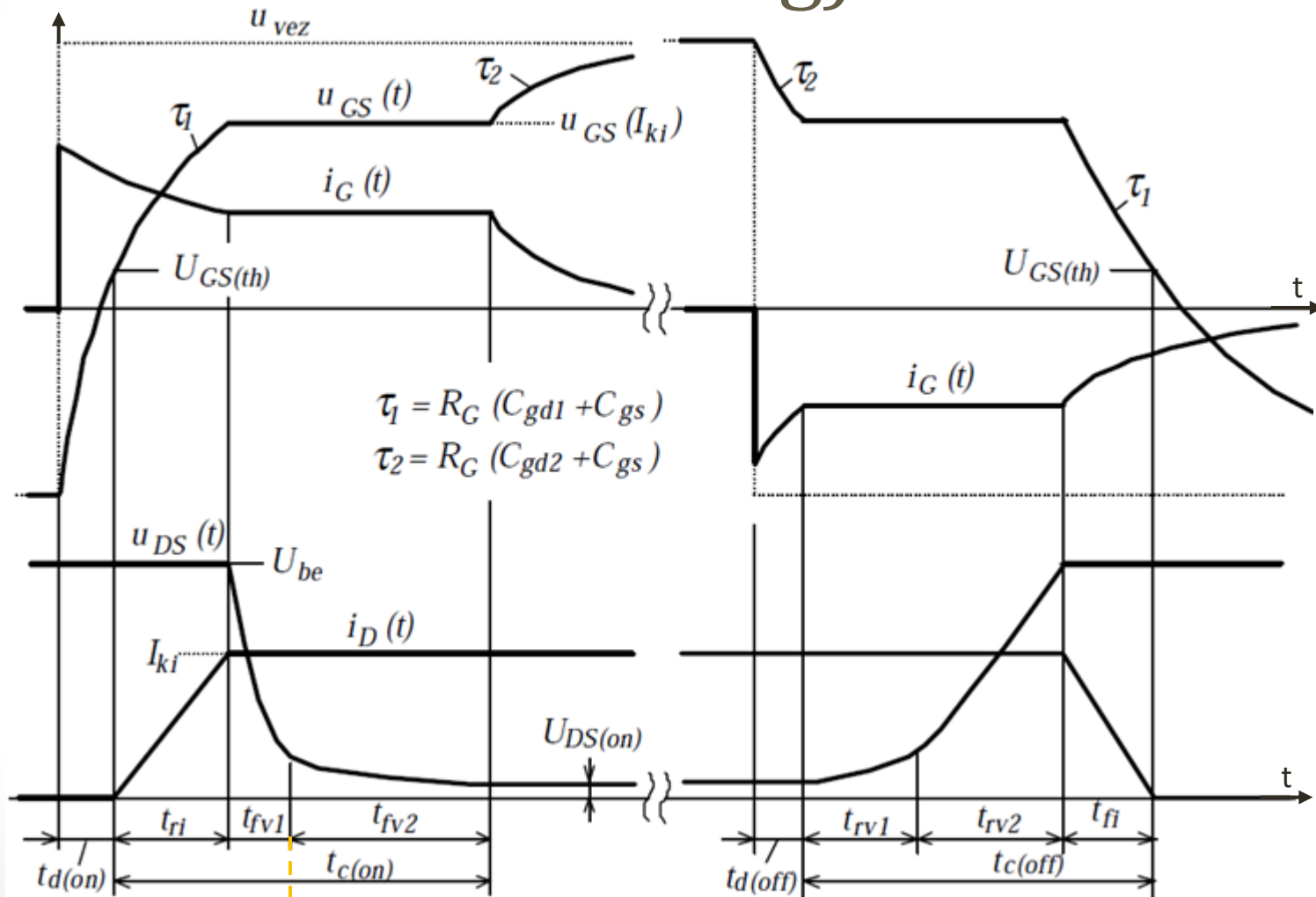
MOSFET küszöbfeszültsége (Threshold voltage)

- Térvezérlési tranzisztorok (feszültségvezérelt jellegű bemenet) esetén) definiálható egy minimális feszültség, mely esetén a tranzisztor vezető állapotba kerül, ezt küszöbfeszültségnek nevezzük (threshold voltage (V_{th}))
- Ez a feszültség típusonként eltérő, az adatlap specifikálja
- Gyakorlati szempontból ennél mindig nagyobb feszültséget alkalmazunk a bekapcsolás során (gate meghajtó)
- Kikapcsoláskor nagyon gyakran alkalmaznak negatív feszültséget, a gyorsabb kikapcsolás érdekében



