

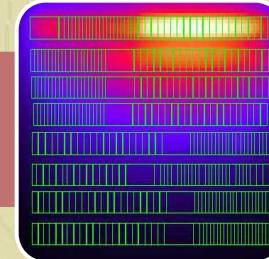
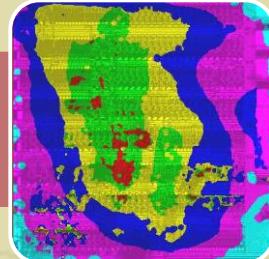
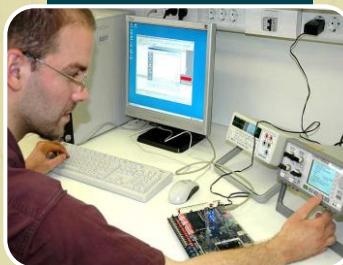
Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi
Egyetem

Elektronikus Eszközök Tanszéke



Elektronika (VIEEA307)

Bevezetés, követelmények



A tárgy oktatásának módja

► Előadás

- Neptun szerint
- Tárgyfelelős: Dr. Rencz Márta, rencia@eet.bme.hu
- Előadó: Ress Sándor, ress@eet.bme.hu

► Gyakorlat

- Neptun szerint, helyszín QB.310, QB.311
- A számítógépek száma konstans... „becsatlakozni” emiatt nem lehet.
- Folyamatos az előrehaladás, ha hivatalos szünet miatt elmarad egy gyakorlat, két hét múlva a következő alkalomkor folytatódik.
- Emiatt 5 gyakorlat lesz.
- Részvétel a TVSZ szerint 70%, 4 gyakorlat kötelező, egy pótolható az utolsó héten, megbeszélés szerint.
- A tavalyi teljesített gyakorlatokat és kisZH-kat (ha van értelme...) elfogadjuk, adminisztráció később

► A tárgy adminisztrációja Moodle rendszerben zajlik

- <http://edu.eet.bme.hu> a feliratkozás központi lesz, még ezen a héten, a jelszóról Neptun üzenetet küldünk.
- minden anyag elérhető lesz más helyen is, erről a honlapon lesz tájékoztatás

Az előadások anyaga

- ▶ Bevezetés, ismétlés fizikából
- ▶ Félvezető eszközök
 - pn átmenet, dióda és alkalmazásai
 - Bipoláris tranzisztor és alkalmazásai
 - MOS tranzisztor és alkalmazásai
- ▶ Integrált áramkörök
 - IC technológia
 - Digitális alapáramkörök
 - Félvezető memóriák
 - Modern IC tervezés, az ún. „digitális IC flow”
 - Programozható logikai eszközök
 - Analóg IC-k (műveleti erősítők és AD/DA konverterek)
- ▶ Kitekintés
 - Modern IC technológia
 - MEMS eszközök

A gyakorlatok anyaga

1. Dióda és alkalmazásai
 2. Egytranzisztoros erősítő
 3. Digitális CMOS alapáramkörök
 4. Műveleti erősítők
 5. Szintézis IC és/vagy FPGA platformra („From C to Silicon”)
- ▶ Az első 4 gyakorlat vegyes: „hagyományos” táblás gyakorlat, áramkörszimulációval alátámasztva
 - ▶ Az 5. gyakorlat számítógépes gyakorlat
 - ▶ A gyakorlat elvégzését a beadott (sablon alapján kitöltendő) jegyzőkönyv igazolja. A feltöltésre figyelni kell! A moodle rendszer „fura”.



Nagyzárthelyik

► Két nagyzárthelyi, az ütemterv szerinti időpontban és helyszínen.

- 1. NZH (60 perc, 30 pont)
- 2. NZH (90 perc, 50 pont)
- Felépítése:
 - Elméleti rész: 10 röviden megválaszolható elméleti kérdés, az egyes előadások után közzétett kérdésekből, 2pont/kérdés. Vigyázat: a kérdések sablonnak tekintendők , a zárthelyiben viszont konkrét kérdések lesznek! Erre a részre 30 perc áll rendelkezésre.
 - Számpéldák : 1. zh 2 db, 10 pont, 2. zh 3 vagy 4 db, összesen 30 pont.
 - Példa: a gyakorlaton és **az előadáson** megoldott példák lineáris kombinációja.
 - A javítás során először az elméleti kérdéseket javítjuk. Ha ebből nincs meg a 10 pont, akkor a dolgozatot nem javítjuk tovább. (de az elméletből szerzett, 10-nél kevesebb pont megmarad.)
 - A ZH TVSZ szerinti teljesítésének a 10 pont megszerzése számít.



Kiszárhelyik

- ▶ A második és a negyedik gyakorlaton, valamint a pót alkalmon
- ▶ 10 pont, 5 perc, 5 nagyon röviden megválaszolandó kérdés
- ▶ Anyaga: a gyakorlat tematikájához kapcsolódó előadások anyaga.
- ▶ A 3 kisZH-ból a legjobb 2 eredménye számít.
 - A 3.-at csak az írja meg, akinek az eredmény számít valamit.



A félévközi jegy kialakítása

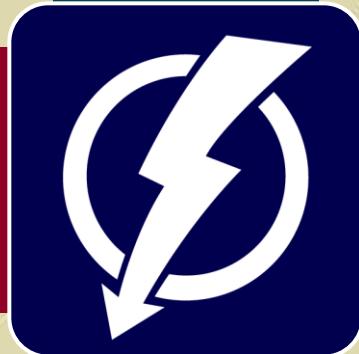
- ▶ Gyakorlatokon TVSZ szerinti mértékű részvétel.
- ▶ A félévközi jegy kialakítása a két nagyzárthelyin és a két legjobb kiszárthelyin szerzett pontok összege alapján történik:
 - 0 - 39 pont - elégtelen
 - 40 - 54 pont - elégséges
 - 55 - 69 pont - közepes
 - 70 - 84 pont - jó
 - 85 - 100 pont - jeles
- ▶ Ezen túlmenően más követelmény nincs. (Tehát nem szükséges minden egyes zárthelyin, kis zárthelyin az elégséges szintet elérni, sőt megírni sem kell - amennyiben az elegendő pontszám már rendelkezésre áll.)



Pótlási lehetőségek

- ▶ Egy gyakorlat pótolható az utolsó héten
- ▶ a kis zárthelyik nem pótolhatók, mivel a félévközi jegybe csak a legjobb 2/3 számít. (TVSZ 16.1)
- ▶ Mindkét nagyzárthelyi javítható
- ▶ sikertelen zárthelyit pótolni a két zárthelyi közül csak egyet lehet. (TVSZ 14.1.a)
- ▶ pót pótZH nincs, mivel a tárgykövetelmény nem követeli meg minden zárthelyi egyenkénti eredményes teljesítését. (TVSZ 16.3)



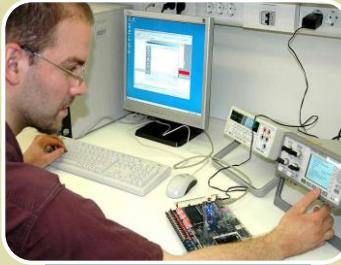


Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi
Egyetem

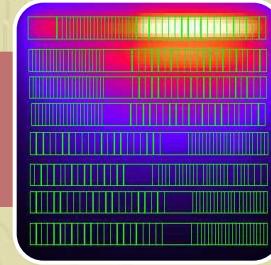
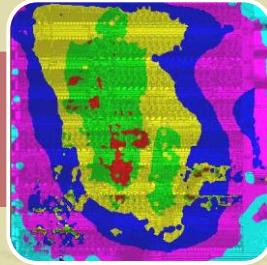
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Elektronika

Alapok



eet.bme.hu



Elektronika

Elektromos áram félvezetőkben ill. vákuumban

► Ágai (régebben erős-, gyenge áram)

- energy processing
- information processing

► Utóbbi felosztása, az ún. 4C:

- Communication
- Computation
- Control
- Components



Az elektronika története

Generációk

- ▶ Elektromágnessel mozgatott mechanika (elektromosságtan)
- ▶ Elektromos és mágneses erőtérrel, vákuumban mozgatott elektron
- ▶ Szilárd testben mozgó, potenciálterekkel vezérelt elektron



Az elektronika története 2.

A gyökerek

(Elektromosság-tan)

(Elektromágnessel mozgatott mechanizmus)

► 1837 Morse, telegráf

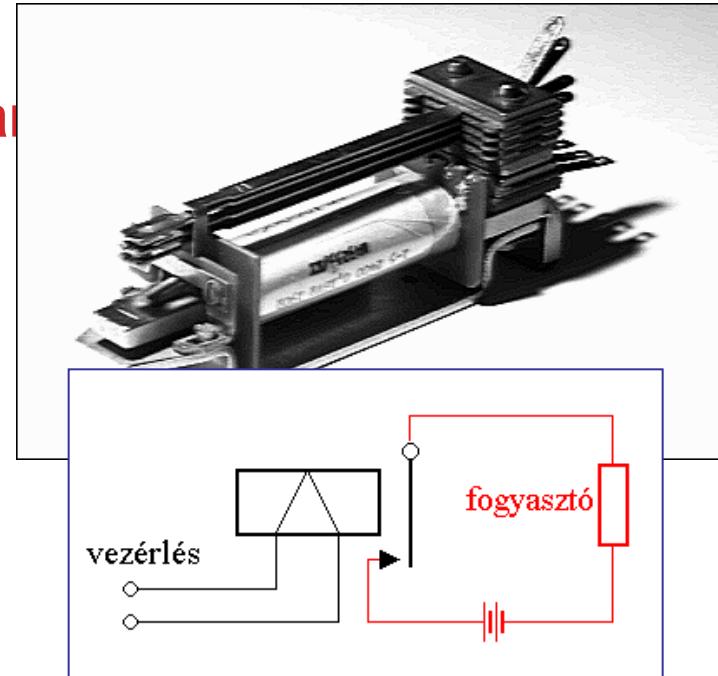
► 1876 Bell, telefon

► 1877 Edison, fonográf: az első ROM

► 1865 Maxwell, az elektromágneses hullámok elmélete

► 1888 (azaz 23 évvel később) Herz előállítja őket

► 1896 Marconi rádió kapcsolat = drót nélküli távíró
(vagy Popov, 1 évvel korábban, de nem publikálta...)

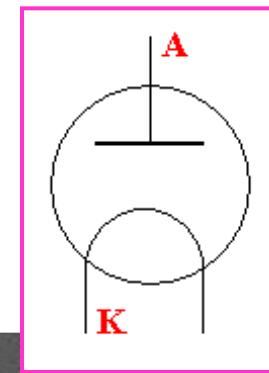
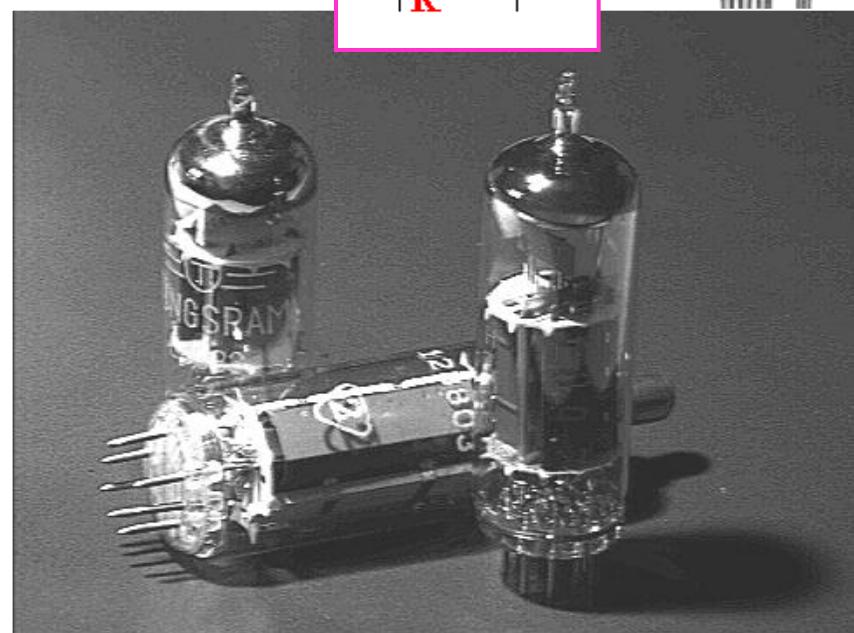
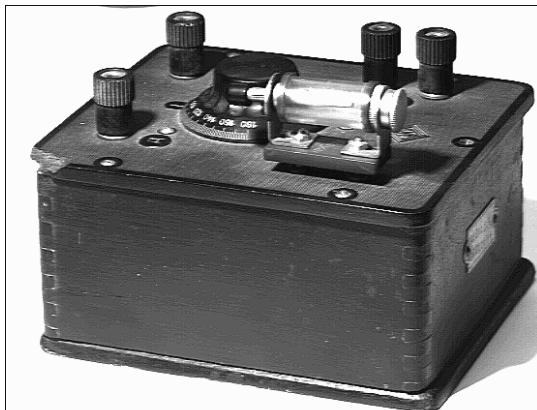


Elektroncső korszak

Vákuumban mozgatott **elektron** → **elektronika**

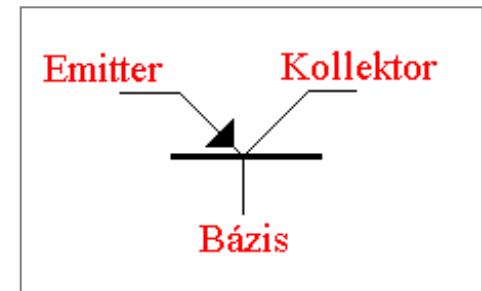
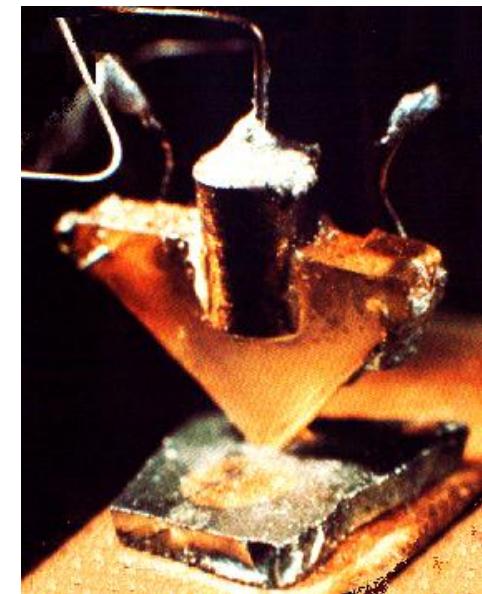
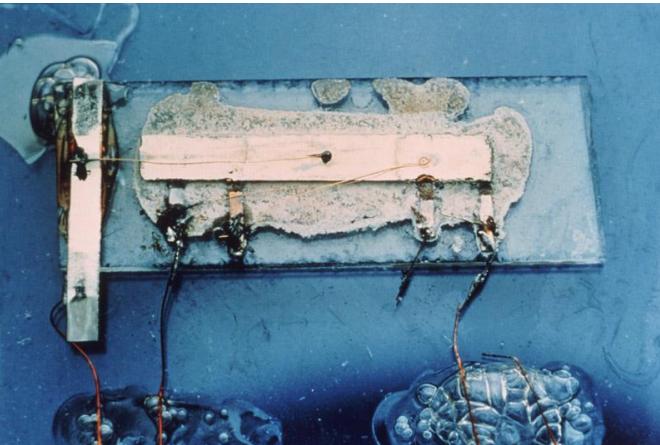
- ▶ 1895 Lorenz kimutatta az elektronok léttét
- ▶ 1897 Braun az első katódsugárcső
- ▶ 1904 Fleming az első dióda (valve) – nemlineáris eszköz
- ▶ Trióda - erősítő eszköz
- ▶ 1920 Rádiótávközlés
- ▶ 1940 TV, radarrendszerök

Rádió a
20-as
évekből



Tranzisztor korszak

- ▶ 1948 Bell Laboratórium **Shockley, Bardeen, Brattain**
Bipoláris eszköz: elektronok és lyukak
(Germánium tűs tranzisztor)
- ▶ 1954 Szilícium tranzisztor,
Texas Instruments
- ▶ 1958 az első integrált áramkör **Kilby**,
Texas Instruments



Integrált áramkörök

- 1960 SSI < 100 elem
- 1966 MSI $n \times 100$ elem
- 1969 LSI $n \times 1000$ elem
- 1975 VLSI $n \times 10\ 000$ elem
- Ma: ULSI $n \times 10^9$ elem

► Új felosztás:

Elektronikai ipar:

- chip gyártók
- chip felhasználók

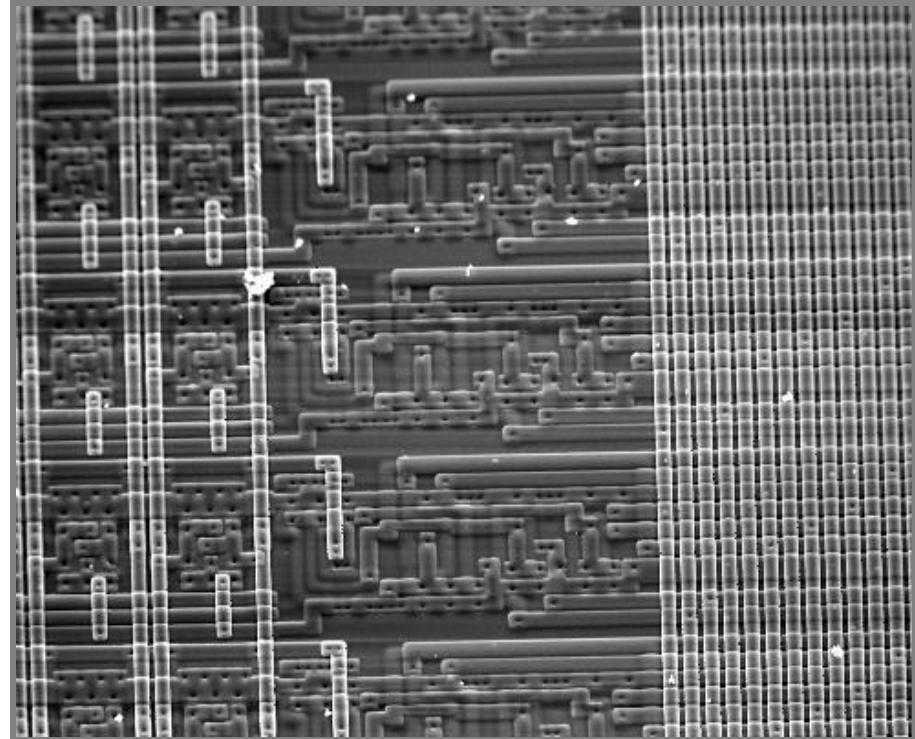
► 1958 JFET

► 1960 MOSFET

► 1969 Mikroprocesszor (Intel, **Andrew Grove**)

► Memóriák, képfeldolgozó eszközök

► Ma: System-on-a-chip SoC, Network on a chip NoC



A szükséges alapok felfrissítése

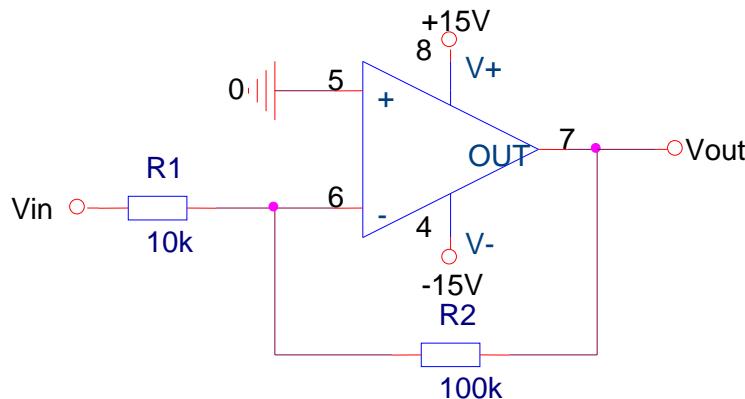
- ▶ Kapcsolási rajz
- ▶ Kirchhoff törvények
- ▶ Ideális és valós források
- ▶ Helyettesítő képek
- ▶ Lineáris hálózatok, a **Szuperpozíció elve**
- ▶ Passzív lineáris hálózati elemek
- ▶ RC hálózatok jellemzése



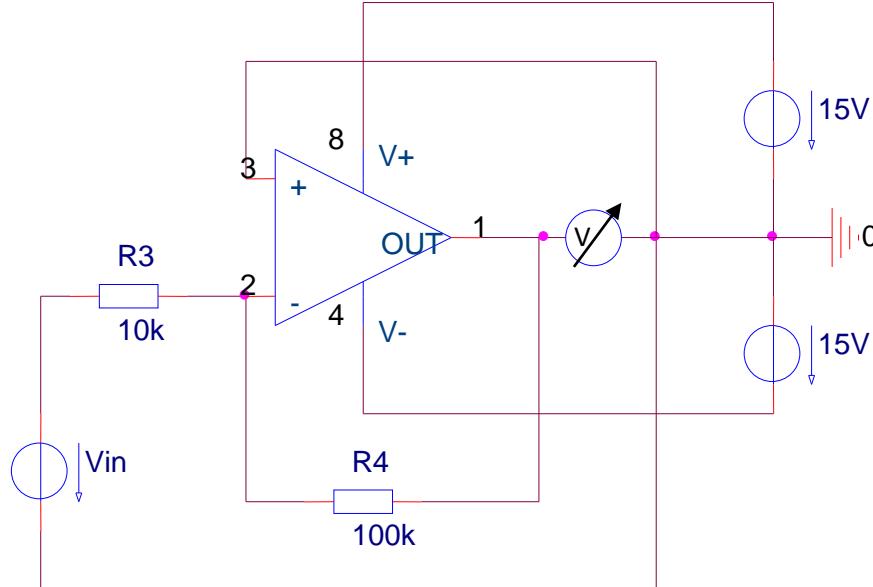
A kapcsolási rajz – tápfeszültségek

A „valódi” kapcsolási rajz picit más, mint amit Fizikából „megszoktunk”...

„Fizikus”

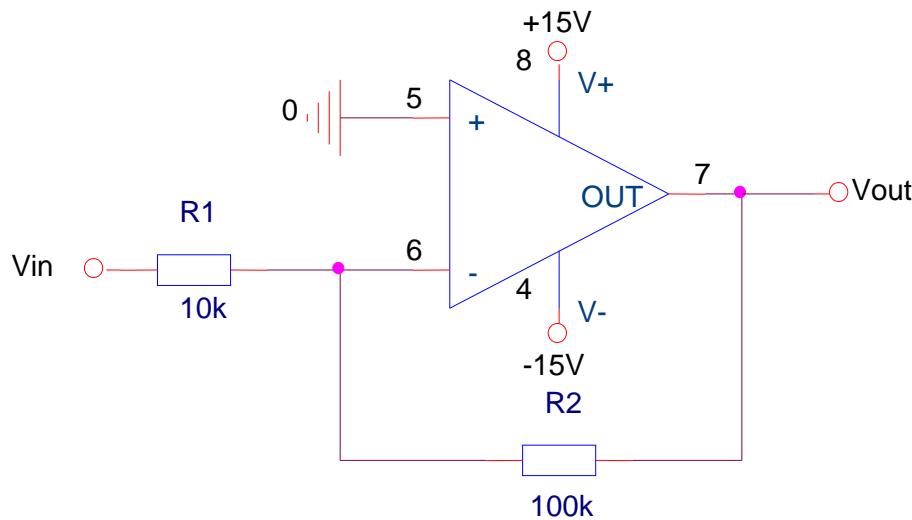


**Valódi? Hol is van
a „kör” az
áramkörben?**

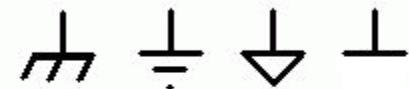


- ▶ A feszültség generátorok szimbólumai általában hiányoznak, ehelyett egy kis karika, vagy vonal mellé kerül egy felirat.
- ▶ Már egy egyszerűbb kapcsolásban is a rajz áttekinthetetlenné válik, ha a tápfeszültséget kettőnél több helyre kell elvezetni.
- ▶ A tápfeszültség szokásos jelzése V_{CC} , V_{DD} , vagy egyszerűen csak a tápfeszültség értéke pl. +5V

A kapcsolási rajz – a föld

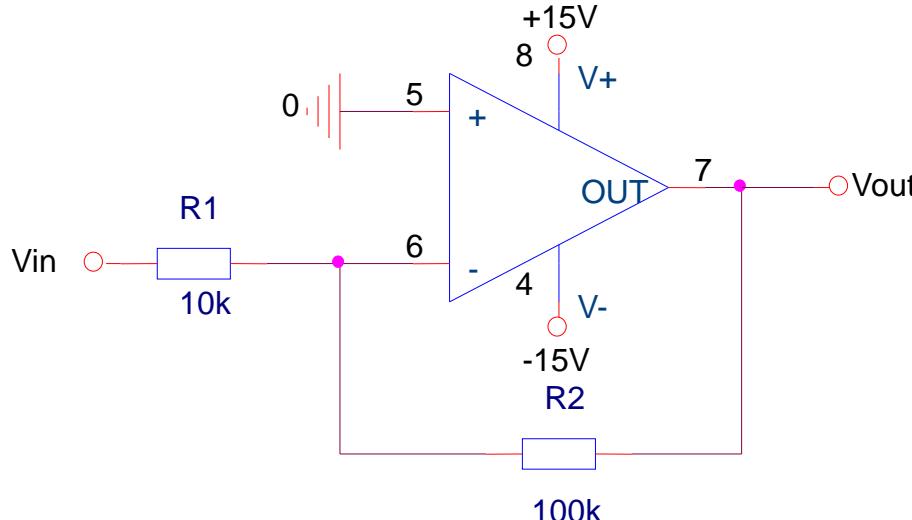


**Föld szimbólumok,
a bal szélső a
védőföld**



- ▶ Van egy kijelölt referencia pont, a föld.
- ▶ minden feszültséget – ha nem mondjuk meg pontosan, hogy mi között kell mérni – ehhez viszonyítunk.
- ▶ A referencia pont és a valódi föld potenciál nem biztos, hogy egybeesik...
- ▶ Ez valójában fizikai értelemben véve potenciál, de a villamosmérnöki gyakorlatban feszültségnek mondjuk.
- ▶ Sokféleképpen ábrázolják, nincs mindenre érvényes konvenció.

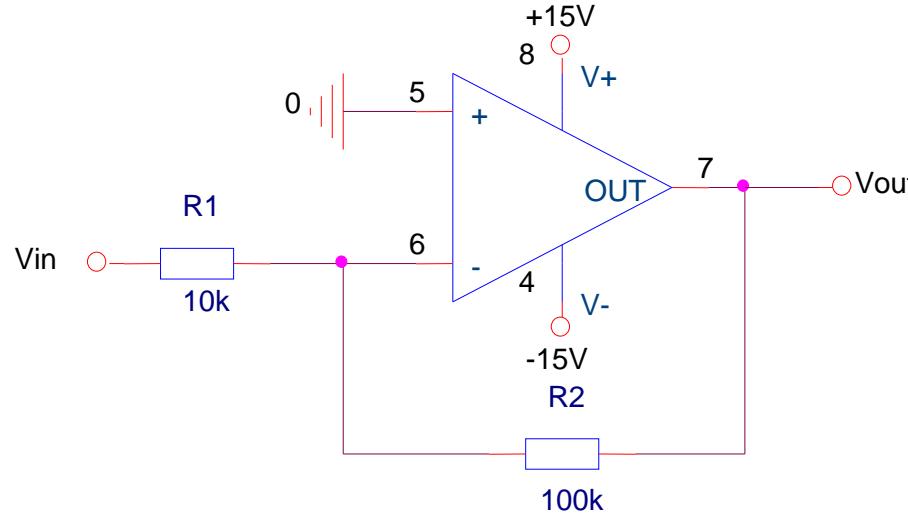
Kapcsolási rajz – passzív elemek



- ▶ A passzív elemek mértékegységeit nem mindig jelöljük, az elem szimbóluma egyértelműen megadja a mértékegységet.
- ▶ A prefixek követik az SI előírásokat. Gyakran az SI prefix a tizedes jelölő helyére kerül. (ez főleg az alkatrészekben van így.) pl. 5k1 felirat egy ellenállásnál 5,1k Ω -os ellenállást jelöl. A használatos SI prefixek:

M, mega	10^6
k, kilo	10^3
m, milli	10^{-3}
μ , mikro	10^{-6}
n, nano	10^{-9}
p, piko	10^{-12}
f, femto	10^{-15}

Kapcsolási rajz - konvenciók

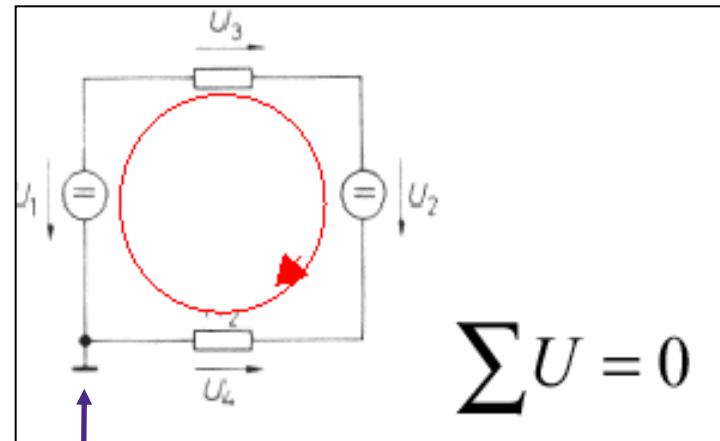
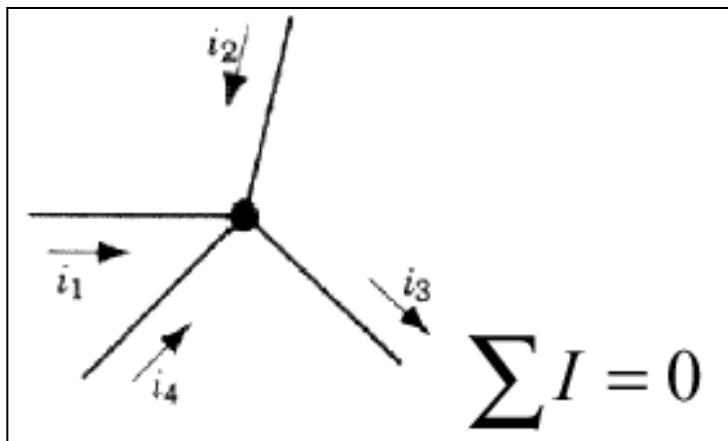


- ▶ Szokás szerint a „fentebb” elhelyezkedő részletek magasabb, a „lentebbi” részek alacsonyabb feszültségen vannak.
- ▶ Általában az áramkör bemenetei baloldalon, kimenetei a jobboldalon találhatók.

Kirchhoff-törvények

- ▶ Egy csomópontba befolyó áramok előjeles összege = 0.
- ▶ Tetszőleges zárt hurokban a feszültségek összege = 0.

A Kirchhoff-törvények alkalmazásával
minden hálózat megoldható.



Referencia feszültség, föld potenciál

Áramkör analízis

Alapvető számítás módszerek

► Csomóponti potenciálok módszere

Áramkör analízis programok általában ezt használják

- minden (n) csomópont potenciálja ismeretlen, ezekkel kifejezzük az ágáramokat
- segítségükkel minden csomópontra felírjuk a csomóponti törvényt
- megoldjuk az n egyenletből álló n ismeretlenes egyenletrendszeret
- a csomóponti potenciálok segítségével meghatározzuk az ágáramokat



Ideális és valós források 1.

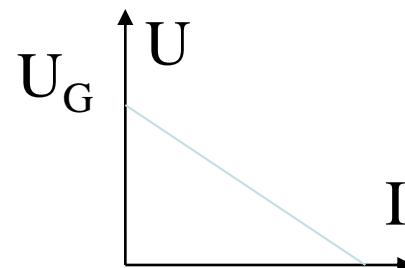
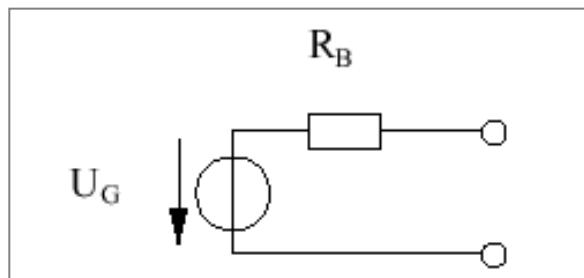
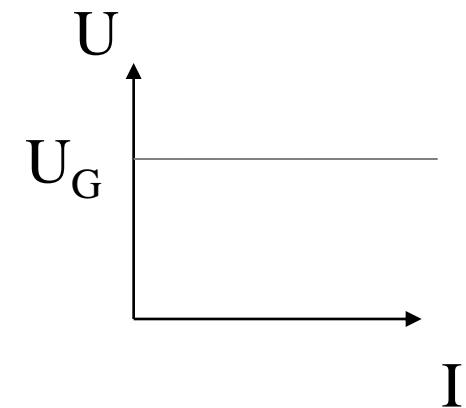
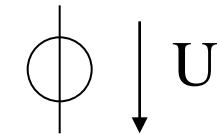
Feszültségforrások

► ideális:

- a 2 kivezetés között a feszültség független a feszültségforrás áramától.

► valós:

- a kivezetések között mérhető feszültség függ az áramtól (a gyakorlatban: csökken)
- modell: belső ellenállás



Ideális és valós források 2.

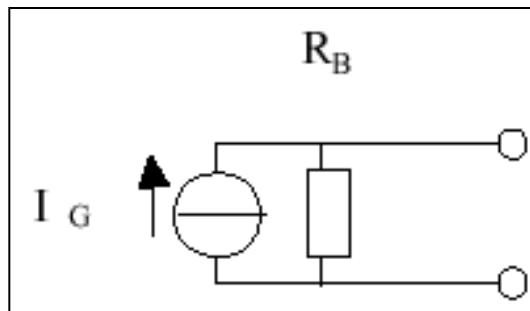
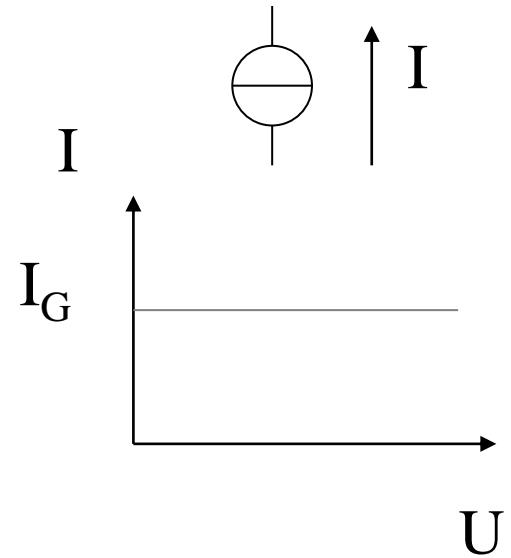
Áramforrások

► ideális:

- az áram független az áramforráson eső feszültségtől

► valós:

- a kimenő áram függ az áramforráson eső feszültségtől
- modell: ideális áramforrás + belső ellenállás



Szuperpozíció elve

Lineáris hálózatok:

- ▶ amelyekben minden elem $I(U)$ karakterisztikáját lineáris egyenlet, vagy lineáris differenciálegyenlet írja le.
- ▶ Lineáris hálózatokban teljesül, hogy
 - $f(F+\Delta F) = f(F)+f(\Delta F)$
- ▶ Így a különböző gerjesztésekre adott együttes válasz meghatározható az egyes gerjesztésre adott válaszok összegeként.
 - alkalmazásnál:
 - az ideális áramgenerátort szakadással,
 - a feszültséggenerátort rövidzárral kell helyettesíteni.

amíg a többi generátor hatását számoljuk egyenként,
majd az összes generátor hatást összeadjuk...

Passzív lineáris hálózati elemek

► Disszipatív elem:

- ellenállás

- az R ellenálláson átfolyó I áram

$$P = UI = I^2R = U^2/R$$

teljesítményt **hővé** alakít

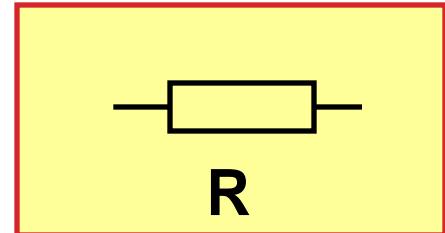
► Egy ellenállás feszültsége és árama között az összefüggés:

$$U = RI$$

- az R arányossági tényező az ellenállás, mértékegysége az Ohm (Ω).
- Az ellenállás reciproka a vezetés, $G = 1/R$, mértékegysége a Siemens ($1S = 1\Omega^{-1}$)

► Energia tároló elemek:

- kapacitás
- induktivitás



Ellenállások soros kapcsolása

- Soros kapcsolás esetén a sorba kapcsolt ellenállások árama megegyezik. Az eredő ellenállás az ellenállások összege.

$$R = \sum_{i=0}^n R_i.$$

- A sorba kapcsolt ellenállásokon kialakuló feszültség az egyes ellenállásokon az ellenállások arányában oszlik meg, azaz:

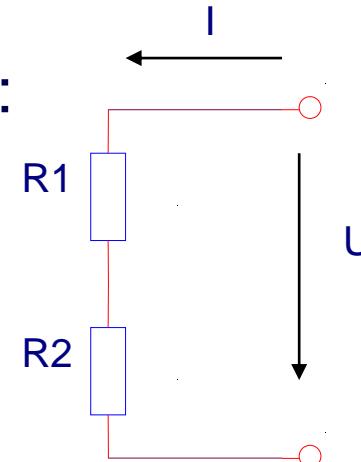
$$U_i = \frac{R_i}{\sum_{i=0}^n R_i} U$$

- Két sorosan kapcsolt ellenállás esetén pl.:

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2}$$

$$U_1 = U \frac{R_1}{R_1 + R_2}, I_1 = I$$

$$U_2 = U \frac{R_2}{R_1 + R_2}, I_2 = I$$



Ellenállások párhuzamos kapcsolása

- Párhuzamos kapcsolás esetén a párhuzamosan kapcsolt ellenállások feszültsége megegyezik. Az eredő vezetés a vezetések összege.

$$G = \sum_{i=0}^n G_i.$$

- Ellenállásokra áttérve:

$$R = \frac{1}{\sum_{i=0}^n \frac{1}{R_i}}$$

- A párhuzamos kapcsolás meglehetősen gyakori, ezért két ellenállás párhuzamos eredőjének kiszámítására szokás definiálni a replusz operátort (\times). Ha R_1 és R_2 ellenállás párhuzamosan kapcsolódik, akkor eredő ellenállásuk:

$$R = R_1 \times R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

- A párhuzamosan kapcsolt ellenállásokon folyó áram az egyes ellenállásokon az vezetések arányában oszlik meg, azaz:

$$I_i = \frac{G_i}{\sum_{i=0}^n G_i} I$$

Kapacitás

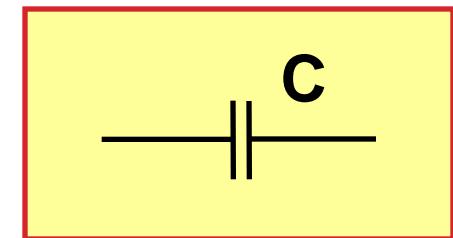
Egymáshoz közeli, de egymástól elektromosan elszigetelt két vezető → töltés felhalmozódás

- ▶ $Q = C \cdot U$
- ▶ C egysége a Farad (As/V)

- ▶ Mivel: $I = dQ/dt$

$$I = C \cdot dU/dt$$

- Ha az ideális kapacitáson a feszültség nem változik (állandósult állapot, DC eset): árama = 0, azaz szakadásként viselkedik, töltését megtartja.
- A valóságos kapacitásnak mindenkor párhuzamos veszteségi ellenállása.



Induktivitás

Hurkolt vezető, amin áram folyik. Ha az áram megváltozik, az induktivitás végpontjain feszültség mérhető.

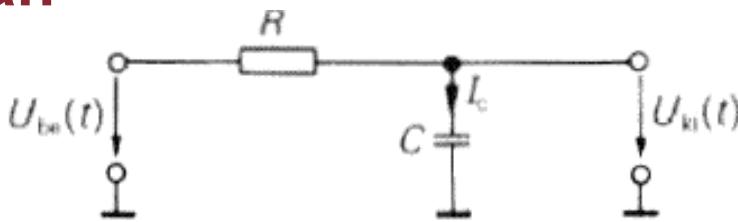
$$U = L \cdot \frac{dI}{dt}$$



- ▶ **L egysége a Henry (Vs/A)**
- ▶ Ha az induktivitáson állandó áram folyik, a rajta eső feszültség $U = 0$
 - Valóságos induktivitásnak mindenkor van soros veszteségi ellenállása, sőt párhuzamos kapacitása is.

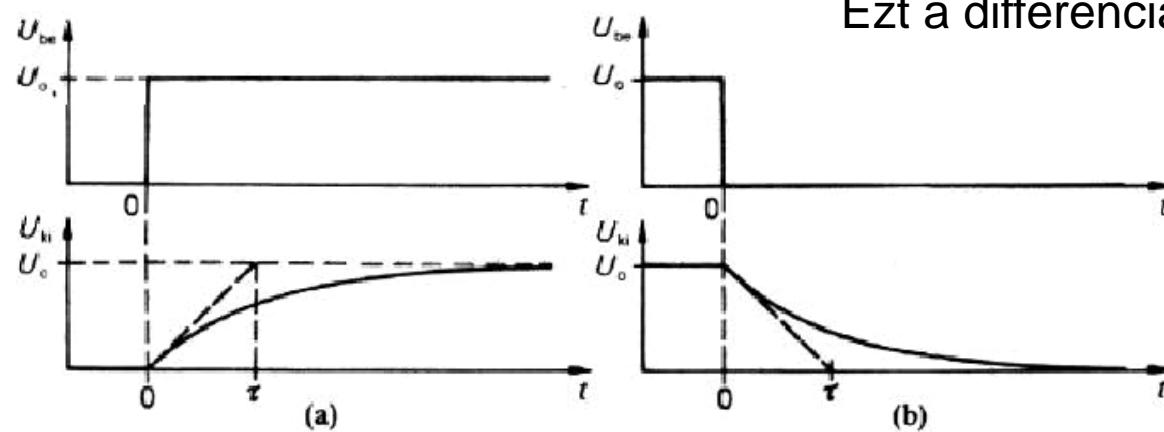
RC hálózatok jellemzése

Időtartományban



$$\frac{U_{be} - U_{ki}}{R} = C \frac{dU_{ki}}{dt}$$

Ezt a differenciálegyenletet kell megoldani...



bekapcsoláskor (a) $U_{be}=U_0$ kikapcsoláskor (b) $U_{ki}(0)=U_0$

$$U_{ki}(t) = U_0 \left(1 - e^{-t/RC}\right)$$

$$U_{ki}(t) = U_0 e^{-t/RC}$$

A $\tau = RC$ mennyiség az ún. **időállandó**.

Az időállandó megadja, hogy mennyi ideig tart, amíg az eltérés az állandósult állapototól e-d részére csökken. Az eltérés 5τ idő alatt már kevesebb mint 1%.

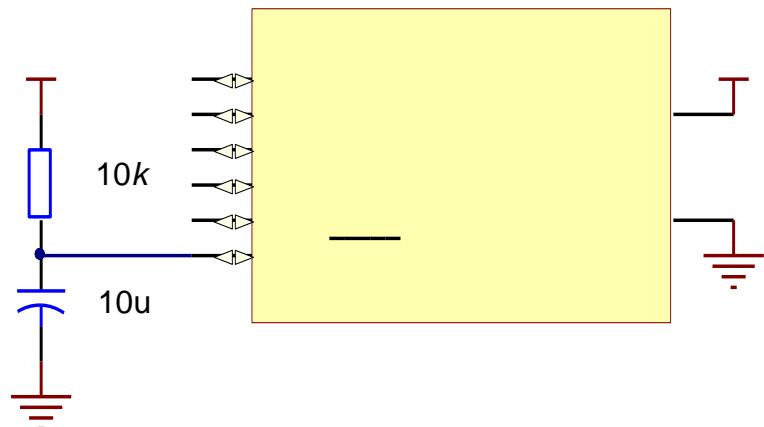
Késleltetés



gyors
változásokat
nem tud
követni

Példa: power on reset

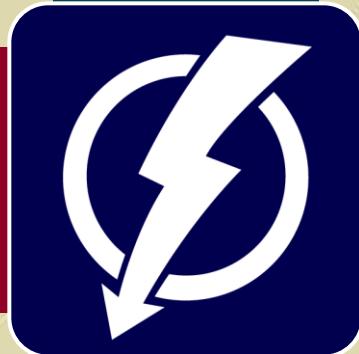
- ▶ A \overline{RESET} bemenet komparálási feszültsége (ami alatt a bemenő jelet logikai alacsony, ami felett pedig logikai magas szintnek érzékeli a logikai áramkör) a tápfeszültség 60%-a.



$$0,6V_{CC} = V_{CC}(1 - e^{-t/RC})$$

$$t = RC \ln 2,5 \approx 100ms$$

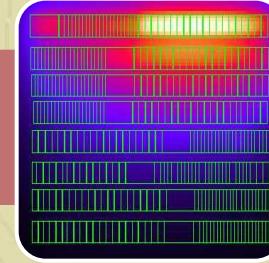
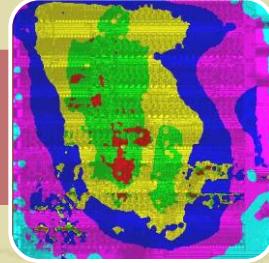
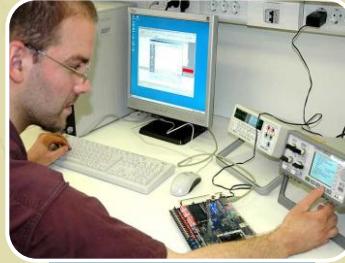
- ▶ Nem véletlenül alacsony aktív a \overline{RESET}



Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi
Egyetem

Elektronikus Eszközök Tanszéke

A mikroelektronika félvezető fizikai alapjai



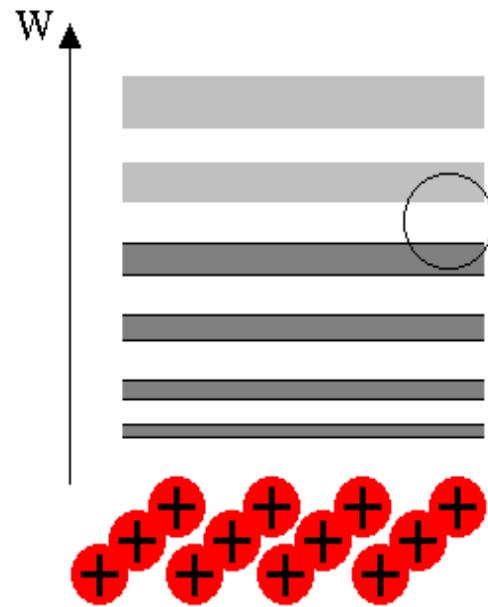
Félvezető anyagok

- ▶ Átmenetet képeznek a szigetelők és a vezető anyagok között.
- ▶ Vezetik az áramot.
 - NTC, azaz növekvő hőmérsékletre az ellenállásuk csökken. (ellentétben a fémekkel)
- ▶ Jelen pillanatban félvezető anyagok az elektronikai eszközök alapjai.
- ▶ Fontosabb félvezető anyagok (önkényes és nem teljes felsorolás!)
 - Egykristályos
 - Elemi félvezetők: **Si**, Ge (IV. oszlop)
 - Si: integrált áramkörök, eszközök
 - Vegyületfélvezetők: pl. GaAs, GaAsP
 - LED
 - amorf (főleg Si)
 - TFT, napelem stb.
 - szerves
 - OLED

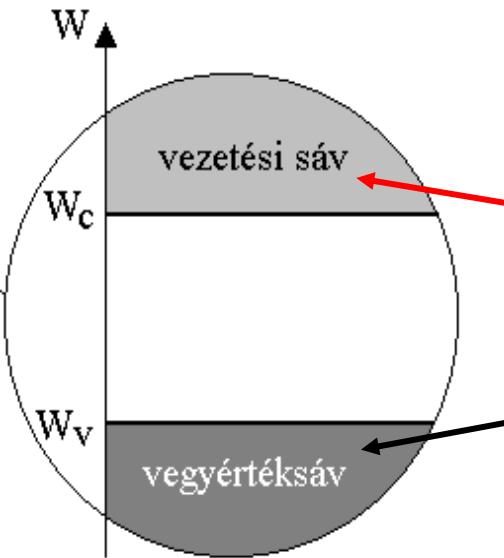
A sávmodell

W : az elektronok megengedett energia értékei szilárd testekben

Sávos szerkezetű, a megengedett sávokat tiltott sávok választják el.



**V = valence band
C = conduction band**



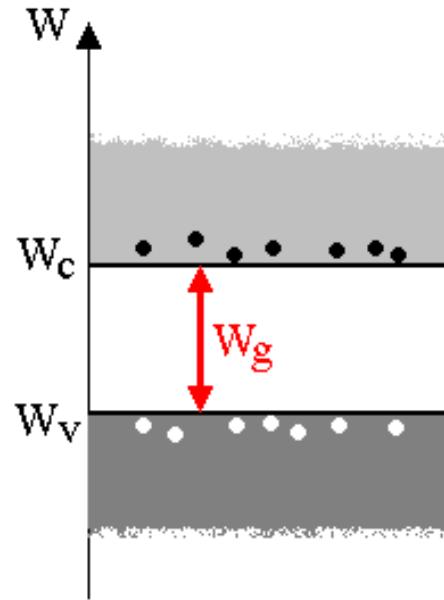
Mozgásképes elektronok

Elektronok vegyérték kötésben

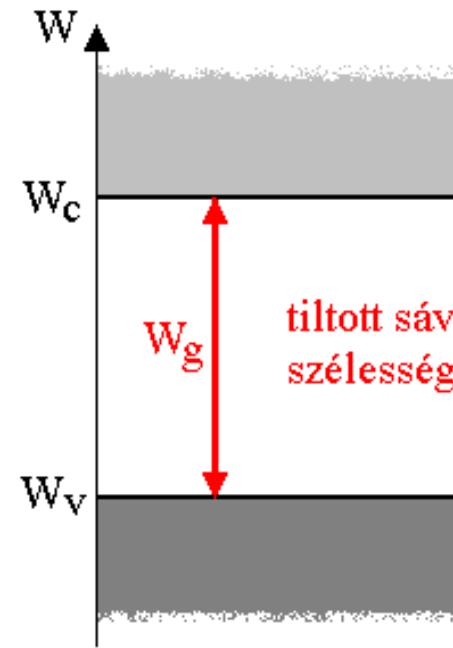
Áramvezetési szempontból fontos:

- a legfelső, (majdnem) teli sáv
- a fölötté levő, (majdnem) üres sáv
- a közük lévő tiltott sáv

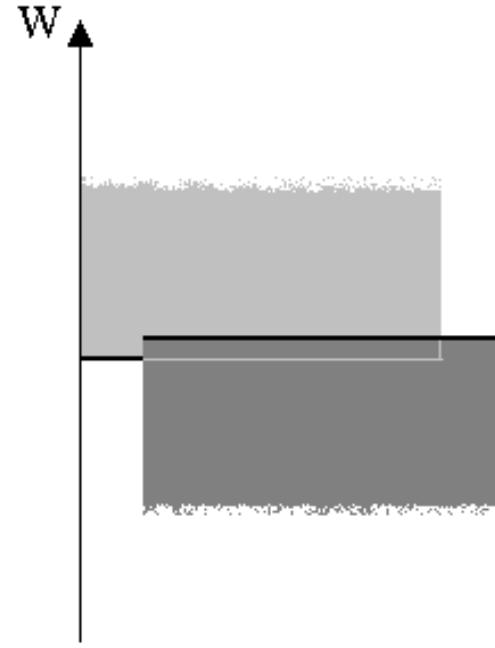
Vezetők és szigetelők (ismétlés)



félvezető



szigetelő

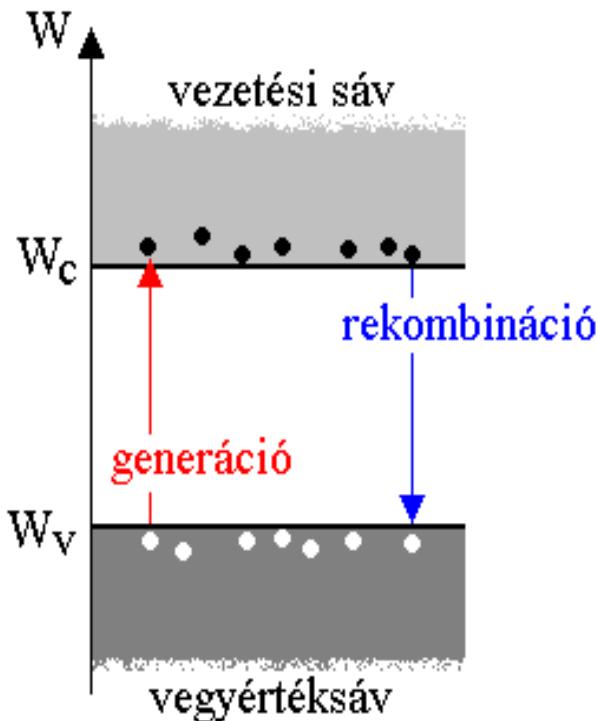


fém

$W_g = 1,12 \text{ eV szilíciumra; } 4,3 \text{ eV SiO}_2\text{-ra}$

$$1 \text{ eV} = 0,16 \text{ aJ} = 0,16 \cdot 10^{-18} \text{ J}$$

Töltéshordozók



- ▶ Elektronok a vezetési sáv alján
- ▶ Lyukak (elektron hiányok) a vegyértékság tetején
- ▶ Mindkettő szolgálja az áram-vezetést!
- ▶ Generáció: a termikus átlagenergia (kT) felhasználásával vagy külső energiaközlés hatására egy elektron a vezetési sávba kerül, azaz két mozgásképes töltéshordozó keletkezik.
- ▶ Rekombináció: egy elektron a vezetési sávból a vegyértékságba kerül vissza.

Elektron	negatív töltés, pozitív tömeg
Lyuk	pozitív töltés, pozitív tömeg

A szilícium kristályszerkezete

Si

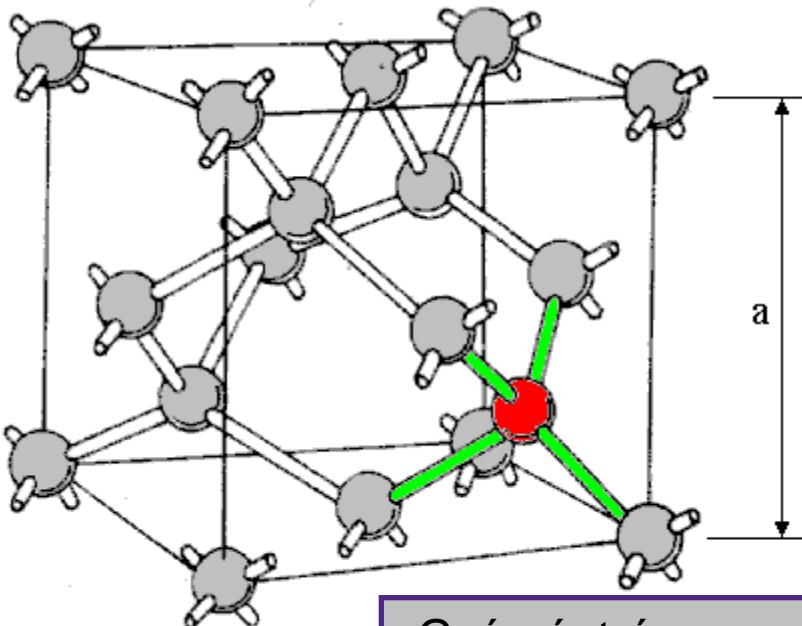
N = 14

4 vegyérték

IV. főcsoport

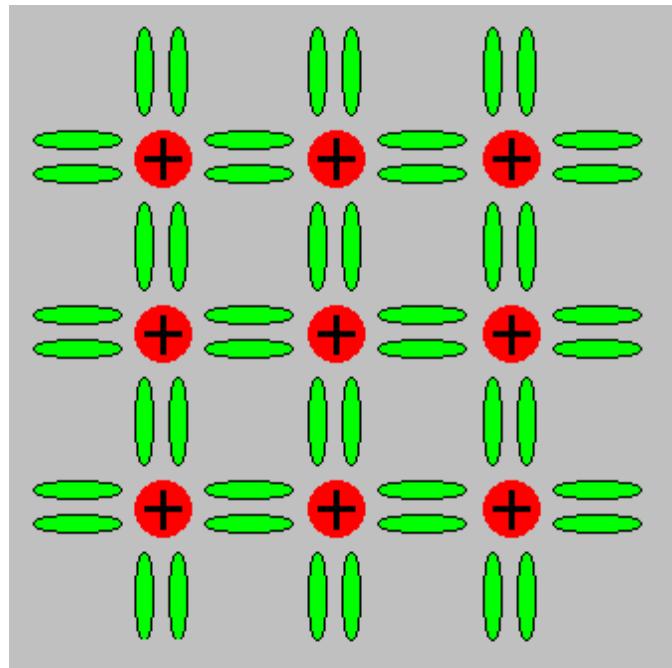
$\rho=2,33 \text{ g/cm}^3$

A térbeli elrendezés



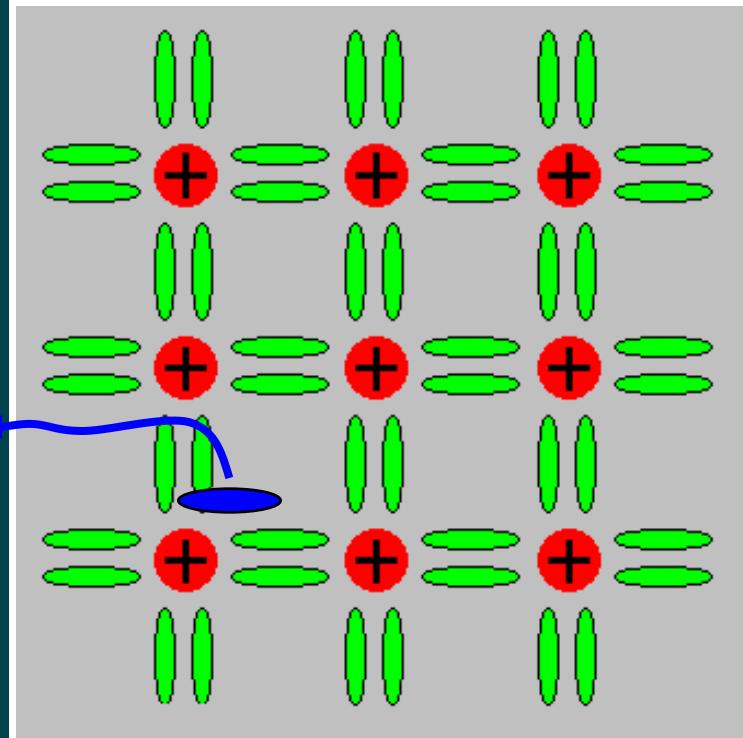
**Minden atomnak 4 közeli szomszédja van
Rácsállandó: $a=0,543 \text{ nm}$**

Egyeszerűsített síkbeli kép



Intrinsic Si: adalékolatlan

Az intrinsic szilícium



$T \neq 0$ esetén a termikus energia hatására néhány elektron kiszabadul a vegyértékkötésből, és a vezetési sávba kerül.

n_i : elektron-koncentráció [1/cm³]

p_i : lyuk-koncentráció [1/cm³]

$$n_i = p_i = 10^{10}/\text{cm}^3$$

- ▶ Nem túl sok. Egy 10µm élhosszúságú kockában ezek szerint átlagosan kb. 10 elektron van.
- ▶ A töltéshordozó-koncentráció megnövelése céljából a kristályt adalékolják.

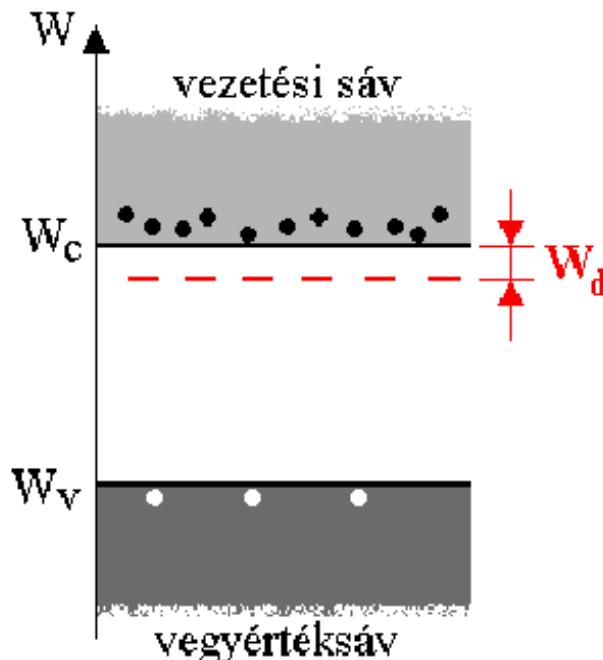
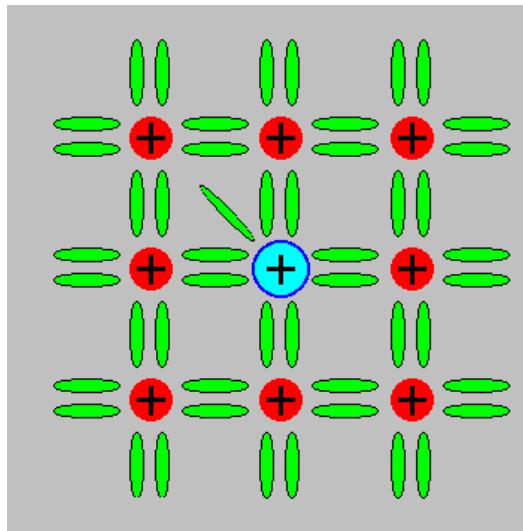
Az adalékolás

- ▶ A félvezető kristályba kis mennyiségben idegen atomokat juttatnak be.
- ▶ Ezek az atomok beépülnek a kristályrácsba.
- ▶ A szokásos adalék koncentrációk kb. 10^{15} - 10^{19} /cm³
 - Azaz valóban adalékolásról van szó, nem ötvözésről.
 - Mivel 1cm³ szilíciumban $5 \cdot 10^{22}$ atom van, egy szokásos 10^{17} koncentrációjú adalékolás hatására minden 2 milliomodik atom cserélődik ki.
 - Azaz az anyag 99,9998%-os szilícium marad.



n típusú félvezető (Si)

Donor adalék pl. P, As, Sb: 5 vegyértékű. Egy elektron „felesleges” – nem tud szomszéddal kovalens kötésbe kapcsolódni, és a szokásos hőmérsékleteken a vezetési sávba kerül.



N_D : donor koncentráció [1/cm³]

n_n : elektron koncentráció

p_n : lyuk koncentráció

Elektronok

- ▶ többségi töltéshordozók

Lyukak

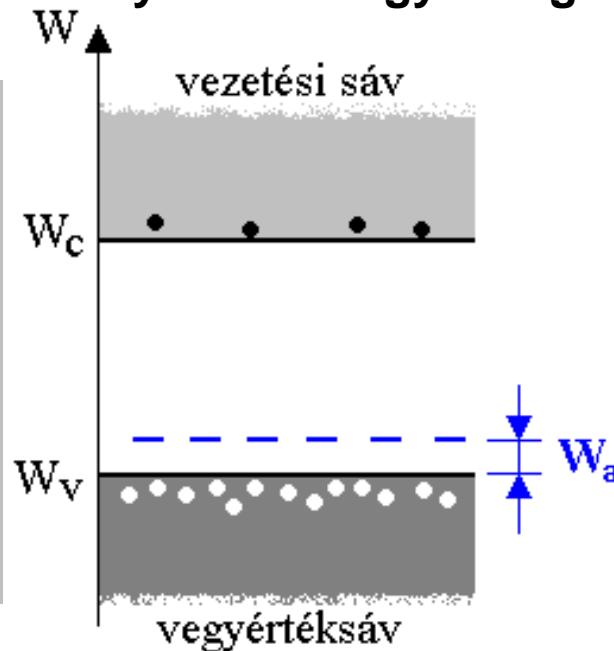
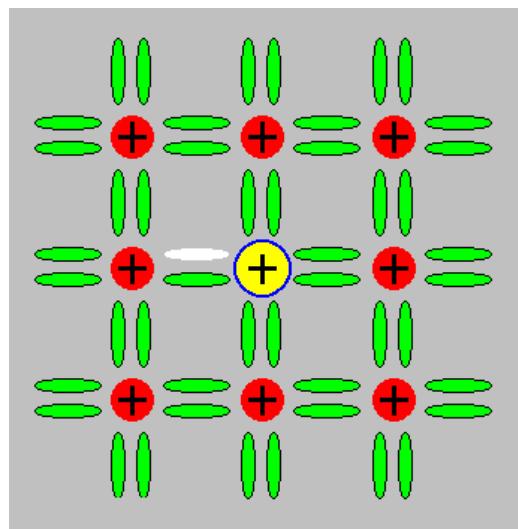
- ▶ kisebbségi töltéshordozók

$$n_n \sim N_D$$

$$n_n > p_n$$

p típusú félvezető (Si)

Akceptor adalék pl. B, Ga, Al, In: 3 vegyértékű. Csak három szomszédrozni tud kapcsolódni, így a kristályrácsban egy mozgóképes elektronhiányt (lyukat) okoz.



Lyukak

- többségi töltéshordozók

Elektronok

- kisebbségi töltéshordozók

N_A - : akceptor koncentráció [1/cm³]

n_p : elektron koncentráció

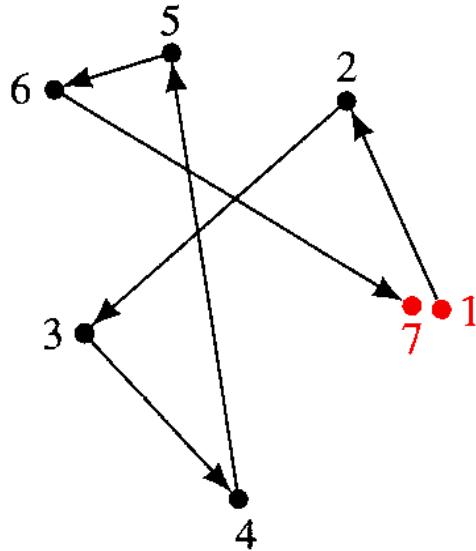
p_p : lyuk koncentráció

$$p_p \sim N_A$$

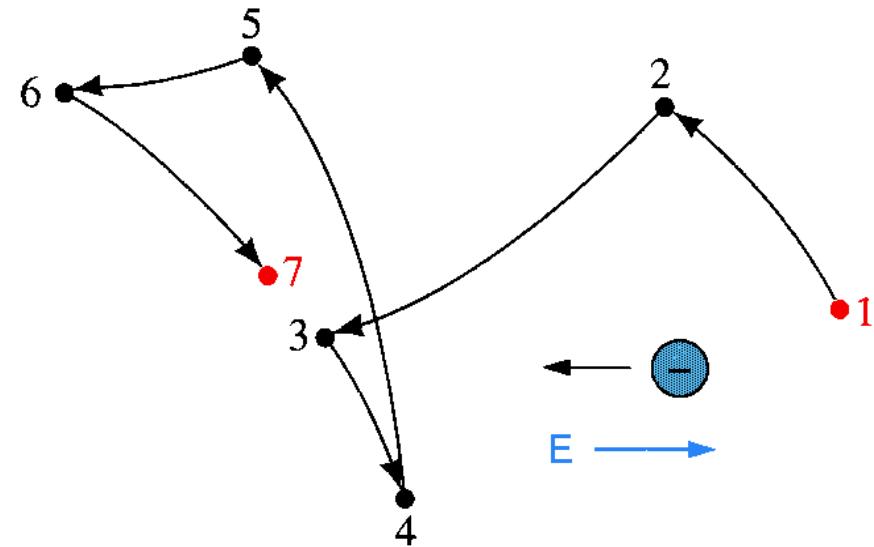
$$p_p > n_p$$

Áramok félvezetőkben – a sodródási (drift) áram

Töltéshordozóknak elektromos erőtér hatására történő mozgása.



Nincs térerősség



Van térerősség

Drift áram (sodródási áram) 2.

- ▶ Töltéshordozóknak elektromos erőtér hatására történő mozgása.
- ▶ Drift sebesség (v_D): a töltéshordozóknak az erőtér irányában történő elmozdulásának sebessége.

$$v_D = -\mu_n \cdot E$$

$$v_D = \mu_p \cdot E$$

ahol

- E : elektromos térerősség
- μ_n : az elektronok mozgékonysága
- μ_p : a lyukak mozgékonysága
- Az elektronok kb. $3\times$ mozgékonnyabbak, mint a lyukak.

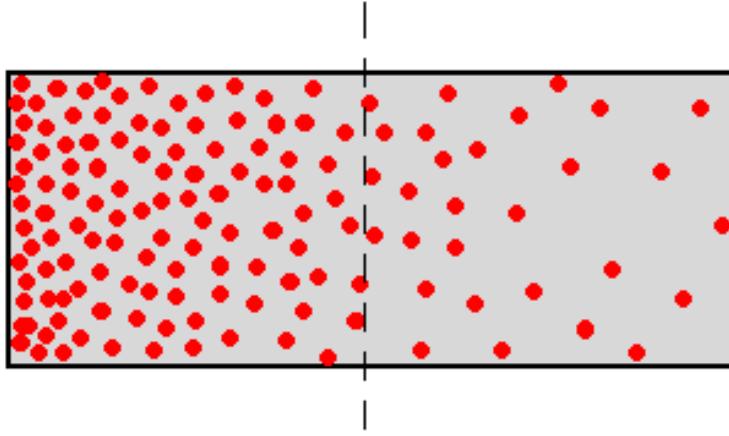
$$\mu_n |_{\text{Si}} = 1500 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$$

$$\mu_p |_{\text{Si}} = 475 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$$

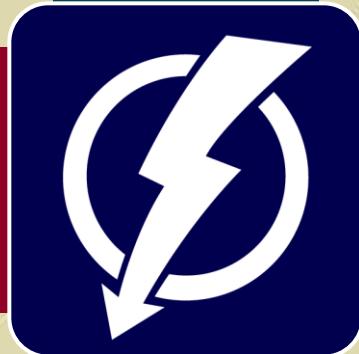


Áramok félvezetőkben – a diffúziós áram

- ▶ **Diffúzió:** a részecskéknek a térbeli koncentráció-különbség megszüntetésére irányuló mozgása.



Oka: a sűrűsékgülönbség és a hőmozgás

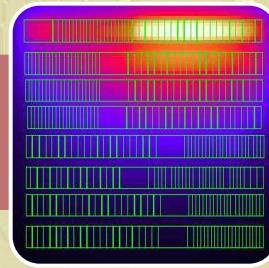
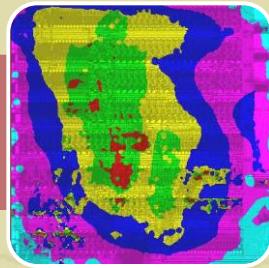
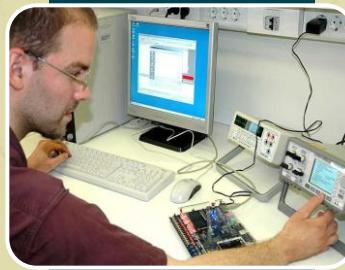


Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi
Egyetem

Elektronikus Eszközök Tanszéke



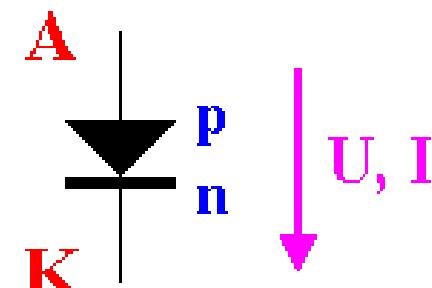
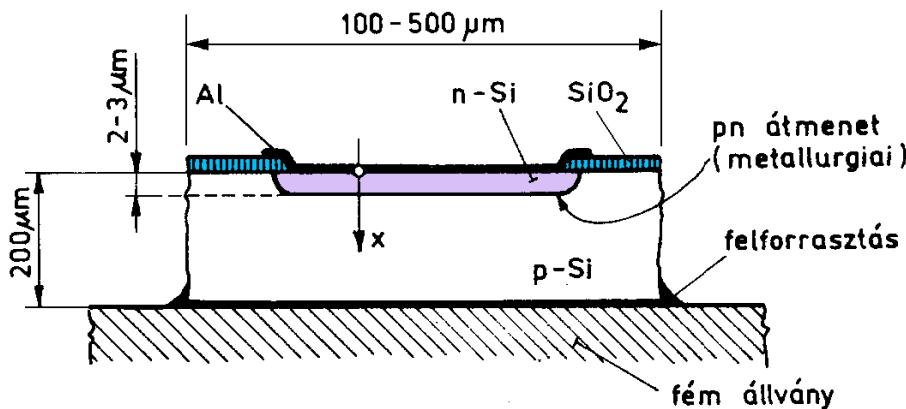
A pn átmenet



pn átmenet, félvezető dióda

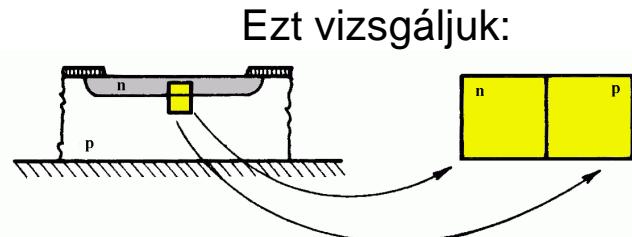
- **pn átmenet:** olyan **egykristályos félvezető** tartomány, amelyben egymással **érintkezik** egy **p** és **n** típusú zóna.
- Az 1 db. pn átmenetből álló **eszköz** a **dióda**

Pl. dióda megvalósítás:



A = anód, K = katód

- Az ábra **torzított**, a keresztmetszeti méretek általában sokkal kisebbek mint az oldalirányúak.
- **Planáris** szerkezet!

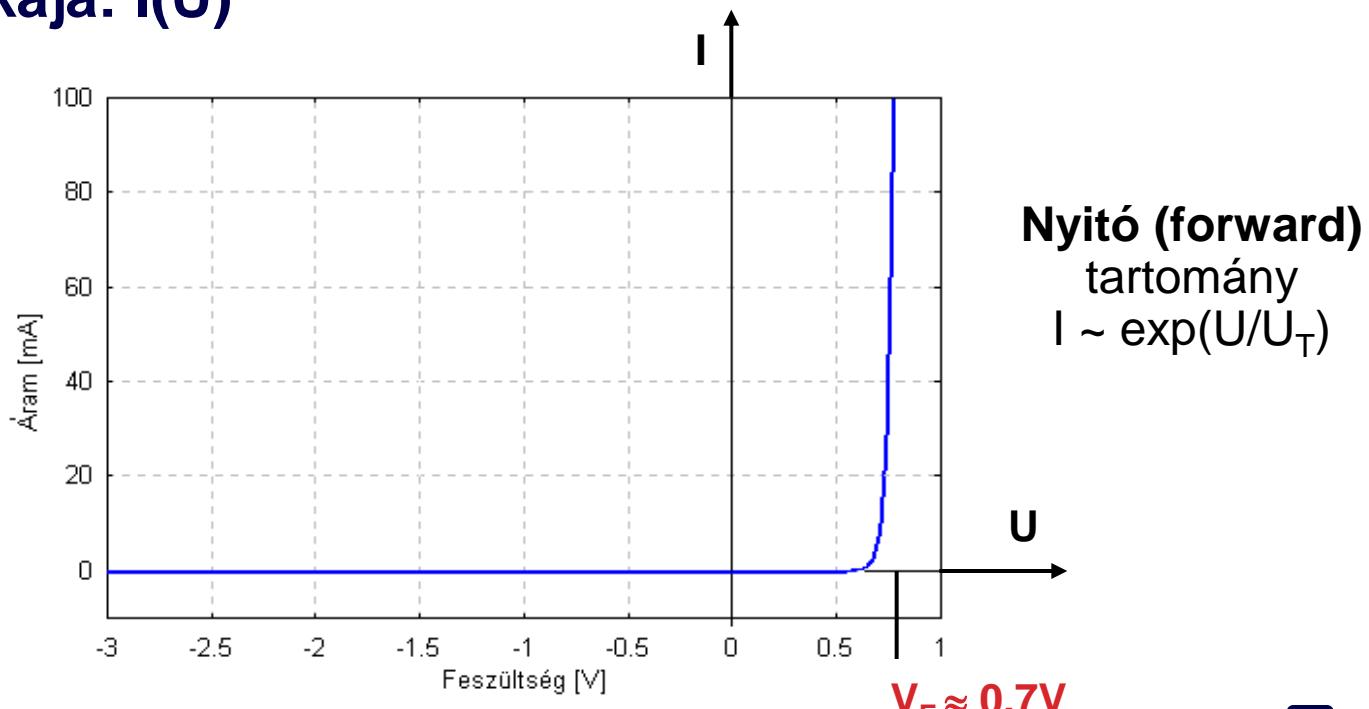


A dióda legfőbb tulajdonságai

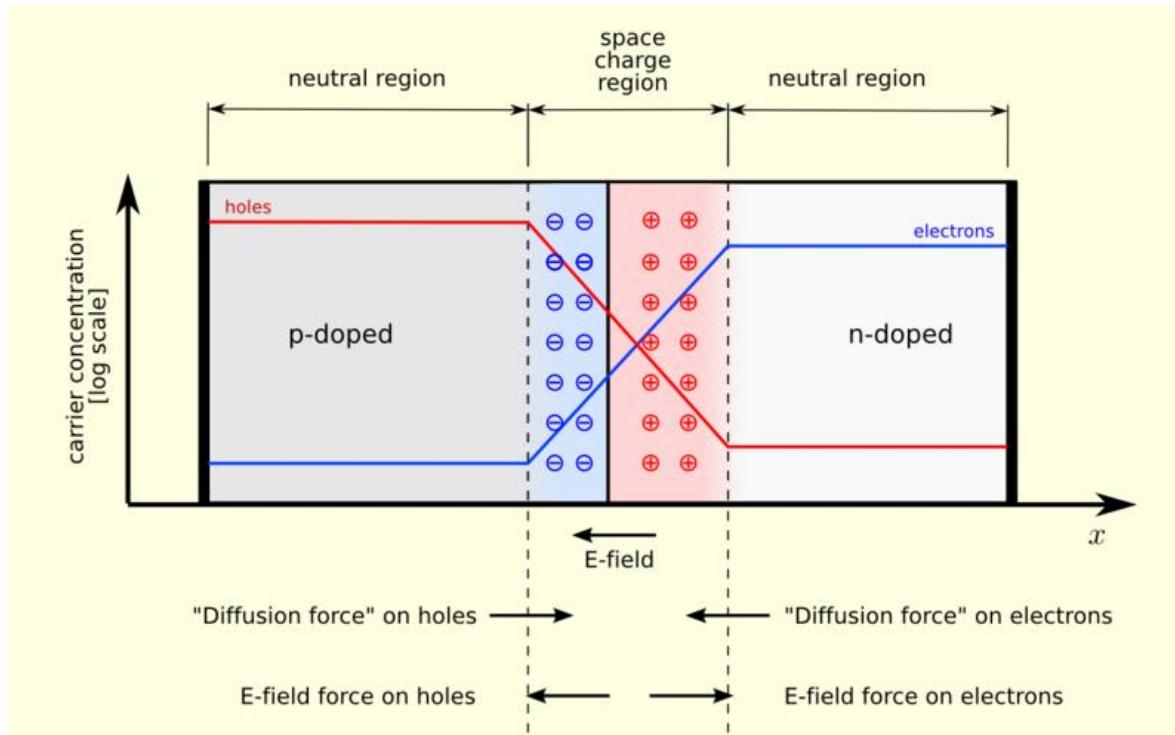
- ▶ Pozitív feszültségekre (p típusú anyag pozitívabb potenciálon, **nyitóirány**), a struktúrán a feszültségtől exponenciálisan függő áram folyik.
- ▶ Negatív feszültségekre (p oldal negatívabb, **záróirány**) a struktúrán nagyon kis, gyakorlatilag feszültségfüggetlen áram folyik.

Karakterisztikája: I(U)

Záró (reverse)
tartomány
 $I \sim 10^{-12}$
 A/mm^2
(Si, T=300 K)



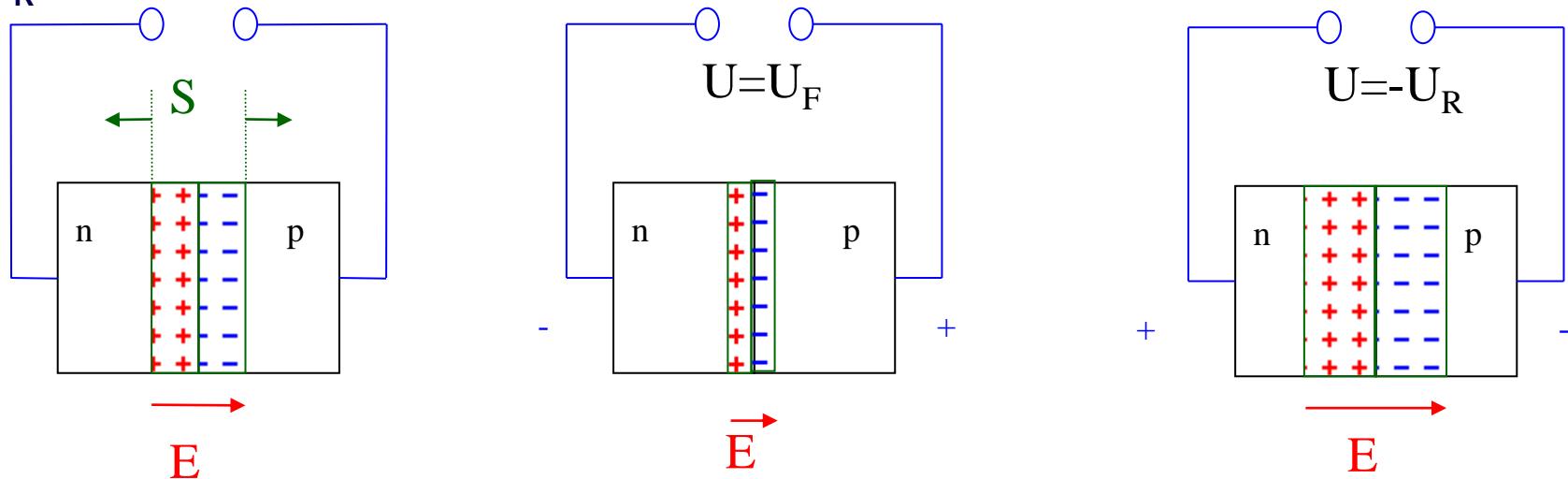
A pn átmenet elektrosztatikus viszonyai



- ▶ A többségi töltéshordozók az átmenet környezetében átdiffundálnak a túloldalra (mivel az n oldalon sok az elektron, a p oldalon pedig kevés... lyukakra ugyanez igaz, a p oldalon sok a lyuk, az n oldalon kevés)
- ▶ Így az átmenet környezetében töltéshordozóktól **kiürített réteg** vagy **tértöltésréteg** jön létre. A kristályrácsban lévő adalékionok viszont egy erőteret hoznak létre, ami a további diffúzió ellen hat.

A dióda működése

- **Egyensúly:** a többségi töltéshordozók diffúziós árama egyensúlyban van a kisebbségi töltéshordozók drift áramával, $I = 0$.
- **Nyitóirány (forward):** a nyitófeszültség csökkenti a térerősséget, így az áramegyenlőség felbomlik: a többségi töltéshordozók diffúziós árama megnő, I_F : nagy.
- **Záróirány (reverse):** a növeli a térerősséget, így a kisebbségi töltéshordozók sodródási árama kerül túlsúlyba, de ezek kis száma miatt az így kialakuló áram I_R : kicsi.



Az ideális dióda karakterisztika egyenlete

$$I = I_0 \left(e^{U/U_T} - 1 \right)$$

- ▶ Karakterisztika egyenlet: $I=f(U)$ függvény...
- ▶ Nemlineáris eszköz.
- ▶ Ez az **ideális dióda egyenlet**
 - I_0 a pn átmenet **szaturációs** vagy **záróáram konstansa**, csak anyagállandóktól és az adalékkoncentrációtól függ.
 - $I_0 \approx 10^{-14} \dots 10^{-15}$ A Si diódán.
 - U_T a termikus feszültség (kT/q), 26mV szobahőmérsékleten.
 - Nyitóirányban az áram exponenciálisan növekszik.
 - 60mV feszültség-növekedés hatására az áram megtízszerződik...

A valós dióda karakterisztikája

- Nyitóirányban egyéb másodlagos jelenségek miatt:

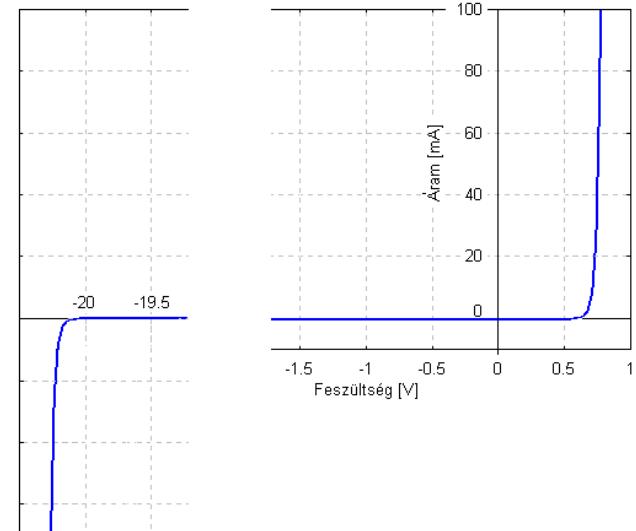
$$I = I_0 \left(e^{U/mU_T} - 1 \right)$$

- m : a dióda idealitási tényezője, általában $1 < m < 2$, méréssel lehet megállapítani.
- Záróirányban

- Egy adott kritikus zárófeszültségnél, az ún. V_{BR} letörési feszültségnél a dióda záróárama hirtelen megnő és viszonylag nagy áramok folynak a diódán nagyon kis további feszültség-emelkedéssel. Ez a karakterisztika feszültség stabilizálásra alkalmazható.

Ha kívülről korlátozzuk az átfolyó áramot, akkor a letörésben való működés nem teszi tönkre a diódát.

Az erre a célra gyártott diódákat
ZENER diódáknak nevezik.

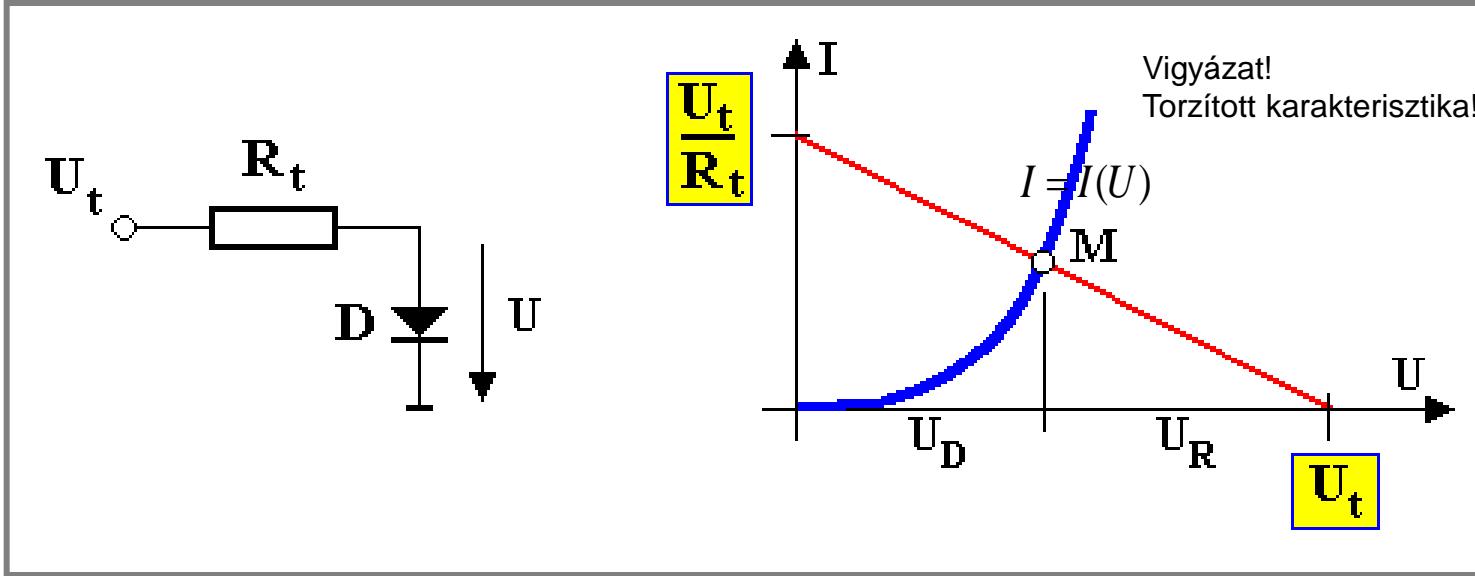


A dióda munkapontja

- ▶ A dióda **karakterisztika egyenlete** a dióda működése során lehetséges, összetartozó áram és feszültségértékeket adja meg.
- ▶ A tényleges működés során a **dióda, ill. tetszőleges nemlineáris karakterisztikájú elem** a karakterisztika egy pontjában, az ún. **munkapontban** (operating point, quiescent point) működik. Ezt a pontot az áramkörben a vizsgált nemlineáris elemet körülvevő elemek határozzák meg.
- ▶ A munkapont megállapítását hívjuk egyenáramú (DC) analízisnek.
- ▶ Általában a munkaponti mennyiségeket **NAGYBETŰVEL** jelöljük.

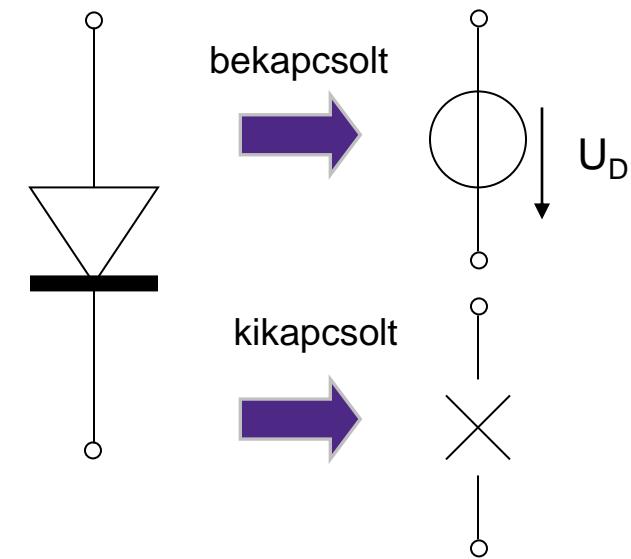
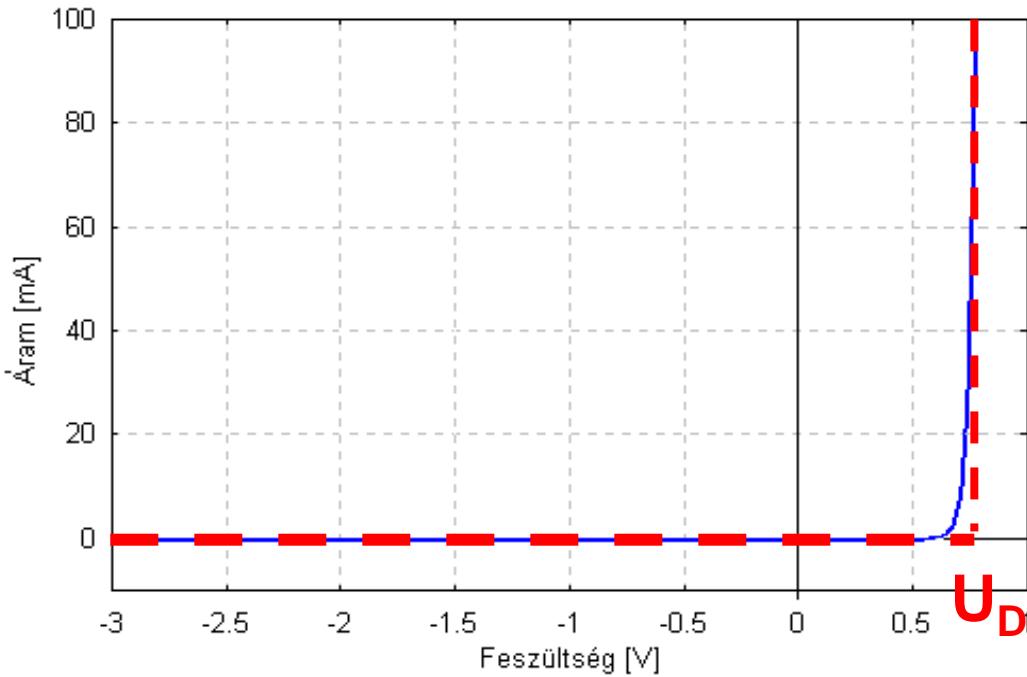


A dióda munkapontja



- ▶ Az áramkörre felírt huroktörvényből: $U_t = IR_t + U$, azaz $I = \frac{U_t - U}{R_t}$
- ▶ Egy egyenes, az ún. **munkaegyenes** egyenlete adódik (ez tulajdonképpen az áramkörben a diódán kívül előforduló elem „karakterisztikája” a dióda feszültségének függvényében).
- ▶ Az áramkörben kialakuló munkapontot a két függvény metszéspontja adja.
- ▶ Ha a karakterisztika egyenlet grafikusan adott – a szerkesztés könnyen elvégezhető.
- ▶ (általában csak jelenségek **szemléltetésére** használjuk...)

A munkapont közelítő meghatározása



- ▶ Kihasználjuk, hogy az exponenciális függvény igen meredek...
- ▶ A bekapcsolt (= nyitóirányú áramot vezető) diódát egy U_D feszültségforrással, a kikapcsolt diódát pedig szakadással helyettesítjük.
- ▶ A helyettesítő feszültségforrás feszültségét, U_D –t az adatlapból állapítjuk meg, Si diódára kb. 0,7V

A munkapont közelítő meghatározása

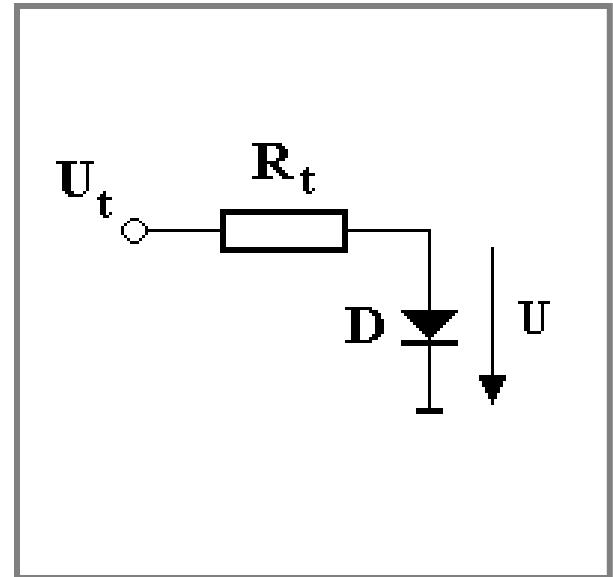
► Feltételezzük, hogy a dióda vezet.

- Mivel az ellenállás egyik végén a tápfeszültség, másik végén közelítőleg a dióda feszültség van, ezért

$$I = \frac{U_t - U_D}{R_t}$$

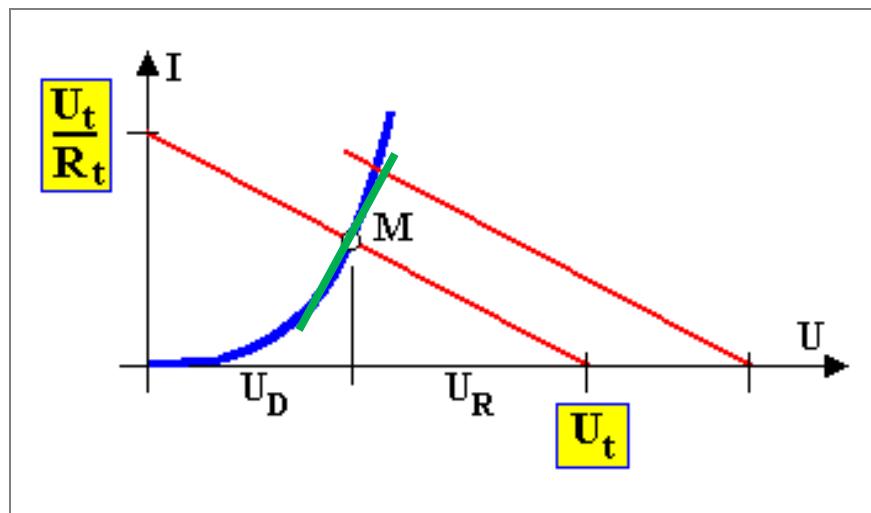
- Si diódára $U_D=0,7V$, legyen a tápfeszültség 5V, az ellenállás pedig $1k\Omega$, ekkor a munkaponti áram:

$$I = \frac{5-0,7}{1} = 4,3mA$$



Mi a helyzet kis változások esetén?

- ▶ A tápfeszültség változása csak kisebb mértékű változást okoz a munkaponti mennyiségekben. Kis változásokra a dióda karakterisztika lineárisnak tekinthető, és a munkapontban a munkapontbeli érintővel g_d ill. annak reciprokával, az ún. r_d **differenciális ellenállás**sal helyettesíthető.
- ▶ (valójában a nemlineáris karakterisztikát a munkapont környékén elsőrendű Taylor sorba fejtettük... mivel a derivált „ellenállás” dimenziójú - a változást egy differenciális ellenállással tudjuk leírni.)
- ▶ Erősen függ a munkaponttól!

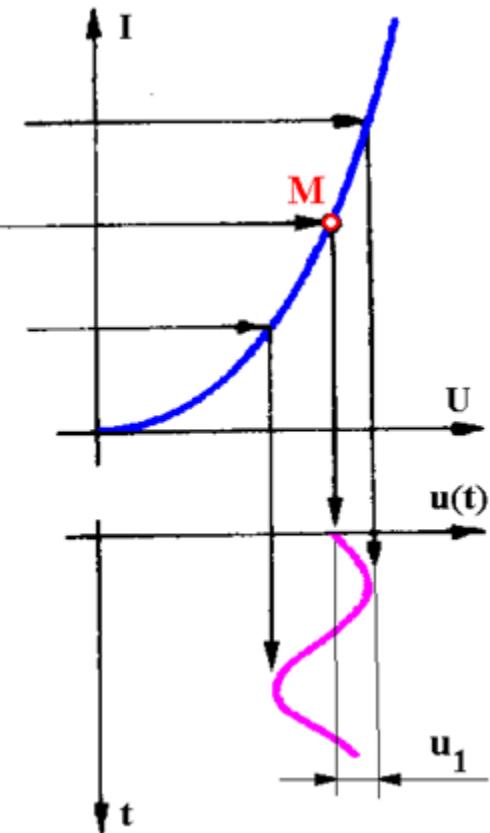
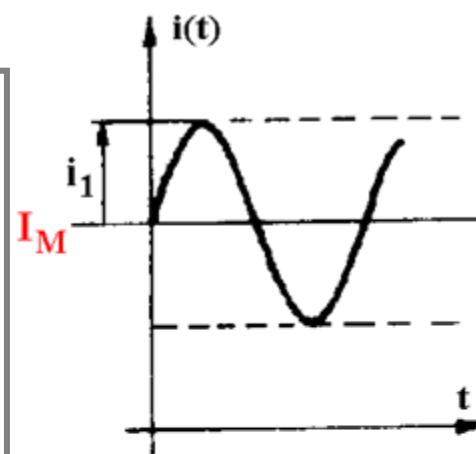
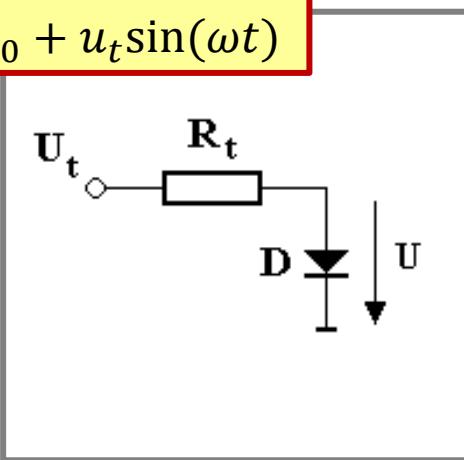


$$r_d = \frac{\partial U}{\partial I} = \frac{m U_T}{I}$$

A dióda kisjelű működése

Kíváncsiak vagyunk, mi történik az egyensúlyi állapot környéki kis változások esetén.

$$U_t(t) = U_{t0} + u_t \sin(\omega t)$$

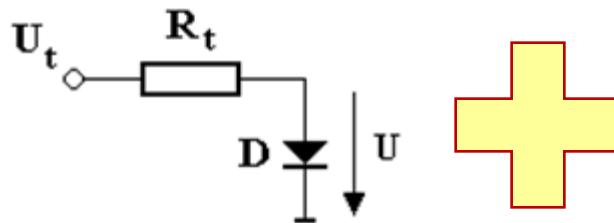


- ▶ A munkapont környéki „kis” változásokat szokás szerint kisbetűvel jelöljük.
- ▶ Ha a változás kicsi, akkor a dióda árama és feszültsége is közel szinuszosan fog ingadozni a munkapont körül.
- ▶ Hogyan számíthatnánk ki?

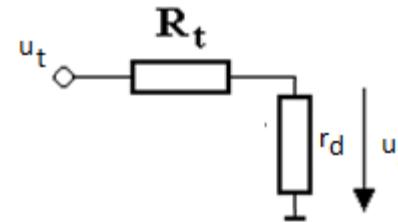
A számítás elve

► Két részre bontjuk a feladatot

- Először meghatározzuk a munkapontot (DC)
- Majd elkészítjük a kisjelű változásokra érvényes helyettesítést, amely jelen esetben a differenciális ellenállás, és kiszámítjuk a változás hatását. (Ez az ún. AC analízis.)
- Majd a két eredményt szuperponáljuk. (Addig tehetjük meg, amíg az egyenessel való karakterisztika közelítés adott hibahatáron belül marad...)

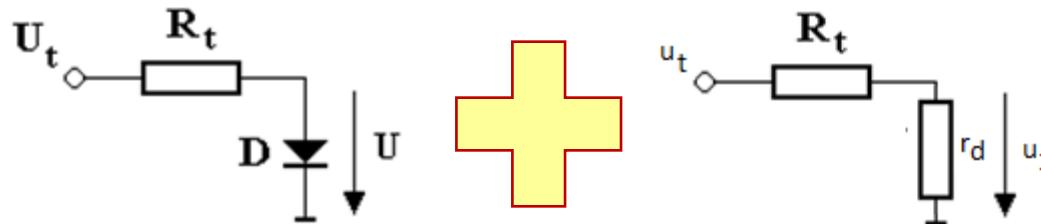


DC = egyensúly



AC = változás

Példa az AC számításra



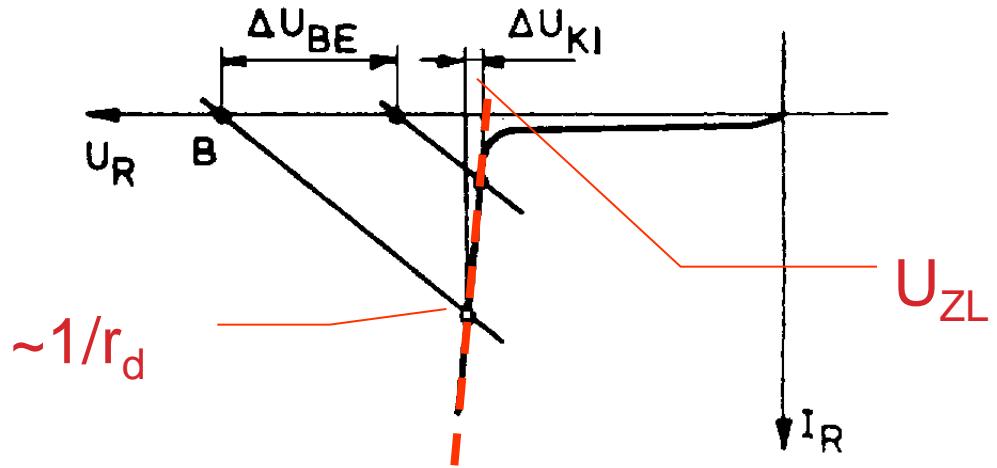
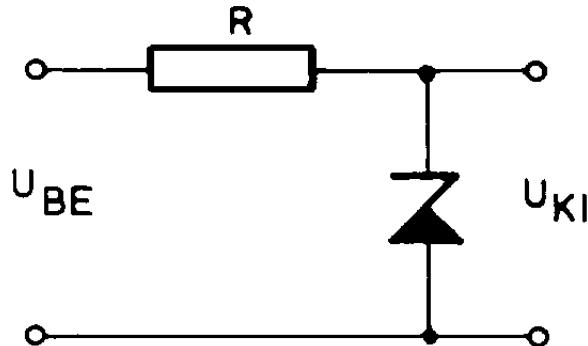
► A változásra:

- $i_1 = \frac{u_t}{R_t + r_d}$ és $u_1 = r_d i_1 = \frac{r_d}{R_t + r_d} u_t$

► Legyen $R_t = 1k\Omega$, $U_t = 5V$ ahogy az előző számításnál, a feszültség-ingadozás pedig legyen 1V!

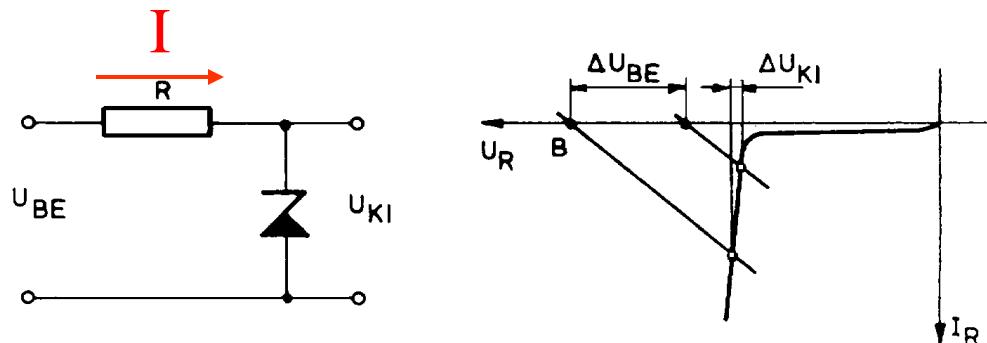
- Ekkor $r_d = \frac{U_T}{I} = \frac{26mV}{4.3mA} = 6\Omega$
- A dióda áramváltozása $i_1 = \frac{1}{1,006k} \approx 1mA$
- A diódán a feszültség megváltozása: $u_1 = 6\Omega \cdot 1mA = 6mV$

Referencia feszültség, ill. stabilizált feszültség előállítása Zener diódával



- ▶ A letörési, igen meredek karakterisztikát használjuk ki.
- ▶ A karakterisztikán látható, hogy nagy bemeneti feszültségváltozások esetén is a Zener dióda feszültsége keveset változik.

Példa.



► Határozzuk meg a Zener dióda áramát és feszültségét, ha $U_{BE}=12V$, $R=150\Omega$, a Zener dióda letörési feszültsége pedig 3,3V!

- Mivel a bemeneti feszültség meghaladja a Zener letörési feszültségét, a Zener dióda letörésben működik, feszültsége kb. 3,3V, árama pedig

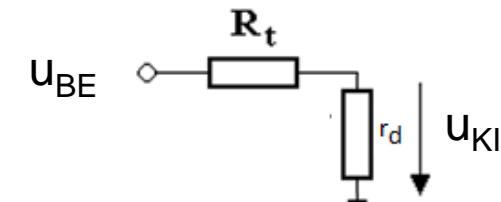
$$I \cong \frac{U_{BE} - U_Z}{R} = \frac{12 - 3,3}{0,15} = 60mA$$

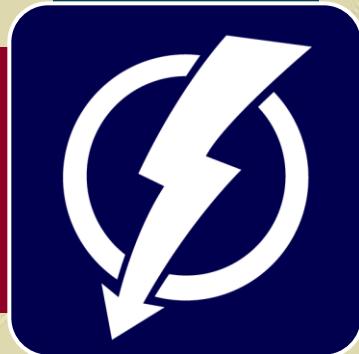
► Mennyit változik a kimenet feszültsége, ha a bemeneti feszültség 1V amplitúdóval megváltozik? A differenciális ellenállás 3Ω .

- A feszültségesztés alapján a kimeneti feszültség változása:

$$u_{KI} = u_{BE} \cdot \frac{r_d}{R_t + r_d} = \frac{3}{153} = 20mV$$

- Azaz a bemenet feszültség ingadozása ötvened részére csökkent.

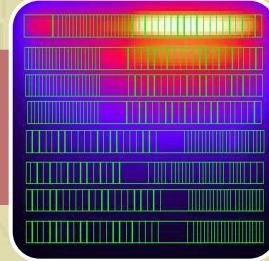
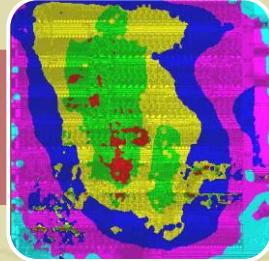
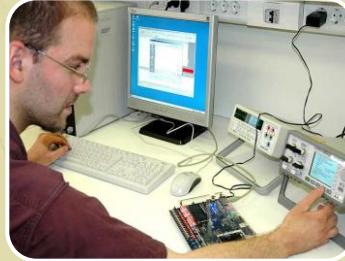




Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi
Egyetem

Elektronikus Eszközök Tanszéke

Dióda alkalmazásai



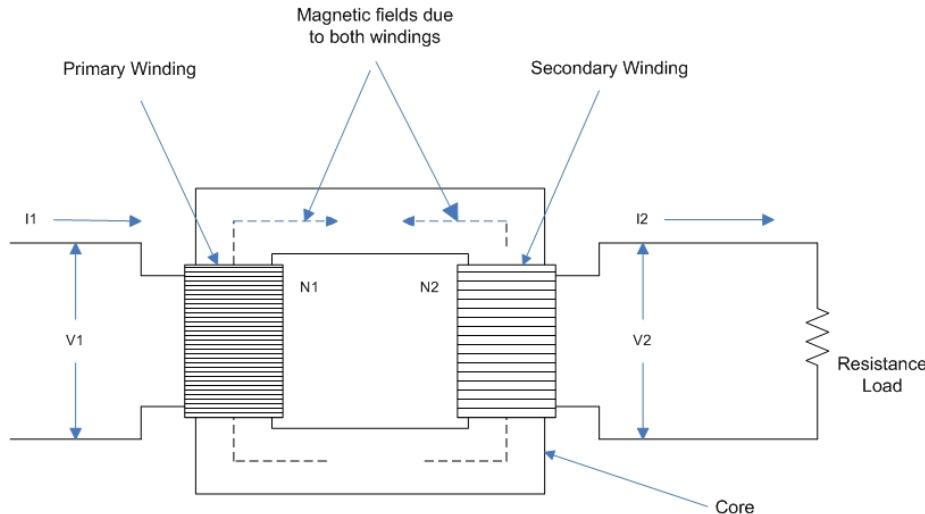
Egyenirányítás

- ▶ Az elektronikus áramkörök nagyobbrészt egyenfeszültséget igényelnek a működéshez.
- ▶ Telepes (elem vagy akkumulátor) működés esetén ez a feltétel teljesül.
- ▶ A villamosenergia-elosztó hálózat átlagos felhasználó által hozzáférhető végpontján (a továbbiakban konnektor ☺) az EU-ban 230V effektív értékű, 50Hz-es szinuszos váltakozó feszültség mérhető.
 - Megjegyzés: egy váltakozó feszültség effektív értéke az az egyenfeszültség, amely a rákapcsolt ellenálláson ugyanakkora munkát végez.
 - Azaz: $\int_0^T U^2(t)dt = U_{eff}^2 T$, mivel a teljesítmény a feszültség négyzetével arányos.
 - A konnektor feszültségének időfüggvénye tehát (bizonyítás nélkül..)
 - $\sqrt{2} \cdot 230\sin(2\pi 50t)$, azaz kb. 325V amplitúdójú, 50Hz frekvenciájú szinuszos jel
- ▶ Tehát egyrészt egyenfeszültséggé kell alakítani – azaz **egyenirányítani kell**, másrészt le kell csökkenteni az áramkörnek szükséges mértékben.
- ▶ Megoldások:
 - Transzformátor (feszültség csökkentés) + egyenirányítás
 - Egyenirányítás + DC/DC konverzió (ez a modernebb és jobb hatásfokú)
 - A DC/DC konvertereket nem tárgyaljuk...



A transzformátor

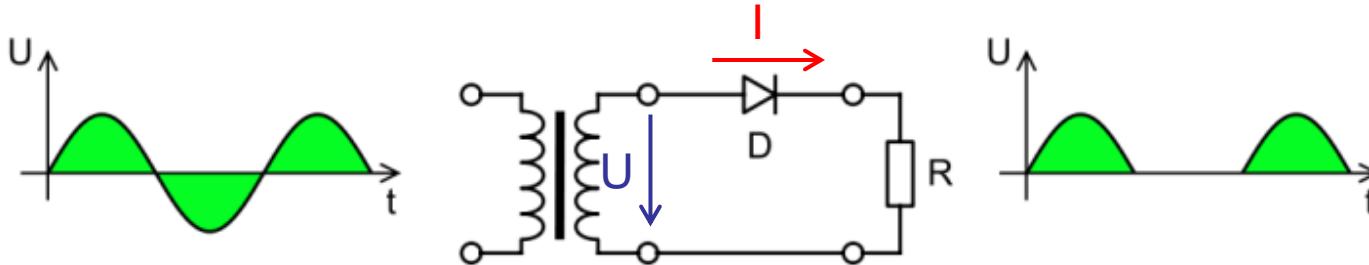
- ▶ Primer oldal: ahol az energia betáplálás történik
- ▶ Szekunder oldal: ahol a fogyasztót kapcsoljuk. (felcserélhető...)
- ▶ Az ideális transzformátorra:
 - $\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$
 - Azaz a két oldal feszültségének aránya megegyezik a menetszámok arányával.
 - Azonban a két oldalon a teljesítmény ideális esetben megegyezik, valós esetben pedig a szekunder oldali teljesítmény kisebb mint a primer oldali, a veszteségek miatt.
 - Ideális esetben: $U_1 I_1 = U_2 I_2$
 - A fel (feszültségnövelés) és le (feszültség csökkentés) transzformálás is gyakran előfordul a gyakorlatban.
 - Csak váltakozó áramra működik!
- ▶ Az első, energiaátvitelre alkalmas transzformátor: Bláthy Otto, Déri Miksa, Zipernowsky Károly, 1885, Ganz Művek



Modern, toroid transzformátor

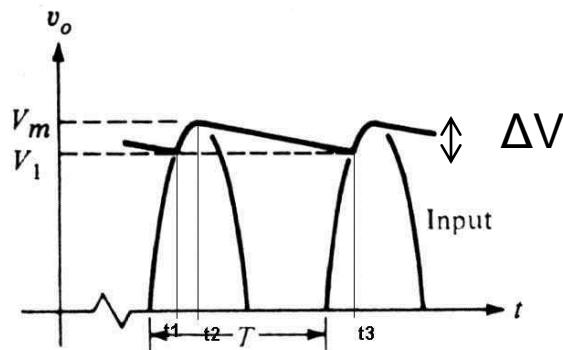
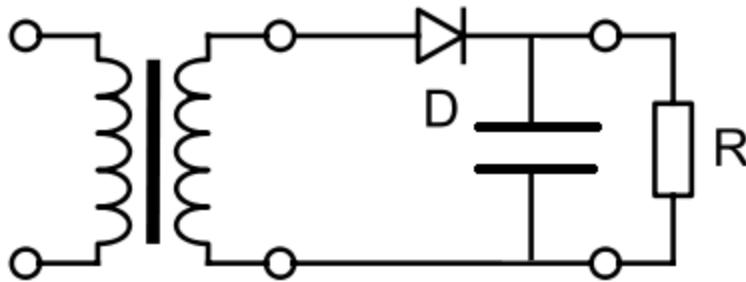


Egyutas egyenirányítás



- ▶ A dióda csak nyitóirányba vezet, így áram csak a pozitív félperiódusban folyik.
- ▶ Ha a transzformátoron mért váltakozó feszültség amplitúdója U , akkor
 - nyitóirányban, azaz pozitív félperiódusban az ellenállás maximális feszültsége kb.
 - $U_{max} = U - U_D$ (a szokásos közelítést alkalmazva)
 - $I_{max} = \frac{U - U_D}{R}$
 - Záróirányban áram nem folyik, a maximális zárófeszültség pedig U . (a letörési feszültségnek tehát ennél nagyobbnak kell lennie!)
 - Pl. 16V-os amplitúdó, Si dióda és 500Ω ellenállás esetén:
 - $U_{max} = 15,3V$ $I_{max} = 30,6mA$
- ▶ Problémák:
 - Csak az egyik félperiódusban folyik áram, így a hatásfok nem túl jó.
 - Lüktet – közvetlenül nem alkalmas áramköri felhasználásra, akkutöltésen kívül (ez volt az első felhasználás...) másra nem használható.

A pufferkondenzátor



► A kapcsolást egy kondenzátorral egészítjük ki.

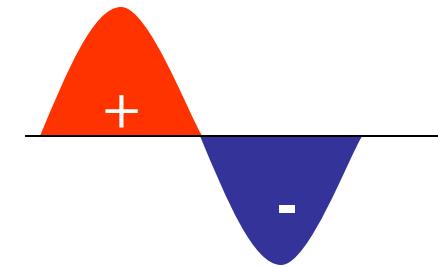
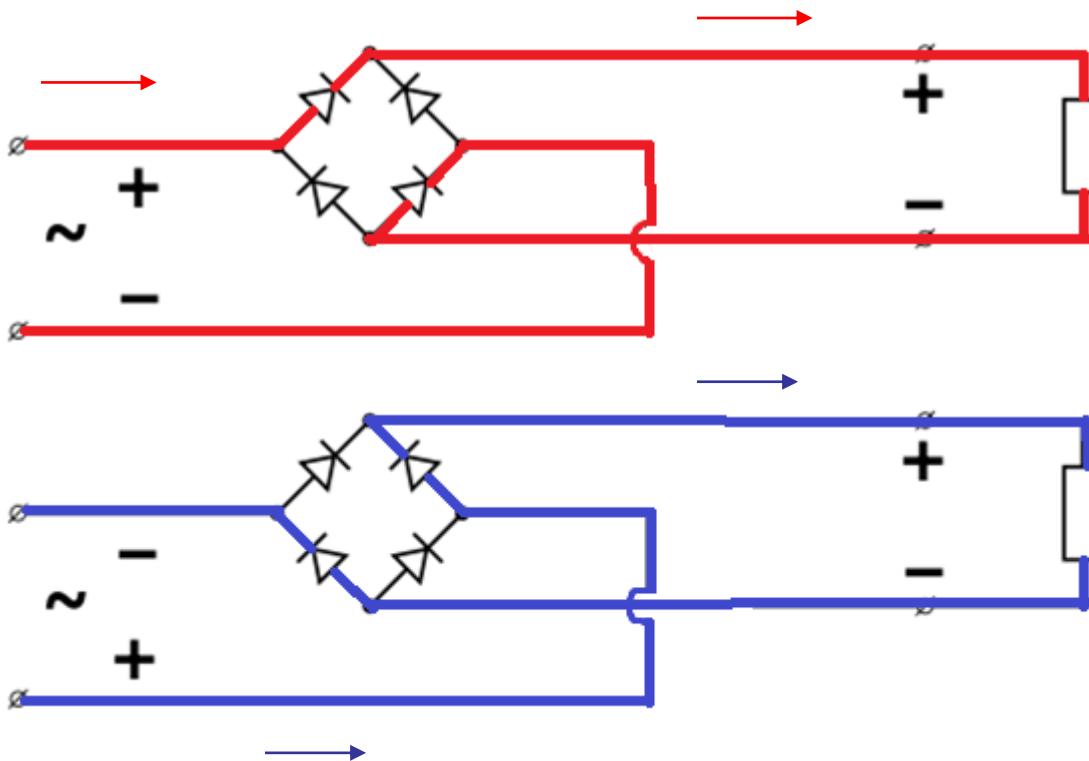
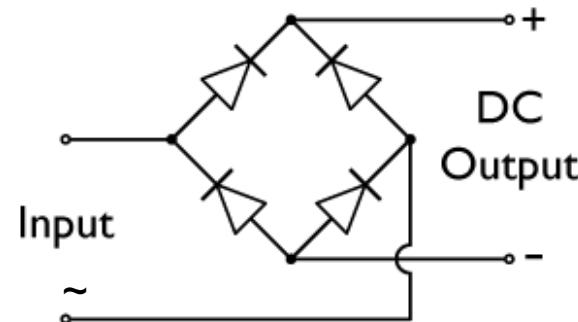
- A kapacitásban tárolt töltés biztosítja az áramot a dióda kikapcsolt állapotában.
- t_1 időpillanatban a transzformátor feszültsége nagyobb, mint a kapacitásé, emiatt a dióda kinyit és a kapacitás csúcsfeszültségre töltődik.
- t_2 időpillanatban a bemenet feszültsége a kapacitás feszültsége alá csökken. Ekkor a dióda lezár, a terhelés (itt: az R ellenállás) áramát a kondenzátor biztosítja.

► A hullámosság becslése (az ábrán: $\Delta V = V_m - V_1$)

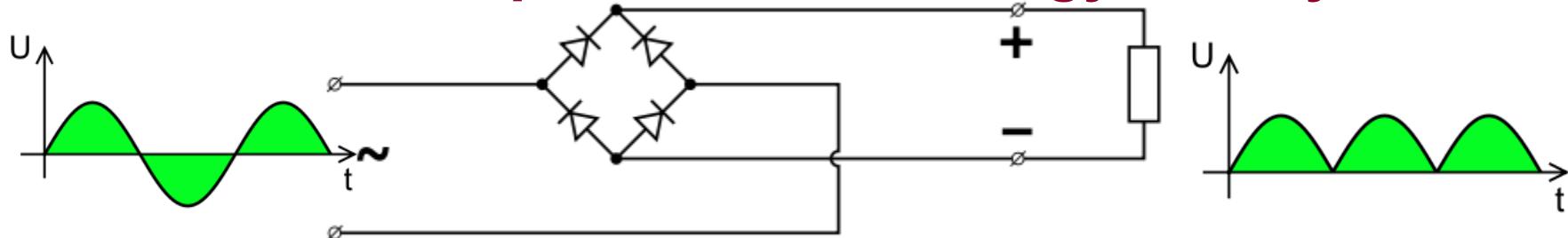
- Számítsuk ki mennyit csökken egy V_m feszültségre feltöltött kondenzátor feszültsége a periódusidő (T) alatt:
- $V(T) = V_m e^{-\frac{T}{RC}}$, azaz $\Delta V = V_m \left(1 - \exp\left(-\frac{T}{RC}\right)\right)$
- Azaz a kapacitás növelésével a hullámosság csökken!

A Graetz / híd kapcsolás/ kétutas egyenirányítás

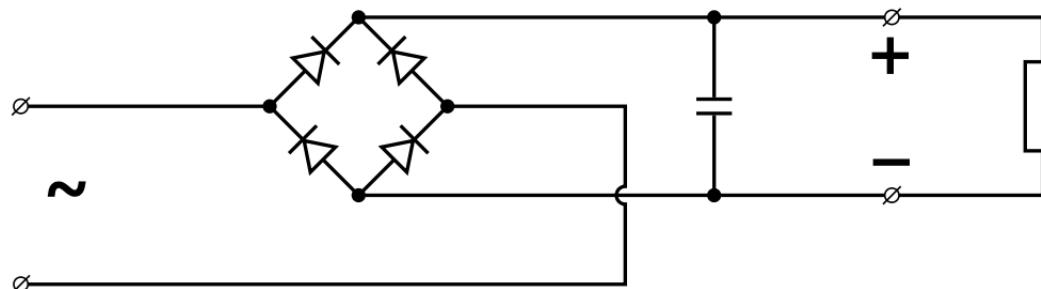
- ▶ Négy diódát tartalmaz.
- ▶ Egy tokba szerelve kapható.
- ▶ Működése: pozitív félperiódusban (piros) illetve negatív félperiódusban (kék)



A Graetz / híd kapcsolás/ kétutas egyenirányítás



- ▶ A Graetz tehát mintegy „abszolút értéket” képez.
- ▶ Ha a bemeneti váltakozó feszültség amplitúdója U , akkor
 - Az ellenállás maximális feszültsége kb.
 - $U_{max} = U - 2U_D$ (a szokásos közelítést alkalmazva és figyelembe véve, hogy két dióda nyitott ki.)
 - $I_{max} = \frac{U-2U_D}{R}$
 - A záróirányban lévő diódákon áram nem folyik, a maximális zárófeszültség pedig U (a letörési feszültségnek U -nál kell nagyobbnak lennie!)
 - Pl. 16V-os amplitúdó, Si dióda és 500Ω ellenállás esetén:
 - $U_{max} = 14,6V$ $I_{max} = 29,2mA$
 - A diódáknak pedig 8V zárófeszültséget kell elviselniük.
- ▶ A lüktetés csökkentése ugyanúgy pufferkondenzátorral történik.

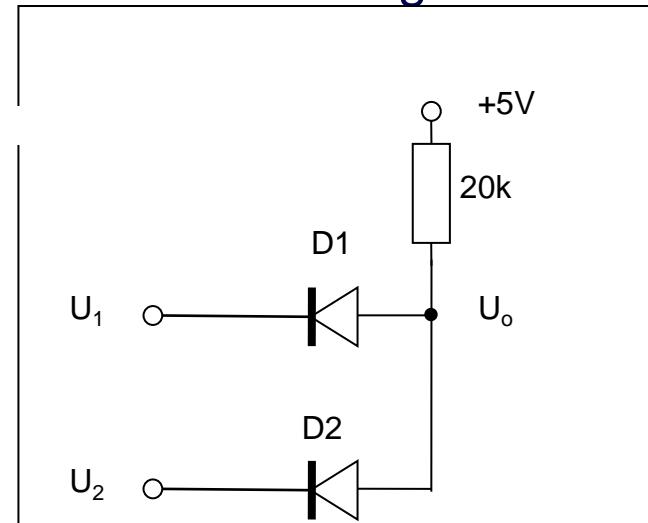


Digitális funkció megvalósítása

- ▶ A dióda, mint polaritásvezérelt kapcsoló, felhasználható digitális áramkörök építésére.
- ▶ Példa: határozzuk meg a kimenet feszültségét
 - (a) $U_1 = U_2 = 5 \text{ V}$
 - (b) $U_1 = 5 \text{ V}, U_2 = 0 \text{ V}$
 - (c) $U_1 = U_2 = 0 \text{ V}$
 - esetekben.

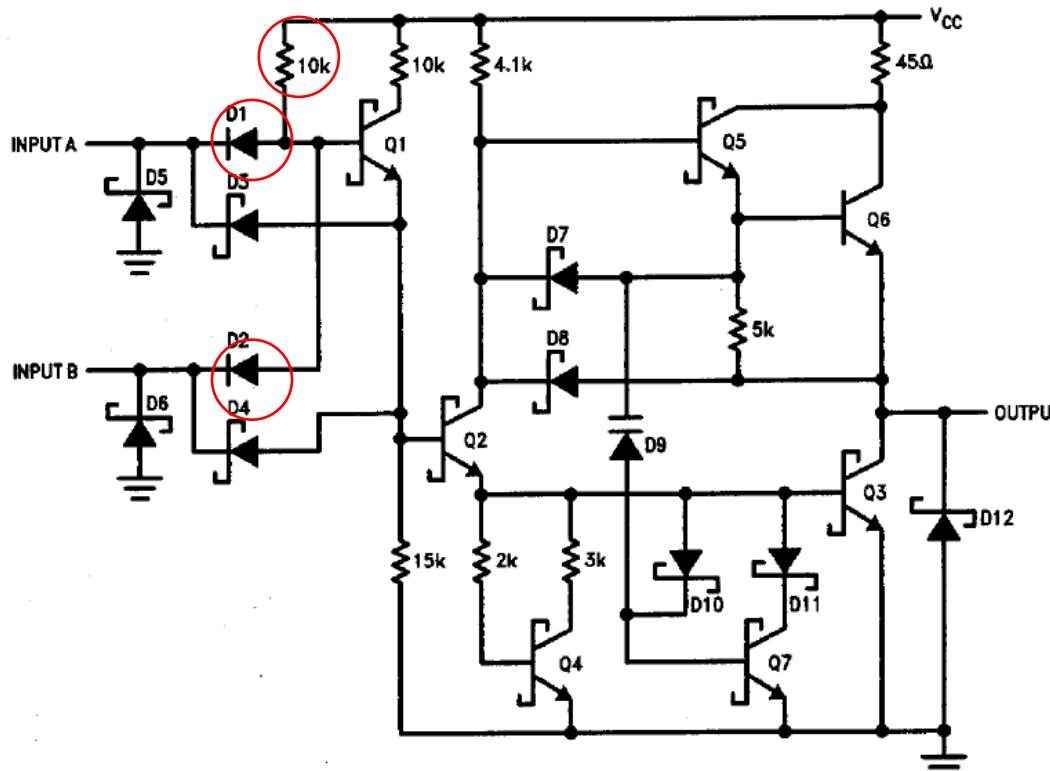
Megoldás:

- Ha minden bemenet 5V értékű, áram nem folyik, hiszen a diódán nincs feszültség, ami kinyitná, a dióda feszültsége 0V
- Ha valamelyik bemenet 0V, akkor a hozzá tartozó dióda kinyit, a kimenet pedig egy diódafeszültségnyi lesz, azaz kb. 0,7V
- Ha a logikai „1” –t 5V környékinek, a logikai „0”-t pedig 0V környékinek definiáljuk, akkor ez a kapcsolás egy logikai ÉS funkciót valósít meg.
- (nem túl jó: gondoljuk meg, ha 0,7V-ot kapcsolnánk a következő kapu bementére, akkor ott a logikai alacsony szint már 1,4V lenne stb.)



Talán említették Digitális technikán – a TTL

- ▶ TTL LS NAND kapu (7400)
- ▶ Részletesen nem tárgyaljuk, mert
 - Eljárt felette az idő.
 - Nem túl egyszerű, legalábbis a CMOS-hoz (ld. később) képest
 - De nézzük csak meg D1, D2 és 10k ellenállást! Az ÉS logika...



A Schottky dióda

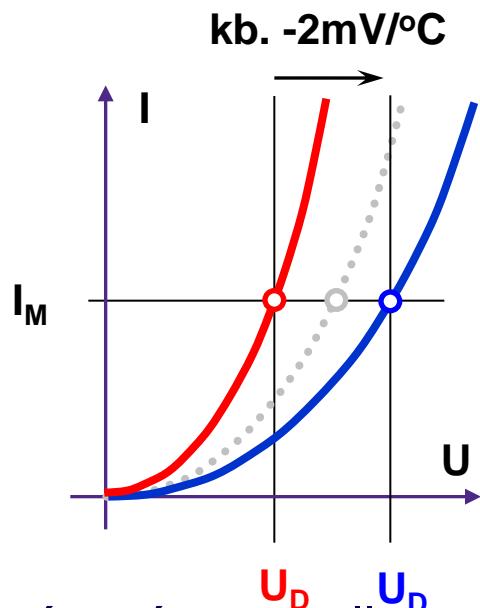


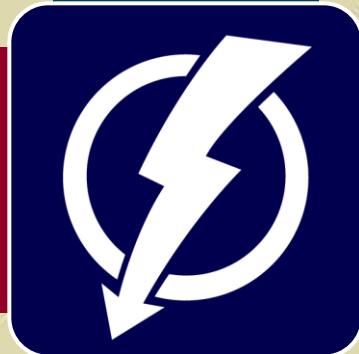
- ▶ Fém-félvezető átmenet, de hasonló tulajdonságokkal bír, mint a *pn* átmenet.
- ▶ Valójában az első, detektoros rádiókban használt kristályba nyomott tűk Schottky átmenetek voltak.
- ▶ Egyenirányító tulajdonságú, 0,2-0,4V nyitófeszültségnél már igen nagy árammal vezet. (Ez kedvezőbb a Si pn átmenet esetén lévő 0,7V-nál)
- ▶ Gyorsabb, mint a Si dióda.
 - Ennek pontos fizikai okaival részletesebben nem foglalkozunk.

Hőmérséklet érzékelés



- ▶ Adott áram mellett a pn átmenet feszültsége meglehetősen hőmérséklefüggő.
- ▶ A hőmérsékleti tényező kb. $2\text{mV/}^\circ\text{C}$, azaz kényszerített áram mellett a nyitófeszültség 1°C hőmérsékletnövekedés hatására 2mV -ot csökken. Ez a változás széles hőmérsékleti tartományokban nagyon jó közelítéssel lineárisnak tekinthető.
- ▶ Használata:
 - Hőmérséklet érzékelő szenzorok.
 - Hőmegfutást érzékelő áramköri elemek, amelyek az integrált áramkör teljesítményét korlátozzák.
 - Integrált áramkörök belső hőmérsékletének mérése, ez az ún. „junction temperature”.
 - CMOS logikai áramkörök tárgyalásánál majd visszatérünk erre, hogy pontosan hogyan történik a szabályozás.
 - Ezt néha közvetlenül kivezetik külső felhasználásra, de általában teljes, digitális megoldást biztosítanak a belső hőmérséklet mérésére.





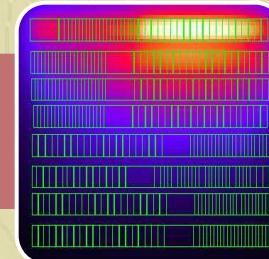
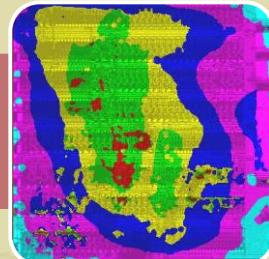
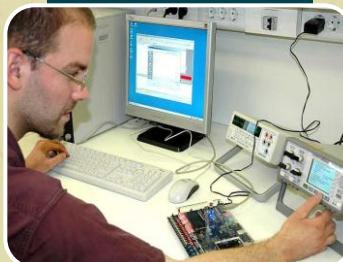
Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi
Egyetem

Elektronikus Eszközök Tanszéke



Fényemittáló diódák

Azaz LED-ek (Dr. Poppe András)



LED = világító dióda

- ▶ LED – light emitting diode
- ▶ Végyületfélvezetők: III-V-ös anyagok, pl.

- GaAs
- InP
- AlGaAs
- AlInGaP

**LED-ek gyártására használt elemek:
III és V oszlop a periódusos rendszerben:**

- ▶ Összetétel változása:

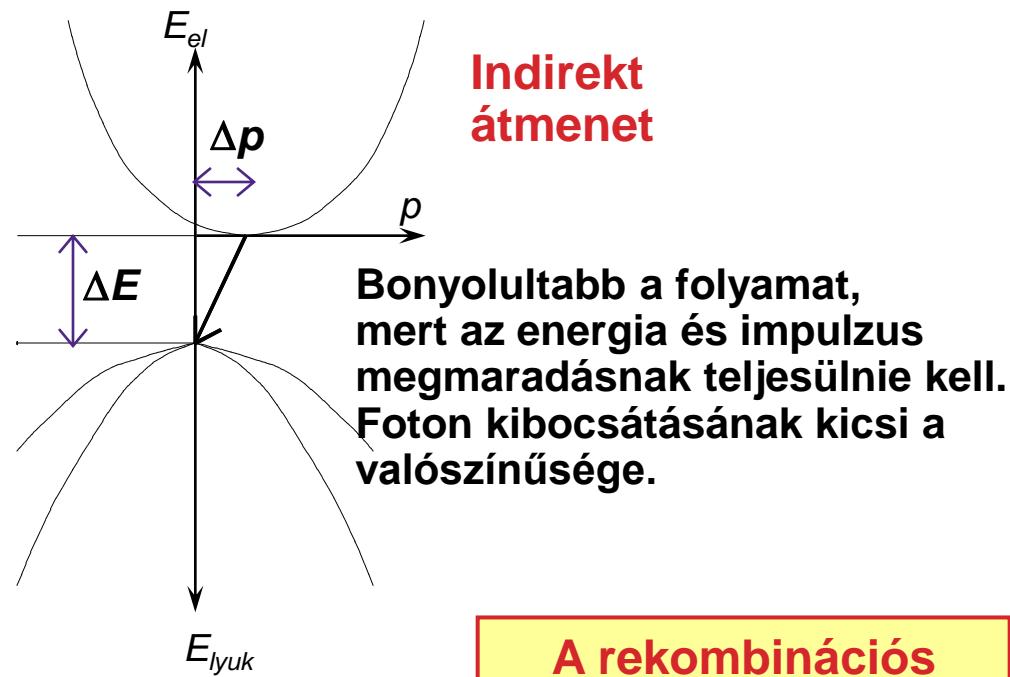
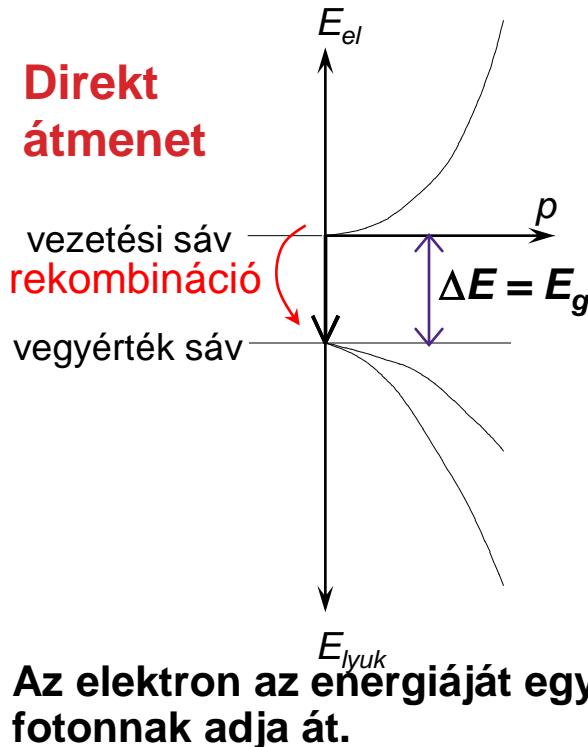
- Sávszerkezet (tiltott sáv szélesség)
- n/p típus

13 14 15 16 17 18
III A IVA VA VIA VIIA VIII A

2 He						
5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	18 Ar
13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	36 Kr
31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr	54 Xe
49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	86 Rn
81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	

Fénykibocsátás alapja: direkt sáv

- **Sávszerkezet:** a megengedett energia szintek az impulzusvektor (p) függvényében változnak.
- **Direkt átmenet:** a vegyértéksáv maximuma és a vezetési sáv minimumához azonos impulzus tartozik.



A rekombinációs áramhoz kötődik a fény emisszió.

LED-ek jellemzése

► A hullámhossz (szín) a tiltott sáv szélességétől (E_{gap}) függ, ami pedig a pn átmenet anyagi minőségétől függ, és a III. illetve az V. oszlopbeli elemek arányával beállítható.

$$h\nu = \frac{hc}{\lambda} = E_{gap}$$

► Elektromos paraméterek:

- Nyitó feszültség: 2.5 V .. 4 V, a színtől függ
- Nyitó áram:
 - kisteljesítményű, hagyományos LED-ek: ~10 mA
 - nagyteljesítményű LED-ek: 300 mA ... 800 mA ... 1500 mA
- Záróirány: kicsi letörési feszültség \Rightarrow védő dióda (az is LED – vörös)



Szinek

InGaN/GaN

Green

T = TrueGreen (InGaN) 525nm
V = VerdeGreen (InGaN) 505nm

White / CoD

W = White (GaN/InGaN)
Cx = Color on Demand (GaN/InGaN)

Blue

B = Blue (InGaN) 470nm
B = Blue (GaN) 466nm

InGaAlP

Green

P = PureGreen 560nm
G = Green 570nm

Yellow

Y = Yellow 587nm

Orange

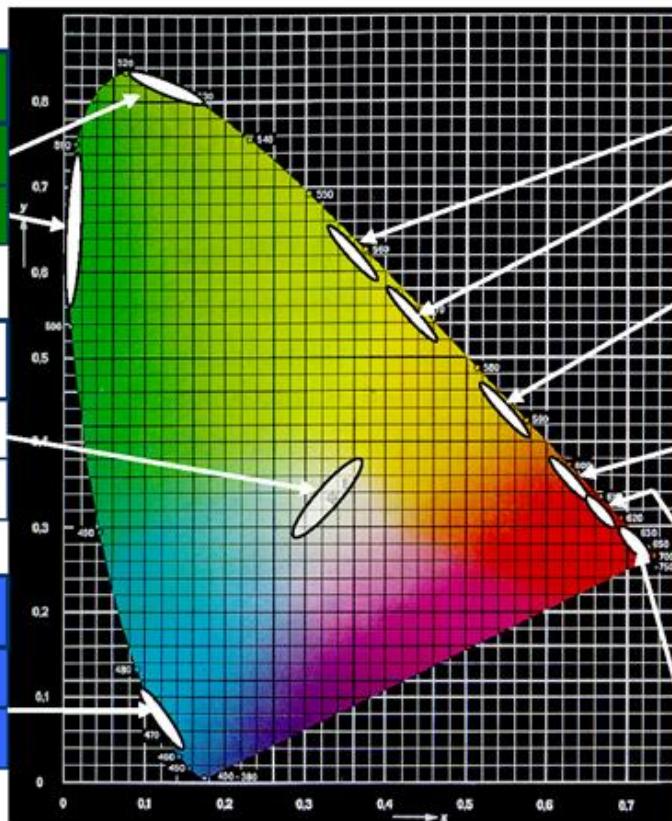
O = Orange 605nm

Orange Red

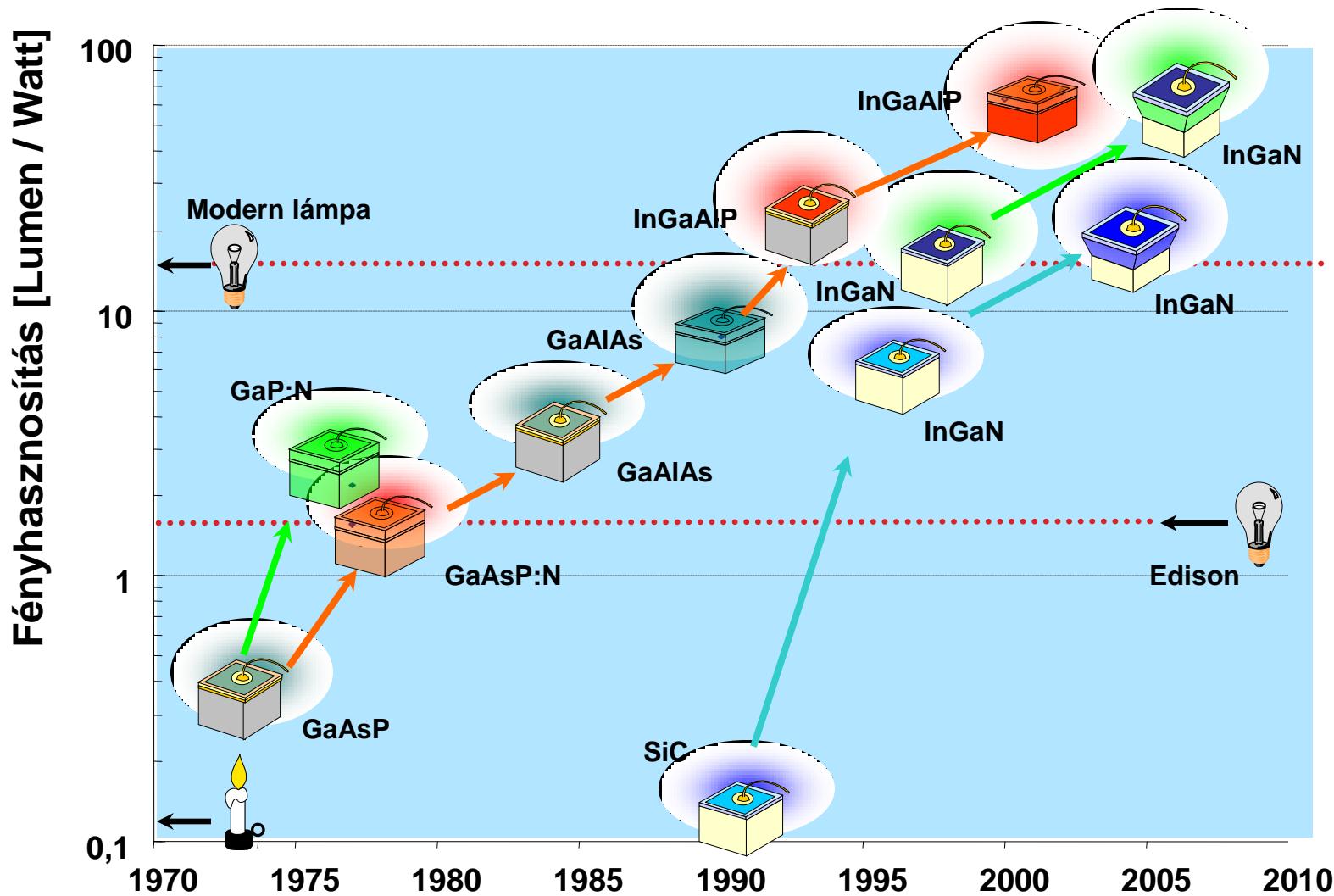
A = Amber 617nm

Red

S = Super-Red 630nm
H = Hyper-Red (GaAlAs) 645nm



A LED-ek fényhasznosítása

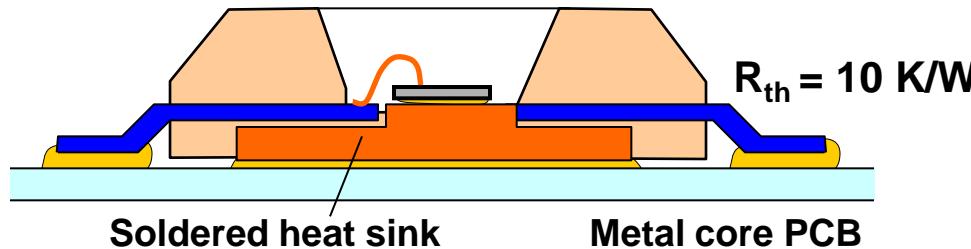


Toktípusok

OSRAM:

High Power LED

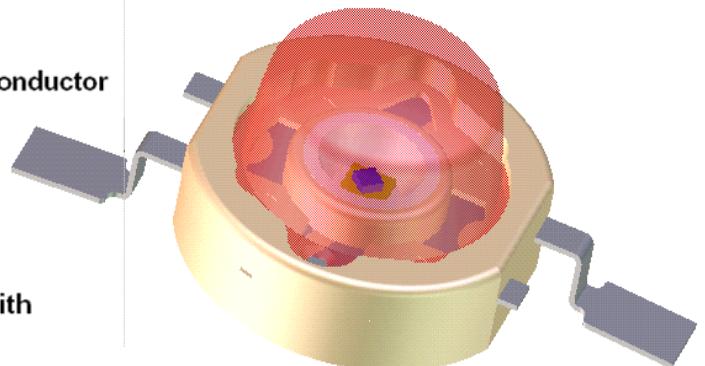
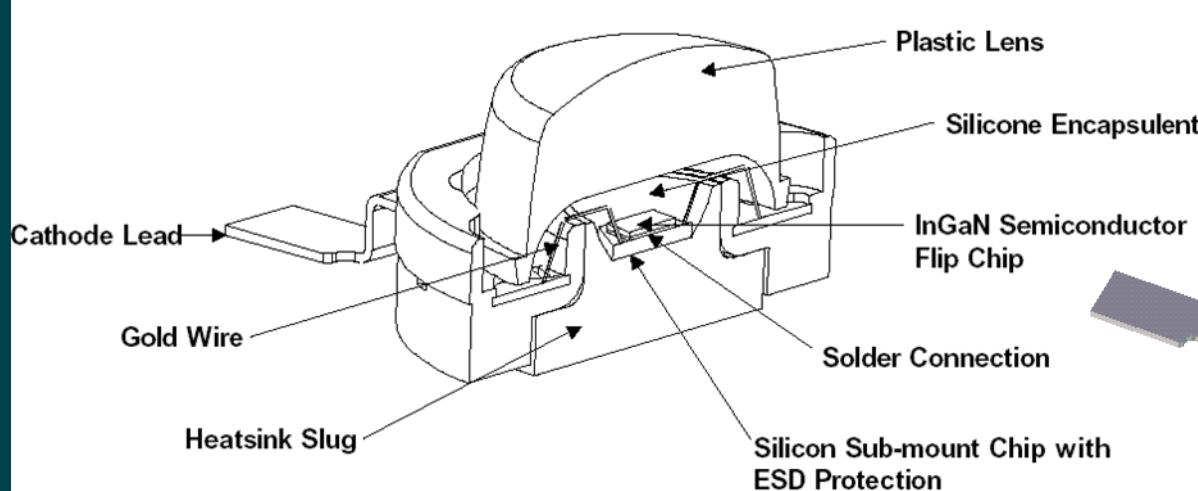
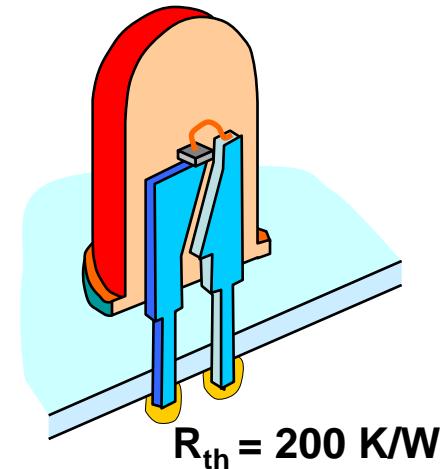
Chip 700 x 700 μm



Lumileds:

Radial LED

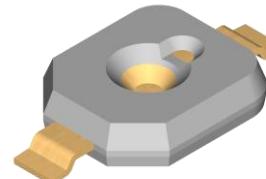
Chip 250 x 250 μm



LED-ek osztályozása tokozás szerint

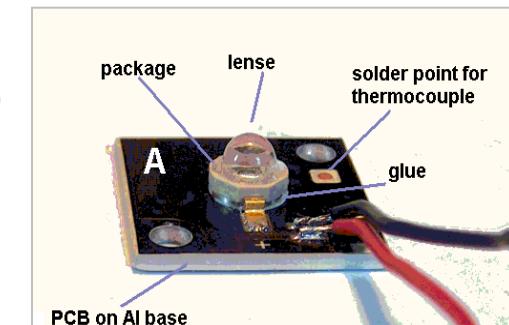
► Egyedi, tokozott LED-ek

- Level 0 device



► Fém magvas nyomtatott huzalozásra szerelt eszközök (MCPCB – alumínium hordozó)

- Level 1 device



► LED szerelvények



► LED cluster-ek

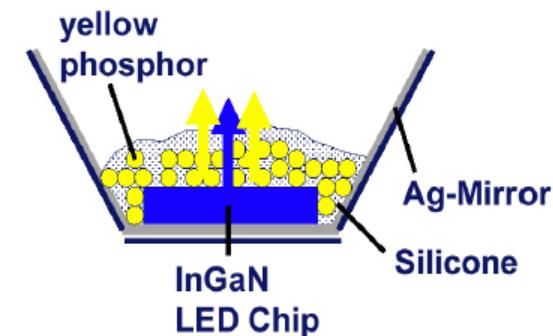
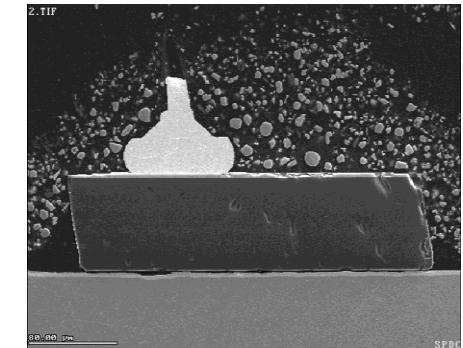
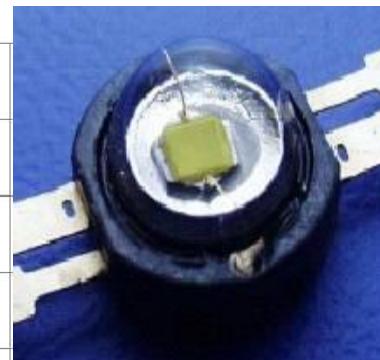
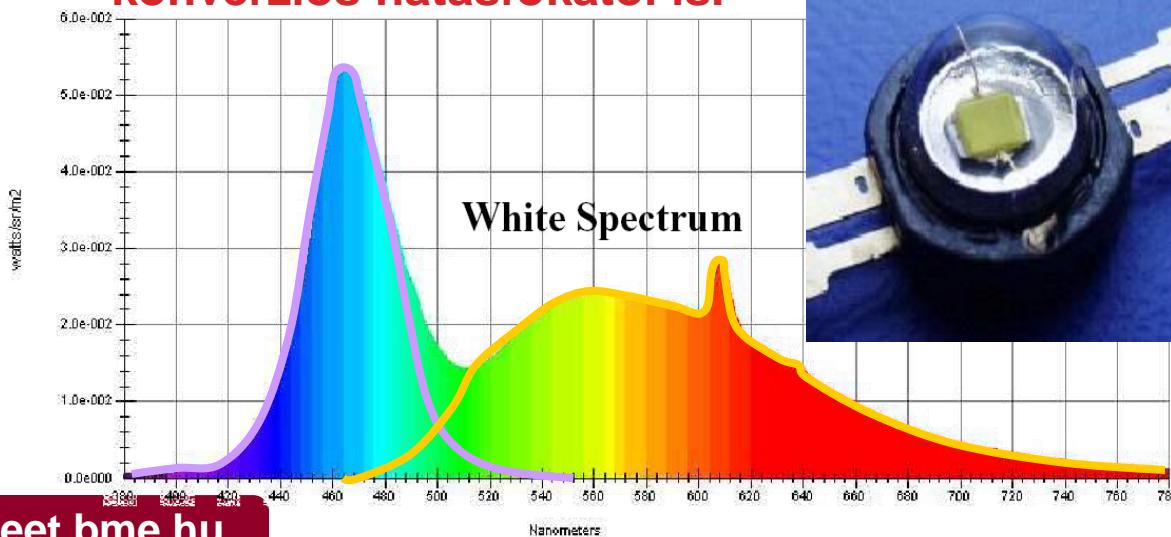


Fehér fény előállítása LED-del

- ▶ Vörös + zöld + kék LED
 - RGB modul
- ▶ Kék-LED + fénypor
- ▶ UV-LED + fénypor

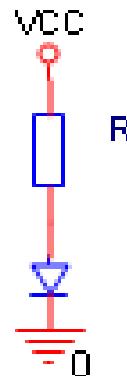


A hatásfok függ a foszfor (fénypor) konverziós hatásfokától is.



Példa: LED meghajtó áramkör méretezése

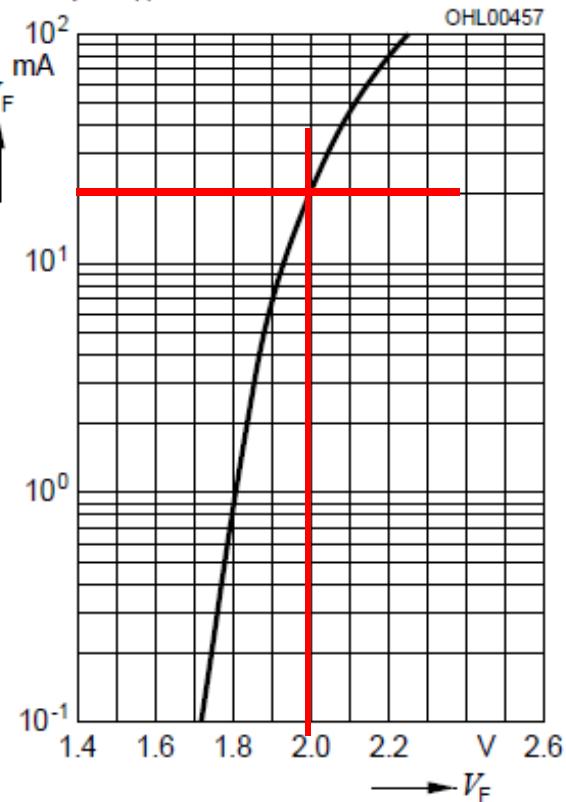
- ▶ Egy zöld színű LED-et szeretnénk egy 3,3V-os tápfeszültségről a 20mA munkapontban működtetni. A LED karakterisztikája adott.
- ▶ A kapcsolási rajz a következő:



- ▶ Az $I_L=20\text{mA}$ -es munkaponthoz $U_L=2\text{V}$ feszültség tartozik a karakterisztika alapján.
- ▶ A szükséges ellenállás:

$$\bullet \quad R = \frac{V_{CC} - U_L}{I_L} = \frac{3,3 - 2}{20} = 65\Omega$$

Durchlassstrom²⁾ Seite 15
Forward Current²⁾ page 15
 $I_F = f(V_F); T_A = 25^\circ\text{C}$



Fotodióda

- ▶ Záró irányban generációs áram folyik a kiürített rétegben, mivel a generációs/rekombinációs jelenségek az egyensúly visszaállítására törekednek.
- ▶ Ellentétes mechanizmus, mint a rekombináció, elektron-lyuk párok keletkeznek, amit a nagy térerősség elválaszt egymástól.
- ▶ Foton elnyeléssel többlet generáció lesz, emiatt megnövekszik az áram, ez lesz az ún. **fotoáram**.
- ▶ A lezárt pn átmenet tehát jó fényérzékelőnek
⇒ **fotodióda**
- ▶ Nagy megvilágítási tartományban működik. Generációra az a foton képes, amelynek energiája nagyobb, mint a tiltott sáv szélessége.
- ▶ Azaz
 - $h\nu = \frac{hc}{\lambda} > E_{gap}$, a hullámhosszra átrendezve: $\lambda < \frac{hc}{E_{gap}}$
 - Szilíciumra 1130nm – a közeli infravörös tartomány!
 - Infravörös szűrő kell tehát a kamerákra és érzékelőkre!



Fotodióda és LED együttes alkalmazásai

► Vezetéknélküli kommunikáció (IR)

- Egyszerű felépítés, „veszélytelen” hullámhossz.
- Többé kevésbé optikai rálátás szükséges.



► Üvegszálas kommunikáció

- LED helyett általában lézerdióda az adó
- A vevő fotodióda sem egy egyszerű pn átmenet, a nagy sebesség miatt.
- Akár sok Tbites sávszélesség, akár sok ezer km hosszan is.
- Fibre – Channel infrastruktúra
 - A storage csatolására.
- Elektromos zajtól, zavartól védett.