	Si-MOSFET	IGBT**	SiC-MOSFET	GaN Transistor
Küszöbfeszültség	1-4V	about 4V	about 3V	1-2V
Maximum V_{GS}	$\pm 20V$	$\pm 20V$	$\pm 25V$	-10V/+7V
Tipikus meghajtó feszültség ($V_{GS(on)}/V_{GS(off)}$)	0V/10-12V	-8V/+15-18V	-4V/+15-20V	0 or -3V/5-6V

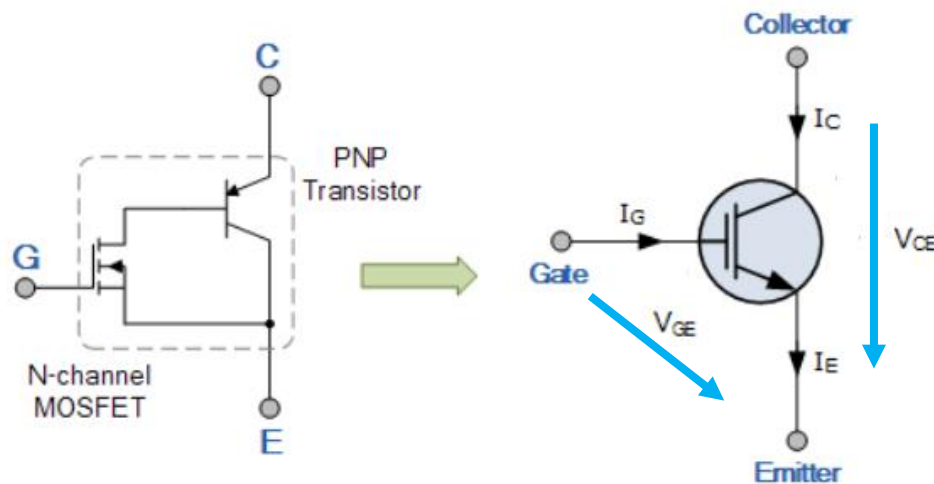
MOSFET kapcsolási folyamatai (Hard switching)



Ohmos tartomány határa

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

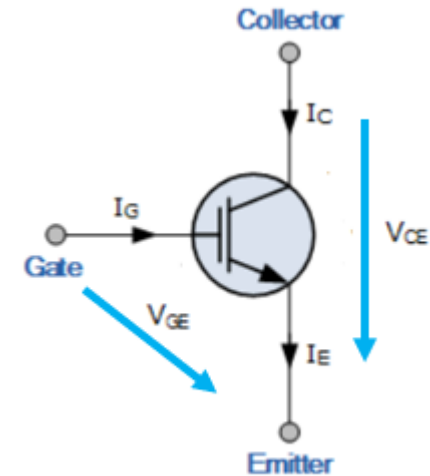
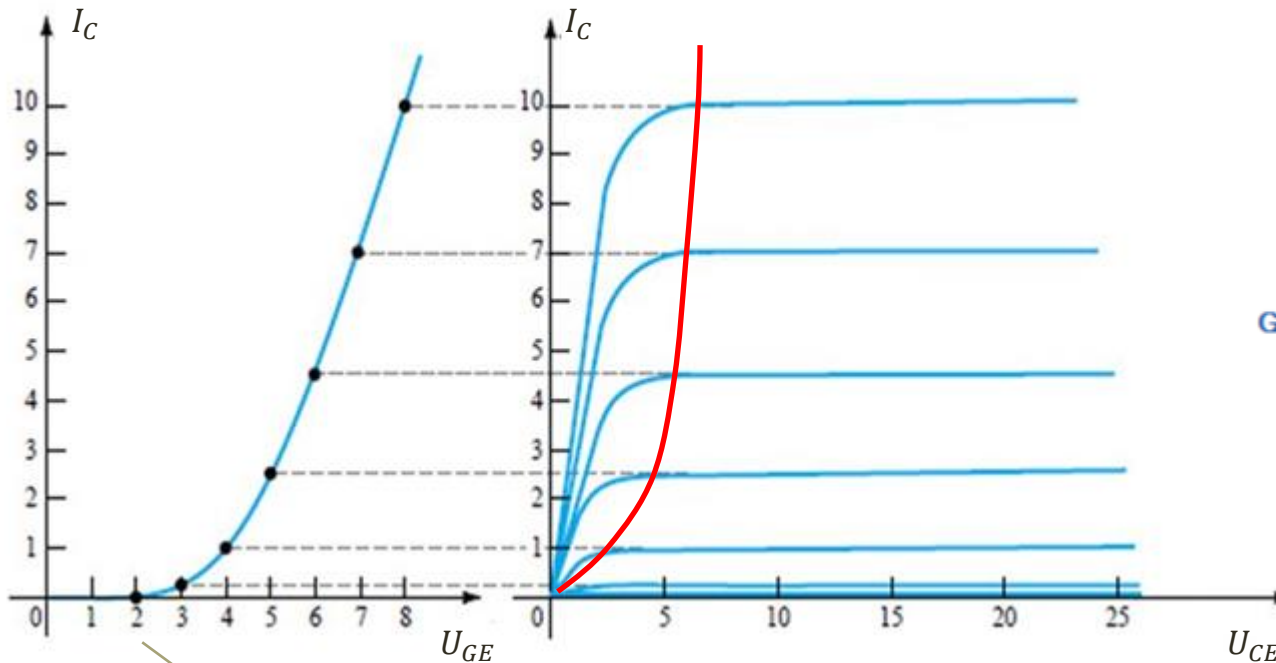
- A MOSFET és a bipoláris tranzisztor „keveréke”, mindkettő előnyös tulajdonságait egyesíti:
 - A bipoláris tranzisztornak kisebb a vezetési vesztesége, illetve nagyobb a feszültségzáró képessége
 - A MOSFET-ek feszültséggel vezérelhetők (kisebb vezérlőteltjesítmény), illetve a nagyobb kapcsolási sebesség érhető el velük
- További előnyös tulajdonságai között megemlíthető:
 - Nagy bemeneti impedancia
 - Alacsony szaturációs feszültség
- Tehát az IGBT bemenetét tekintve egy MOSFET, kimenetét tekintve egy bipoláris tranzisztor
- A szimbolikus rajzon általában a belső dióda nincs jelölve