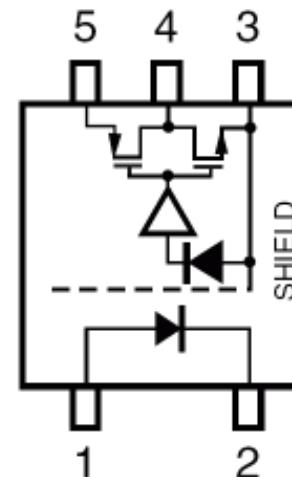
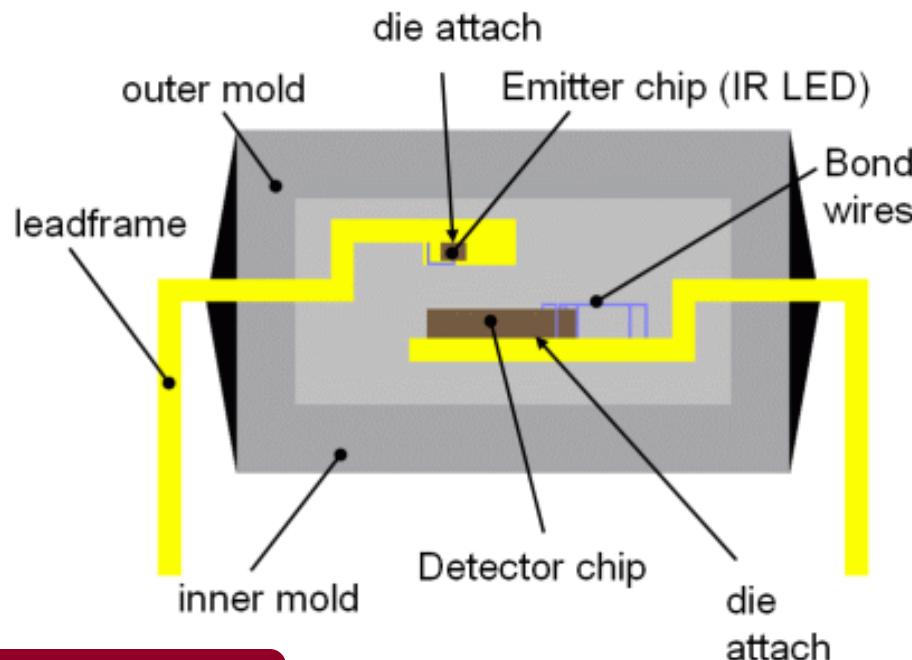


► Optocsatolás

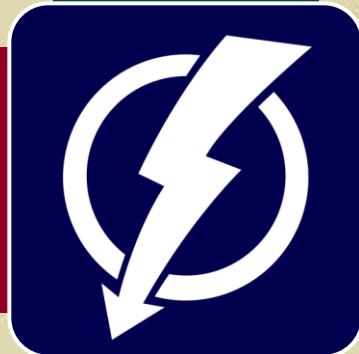


Fotodióda alkalmazása: optocsatoló

- ▶ Galvanikusan szeparált adatátviteli út kialakításához használt.
- ▶ Nagy sebesség (pl. 15Mbps) érhető el.
- ▶ Bemenet: pl. GaAs LED
- ▶ Kimenet: Si fotodióda + kimeneti interfész (pl. CMOS logikai áramkör)

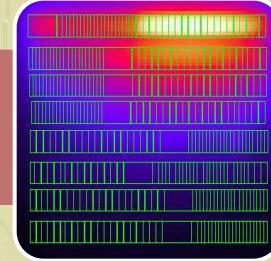
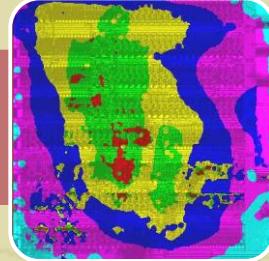
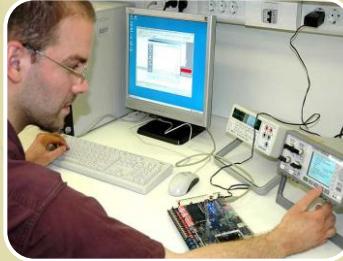


1. Anode
2. Cathode
3. GND
4. Vo
5. V_{DD}



Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi
Egyetem

Elektronikus Eszközök Tanszéke



Tranzisztorok

► A legfontosabb félvezetőeszközök. Fő felhasználási területük:

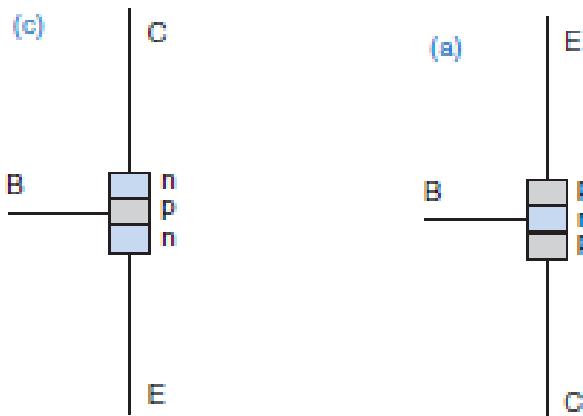
- Erősítő eszközként (analóg áramkörökben)
 - Erősítő: a kimeneten mért teljesítmény nagyobb, mint a bemeneten mérhető teljesítmény. Az ehhez szükséges energiát általában egy egyenfeszültségű forrás biztosítja.
 - Azaz pl. a transzformátor nem erősítő: hiszen a szekunder oldalon a teljesítmény nem haladja meg a primer oldali teljesítményt.
- Kapcsolóként
 - Kis bemeneti teljesítményigénnyel a kimeneten a nagyteljesítményű terhelés ki/be kapcsolható.
 - Digitális áramkörökben logikai kapuk megvalósítása.

► Fajtái:

- **Bipoláris**: áram vezérelt, a kimeneti kivezetések szerepe nem felcserélhető.
- Térvezérlésű (Field effect, FET) feszültségvezérelt, unipoláris eszköz.

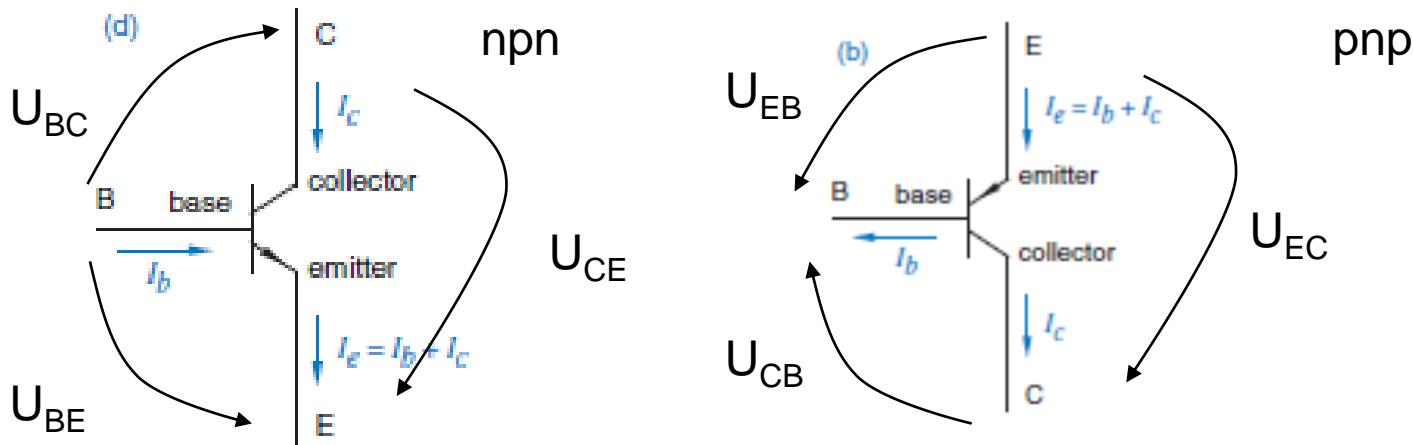
A bipoláris tranzisztor

- Két, egymáshoz közel lévő pn átmenetből áll, amelyek középső rétege közös.
 - Kétfajta kialakítás képzelhető el, *npn* vagy *pnp*.



- Mindkét kialakítás használt, az *npn* tranzisztor gyorsabb, ezért gyakrabban használt.
 - Mivel az npn tranzisztorban elektronok, a pnp tranzisztorban pedig lyukak szállítják az áramot. Az elektronok mozgékonyisége (ld. 2. előadás) nagyobb.
- Hárrom kivezetéssel rendelkező eszköz, elnevezésük:
 - E – **emitter**, B – **bázis (base)**, C – **kollektor (collector)**

A bipoláris tranzisztor rajzjele

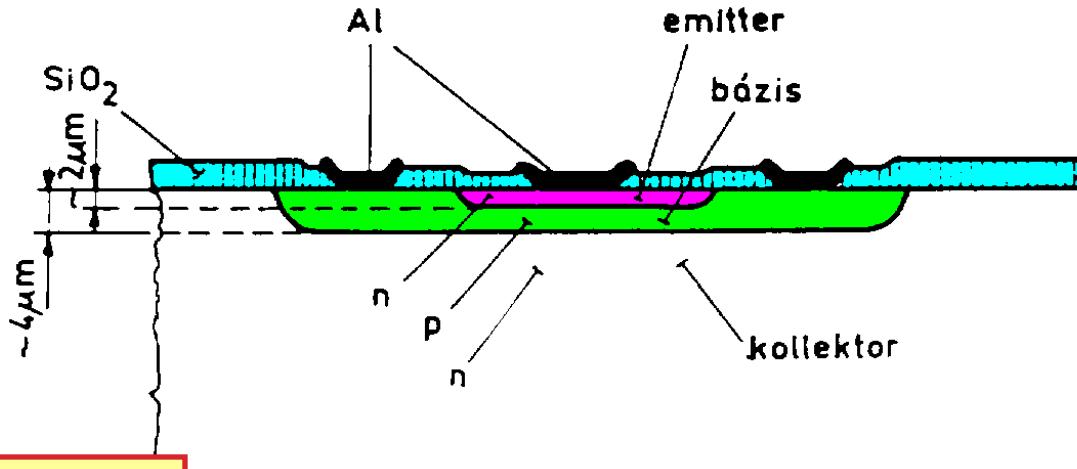


- ▶ A két tranzisztortípus áramai és feszültségeinek iránya fordított. Éppen ezért csak az npn-t fogjuk tárgyalni, a pnp fordított áram és feszültségirányokkal pontosan ugyanúgy működik.
- ▶ A „nyíl” jelöli egyrészt az **emittert**, másrészt a pn átmenet nyitóirányát.
- ▶ Az egyes kivezetések áramai közötti összefüggés a Kirchhoff törvény alapján:
 - $I_E = I_C + I_B$
- ▶ Az egyes kivezetések között mért feszültségeket általában úgy mérjük, hogy az emitternél lévő pn átmenet nyitóirányban, a kollektornál lévő pn átmenet pedig záróirányban van. (ez a tranzisztor leggyakoribb használatának felel meg.)

A bipoláris tranzisztor felépítése 1.

Két pn átmenet, szoros (néhány μm vagy kevesebb) közelségben.

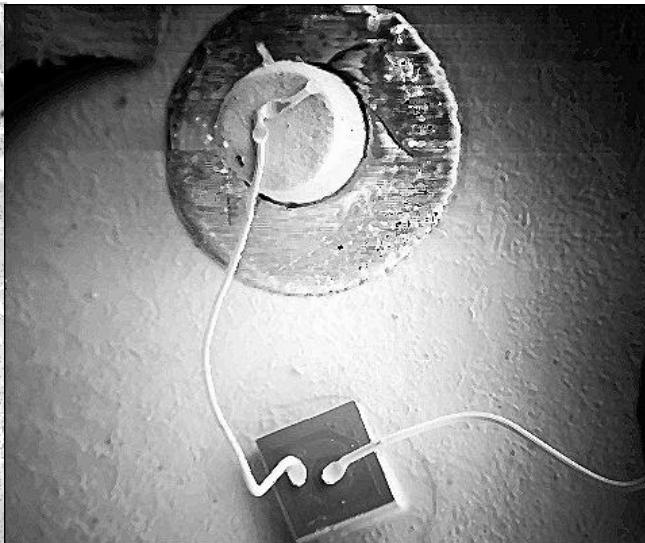
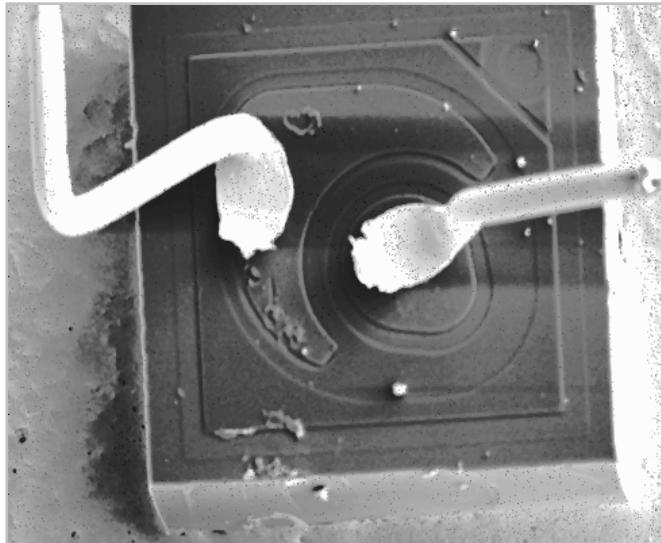
BJT



Diszkrét tranzisztor

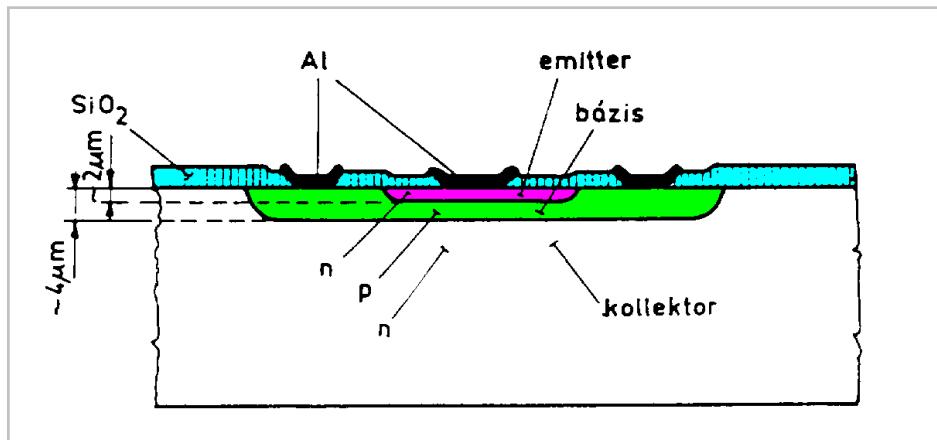
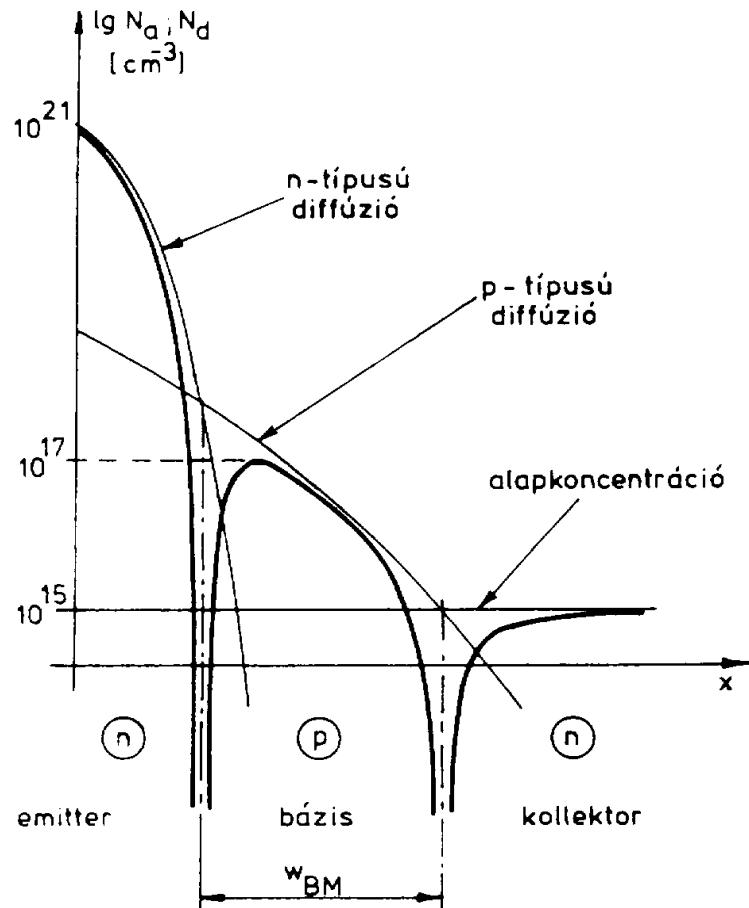
- ▶ Diszkrét tranzisztor = önmagában csak a tranzisztor kerül tokozásra.
- ▶ A diódához hasonlóan a struktúra planáris: azaz horizontálisan jóval szélesebb, mint vertikálisan.
- ▶ A kollektor a gyenge *n*-Si, ebbe kerül a *p* típusú bázisréteg, a bázisrétegbe pedig az erős *n* típusú emitter.
- ▶ A szilícium lapka felszínét SiO_2 védi, ami csak a hozzávezetésekkel van „kinyitva”.

A bipoláris tranzisztor felépítése 2.



- ▶ Az elektronmikroszkóppal készült képeken a chip mérete kb. $0,5 \times 0,5 \times 0,3$ mm
- ▶ A kollektor kivezetés a fém állvány, amire a szilícium chip-et felforrasztják.
- ▶ Az emitter és bázis kivezetéseket ún. termokompressziós kötéssel, aranyhuzallal kötik ki a tokozás megfelelő lábaihoz.
- ▶ A kisteljesítményű tranzisztorokat általában műanyag, a nagyteljesítményűeket pedig fém tokba szerelik. (ezek közvetlenül felcsavarozhatóak a hűtőbordára.)

A bipoláris tranzisztor felépítése 3.

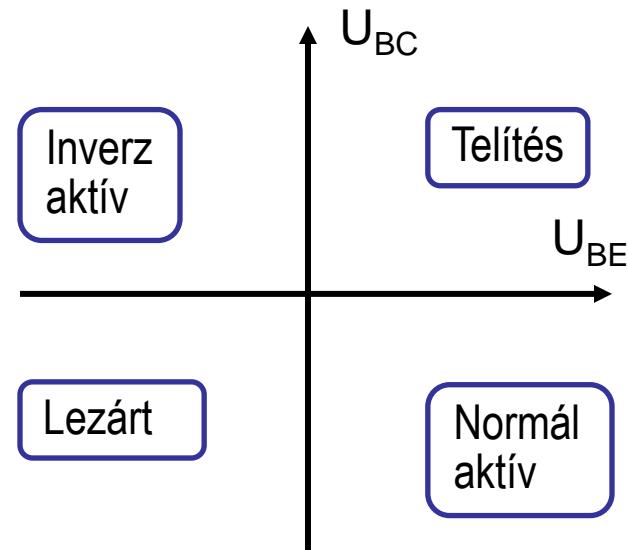


- ▶ A kialakításból adódóan nem lesz szimmetrikus az eszköz, mivel az egyes rétegek adalékolása nagymértékben eltér.
- ▶ Ez a kialakítási technológia miatt adódik így, erről majd részletesebben lesz szó az integrált áramkörök kapcsán.
- ▶ Emiatt a két pn átmenet nem egyforma adalékolású.
 - A bázis kollektor átmenet ezenkívül még jóval nagyobb keresztmetszetű is.

A tranzisztor üzemállapotai

- Mivel a tranzisztor két pn átmenettel rendelkezik, a pn átmenetek áramától függően összesen négy üzemmód létezik.

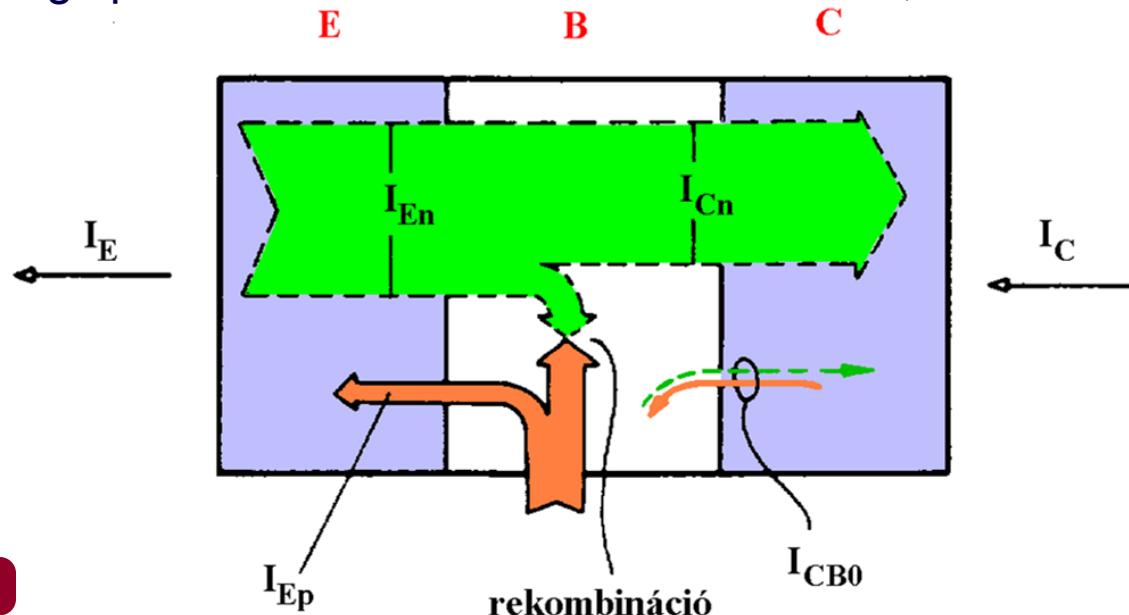
	BE átmenet	BC átmenet
Normál-aktív	nyitott	zárt
Inverz-aktív	zárt	nyitott
Telítéses	nyitott	nyitott
Lezárt	zárt	zárt



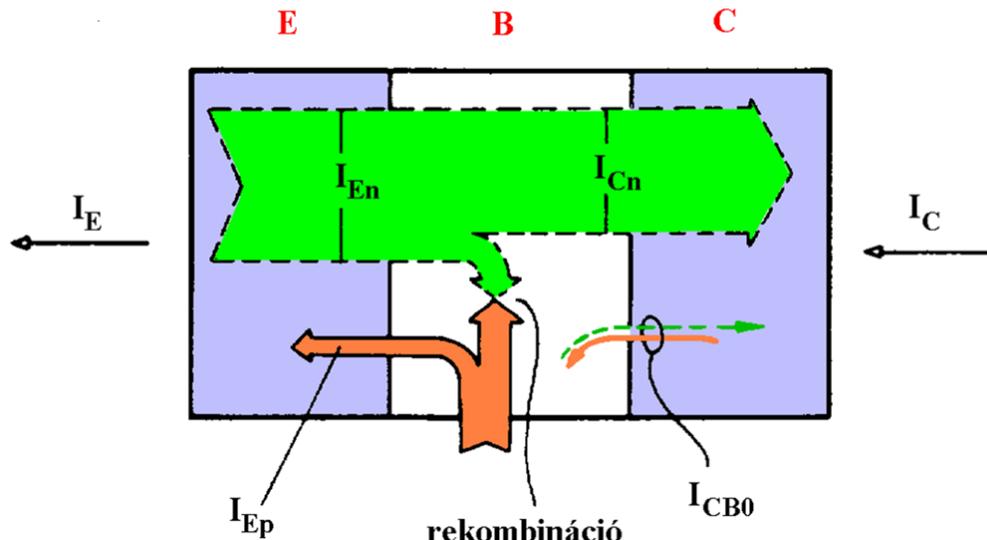
- Elsőként a normál aktív üzemmódot tárgyaljuk, itt a bázis-emitter pn átmenet nyitóirányban, a bázis-kollektor átmenet záróirányban van előfeszítve.

A bipoláris tranzisztor működése, normál aktív módban.

- ▶ A bázis-emitter átmenet nyitóirányban van előfeszítve, azaz minden két oldal többségi töltéshordozói haladnak a másik oldal irányába.
- ▶ A bázis kollektor átmenet zárt, a kiürített rétegben nagy térerősség uralkodik.
- ▶ Az emitter sokkal jobban adalékolt, mint a bázis, ezért a nyitott pn átmenet áramában az elektronok többségeben vannak.
- ▶ A bázisba bekerülő elektronok diffúzióval terjednek tovább, egy részük rekombinálódik.
- ▶ Ha eléri a bázis-kollektor kiürített réteg határát, a térerősség átsodorja a kollektor oldalra, azaz a kollektor áramot vezet – noha a pn átmenet záróirányban van előfeszítve és csak nagyon kis áramot várunk.
- ▶ Ez nagy meglepetést okozott a Bell laboratóriumban, 1948 környékén...



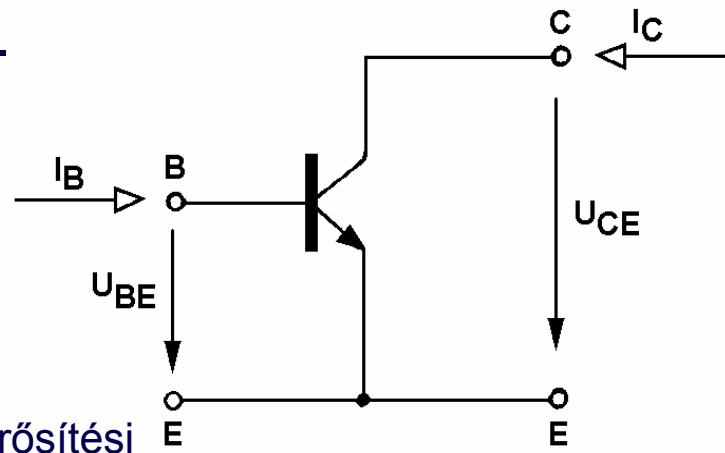
A bipoláris tranzisztor működése, normál aktív módban.



- ▶ Az emitter tehát töltéshordozókat emittál a bázisba. (innen ered a név)
- ▶ A bázisba kerülő töltéshordozókat pedig a kollektor gyűjti össze.
 - Minél keskenyebb a bázis, annál nagyobb valószínűséggel haladnak át a töltéshordozók a kollektor irányába.
 - Tehát a kollektoráram – a levezetéseket mellőzve - az emitterárammal arányos, annál viszont némileg kisebb, azaz:
 - $I_C = A_N I_E$
 - ahol A_N a normál aktív, földelt bázisú, egyenáramú áramerősítési tényező.
 - $A_N \rightarrow 1$, jellemző értéke 0,98.. 0,995, a tranzisztor struktúrát ugyanis erre optimalizálták.
 - Ez az üzemmód az **erősítésre** használt üzemmód.

A közös emitteres kapcsolás

- ▶ Láttuk, hogy a kollektoráram arányos az emitterárámmal, de az áramerősítés egynél kisebb.
 - Az áramerősítési tényezőben az egytől való eltérést a bázisáram okozza.
 - Azaz, ha a bázisáramot (vagy a bázis-emitter közötti feszültséget) vezérelnénk, nagyobb áramerősítést érhetnénk el.
- ▶ Erre szolgál a *közös emitteres kapcsolás*.
 - A Kirchhoff törvényből kifejezzük az emitteráramot és behelyettesítünk:
 - $I_C = A_N I_E = A_N (I_C + I_B)$
 - Azaz:
 - $I_C = \frac{A_N}{1 - A_N} I_B = B_N I_B$
 - Ahol B_N a normál aktív, földelt emitteres áramerősítési tényező.
 - Szokásos értéke: 50.. 200.
 - Általában áramfüggő, kis ill. nagy áramoknál erőteljesen lecsökken.
 - A továbbiakban az N indexet nem használjuk, ha nincs index, akkor normál aktív üzemmódra vonatkozik, azaz
 - $I_C = B I_B$
 - Az angol szakirodalom egy része α ill. β jelölést használ az egyenáramú áramerősítési tényezőre.



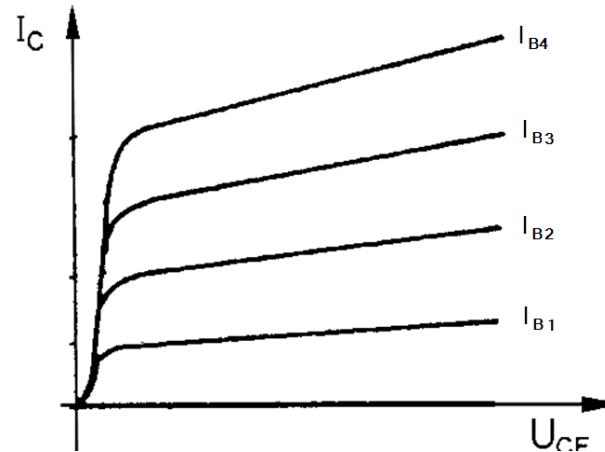
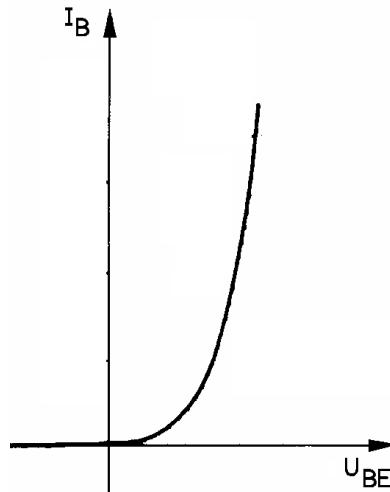
További üzemmódok

- ▶ Inverz aktív üzemmódban a kollektor és az emitter szerepet cserél.
 - A tranzisztorhatás létezik, de sokkal kisebb, az aszimmetrikus felépítés miatt.
 - Az inverz aktív áramerősítési tényező $0,01..0,1$ környékén van.
 - Nagyon ritkán használt üzemmód a gyakorlatban.
 - Pl. a hagyományos (nem Schottky) TTL kapuk bemenetén lévő tranzisztor működik így, ha a bemenet logikai magas szintű.
- ▶ Telítéses üzemben minden átmenet nyitott.
 - A tranzisztoron nagy áram halad keresztül, miközben a kollektor és az emitter közötti mérhető feszültség kicsi.
 - Ez az üzemmód megfelel a bekapcsolt kapcsoló állapotának.
- ▶ Lezárás esetén minden átmenet zárt.
 - A tranzisztor átmenetein csak egy záróirányú pn átmenet szivárgási árama folyik.
 - Ezeket az áramokat a gyakorlatban elhanyagoljuk, nA nagyságrendűek.
 - Ez az üzemmód megfelel egy kapcsoló kikapcsolt állapotának.
- ▶ Kapcsolóüzemű működésben tehát telítés és lezárás között változtatjuk a tranzisztor üzemállapotát.



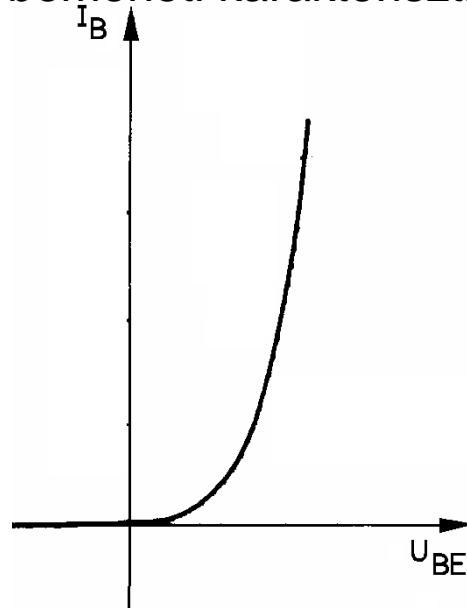
A bipoláris tranzisztor karakterisztikái

- ▶ Grafikusan szeretnénk ábrázolni a tranzisztor áramait a feszültségek függvényében.
 - Ez nem olyan egyszerű feladat, mint két kivezetéssel rendelkező eszköz esetén.
- ▶ Mivel három kivezetése van a tranzisztornak, ezért minimálisan két áram és két feszültség kell ahhoz, hogy egy munkapontot egyértelműen meghatározzunk.
 - (A 3. áram illetve a 3. feszültség a Kirchhoff törvények alapján a megelőző kettő függvénye.)
- ▶ A leggyakrabban használt karakterisztika a földelt emitteres karakterisztika.
 - $I_B = f(U_{BE})$ illetve $I_C = g(U_{CE}, I_B)$ függvényeket ábrázoljuk.

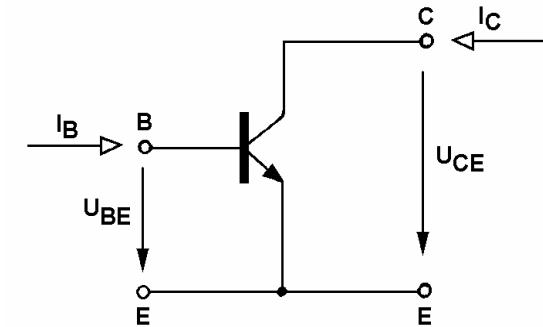
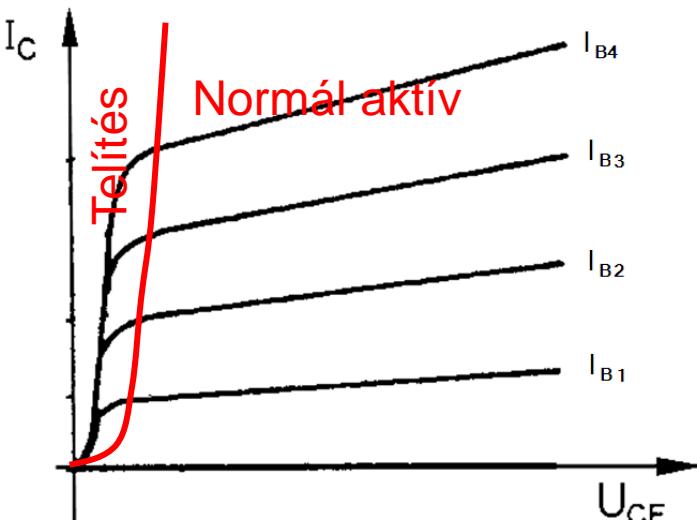


A földelt emitteres karakterisztika

bemeneti karakterisztika



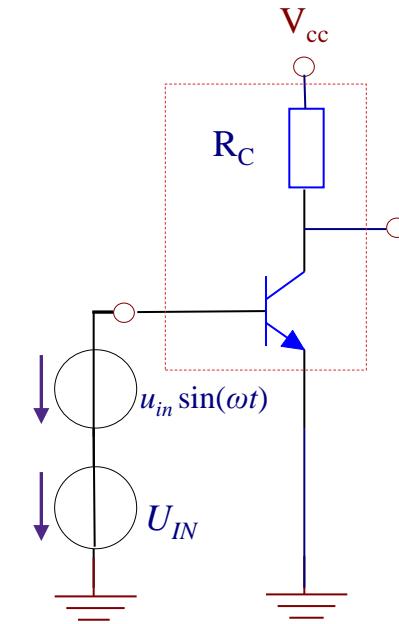
kimeneti karakterisztika



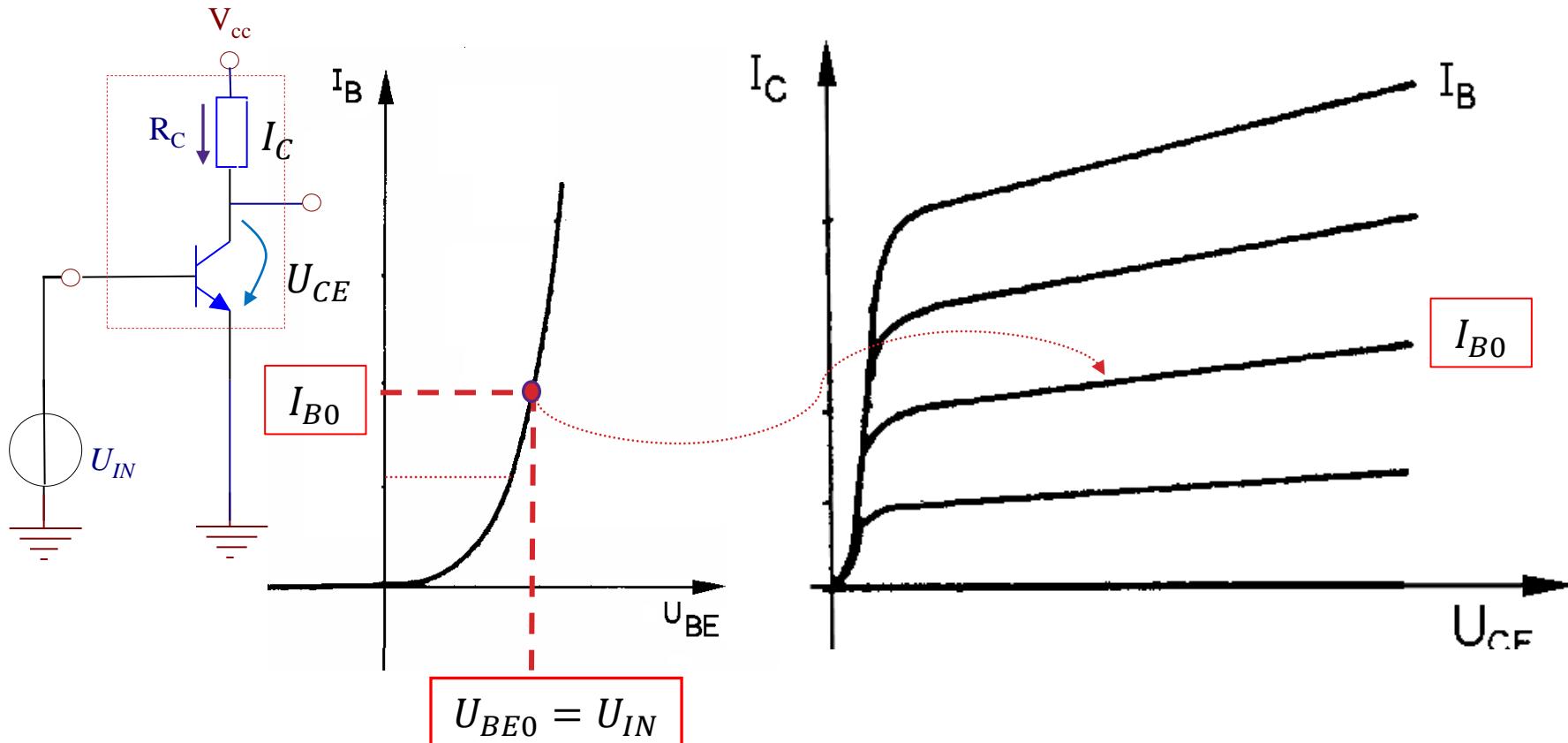
- ▶ A bemeneti karakterisztika a bemeneti mennyiségek kapcsolatát ábrázolja.
 - Dióda jellegű karakterisztika, azaz a bázisáram közel exponenciálisan függ az átmenet nyitófeszültségétől. Nem túl meglepő, ha belegondolunk, hogy $I_B = I_E/B$ és bázis emitter között pedig egy pontosan ilyen karakteristikákú nyitott dióda van. (Ez nem teljesen igaz, de jó közelítés...)
- ▶ A kimeneti karakterisztika a kollektoráramot ábrázolja az U_{CE} feszültség függvényében, növekvő I_B bázisáramok mellett. ($I_{B4} > I_{B3} > I_{B2} > I_{B1}$)
- ▶ A telítés és a normál aktív tartomány határát a **piros vonal** jelzi.
 - Látható, hogy telítésben a kollektoráram lecsökken a normál aktívhoz képest. Ennek az az oka, hogy a bázis-kollektor átmenet is kinyit és „ellene dolgozik” a normál aktív módnak.

Feszültségerősítés tranzisztorral

- ▶ Vizsgáljuk meg a következő kapcsolási rajzot!
 - Egy földelt emitteres kapcsolásban a bázis feszültségét egy egyenfeszültség körül u_{in} amplitúdóval szinuszosan változtatjuk.
- ▶ A tranzisztor kollektorát egy ellenálláson keresztül egy egyenfeszültségű generátorra kötöttük.
- ▶ Az áramkör kimenetének a kollektorpontot tekintjük.

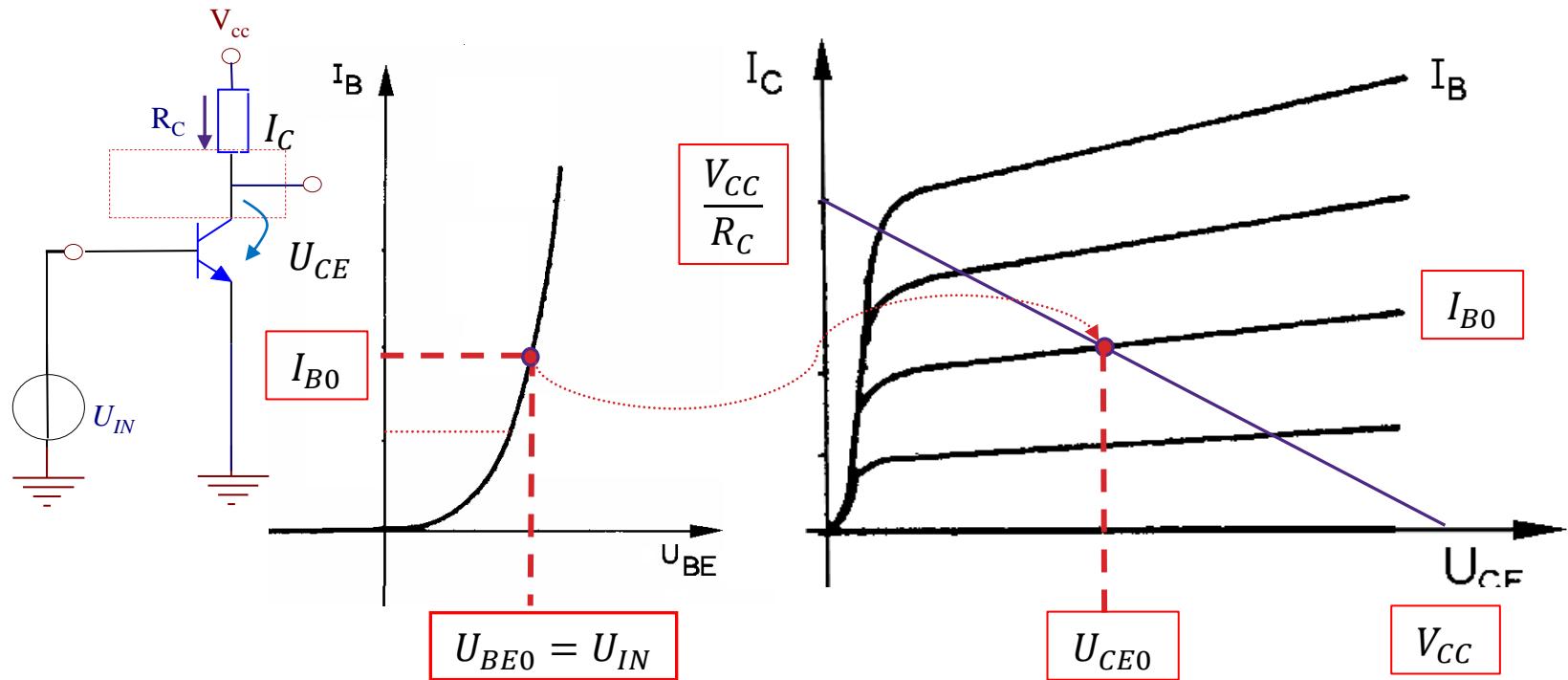


A munkapont meghatározása



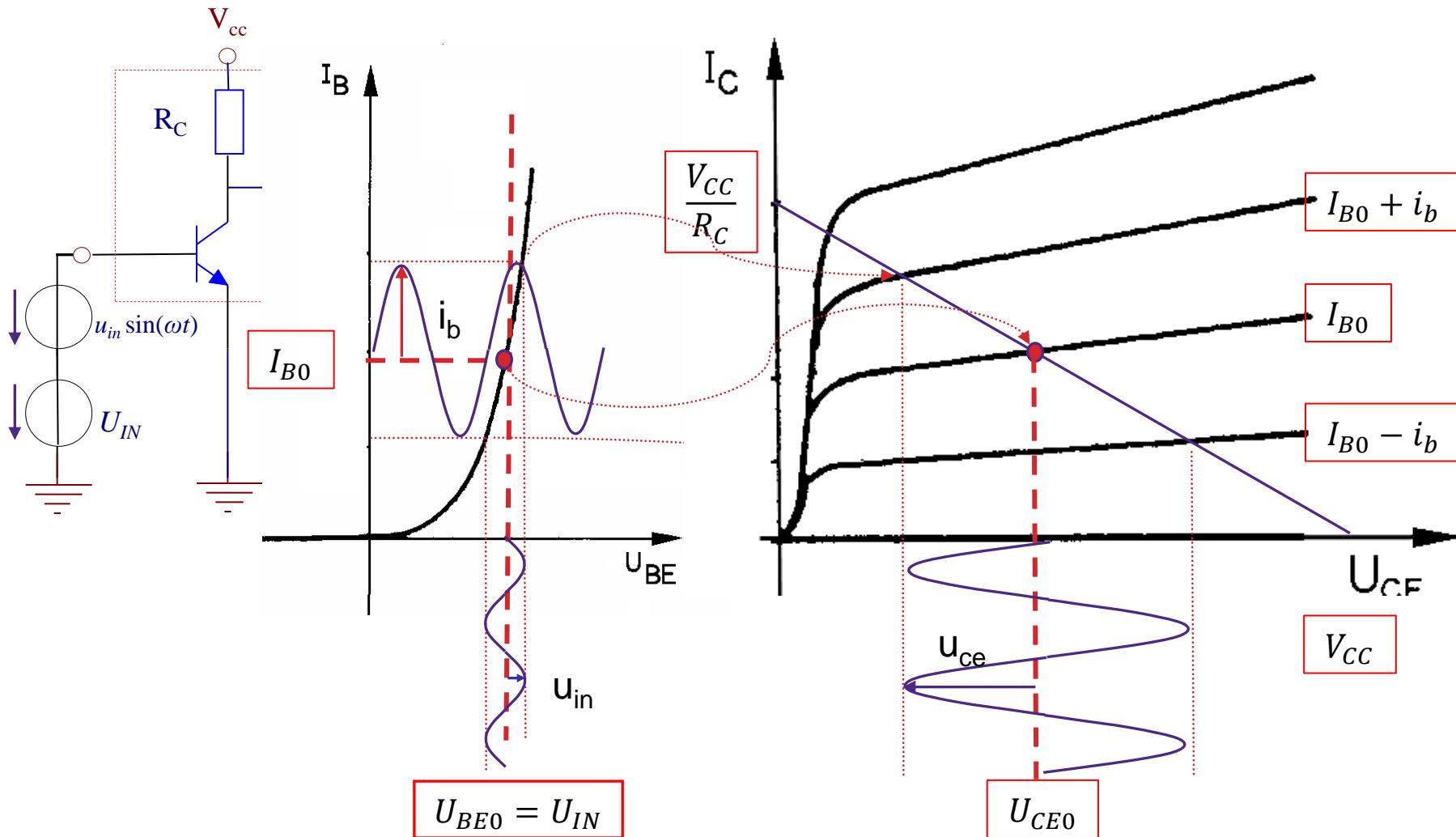
- ▶ A bemeneti U_{IN} egyenfeszültséghez a bemeneti karakterisztika alapján I_{B0} bázisáram tartozik.
- ▶ A bázisáram ismeretében már tudjuk, hogy a kimeneti karakterisztikán melyik vonalon „mozgunk”, de a pontos munkapontot a V_{cc} tápfeszültség és az R_C ellenállás fogja meghatározni.

A munkapont meghatározása 2.



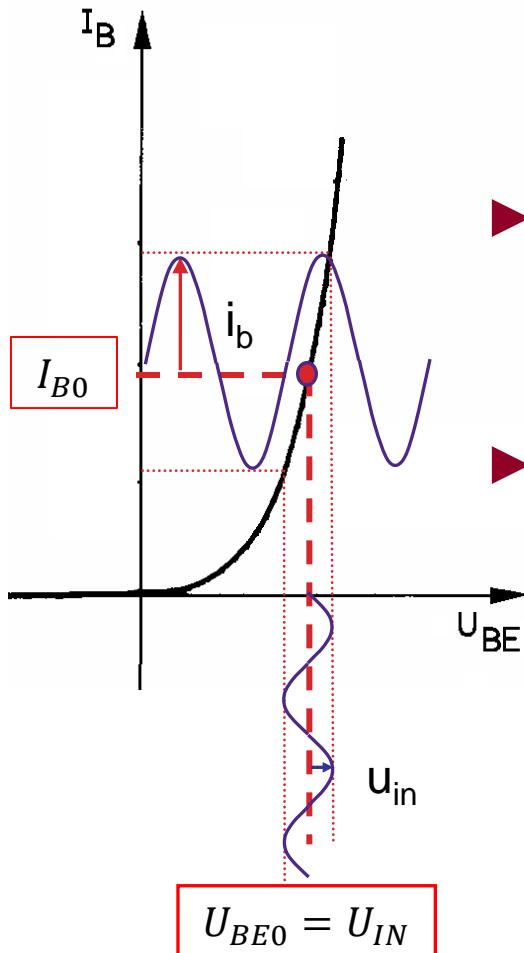
- ▶ A tranzisztoron kívüli elemek egy egyenest határoznak meg, az ún. munkaegyenest. (mivel lineárisak.)
 - A kimeneti karakterisztika és az egyenes metszéspontja adja meg a munkapontot.
- ▶ Írjuk fel a Kirchhoff törvényt:
 - $V_{cc} = R_C I_C + U_{CE}$, azaz $I_C = (V_{cc} - U_{CE})/R_C$
 - Egyszerűbben:
 - Ha áram nem folyik, a kollektor feszültsége pontosan a tápfeszültség. Ha a tranzisztor U_{CE} feszültsége nulla lenne, akkor $I_C = V_{cc}/R_C$ áram folyna.
 - » Kössük össze a két pontot!

Az erősítés számítása 1.



- (Összefoglaló ábra a teljes folyamatról. Magyarázat a következő fóliákon, részletezve)

Az erősítés számítása 2.



- A bázisáram a bemeneti u_{in} amplitúdójú gerjesztésre a munkaponti I_{B0} érték körül közelítőleg i_b amplitúdóval változik.

$$I_B(t) = I_{B0} + i_b \sin(\omega t)$$

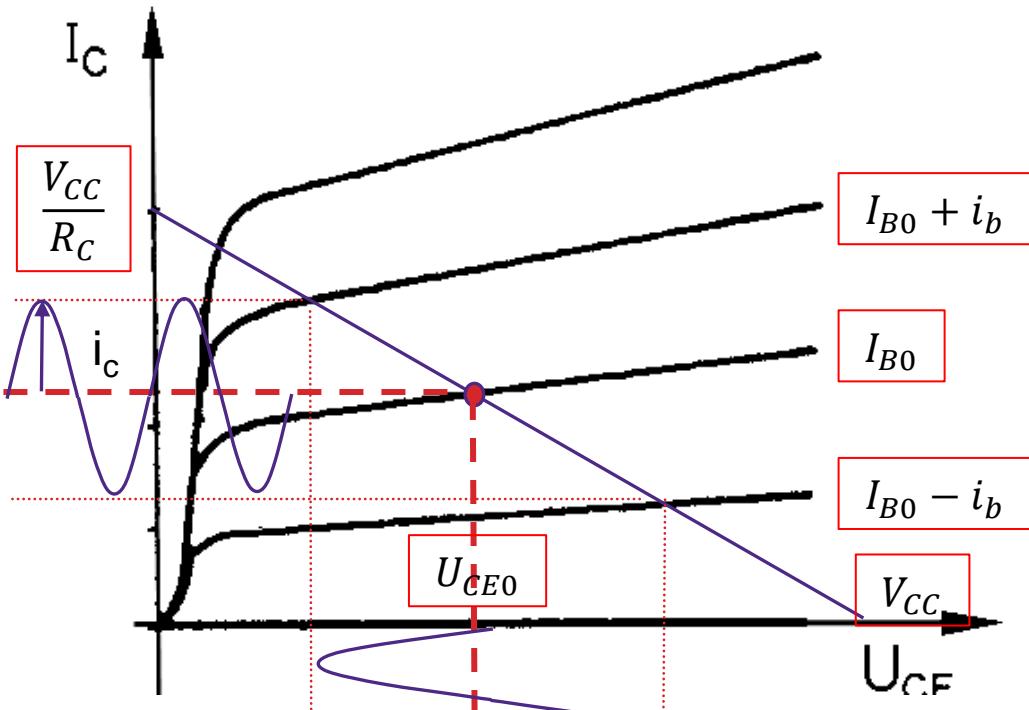
- A munkapontban a karakterisztikát érintővel helyettesítve:

$$i_b = \frac{\partial I_B}{\partial U_{BE}} u_{in} = \frac{\partial I_B}{\partial I_E} \frac{\partial I_E}{\partial U_{BE}} u_{in}$$

- Használjuk ki, hogy $I_E = I_C + I_B = (B + 1)I_B$ és tételezzük fel, hogy a bázis-emitter átmenet ideális, így $I_E = I_{E0} \left(\exp \left(\frac{U_{BE}}{U_T} \right) - 1 \right)$ egyenlettel számítható.

$$i_b = \frac{1}{B + 1} \frac{I_E}{U_T} u_{in}$$

Az erősítés számítása 3.



► A bázisáram megváltozása miatt a kollektoráram is megváltozik.

$$I_C = I_{C0} + i_c \sin(\omega t)$$

► A változás nagysága lineáris közelítve:

$$i_c = \frac{\partial I_C}{\partial I_B} i_b = B i_b$$

► A kimenet feszültsége tehát:

$$U_C(t) = V_{CC} - I_C(t)R_C$$

► Behelyettesítve:

$$U_C(t) = V_{CC} - I_{C0}R_C - i_c R_C \sin(\omega t) = U_{CE0} - B i_b R_C \sin(\omega t) =$$

$$= U_{CE0} - \frac{B}{B+1} \frac{I_E}{U_T} R_C u_{in} \sin(\omega t)$$

Váltakozó áramú erősítés!

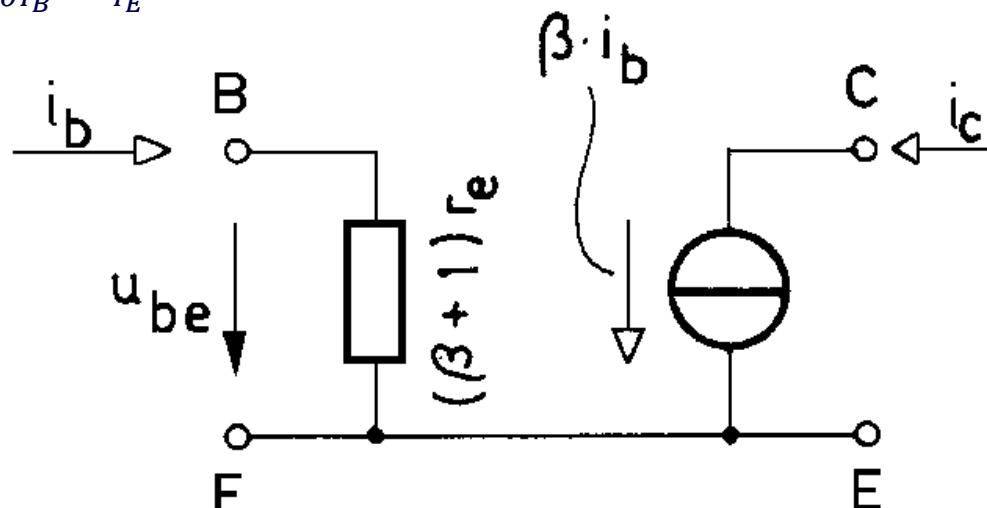
A számítás egyszerűsítése

- ▶ Munkapont (DC) + munkapont környéki változásokra (AC) kisjelű analízist végzünk.
- ▶ A karakterisztikát a munkapontban érintővel helyettesítjük. (elsőrendű Taylor sorba fejtjük...)
- ▶ A változásokra kisjelű, lineáris elemeket (vezérelt generátorok és ellenállások) tartalmazó kisjelű (AC) helyettesítő képet alkotunk. A helyettesítő kép elemeinek értékeit a munkaponti áramok és feszültségek határozzák meg.
- ▶ A helyettesítő kép könnyen számítható.
- ▶ Nemlinearitás?
 - Tudomásul vesszük...
 - Szimulátor...
 - Rendszerszinten kezeljük. (visszacsatolt erősítők...)

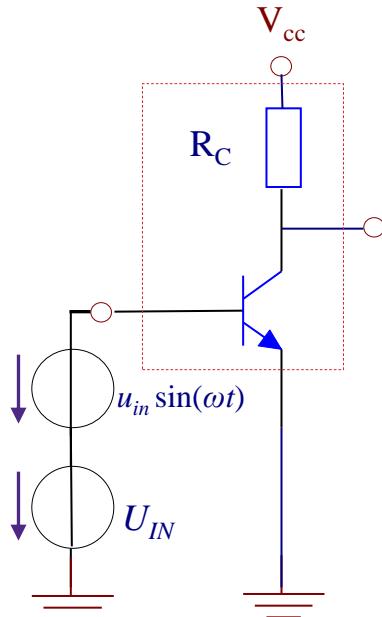


A kételemes földelt emitteres kisjelű helyettesítő kép

- ▶ Az egyik legegyszerűbb helyettesítő kép.
- ▶ A kollektoráram megváltozása arányos a bázisáram megváltozásával.
 - Ezt egy **áramvezérelt áramgenerátorral** helyettesítjük.
 - $\beta = \frac{\partial I_C}{\partial I_B} \approx B$, mivel $I_C = BI_B$
- ▶ A bázis-emitter átmenetet pedig – a diódánál ismert módon – a differenciális ellenállással helyettesítjük. $r_e = \frac{U_T}{I_E}$
 - Mivel most a bázisáram megváltozását vizsgáljuk és az $(\beta+1)$ –ed része az emitteráram megváltozásának, emiatt az emitterdióda r_e differenciális ellenállásának $(\beta+1)$ szerese látszik.
 - Bizonyítani talán egyszerűbb, a bázis és az emitter között lévő helyettesítő ellenállás:
 - $\frac{\partial U_{BE}}{\partial I_B} = \frac{\partial U_{BE}}{\partial I_E} \frac{\partial I_E}{\partial I_B} = \frac{U_T}{I_E} (\beta + 1) = (\beta + 1)r_e$

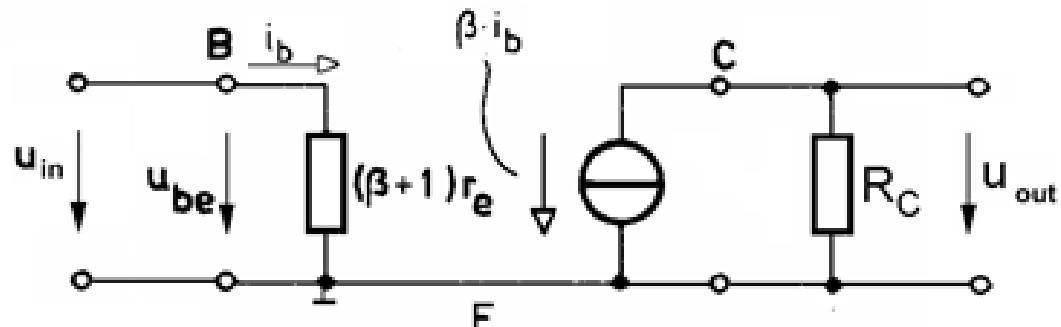


Az erősítés számítása kisjelű helyettesítéssel



► A kisjelű (AC) helyettesítés elkészítése

- A tranzisztor helyettesítő képét lerajzoljuk.
- Az egyenfeszültségű generátorokat rövidzárral helyettesítjük. (Id. szuperpozíció tétele, 1. előadás!)

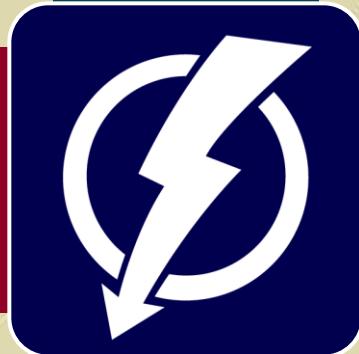


► Ha ezzel megvagyunk, a számítás már egyszerű.

- A bázisáram megváltozása a bemeneti feszültség változása függvényében:
 $i_b = \frac{u_{in}}{(\beta+1)r_e}$
- A kollektoráram megváltozása: $i_c = \beta i_b$
- A kimeneti feszültség megváltozása (az ellentétes mérőirány miatt)

$$u_{out} = -i_c R_C = -\beta i_b R_C = -\frac{\beta}{\beta + 1} \frac{R_C}{r_e} u_{in} \approx -\frac{R_C}{r_e} u_{in}$$

- A negatív előjelek azt jelenti, hogy kimeneti változás iránya ellentétes a bemeneti változás irányával, azaz fázisfordítás történik.



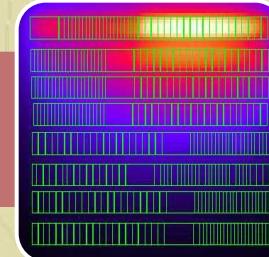
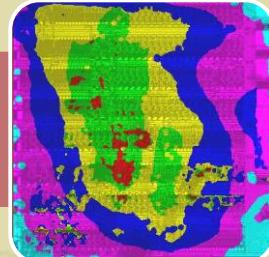
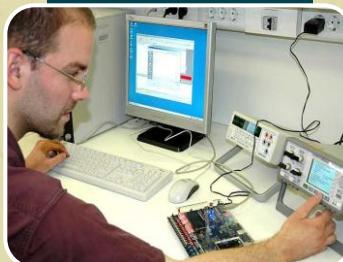
Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi
Egyetem

Elektronikus Eszközök Tanszéke



Számítás a frekvencia tartományban

Rövid bevezető. Kiegészítő anyag, zárthelyin
nem kérdezzük!



Szinuszos hálózatok jellemzése

- ▶ Az $u(t) = U \cos(\omega t + \phi)$ szinuszos jel egyértelműen megfeleltethető egy $U e^{j(\omega t + \phi)}$ alakú komplex szám valós részének.
- ▶ Ha ezt a komplex számot $\bar{U} e^{j\omega t}$ alakban írjuk fel, ahol $\bar{U} = U e^{j\phi}$, akkor az \bar{U} komplex szám önmagában jellemzi az $u(t)$ időtartománybeli jel amplitúdóját (abszolút érték) és fázisát, a megadott ω körfrekvencián.
- ▶ Ez „fazor”-nak nevezzük. (phase vector)
- ▶ Könnyen bizonyítható, hogy ugyanolyan frekvenciájú jelek lineáris kombinációja és a fazorokon végezett lineáris kombináció uyanahhoz az eredményhez vezet.
- ▶ A komplex számokon viszont sokkal egyszerűbb műveleteket végezni...
- ▶ A felülvonás jelet elhagyjuk, mostantól minden mennyiség fazorként értelmezendő és komplex szám.



Műveletek szinuszos lineáris hálózatok esetén

► Ellenállás: valós számmal történő szorzás v. osztás

- $U_R = RI_R$

► Kondenzátor: $i(t) = C \frac{dU}{dt}$

- $I_C = j\omega CU_C$

► Tekercs: $u(t) = L \frac{dI}{dt}$

- $U_L = j\omega LI_L$

► Összegezve:

- $U = ZI$

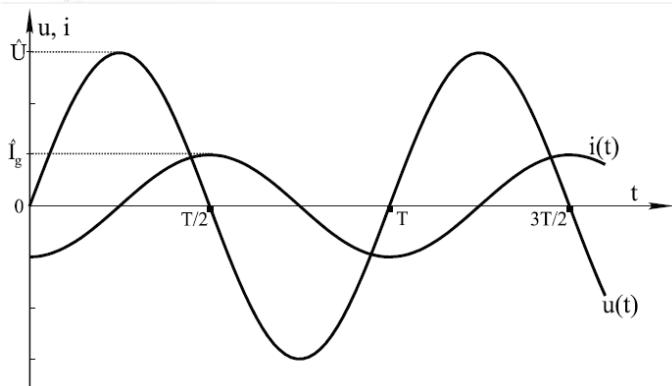
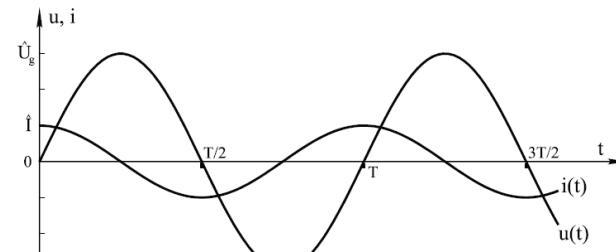
- Ahol Z az ún. komplex impedancia és a kifejezés pedig a komplex Ohm törvény.

- Az elemi kétpólusok esetén:

- $Z_R = R$

- $Z_C = \frac{1}{j\omega C}$

- $Z_L = j\omega L$



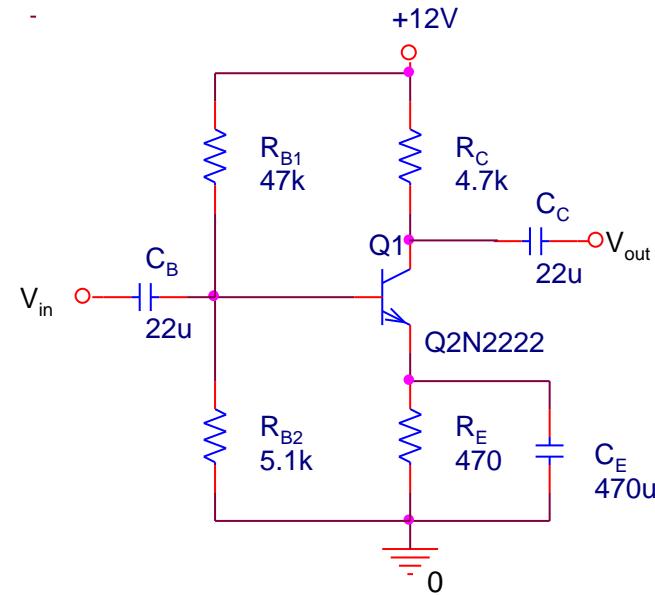
Miért jó ez?

- ▶ Bizonyítás nélkül, de működik minden lineáris hálózati összefüggés, azaz
 - Az Ohm törvény
 - A Kirchhoff törvények
 - Az egyszerű összefüggések a soros és párhuzamos kapcsolásra
 - A feszültségosztás, áramosztás stb.
- ▶ Az egyetlen nehézség az, hogy komplex számokkal kell számolni.
 - De ez nem okozhat gondot. (legalábbis egy számítógépnek)
- ▶ minden matematikai hátteret félredobva (Id. Fourier és Laplace transzformáció) általában az $s = j\omega$ helyettesítést használjuk.



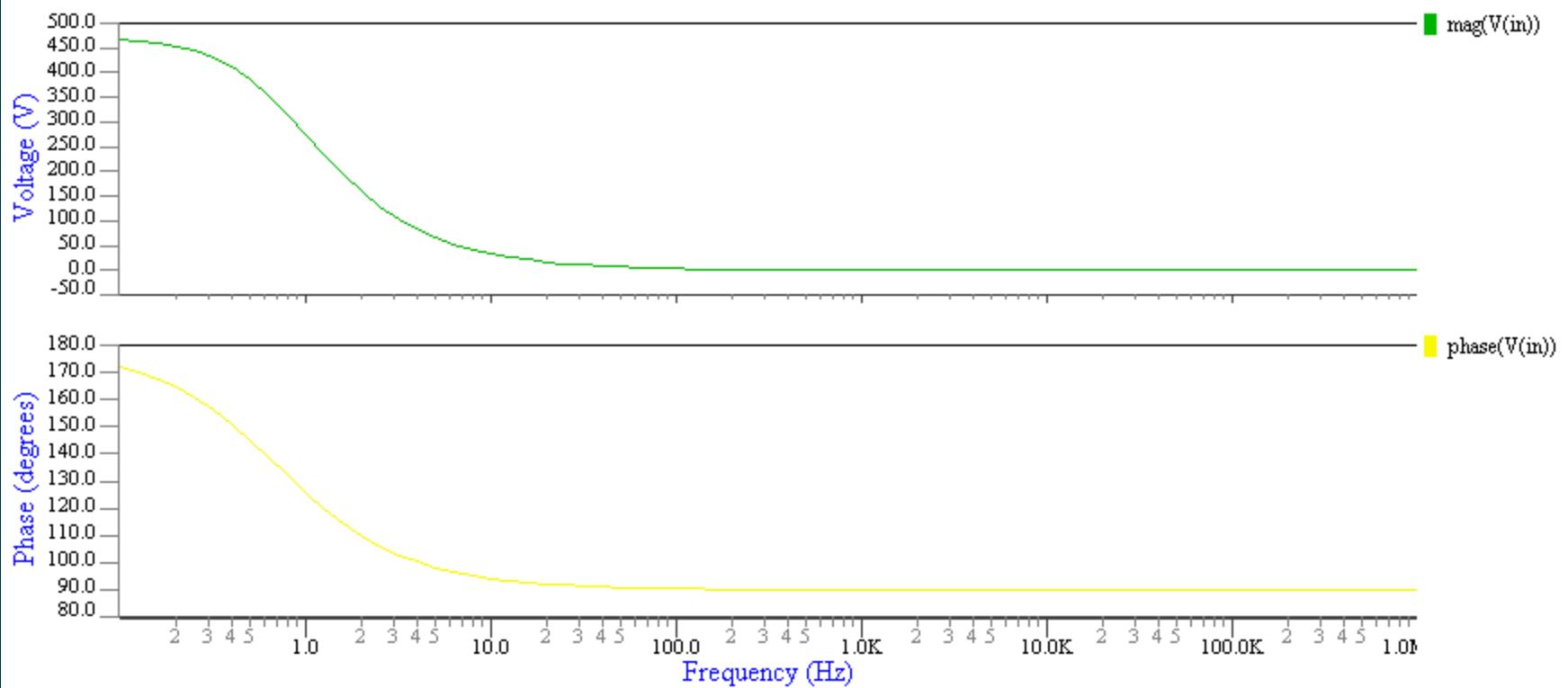
Példa: az emitterhidegítő kondenzátor hatása

- ▶ Vizsgáljuk meg, mennyire jogos a „kondenzátor” rövidzár feltételezés az elmúlt órán elemzett erősítőben, 10kHz frekvencián!
- ▶ Elsőként vizsgáljuk meg azt a feltételezést, hogy az emitter váltakozó áramú szempontból a földre kapcsolódik:
 - Az R_E ellenállás és a C_E kondenzátor párhuzamos eredője: (\times a replusz operátor!)
 - $Z_E = R_E \times \frac{1}{sC} = \frac{R_E}{1+sR_E C_E}$
 - Ha kiszámítjuk, az abszolút értéke $34\text{m}\Omega$
 - Ez jóval kisebb, mint bármelyik ellenállás akár az áramkörben, akár a kisjelű modellben, tehát az elhanyagolás jogos.



Példa: az emitterhidegítés hatása a frekvencia függvényében

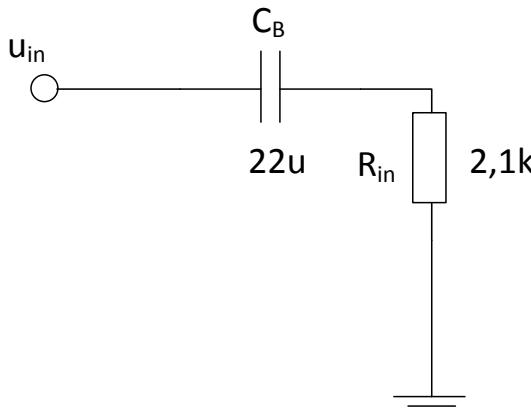
September 28, 2011 / 12:07:45 AM rs-notebook



Példa: a csatolókondenzátor átvitele

► Most vizsgáljuk meg, a bemeneti csatoló kondenzátor hatását!

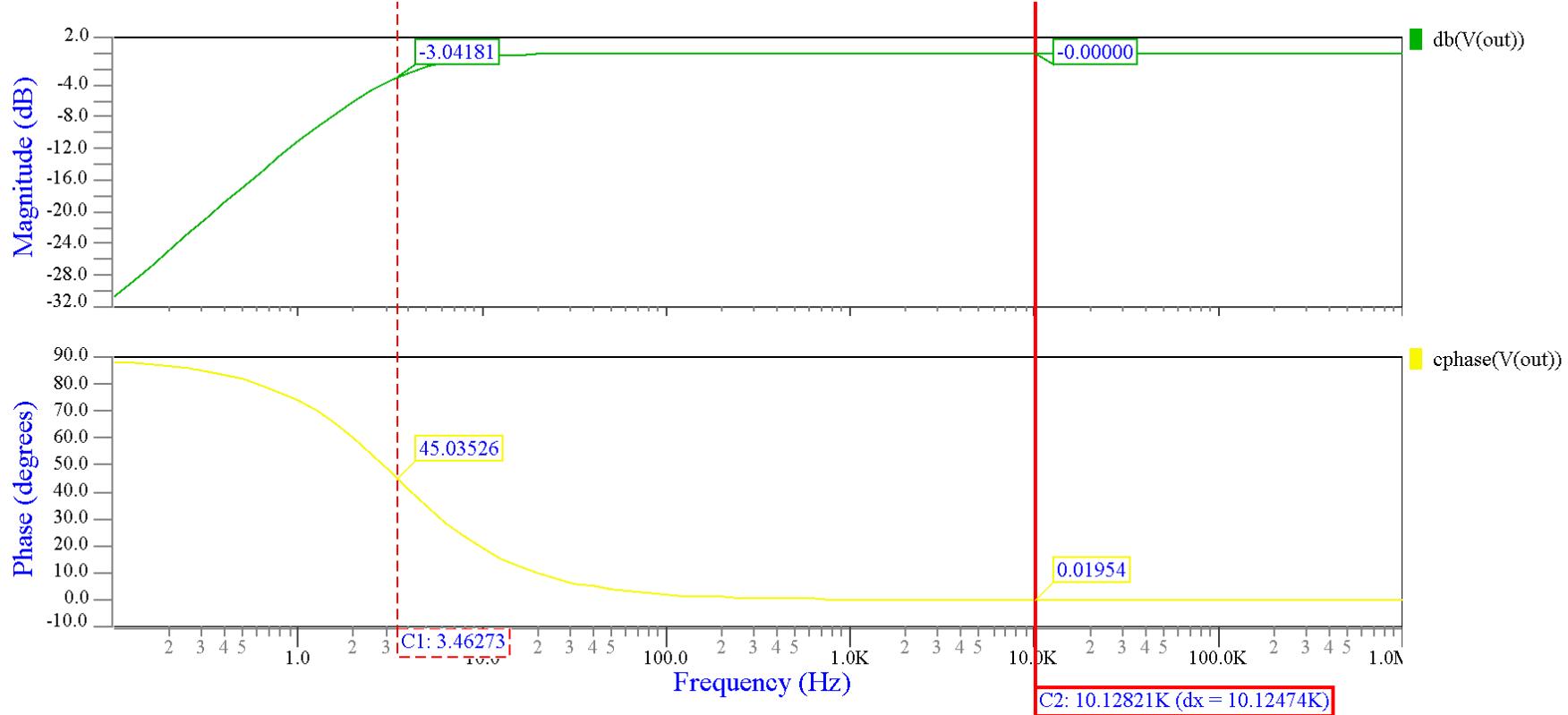
- Az erősítő bemeneti ellenállását már kiszámítottuk, tehát a következő hálózat átvitelét kell vizsgálnunk:

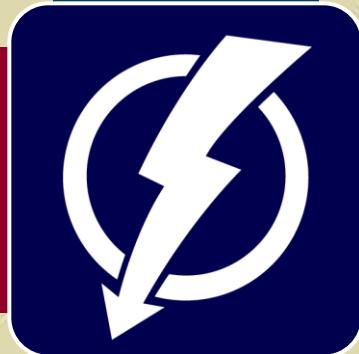


- Azt kell meghatároznunk, hogy bemeneti feszültség milyen részben kerül az erősítő bementére, ezt egy egyszerű feszültségesztással számíthatjuk:
- $$\frac{R_{in}}{R_{in} + Z_{C_B}} = \frac{R_{in}}{R_{in} + \frac{1}{sC_B}} = \frac{sR_{in}C_B}{1 + sR_{in}C_B}$$
- 10kHz-en 5 tizedes jegy pontossággal ez 1.

Példa: a csatolókondenzátor hatása a frekvencia függvényében

September 27, 2011 / 11:57:48 PM rs-notebook





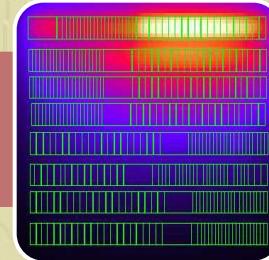
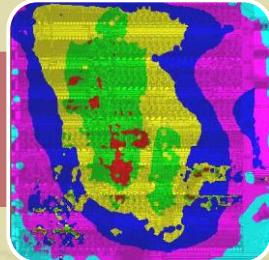
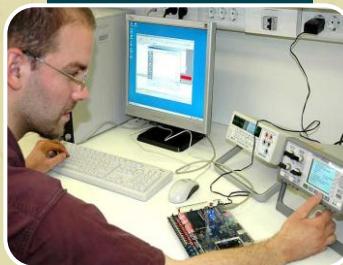
Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi
Egyetem

Elektronikus Eszközök Tanszéke



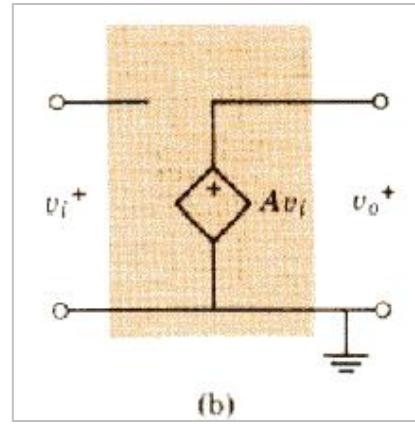
A bipoláris tranzisztor alkalmazása

Erősítők, kapcsolók



Erősítők

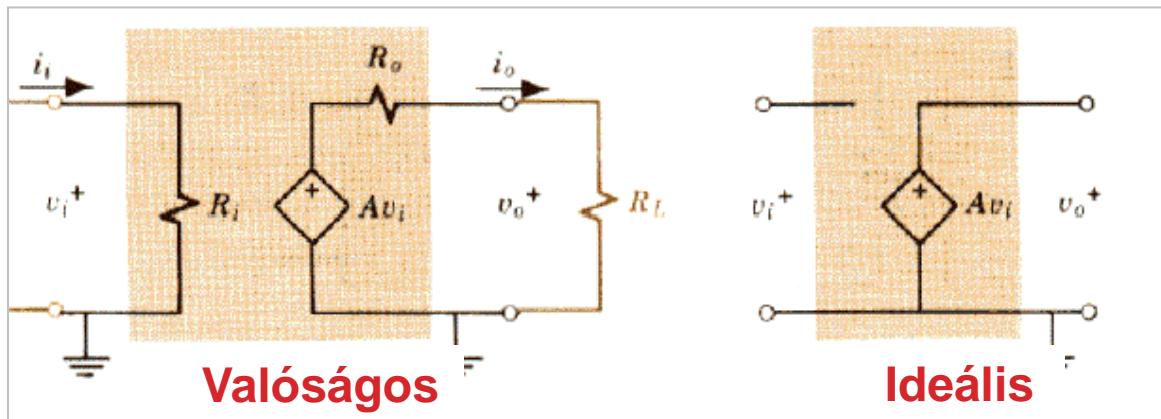
- ▶ Az előző előadáson áttekintettük azt az elvi lehetőséget, hogy hogyan lehet bipoláris tranzisztor erősítésre használni.
- ▶ Mielőtt elemeznénk egy valódi erősítő kapcsolást, néhány alapvető fogalmat tisztázni kell.
- ▶ Ideális feszültségerősítő:
 - Bemenetén áram nem folyik
 - A kimenetén mért feszültség a bemeneti feszültséggel egyenesen arányos:
 - $v_o = Av_i$
 - Egy feszültségvezérelt feszültségforrással modellezhető.



Valós feszültségerősítő

► Ezzel szemben a valódi feszültségerősítő

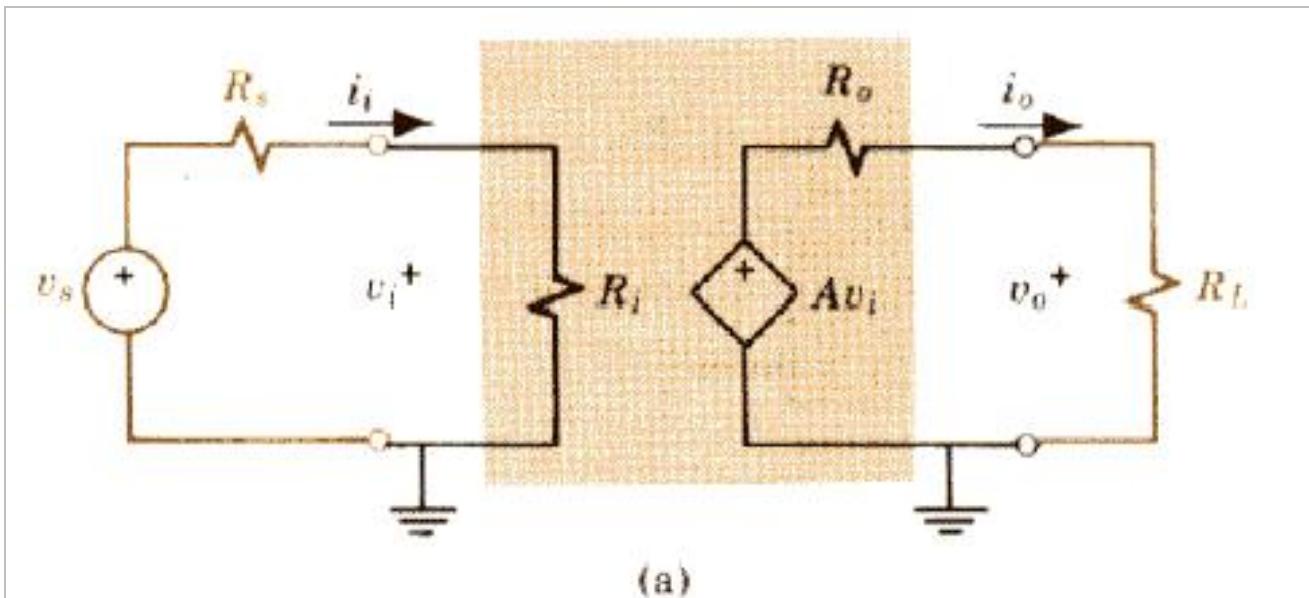
- bemenetén a rákapcsolt feszültségtől függő áram folyik.
- a kimenetén lévő feszültség pedig függ a kimeneti terheléstől.
 - Pl. pontosan milyen hangszórót használunk egy audio erősítő esetén...
- Ezeket a hatásokat a legegyszerűbb esetben egy-egy ellenállással modellezhetjük, azaz az ideális feszültségerősítőt ki kell egészíteni
 - egy R_i **bemeneti ellenállással**, (input resistance)
 - és egy R_o **kimeneti ellenállással**. (output resistance)
- Az **A** erősítési tényezőt pedig üresjárási vagy névleges erősítésnek hívjuk.