$$I_C \cong I_E$$

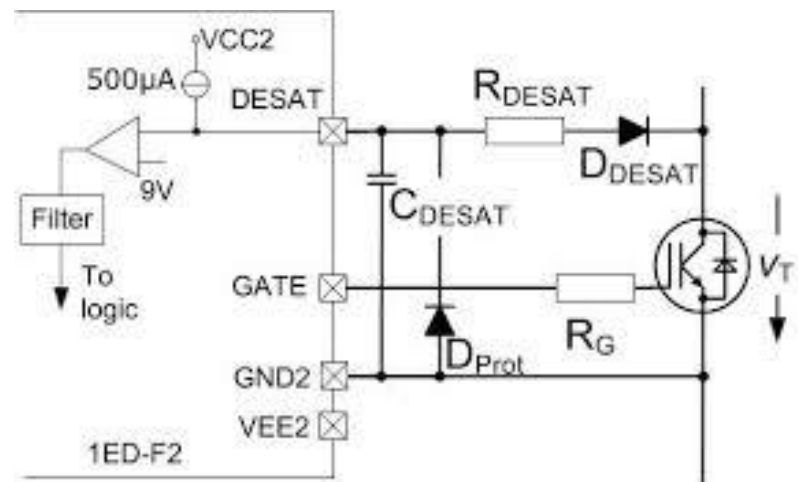
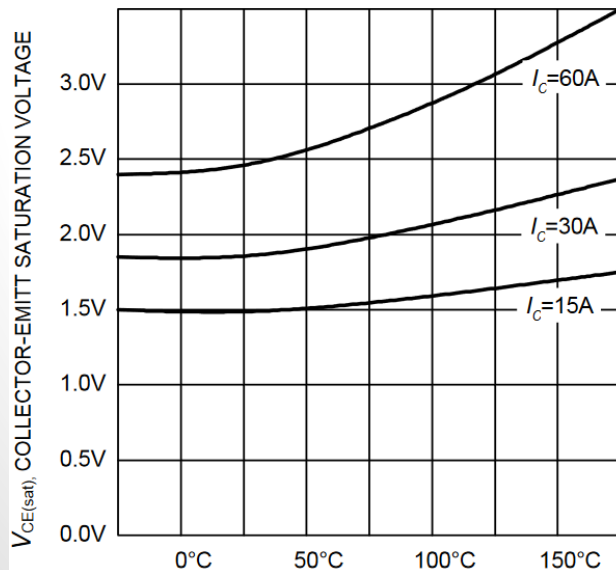
IGBT működése, jelleggörbe

- Bipoláris tranzisztorok esetén (BJT) a bemenet áramvezérelt, a kimeneti és a bementi áram között az áramerősítési tényező (β) teremt kapcsolatot
- Térvezérlésű tranzisztor esetén nincs bemeneti áram (elhanyagálhatóan kicsi), a vezérlő elektróda el van szigetelve a szubsztráttól, a vezérlést az elektromos tér hozza létre (feszültséggel vezérelt jelleg)
- A kimeneti bipoláris tranzisztor bázisáramát tehát egy térvezérlésű tranzisztor biztosítja
- Természetesen az IGBT ugyanúgy használható kisjelű (normál aktív) erősítő elemként, illetve kapcsolóüzemben is



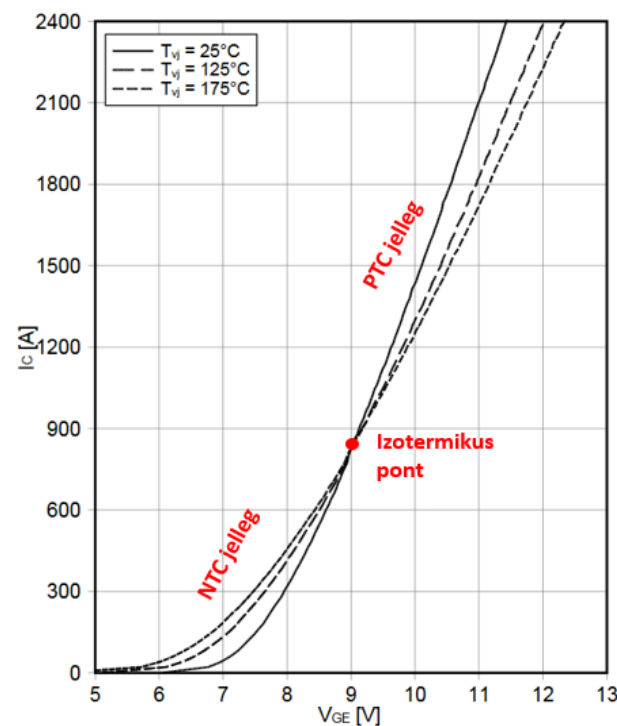
IGBT speciális igényei (deszaturációs védelem)

- Az adatlap minden esetben megadja a félvezetőn átfolyatható áram maximális értékét
- Megadja továbbá a szaturációs feszültség értékét is. Ez az a feszültség, amely kapcsolóüzem esetén a collector-emitter kivezetések között mérhető (kvázi a félvezető drop feszültsége). Ez tipikusan néhány volt, és a kristály hőmérsékletének növekedésével nő (bal oldali ábra)
- Amennyiben a megengedett áramerősséget túllépjük, a félvezető károsodik, tönkre megy
- A legtöbb IGBT-re specializált gate meghajtó áramkör tartalmaz ilyen jellegű védelmet, mely néhány passzív alkatrész segítségével beállítható



Félvezetők párhuzamosítása

- A gyakorlatban nagy terhelőáramok esetén a félvezetőket párhuzamosítják (gondoljunk a párhuzamos ellenállásokra!)
- Ezzel gyakorlatilag megoszlik a teljes hődisszipáció a félvezetők között, illetve a rendszer redundanciája növekszik
- MOSFET-ek esetén a párhuzamosítást a csatornaellenállás ($R_{DS(on)}$) pozitív hőmérsékleti együtthatója (PTC) nagyban megkönnyíti: növekvő hőmérsékletre a csatornaellenállás nő, így egy önszabályozási mechanizmus játszódik le (Ha egy MOSFET nagyobb áramot vezet, akkor a hőmérséklete is nagyobb lesz. A növekvő ellenállás az áramot visszakényszeríti egy kisebb hőmérsékletű IGBT-re.)
- IGBT-k esetén a helyzet némiképp komplikáltabb. Két mennyiséget kell figyelembe venni:
 - Szaturációs feszültséget
 - Illetve az $V_{GE}-I_D$ transzfer karakterisztikát
- Az utóbbi karakterisztika tartalmaz egy izotermikus pontos. E felett a félvezető PTC jelleget, ez alatt NTC mutat. Tervezés során a PTC jelleg megtartására kell törekedni



Félvezetők jelölésrendszere

- **Az első betű**

- A - Germánium
- B - Szilícium
- C – Vegyület félvezető

- A harmadik betű opcionális (X, Y, Z, V, W)

- Az amerikai jelölés gyakran az 1N (dióda) és 2N (tranzisztor) jelölést használja)