A valós erősítés

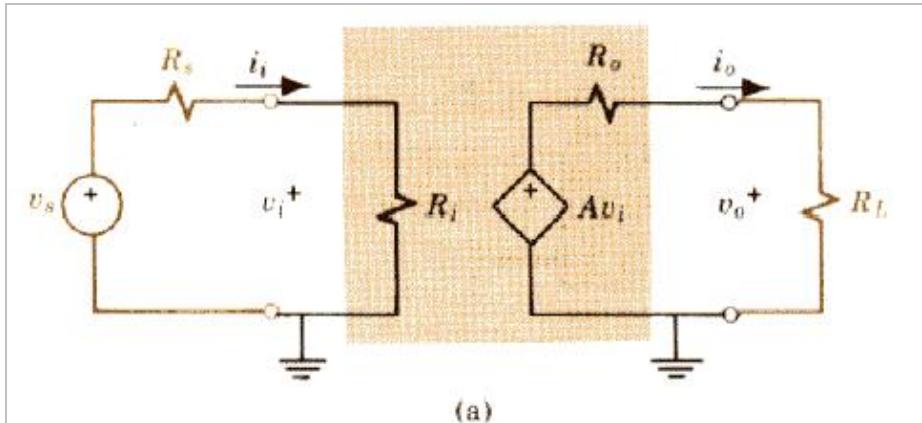
► Ezekkel a kiegészítésekkel több, egymás után kapcsolt erősítő erősítése is könnyen számíthatóvá válik.

- Általában az erősítők **több fokozatból** állnak.
- Példaként tekintsük a következő hálózatot:
 - Az erősítőt egy v_s feszültségű, R_s belső ellenállású forrás hajtja. (pl. ez előző fokozat, ebben az esetben az R_s ellenállás a megelőző fokozat kimenő ellenállása)
 - Az erősítőnek R_i a bemenő, R_o a kimenő ellenállása, amit R_L ellenállással terhelünk.



(a)

A valós erősítés számítása



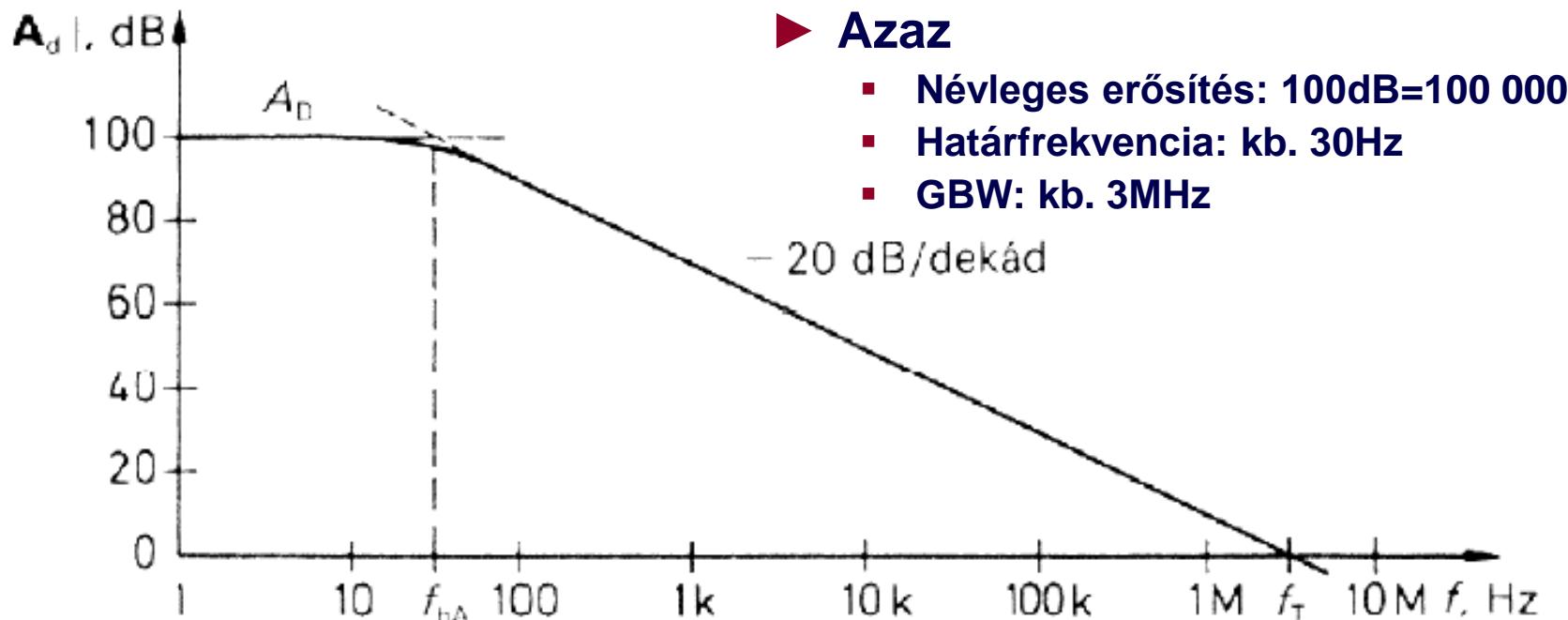
- ▶ A generátor feszültsége a R_s , R_i ellenállásokon megoszlik.
- ▶ Az erősítő bemenetére kerülő feszültség tehát (ellenállásosztás!)
 - $v_i = \frac{R_i}{R_i + R_s} v_s$
- ▶ Az erősítő kimenetén, ha áram folyik, az $A v_i$ feszültség szintén két ellenálláson oszlik meg, azaz:
 - $v_o = \frac{R_L}{R_L + R_o} A v_i = A \frac{R_L}{R_L + R_o} \frac{R_i}{R_i + R_s} v_s$
 - Azaz a „hasznos” erősítés, azaz a terhelésre kerülő feszültség/ a generátor feszültség kisebb a névleges értéknél.
 - Arra kell törekedni, hogy:
 - $R_i \gg R_s$ és $R_o \ll R_L$, ebben az esetben a valós erősítés a névlegest jól fogja közelíteni.

A Bode-diagramm

- ▶ A Bode-diagramm Szabályozástechnikából közismert.
- ▶ Lineáris rendszerek átvitelének (egy egy bemenetű és egy kimenetű rendszer átviteli karakterisztikája) ábrázolására szolgál.
- ▶ Az $A(\omega) = U_{ki}/U_{be}$ átviteli függvényt ábrázoljuk. Ha U , amplitudójú, ω frekvenciájú szinuszos jelet teszünk a hálózat bemenetére:
 - $U_{be}(t) = U_1 \cos(\omega t)$, a kimeneten $U_{ki}(t) = U_2 \cos(\omega t + \varphi)$ függvényt mérhetjük
 - az átvitel abszolút értéke U_2/U_1 , a bemenet és a kimenet között pedig φ fázistolás van.
- ▶ Az átvitel abszolút értékét és a fázistolást ábrázoljuk a frekvencia függvényében logaritmikusan.
 - Az $|A|$ mértékegysége a dB (decibel)
 - $A|_{dB} = 20\lg(A)$, amennyiben az átvitel feszültségre, vagy áramra vonatkozik.
 - Ha teljesítményre, akkor $P|_{dB} = 10\lg(P)$
 - Mivel lineáris rendszerekben $P \sim U^2$ vagy $P \sim I^2$, ez magyarázza a húszas szorzót a feszültség ill. áramátvitel képletében (deci = 10^1)



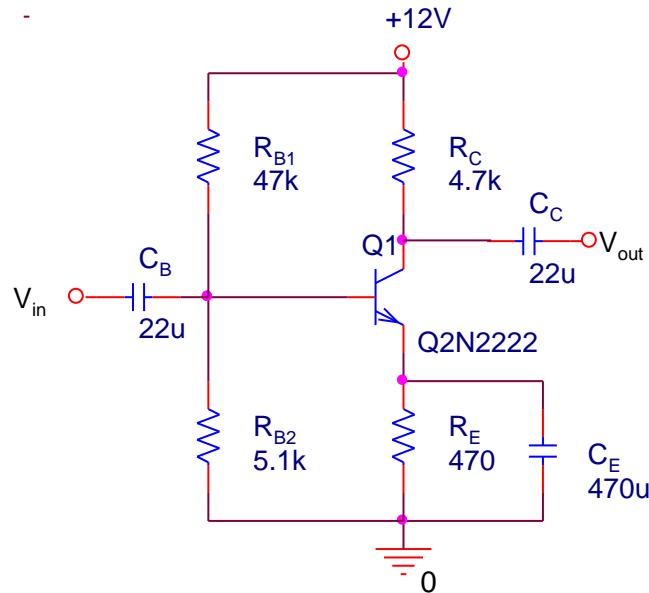
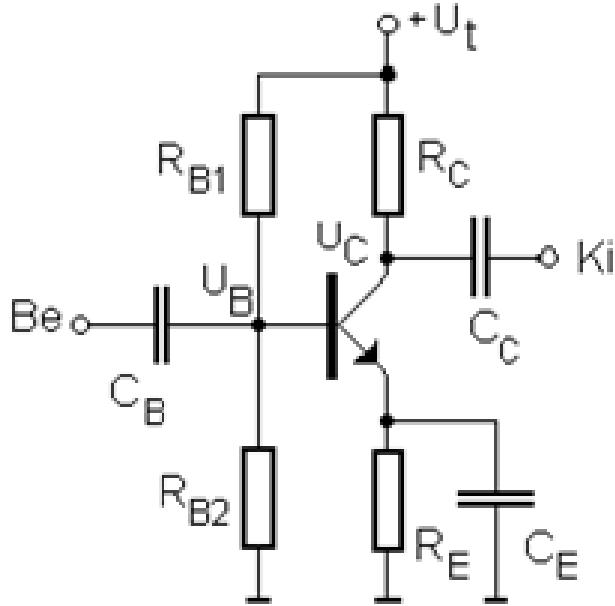
Példa Bode-diagrammra, műveleti erősítő



► Jellegzetes pontok:

- **Határfrekvencia:** f_h az a pont, ahol az erősítés a névleges erősítésnél 3dB-el kevesebb. (a névleges érték $\sqrt{2}$ -ed része, kb. 70%-a)
- **Tranzitfrekvencia:** az a frekvencia, ahol az erősítés abszolút értéke 1-re csökken. (Más néven **erősítés-sávszélesség szorzat, GBW**)

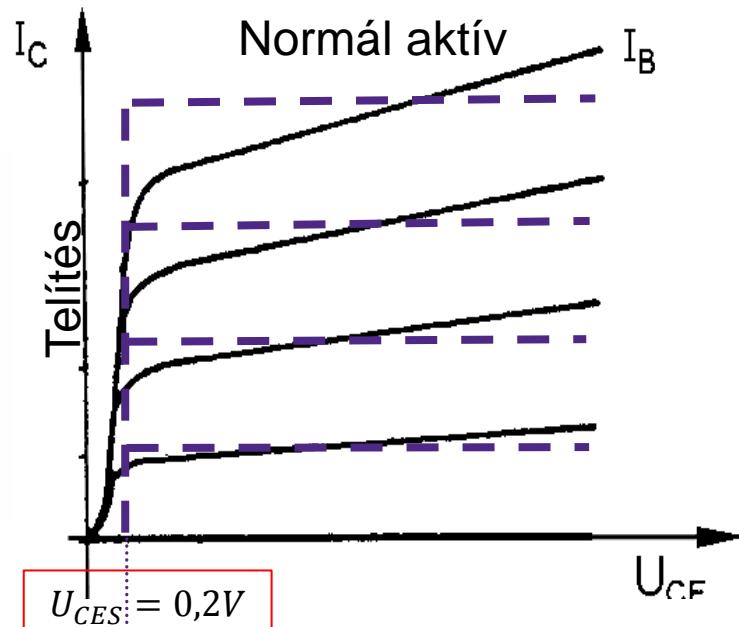
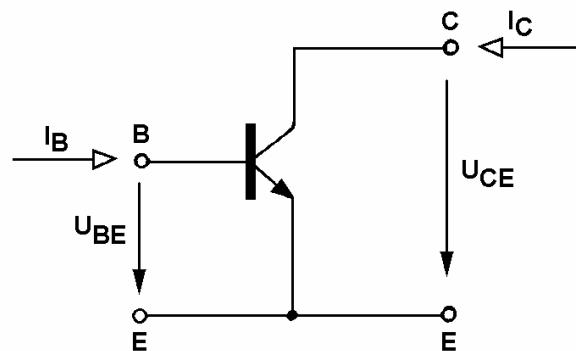
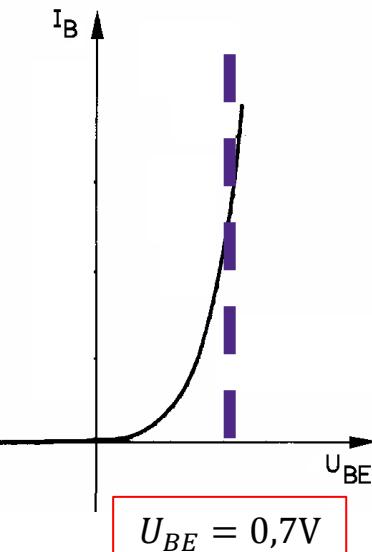
A földelt emitteres erősítő



- ▶ Ezt az erősítőt vizsgáljuk a továbbiakban.
 - Baloldalon található az elvi kapcsolási rajz, jobboldalon pedig egy valódi, méretezett kapcsolási rajz.
- ▶ A „megszokott” módon vizsgáljuk az áramkört,
 - először egy egyenáramú (DC) egyensúlyi megoldást keresünk, egy egyszerű közelítés segítségével,
 - majd a munkapont környéki kis változásokra elkészítjük az áramkör kisjelű (AC) helyettesítő képet és meghatározzuk az erősítő paramétereit,
 - azaz a névleges erősítést, ill. a be és kimenő ellenállásokat.

A munkapont közelítése

- ▶ Egyszerű, de a gyakorlatban jól használható közelítést keresünk.
- ▶ A bemeneti karakterisztikát a diódához hasonlóan egy megadott, U_{BE} feszültségforrással közelítjük. Szokásosan $U_{BE} \sim 0,7V$.
 - Ez alapján általában már tudunk áramot számítani.
- ▶ A kimeneti karakterisztikát:
 - NORMÁL AKTÍV tartományban, $I_C = BI_B$, ha $U_{CE} > U_{CES}$
 - TELÍTÉSBEN: $U_{CE} = U_{CES}$
 - ahol U_{CES} a telítési feszültség, szokásos értéke 0,1V..0,3V.



A számítás menete

► Normál aktív üzemmódot feltételezünk

- A tranzisztor bázis-emitter átmenetét U_{BE} feszültségforrással helyettesítjük, így az áramkör számíthatóvá válik.
- Meghatározzuk a tranzisztor valamelyik áramát. (a többi áram B ismeretében meghatározható.)
- Kiszámítjuk a kollektor-emitter feszültséget, ha $U_{CE} > U_{CES}$, akkor helyes volt a feltételezés, a tranzisztor valóban normál aktív üzemmódban dolgozik, készen vagyunk.

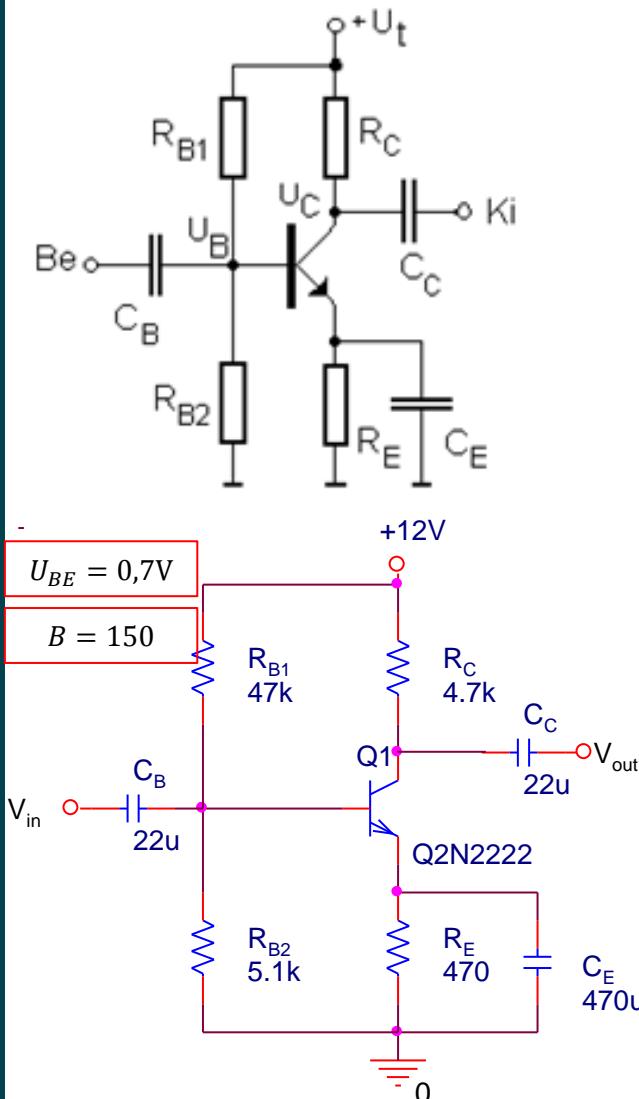
► Ha nem, tévedtünk, mégis telítésben van a tranzisztor

- A bázisáram helyes, viszont $U_{CE} = U_{CES}$.
- A kollektoráramot ez alapján tudjuk kiszámítani, telítésben nem érvényes az $I_C = BI_B$ összefüggés!

► Erősítő kapcsolásokban a tranzisztor normál aktív üzemmódban van, míg kapcsoló alkalmazások esetén bekapcsolt állapotban telítésben.



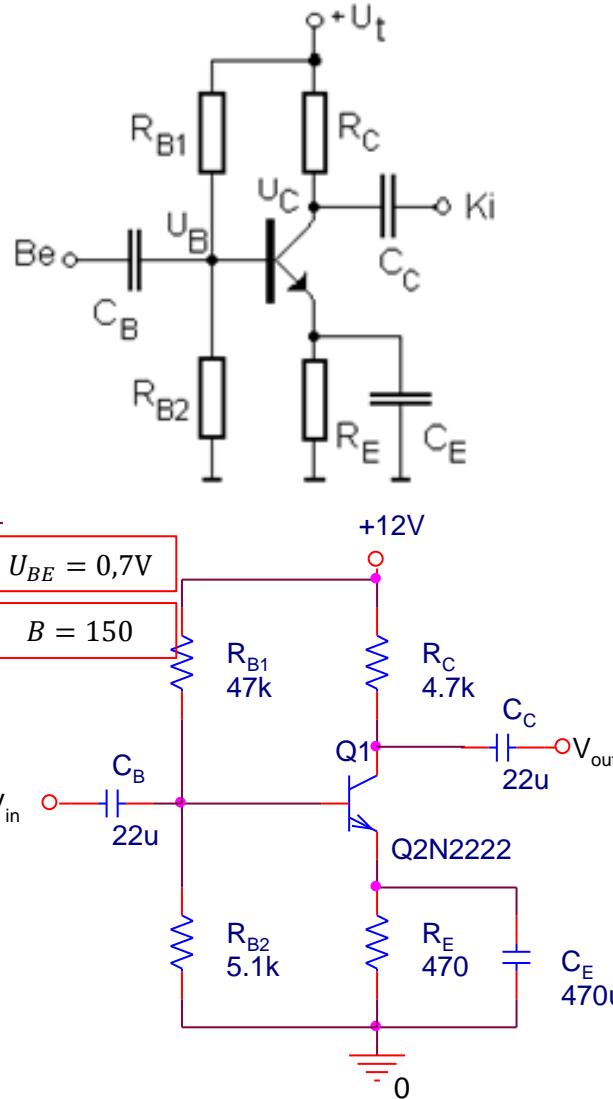
A földelt emitteres erősítő (DC)



- ▶ Egyenfeszültségű egyensúlyi állapotot vizsgálunk, így a kondenzátorokat nem kell figyelembe venni.
 - Mivel tetszőleges feszültségre $\partial U / \partial t = 0$, a kondenzátoron áram nem folyik.
 - A tekercset (nem lesz ilyen ...) rövidzárral kell helyettesíteni, mivel $\partial I / \partial t = 0$, így rajta feszültség nem indukálódik.
- ▶ Feltételezzük, hogy a tranzisztor normál aktív üzemmódban működik.
- ▶ Ha a bázisáramot elhanyagoljuk, akkor a bázispont feszültsége egy feszültségesztással számítható:

$$\bullet \quad U_B = V_{CC} \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} = 1,17V$$

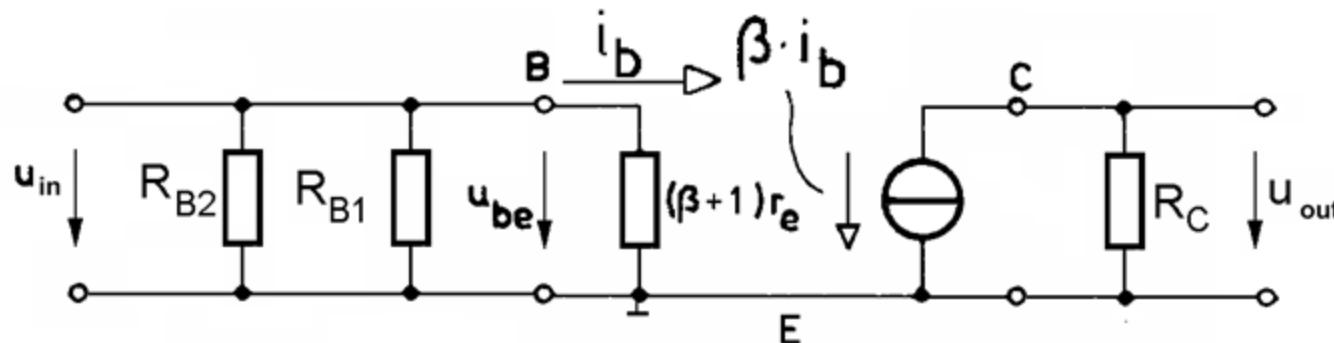
A földelt emitteres erősítő (DC)



- ▶ Az emitterpont feszültsége a bázis feszültségénél U_{BE} -vel kisebb, tehát az emitter áram:
 - $I_E = \frac{U_B - U_{BE}}{R_E} = 1mA$
 - (a Kirchhoff törvény: $U_B = I_E R_E + U_{BE}$)
- ▶ Ha a bázisáramot elhanyagoltuk, akkor
 - $I_C = I_E = 1mA$
- ▶ Ennek ismeretében már kiszámíthatjuk U_{CE} feszültséget:
 - $U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C - I_E R_E = 6,8V$
 - (A Kirchhoff törvény: $V_{CC} = I_C R_C + U_{CE} + I_E R_E$)
 - Az egy-két tized voltos telítési feszültségnél ez határozottan nagyobb.
 - Tehát a tranzisztor normál aktív üzemmódban dolgozik, feltételezésünk tehát helyes volt.

A földelt emitteres erősítő (AC)

- ▶ A kondenzátorok az erősítő középfrekvenciáján rövidzárnak tekinthetőek.
 - Mit jelent ez? Frekvenciafüggéssel nem foglalkozunk, ez egy jó közelítés. A váltakozó áram keresztülhalad a kondenzátoron és eközben a kondenzátor egyenfeszültsége keveset változik.
 - Azaz mintegy egyenfeszültségű forrásnak fogjuk fel és szuperpozíció tért alkalmazva rövidzárral helyettesítjük. Elméletileg a kondenzátor látszólagos ellenállása: $1/\omega C$, ami tetszőlegesen kicsivé lehető.
- ▶ Az AC helyettesítő kép rajzolásának szabályai:
 - egyenáramú feszültségforrás – rövidzár (Id. szuperpozíció tétele)
 - kondenzátor – rövidzár
- ▶ Érdemes a tranzisztor helyettesítő képével kezdeni, majd köré rajzolni az áramkör többi elemét...



A földelt emitteres erősítő (AC)

► A helyettesítő kép paraméterei:

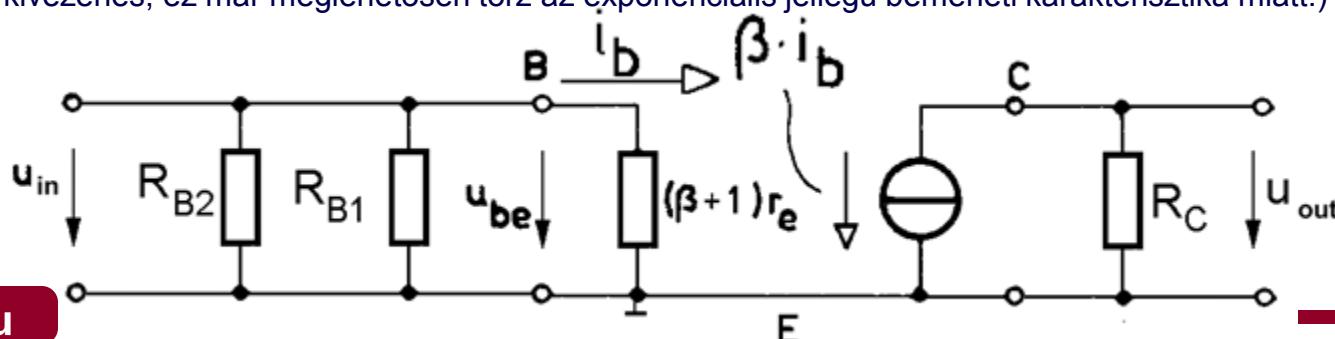
- $\beta = B = 150, r_e = \frac{U_T}{I_E} = \frac{26mV}{1mA} = 26\Omega$

► Az erősítés számításához írjuk fel a bemenő és a kimeneti feszültséget a kisjelű bázisáram függvényében!

- $u_{in} = (\beta + 1)r_e i_b$
- $u_{out} = -\beta i_b R_C$
 - Mivel a kimeneti kisjelű feszültség mérőiránya ellentétes a vezérelt áramgenerátor mérőirányával, ezért a negatív előjel.
- Így az erősítést már könnyen meghatározhatjuk:
- $A = \frac{u_{out}}{u_{in}} = -\frac{\beta}{\beta+1} \frac{R_C}{r_e} = -180$

► Mit jelent ez?

- A bemenetre kapcsolt 1mV amplitúdójú szinuszos feszültség hatására a kimeneten kb. 180mV amplitúdójú erősített feszültséget kapunk, és ez még nem torzul túlzott mértékben.
- 1V amplitúdójú bemenet esetén NEM LESZ 180V a kimeneten! (ez túl egyszerű lenne...)
 - (A kollektorpont max. a tápfeszültségig, min. pedig kb. 7V-ig vezérelhető, így kb 2,5V amplitúdó a maximális kivezérlés, ez már meglehetősen torz az exponenciális jellegű bemeneti karakterisztika miatt.)



A földelt emitteres erősítő (AC)

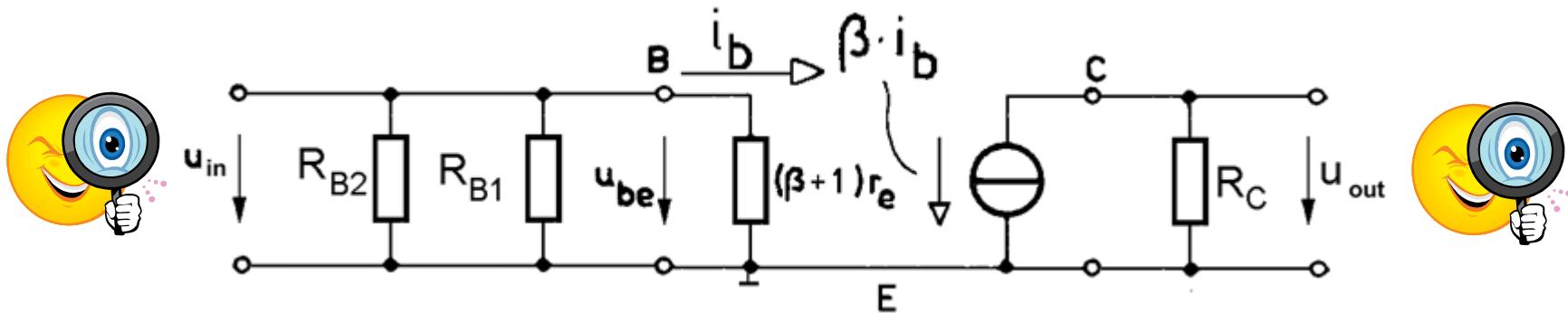
► A bemenő ellenállás számítása:

- Az erősítő bemenetéről tekintve három ellenállás kapcsolódik párhuzamosan, azaz
- $r_{in} = R_{B1} \times R_{B2} \times (\beta + 1)r_e = 2,1\text{k}\Omega$

► A kimeneti ellenállás számítása:

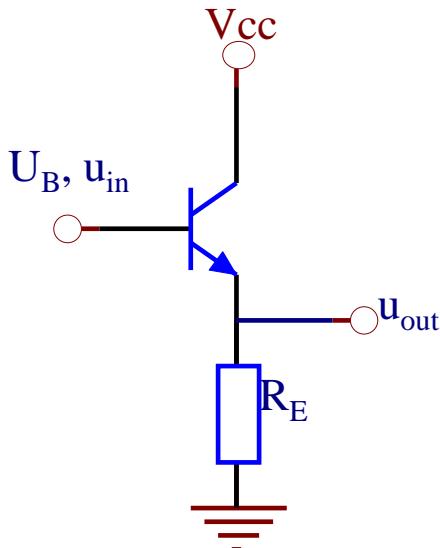
- A kimenetről tekintve az R_C ellenállást látjuk, hiszen az áramgenerátor szakadás.
- $r_{out} = R_C = 4,7\text{k}\Omega$

► Készen vagyunk.



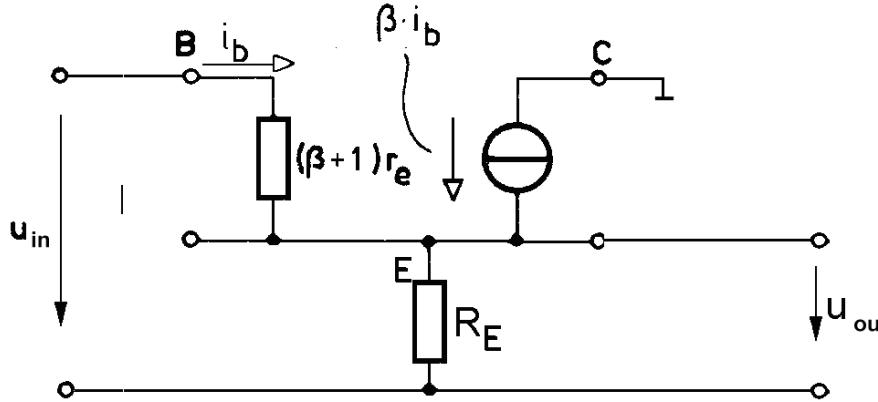
Az emitterkövető (analóg buffer)

- ▶ Láttuk, hogy az előző erősítő kimeneti ellenállása nem a legkedvezőbb.
 - Jó lenne valahogy csökkenteni. Erre szolgál az emitterkövető kapcsolás.
- ▶ Ez a kapcsolás gyakorlatilag „lemásolja” a bemenetére kerülő feszültséget, a kimeneten a bemeneti feszültség jelenik meg, egy diódafeszültséggel csökkentve.
- ▶ A kimenő ellenállás viszont csökken.



- ▶ DC számítás
- ▶ Az emitterpont feszültsége a bázispont feszültségénél U_{BE} feszültséggel kisebb.
- ▶ Így az emitteráram:
 - $I_E = (U_B - U_{BE})/R_E$
- ▶ A kollektor – emitter feszültség:
 - $U_{CE} = V_{CC} - I_E R_E$

Az emitterkövető (AC)

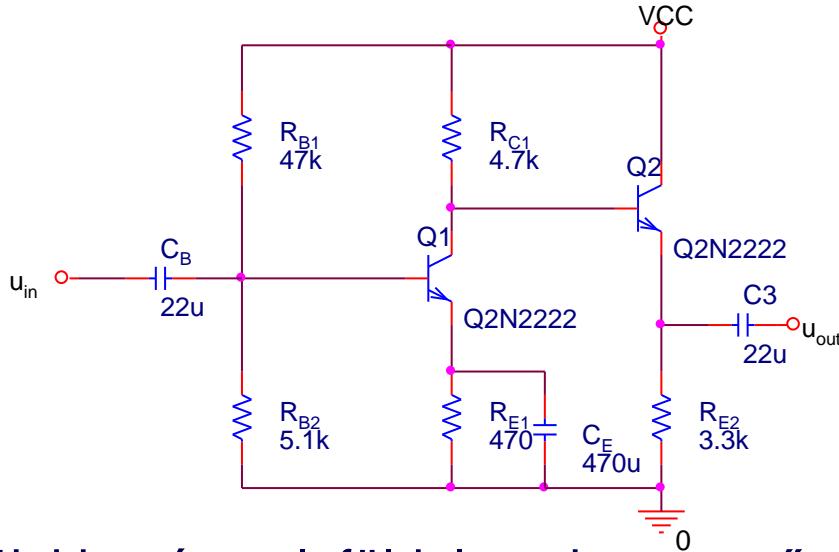


- ▶ A számítások elvégzése előtt vegyük észre, hogy az R_E ellenállás áram a Kirchhoff csomóponti törvény miatt $(\beta + 1)i_b$. (Mivel a bázis irányából a bázisáram, a kollektor irányából pedig βi_b kisjelű áram érkezik.)
- ▶ A kisjelű bázisáram függvényében írjuk fel a be és kimeneti feszültséget, ebből az erősítés meghatározható:

$$\blacksquare \quad A = \frac{u_{out}}{u_{in}} = \frac{(\beta+1)R_E}{(\beta+1)(r_e+R_E)} = \frac{R_E}{r_e+R_E} \approx 1$$

- ▶ A bemenő ellenállás (szintén ugyanezzel a trükkel)
 - $r_{in} = \frac{u_{in}}{i_{in}} = \frac{(\beta+1)(r_e+R_E)i_b}{i_b} = (\beta + 1)(r_e + R_E)$
- ▶ A kimenő ellenállás, bizonyítás nélkül: $r_{out} = r_e + \frac{R_G}{\beta+1}$
 - Ahol R_G a meghajtó fokozat ellenállása.
 - Azaz a meghajtó fokozat kimenő ellenállását 50..200-d részére csökkenti!

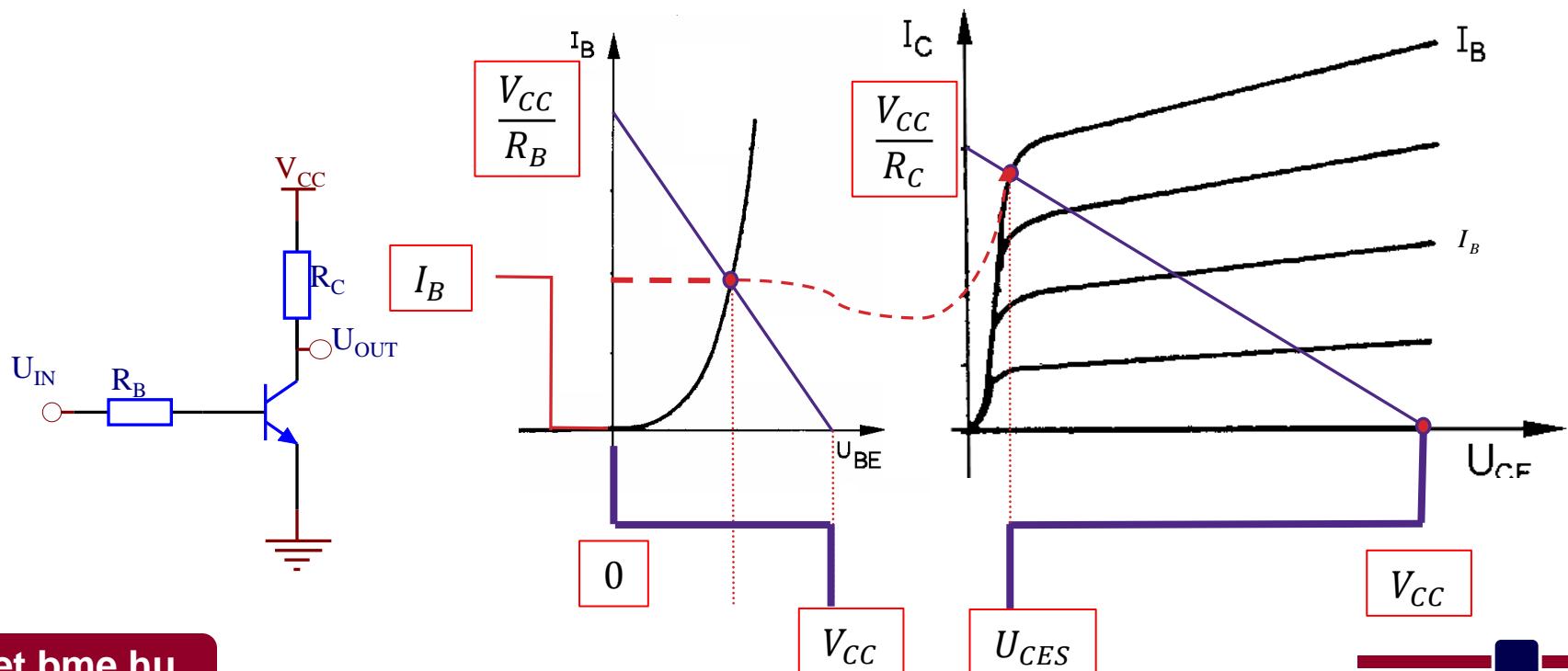
Emitterkövető, példa.



- ▶ Egészítsük ki a tárgyalt földelt emitteres erősítőt emitterkövetővel.
- ▶ Számítsuk ki az emitterkövető munkapontját! Az előző eredményeket felhasználva a Q2 tranzisztor bázisának feszültsége:
 - $U_{B2} = V_{CC} - I_{C1}R_{C1} = 12 - 4,7 = 7,3V$
- ▶ Ebből kiszámíthatjuk az emitteráramot:
 - $I_{E2} = \frac{U_{B2} - U_{BE}}{R_{E2}} = 2mA$
- ▶ Az erősítő kimenő ellenállása pedig:
 - $r_{out} = \frac{u_g}{i_g} = r_{e2} + \frac{R_{C1}}{\beta+1} \approx 44\Omega$

A tranzisztor kapcsoló működése

- ▶ A tranzisztor bázisára kapcsolt feszültséggel kapcsoljuk ki/be az R_C ellenállással jelképezett fogyasztót.
- ▶ Ha a bemenet 0V, bázisáram nem folyik, akkor a tranzisztor lezár, kollektoráram sem folyik.
 - Ez a kikapcsolt állapot.
- ▶ Bekapcsoláskor a bemenetre egy nagyobb feszültség, pl. a tápfeszültség kerül.
 - Ennek hatására bázisáram indul meg. $I_B = (V_{CC} - U_{BE})/R_B$ a szokásos közelítést alkalmazva.
 - Ha a kapcsolás jól van méretezve, a tranzisztor telítésbe kerül, így $U_{CE} = U_{CES}$
 - A terhelés árama pedig: $I_C = (V_{CC} - U_{CES})/R_C$

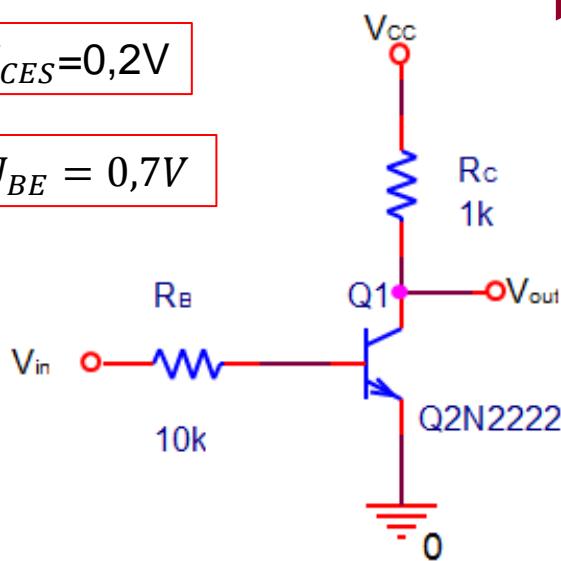


A tranzisztor kapcsoló működése, példa.

$$V_{CC}=5V$$

$$U_{CES}=0,2V$$

$$U_{BE} = 0,7V$$



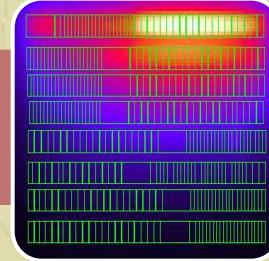
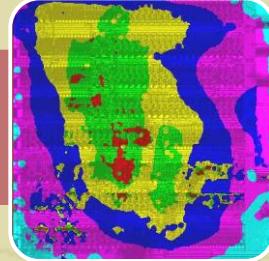
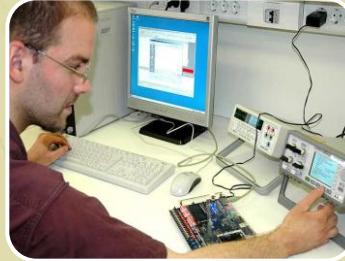
- ▶ $V_{in}=0V$ esetén:
 - Bázisáram nem folyik, a tranzisztor lezárt.
- ▶ $V_{in}=5V$ esetén:
 - $I_B = \frac{V_{in}-U_{BE}}{R_B} = \frac{5-0,7}{10} = 4,3mA$
 - (a Kirchhoff törvény: $V_{IN} = I_B R_B + U_{BE}$)
 - Ha **normál aktív** üzemmódban **lenne** a tranzisztor, a kollektoráram:
 - $I_C = BI_B = 150 \cdot 4,3 = 645mA$ **lenne**.
 - (Itt már gyanakodhatunk, mert az ellenállás feszültsége 645V...egy 12V-os tápfeszültség mellett, egyensúlyban...)
 - A kollektor-emitter feszültség:
 - $U_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = -640V < U_{CES}$
 - Tehát biztosan telítésben van.
 - $V_{OUT} = U_{CE} = U_{CES} = 0,2V$
 - $I_C = \frac{V_{CC}-U_{CES}}{R_C} = \frac{5-0,2}{1} = 4,8mA$
 - ▶ Ki/be kapcsolunk egy $1k\Omega$ -os ellenállást.
 - ▶ Vagy meginvertáltuk a bemeneti logikai jelet? Mindkettő igaz.



Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi
Egyetem

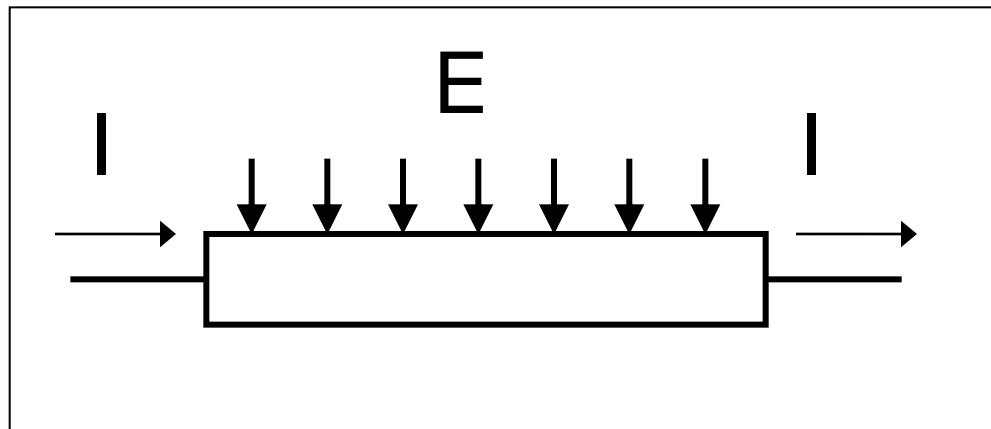
Elektronikus Eszközök Tanszéke

A MOS tranzisztor és egyéb tranzisztorok



Térvezérelt tranzisztor

FET: Field Effect Transistor



Működésük alapelve, hogy egy térrészen átfolyó áramot úgy szabályozunk, hogy **külső elektromos erőtérrrel** megváltoztatjuk.

- Emlékeztető: a bipoláris tranzisztor úgy működik, hogy egy pn átmenet áramával vezérelnünk egy másik pn átmenet áramát!

Térvezérelt tranzisztorok tulajdonságai

► Két csoportjuk:

- **MOSFET – nevét a struktúráról kapta, Metal-Oxide-Semiconductor. (nem feltétlenül igaz mindhárom..., a név viszont rajtamad)**
- JFET – Junction Field Effect Transistor

► Közös tulajdonságaik:

- **Bemenő (egyen!) áramuk közel 0.**
- A vezérlés kis teljesítményigényű, és feszültséggel történik
- Jóval kisebb helyigényűek a bipoláris tranzisztorhoz képest, ezért integrált áramköri megvalósításra alkalmasabbak.
- Szimmetrikus eszközök, azaz a kimeneti kapcsok felcserélhetőek – ez a tranzisztorfajta unipoláris.

► Működésük alapja: feszültségvezérelt áramforrás



MOS tranzisztorok

- ▶ **MOS: Metal-Oxide-Semiconductor**
- ▶ Nevét a működést biztosító anyagstruktúráról kapta, azaz
 - Fém, a félvezető oxidja, félvezető.
 - A félvezető Si, mivel a SiO_2 (más néven kvarc) stabil anyag.
 - Valójában ez az oka annak, hogy Si-ot használunk más félvezetők helyett
 - A fém kezdetben alumínium volt, később szinte minden technológiában polikristályos szilíciumot használtak, az utóbbi években azonban újra fémből készül. (meglehetősen „trükkös” ötvözletek – ez a fém-gate-s / metal gate technológia)

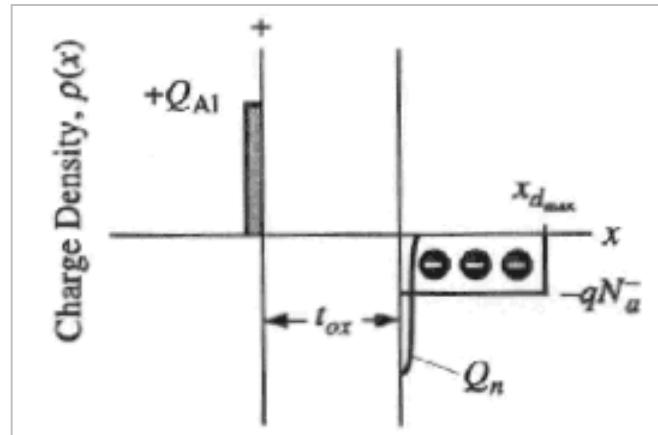
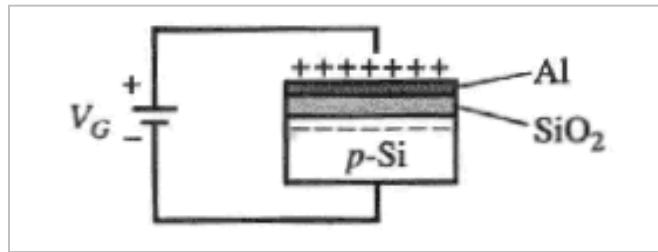
Ma a vezető technológia

- 1957: az első MOS tranzisztor
- 1970: az első nagy téTELben árult MOS IC (3-tranzisztoros 1 kbit DRAM, Intel)
- Ma: 3-7 milliárd MOS tranzisztor/chip
- 2005-ben állítólag több MOS tranzisztor készült, mint ahány szem rizst termesztettek. (forrás: „SEMI Annual Report’05” – nem ellenőrzött...)
 - És olcsóbb az előállítása is...
- ▶ Működésének alapja: a **MOS kapacitás**



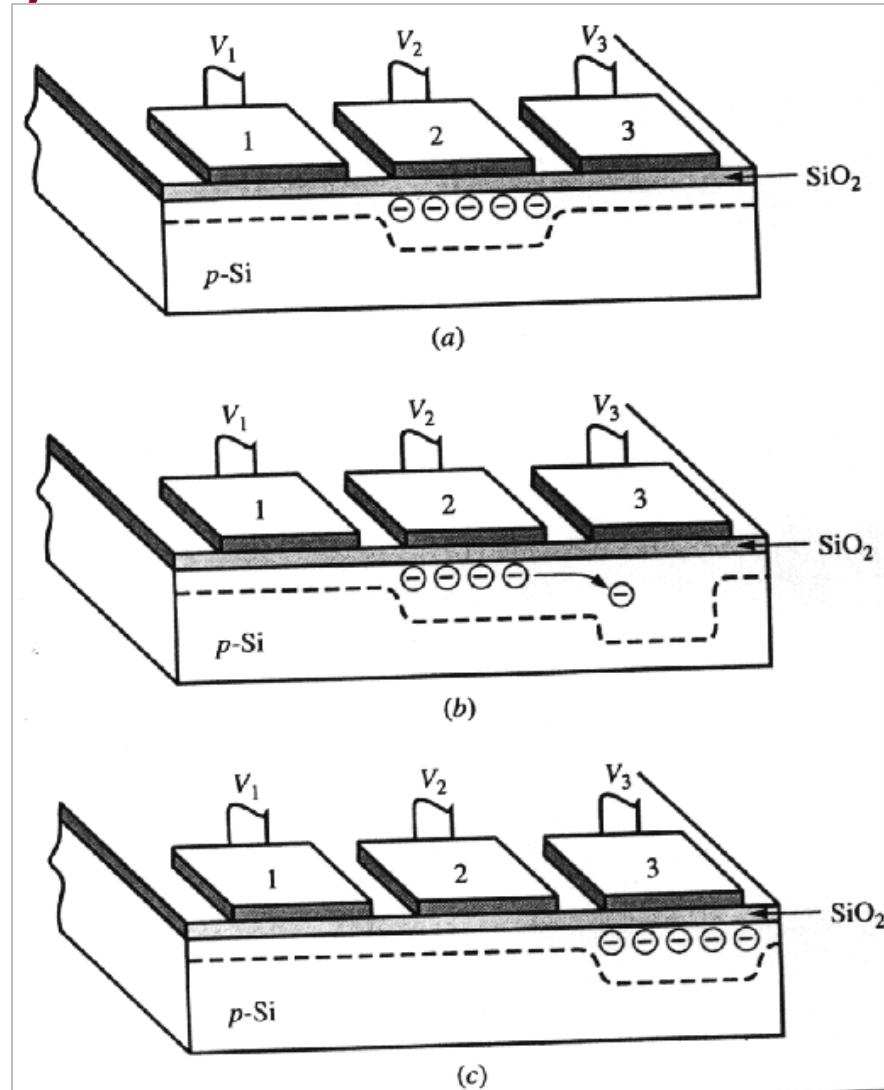
A MOS kapacitás 1.

- ▶ A MOS kapacitás egyik fegyverzete félvezető anyag.
- ▶ Ha az ábrán látható MOS kapacitásra pozitív feszültséget kapcsolunk, a fémen pozitív töltés jelenik meg.
 - (valójában a fém néhány atomsor nyíltávolságban elektronokban szegényebbé válik...)
- ▶ A p típusú félvezetőben elektronoknak kellene megjelenni, de alapesetben nagyon kevés van...
- ▶ Ehelyett
 - először egy kiürített réteg jön létre, (a negatív töltés az ionizált akceptor atomok adják)
 - majd adott nagy térerősségnél mozgásképes elektronok jelennek meg, ezek az ún. **inverziós töltések**.
 - A felület környékén a nagy térerősség hatására úgy viselkedik a félvezető, mintha ellentétes vezetési típusú lenne.
- ▶ Az a feszültség, amit a struktúrára kell adni, hogy az **inverziós csatorna** létrejöjjön a **V_T küszöbfeszültség**.



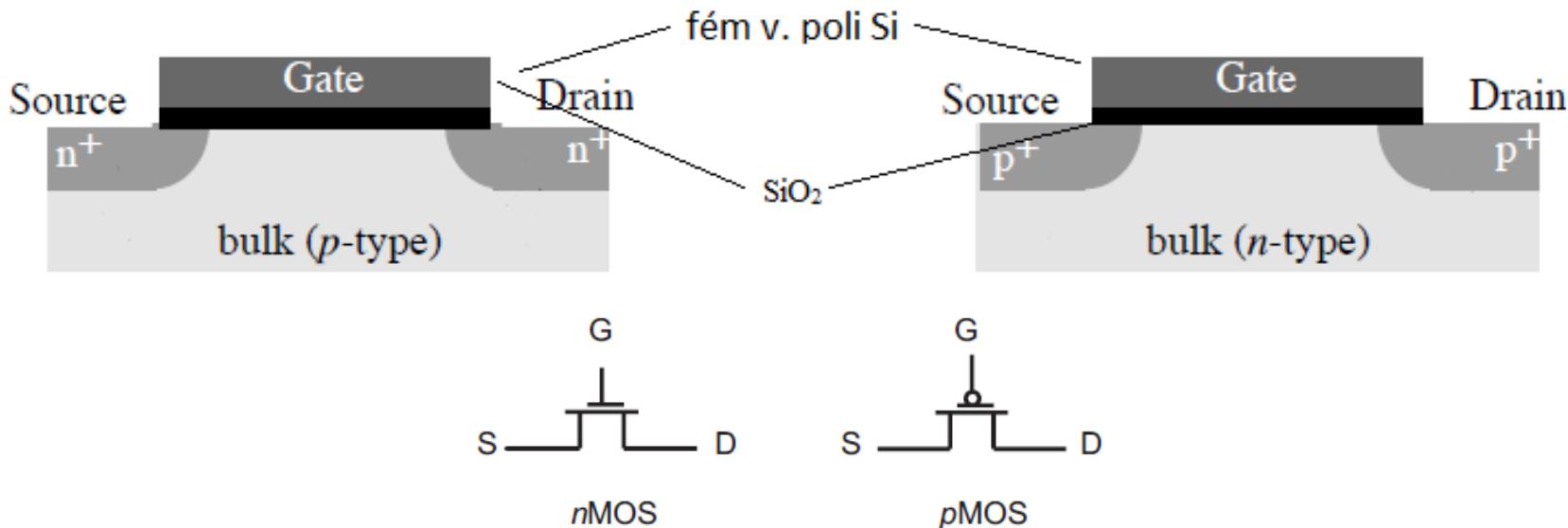
A MOS kapacitás 2. (CCD)

- ▶ A MOS kapacitást önmagában is használják töltések mozgatására
- ▶ pl. a **CCD (charge coupled devices) struktúrákban** (camcorderek)
 - A megvilágítás intenzitásával arányos mennyiségű töltés generálódik.
 - Ezt soronként ki lehet „shiftelni”
 - $V_2 > V_T > V_1$ és V_3 : a töltés a kettes jelű kapacitás alatt marad.
 - $V_3 > V_2 > V_T > V_1$: a töltés a hármas jelű kapacitás alá mozdul.
 - $V_3 > V_T > V_1$ és V_2 : a töltés a hármas jelű kapacitás alatt marad.



MOS tranzisztorok

A MOS tranzisztor egy source és egy drain elektródával kiegészített MOS kapacitás.

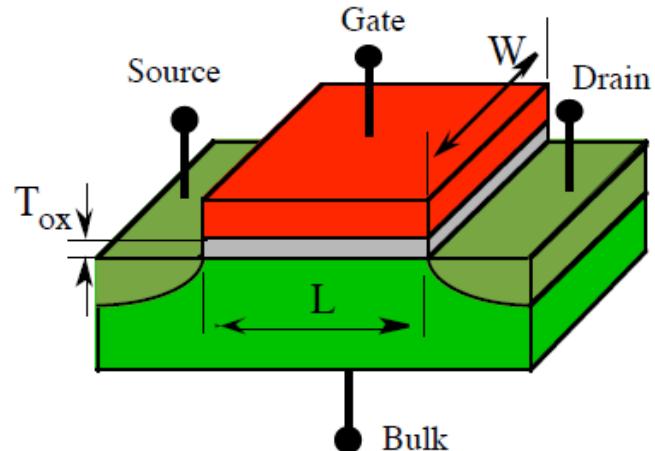


- ▶ **n csatornás eszköz:** p típusú szubsztráton készül, az inverziós csatornát elektronok alkotják, az inverziós csatorna köti össze a source és a drain elektródát.
- ▶ **p csatornás eszköz:** n típusú szubsztráton készül, az inverziós csatornát lyukak alkotják.

MOS tranzisztorok

► A fontosabb geometriai méretek

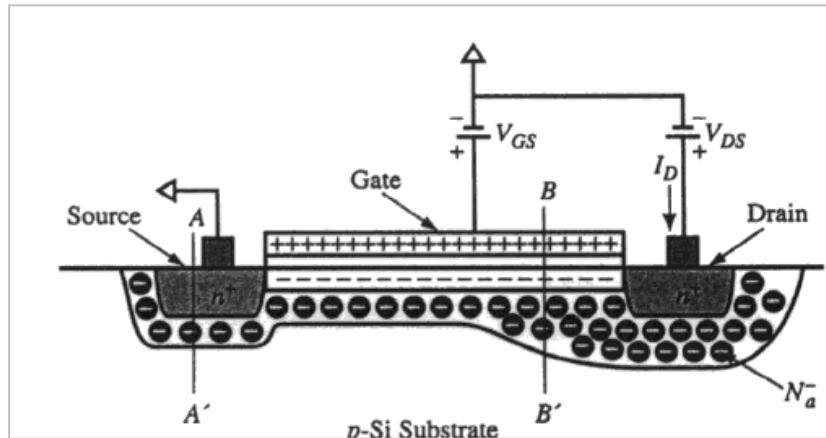
- Tox: az oxidréteg vastagsága (néhány nm)
- L: a csatorna hossza (20nm – néhány µm)
- W: a csatorna szélessége (20nm – néhány µm)



- Pont mint egy relé – ha a gate-source feszültség a küszöbfeszültséget meghaladja, összeköti a két elektródát az inverziós réteg, egyébként pedig nem.
 - Kapcsolási célokra ez kiválóan hasznosítható.
- Valójában egy négypólusú eszköz, de feltételezzük, hogy a szubsztrát (bulk) n csatorna esetén a legnegatívabb (általában 0V, föld), p vezetéses esetén pedig a legpozitívabb feszültségre (tápfeszültség) van kötve.
 - Ha nem így lenne, akkor kinyitnának a source ill. drain elektródáknál lévő pn átmenetek.
 - És ez így is történik – ha fordított tápfeszültséget kapcsolunk rá, egy nagy dióda lesz a MOS integrált áramkörből. (ha az áramot nem korlátozzuk, füst is...)

MOS tranzisztor működése 1.

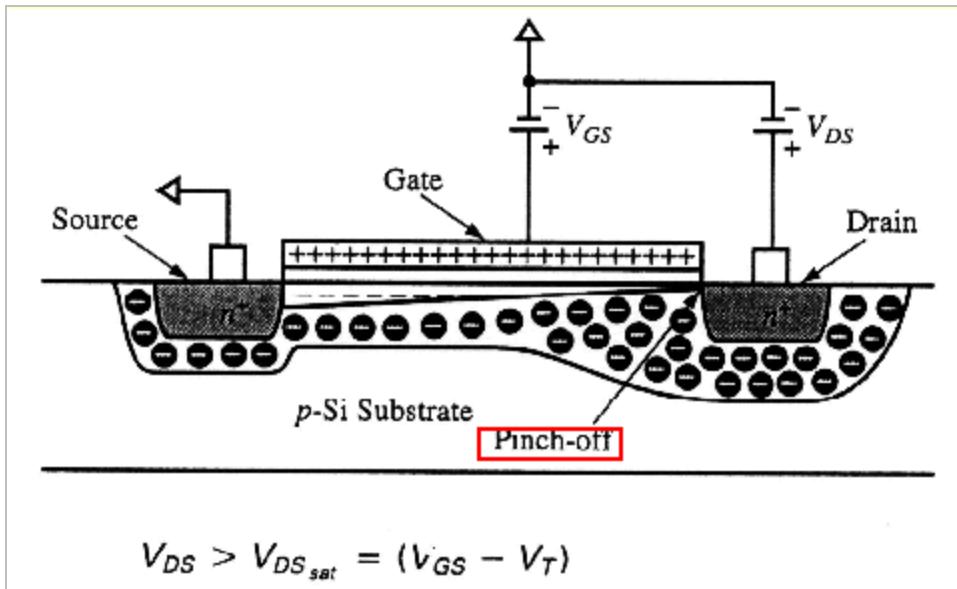
Ha a V_{GS} gate feszültség nagyobb mint a V_T küszöbfeszültség, a Si és SiO_2 átmenetnél egy elektronokból álló inverziós réteg alakul ki.



- ▶ Az **n+ – source tartomány** a MOS kapacitás inverziós töltéseiinek gyors megjelenését biztosítja.
- ▶ Az **n+ – drain tartomány** pozitív előfeszítése hatására az inverziós csatornában a source-tól a drain felé áram folyik.
- ▶ A pozitív feszültség a drain körüli pn átmenetet záróirányban feszíti elő, ennek eredménye a **széles kiürített réteg a drain körül**.
- ▶ Az inverziós csatorna töltéseiinek számát V_{GS} szabályozza.
- ▶ A drain feszültség miatt az inverziós csatornán feszültség esik, ezért a csatorna a drain felé szűkül.

MOS tranzisztor működése 2.

$$I_D = \frac{W}{L} \frac{\mu_n \epsilon_{ox}}{t_{ox}} \left\{ (V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right\} \quad \text{ha } V_{GS} \geq V_T, V_{DS} \leq V_{GS} - V_T$$



Egy adott drain feszültségnél ($V_{DS_{sat}}$, telítési feszültség) a csatorna a drain-nél elzáródik (pinch-off)

$$V_{DS_{sat}} = V_{GS} - V_T$$

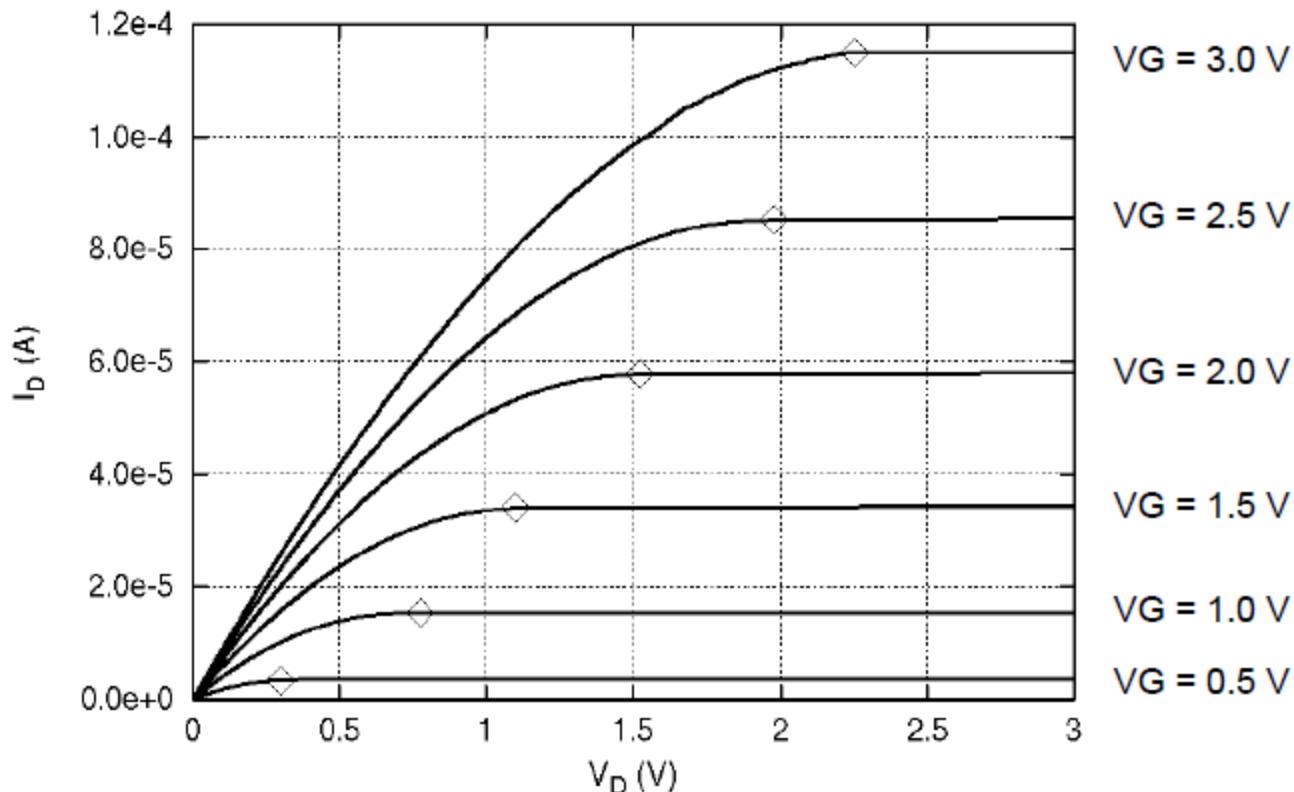
u.i.: ha $V_{DS} > V_{GS} - V_T$, a drain-nél nem tud inverziós csatorna kialakulni.

Az elzáródás bekövetkezte után a MOS tranzisztor ún. **telítéses üzemmódban** dolgozik.

A MOS tranzisztor karakterisztikái

- ▶ Kimeneti: $I_D = f(U_{DS})$ paraméter: U_{GS})
- ▶ Transzfer: $I_D = f(U_{GS})$

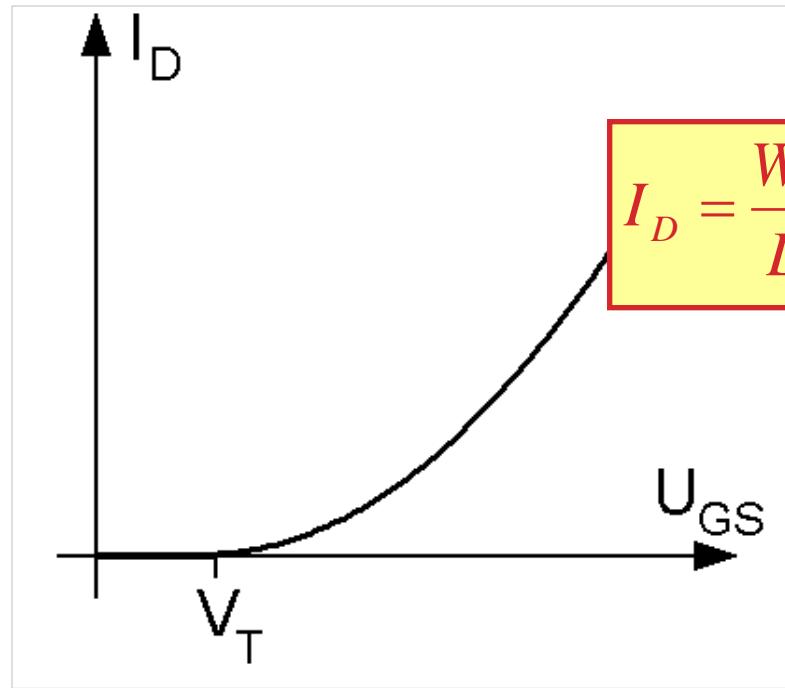
Kimeneti
karakterisztika



Transzfer karakterisztika

A MOS tranzisztor **leggyakrabban a telítéses (saturation) tartományban használjuk.**

A MOS tranzisztor **telítéses karakterisztika** egyenlete:



$$I_D = \frac{W}{L} \frac{\mu_n}{2} \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} (V_{GS} - V_T)^2 = \frac{K}{2} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2$$

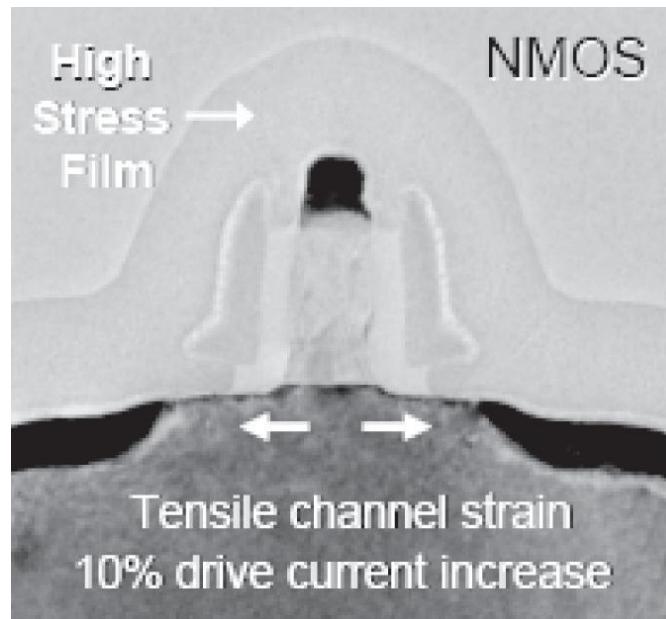
ahol

W a gate szélessége,
 L a gate hosszúsága,
 ϵ_{ox}/t_{ox} a felületegységre eső oxidkapacitás,
 μ_n a csatorna töltéshordozónak mozgékonyisége,
 V_{GS} a gate-source feszültség,
 V_T a tranzisztor küszöbfeszültsége.

(a tervező csak a W/L arányt tudja változtatni...)

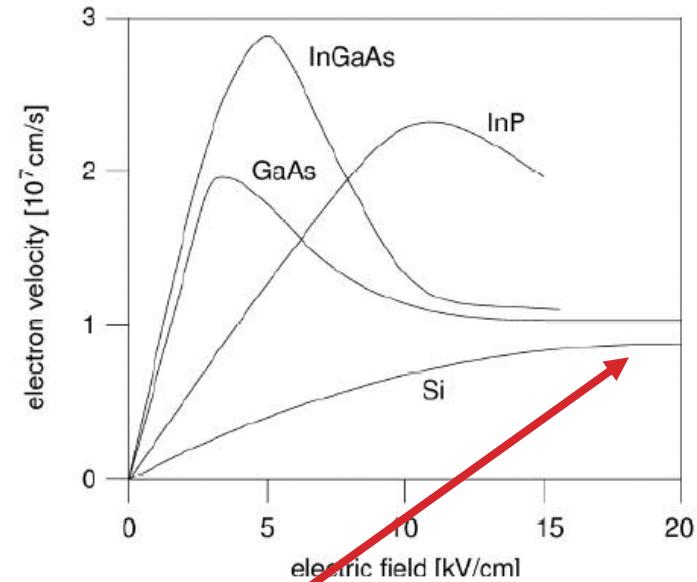
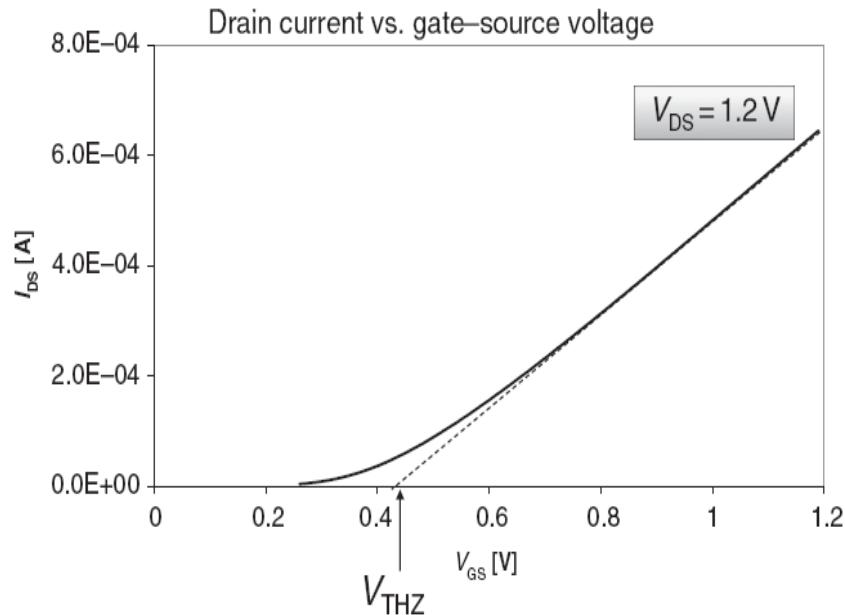
Kisméretű MOS tranzisztorok

- ▶ Jelenleg 22nm gyártásban, <10nm fejlesztés alatt
- ▶ A csatornában mozgó töltéshordozók elérik a határsebességüket → a transzfer karakterisztika lineáris
- ▶ A küszöbfeszültség a csatornahossztól és az U_{DS} feszültségtől erősen függ
- ▶ Szivárgási áram
 - Küszöbfeszültség alatti áram
 - Áram folyik a gate elektródán



A transzfer karakterisztika változása

65nm tranzisztor



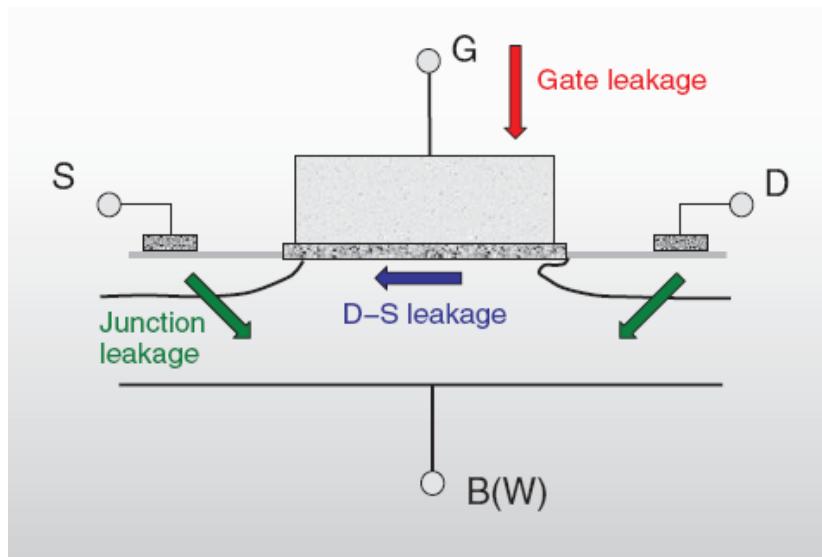
- ▶ A karakterisztika linearizálódik..., mert a töltéshordozók sebessége eléri a maximumát a nagy térerősség hatására

$$I_D = \frac{W}{L} \frac{\mu_n}{2} \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} (V_{GS} - V_T)^\alpha$$

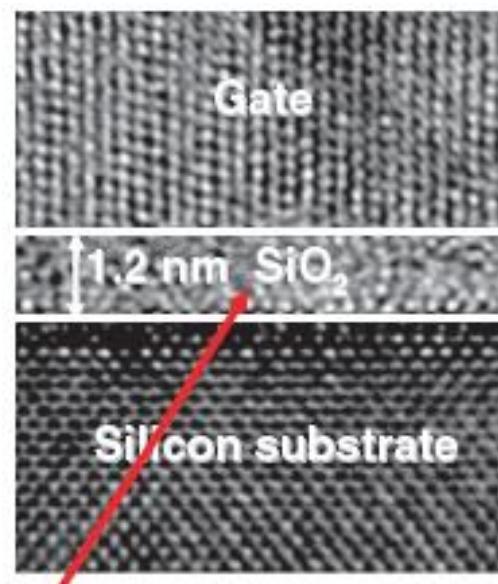
$$\alpha = 1,2 .. 1,3$$

Illesztett modell, nem fizikai

Szivárgási áramok



- Mivel V_T kicsi, $V_{GS}=0V$ -nál is jelentős a küszöbfeszültség alatti áram → D-S szivárgás
- A gate – oxidon keresztül tunnelhatással haladnak a töltéshordozók, mert az oxidréteg néhány atomsor széles → gate szivárgás



Megoldások?

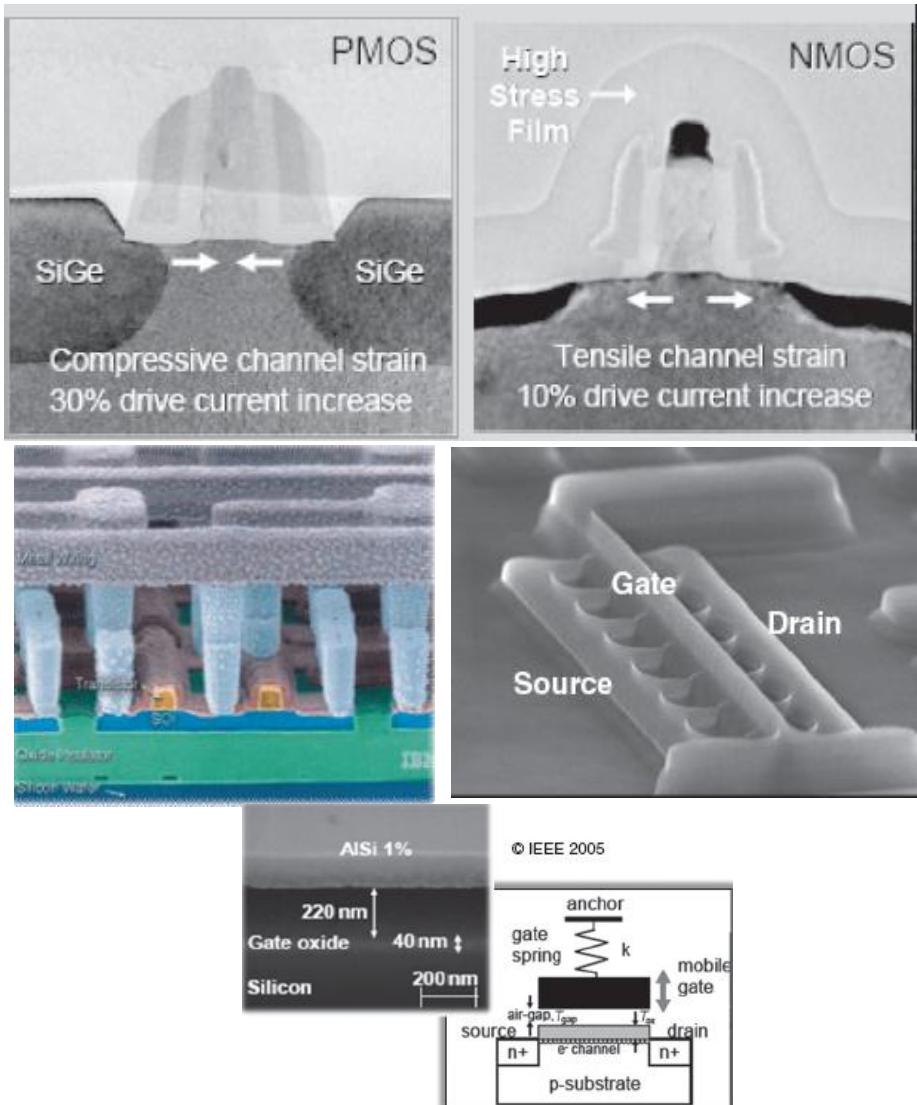
► Gyártásban

- Feszített szilícium (strained Si)
- nagy ϵ_{rel} (High-K) szigetelőanyagok
- SOI
- Trigate tranzisztor

► Kutatás alatt

- Multigate tranzisztorok
- MEMS + MOS

► Az utolsó heti előadáson



Egyéb tranzisztorok

► JFET

- Junction field effect transistor
- Analóg elektronika, erősítők bemeneti fokozatai

► Teljesítmény elektronika

- POWER MOS FET
- IGBT – insulated gate bipolar transistor

► Vékonyréteg tranzisztor

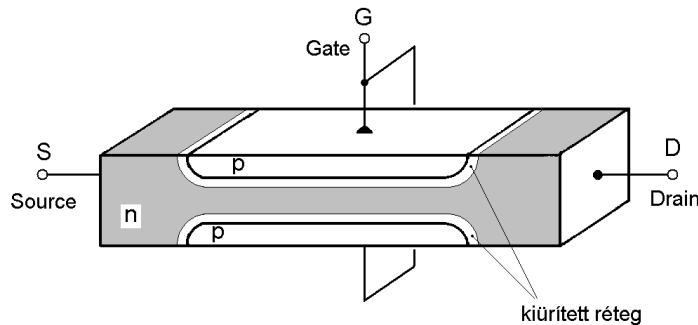
- LCD kijelzők vezérlésére
- TFT – thin film transistor



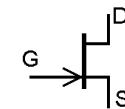
Záróréteges térvézérelt tranzisztor

JFET: Junction Field Effect Transistor

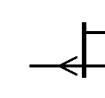
Alapstruktúra (diszkrét kivitelben):



Záróréteges FET n típusú csatornával (nJFET)



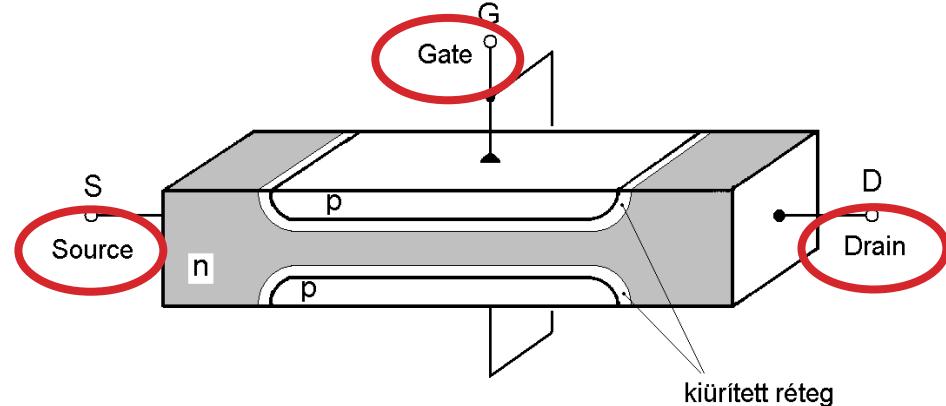
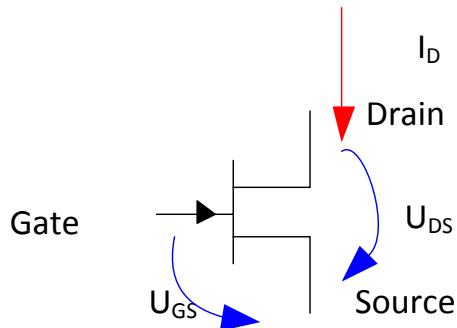
Záróréteges FET p típusú csatornával (pJFET)



- A source és drain elektródák közötti többségi töltéshordozó áramot a **gate elektródára kapcsolt feszültséggel** tudjuk változtatni azáltal, hogy változtatjuk a záróirányba előfeszített pn átmenet feszültségét.