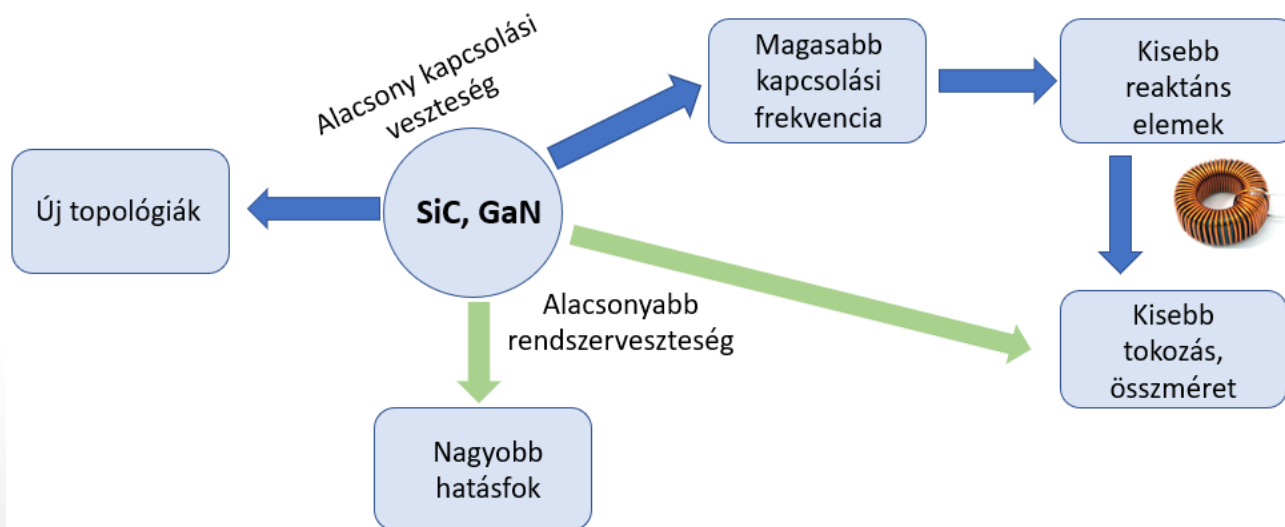
- Pl. 2N3055, BDY73, 1N4148, BZ102

- **A második betű**

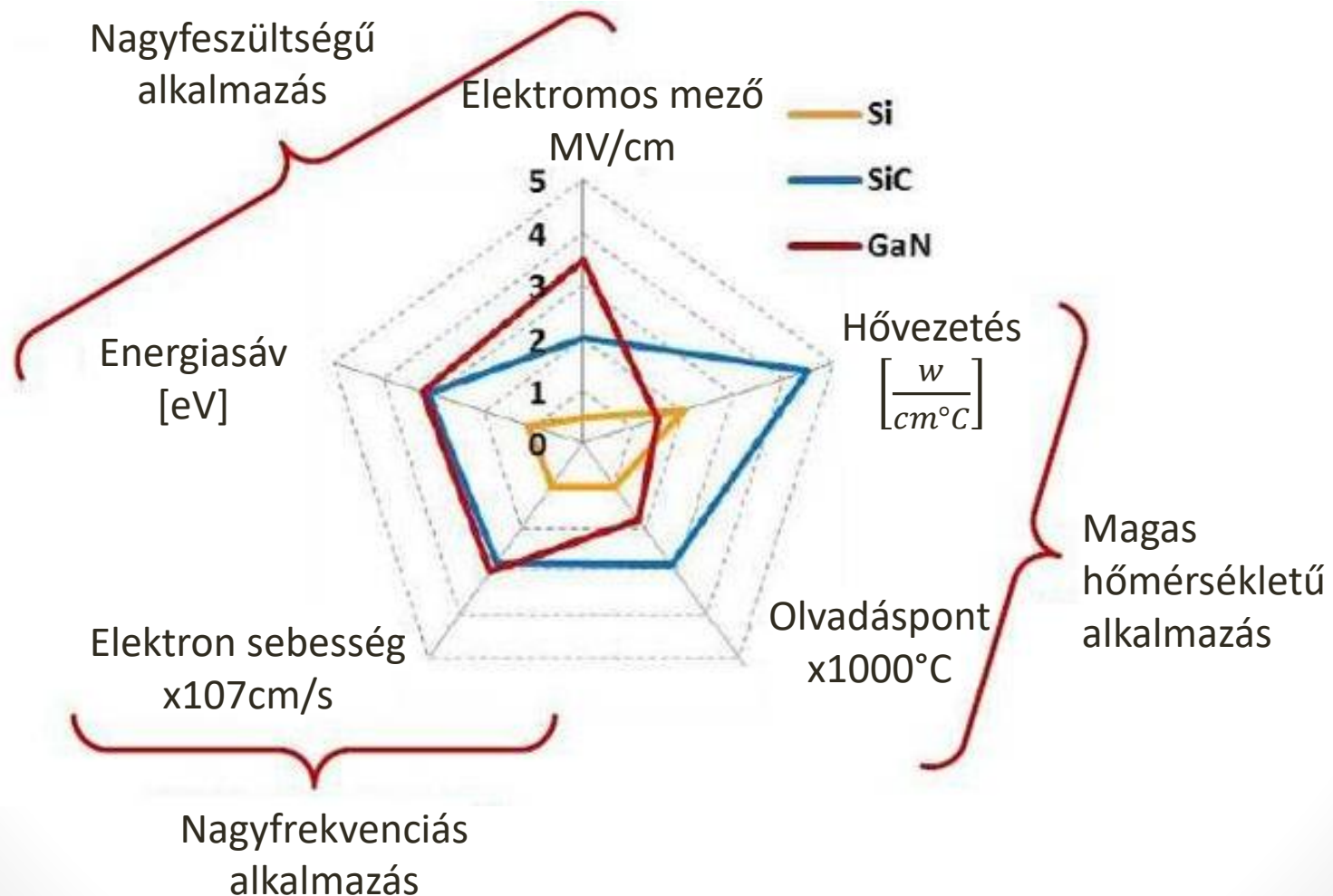
- A - dióda,
- B - dióda,
- C - általános célú, kisteljesítményű, kisfrekvenciás tranzisztor,
- D - általános célú, nagyteljesítményű, kisfrekvenciás tranzisztor,
- E - Tunnel (Esaki) dióda,
- F - nagyfrekvenciás, kisteljesítményű tranzisztor,
- L - nagyfrekvenciás, nagyteljesítményű tranzisztor,
- P - sugárzásérzékeny eszköz, fotódióda, fotótranzisztor,
- Q - sugárzó, fényemittáló eszköz, LED,
- R - vezérelhető egyenirányító,
- S - kapcsolótranzisztor,
- T - vezérelhető nagyteljesítményű egyenirányító,
- U - nagyteljesítményű kapcsolótranzisztor,
- Y - egyenirányító dióda,
- Z - Zener-dióda.