- A két elektróda közötti tartományt csatornának hívjuk.
- Ha a zárófeszültség nagyobb, a kiürített réteg szélesebb, és lecsökken a két elektróda közötti csatorna, azaz az áramvezetésre használható tartomány kereszmetszete.
- Ha a zárófeszültséget csökkentjük, a kiürített réteg szélessége is csökken, a csatorna szélessége, azaz áramvezetés kereszmetszete megnövekszik.
- Nagy zárófeszültség a kiürített réteg teljes szélességében elzárja a csatornát.
- Ez az ún. elzáródási feszültség, V_P

A JFET



► Az egyes kivezetések elnevezései

- Source, forrás elektróda – innen indulnak el a töltéshordozók a
- Drain, nyelő elektróda felé
- Gate, „kapu” elektróda szolgál a vezérlésre.

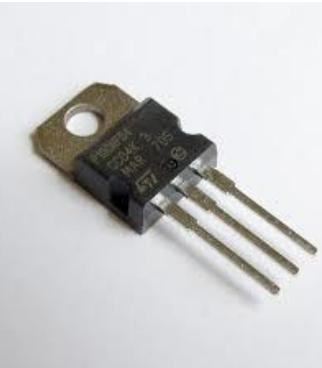
► Az eszköz n és p csatornás kivitelben is elkészíthető, hasonlóan az npn/pnp tranzisztorokhoz..

► A szokásos működési tartományban n csatornás esetben

- $U_{DS} > 0$, (ha negatív lenne, a drain és a source szerepe megfordul, ezért unipoláris az eszköz!)
- $U_{GS} < 0$ (a pn átmenet záróirányban van.)

► Karakterisztikája hasonlít a MOS tranzisztorra, jó közelítéssel négyzetes.

Teljesítmény MOS HEXFET

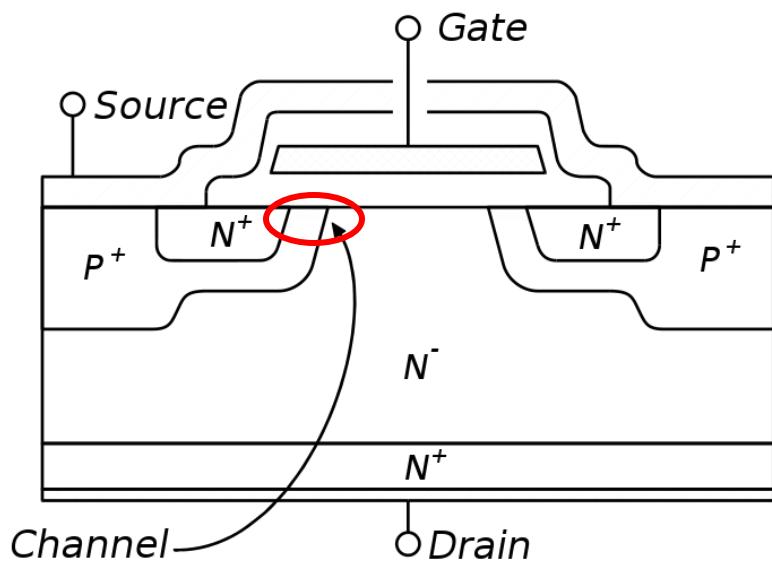


► Teljesítmény MOSFET

- Nagy áramok gyors (több 100kHz-es) kapcsolásához
 - (miért nem jó a bipoláris tranzisztor?)
 - Árammal kell bekapcsolni, a bázisáram nagy áramokon, telítésben a kollektoráram kb. 20-ad része. Azaz 100A-t, 5A-el kellene kapcsolni.
- Teljesítmény elektronika – tíz-száz ampernyi áramok kapcsolásához
 - DC/DC átalakító (tápegységek) , inverter (DC -> AC)
- De pl. egy 72W-os processzorba 112A folyik be.
 - Forrás: <http://www.intel.com/content/www/us/en/processors/core/3rd-gen-core-desktop-vol-1-datasheet.html>, 82. oldal.
- Sok, párhuzamosan kapcsolt kis tranzisztor struktúrát alkalmaznak, viszonylag nagy chipeken
- A MOS felépítése más, nagy áramok szállítására optimalizált.
- Tokozás: nagy hűtőfelületek, hűtőbordára csavarozható tokok.
- Működés szempontjából ugyanolyan MOS tranzisztor.
 - Ha $V_{GS} < V_T$, akkor a tranzisztor nem vezet.
 - Ha $V_{GS} > V_T$, a tranzisztor vezet, és leegyszerűbben egy bekapcsolási ellenállással jellemezzük. Nagyságrendileg néhány mΩ.

Hexfet felépítése

Forrás: IR, Application Note AN-1005



Forrás: Wikipedia

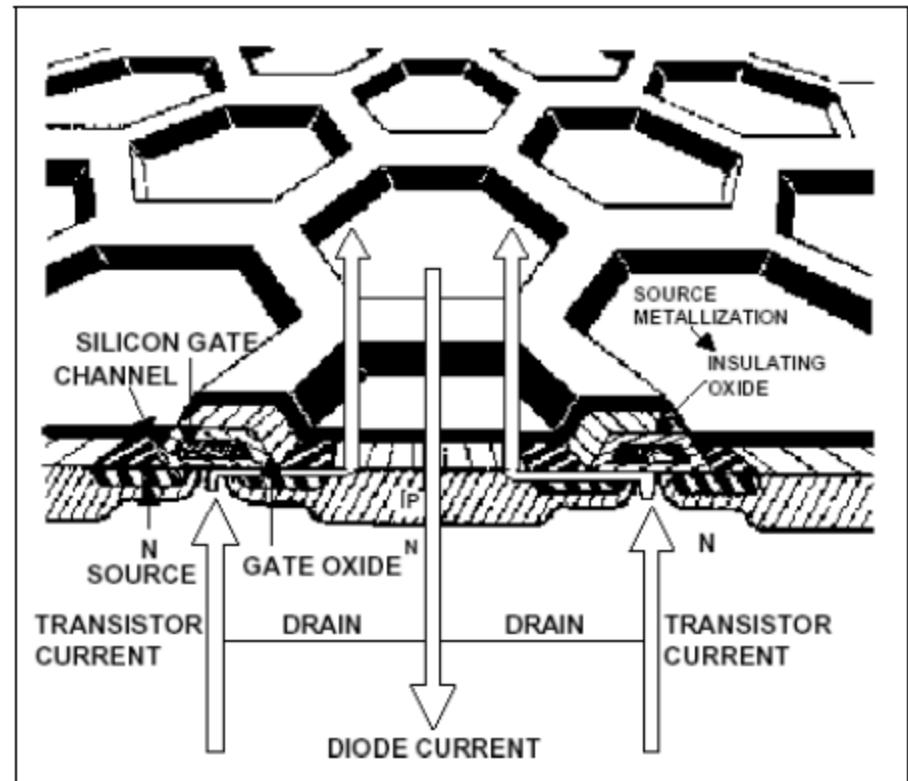


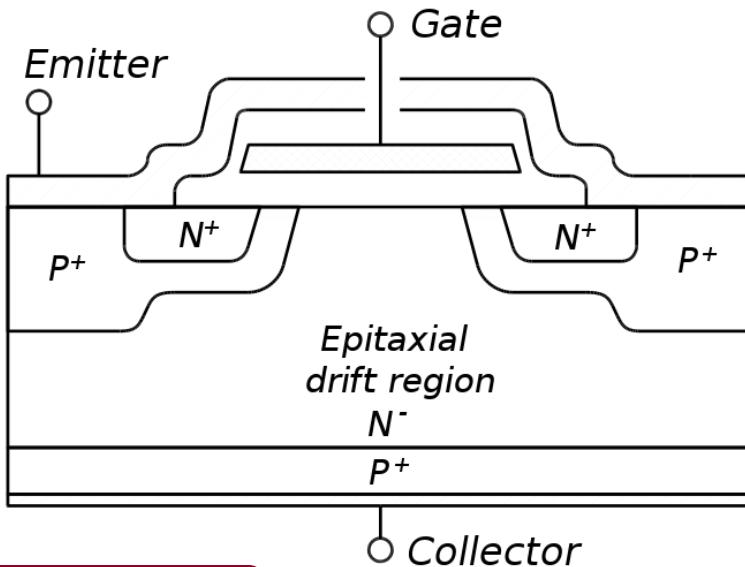
Figure 9: Basic HEXFET Structure

- ▶ Trükkösebb a felépítés, az alapszelet a drain kontaktus.
- ▶ A hatszögletű fémezés a source áramát szállítja.
- ▶ A csatorna a bekrikázott részen alakul ki.

IGBT

► Insulated gate bipolar transistor

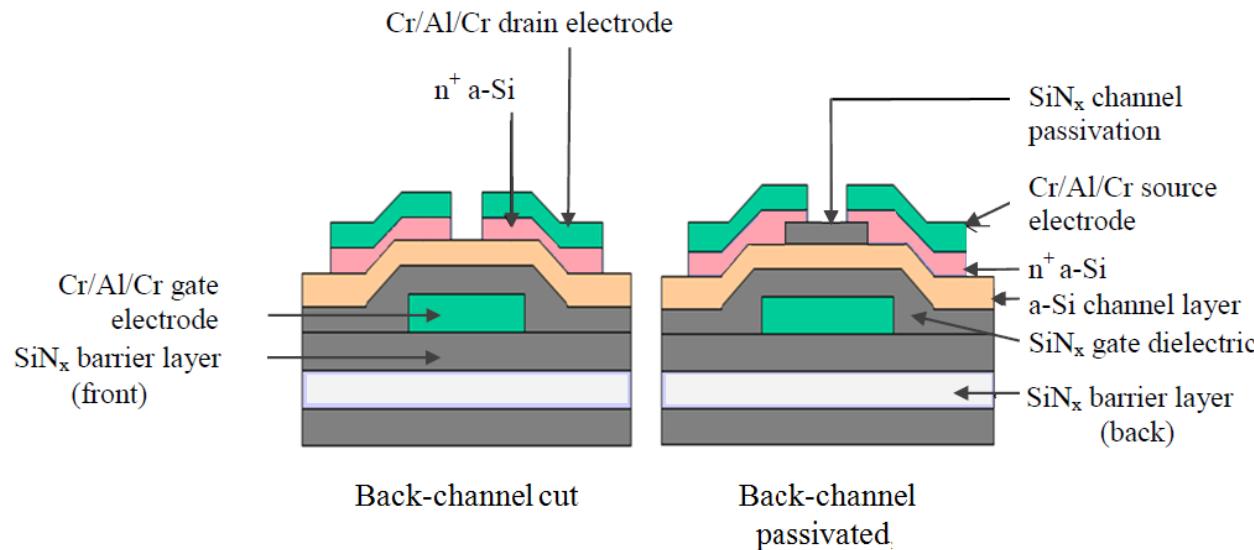
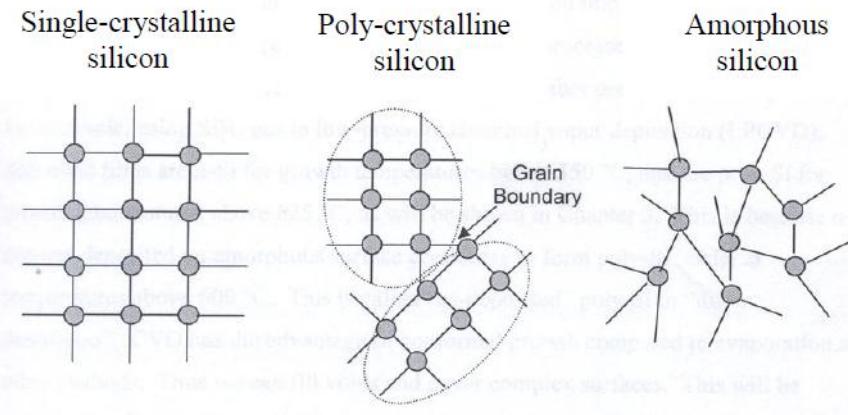
- Szintén a teljesítményelektronika eleme
- Nagy áramok, 100A-1000A, modulokban, kV-os feszültségek
- Elektromos autók, mozdonyok stb.
- Valójában a teljesítmény MOS tranzisztor van kiegészítve egy bipoláris tranzisztorral.
- Előny: a kimeneti karakterisztika hasonlít egy bip. tranzisztorra
 - A maradékfeszültséggel viszont az áram exponenciálisan növekszik
 - Nagy áramok esetén már kedvezőbb.

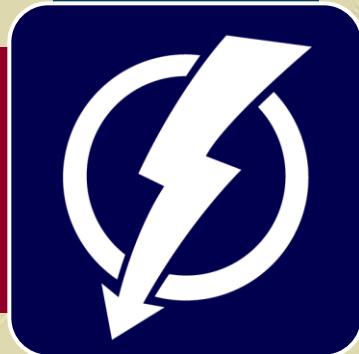


Forrás: Wikipedia

Thin-film transistor

- ▶ Vékonyréteg tranzisztor
- ▶ LCD-ben, a folyadékkristály cellák ki/be kapcsolására
- ▶ Teljesen átlátszó
- ▶ MOS tranzisztor
 - Amorf vagy polikristályos szilíciumot használnak, üveg, vagy műanyag hordozón
 - minden réteg nagyon vékony, ezért átlátszó



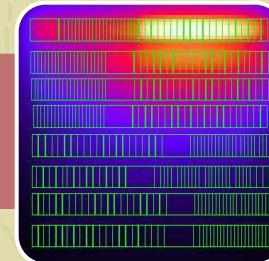
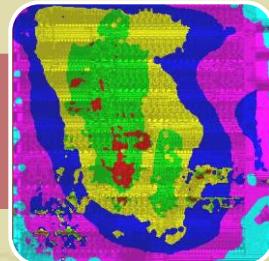
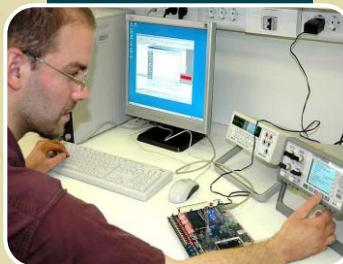


Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi
Egyetem

Elektronikus Eszközök Tanszéke



Integrált áramkörök



A mikroelektronika

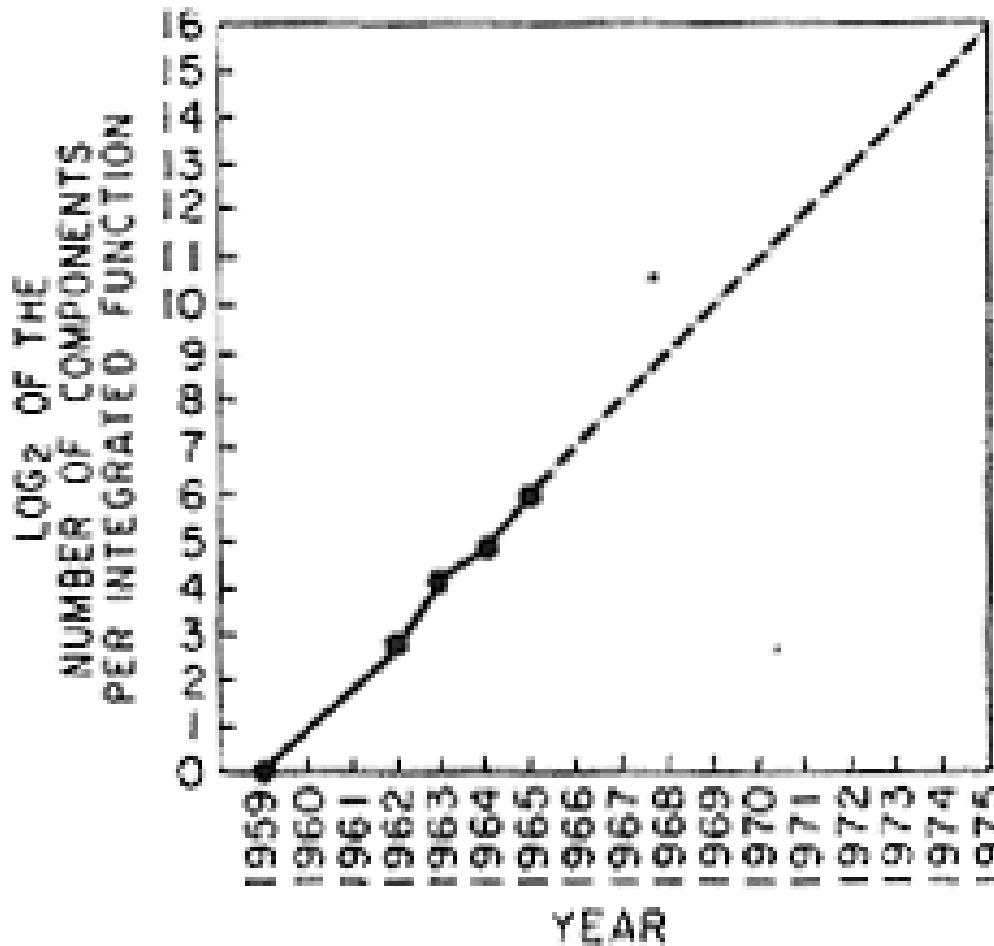
Az egyik leggyorsabban fejlődő iparág

Moore törvény

- ▶ 1965-ben Gordon Moore megjósolta, hogy az egy lapkára integrálható tranzisztorok száma 14..18 havonta megduplázódik (exponenciális növekedés)
- ▶ **A jóslat továbbra is helytálló**
- ▶ Az 1 millió tranzisztor/lapka határt az iparág a 80-as években törte át
 - 2300 tranzisztor, 1 MHz-es órajel frekvencia (Intel 4004) - 1971
 - 42 millió tranzisztor, 2 GHz-es órajel frekvencia (Intel P4) - 2001
 - **2,6 milliárd tranzisztor, 10 mag, 30MB L3 – 2012 április, XEON Westmere-EX**
 - **6,8 milliárd tranzisztor: Xilinx Virtex 7 FPGA**
 - **RADEON HD7990 „New Zealand” (GPU) 2×4,3milliárd tranzisztor**
 - **More than Moore**: elemsűrűség erőteljesebb fokozása, pl. 3D kialakítással

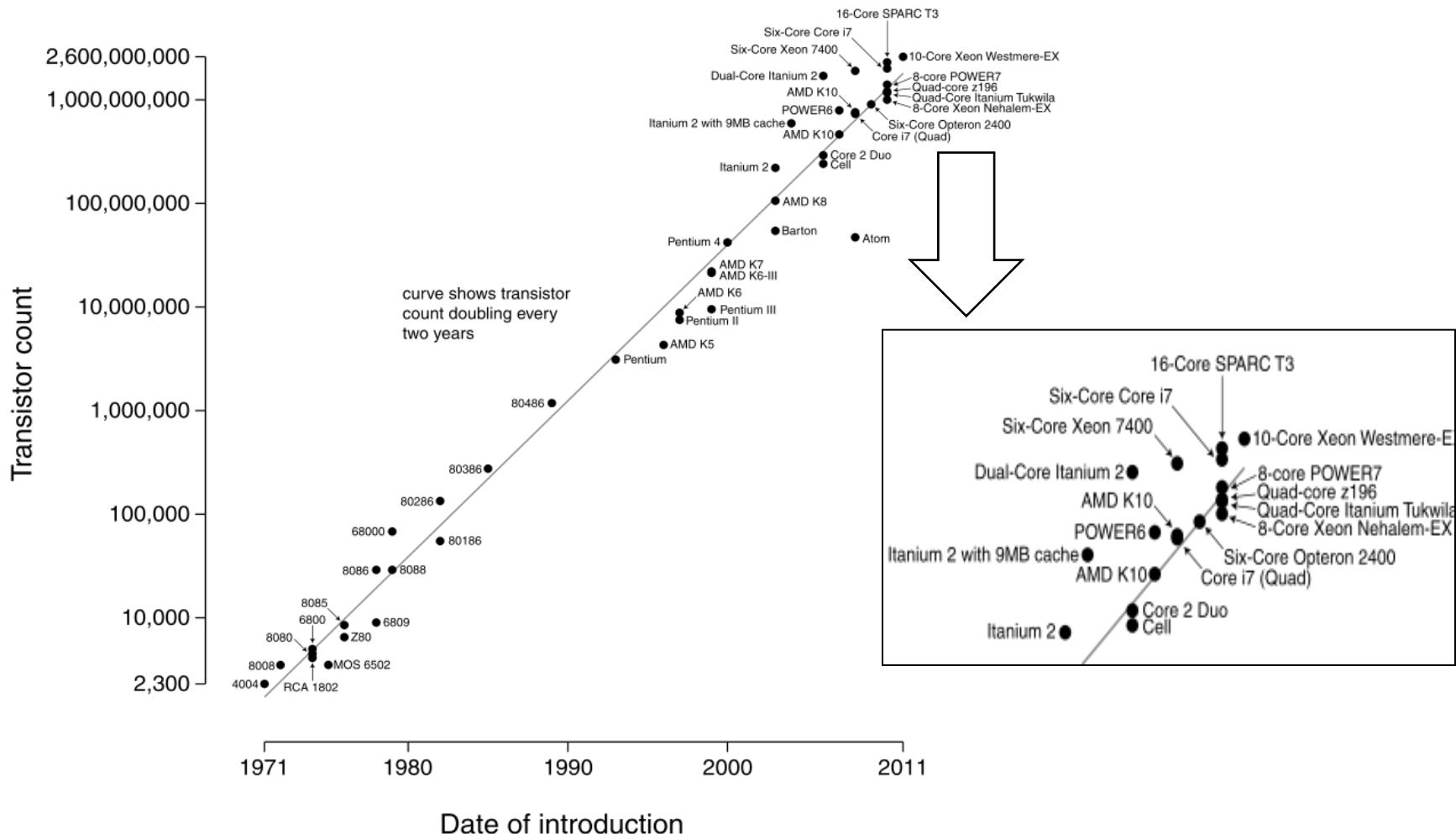
MOORE eredeti cikkének ábrája

► A „merész” becslés talán nem túlzás...



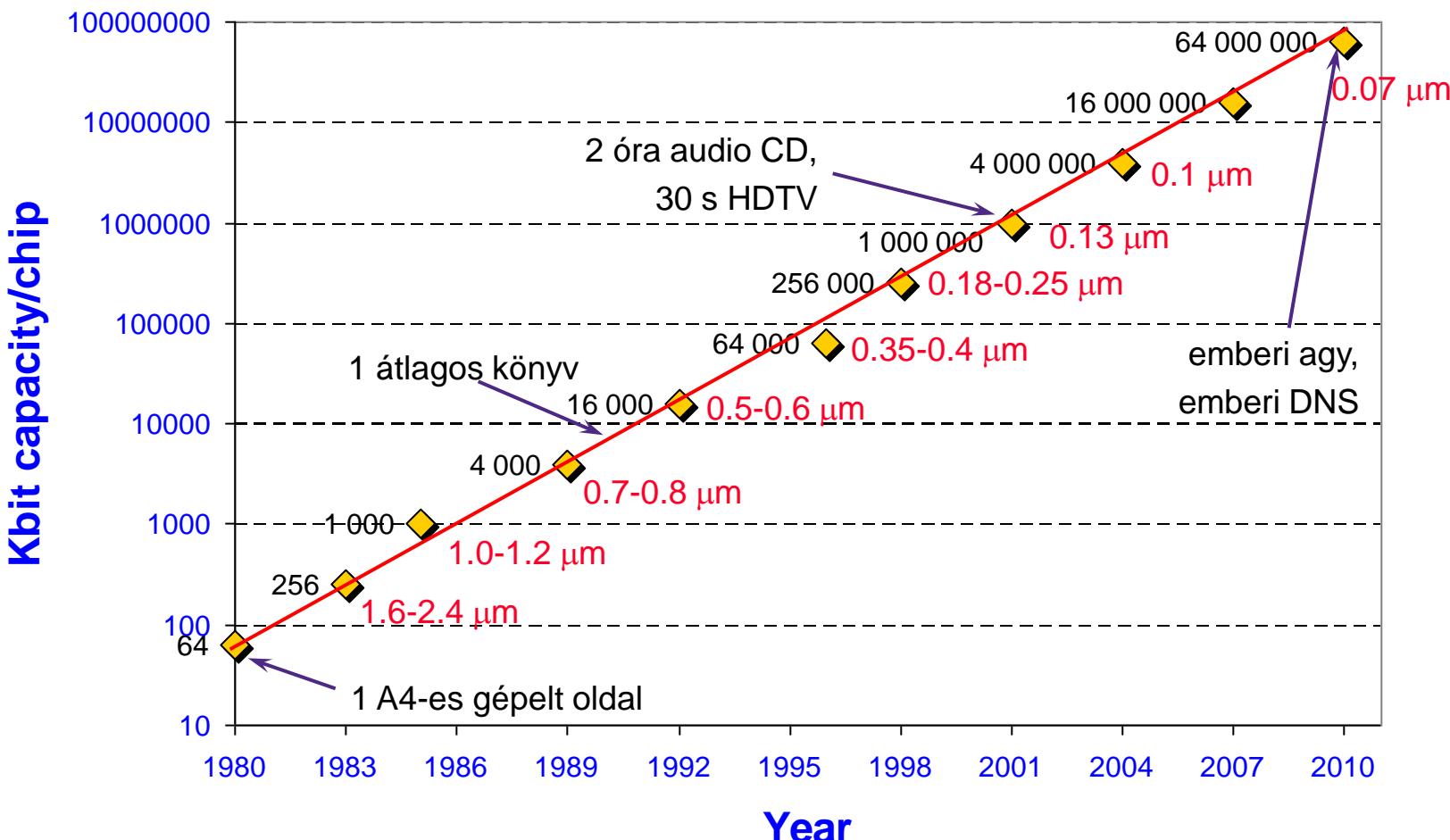
A mikroprocesszorok fejlődése

Microprocessor Transistor Counts 1971-2011 & Moore's Law



A DRAM kapacitás fejlődése

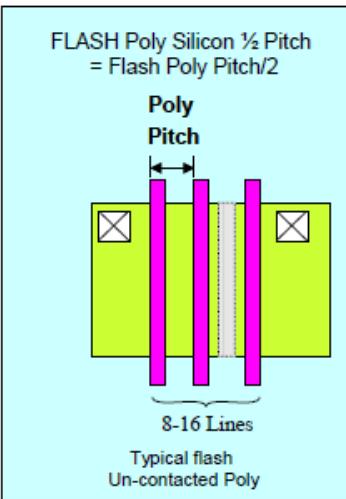
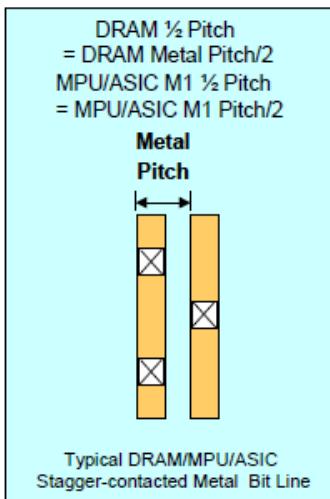
Három évente négyszeres növekedés:



A technológia trendjei: ITRS roadmap

Vezető ipari szakértők által **folyamatosan frissített** előrejelzések a mikroelektronikai technológiák (IC gyártás) várható fejlődési irányairól.

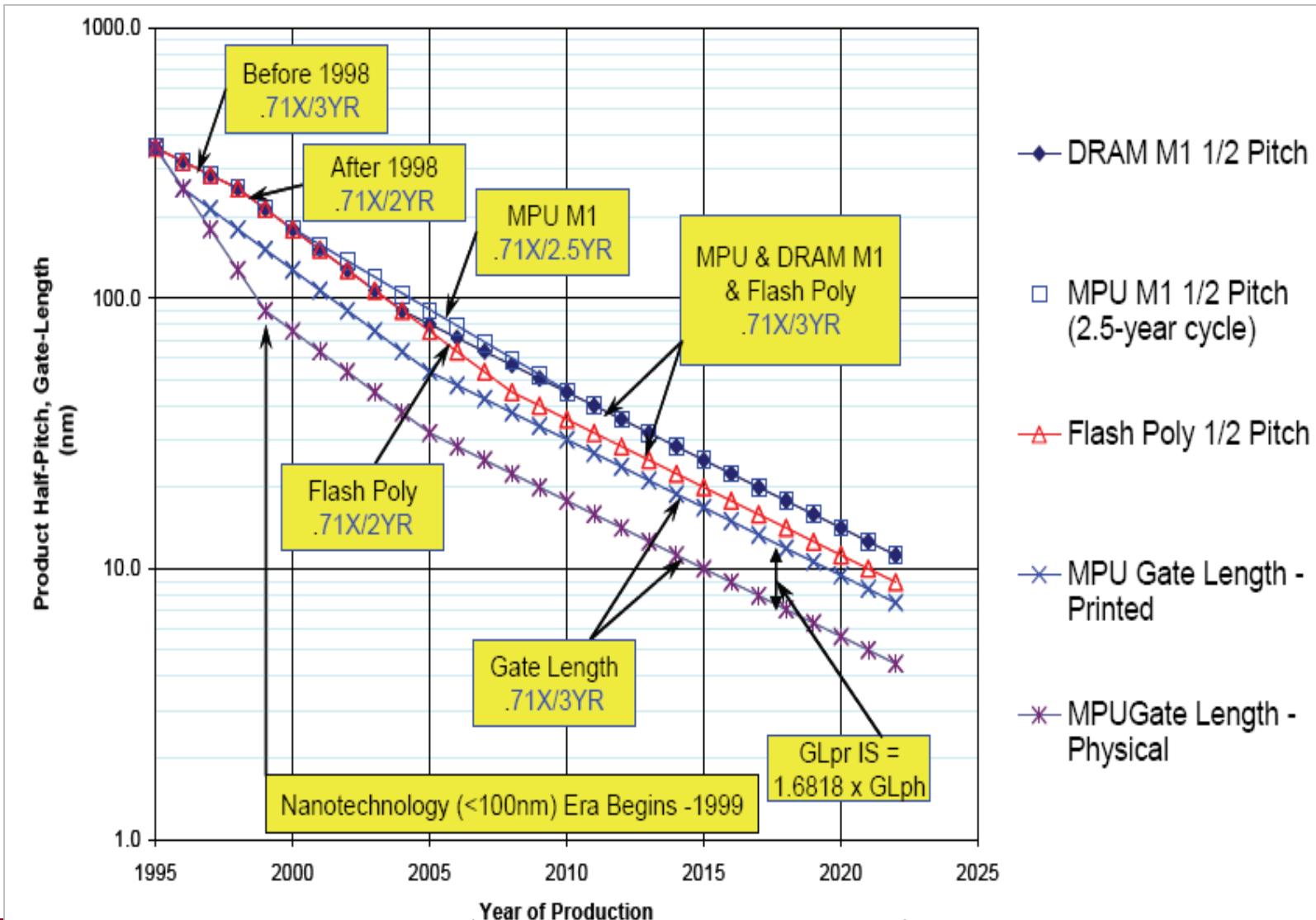
Year of Production	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Flash ½ Pitch (nm) (un-contacted Poly)	22	20	18	17	15	14	13
DRAM ½ Pitch (nm) (contacted)	36	32	28	25	23	20	17.9
MPU/ASIC Metal 1 (M1) ½ Pitch (nm)	38	32	27	24	21	19	17
MPU Printed Gate Length (nm)	35	31	28	25	22	20	18
MPU Physical Gate Length (nm)	24	22	20	18	17	15	14



ITRS = International Technology Roadmap
for Semiconductors

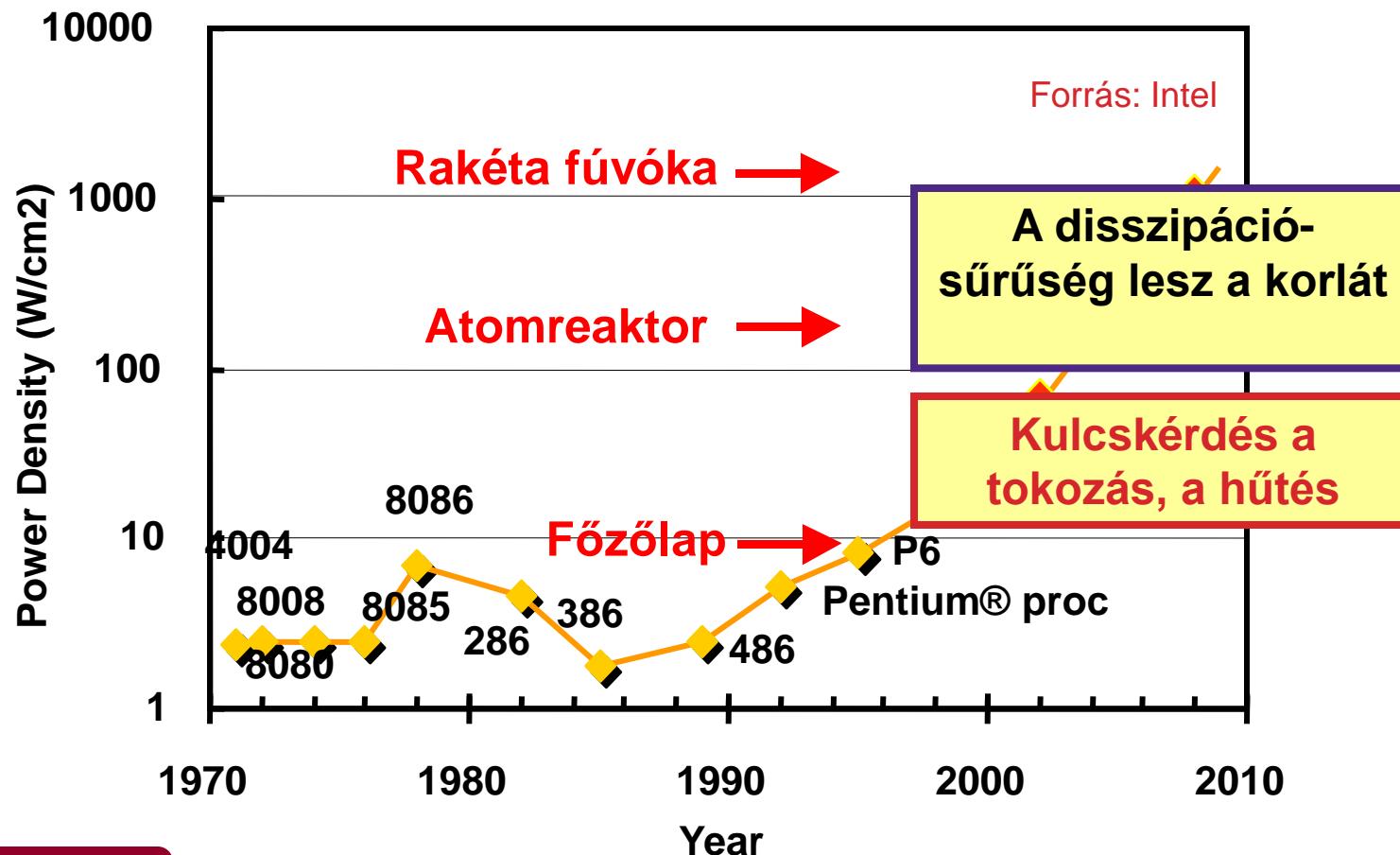
<http://www.itrs.net/reports.html>
(2011. decembéri adatok, a
2012-es decembertől kerül
nyilvánosságra)

A méretcsökkenés becsült üteme 1.



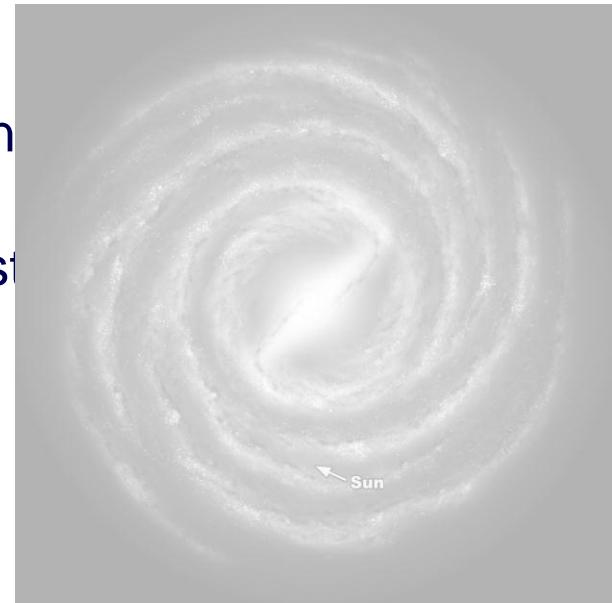
Növekvő disszipációsűrűség

A fogyasztás erőteljesebben nő, mint a lapkaméret, ezért a teljesítménysűrűség meredeken nő:



Miért is gond az energia?

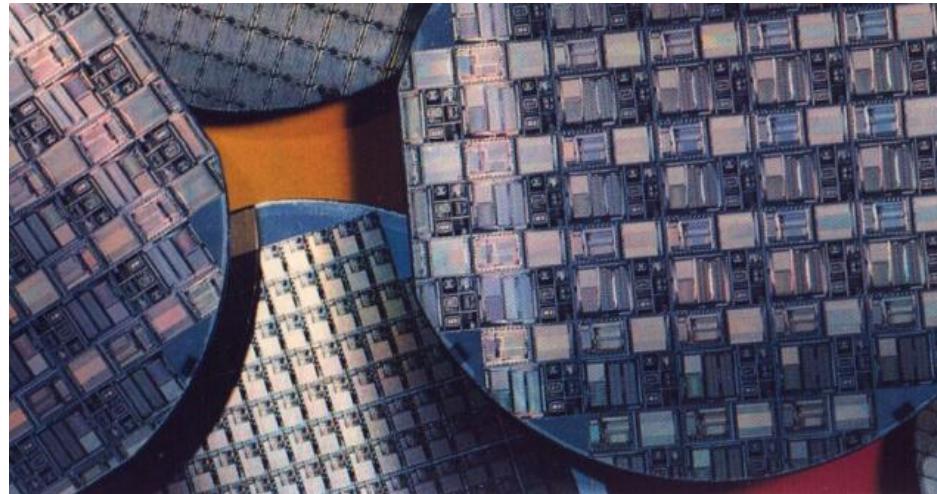
- ▶ A Tejúrendszer összes energiája:
 - 10^{59} J (a Tejúrendszer tömegéből számítható)
- ▶ A minimális kapcsolási energia
 - 1db elektron, 100mV logikai szint távolság
 - $1,6 \cdot 10^{-20}$ J
- ▶ A Tejúrendszer összes energiájával összesen
 - $6 \cdot 10^{78}$ kapcsolás
- ▶ 1 milliárd, másodpercenként 100millió utasítás végrehajtó számítógép egy év alatt
 - (azaz minden 6. ember rendelkezik egy 100MIPS-es számítógéppel)
 - $3 \cdot 10^{24}$ utasítás hajt végre
- ▶ Ha Moore törvénye tovább tart
 - Az elkövetkező 180 évre van csak energia!



VLSI áramkörök gyártástechnológiája

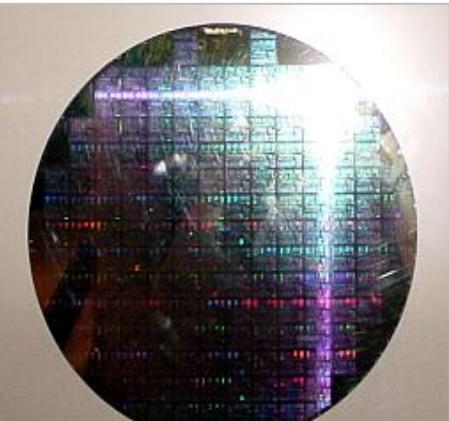
A planár technológia

- ▶ A planár szó arra utal, hogy az integrált áramkörök gyártása síkbeli elrendezésben történik. A gyártás „síkja” a félvezető szelet (wafer) felülete.
- ▶ Kiindulási alap: a rudakban készülő szilícium egykristály
2-12" átmérőjű, 0,25-0,7 milliméter vastag szeletek
- ▶ Egy szeleten több ezer IC (chip vagy die) készül egyszerre



Megmunkált félvezető szeletek darabolás előtt

Si egykristály: rúd, szeletek ma: 12"



8" szelet Intel
Pentium
processzorokkal,
Intel Múzeum



~2007



Megmunkált Si szelet

A megmunkálás során a szeletek csoportosan járják végig a technológia lépésein, egy ilyen csoport neve: **party**



Az ábrán egy party-nak a diffúziós kályhába történő behelyezése látható.



A félvezető gyártás különösen nagy tisztasági igényű. A technológiai lépések ún. **tisztaszobákban** (tisztatérben) történnek.

Félvezetőgyártás

A félvezetőgyártás során

- ▶ adalékolási
- ▶ rétegfelviteli vagy rétegépítési
- ▶ és szelektív rétegeltávolítási, azaz
- ▶ litográfiai

műveletek váltják egymást.



Adalékolási műveletek

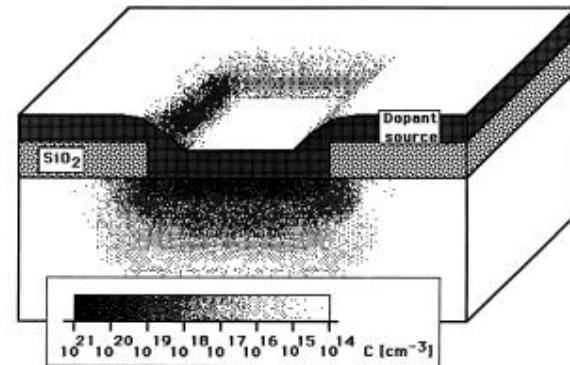
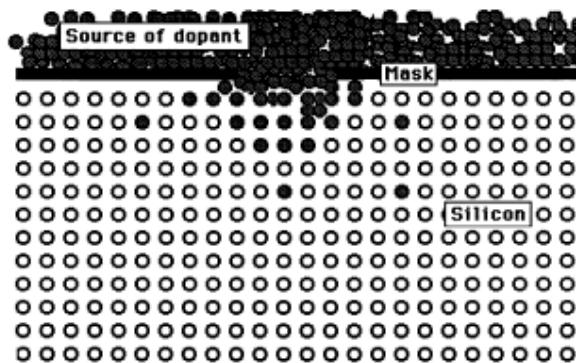
► Adalékolás: a felület bizonyos helyein a félvezető vezetési típusának megváltoztatása.

- Feladata: megfelelő mennyiségű adalékatomot bejuttatni a kristályba, és ún. elektromos szempontból aktiválni. (Ezeknek az atomoknak kell épülniük a kristályrácsba, különben nem járulnak hozzá a vezetési tulajdonságok megváltoztatásához.)
- Adalékolással készül minden pn átmenet, azaz
 - A dióda
 - A bipoláris tranzisztor bázisa és emittere
 - A MOS tranzisztor source és drain elektródája

► Módjai:

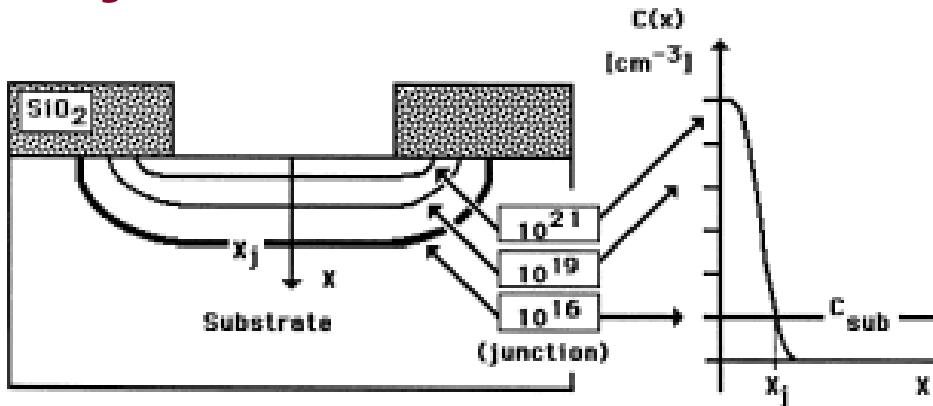
- Diffúzió
- Ionimplantáció

Diffúzió



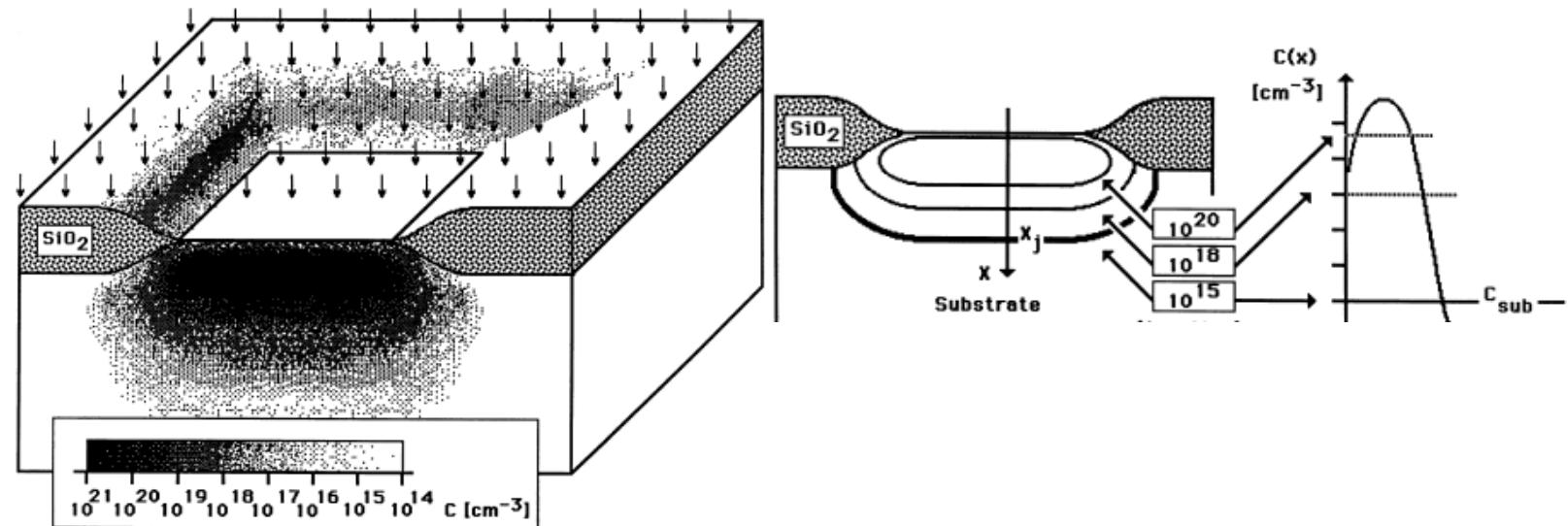
- ▶ **Szilárdtest diffúzió:** a felületre felvitt, vagy a felület környéki atmoszférában található adalék atomok diffundálnak a szilícium kristályba.
- ▶ A Si atom és az adalék atom helyet cserél, a folyamat hajtóereje a pedig koncentráció-különbség.
- ▶ Magas hőmérséklet, kb. 1000 °C szükséges a gyors diffúzióhoz.
- ▶ A szelektivitás biztosítása:
 - A felülete azokon a helyeken, ahol nem szeretnének adalékolást, SiO₂-al fedik, míg az adalékolni szándékolt tartomány „fedetlen”
 - Azaz a SiO₂ maszkol a diffúzióval szemben.

A diffúzió folyamata



- ▶ A felületi rétegek adalékoltsága erősebb.
 - ez minden diffúzióra igaz nyilvánvalóan.
 - A felülettől növekvő távolságra kb. exponenciálisan csökken az adalék koncentráció.
- ▶ Az adalékolás oldalirányban is terjed. (valójában az egyes kristálytani irányokban a diffúzió nem egyforma sebességű)
 - Emiatt a kialakított réteg szélessége nem egyezik meg a maszk szélességével.
- ▶ A kialakított réteg koncentráció eloszlása az ún. adalékprofil.
 - Az eszköz működése ennek lesz függvénye.
 - Kulcskérdés és igen nehéz technológiai feladat a művelet reprodukálhatósága.

Ionimplantáció



► Gyorsított ionok belövése az anyagba

- Szobahőmérsékletű művelet.
- Az ionok mennyisége és átlagos behatolási mélysége könnyen szabályozható.
- Az oldalirányú terjedés kevésbé jelentős, mint diffúzió esetén.
- Egy vékonyabb felületi réteg „kereszül lőhető”.
- Károsodik a kristályszerkezet.
 - A nagyenergiájú ionok ütköznek a kristály atomjaival, kilökhetik a kristályrácsból stb.
- Az újrakristályosításhoz hőkezelés szükséges

Rétegleválasztási eljárások

► Kémiai vagy fizikai módszerek, amikkel a teljes szelet felületét beborító, összefüggő réteget hoznak létre.

► Oxidáció

A Si felületén a SiO_2 réteg létrehozása oxigén környezetben kb. 1000 °C hőmérséklet hatására. A felületen a SiO_2 réteg tökéletes szigetelő, vegyi anyagokkal szemben szelektíven viselkedik.

A SiO_2 szerepe kettős:

1. gyártástechnológiai (maszkol)
2. elektronikai
 - szigetel a felületi rétegek között (ez az ún. vastag vagy field oxid)
 - MOS tranzisztorokban dielektrikum (vékony oxid)



Epitaxiális rétegnövesztés

► A felületen olyan Si réteg létrehozása, ami az egykristályos szerkezetet folytatja, de pl. kisebb adalékolású. 1200 °C hőmérsékletű művelet.

- A szilícium szeletet magas hőmérsékleten tartják.
- A felület felett gázatmoszférában olyan kémiai reakció zajlik, amelynek eredménye szilícium.
- Megfelelő hőmérséklet és nyomás hatására a szilícium egykristály tovább épül, a lerakodó réteg folytatja az egykristály szerkezetet.
- Nagyon jó minőségű egykristály réteg alakítható ki.

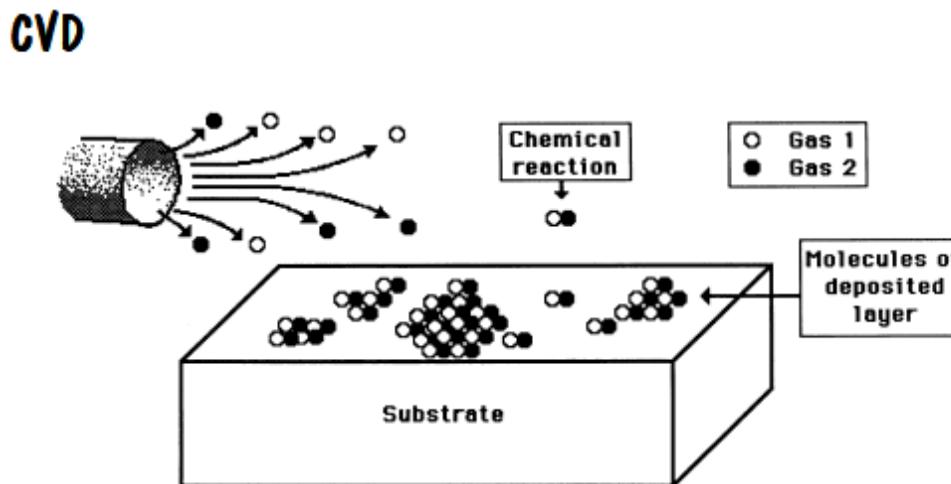
► Molekulasugaras epitaxia (molecular beam epitaxy)

- Az épülő réteg sztöchiometriai összetétele akár atomsorról atomsorra változtatható.
- Olyan rétegösszetételek alakíthatóak ki, amelyeket más technológiával nem lehet előállítani.
- Pl. germánium beépítése
- A nagyon vékony rétegek tulajdonságai nagymértékben eltérnek a tömbi anyag tulajdonságaitól a kvantummechanikai hatások miatt.



Kémiai gőzfázisú leválasztás

- ▶ Chemical Vapor Deposition (CVD)
- ▶ A szelet feletti atmoszférában gáz komponensek kémiai reakciója zajlik, amelynek (egyik) végterméke szilárd anyag
- ▶ A szilárd anyag a felszínre lerakódik, ez a leválasztott réteg.
 - Elsősorban szigetelő és passzíváló rétegek és a poliszilícium (polikristályos, azaz apró egykristályokból álló) leválasztására használt.



Fizikai gőzfázisú leválasztás

► Physical vapor deposition (PVD)

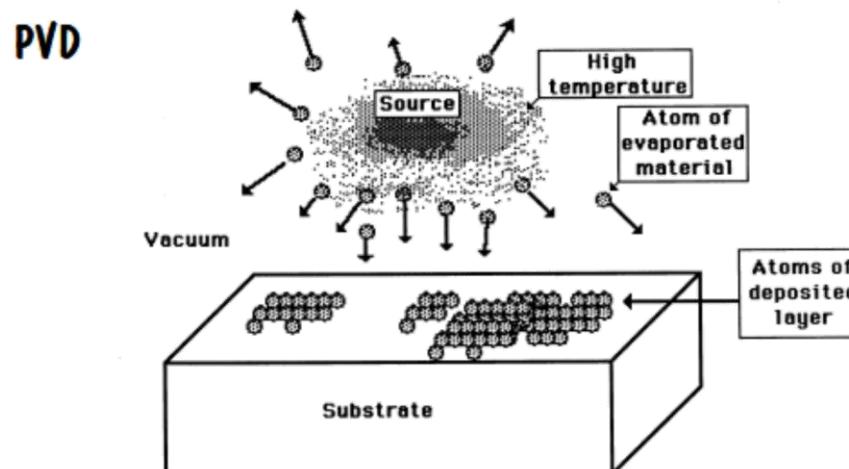
- Elsősorban fémrétegek leválasztására használt.

► Vákuumpárologtatás:

- Vákuumban fémet párologtatnak el magas hőmérsékleten.
- A hűtött hordozóra a fématomok lecsapódnak és réteget hoznak létre.

► Vákuumporlasztás:

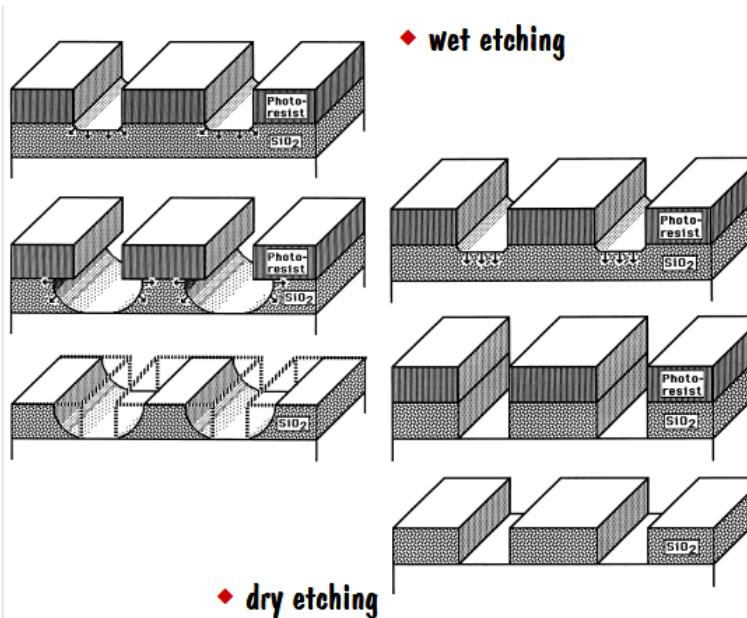
- pl. elektromágneses térrel gyorsított argon ionokkal bombáznak egy fém felületet. Ennek hatására atomok, atomcsoportok szakadnak le. (porlódnak)
- Ezek eljutnak a hordozóra és réteget hoznak létre.



Rétegeltávolítás

► Azaz marás.

- Olyan kémiai vagy fizikai-kémia reakcióval történik, amelyik szelektív. (bizonyos anyagokat mar, más anyagokat nem.)
- Ha sikerül a felületet olyan anyaggal beborítani, ami a marószer nem old, akkor szelektíven el lehet a kívánt helyről a réteget távolítani.
- A mintázat kialakítása a litográfia feladata. (Id. a következő dia.)
- Nedves kémiai marás: folyékony oldószerrel.
- Plazma marás: oldószer atmoszférával.



Litográfia

- ▶ Feladata a szelektív mintázat kialakítása.
- ▶ A felületre ún. fotorezisztet visznek fel.
 - Szerves anyag, megvilágítás hatására bizonyos oldószerekkel szemben az oldhatósága megváltozik, pl. nem oldhatóvá válik.
- ▶ Egy maszkon keresztül (ami a megvalósítandó alakzatok körvonalát tartalmazza) megvilágítják.
- ▶ A rezisztet előhívják, azaz a szelektív oldószerrel a nem megvilágított részt leoldják.
 - Így a felületet a maszk által meghatározott területeken a fotoreziszt fedi.

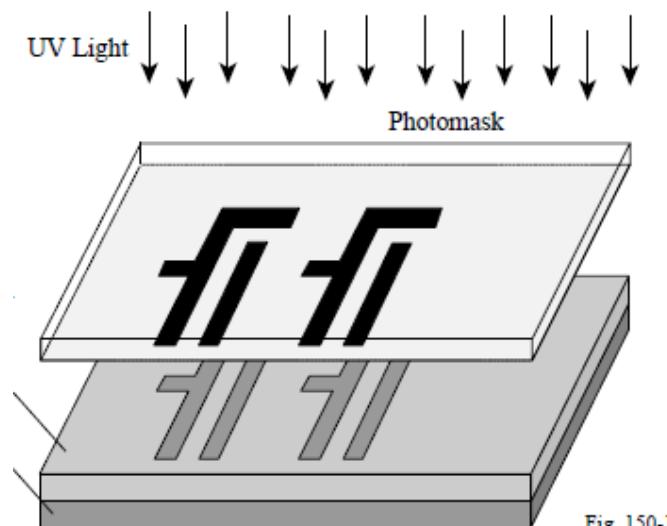


Fig. 150-1

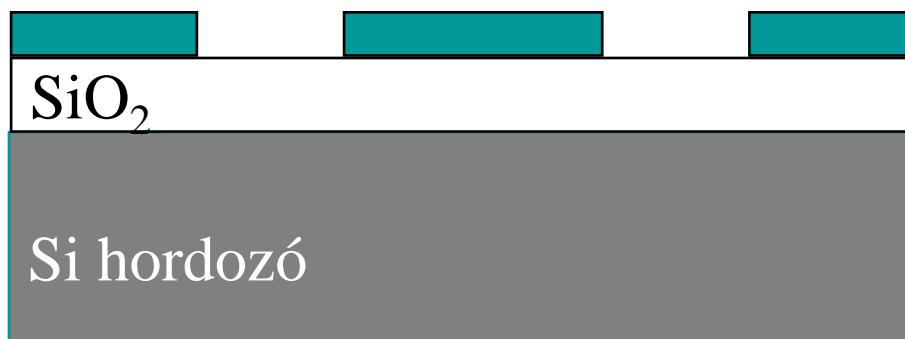
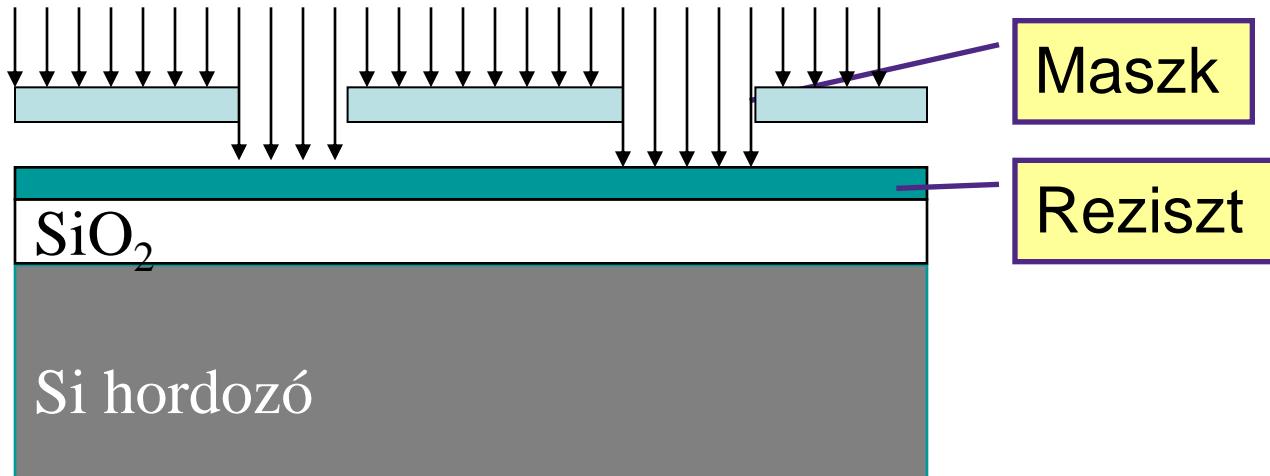
Maszkok

- ▶ minden egyes technológia lépéshoz más és más maszk tartozik.
 - kb. 20-30 maszk is szükséges lehet egy modern integrált áramkör elkészítéséhez.
- ▶ Az integrált áramkör tervezése tulajdonképpen a maszkok megtervezését jelenti.
 - Egy része tervezett, más része logikai műveletekkel a megtervezett alakzatokból kiszámítható.
- ▶ Általában 1 chip rajzolata készül el (ez az ún. reticle) és ezt „fényképezik” a szeleten az összes chip pozícióba.
- ▶ Az integrált áramköri gyártás egyik nagy költségét a maszkok előállítása jelenti.
 - Legalább ugyanolyan, de inkább még jobb technológiával kell előállítani.
- ▶ 32nm technológián egy maszksorozat ára kb. \$1 000 000



Példa litografiára

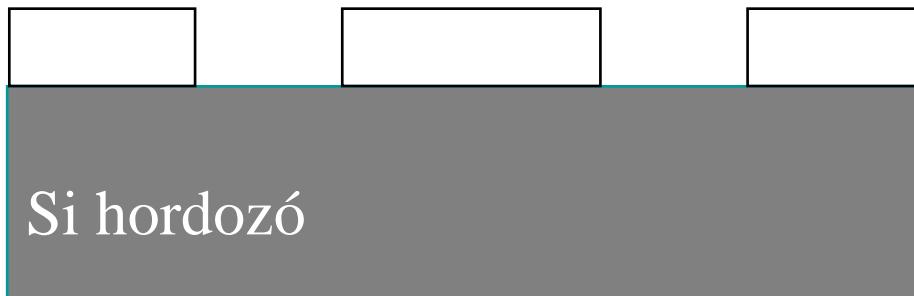
► MOS tranzisztor source ill. drain elektródájának kialakítása



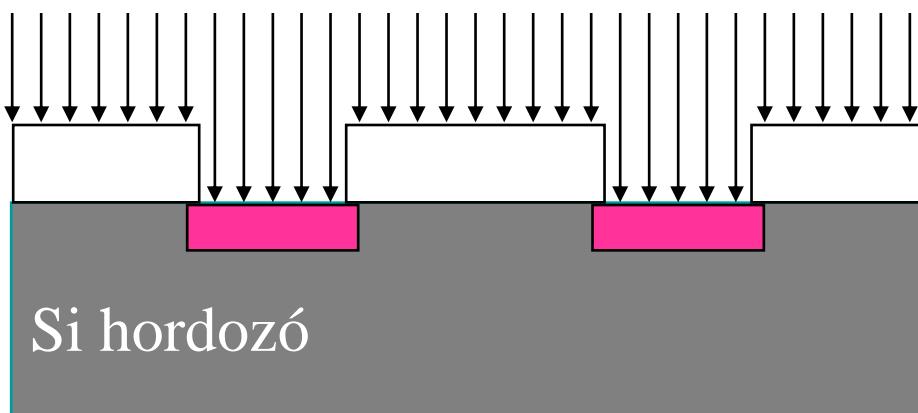
Előhívás után



Oxid marás után:



Tisztítás után



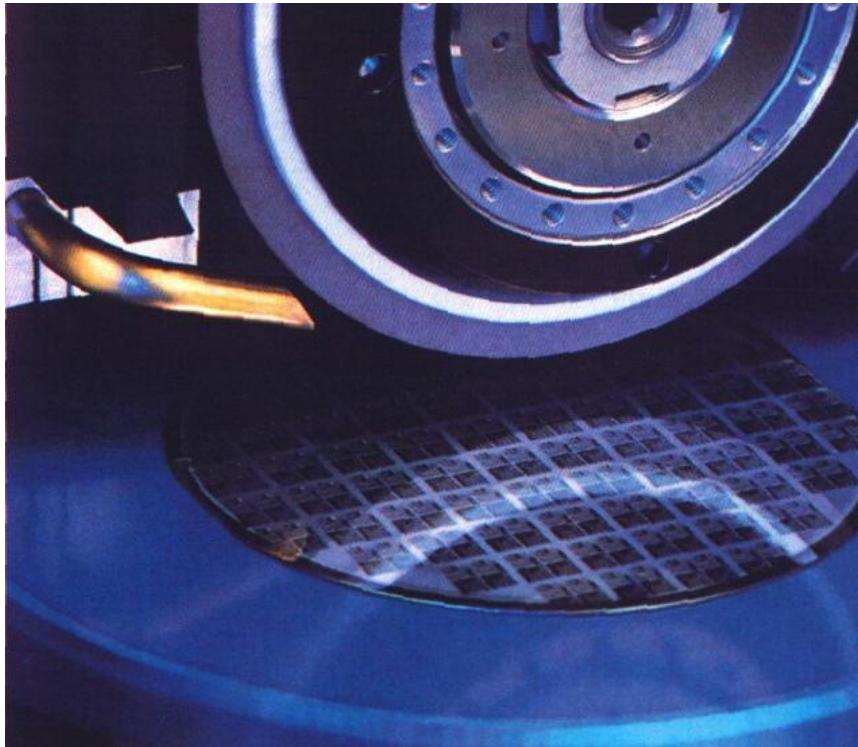
Adalékok (pl.diffúzió)

A SiO_2 -ben kialakított mintázat maszkol a diffúzióval szemben.

Egyedi műveletek

A szeleteken végzett műveletek csoportos műveletek olcsók. Az egyedi műveletek drágák, minimalizálandók. Az ellenőrzési (tesztelési) lépésekkel minél többet célszerű még a szeleten elvégezni, hogy a rossz chipeket ne tokozzák be.

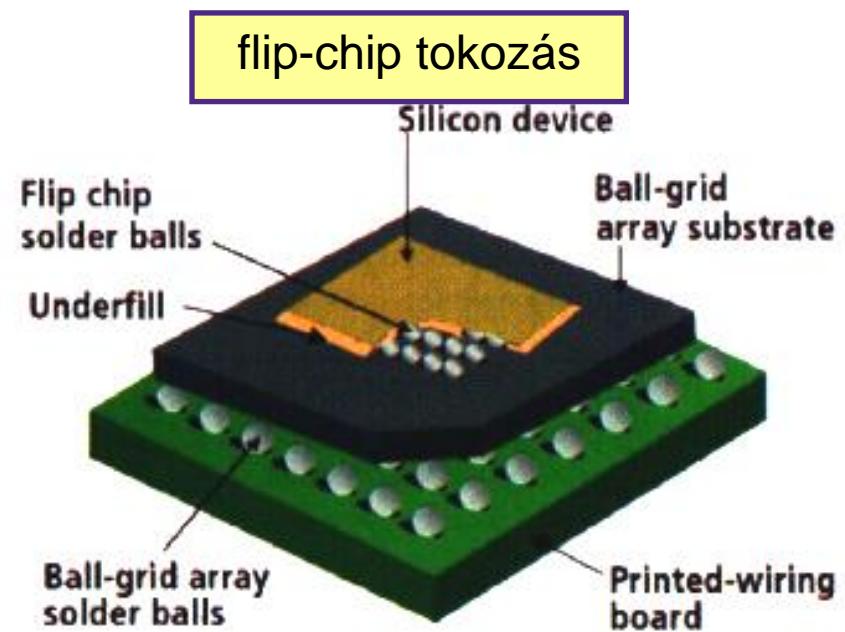
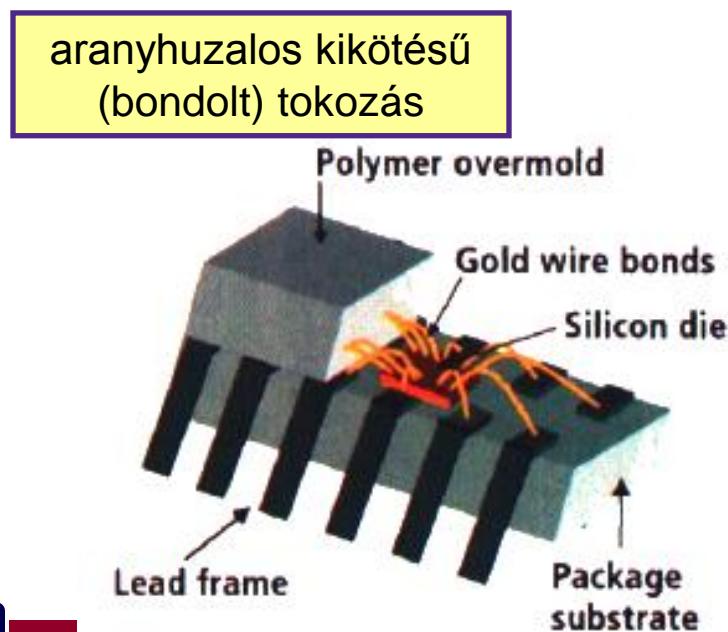
Szeletelés



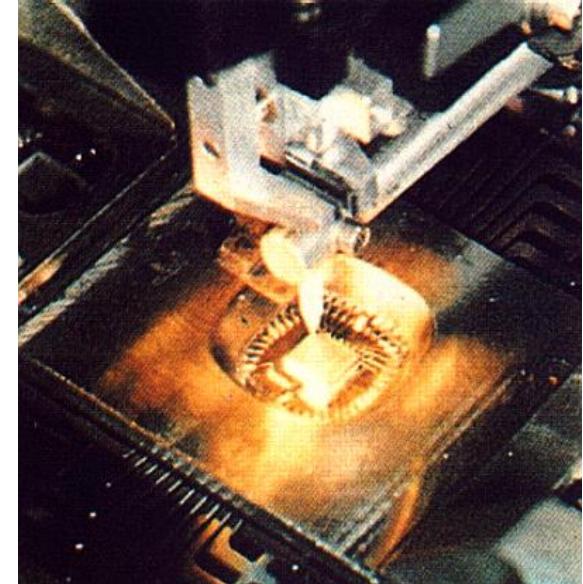
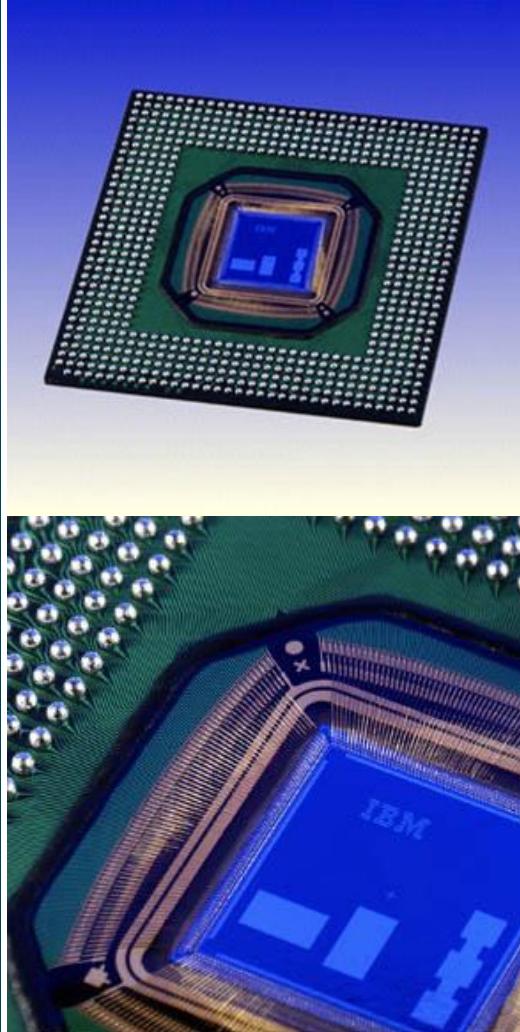
Tokozás

Jellegzetes tokozási módok

- ▶ Aranyhuzalos kikötés (bondolás)
 - A chip kivezetéseit és a tok lábait aranyhuzallal kötik össze.
- ▶ Flip-chip tokozás
 - A tok és a chip megfelelő kivezetéseit forrasztással kötik össze.
 - Hasonlóan, ahogy a felületszerelt nyomtatott huzalozású lemez (PCB) az alkatrészek rögzítése történik.
 - Egy automata forrasz szemcséket adagol, majd hőközlés hatására forrasz megolvad és létrehozza a kötést.



Tokozás – ma nagy kihívás

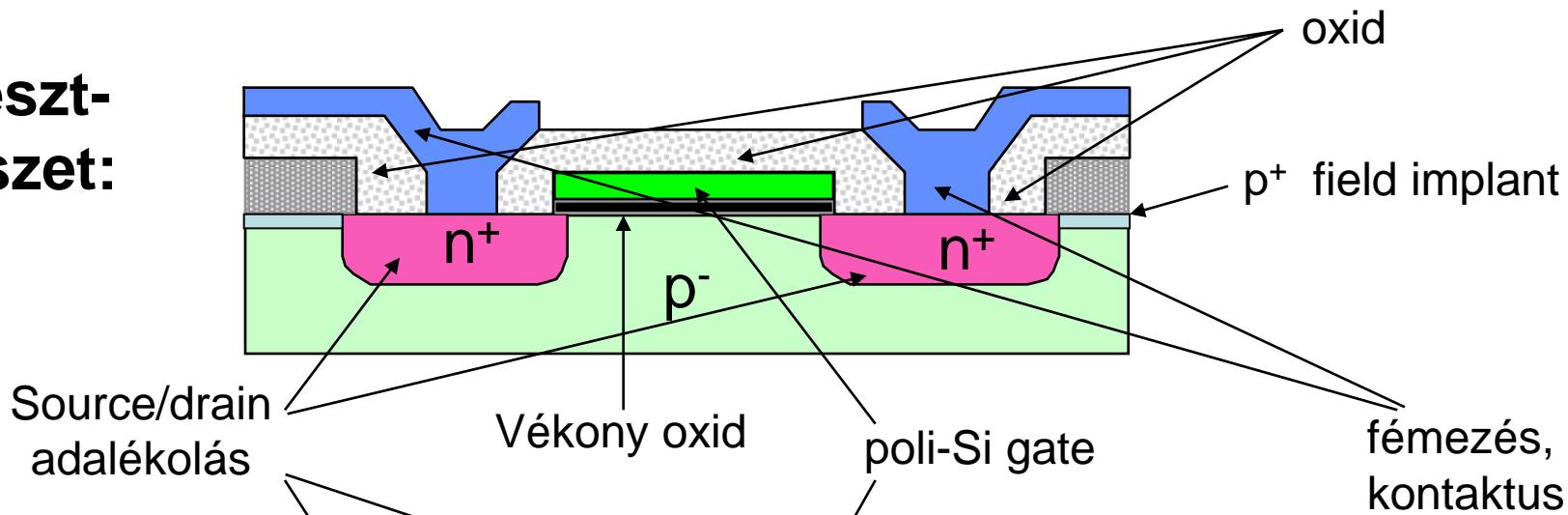


Bondoló automata

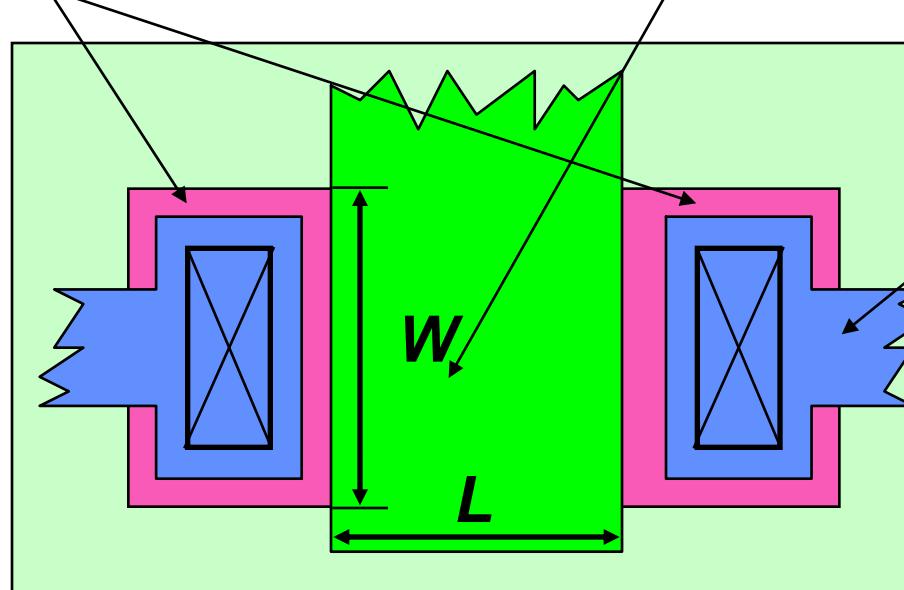
- ▶ A nagy teljesítményfelvétel miatt sok láb kell.
 - Mivel az egyes kivezetések áramterhelhetősége korlátozott.
- ▶ Nagyon finom az osztás.
- ▶ A hőelvezetést meg kell oldani.

MOS IC-k gyártásának lépései (egyszerűsített)

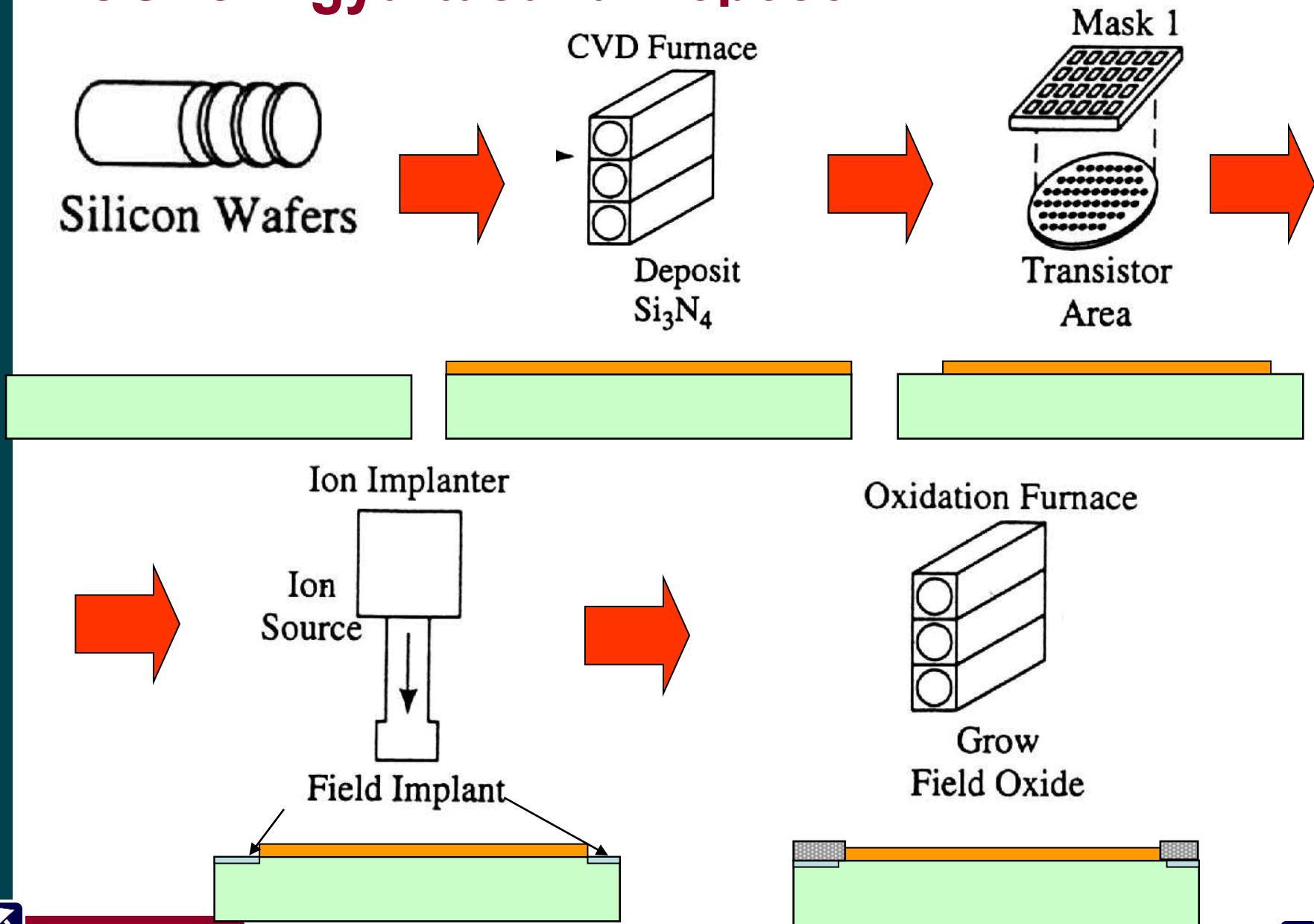
Kereszt-metszet:

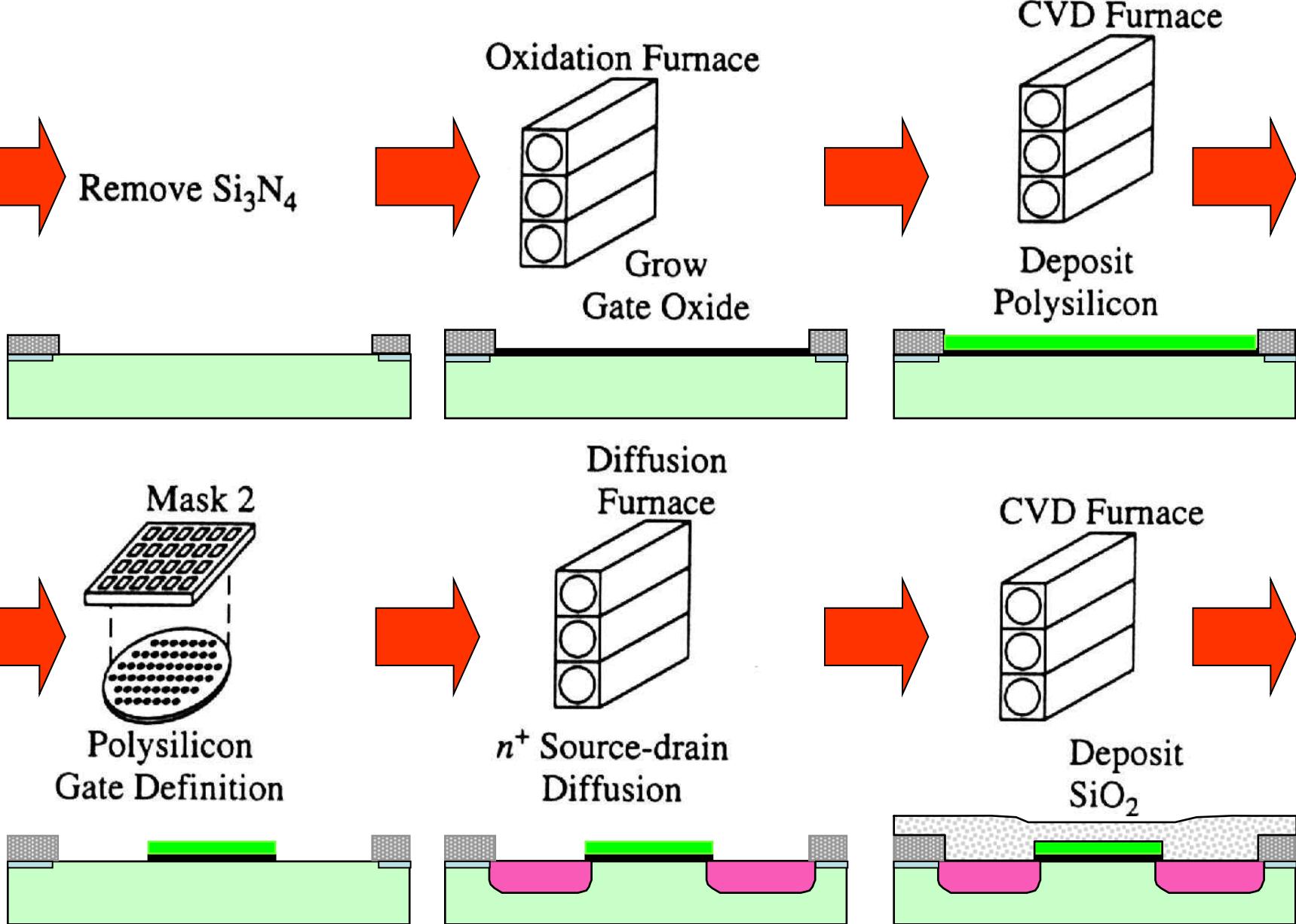


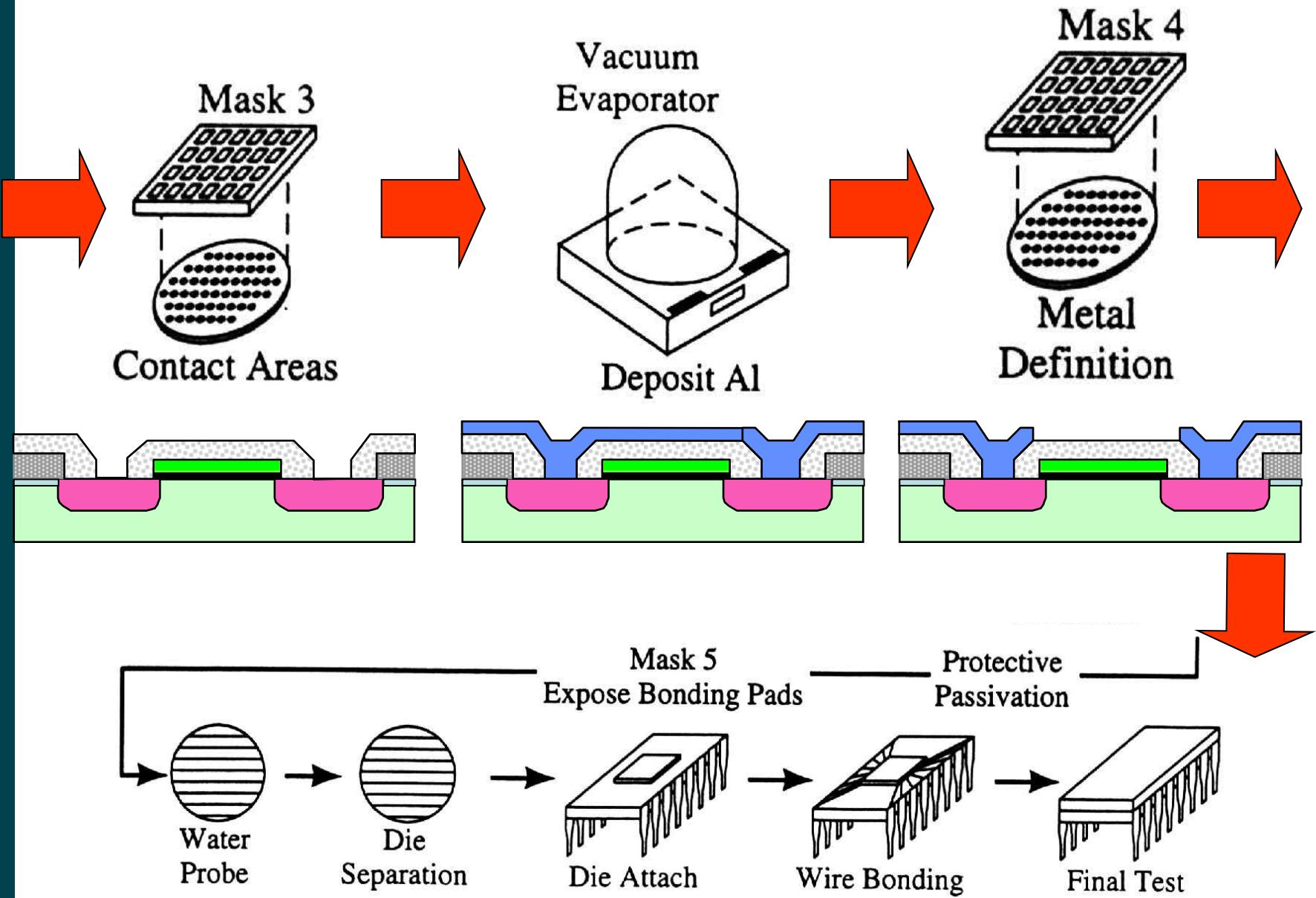
Felület
(layout):

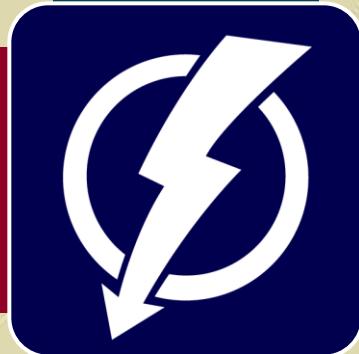


MOS IC-k gyártásának lépései



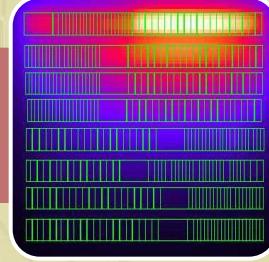
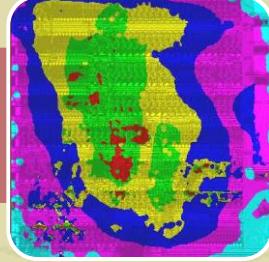
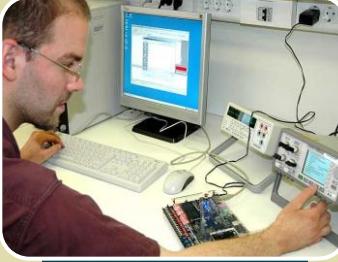
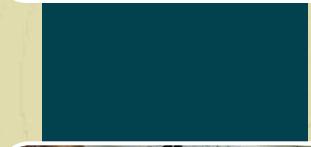






Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi
Egyetem

Elektronikus Eszközök Tanszéke



Digitális alapáramkörök

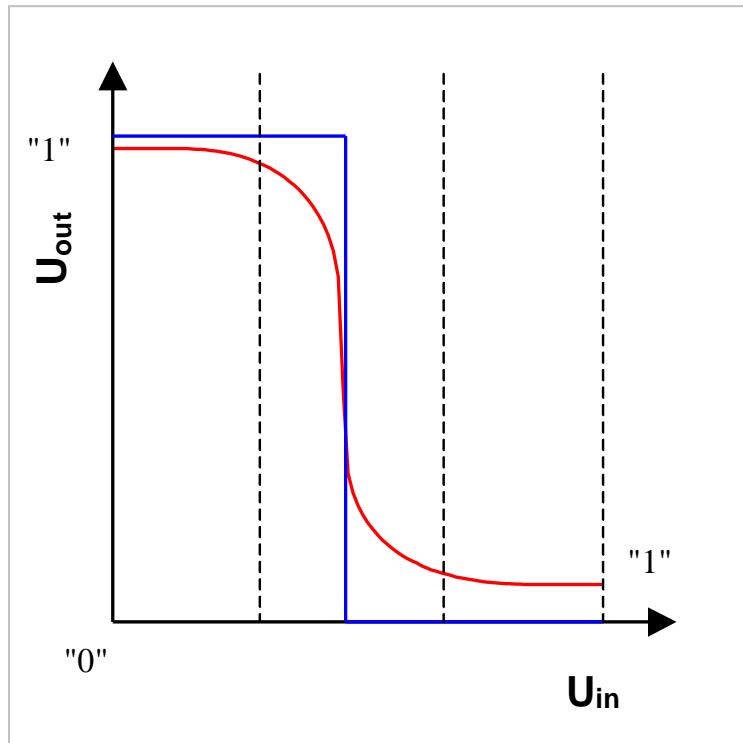
CMOS megoldásokat tárgyalunk ma

- Alapelem az **inverter**
 - A legalapvetőbb logikai elem, az összes többi elem ebből származtatható.
- Alap kapuáramkörök
- Komplex kapuk



Transzfer karakterisztika

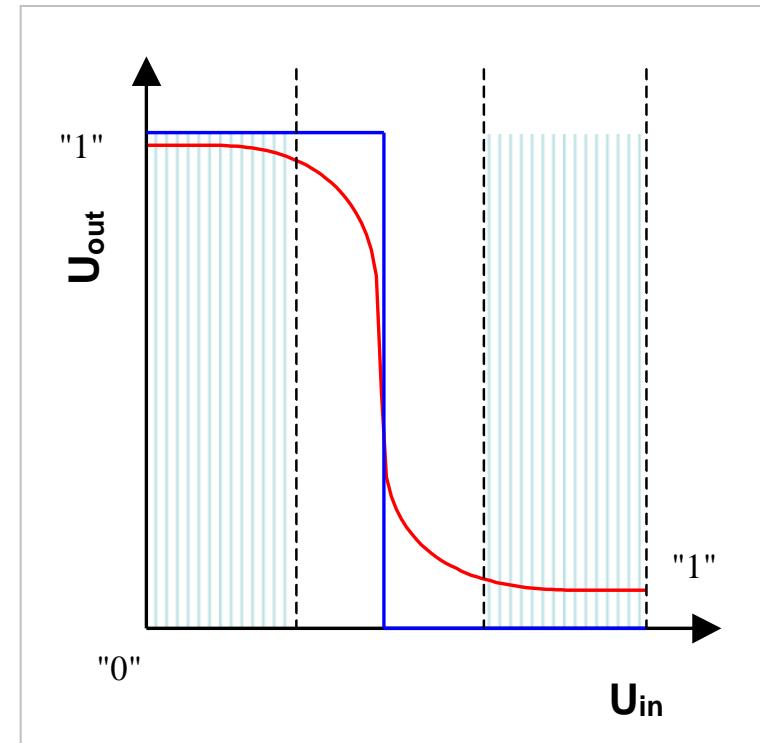
- ▶ A kimeneti jel logikailag a bemeneti jel invertáltja
- ▶ A transzfer karakterisztika az inverter kimeneti feszültsége a bemeneti feszültség függvényében.
- ▶ Azaz a
 - $U_{OUT} = f(U_{IN})$ függvény.
 - Általában a V_{DD} tápfeszültség környékét tekintjük logikai 1-nek.
 - Más néven a HIGH szintnek
 - A 0V környéki feszültség felel meg a logikai nullának
 - Más néven a LOW szint.



ideális és **valós** inverter transzfer karakterisztikája

A karakterisztika következményei: zavarvédelettség

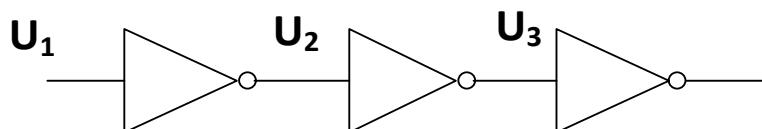
- ▶ Széles U_{in} tartományhoz azonos U_{out} érték tartozik.
- ▶ A karakterisztika három szakaszból áll.
- ▶ A két szélső szakasz laposan fut, azaz a bemeneten lévő feszültségváltozások csak nagyon kis változást okoznak a kimeneten.
- ▶ Ez lehetőséget teremt arra, hogy biztonságos logikai szint tartományokat jelöljünk ki.



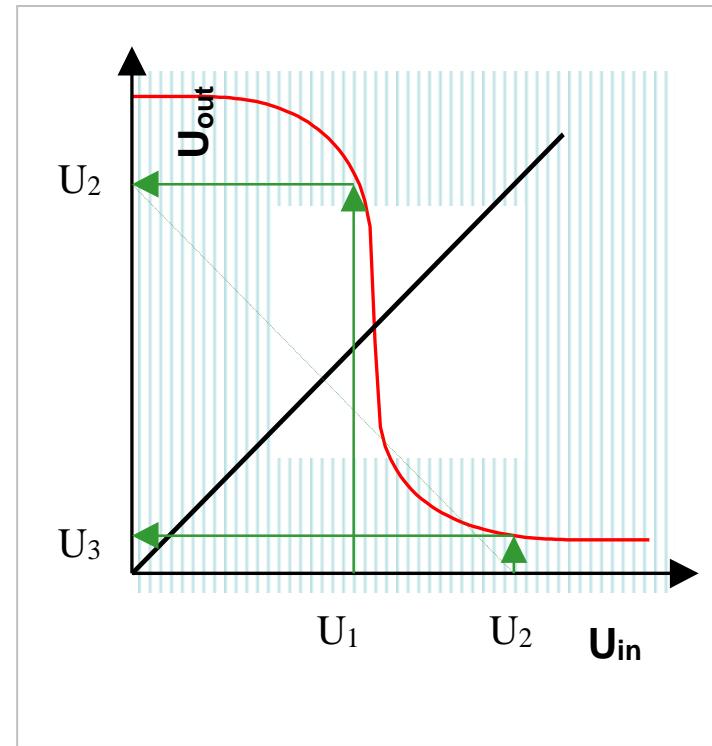
ideális és **valós** inverter
transzfer karakterisztikája

A karakterisztika következményei: jel regenerálás

- ▶ A jel regeneráló képesség a középső szakasz meredekségétől függ.
- ▶ Tekintsünk néhány, sorba kötött invertert!

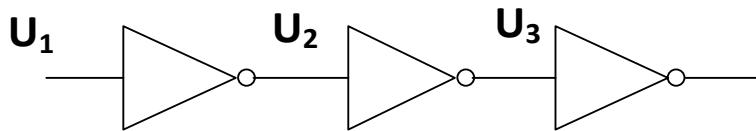


- Az első inverter bemenetére egy „rossz” logikai 0 érkezik, U_1
 - A kimeneten keletkező U_2 már közelebb áll az elfogadható magas szinthez.
 - A második kapu kimenete pedig, U_3 már „jó” logikai jelszint.
- ▶ Elméletileg egy végtelen hosszú kapusorozat, a gyakorlatban kb. 3-4 kapu a jelszintet tökéletesen helyreállítja.



jelregenerálódás

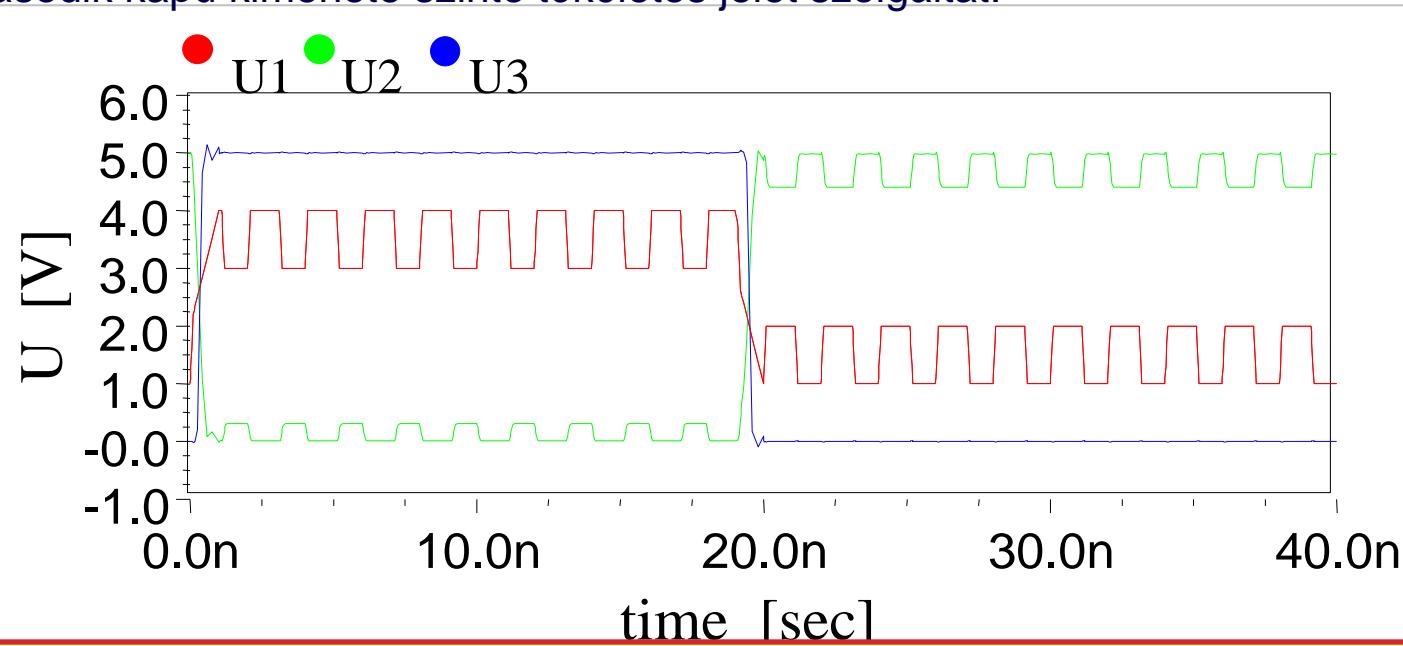
Jel regenerálódás, szimuláció



$$U_L = 0V, U_H = 5V$$

► Az első inverter bemenetére egy rossz, a névleges értéktől 1,5V-al eltérő logikai jel érkezik, amelyre $1V_{pp}$ zavar szuperponálódik.

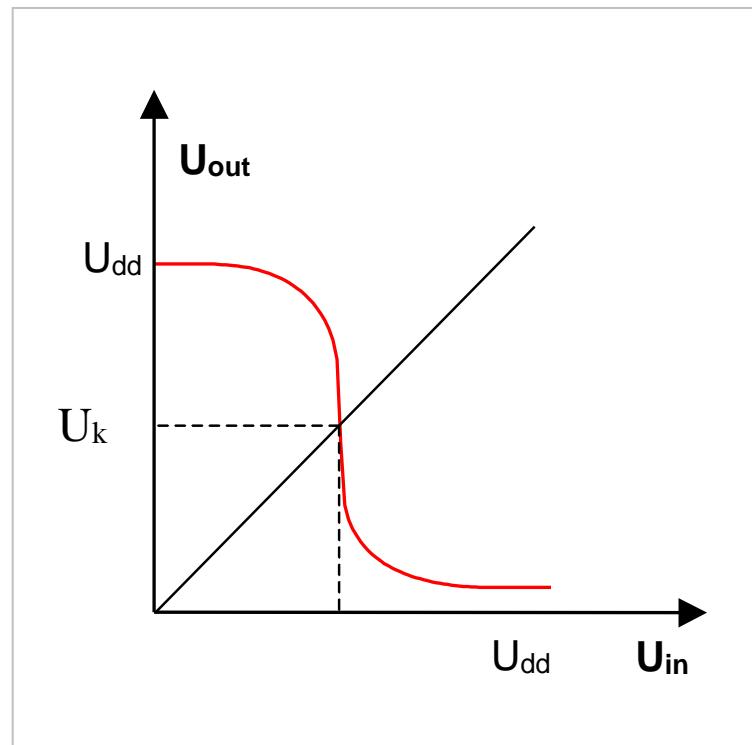
- A kapu kimenetén a jelszint középérték már csak 0,5V-al tér el a névlegestől és a zavar amplitúdója is felére-harmadára csökkent.
- A második kapu kimenete szinte tökéletes jelet szolgáltat.



U₃-nak láthatóan a szintje is és a jelalakja is regenerálódott!

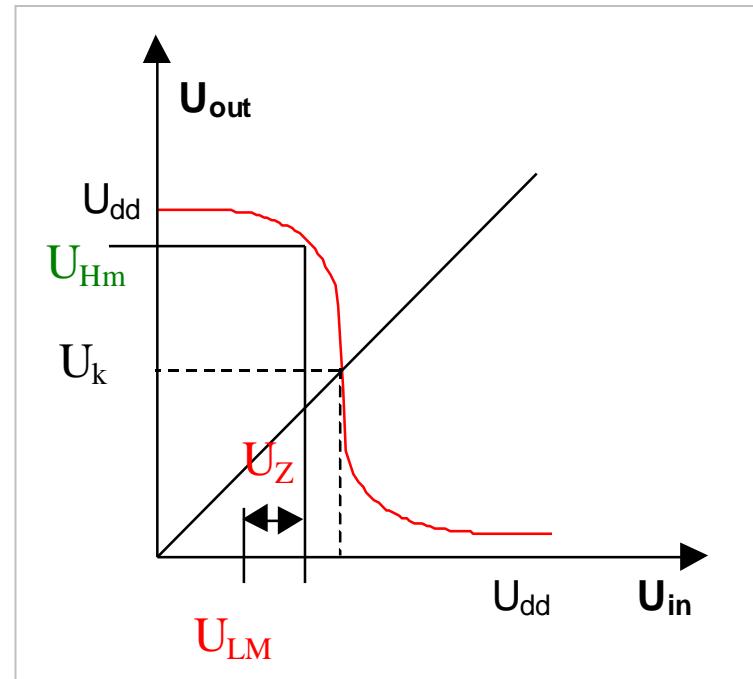
A komparálási feszültség

- ▶ Az a határ, ami felett logikai 1 szint regenerálódik, alatta pedig logikai 0.
- ▶ Azaz: $U_{IN} = U_{OUT}$
- ▶ A 45° -os egyenes és a karakterisztika metszéspontja.
 - A regenerálódás csak ideális logikai rendszerben igaz, a valóságban az egyes kapuk komparálási feszültsége eltér egymástól.
 - A komparálási feszültségen történő működés teljesen bizonytalan.



Logikai szint tartományok

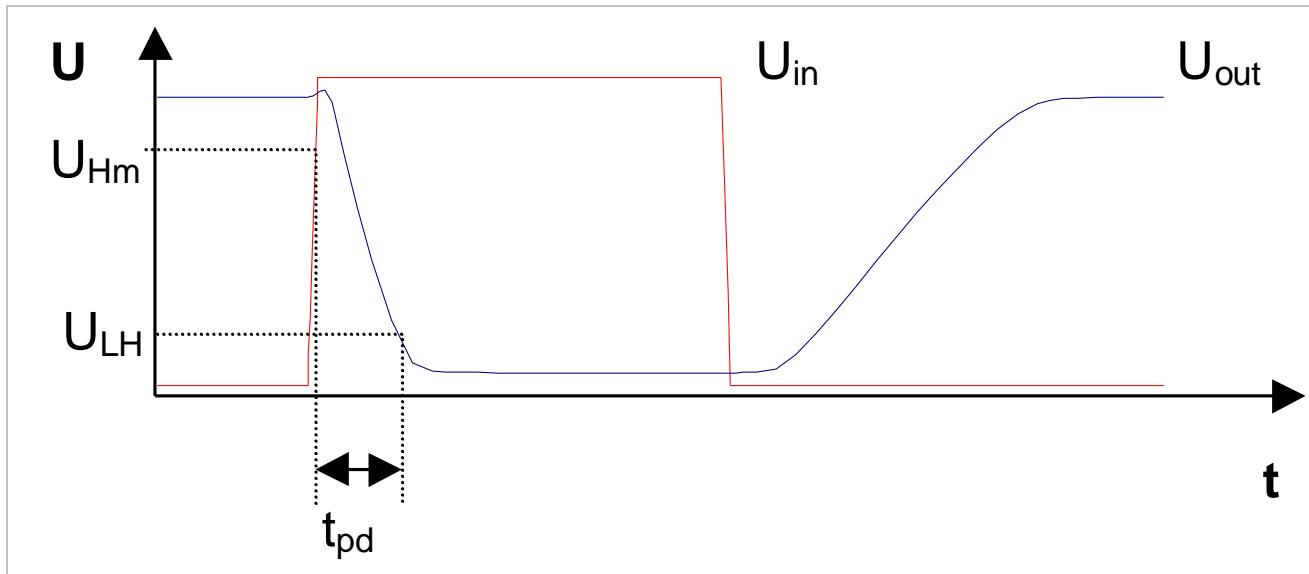
- ▶ A logikai 0 és 1 szint azon feszültségtartománya, amelyen belül adott zavarszintek mellett az áramkör biztonságosan működik.
- ▶ Tételezzük fel, hogy a láncba kapcsolt, egyforma inverterek minden egyik kapcsolódási pontján keletkeznek zavarjelek, amelyek maximális amplitúdója U_{ZM} .
- ▶ A jelregenerálódás feltételei:
 - $f(U_{LM} + U_{ZM}) \geq U_{Hm}$
 - $f(U_{Hm} - U_{ZM}) \leq U_{LM}$



Kritikus feszültségek:
 U_{LM} , a logikai 0 szint maximuma
 U_{Hm} , a logikai 1 szint minimuma

Ezek betartása esetén a legrosszabb megengedett logikai szint és a legnagyobb zajfeszültség mellett is elfogadható logikai szintet kapunk.

A jelterjedési idő (propagation delay)



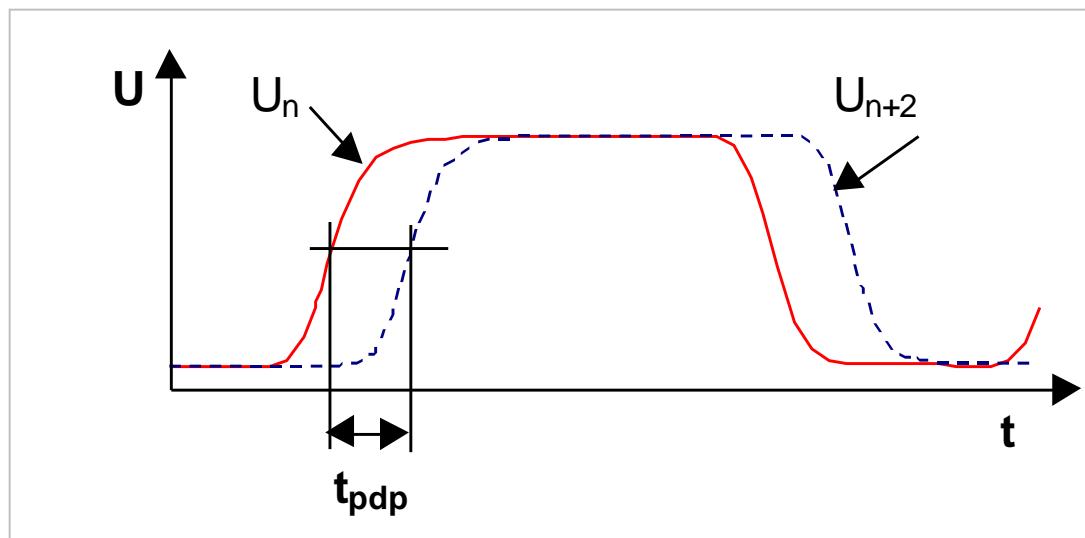
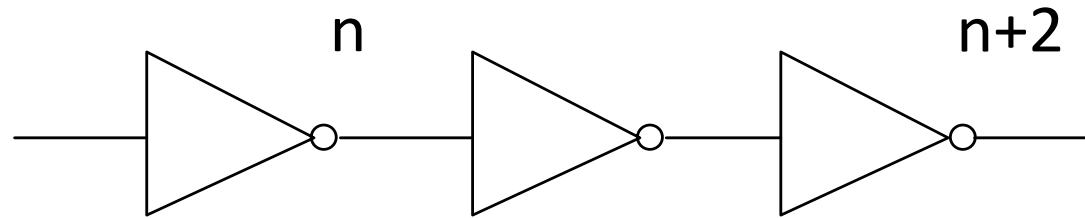
t_{pd} nehezen definiálható, ráadásul a fel és lefutáshoz tartozó késleltetés különböző lehet.

Lehetséges definíció pl. $t_{pd_{HL}}$ = a bemenet 0-1 váltásánál az U_{Hm} szint elérésétől a kimenet U_{LH} szint eléréséig.

(az ábrán egy szándékosan lassú inverter válasza van.)

A párkésleltetés

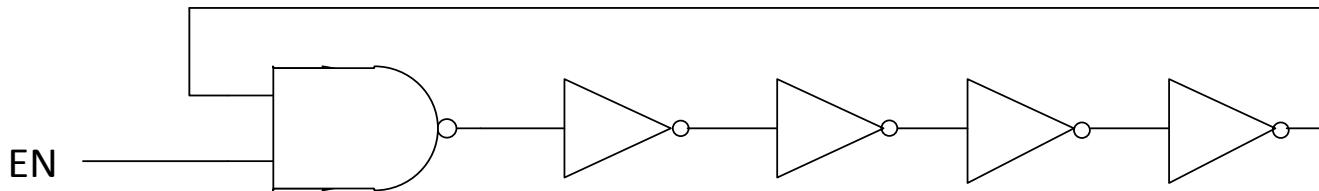
- ▶ Tegyük fel, hogy a jel egy hosszú, egyforma inverterekből álló láncon terjed. Elegendően sok inverter után a jelformát csak az inverterek belső tulajdonságai határozzák meg.
- ▶ A jel 2 inverter után megegyezik, a késleltetés pedig t_{pdp}



A párkésleltetés mérése: ring oszcillátor

A párkésleltetés mérése:

- ▶ páratlan számú inverter láncba kapcsolva, nincs stabil állapota, oszcillál.



$$T = N \cdot t_{pdp}$$

- ▶ A NAND kapu az indításhoz szükséges.

CMOS áramkörök

► Complementary MOS

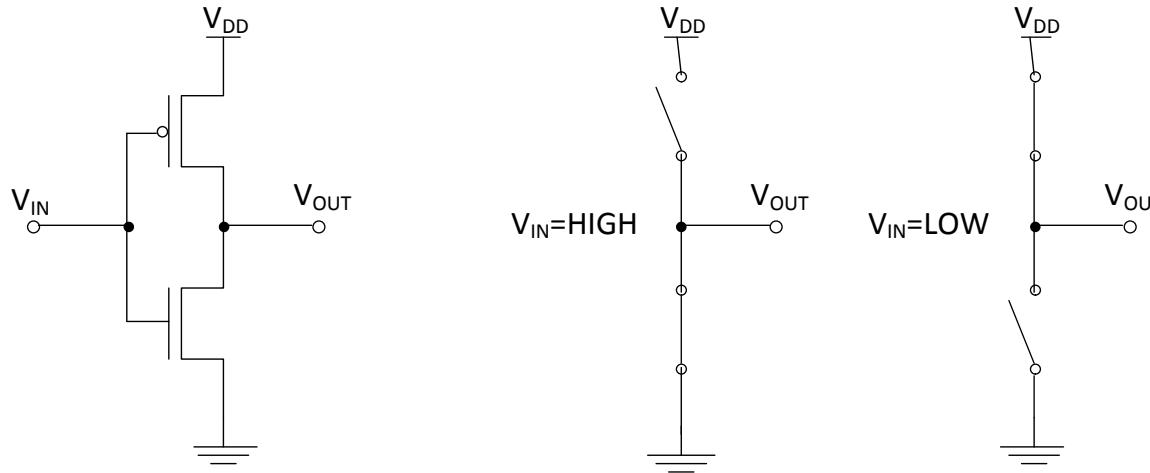
→ n és p típusú növekményes tranzisztorokból állnak a kapuk, innen ered a név.

► Manapság egyeduralkodó logikai áramkörökben.

► Előnyei:

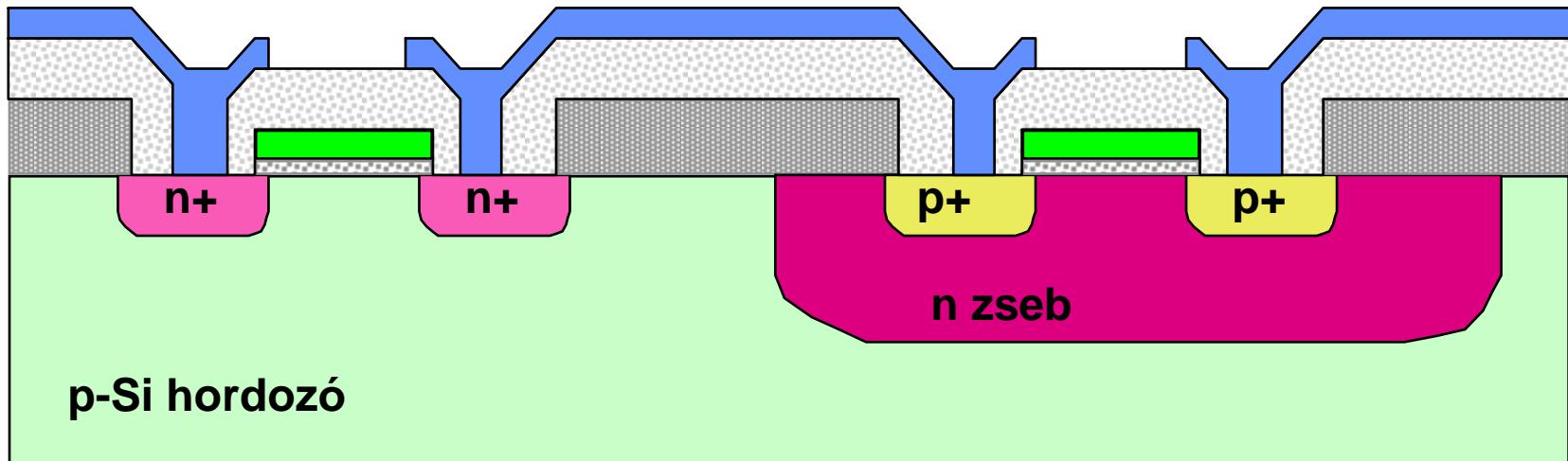
- A logikai szintek „tiszták”: $V_H = V_{DD}$, $V_L = 0V$ (azaz rail-to-rail, 0-tól tápfeszültségig történik a működés)
- A statikus (állandósult állapotbeli) áramfelvétel alacsony, közel 0.
- A jelváltozás esetén a fel és lekapcsolási késleltetések megegyeznek. (jól méretezett kapuk esetén.)
- Gyors működés.
- Tápfeszültség-érzéketlen, széles tápfeszültség tartományokban működik.

CMOS inverter kapcsolási rajza



- ▶ Egy n és egy p csatornás MOS tranzisztorból áll.
- ▶ Állandósult állapotban a két tranzisztor közül csak az egyik vezet, a másik mindenkorban lezár.
- ▶ Digitális áramkörök esetén a MOS tranzisztorokra a következő igaz:
 - Logikai magas szint esetén nMOS vezet, pMOS zár.
 - Logikai alacsony szint esetén pMOS vezet, nMOS zár.
 - (a kis karika a pMOS szimbólumán sokat segít...)
- ▶ Azaz mint egy olyan kapcsoló, ami a kimenetre a bemeneti jel szintjétől függően vagy a tápfeszültséget, vagy a földet kapcsolja.

CMOS inverter keresztmetszete



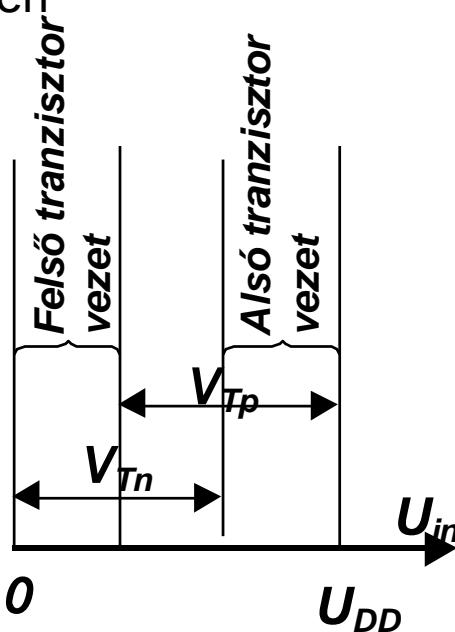
► A technológia bonyolultabb:

- Az egyik tranzisztortípusnak külön zsebet kell kialakítani.
- Az összes n csatornás tranzisztor szubsztrátja a legnegatívabb feszültségre (általában 0V) van kötve.
- Az összes p csatornás MOS tranzisztor zsebe pedig a tápfeszültségre.
- A zsebek és a hordozó között tehát egy záróirányú pn átmenet van.

CMOS inverter karakterisztikája 1.

Transzfer karakterisztika

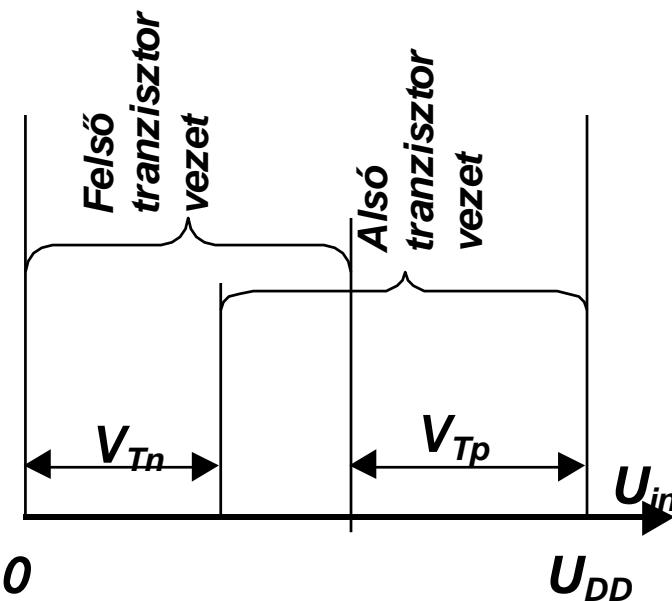
Két alapeset: a **tápfeszültségtől** és a tranzisztorok **küszöbfeszültségétől** függően



1. kis tápfeszültség:

$$U_{DD} < V_{Tn} + |V_{Tp}|$$

egyszerre csak az egyik tranzisztor vezet



2. nagyobb tápfeszültség:

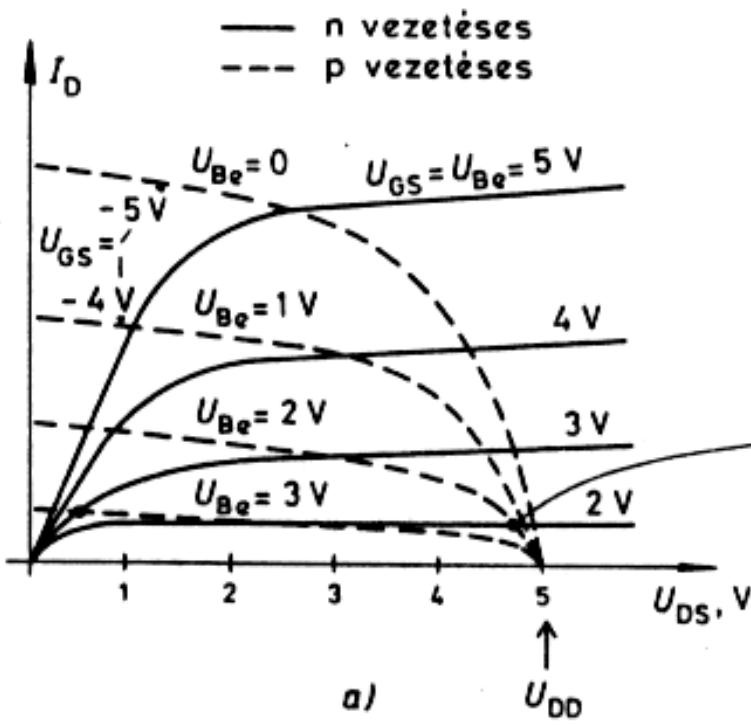
$$U_{dd} > V_{Tn} + |V_{Tp}|$$

átkapcsoláskor egyszerre vezet mindkét tranzisztor

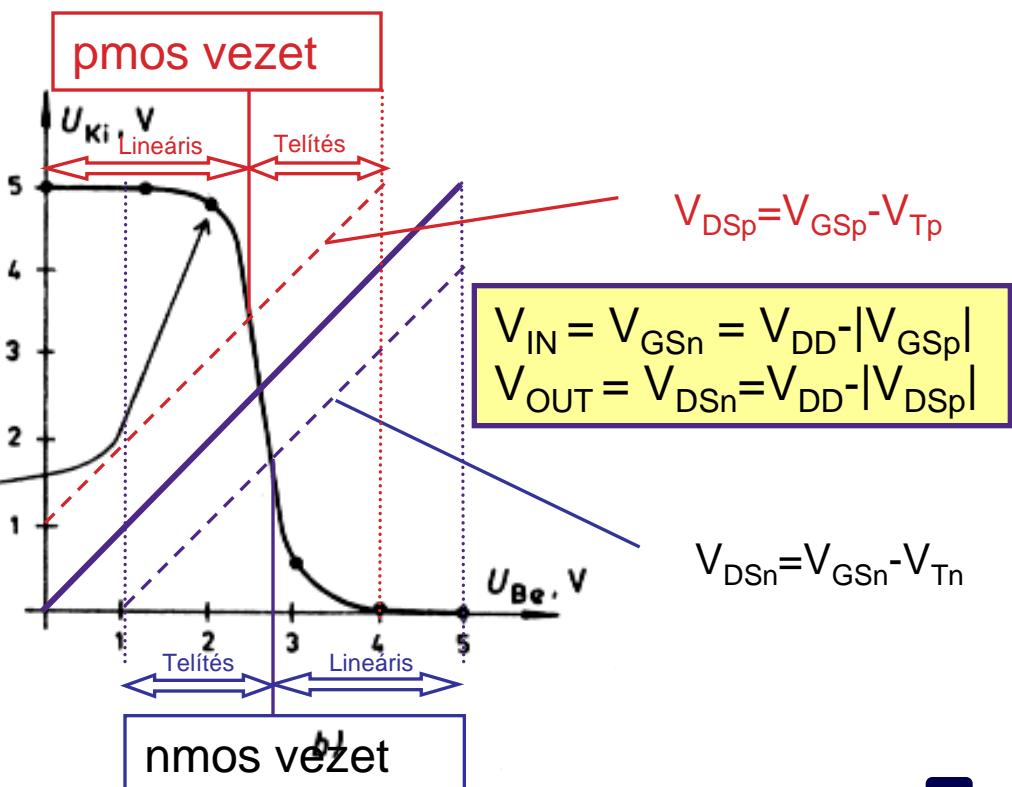
CMOS inverter karakterisztikája 2.

Nagyobb tápfeszültség: $V_{dd} > V_{Tn} + |V_{Tp}|$

A karakterisztika szerkesztése:



a)



b)

CMOS inverter méretezése

Méretezés szimmetrikus működésre

Ha $V_{in} = V_C$ komparálási feszültség, a két tranzisztor árama megegyezik:

$$\frac{K_n}{2} \frac{W_n}{L_n} (V_C - V_{Tn})^2 = \frac{K_p}{2} \frac{W_p}{L_p} (V_{DD} - V_C - |V_{Tp}|)^2$$

$$V_C = \frac{V_{DD} - |V_{Tp}| + V_{Tn} \sqrt{D}}{1 + \sqrt{D}} \quad \text{ahol} \quad D = \frac{\frac{K_n}{L_n} \frac{W_n}{W_p}}{\frac{K_p}{L_p}}$$

$$V_{GSn} = V_C$$

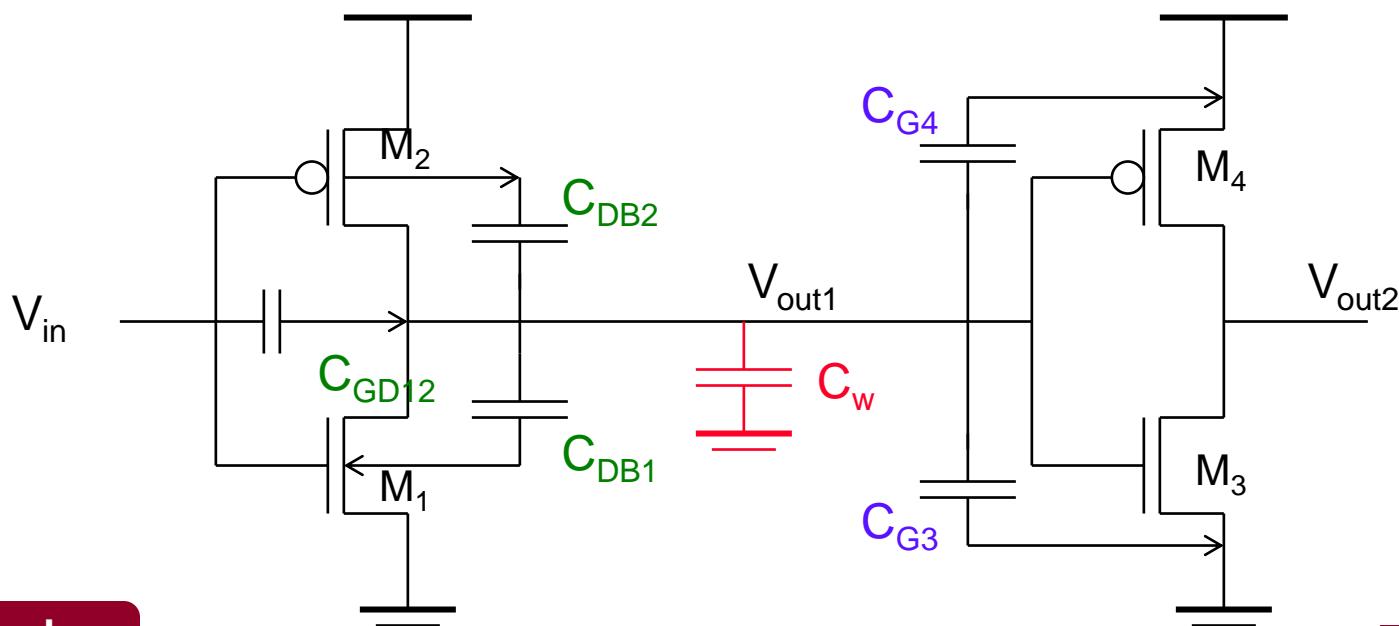
$$V_{GSp} = V_{DD} - V_C$$

A komparálási feszültség függ a két tranzisztor áramállandójának arányától. Ha a komparálási feszültséget a tápfeszültség felére szeretnék beállítani, és $V_{Tn} = |V_{Tp}|$, akkor D áramállandó arányt 1-re kell beállítani.

$$\left(\frac{W}{L}\right)_p = 1,5..2,5 \cdot \left(\frac{W}{L}\right)_n \quad \text{mivel a lyukak mozgékonysága kb. } 1,5\text{-}2,5\text{x kisebb.}$$

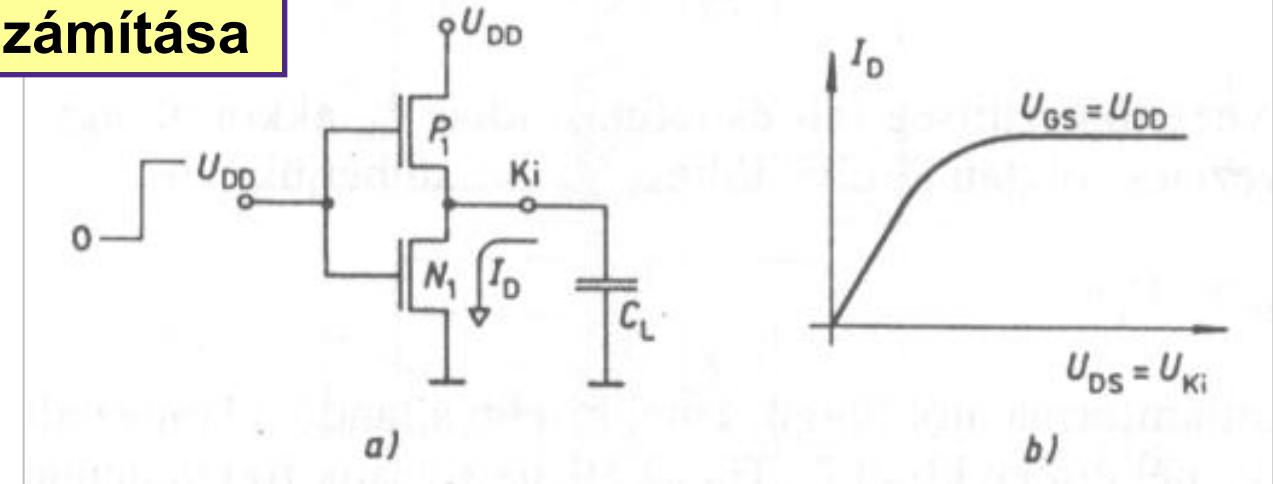
CMOS kapu kimenetét terhelő kapacitások

- ▶ Meghajtó fokozat tranzisztorainak belső kapacitásai
- ▶ Következő fokozat tranzisztorainak bemeneti kapacitásai
- ▶ Vezetékezés kapacitása
 - Az első kettő ismert, hiszen a kapu végleges megvalósítása alapján kiszámítható, megmérhető.
 - A vezetékezés kapacitása viszont csak a kapuk elhelyezésekor lesz ismert!
 - Emiatt a tervezés iteratív – hiszen pontos késleltetést számolni csak a vezetékhossz ismeretében lehetséges.



CMOS inverter kapcsolási idők számítása

A kapcsolási idők számítása



Ha a két tranzisztor komplementer karakterisztikájú, a kapcsolási idők (fel és lefutás) egyformák lesznek.

pl. 1-0 átmenetre:

$$t_l = \int_{V_{DD}}^{V_{LM}} \frac{C_L}{I_C} dU$$

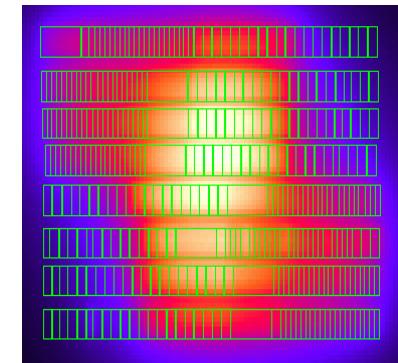
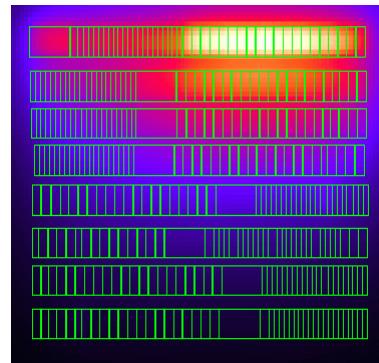
Ha $I_c \approx \frac{K}{2} \frac{W}{L} (V_{DD} - V_T)^2$ $\rightarrow t_l = \frac{C_L (V_{DD} - V_{LM})}{\frac{K}{2} \frac{W}{L} (V_{DD} - V_T)^2}$

Csökkenthető a tápfeszültség vagy W/L növelésével.

CMOS áramkörök fogyasztásának összetevői

► Dinamikus összetevők – minden kapcsolási eseménykor

- egymásbavezetés, töltéspumpálás
- eseménysűrűséggel arányos
 - órajel frekvencia
 - az áramkör aktivitása



► Parazita jelenségek miatt további összetevők:

- küszöb alatti áramok (subthreshold current)
- pn-átmenetek szivárgási áramai – **leakage**: ma már nagyon jelentős
- tunnel áram a gate-n keresztül

CMOS inverter dinamikus fogyasztása

A működés közbeni, **dinamikus** fogyasztás két részből áll

► Egymásba vezetés

- a bemenő jel felfutásának egy szakaszában minden tranzisztor egyszerre vezet, ha $V_{Tn} < V_{in} < V_{DD} - V_{Tp}$

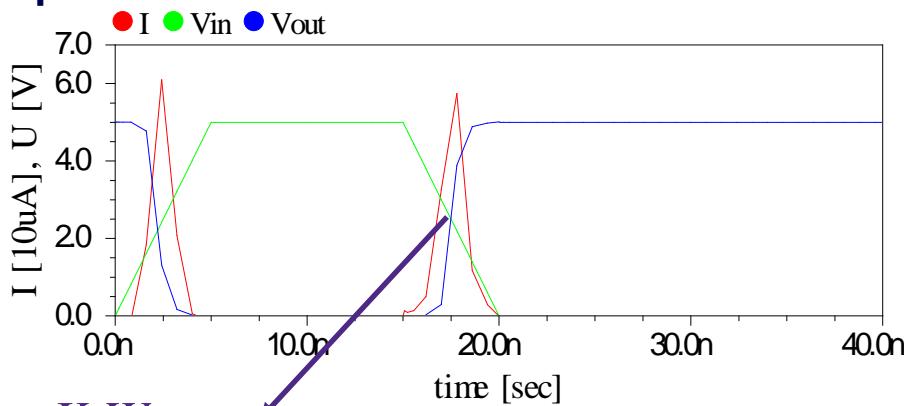
► Töltés-pumpálás

- Jelváltásokkor a kimeneten lévő C_L terhelést 1-re váltáskor a p tranzisztoron keresztül tápfeszültségre töltjük, majd 0-ra váltáskor az n tranzisztoron keresztül kisütjük.
→ **töltést pumpálunk a tápból a föld felé.**



Egymásba vezetés

- a bemenő jel felfutásának egy szakaszában minden tranzisztor egyszerre vezet, ha $V_{Tn} < V_{in} < V_{DD} - V_{Tp}$



(SPICE
szimuláció)

$$I_{MAX} = \frac{K}{2} \frac{W}{L} \left(\frac{V_{DD}}{2} - V_T \right)^2$$

az átfolyó töltés , $\Delta Q = b \cdot t_{UD} \cdot I_{MAX}$
ahol t_{UD} az idő, amíg áram folyik, b egy konstans, ami az
átkapcsoló jel alakjától függ. $b \approx 0,1-0,2$

$$P = f \Delta Q V_{DD} = f V_{DD} b t_{UD} \cdot \frac{K}{2} \frac{W}{L} \left(\frac{V_{DD}}{2} - V_T \right)^2$$



$$P \sim f \cdot U_{DD}^3$$

Töltéspumpálás

- ▶ Jelváltásokkor a kimeneten lévő C_L terhelést 1-re váltáskor a p tranzisztoron keresztül tápfeszültségre töltjük, majd 0-ra váltáskor az n tranzisztoron keresztül kisütjük.
→ töltést pumpálunk a tápból a föld felé.

$$\Delta Q_L = C_L \cdot V_{DD}$$

$$P_{cp} = f \cdot C_L \cdot V_{DD}^2$$

- ▶ A töltéspumpálás teljesítmény igénye **arányos a frekvenciával és a tápfeszültség négyzetével.**
- ▶ **A teljes fogyasztás a 2 összege (ha egymásba vezetés is van), arányos a frekvenciával és a tápfeszültség 2.–3. hatványával.**

CMOS kapuk

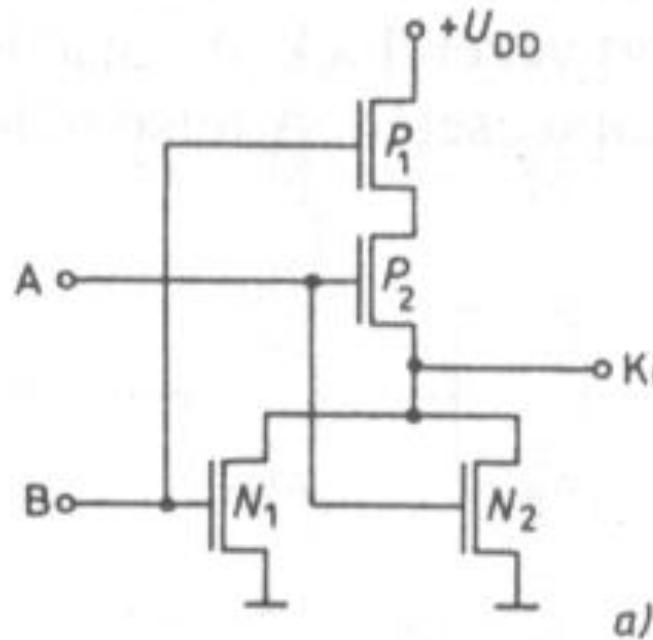
- ▶ A kapuk esetében egy p csatornás tranzisztorból álló „pull up” (PUN) ill. n csatornás tranzisztorból álló „pull down” hálózat (PDN) alkotja a kaput, minden két hálózat annyi tranzisztorból áll, ahány bemenete van a függvénynek.
 - Azoknál a bemeneti kombinációknál, ahol a függvény értéke 0, a PDN rövidzár a kimenet és a föld között, míg a PUN szakadás a kimenet és a táp között.
 - Ha a függvény értéke 1, akkor a PDN szakadás, a PUN rövidzár.
→ a p ill. n tranzisztorokkal ún. duális hálózatokat kell megvalósítani
 - hurokból vágat, vágatból hurok.
 - Egyszerűbben: amit az egyik hálózatban sorbakötöttünk, azt a másik hálózatban párhuzamosan kell kötni.
 - duális alkatrészek: NMOS helyett PMOS
- ▶ De Morgan azonosságok alapján belátható

CMOS NOR kapu

Az alsó hálózat két párhuzamosan kötött tranzisztorból áll.

Ha A vagy B bemenet magas, valamelyik alsó tranzisztor vezet, a felső hálózatban viszont zár, így a kimenet 0.

Ha minden bemenet 0, akkor a két alsó tranzisztor zár, a két felső nyit, a kimenet 1.

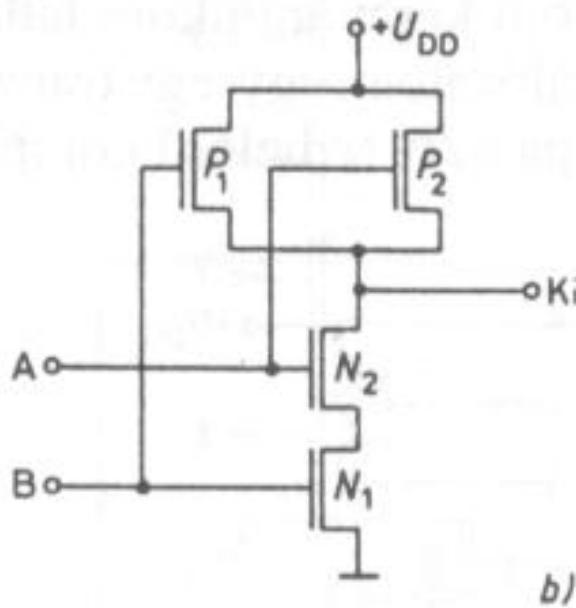


$$Y = \overline{A + B} = \overline{A}\overline{B}$$

a)

CMOS NAND kapu

Az alsó hálózat két sorba kötött tranzisztorból áll.



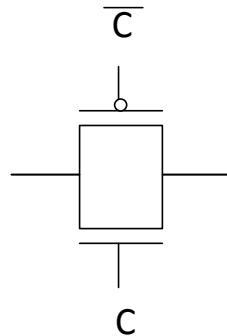
$$Y = \overline{AB} = \overline{A} + \overline{B}$$

Egy n bemenetű CMOS kapuhoz $2n$ db tranzisztorra van szükség.

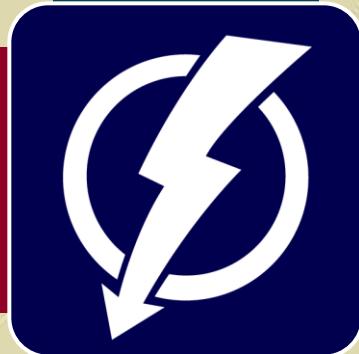
CMOS transfer kapu

- ▶ A jelfolyam útjába helyezett kapcsoló.
- ▶ CMOS kivitelben egy n és egy p típusú tranzisztor kapcsolnak össze, a vezérlő jelek egymás inverzei.
- ▶ A jel vagy az egyik vagy a másik vezető tranzisztoron veszteség nélkül átvitelre kerül.

C=0 : Szakadás



Transzfer gate-ek alkalmazásával tovább egyszerűsíthetők az áramkörök.

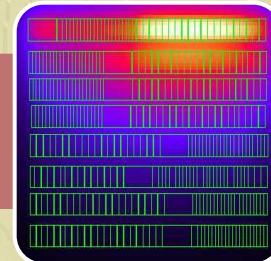
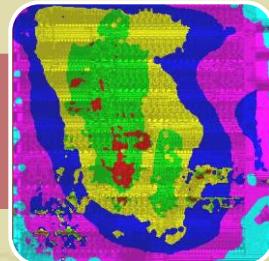
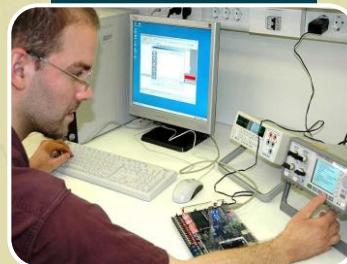


Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi
Egyetem

Elektronikus Eszközök Tanszéke



Digitális CMOS áramkörök



Mai témák

► Logikai függvények megvalósítása

- Statikus CMOS logika (ismétlés)
- Transzfer kapuk alkalmazása
- Órajel vezérelt CMOS
- Domino logika

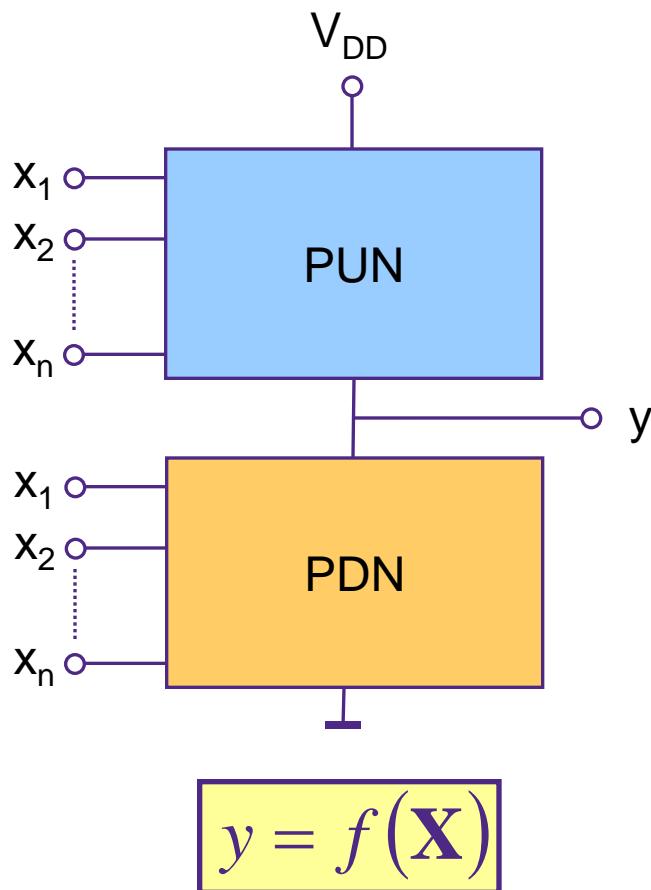
► Monostabil impulzus adó áramkörök

► Tárolók

- Alapelv
- SR latch
- D latch
- Master-slave flip-flopok
- Dinamikus D flip-flop



Statikus CMOS logika (ismétlés...)



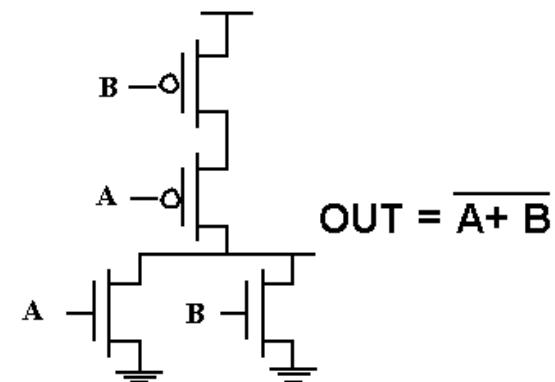
► pull up network

- p-csatornás tranzisztorok
- rövidzár, ha $f(X)=1$
- szakadás, ha $f(X)=0$

► pull down network

- n-csatornás tranzisztorok
- rövidzár, ha $f(X)=0$
- szakadás, ha $f(X)=1$

Pi. NOR kapu



Komplex kapuk

- ▶ Tranzisztor szintjén tudunk bonyolultabb logikai függvényeket megvalósítani.
- ▶ Általában max 4 bemenet, az és/vagy függvények tetszőleges kombinációi.
- ▶ Például
 - OAI21
 - $Y = \overline{(A + B)C}$
 - AOI22
 - $Y = \overline{AB + CD}$
 - OAI211
 - $Y = \overline{(A + B)CD}$



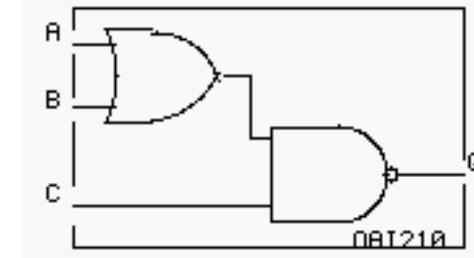
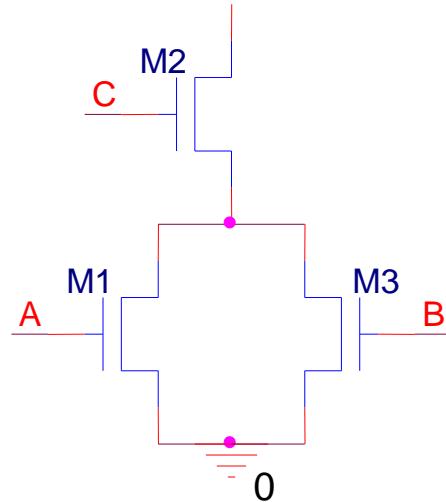
Példa komplex kapu tervezésére

- Tervezzük meg az $Y = \overline{(A + B)}C$ függvényt meavalósító komplex kaput!

- Első lépés a PDN (pull-down network) megtervezése, ezt n csatornás tranzisztorokkal kell megvalósítani.

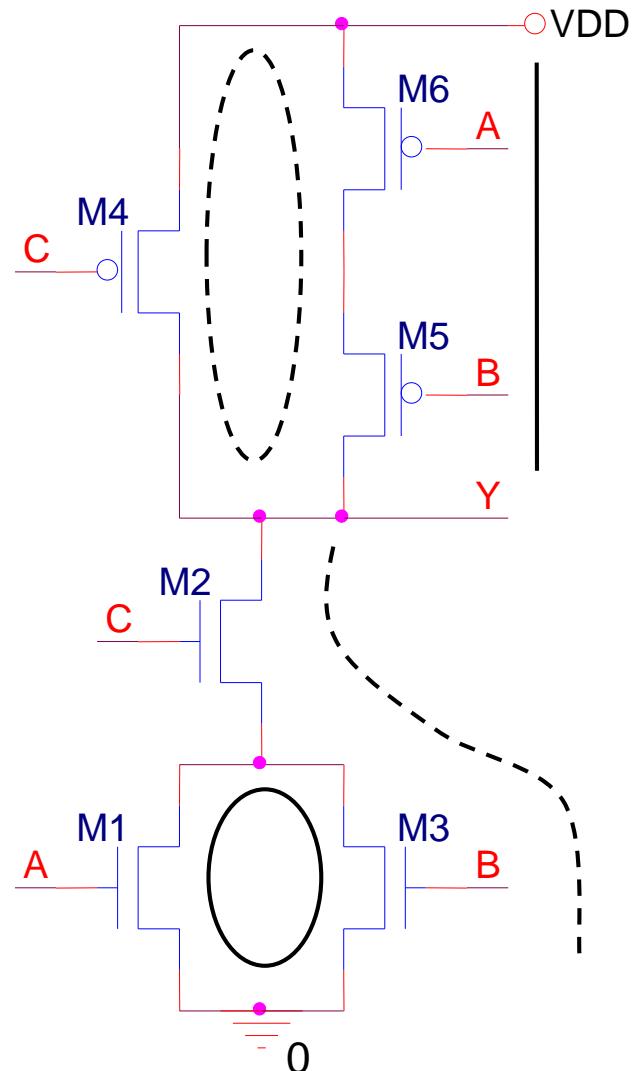
A negált logikai függvény minden 0 értékéhez a kimenet és föld között áram utat kell biztosítani, a függvényben szereplő összegnek párhuzamosan, a szorzatoknak sorba kapcsolt hálózatrészek felelnek meg.

- Itt tartunk:



Példa komplex kapu tervezésére

- ▶ A második lépés PUN (pull-up network) megtervezése, ezt a vezetésekkel vezetéses tranzisztorokkal kell megvalósítani.
 - A pull-up network a negált függvény minden 1 értékéhez a tápfeszültség és a föld között áramutat kell, hogy biztosítson.
 - Ennek egy módszere az, hogy meghatározzuk a PDN duális hálózatát.
 - A duális hálózatban sorbakapcsolt hálózatrészeknek párhuzamosan kapcsolt hálózatrészek, a párhuzamosan kapcsolt hálózatrésznek pedig sorbakapcsolt részek felelnek meg.



Példa komplex kapu tervezésére

- ▶ A másik módszer az, hogy meghatározzuk De Morgan azonosságok alkalmazásával a függvényt a bemenetek negált értékei függvényében, azaz az függvényt (mivel a p csatornás MOS tranzisztor logikai 0 szintnél fog vezetni) és a PDN-nél alkalmazott módszer szerint előállítjuk a hálózatot. Ebben az esetben:
 - ▶ $Y = \overline{C(A + B)} = \bar{C} + \overline{A + B} = \bar{C} + \bar{A} \bar{B}$
 - ▶ A két módszer azonos eredményre vezet.



CMOS kapuk tranzisztorainak méretezése

- ▶ A digitális kapuk méretezése viszonylag egyszerű.
 - Az alapinverter tranzisztorainak csatornahossza a minimális megvalósítható méret.
 - A szélesség n csatornás tranzisztoránál általában a minimális méret, vagy annál egy pici nagyobb.
 - A p csatornás tranzisztor szélessége pedig kb. $1,5..2\times$ nagyobb.
- ▶ Az alapinverter meghatározott kapacitás feltöltésére képes a megengedett késleltetés mellett.
 - CMOS esetén nemcsak a következő kapu bemenete, hanem az összekötő vezeték is terhelést jelent, így a szokott „fan-out”, azaz a rákapcsolható kapuk száma helyett a tervezőrendszereknek a vezetékhosszat is figyelembe kell venniük.
 - Általában ugyanannak a kapunak elkészül a $2\times$, $4\times$, ... stb. meghajtóképességű változata.
 - Inverter esetén ez csak annyit jelent, hogy a tranzisztorok szélessége az alapinverter tranzisztoraihoz képest nagyobb, pl. kétszeres meghajtóképességhez kétszer akkora tranzisztorok tartoznak.

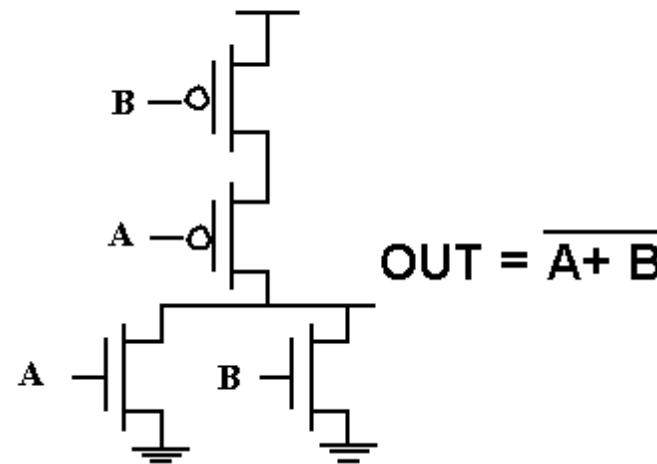
CMOS kapuk tranzisztorainak méretezése

- ▶ A kapuk méretezésekor az alapinverter méreteiből indulnak ki.
- ▶ Azonos szélességű és csatornahosszúságú tranzisztorok sorba kapcsolása esetén a csatornahosszúság, párhuzamos kapcsolás esetén pedig a szélesség adódik össze.
- ▶ Ez egy közelítés, de könnyen belátható, ha a tranzisztor feszültségfüggő „ellenállásnak” illetve vezetésnek tekintjük adott V_{GS} vezérlő feszültség mellett.
- ▶ Pl. két W/L méretű nMOS tranzisztor soros kapcsolása esetén, minden tranzisztor gate-je logikai magas szintet, azaz tápfeszültséget kap:
 - A tranzisztor árama a W/L –el arányos.
 - $I_D \sim \frac{W}{L}$ Az ekvivalens ellenállás tehát: $R \sim \frac{L}{W}$
 - Két ilyen tranzisztor sorbakapcsolásakor az eredő ekvivalens ellenállás tehát
 - $R \sim \frac{2L}{W}$, azaz valóban a kétszeres a csatorna hossz.
 - Ez a levezetés csak közelítés!



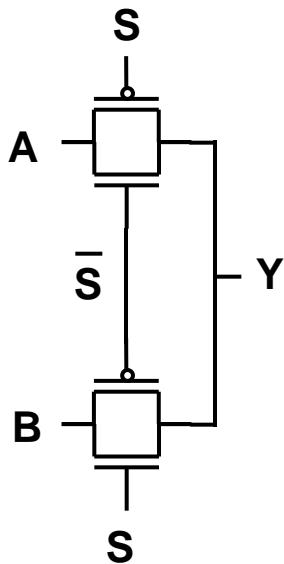
CMOS kapuk tranzisztorainak méretezése

- ▶ A közelítő összefüggés alapján tehát méretezhetjük az összetettebb kapukat.
- ▶ Ha az egységinverter késleltetéséhez hasonló késleltetést szeretnénk elérni, MINDEN ÁRAMÚTON biztosítani kell, hogy az áram legalább akkora legyen, mint az egységinverterben.
- ▶ Tekintsük példaképpen a NOR kaput!
 - A kisütő áram utak egy tranzisztor tartalmaznak, azaz méretük megfelel az inverter n csatornás tranzisztorainak méretével.
 - A feltöltő áramútból két pMOS van sorba kapcsolva.
 - Ezeket tehát kétszeres W/L arányra kell méretezni.



Transzfer kapuk alkalmazása - multiplexer

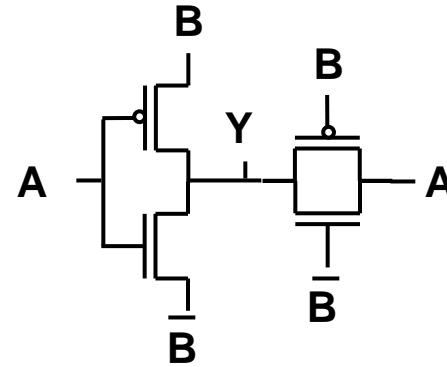
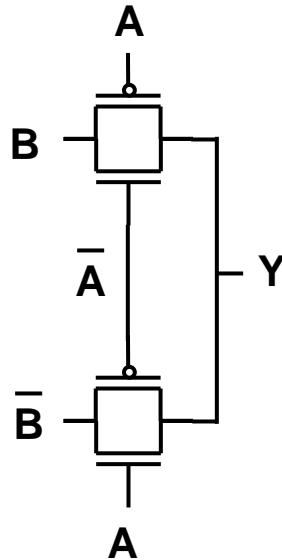
- ▶ Bizonyos funkciók transzfer kapuk alkalmazásával jóval egyszerűbben, kevesebb tranzisztorral valósíthatóak meg.
- ▶ Tipikusan a kiválasztó jellegű funkciók ilyenek.
- ▶ Tekintsünk például egy kétbemenetű multiplexert!
 - $Y = A\bar{S} + BS$



- Komplex kapuval 8 tranzisztor szükséges a megvalósításhoz.
- A transzfer kapus megoldás mindössze négy tranzisztor igényel.
- Feltételeztük, S és \bar{S} rendelkezésre áll.
 - Ez szimpla huzalozási kérdés, mert a tárolók a tárolt érték ponált és negált változatát is szolgáltatják...

Transzfer kapuk alkalmazása – XOR kapu

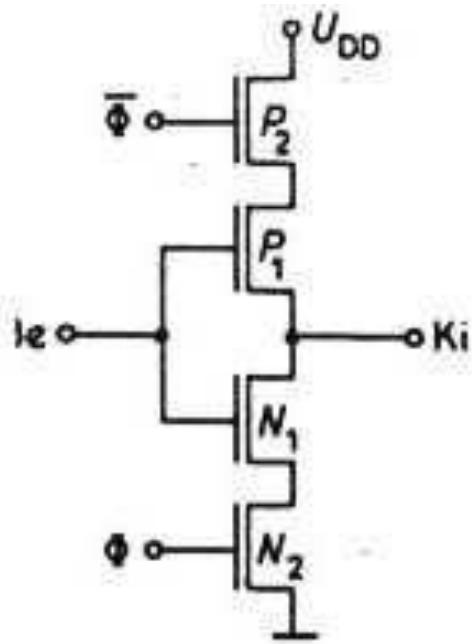
- ▶ Multiplexerből alakítjuk ki
- ▶ Mindkét változat 4 tranzisztor, ha a negált és ponált jelek rendelkezésre állnak (a komplex kapu 8 tranzisztort tartalmaz)
- ▶ Ha a negált jelek nem állnak rendelkezésre az első kapu 8, a második 6 tranzisztort tartalmaz. (komplex kapu 12 tranzisztor)
- ▶ $Y = A \oplus B = \bar{A}B + A\bar{B}$



- ▶ A kizáró vagy művelet pl. összeadókban fordul elő. Több optimalizált változata létezik.