Modern félvezetők: SiC MOSFET, GaN (wide bandgap semiconductors)

- Napjaink nagyáramú, nagy feszültségű (nagyteljesítményű) berendezéseiben többnyire IGBT-t használnak kapcsolóelemnek (frekvenciaváltók). Ezek előnyös tulajdonságok, de cserébe az IGBT alapú kapcsolóüzemű áramkörök alacsonyabb kapcsolási frekvencián képesek működni
- Napjainkban egyre nagyobb teret hódítanak a szélessávú (wide bandgap) félvezetők:
 - SiC (Silicon Carbide)
 - GaN (Gallium-Nitride)
- A következő generációs félvezetők estén a kulcs a magas kapcsolási frekvencia

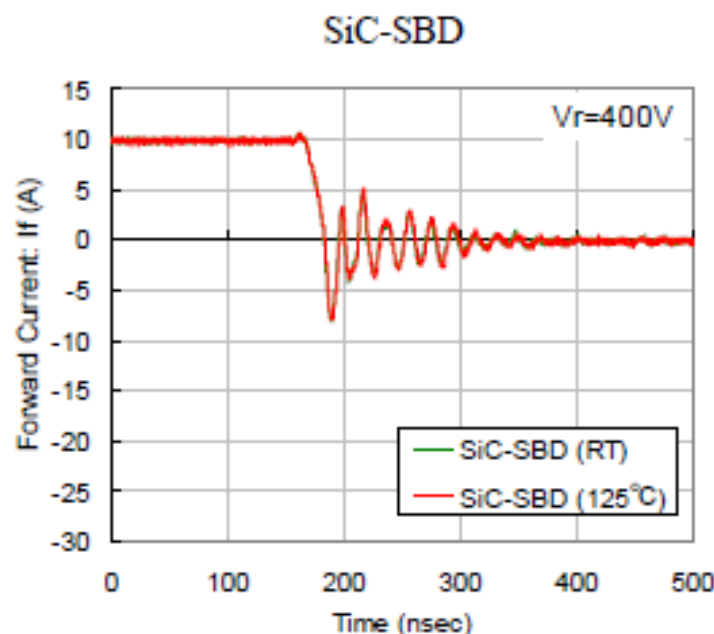
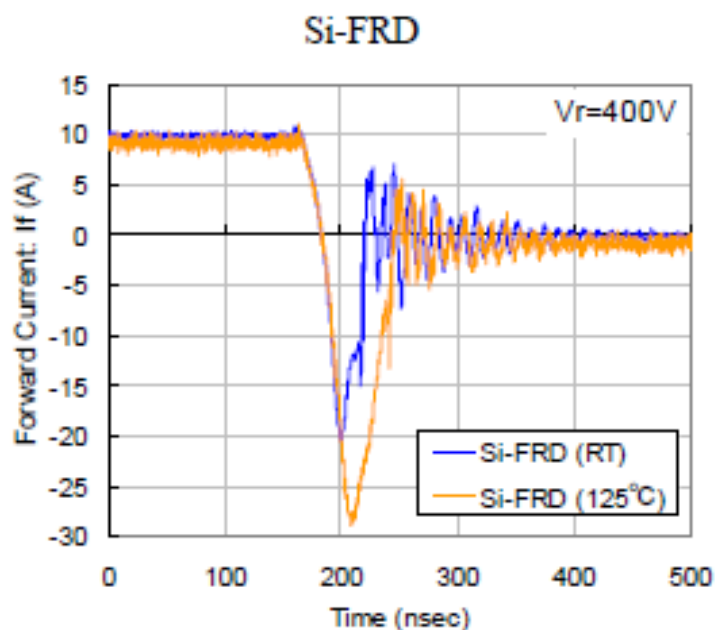