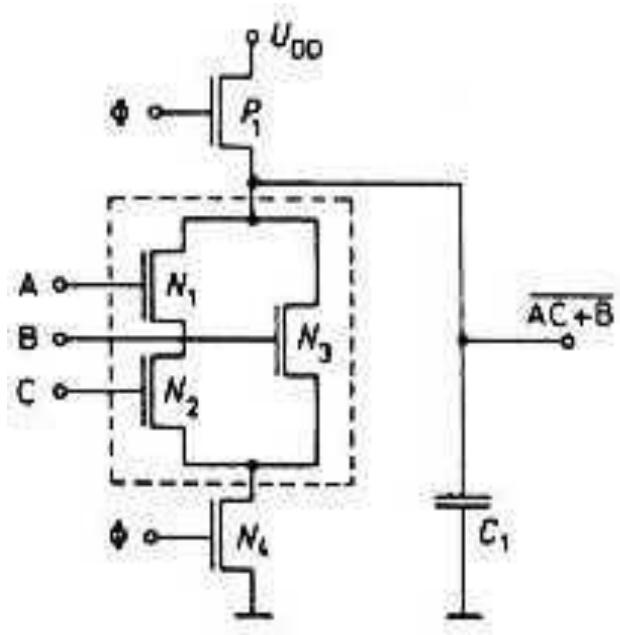
Órajel vezérelt CMOS

Clocked CMOS, C²MOS



- ▶ Kis terület
- ▶ 3-állapotú (tri-state) kapuk
 - $\Phi = 0$: a kimenet lebeg
 - $\Phi = 1$: a kimenet a bemenet invertáltja

CMOS dominó logika



- ▶ **Előtöltés:** a kimenetet terhelő C-t előre tápfeszültségre töltjük, mert a kisütés gyorsabb mint a feltöltés.
- ▶ $\Phi = 0$: előtöltés V_{DD} -re, $p_1 = \text{be}$, $n_4 = \text{ki}$
- ▶ $\Phi = 1$: kiértékelés, $p_1 = \text{ki}$, $n_4 = \text{be}$
- ▶ Tranzisztorszám: $n+2$
- ▶ **Csak dinamikus fogyasztás**

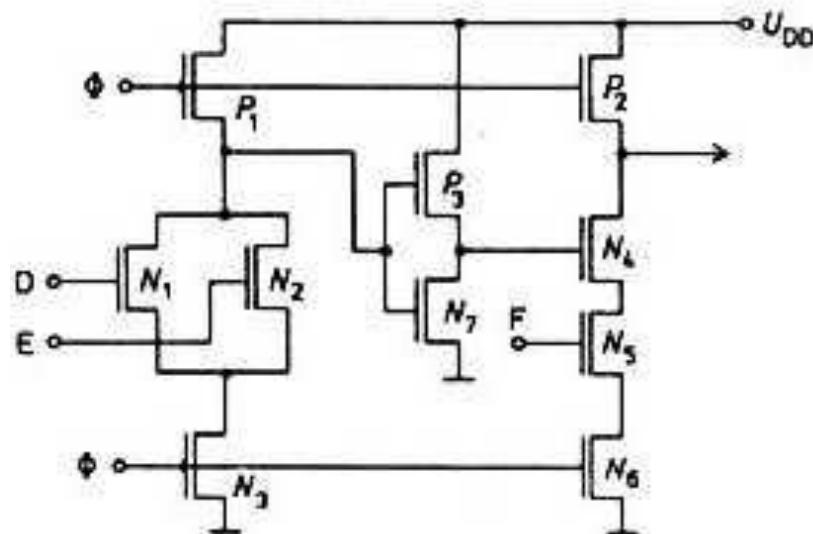
Problémája: **ki = 0**, csak késéssel jelenik meg → a kiértékelő fázis elején rövid ideig egy hamis 1 állapot (glitch) van a kimeneten.

CMOS dominó logika 2.

CMOS dominó logika

Megoldások: egy további inverter (hagyományos), ami a pozitív glitch-et negatívvá változtatja, ami nem okoz problémát → **dupla inverzió**

inverteres megoldás

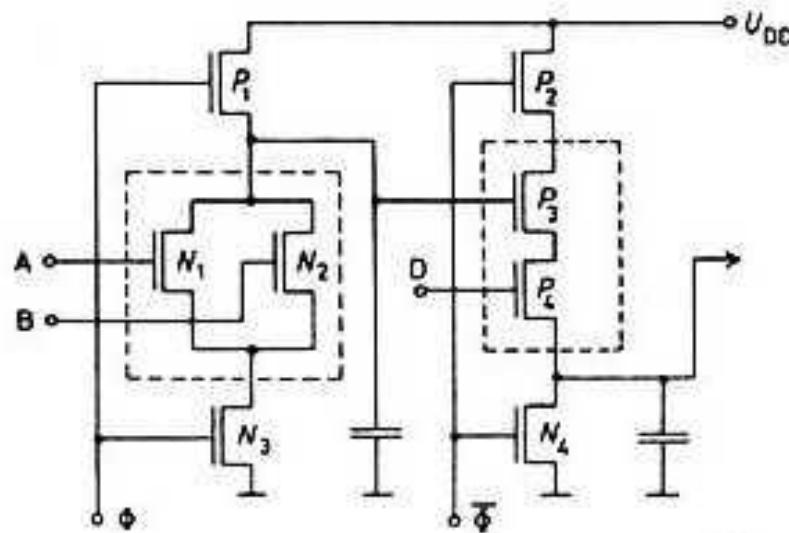


CMOS dominó logika 3.

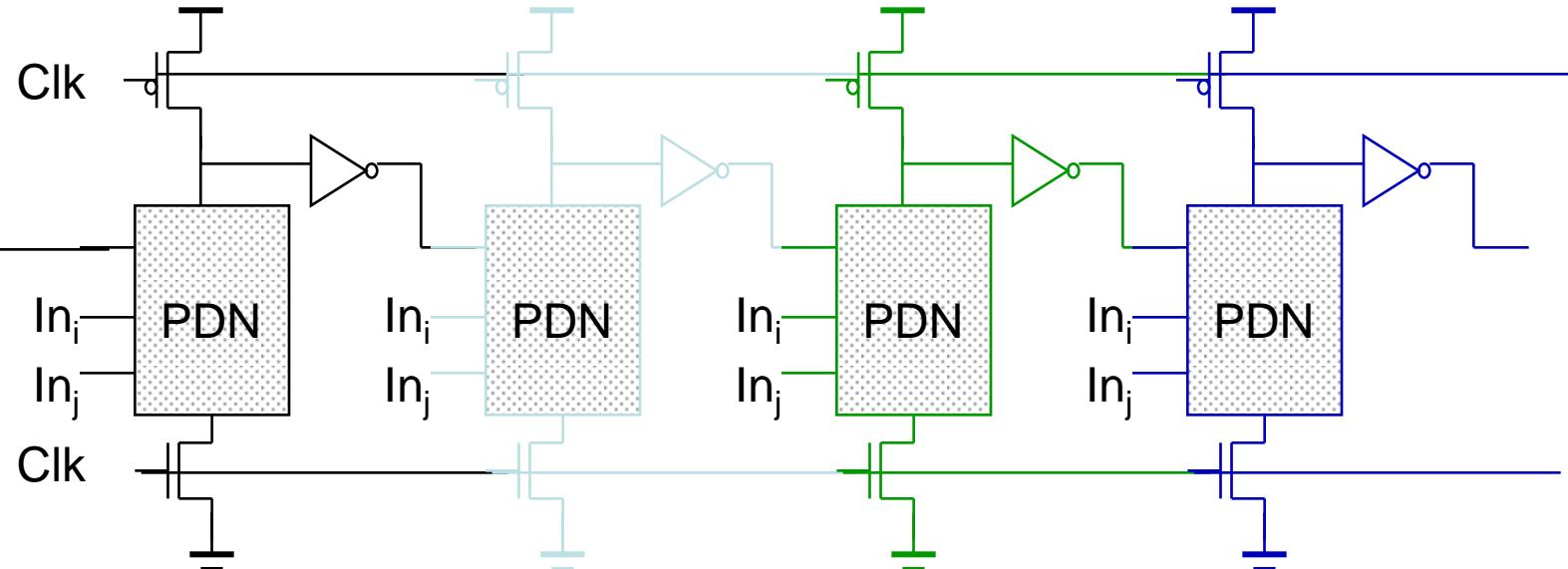
CMOS dominó logika

Megoldások: a következő kaput célszerűbb **komplementer logikával** megvalósítani, itt a glitch nem okoz hibát...

váltott logikájú megoldás



CMOS dominó logika



MOS impulzusadó és tároló elemek

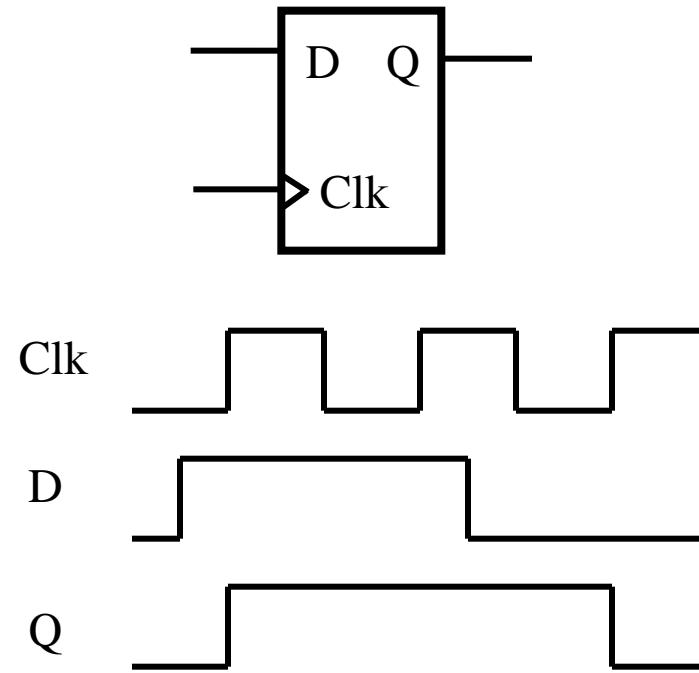
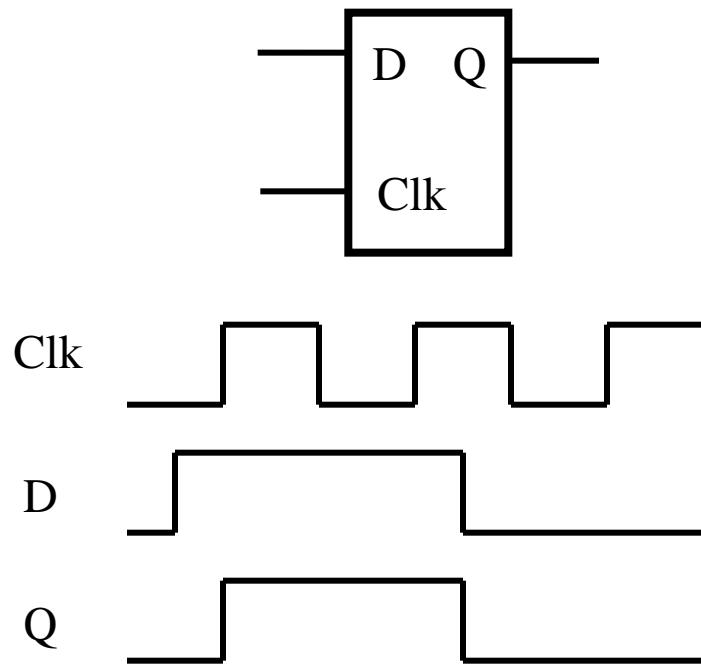
Két állapotú elemek:

- ▶ Monostabil impulzus adó áramkörök (monoflopok)
- ▶ Bistabil két állapotú elemek
 - Transzparens két állapotú áramkörök (**latch-ek**) (a bemeneti jelváltozás azonnali kimeneti jelváltozást eredményez, ha engedélyezett)
 - flip-flopok (kimeneti jelváltozás órajel fel, vagy lefutó élre)



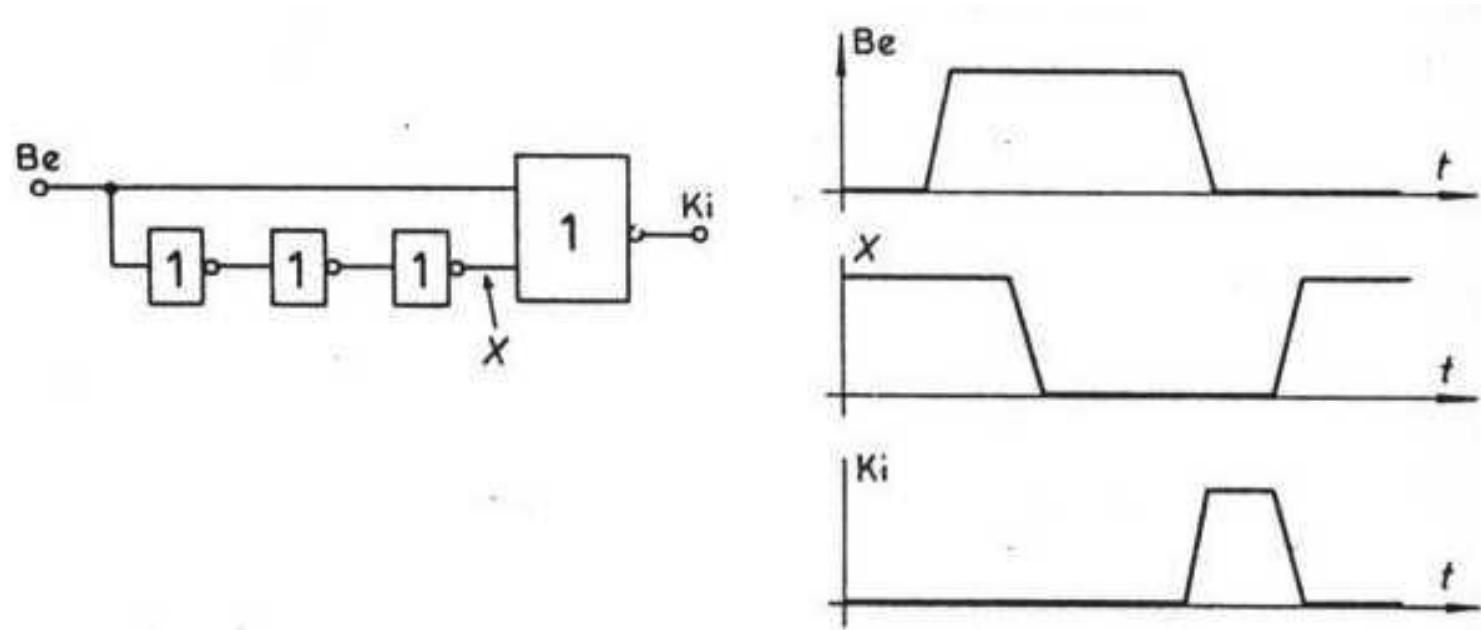
Latch és flip-flop

- ▶ Latch: transzparens
- ▶ Flip-flop/register: élvezérelt!



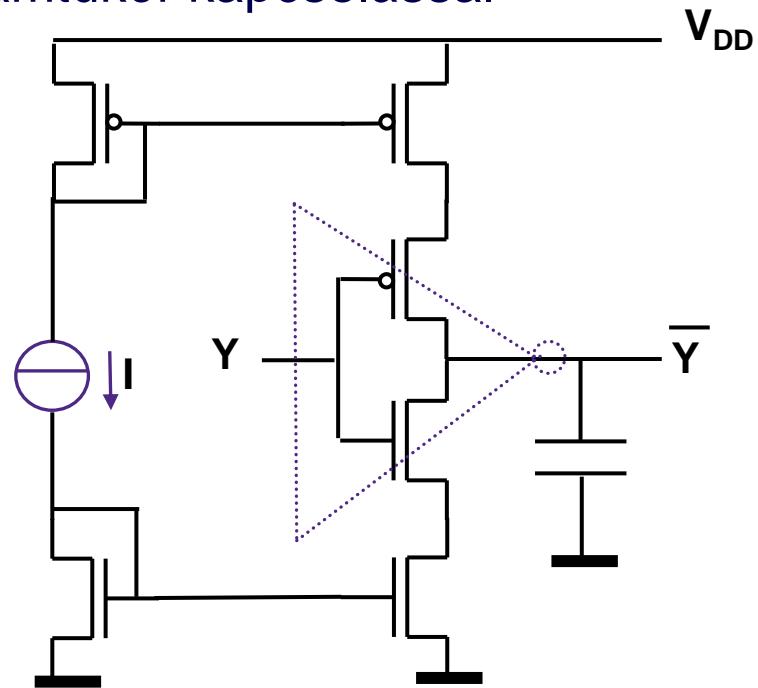
Monostabil impulzusadó áramkör

A kapukésleltetést használja ki: NOR kapus kivitelben a kimeneten akkor jelenik meg egy rövid ideig tartó + impulzus, amikor a bemenő jel 1-ből 0-ba vált



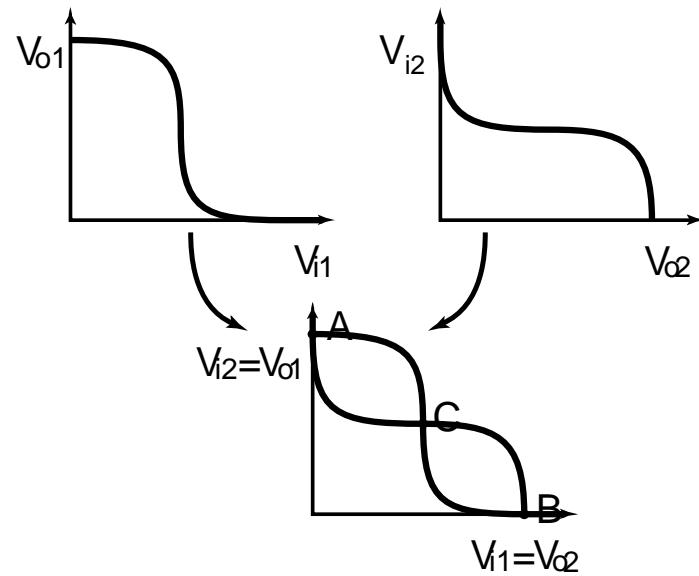
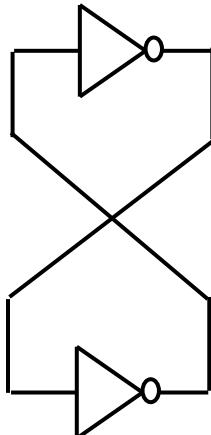
A késleltetés beállítása

- ▶ Áramkorlátozott (starved) inverter
- ▶ Az invererek maximális áramát egy áramtükör kapcsolással korlátozzuk.
- ▶ Egy kis ANALÓG CMOS...
 - Az áramgenerátorral hajtott oldal és a CMOS inverter „felett” és „alatt” elhelyezkedő tranzisztorok mérete és V_{GS} feszültsége megegyezik.
 - (Kirchhoff törvény alapján belátható)
 - Ha ezek a tranzisztorok vezetnek maximális áramuk I.
- ▶ Így a kimeneti kapacitás max. I árammal töltődik illetve sül ki.



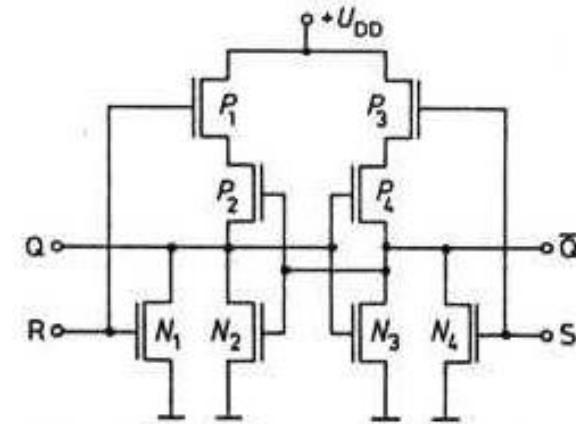
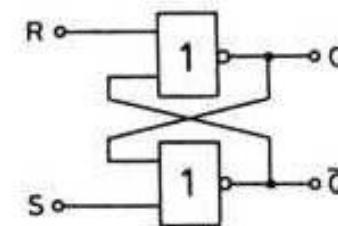
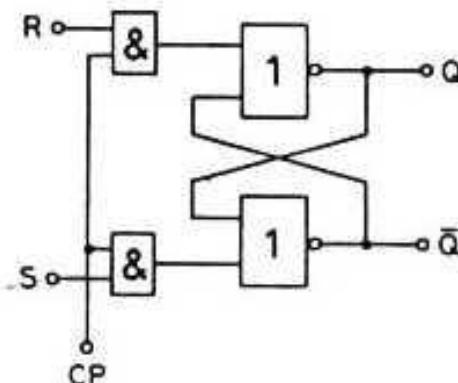
MOS tároló elemek elve

- ▶ Két állapotú áramkörök alapja: két, gyűrűbe kapcsolt inverter → két stabil állapota van.
- ▶ Ahhoz, hogy tárolóként lehessen használni, írhatóvá kell tenni → az invererek helyett logikai kapuk, amelyeknek a további bemenetei lehetővé teszik a beállítást.



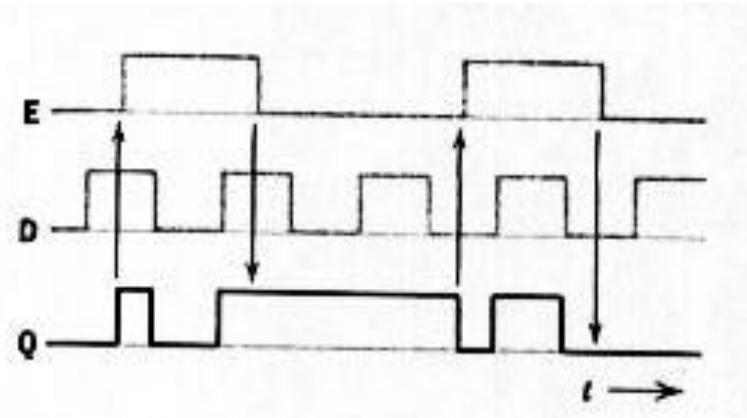
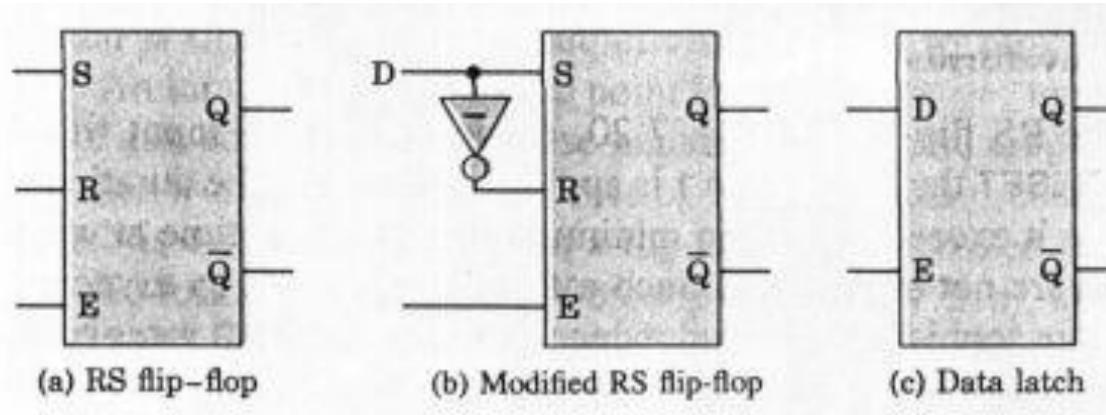
SR latch

- ▶ Van lehetőség latch-ek kialakítására logikai kapuk segítségével.
- ▶ De a tranzisztor szintű építkezés kedvezőbb mind késleltetés, mind pedig helyfoglalás tekintetében.
- ▶ Példa: SR latch.
 - Két NOR kapuból épül fel, mint ahogy az közismert.
 - Az engedélyezést pl. egy ÉS kapuval lehet megoldani.



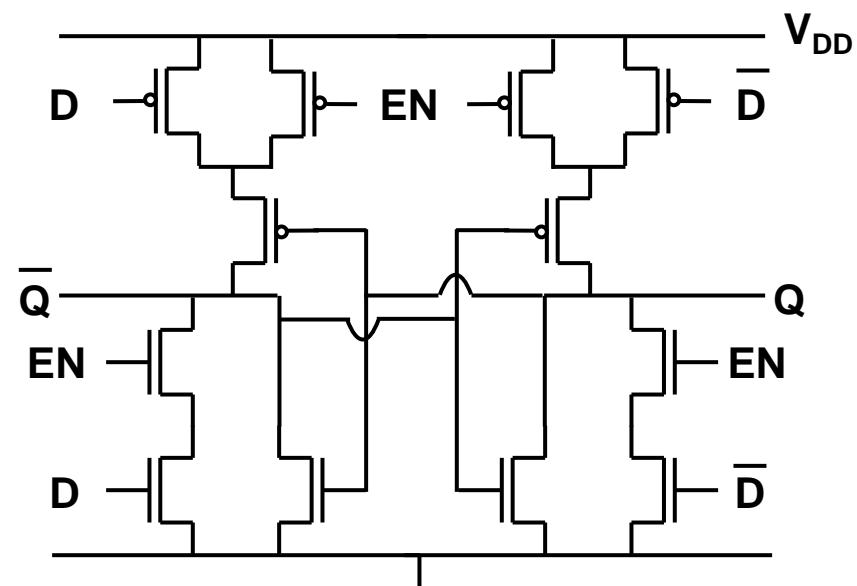
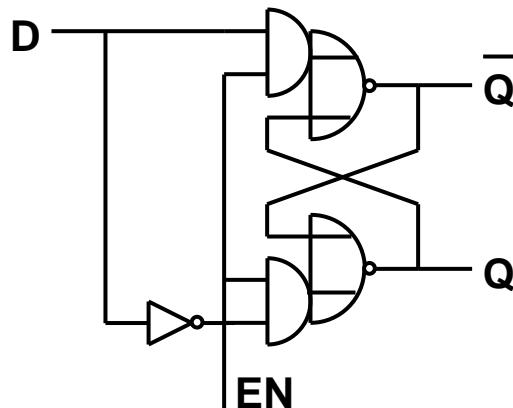
D - latch

- ▶ SR latch-et viszonylag ritkán használunk.
- ▶ Annál inkább a D tárolót.
- ▶ Szokásos módon így lehetne kialakítani az SR latch-ből:



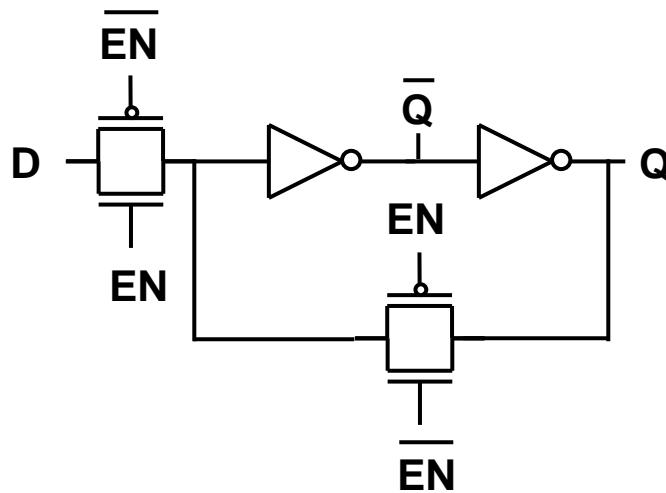
D latch AOI kapuval

- ▶ Komplex kapuk segítségével az engedélyező funkciót összevonhatjuk a tároló/beíró funkcióval.
- ▶ AND-OR-INVERT kapus kivitel.
- ▶ Két komplex kapuval, összesen 12 tranzisztorral realizálható.
- ▶ A D ellentettjére is szükség van.



Transzfer kapukkal realizált D-latch

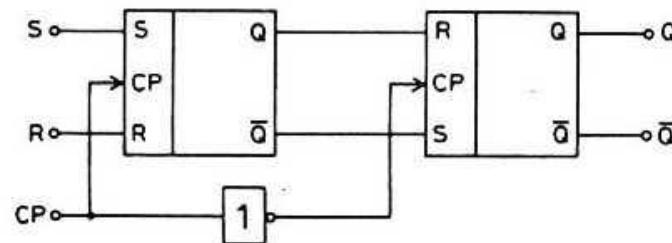
- ▶ A beírás és a visszacsatoló ág egy egy transzfer kapuval van ellenfázisban vezérelve.
- EN=1 alatt transzparens működés, $Q = D$, mivel a beíró ág transzfer kapuja vezet, a visszacsatoló ágban elhelyezett transzfer gate viszont zárt.
- EN=0 alatt a kimenet visszaíródik a bemenetre, a transzfer kapuk most ellentétesen vezetnek: a visszacsatoló ág „él”, a beíró ág elzárt.
- Összesen nyolc tranzisztorral megvalósítható és nincs szükség a D negáltjára.



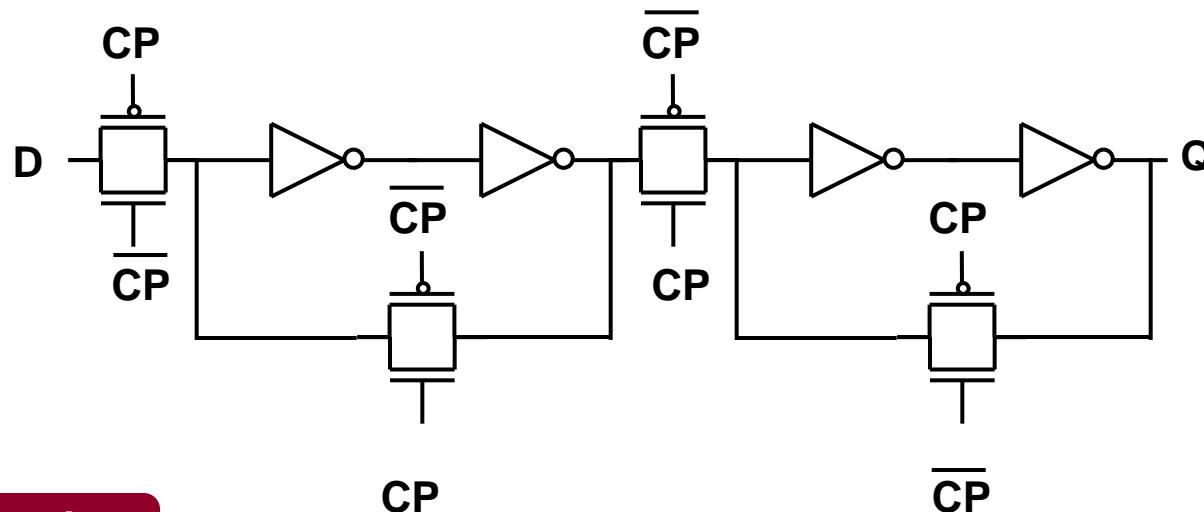
Mater - Slave flip-flopok

2 sorbakötött, ellenütemű órajellel vezérelt latch-ből állíthatók össze.

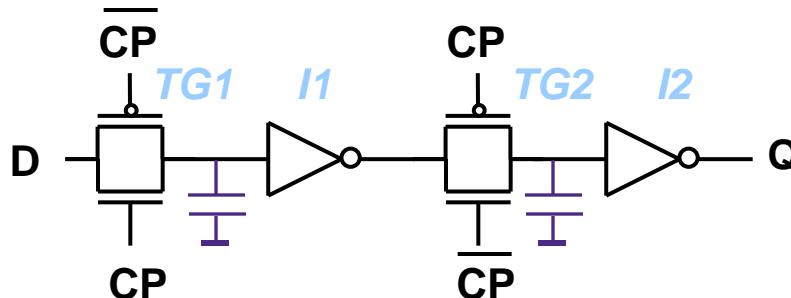
Master-slave SR-tároló, lefutó ére



Master-slave D-tároló, felfutó ére



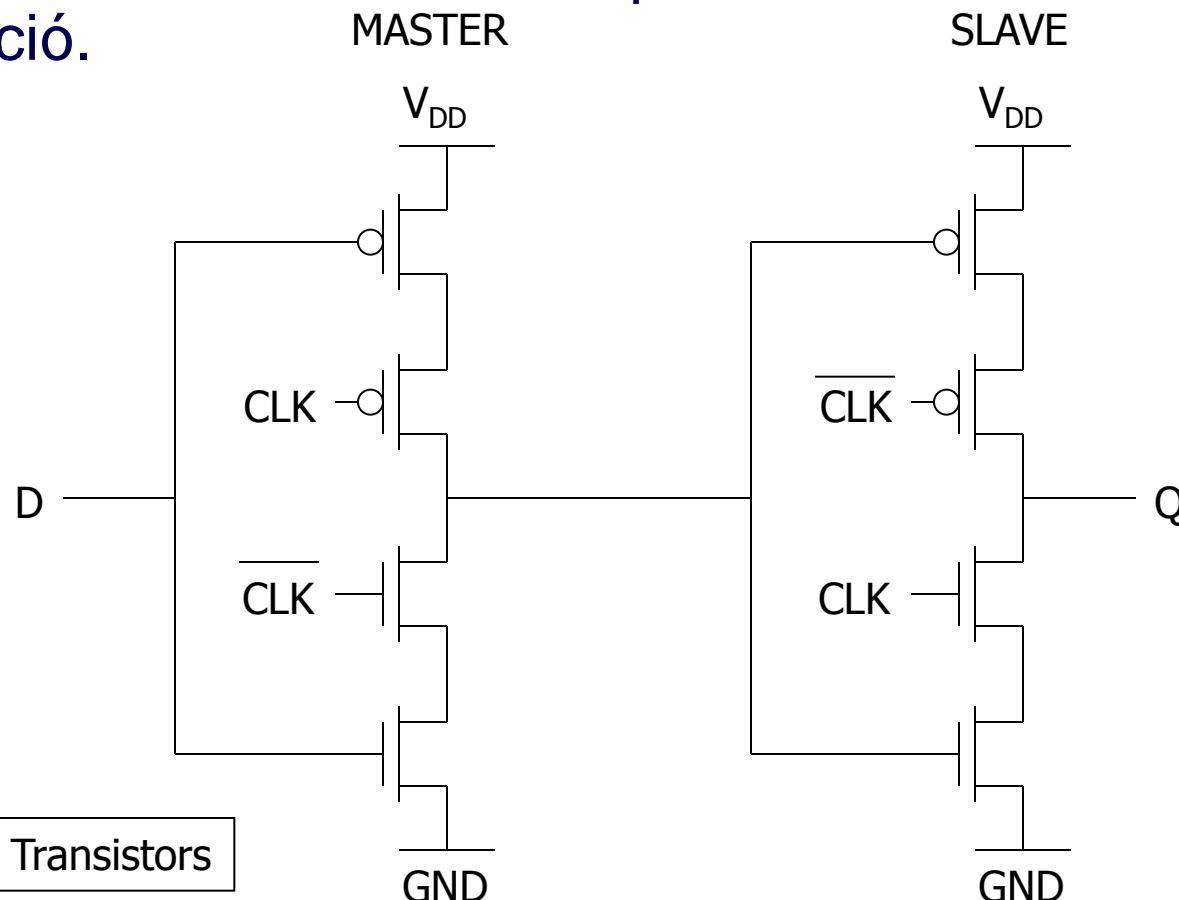
Dinamikus D flip-flop



- ▶ CP=1 esetén TG1 nyitott, TG2 zárt. D értéke a jelölt szórt kapacitásában tárolódik.
- ▶ CP=0 esetén, lefutó élre TG1 zár, TG2 nyit. A master logikai értéke a slave-be másolódik.

Dinamikus D flip-flop C²MOS megvalósítás

- ▶ Egyszerűen két órajel vezérelt invertert kapcsolunk össze.
- ▶ Ezeket ellentétesen vezéreljük.
- ▶ A master és a slave közötti kapacitásban tárolódik az információ.

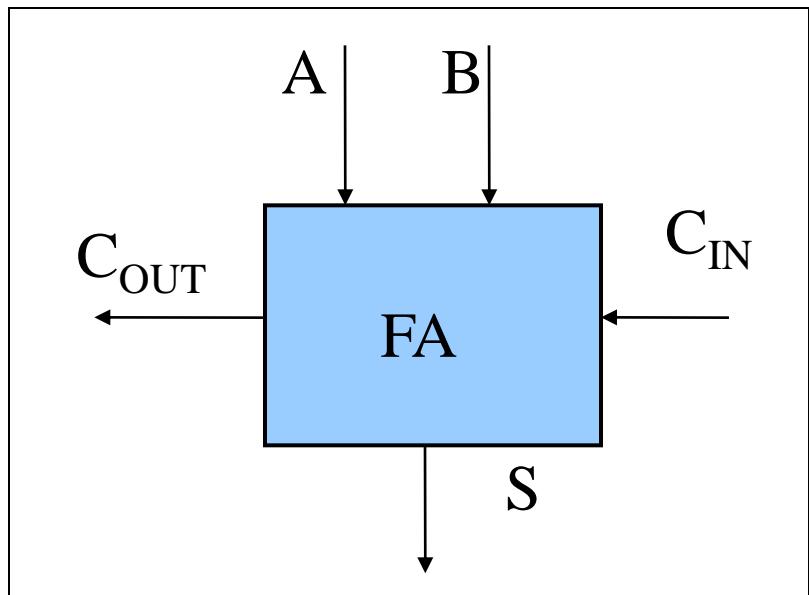


A teljes összeadó 1.

(full adder, FA)

3 bemenete és 2 kimenete
van

- ▶ bemenetek: A, B, C_{IN}
- ▶ kimenetek: S, C_{OUT}



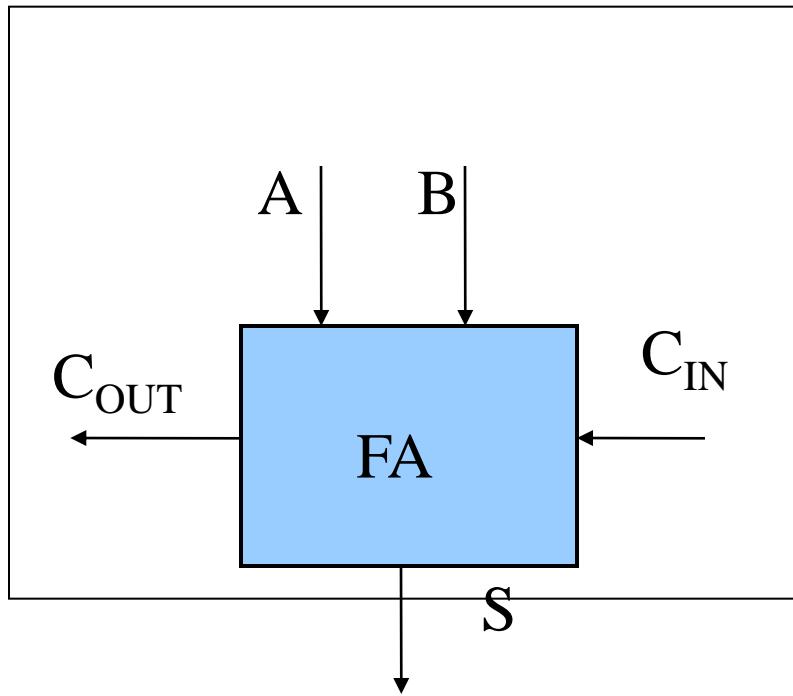
A teljes összeadás kimeneti logikai függvényei:

$$C_{OUT} = AB + C_{IN}(A + B)$$

$$S = ABC_{IN} + (A + B + C_{IN})\overline{C_{OUT}}$$

A teljes összeadó 2.

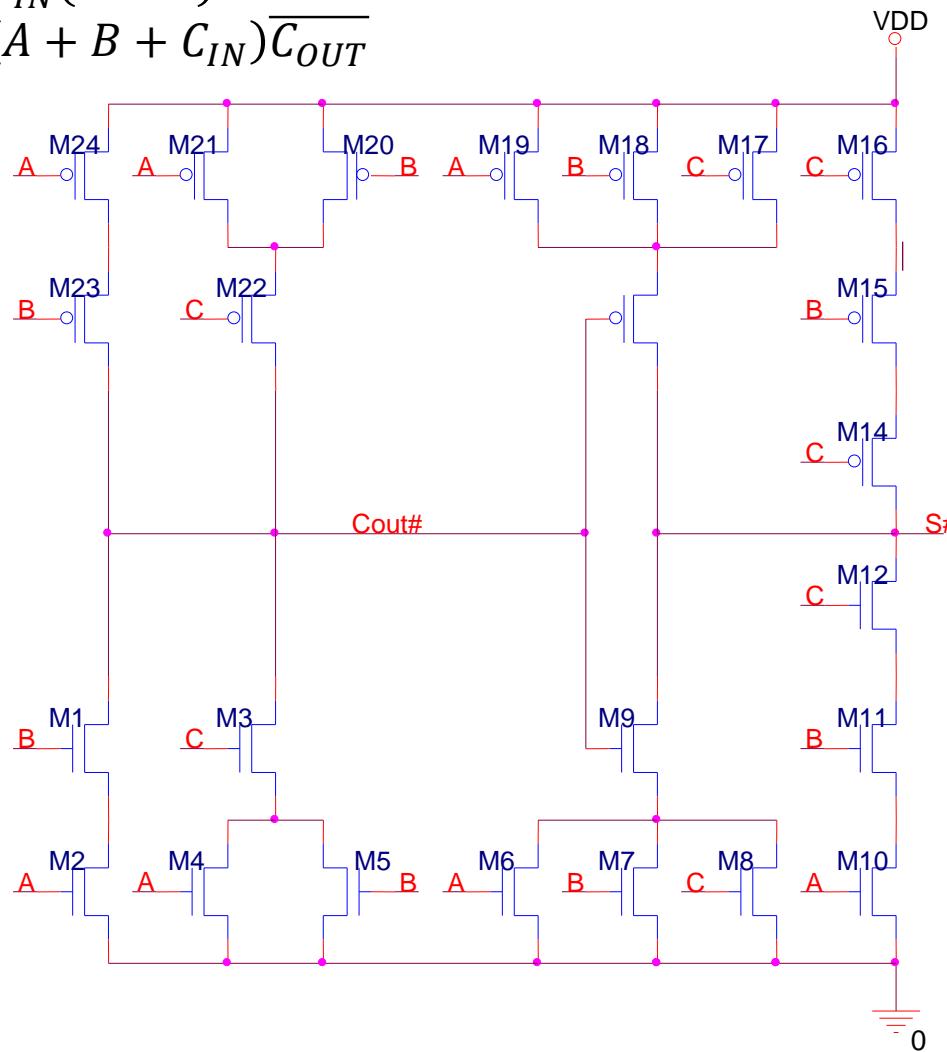
→ két komplex kapuval realizálható, de C_{OUT} 1, míg S 2 kapu késleltetéssel képződik.



További probléma, hogy a kimenetek negáltak → további inverterekre van szükség.

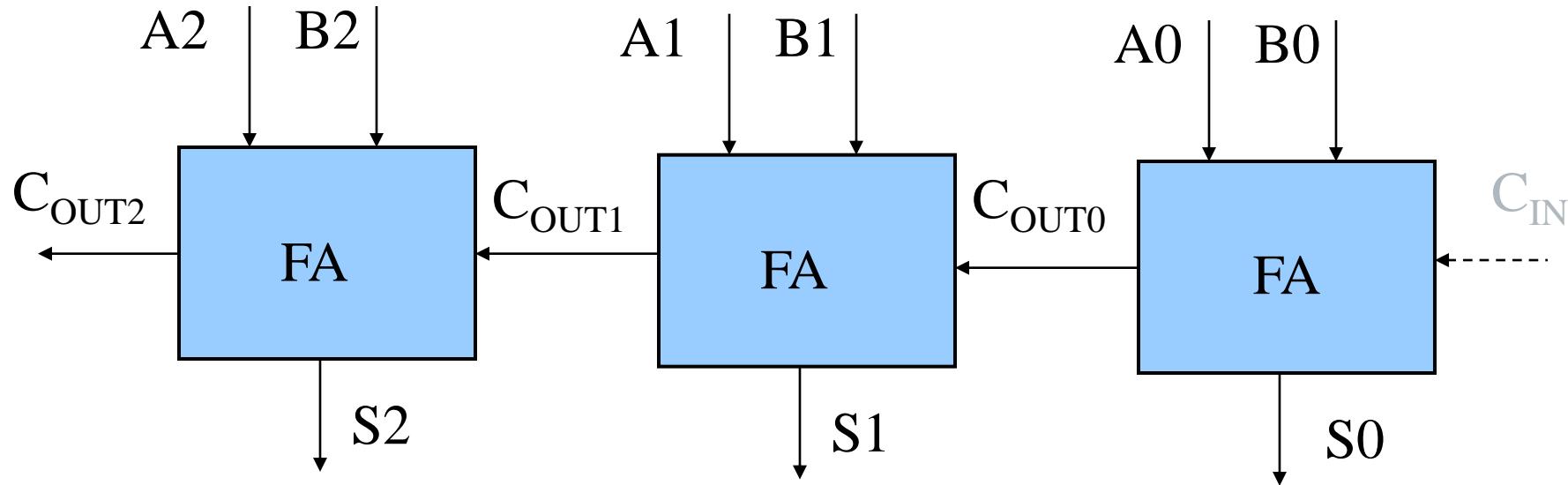
A teljes összeadó kapcsolási rajza

$$C_{OUT} = AB + C_{IN}(A + B)$$
$$S = ABC_{IN} + (A + B + C_{IN})\overline{C_{OUT}}$$



Ripple carry adder

Több bites szavak összeadására szolgáló soros összeadó



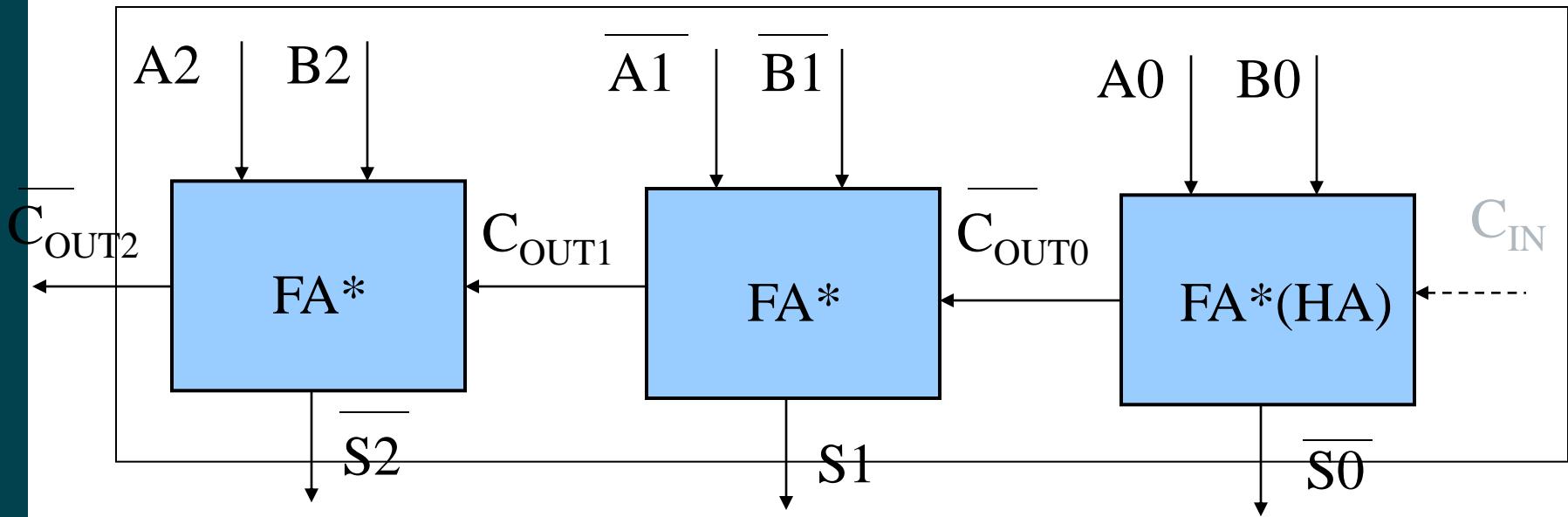
Problémái:

- ▶ Bit1 várni kényszerül C_{OUT0} -ra
- ▶ Bit2 várni kényszerül C_{OUT1} -re stb.
- ▶ A művelethez szükséges idő: $n \cdot C_{OUT}$ előállítási ideje

Ripple carry adder

Váltakozó logikájú összeadó

az inverterek megspórolhatók



Előny: gyorsabb, Hátrány: negált jelek

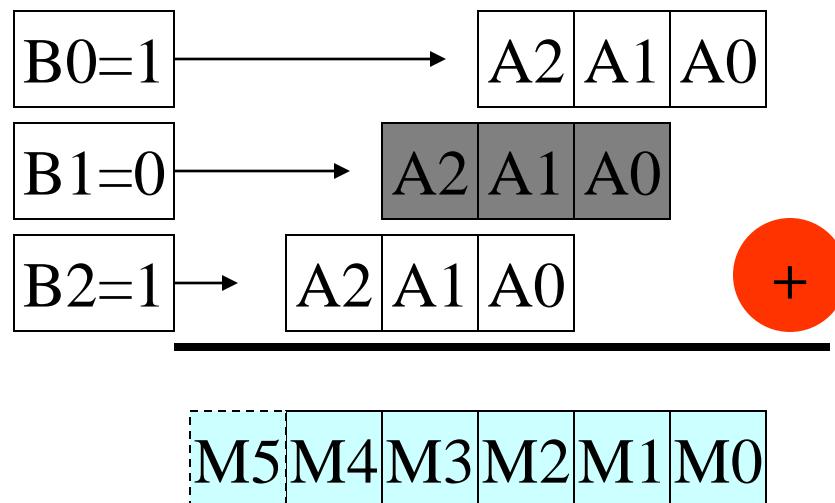
Gyorsabb megoldás: előre kiszámított Carry (look-ahead)
(az átvitelt előre generáljuk egyszerre több fokozatra)

Előny: gyorsabb, Hátrány: bonyolultabb

Aritmetikai elemek – Szorzók 1.

Kombinációs szorzók

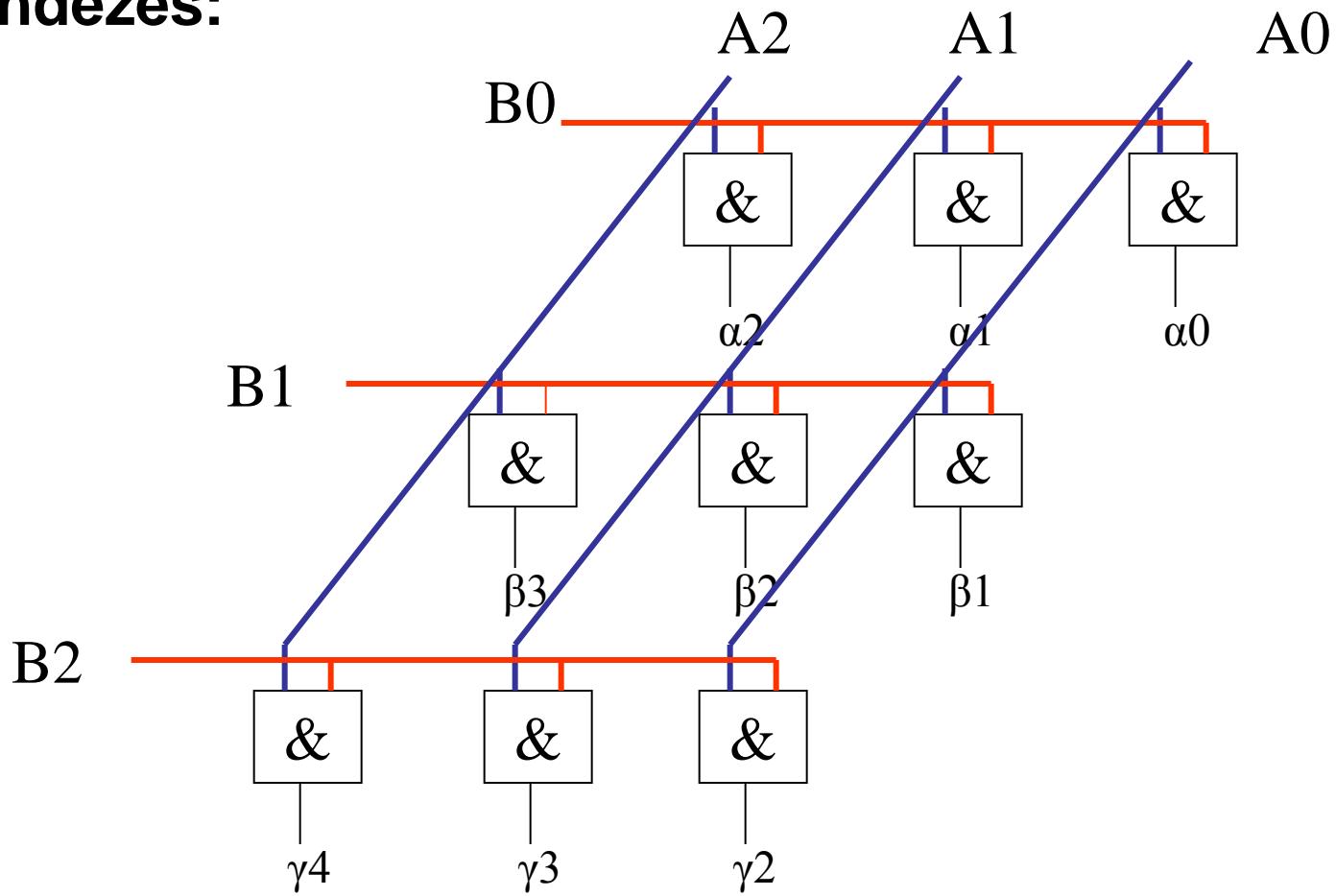
Az összeszorzandó számok A_n és B_n
Bináris számok szorzása



Ha B adott bitje 1, bekerül az összegbe, egyébként nem.

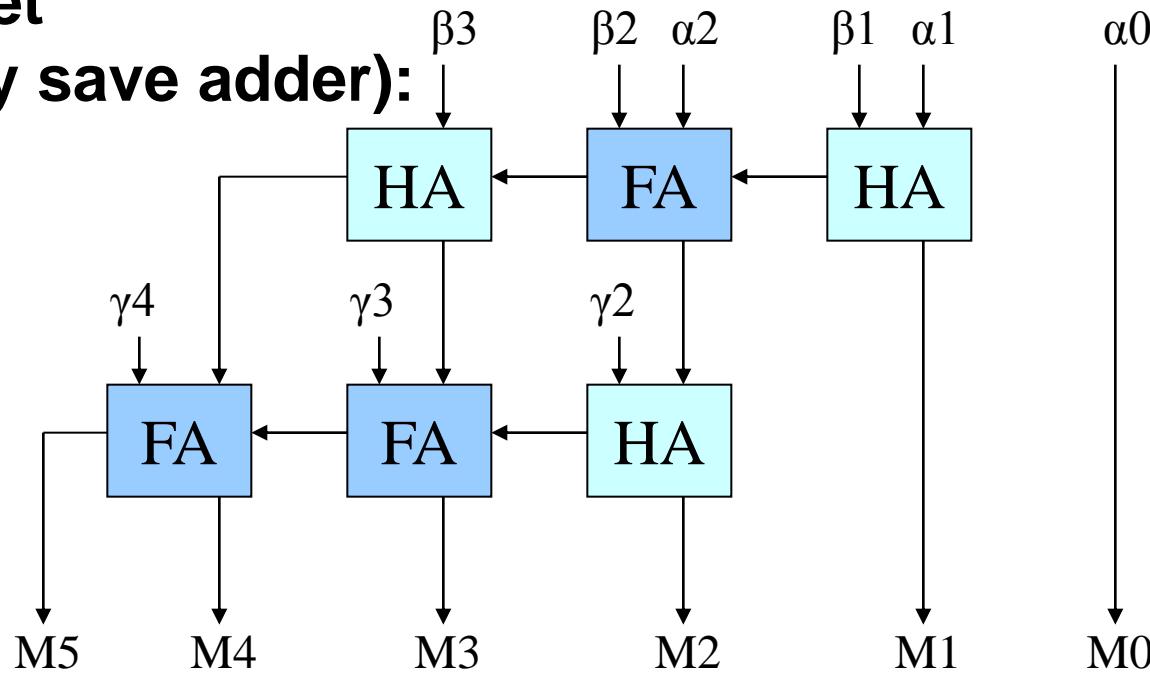
Aritmetikai elemek – Szorzók 2.

Az ezt megvalósító áramköri elrendezés:



Aritmetikai elemek – Szorzók 3.

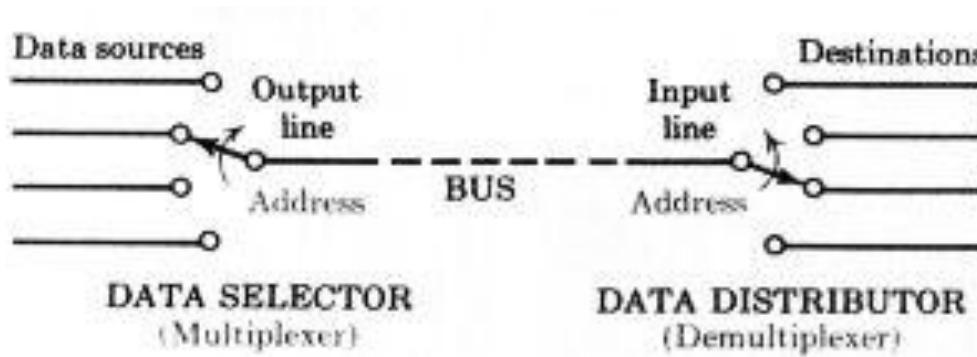
**Az összeadást elvégző további áramkör részlet
(carry save adder):**



kritikus művelet, sok gyorsító megoldás létezik

Meghajtó áramkörök 1.

- ▶ Bonyolult áramkörökben az információ továbbítás hosszú, közös adatvonalakon, ún. **buszokon** történik.

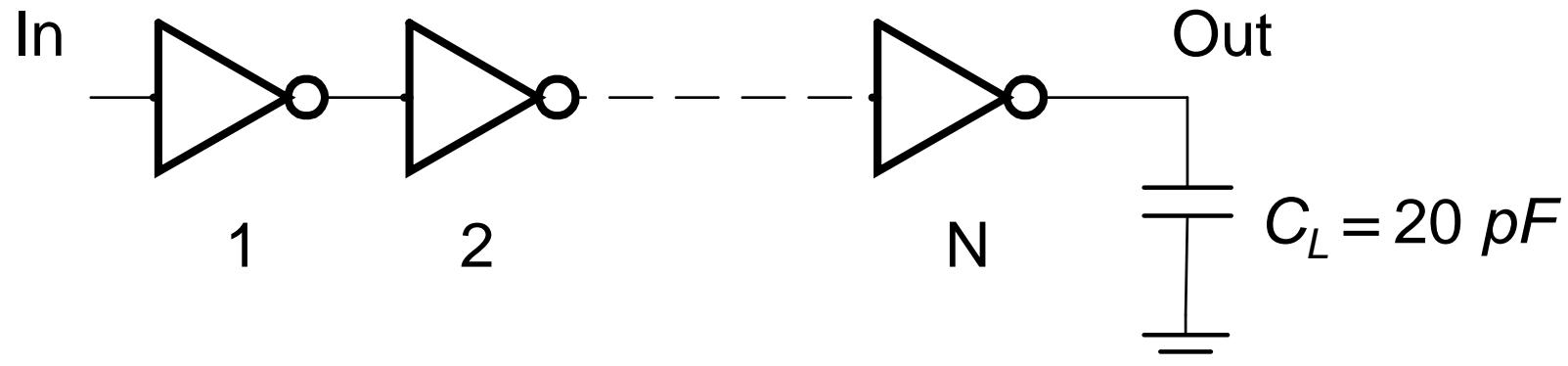


- ▶ Hosszú, azaz nagy szort kapacitású vonalak meghajtására (pl. belső adatbuszok vagy órajelek) **nagy kimeneti áramú kapuk (buffer)**.
- ▶ Rendszerint 3-állapotú kimenettel rendelkeznek (pl. buszok meghajtására).

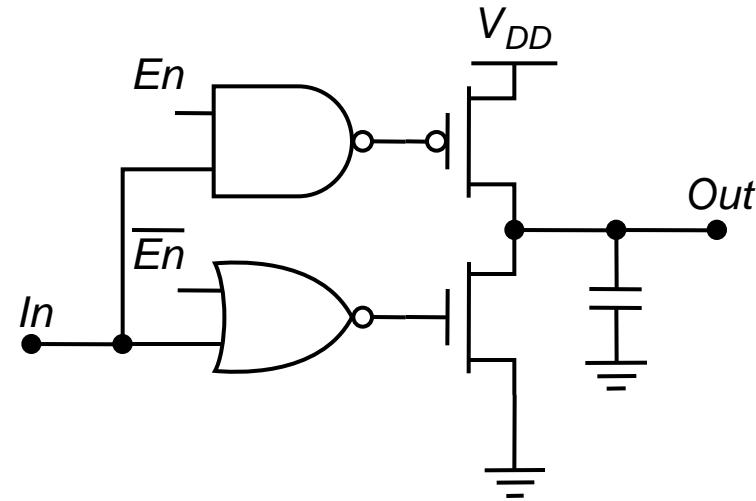
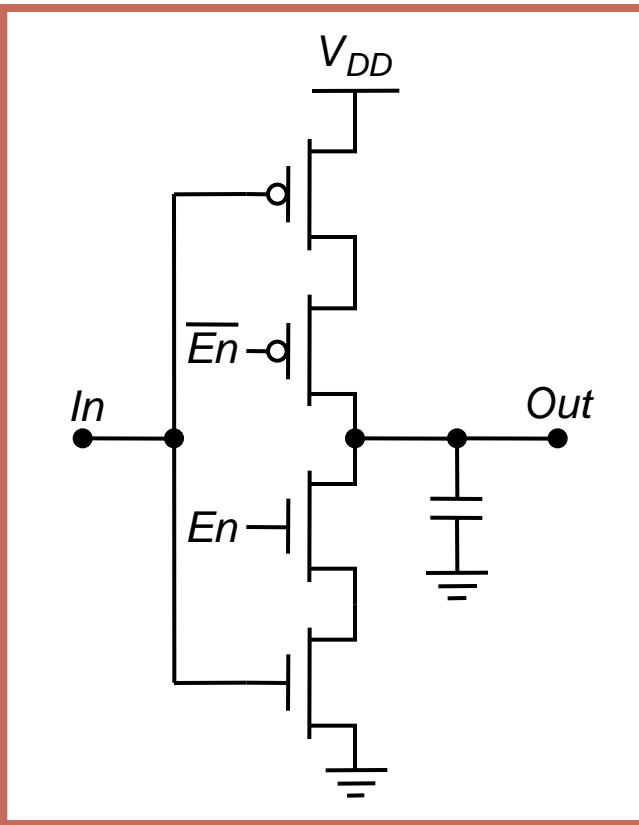
Meghajtó áramkörök 2.

Növekvő W/L arányú inverterek sorozata

- ▶ Nagy W/L arányú tranzisztorokkal lehetne nagy áramokat biztosítani, de az adódó nagyon nagy méretek mellett a buffer bemeneti kapacitása is nagy lenne → közönséges kapuk nem tudnák meghajtani.
- ▶ A probléma pl. egyre növekvő W/L arányú inverterek sorozatával oldható meg (pl. $W/L = 5, 20, 80\dots$)



Tristate buffer



Increased output drive

- ▶ $En=0$ esetén a kimenet nagyimpedanciás

I/O áramkörök

Kimeneti áramkörök

- ▶ Általában olyan 3-állapotú bufferek, ahol az áramköröket úgy egészítik ki, hogy egyúttal a kimenő adat tárolását is elvégezzék
→ általában D-tárolóvá kiegészítve.

Bemeneti áramkörök

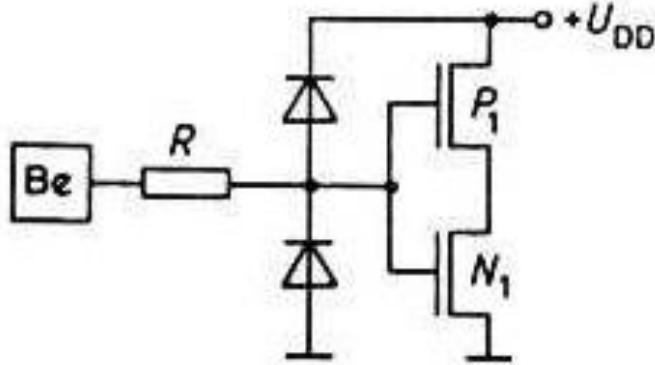
- ▶ Túlfeszültség védelmet látnak el. (ESD protection)
ui. az IC-t megérintő ember sztatikus feltöltődéséből származó kisütőáram (néhány kV, néhány μ A) a bemeneti tranzisztor vékony gate oxid-ját átüti és tönkreteszzi.
- ▶ A gate-et ellenállásokból és diódákból álló hálózattal védik.



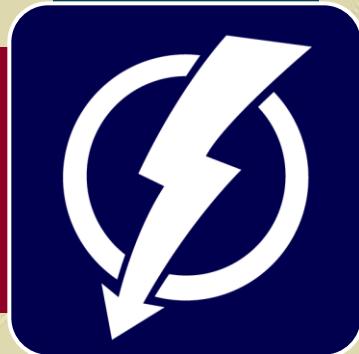
Bemeneti védelem

CMOS áramkörök bemeneti védelme

A tápfeszültségnél nagyobb, vagy negatív feszültségre a diódák kinyitnak így védi meg a bemenetet.

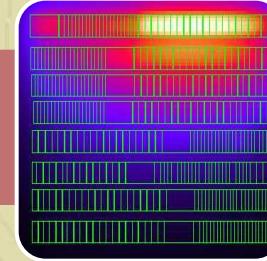
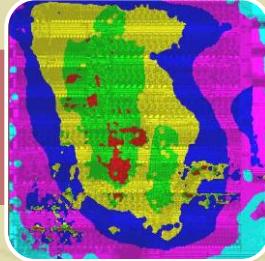
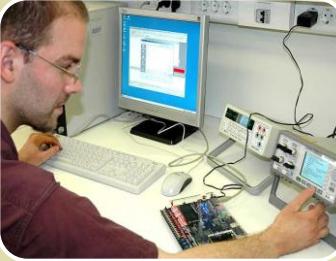


Két dióda
nyitókarakterisztikáját
kihasználó védelem



Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi
Egyetem

Elektronikus Eszközök Tanszéke

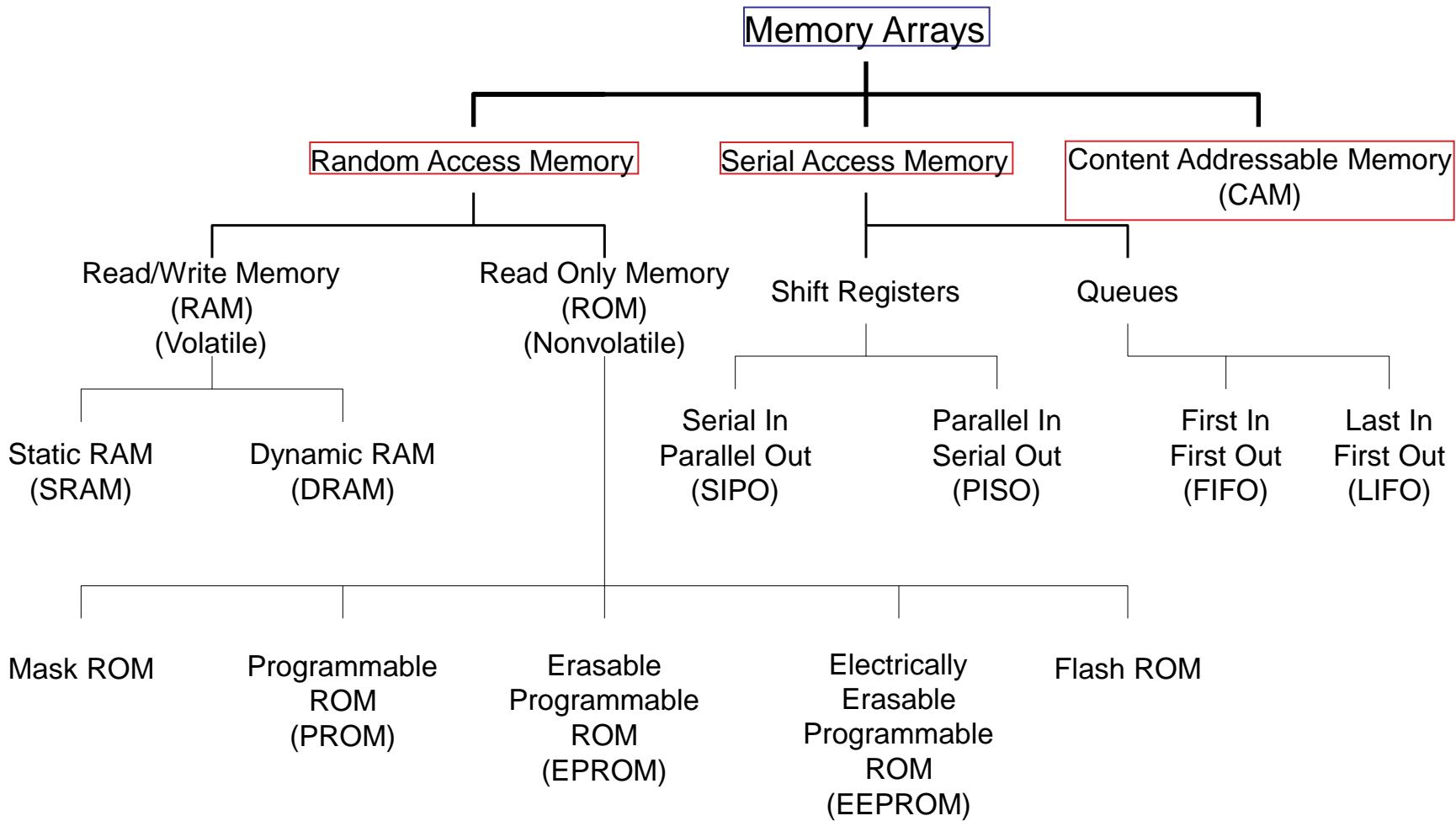


Mai témák

- ▶ Memóriákkal kapcsolatos alapfogalmak
- ▶ ROM memóriák
 - ROM, PROM, EPROM, EEPROM megvalósítások
- ▶ RAM memóriák
 - SRAM, DRAM megvalósítások
 - Frissítési módok



Memóriák összefoglalása



A memóriák szervezése: cellamátrix

Cellamátrix

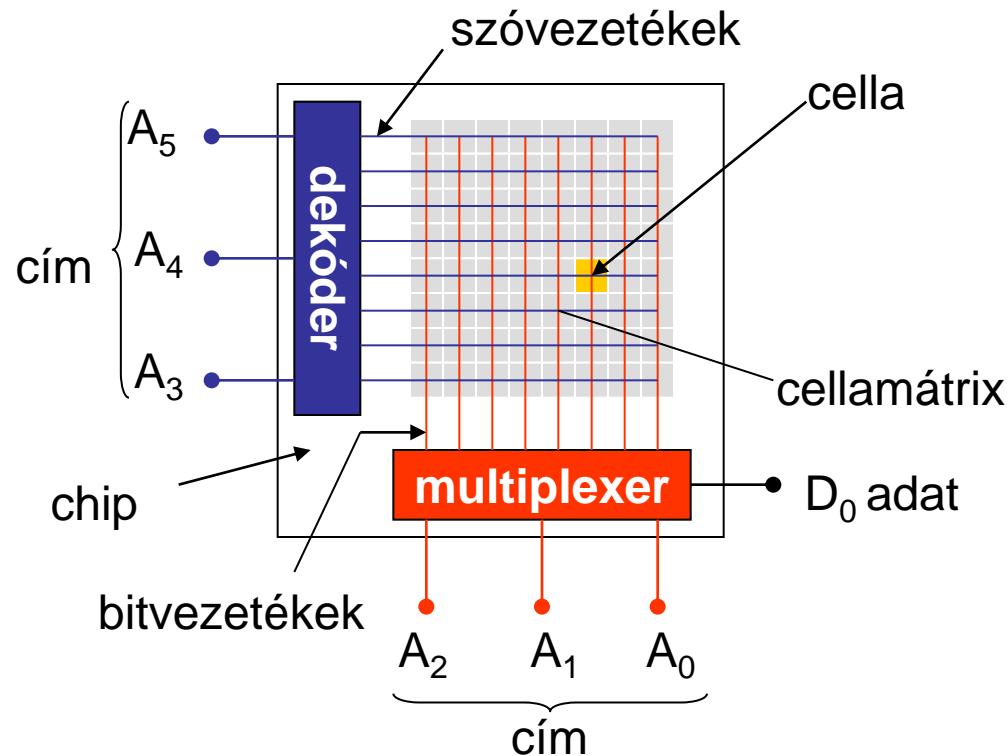
cella: 1 bit információt tárol

vízszintes vezetékek:
szóvezeték

a cellamátrix valamelyik sorának kijelölése

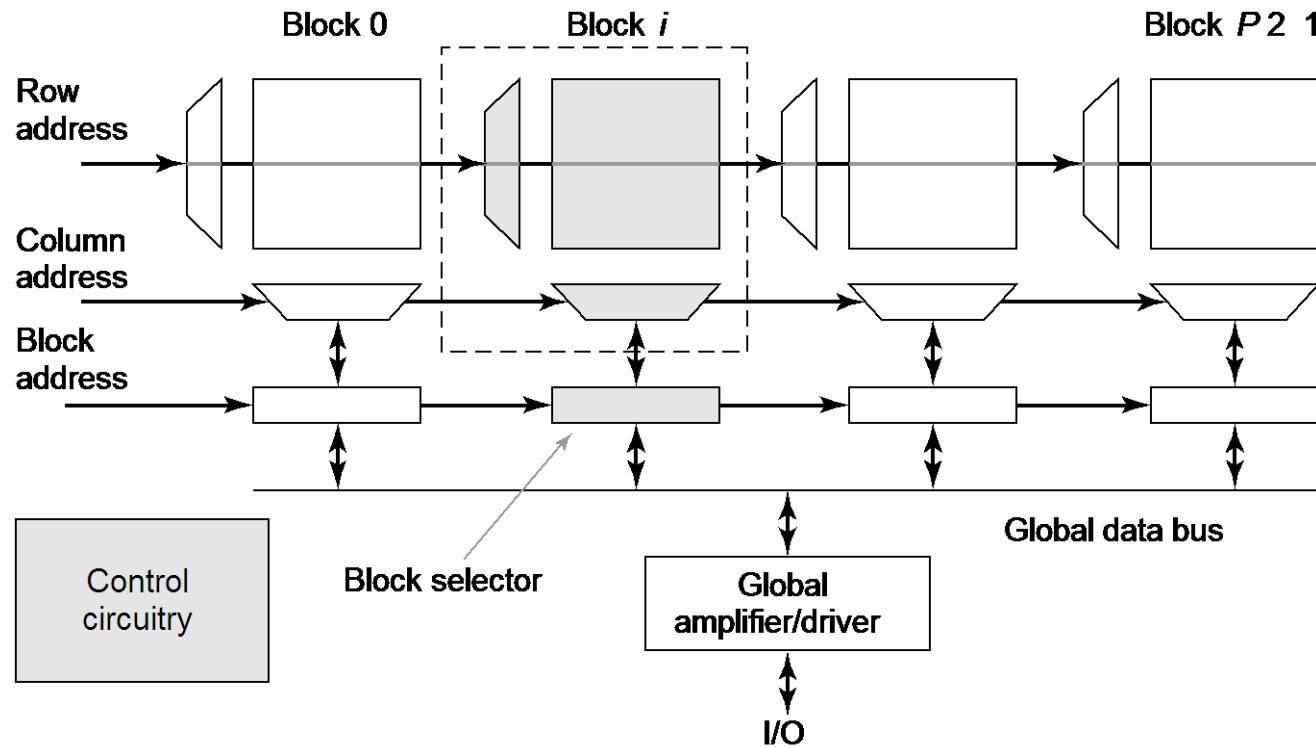
függőleges vezetékek:
bitvezeték

ezen keresztül lehet a kijelölt sor celláit írni vagy olvasni

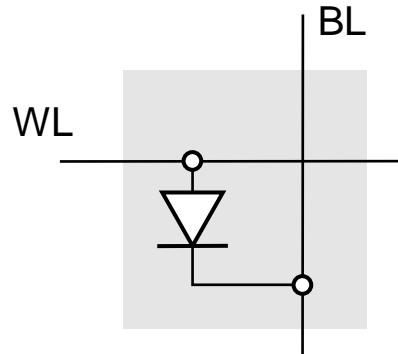


- ▶ a szóvezetékeket mindig egy dekóder hajtja meg,
- ▶ a bitvezetékekhez csatlakozó áramkör az **író/olvasó erősítő**, ami a kiolvasás során multiplexerként működik

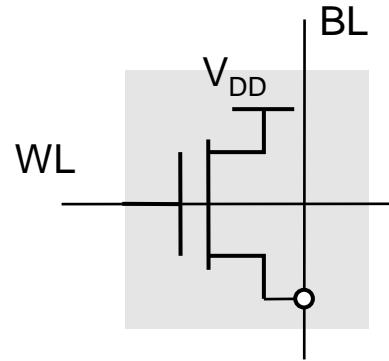
Blokk szervezésű memória (bank)



ROM memóriák elemi cellái

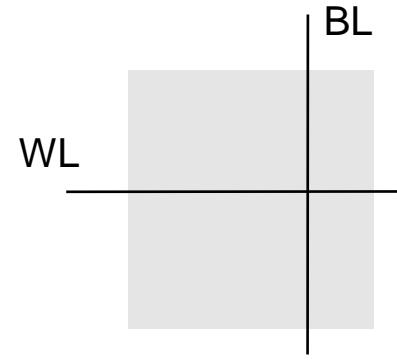


1



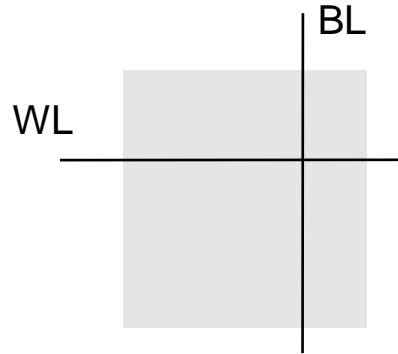
WL

WL



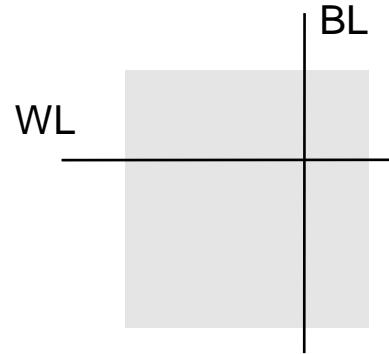
WL

WL

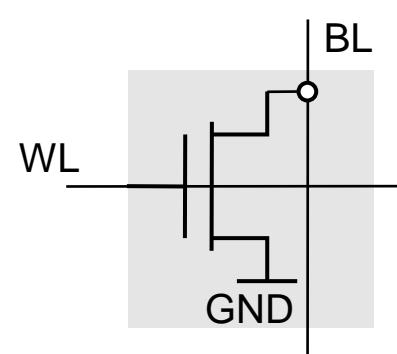


0

Diode ROM



MOS ROM 1



MOS ROM 2

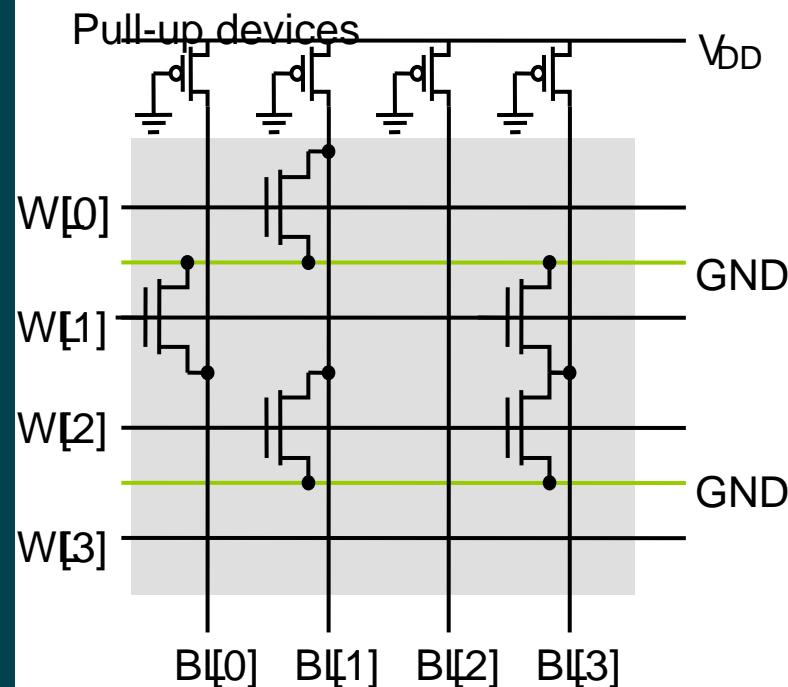
► Dióda (bipoláris tech.), vagy MOS tranzisztor

Maszk programozott ROM – NOR típus

Az „igazi” ROM

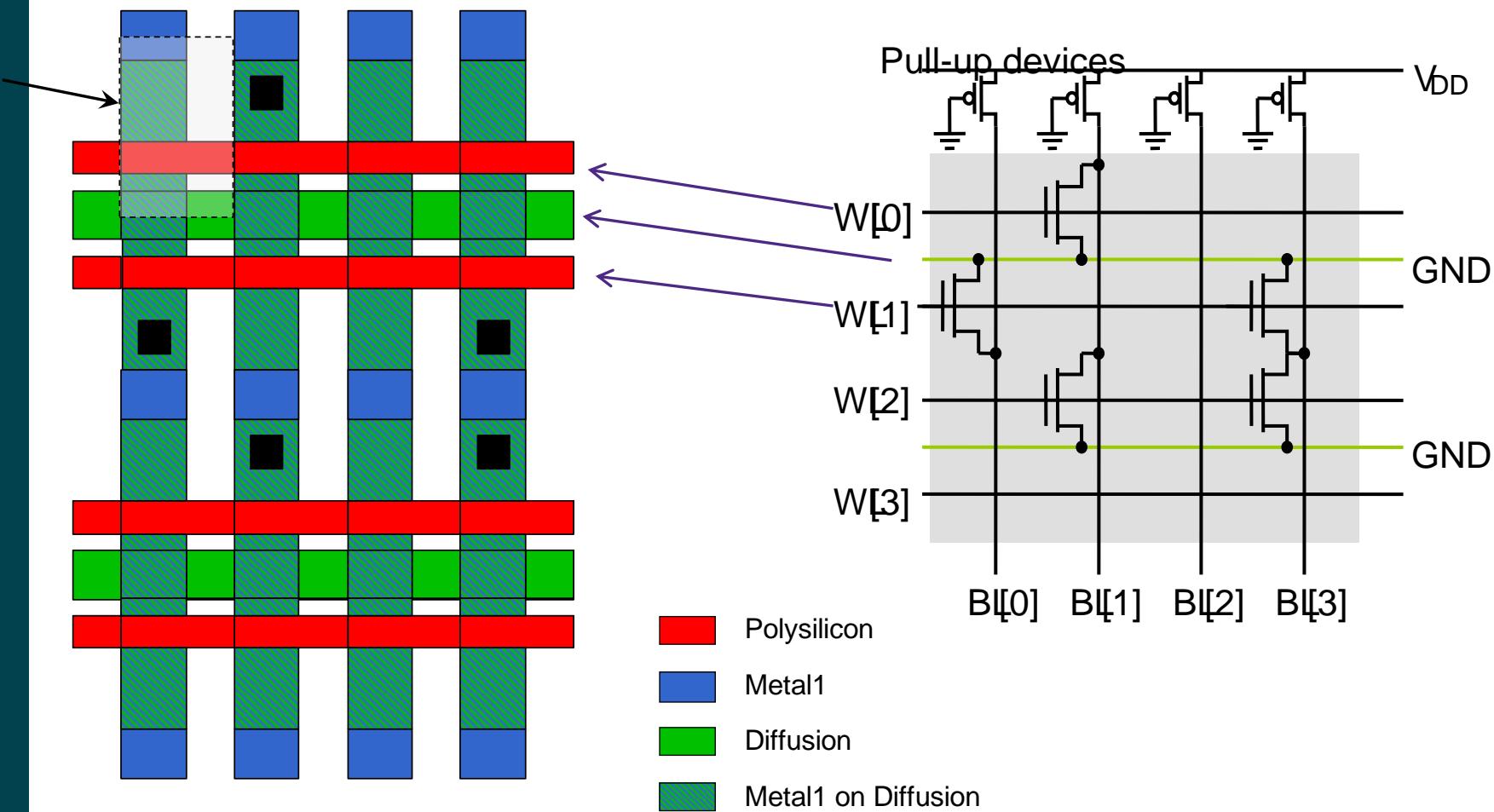
Gyártáskor kerül bele az információ

(nagyon nagy sorozatú gyártásnál, ill. egyéb chipeken, pl. mikroprocesszorban look-up táblázatok készülnek így)



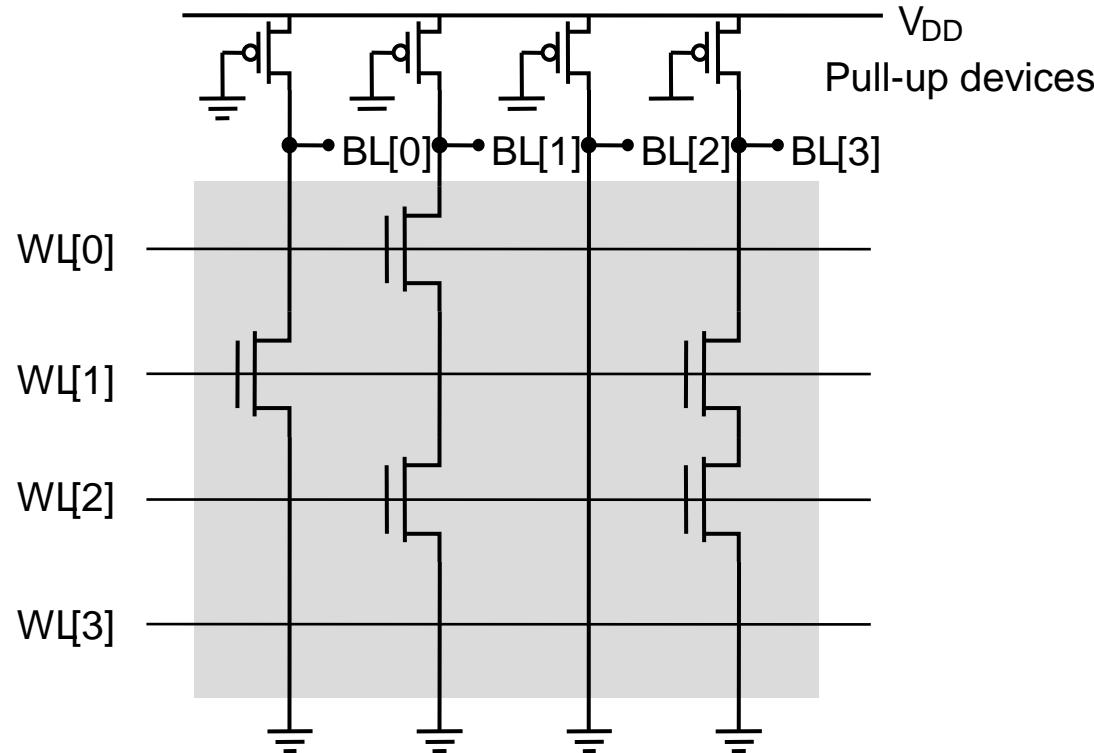
- ▶ Az információt az tárolja, hogy az adott helyen van-e tranzisztor, vagy sem.
- ▶ **Minden oszlop egy NOR-kapu** (a p tranzisztor a passzív terhelés)
- ▶ Egy szóvezeték megcímzésekor, **ha van a szó és a bitvonal között tranzisztor, a kimenet alacsony** szintű, egyébként logikai 1.