Wide bandgap semiconductors



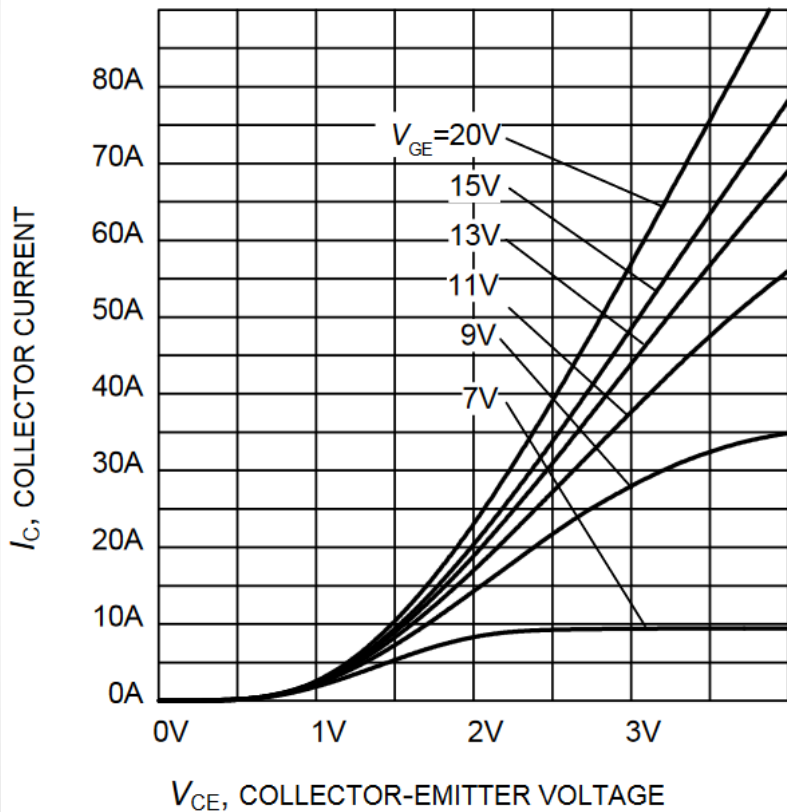
SiC alapú félvezetők

- Összehasonlítva az Si alapú IGBT-vel egy számos kedvező előnnyel rendelkezik:
 - Nagyobb letörési feszültség
 - Jobb hőmérsékleti tulajdonságok (akár 200°C üzemi hőmérséklet)
 - Egységnyi területre vett ellenállása kisebb
 - Nagyobb sávszélesség
 - Kisebb veszteség

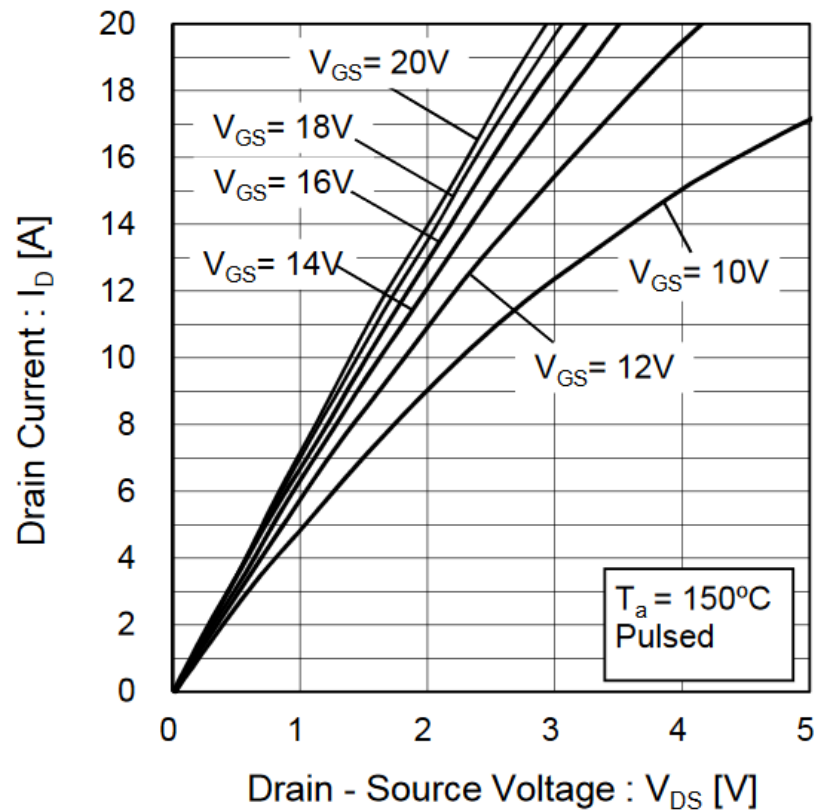


Vezetésből zárásba való átmenet (dióda)

$V_{CE}-I_C$, $V_{DS}-I_D$ karakterisztikák összehasonlítása



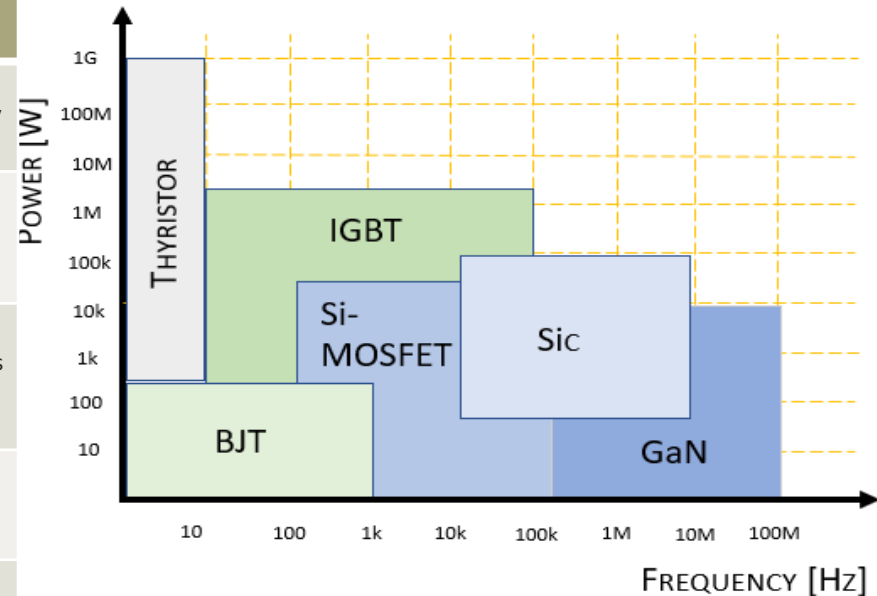
IHW30N160R2 IGBT



SCT2080KEHR SiC MOSFET

Összefoglalás, áttekintés

	MOSFET	IGBT	SiC-MOSFET	GaN E-HEMT
Letörési feszültség	Közepes <1kV	Magas >1kV	Magas >1kV	Közepes <1kV
Maximum áram (impulzus)	Közepes < 0,5kA	Extrém magas >1kA	Magas < 1kA	Közepes < 0,5kA
Kapcsolási frekvencia	Közepes ≥ 100kHz	Alacsony <100kHz	Közepes ≥ 100kHz	Extrém magas > 1MHz
Kapcsolási teljesítmény	Alacsony <500W	Extrém magas >1kW	Magas >1kW	Magas > 1kW
Maximális kristályhőmérséklet	Magas ~150°C	Magas ~150°C	Extrém magas ~200°C	Magas ~150°C
Veszteségek	Közepes	közepes	Alacsony	Extrém alacsony
Példa	Infineon IPW60R045CPA (600V@230A) 	Infineon FF1200R12IE5P (1200V@2400A) 	ROHM BSM600D12P3 G001 (1200V@600A) 	GaN Systems GS66516T (650V@144A) 



	Si-MOSFET	IGBT	SiC-MOSFET	GaN Transistor
Küszöbfeszültség	1-4V	kb. 4V	kb. 3V	1-2V
Maximum érték	±20V	±20V	±25V	-10V/+7V
Tipikus vezérlőfeszültség	0V/10-12V	-8V/+15-18V	-4V/+15-20V	0 vagy -3V/5-6V

Ajánlott irodalom

- Kovács Csongor: Elektronikus áramkörök
- N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, *Power Electronics – Converters, Applications, and Design*, John Wiley & Sons, inc., Canada, 1995.
- Dr. Borbély Gábor: Elektronika I., II.
- Dr. Iváncsyné Csepesz Erzsébet: TELJESÍTMÉNYELEKTRONIKA, A teljesítményelektronika kapcsolóelemei
- Badacsonyi Ferenc TELJESÍTMÉNYELEKTRONIKA, TELJESÍTMÉNYELEKTRONIKA KAPCSOLÓELEMEL
- Dr. Puklus Zoltán: Teljesítményelektronika
- Ferenczi Ödön: Kapcsolóüzemű tápegységek
- Balogh László: Design And Application Guide For High Speed MOSFET Gate Drive Circuits (TI)