NOR CMOS ROM - layout



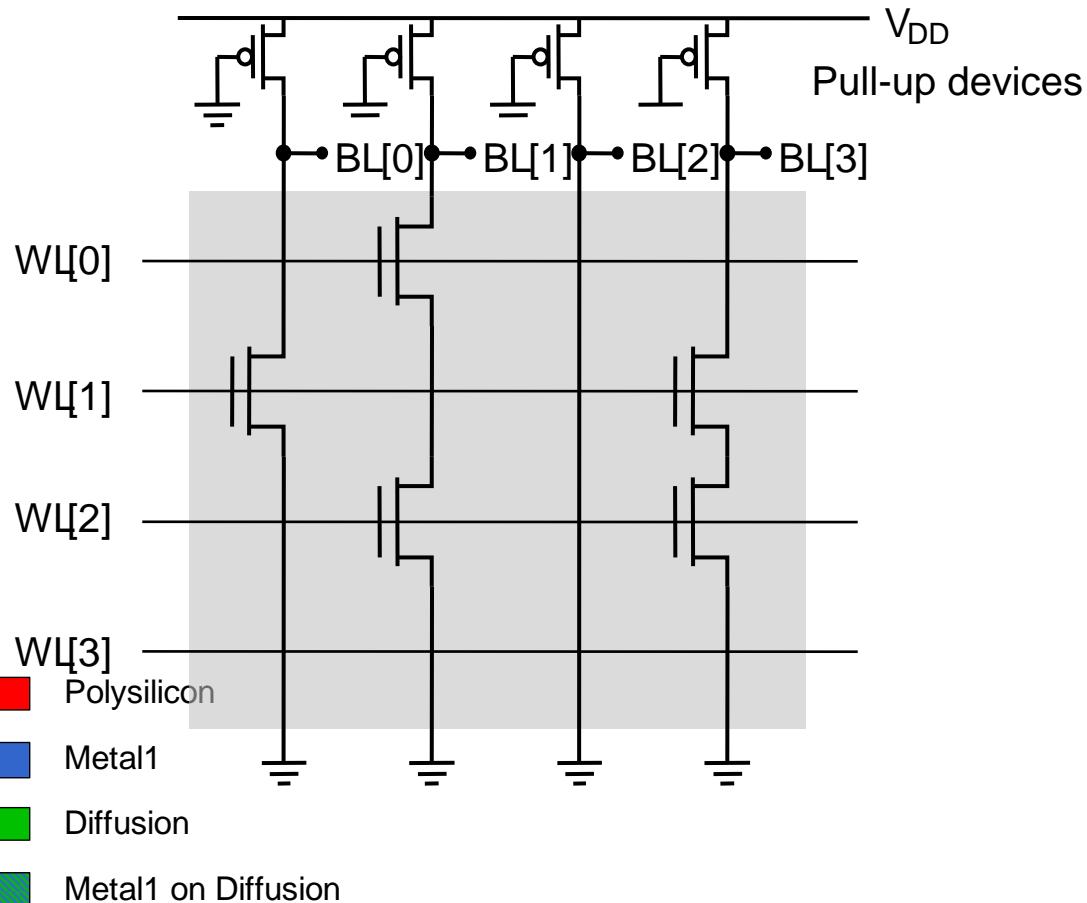
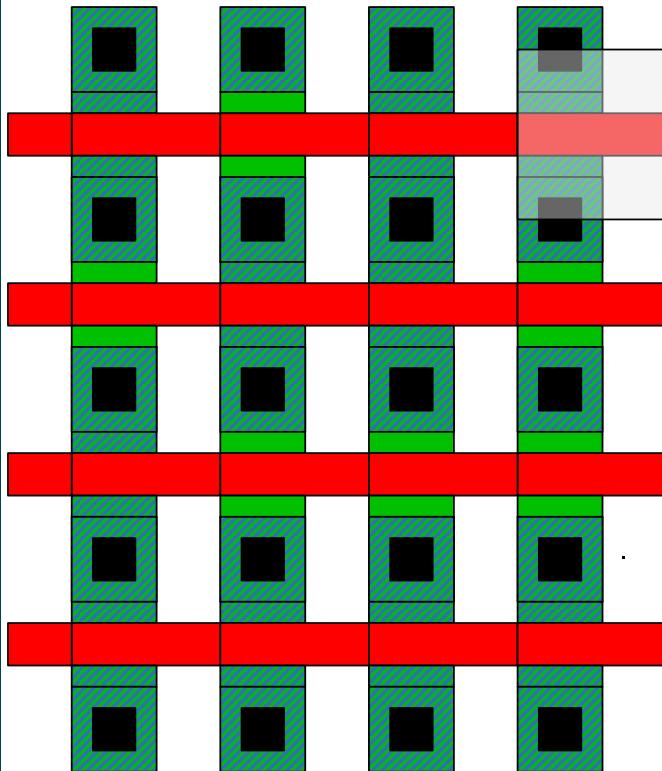
► A cella méret nagy, mivel a földet be kell kötni...

NAND CMOS ROM



- ▶ Olvasáskor minden szóvon al 1, kivéve a megcímzett.
- ▶ Ha nincs tranzisztor, a tárolt érték 0, egyébként 1

NAND CMOS ROM - layout



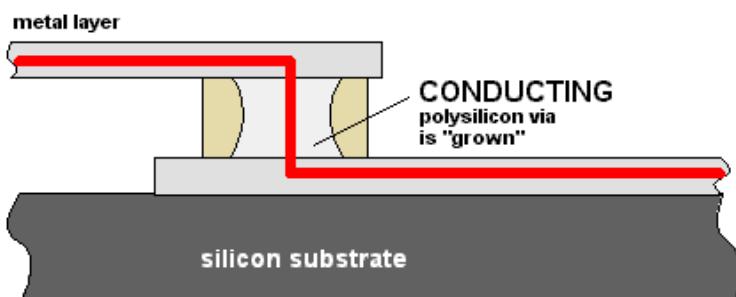
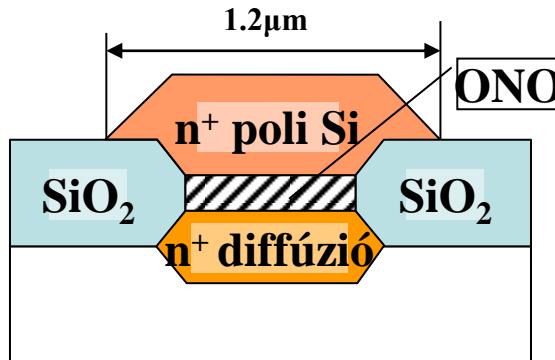
- ▶ A cellában nem kell bekötni a földet, így a cellaméret kisebb, mint NOR esetben
- ▶ A sorbakapcsolt tranzisztorok miatt lassabb mint a NOR
- ▶ Hol van elrontva a layout?

Felhasználó által programozható ROM PROM

Típus	Techn.	Programozás	Törlés
PROM	Bipoláris CMOS	elektronikus, egyszer	-
EPROM	CMOS	elektronikus	UV fénnyel
EEPROM	CMOS	elektronikus	elektronikusan, byte-onként
Flash EEPROM	CMOS	elektronikus	elektronikusan, blokkonként

PROM CMOS technológiával

- ▶ CMOS PROM-okban az ún. „anti-fuse” technológiát alkalmazzák
- ▶ „Anti-fuse” (a biztosíték tagadása ;-) egy olyan eszköz, amelyik akkor vezeti az áramot, ha kiégetjük, egyébként programozatlanul szakadásként viselkedik.
- ▶ (FPGA és egyéb programozható eszközökben is használt...)



▶ PLICE

- Az n⁺ diffúzió és a n⁺ poli-Si között egy vékony, 10 nm-es dielektrikum réteg található.(oxid-nitrogén-oxid)
- A kb. 16V, 5 mA, 1 ns impulzus ezt a dielektrikumot átütíti, a hő hatására megolvad és összeköttetés jön létre a poliSi és a diffúziós réteg között.

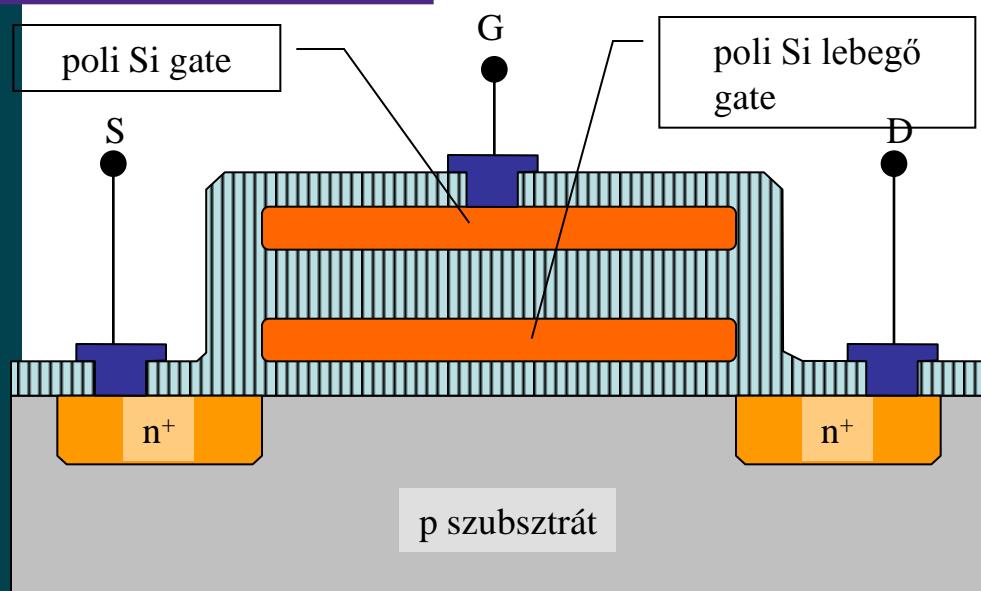
▪ ViaLink

- Két huzalozási réteg közötti átkötési területet, azaz viát amorf szilíciummal töltenek fel. Ez szigetel, de nagy térerősségnél átüt, megolvad és poliszilíciummá kristályosodik át, ami viszont már elektromosan vezet.

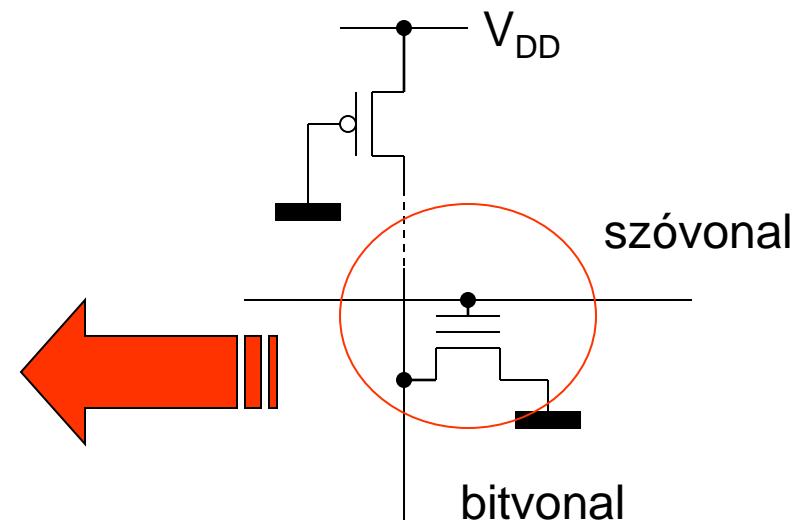
EPROM (NOR típusú)

- ▶ Elektronikusan programozható, UV fénnyel törölhető.
- ▶ Az információtároló elem: egy ún. **FAMOS** tranzisztor {Floating gate Avalanche MOS}

Keresztmetszete



A cella felépítése



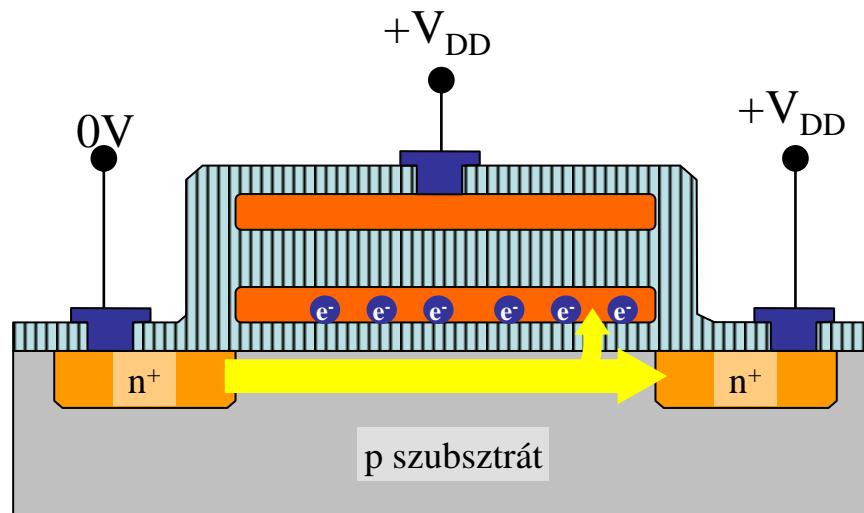
A MOS tranzisztorban egy további „lebegő” (nincs sehova kötve) gate van kialakítva.

EPROM – Programozás

A source-t földeljük, a gate-re és a drain-re nagy pozitív feszültséget kapcsolunk. (kb. 12 V)

→ letörés jön létre a MOS tranzisztor csatornájában

→ a nagy energiájú elektronok átjutnak az oxid potenciálján (3,2 eV) és a lebegő elektródára kerülnek. A folyamat önszabályozó, mert a küszöbfeszültség megnövekszik, így az áram csökken.

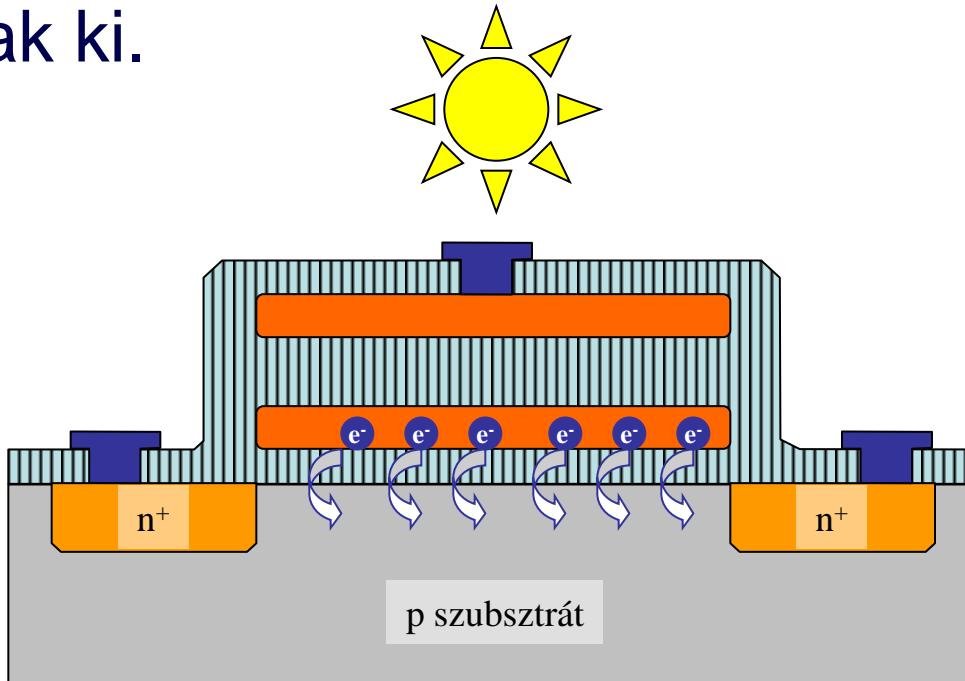


A lebegő elektródán a negatív töltés évekig megmarad. (10 évet garantálnak a gyártók általában) **Emiatt a tranzisztor küszöbfeszültsége megnövekszik, és akkor sem nyit ki, ha a gate-re tápfeszültséget kapcsolunk.**

Programozás nélkül az eszköz úgy viselkedik, mint egy közönséges MOS tranzisztor.

EPROM – Törlés

- ▶ Az EPROM tok tetején egy átlátszó ablakot alakítanak ki.

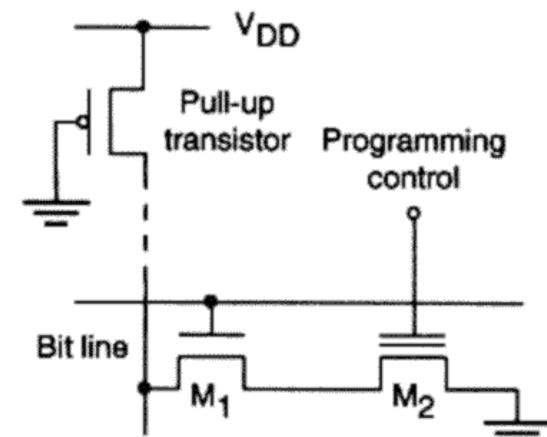
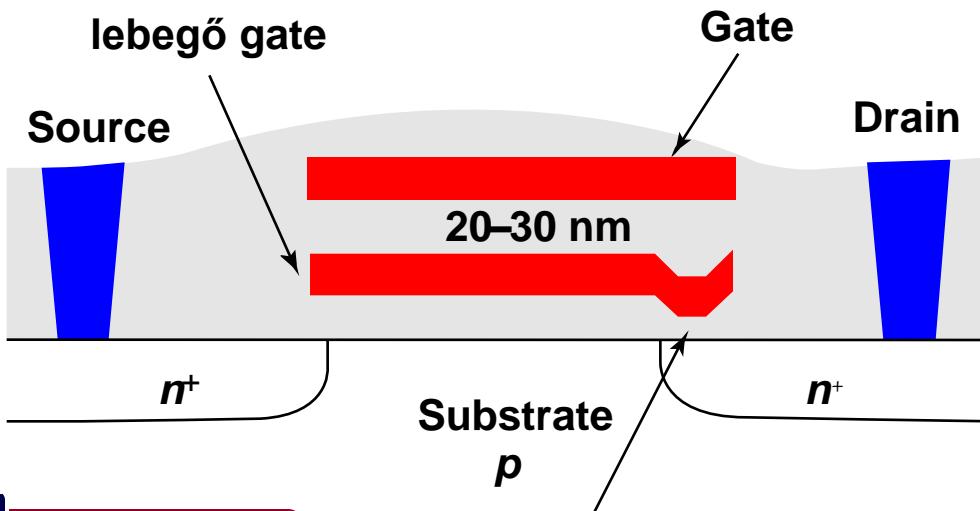


- ▶ Nagy energiájú UV fénnnyel a lebegő elektródáról eltávolíthatjuk az elektronokat. Kb. 20 perc alatt a folyamat lezárul és az eszköz újraprogramozható.

EEPROM (E²PROM) 1.

Elektromosan programozható és törölhető

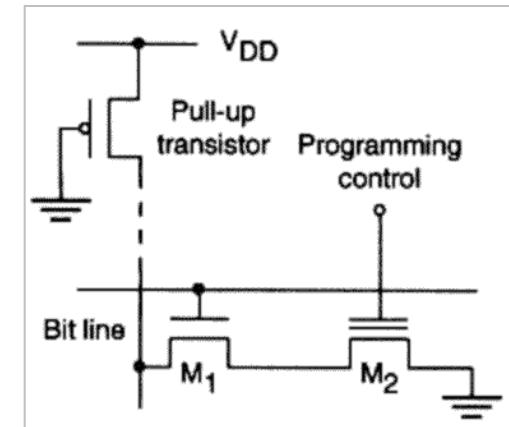
- ▶ Egy cella 2 tranzisztorból áll, egy kiválasztó és egy speciális lebegő gate-es tranzisztorból.
- ▶ A FAMOS tranzisztortól annyiban tér el, hogy **a gate a drain fölé nyúlik**, a lebegő gate-et a draintől egy **vékony, 5-10 nm oxid** választja el → az elektronok ezen a vékony oxidon keresztüljuthatnak. (alagútjelenség, tunnel hatás)



EEPROM 2.

► Programozás

- A gate-et földeljük, a drainre nagy pozitív feszültséget kapcsolunk.
- Az elektronok a lebegő gate-ről a drain felé „tunneleznek”,
- A lebegő gate pozitív töltésűvé válik, ez a tranzisztor küszöbfeszültségét lecsökkenti, tehát a tranzisztor 0V gate-source feszültség mellett is vezet.



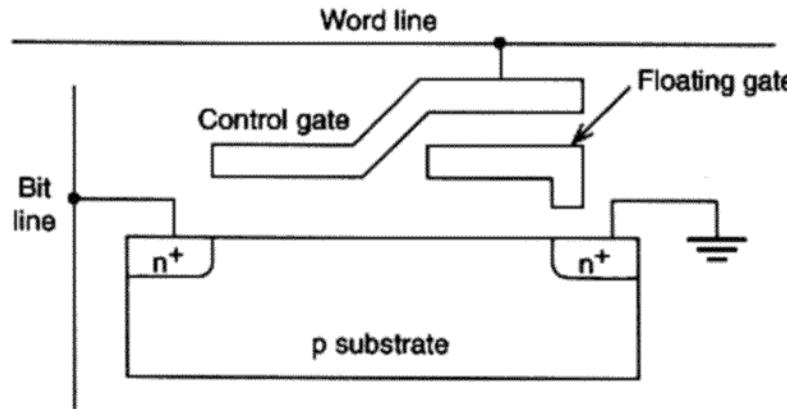
► Törlés

- Pozitív feszültséget kapcsolunk a gate-re és a drain-t földeljük.
- Ellenkező irányú tunneláram indul a lebegő gate felé.
- A lebegő gate negatív töltésűvé válik, így a küszöbfeszültség növekszik, a tranzisztor nem vezet.

► A vezérlő gate-et csak programozáskor használjuk, a kiolvasáshoz kell egy „hagyományos” MOS tranzisztor.

Flash EEPROM

A két tranzisztoros EEPROM cellát egy különleges tranzisztor helyettesíti, így a sűrűség összemérhető az EEPROM sűrűségével.



Programozás: mint az EEPROM cellánál, lavinaletöréssel.

Törlés: mint az EEPROM-nál, tunnelezéssel.

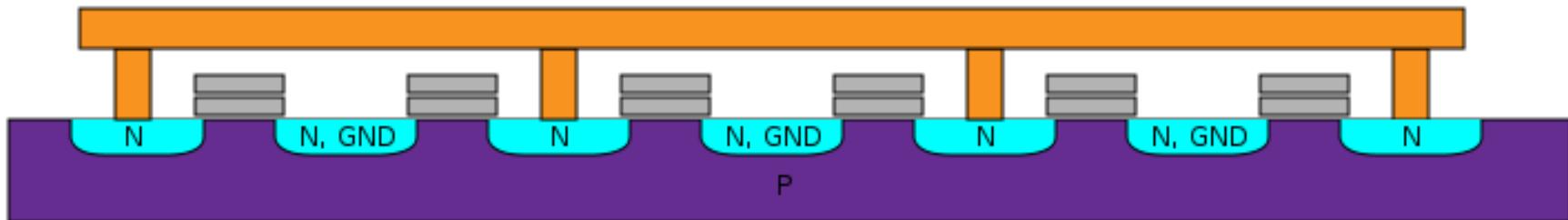
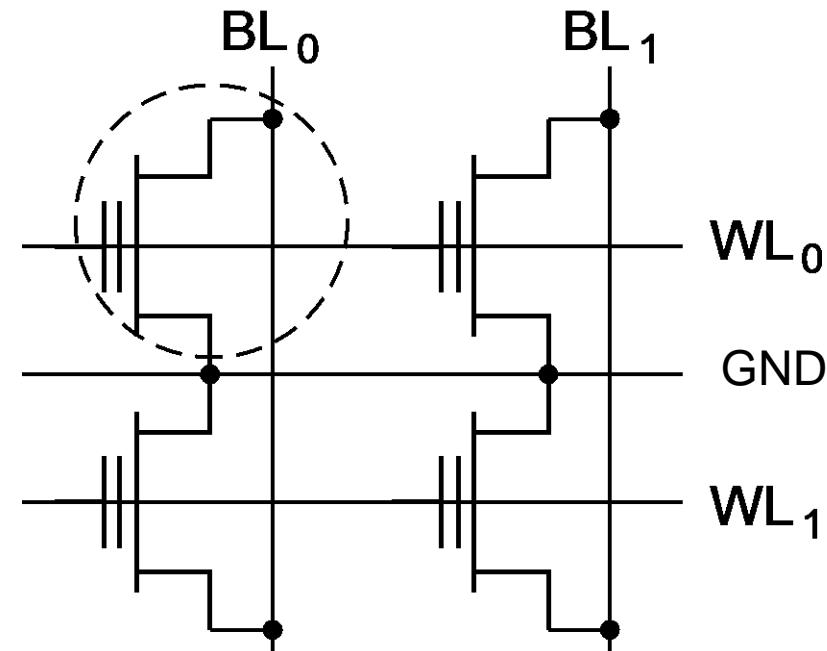
A programozás – törlés a tranzisztor küszöbfeszültségének változtatását jelenti.

SLC – (single level cell) két elkülöníthető V_T

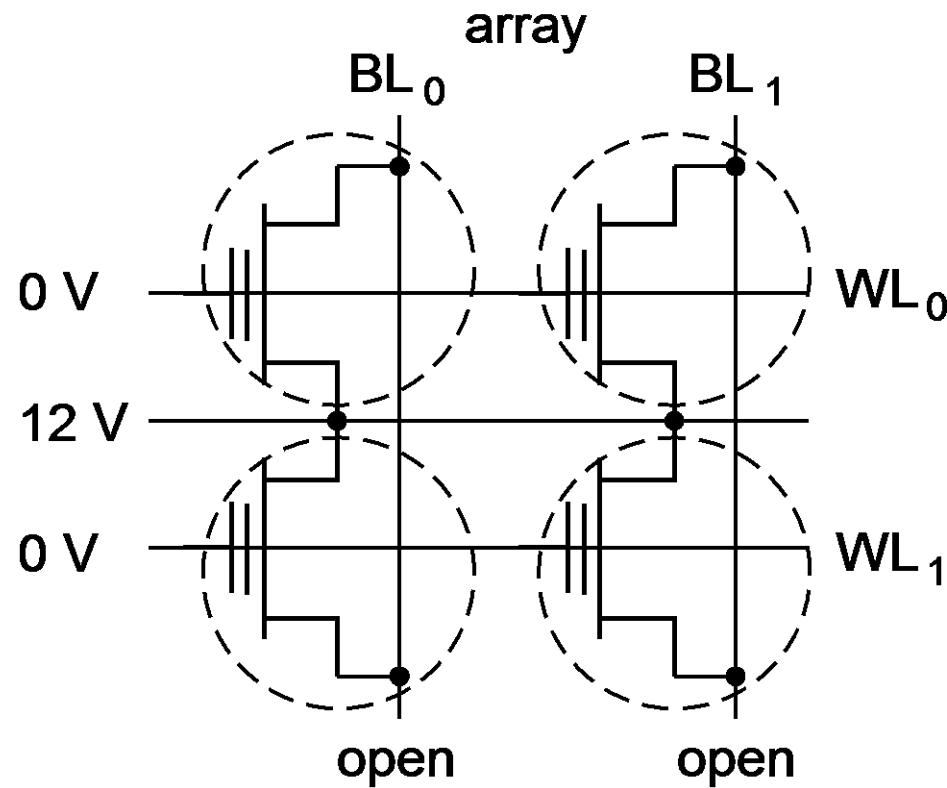
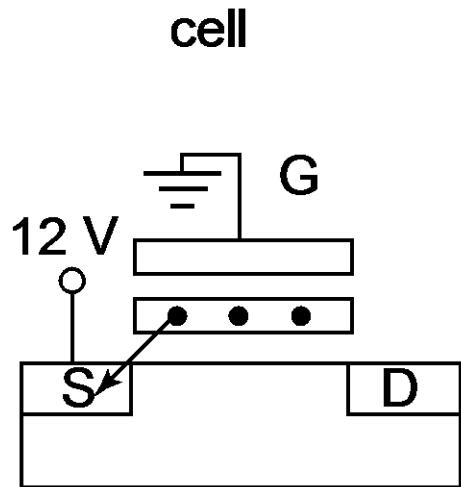
MLC – (multi level cell) több, 4 vagy 8 különböző állapot.

NOR Flash

- ▶ A helytakarékosság miatt két egymást követő szóvonalhoz tartozó tranzisztor „szembe fordul”.
- ▶ A kiolvasás úgy történik, ahogy mask programozott ROM esetében.
- ▶ Az olvasás véletlen elérésű.

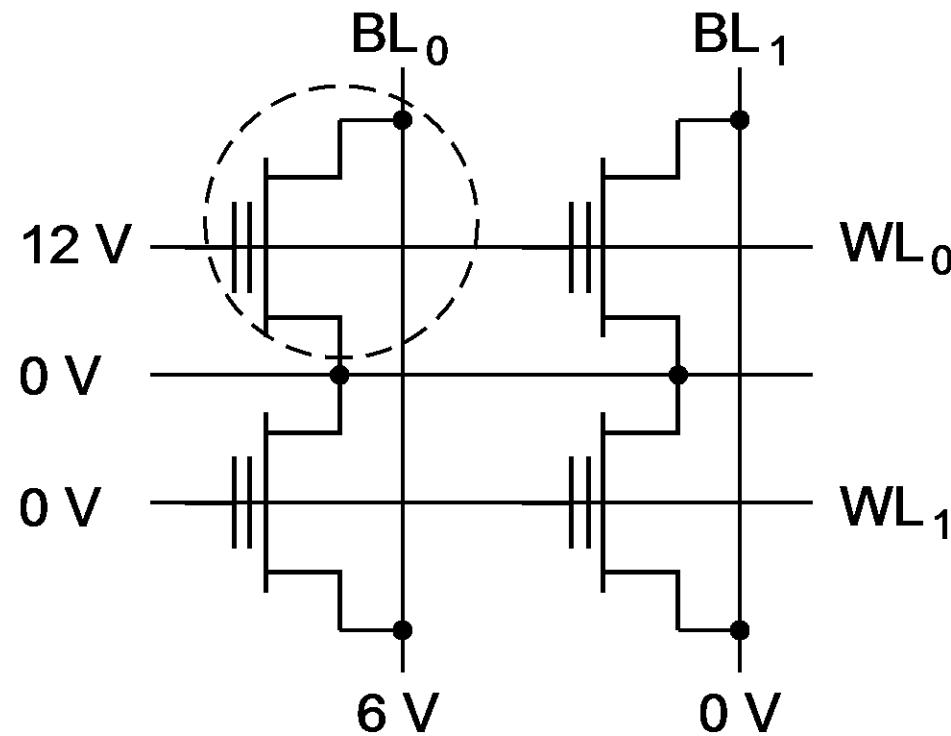
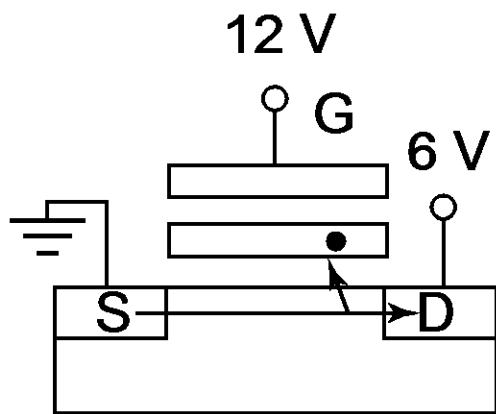


NOR Flash, törlés



- ▶ A source-ra kapcsolt nagy pozitív feszültség hatására a lebegő gate elektronjai tunnelezéssel távoznak

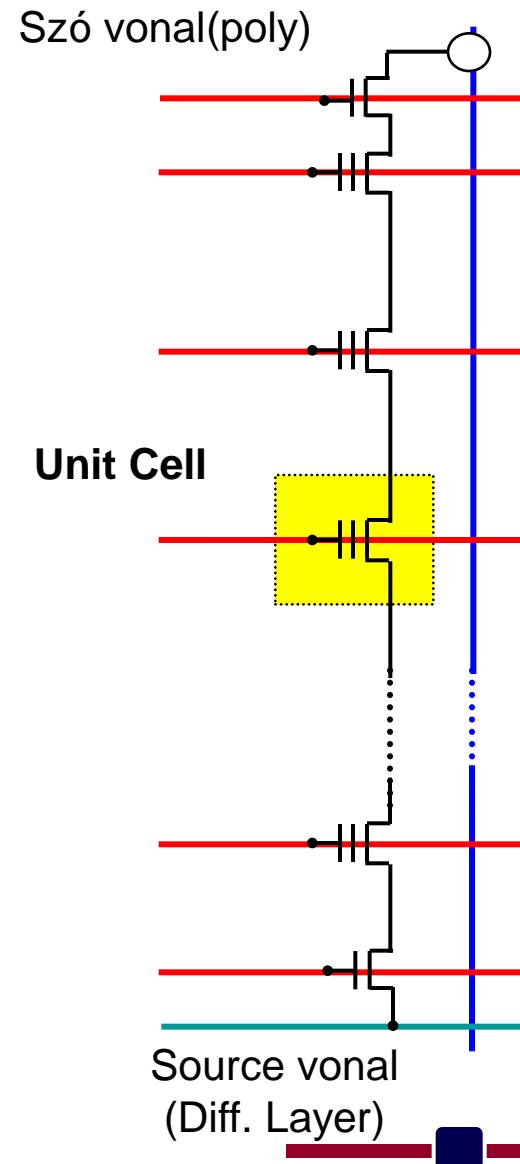
NOR flash, programozás



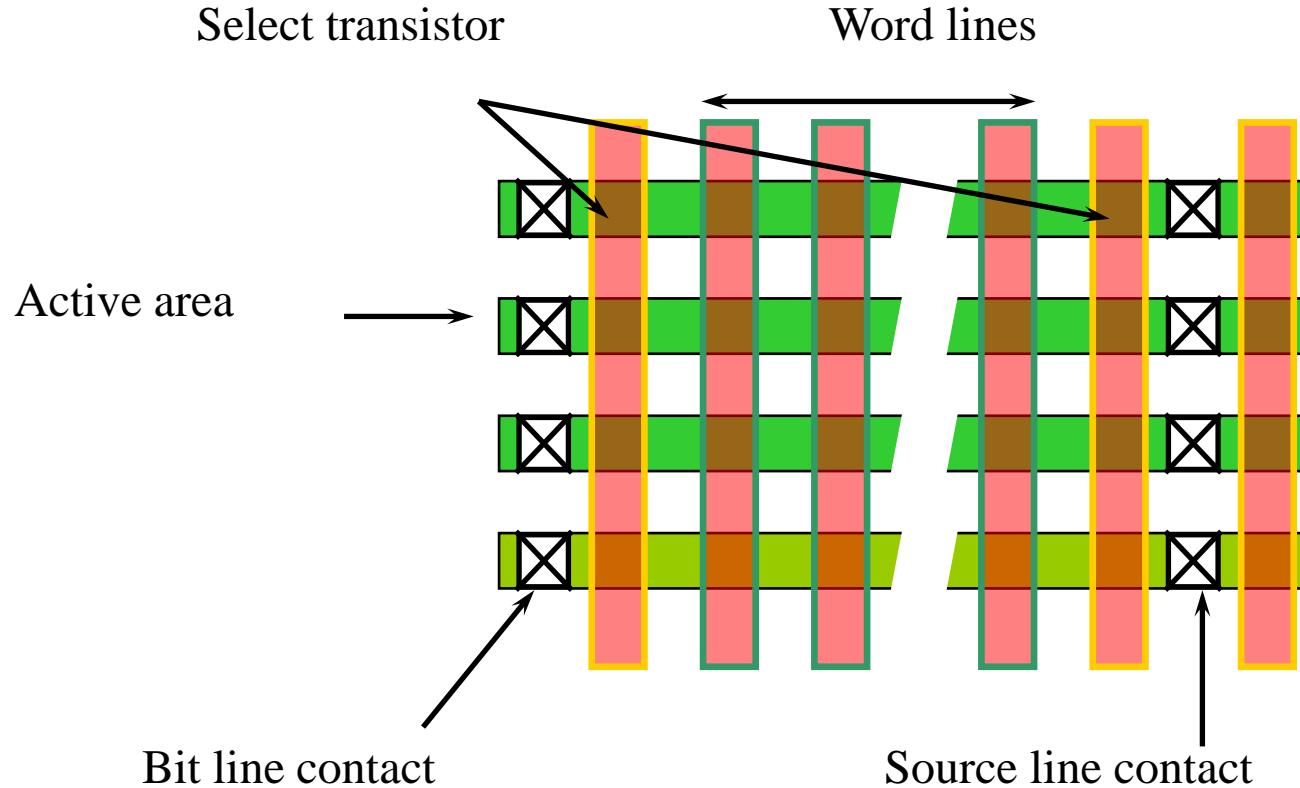
- ▶ Programozáskor lavaletaörést hoznak létre a drain-nél, a nagyenergiájú elektronok a lebegő gate-re kerülnek.

NAND Flash

- ▶ Nagyobb kapacitású, mivel a tranzisztorok sorba vannak kötve, és több sorbakötött tranzisztorhoz tartozik egy bitvonal.
- ▶ A sor egy aktiváló tranzisztor nyitja és zárja.
- ▶ A kiolvasás, programozás jóval bonyolultabb
 - Pl. SLC esetén az olvasás:
 - az aktivált cellán kívül az összes szóvonalat magas feszültségre kapcsolják (ezek a tranzisztorok tehát mindenkorban vezetnek), az aktivált cellára a „0” értéknél kicsit nagyobb gate feszültséget kapcsolnak.
 - Ha a tranzisztor vezet, akkor az egész sor vezet, tehát a benne tárolt érték logikai 1, egyébként pedig 0.
 - MLC esetén különböző feszültségszintekkel kell ugyanezt végigpróbálni.
 - Nem túl egyszerű, MLC esetén sok a bithiba – ezt megfelelő hibajavító kód kezeli.



NAND flash, layout

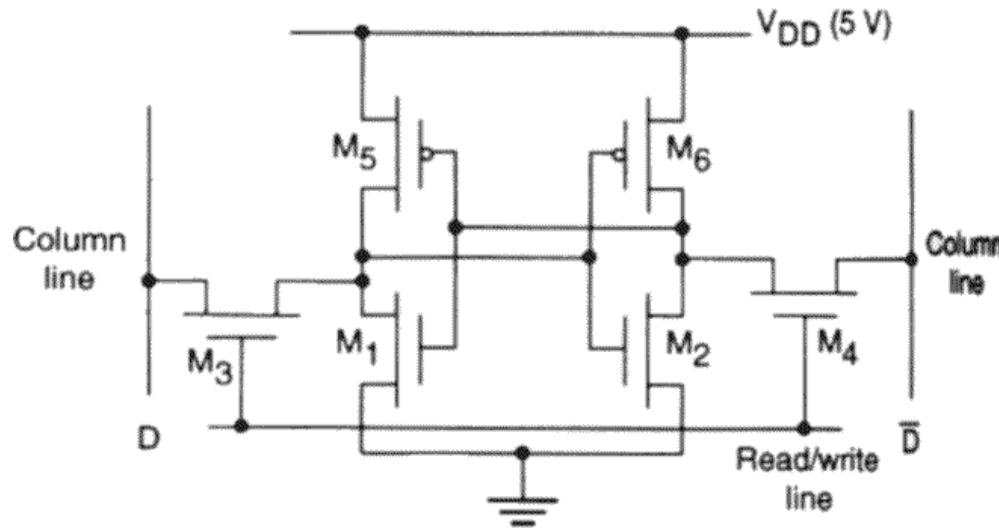


- ▶ Jóval helytakarékosabb, mint a NOR flash, de lassabb a sok sorba kapcsolt MOS tranzisztor miatt.

Statikus RAM (SRAM)

Statikus RAM: a beírt információ a tápfeszültség
eltűnéséig megmarad. **Gyors!**

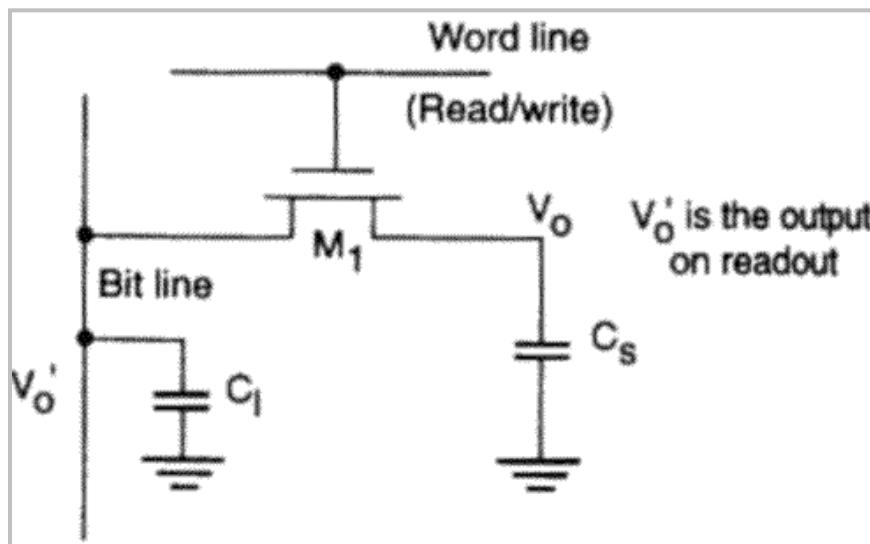
Minden egyes cella egy kétállapotú áramkör, ez tárolja az
információt.



- ▶ 6 tranzisztorból áll.
- ▶ Az információt a 2 keresztbé csatolt CMOS inverter tárolja, aminek 2 stabil állapota van (flip-flop).
- ▶ A beírás, kiolvasás a 2 NMOS tranzisztor segítségével történik.

Dinamikus RAM (DRAM)

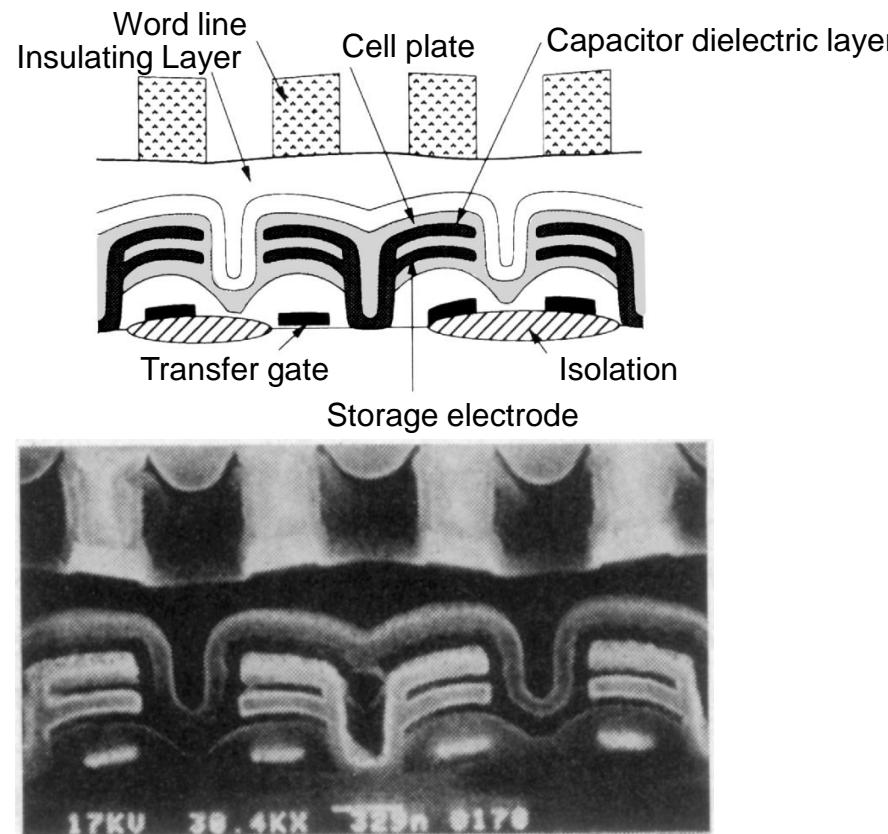
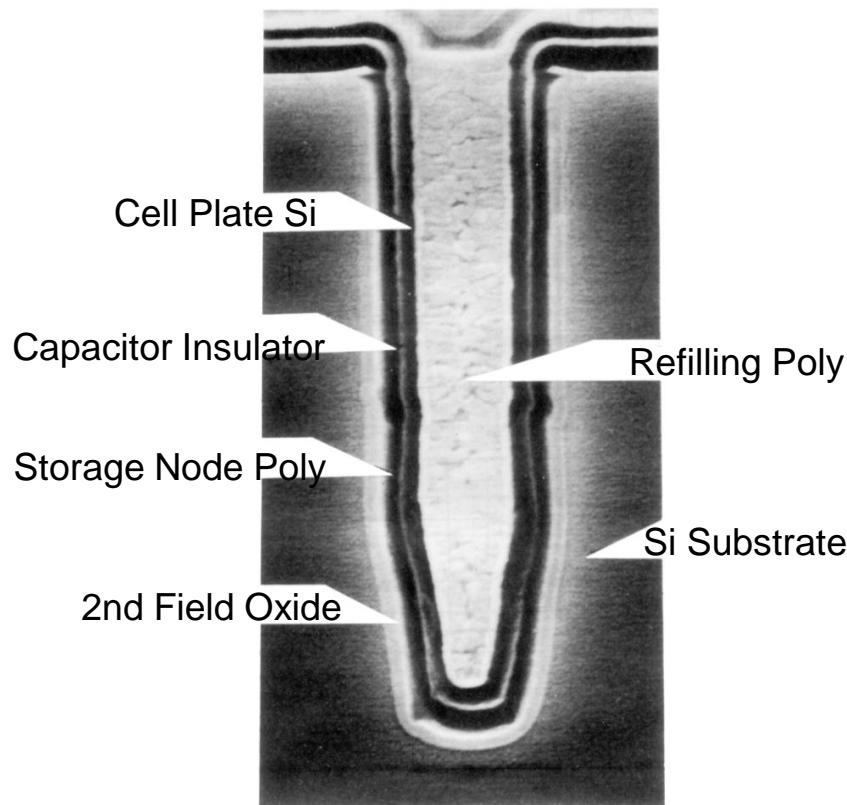
A DRAM cella egy tranzisztorból és egy kapacitásból áll. Azonos felületen kb. négyeszer sűrűbb, mint a statikus RAM.



Az információt a C_s kapacitás tárolja, amit az M₁ tranzisztor kapcsol rá a bitvonalra.

A C_s kapacitás kb. 20..50 fF. 2,5V töltés esetén 20fF kapacitásban kb. 300 000 elektron van.

DRAM megvalósítások



Mindkét struktúra „függőleges”, így minimalizálva a Si-területet.

A) árokkapacitás (trench kapacitás): A szilíciumba árkot marnak, aminek a falát oxid fedi, ebbe kerül a poli-Si.

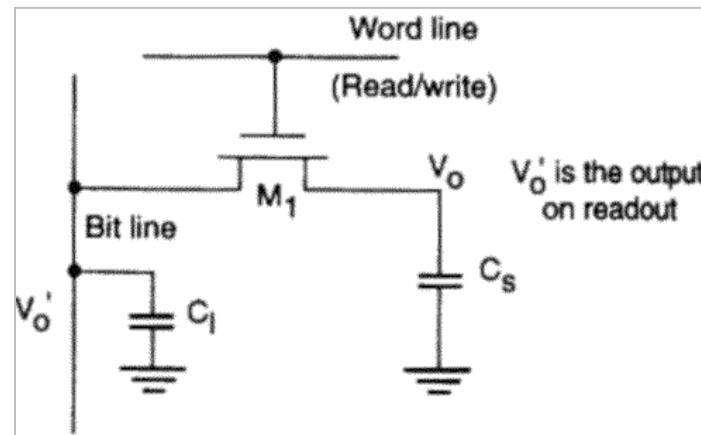
B) „stack” kapacitás: a fegyverzeteket vékony oxid szigeteli el. A kapacitás növelése több réteggel lehetséges.

DRAM – írás, olvasás

Írás: a szóvonalat V_{DD} -re kapcsolva a bitvonal szinttől függően vagy kisüti a kapacitást (LOW), vagy $V_{DD} - V_T$ -re (HIGH) tölti fel.

Kiolvasás: a szóvonal aktivizálásakor a bitvonalra kapcsoljuk a C_s kapacitást. A bitvonal saját kapacitása nagyobb, mint a tároló kapacitás, így töltésmegoszlás történik.

$$\Delta U_L = \frac{C_s}{C_s + C_L} U_C$$



Példa:

Legyen $C_L = 20 \cdot C_S$, $V_{DD} = 3,3$ V, $V_T = 0,7$ V

Ekkor a C_S kapacitás „1” szintje $U_{DD} - V_T = 2,6$ V lesz. A bitvonal feszültségváltozása ennek 21-ed része, azaz kb. 120 mV.

Az érzékelő erősítőnek tehát ezt kell helyreállítani.

A kiolvasás destruktív, tehát kiolvasás után mindenkorábban frissíteni kell.

DRAM – frissítés

- ▶ A tároló kapacitásból a töltés lassan elszivárog. Ennek oka a kapcsoló MOS tranzisztor drain-jének záróirányú diódáján szivárgó áram és a küszöbfeszültség alatti áram.
- ▶ Emiatt a dinamikus RAM celláit rendszeresen frissíteni kell. (azaz a cellák tartalmát ki kell olvasni és vissza kell írni, tipikusan 2..4 ms-onként.)

Egyszerre egy sort frissítének, ennek ideje t_{RC} kb. 100-200 ns.

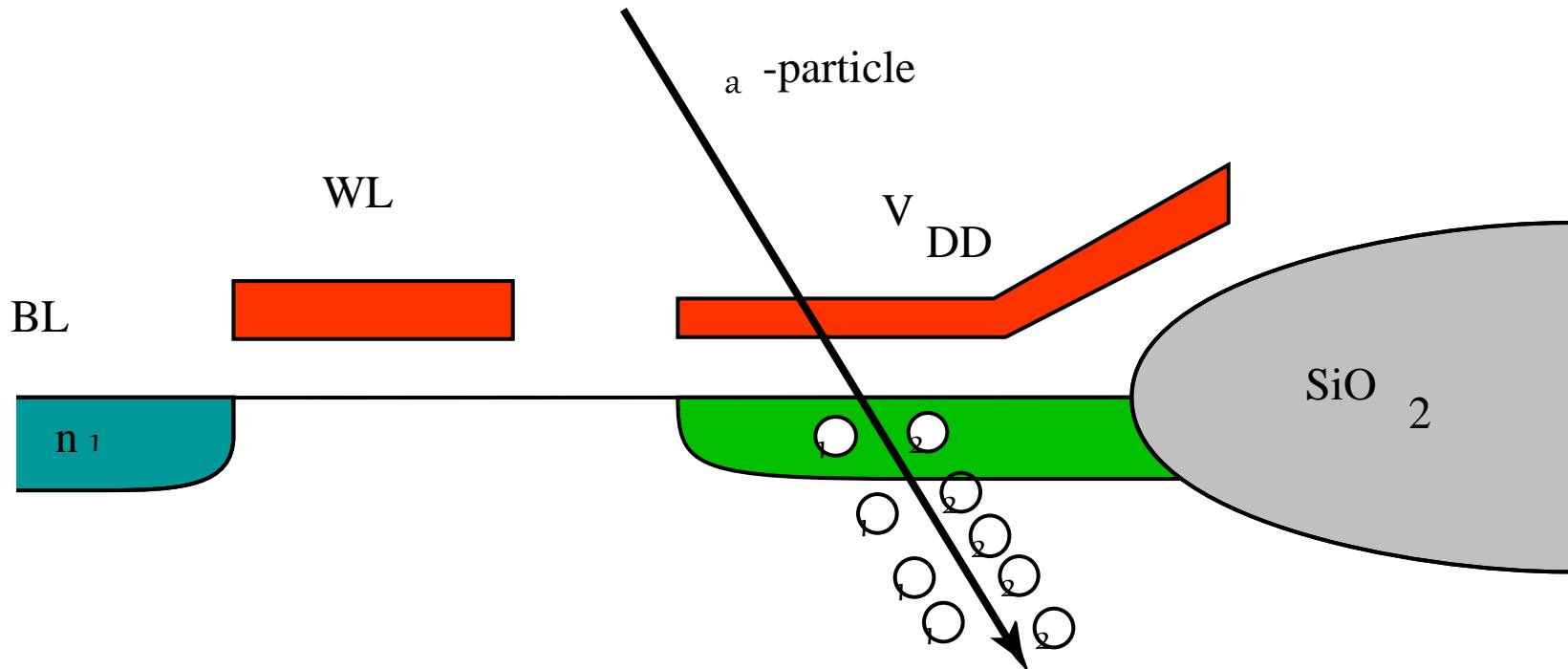
Burst refresh: az összes sort egyszerre frissítik.

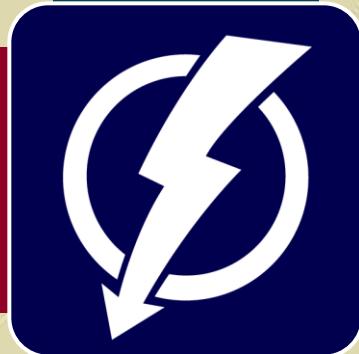
Distributed (hidden) refresh: van egy számláló, ami nyilvántartja az utolsó frissített sort, és mindig a soron következő kerül frissítésre.



DRAM – a részecskek hatása

- ▶ Az ún. soft error
- ▶ Egy részecske kb. 1M elektronot kelt
- ▶ Védőfóliával fedik a chipeket.



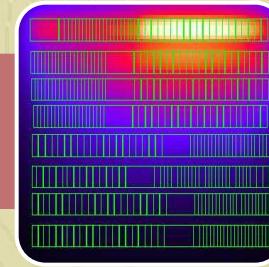
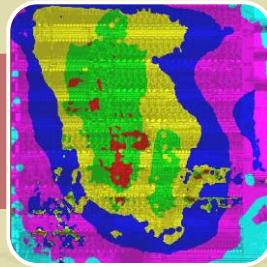
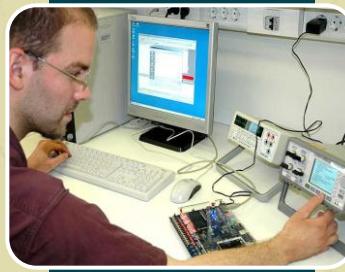


Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi
Egyetem

Elektronikus Eszközök Tanszéke



Műveleti erősítő

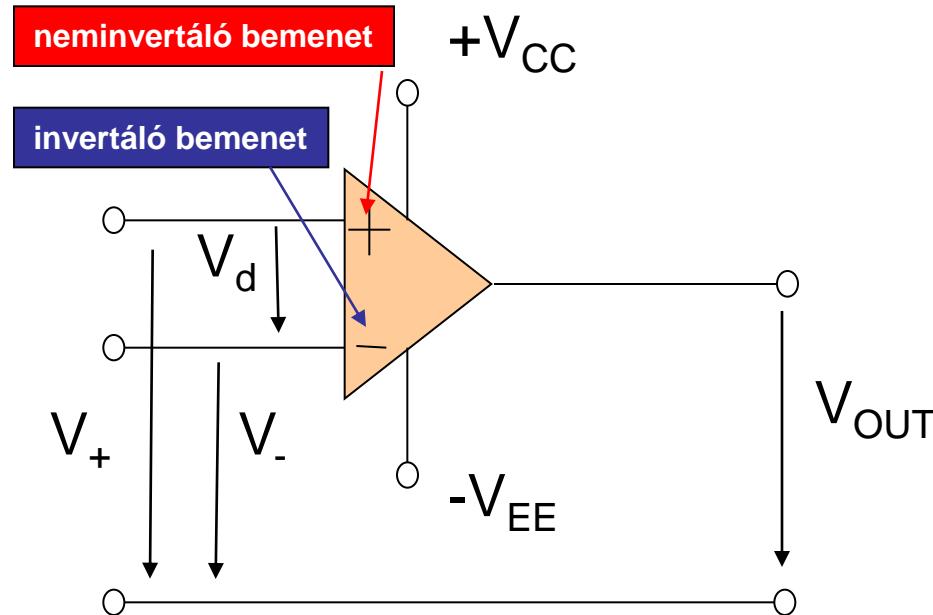


A műveleti erősítő

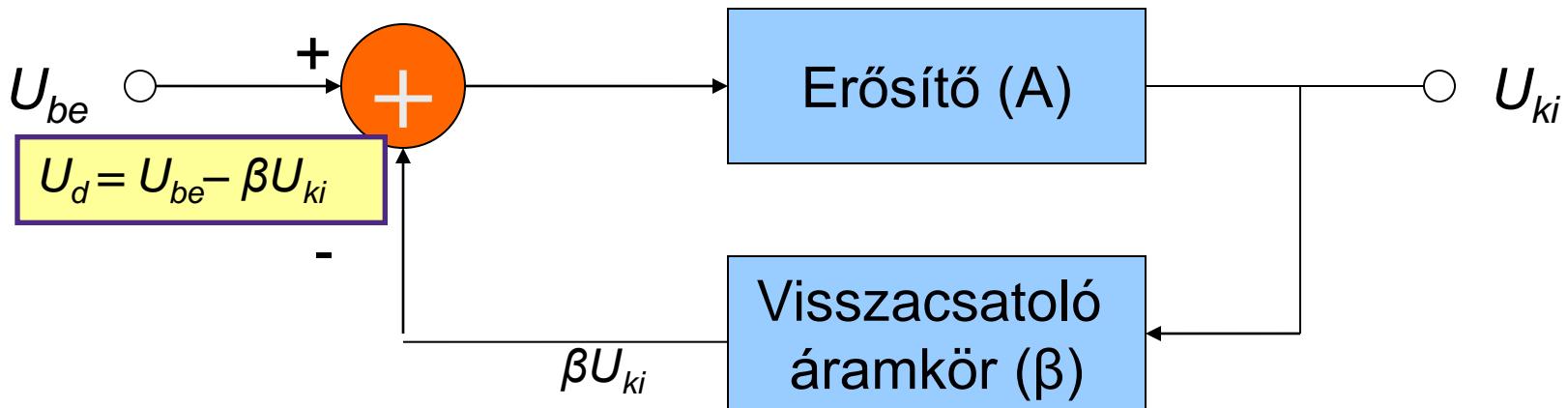
- A hagyományos erősítő tulajdonságait a belső felépítése határozza meg, a műveleti erősítővel (**operational amplifier**) épült áramkörök működését a külső negatív visszacsatolás határozza meg.
- Közel ideális tulajdonságokkal rendelkezik,
 - méretben, árban alig tér el a tranzisztoruktól, alkalmazása pedig jóval egyszerűbb.

Bemenete differenciálerősítő:
2 bemenete van, az ezek közötti
feszültségkülönbséget erősíti, ez az ún.
differenciális feszültség erősítés.

$$V_{OUT} = A_d (V_+ - V_-)$$



A negatív visszacsatolás



A kimeneti jel egy részét a visszacsatoló hálózaton keresztül visszavezetjük a bemenetre, és kivonjuk a bemeneten lévő jelből.

Stabil állapotban:

átrendezve:

$$A_v = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = \frac{A}{1 + \beta \cdot A}$$

$$U_{ki} = A \cdot U_d = A(U_{be} - \beta \cdot U_{ki})$$

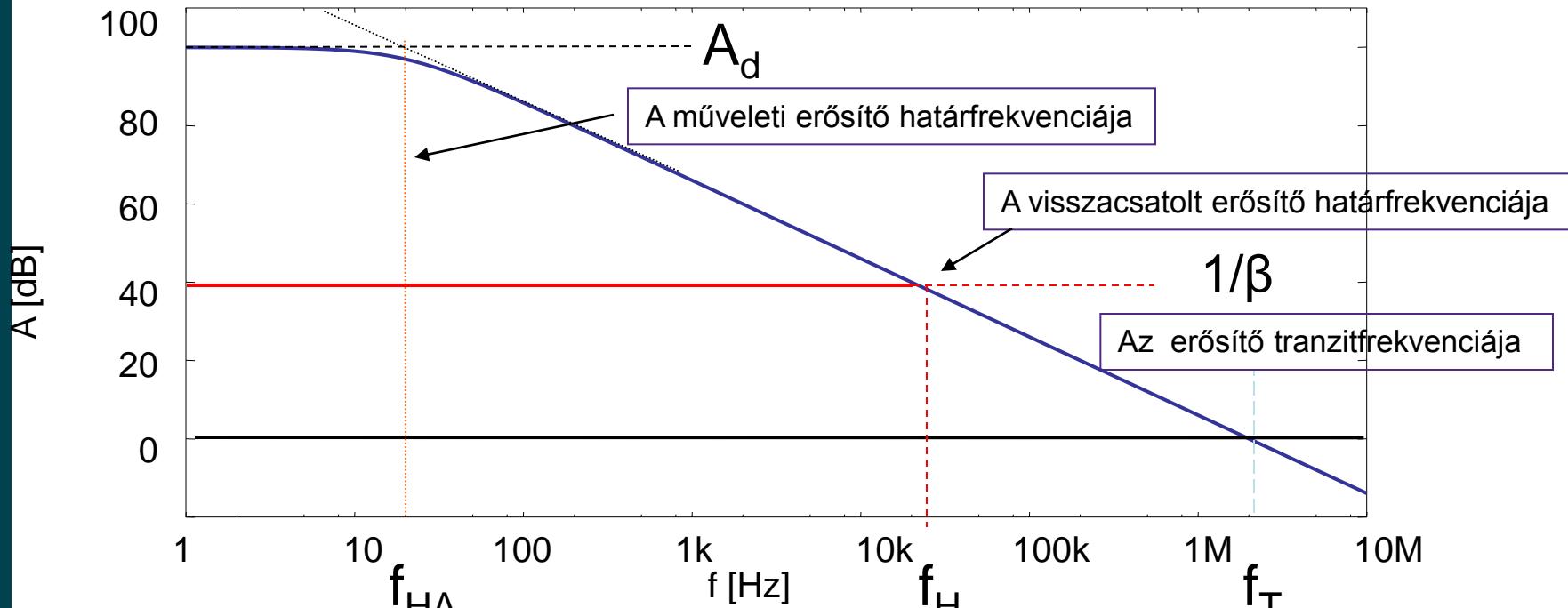
Ha $\beta A \gg 1$, akkor

$$A_v \approx \frac{1}{\beta}$$

Az erősítést a visszacsatolás határozza meg!

A visszacsatolt erősítő frekvenciamenete

(ohmikus elemeket tartalmazó visszacsatoló hálózat esetén)



$$f_H \cdot A_V = f_{HA} \cdot A = f_T = GBW$$

A negatívan visszacsatolt erősítő erősítés-sávszélesség szorzata egyenlő az erősítő tranzitfrekvenciájával.

Az ideális műveleti erősítő

$$A_d \rightarrow \infty, r_d \rightarrow \infty, r_{ki} \rightarrow 0$$

ahol r_d a **differenciális bemeneti ellenállás**,
 r_{ki} a **kimenő ellenállás**.

Egy valódi, általános célú (olcsó) műveleti erősítő paraméterei (μ A741) $A = 2 \cdot 10^5$, $r_d = 2 \text{ M}\Omega$, $r_{ki} = 75\Omega$

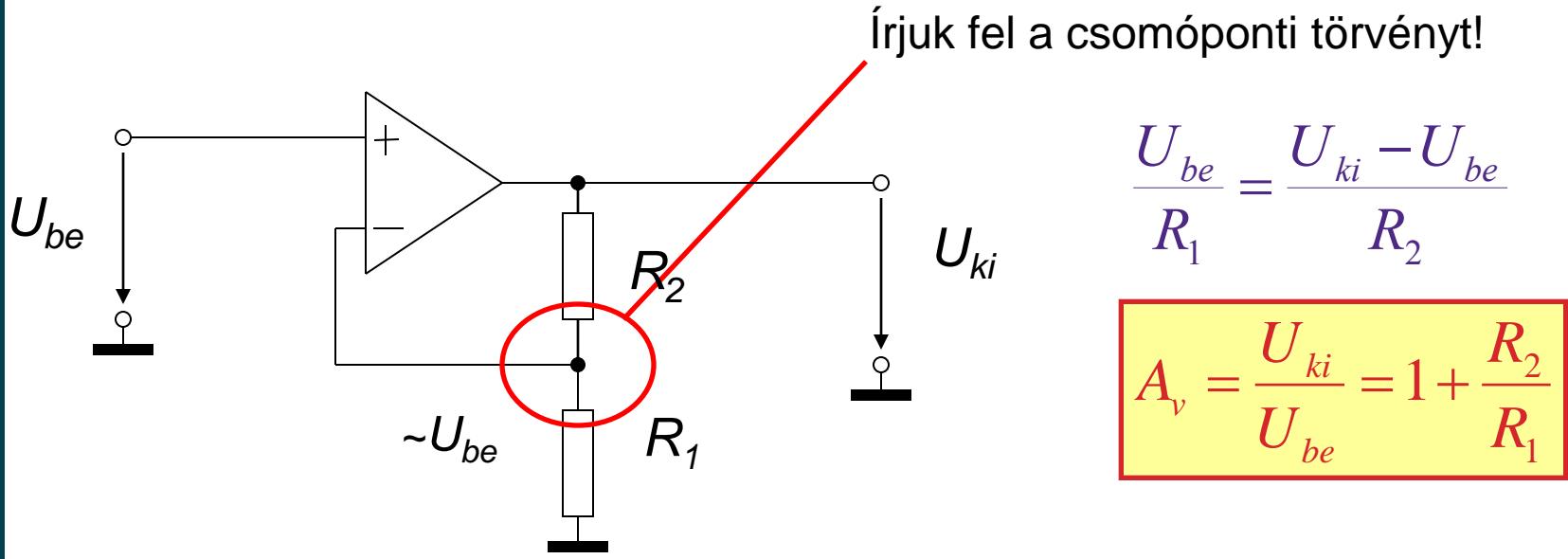
→ a legtöbb alkalmazásban a műveleti erősítő **ideálisnak** tekinthető

A számítások elve

- ▶ Mivel a műveleti erősítő **differenciális erősítése a végtelenhez tart**, nem követünk el nagy hibát, ha **feltételezzük, hogy**
 - (1) a két bemenet azonos potenciálon van, $V_+ = V_-$.
 - (2) és bemenő árama = 0.
- ▶ Ezek után a hálózat már lineáris, tehát a szokásos hálózatszámítási eljárásokkal számítható.
- ▶ A számítás sokat egyszerűsödik az alapkapcsolások ismeretében, és a szuperpozíció téTEL alkalmazásával
- ▶ De a Kirchhoff huroktörvény alkalmazása is viszonylag egyszerű.



Fázist nem fordító (neminvertáló) alapkapcsolás

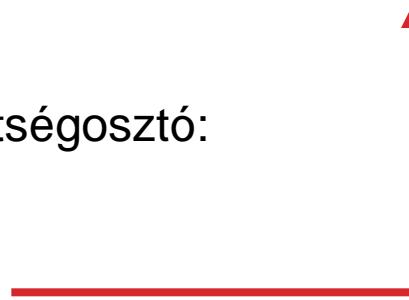


Másik megoldás:

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

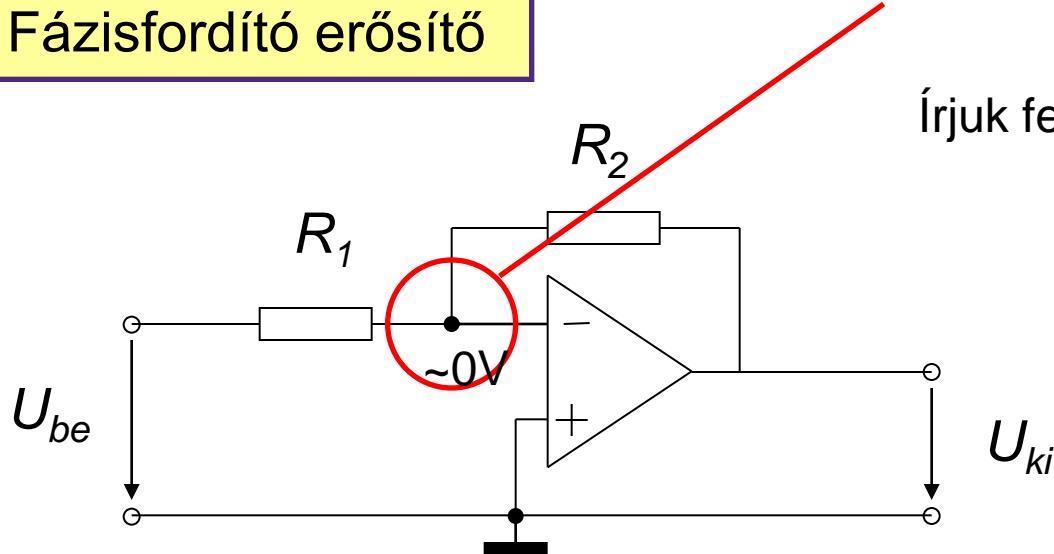
mivel ez egy feszültségesosztó:

$$A_V \approx \frac{1}{\beta}$$



Fázisfordító (invertáló) alapkapsolás

Fázisfordító erősítő



A neminvertáló bemenet feszültsége 0V

Írjuk fel a csomóponti törvényt!

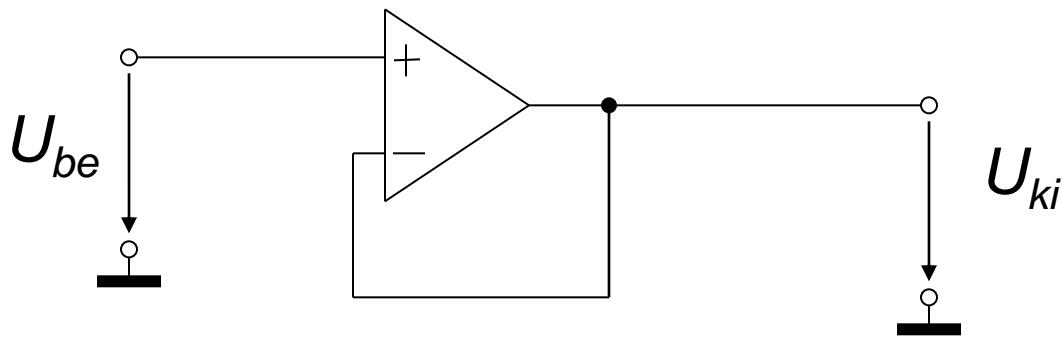
$$\frac{U_{be}}{R_1} + \frac{U_{ki}}{R_2} = 0$$

$$A_v = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Feszültségkövető

Feszültségkövető

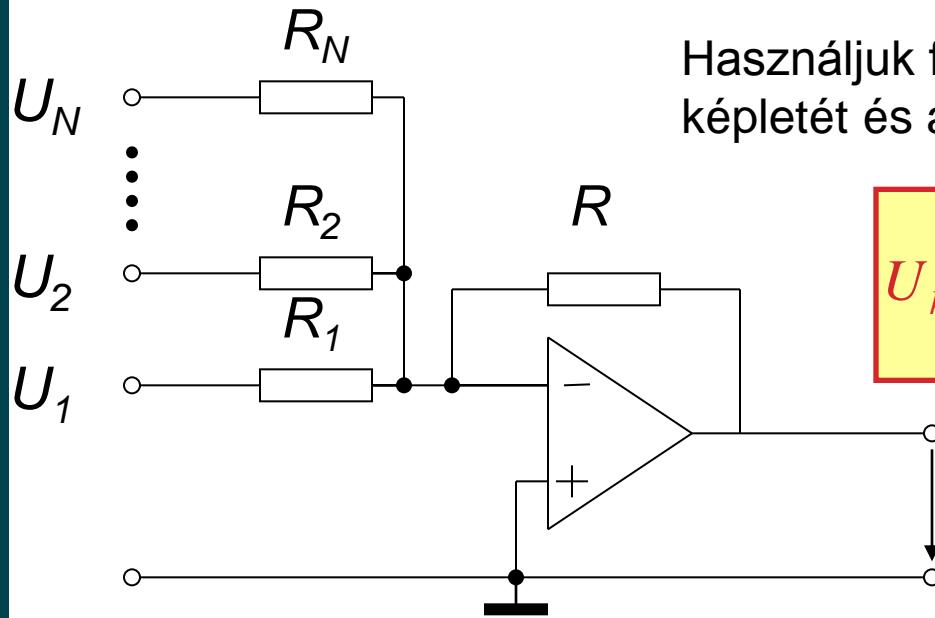
Az U_{be} forrást minimálisan terheli, a kimeneti ellenállás kicsi, ún. **impedanciaáltó**. ($r_{in} \rightarrow \infty$, $r_{out} \rightarrow 0$)



$$\beta = 1$$

$$A_v = \frac{U_{ki}}{U_{be}} = 1$$

Összeadó erősítő

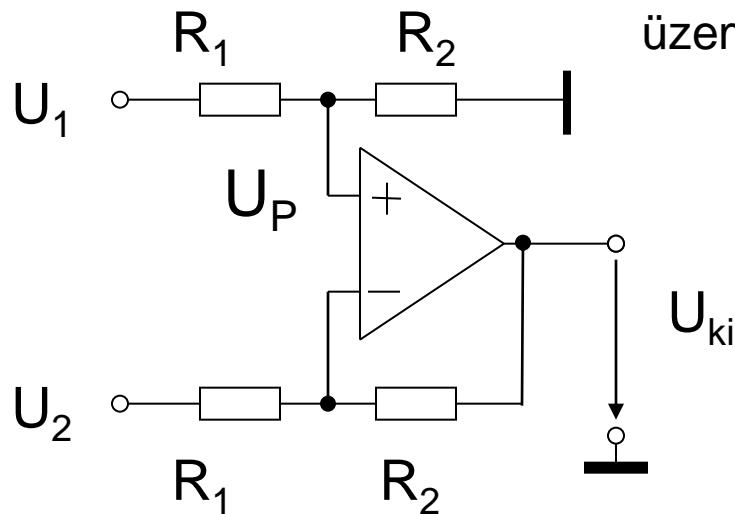


Használjuk fel a fázisfordító erősítő erősítésének
képletét és a szuperpozíció elvét...

$$U_{ki} = -\left(\frac{R}{R_1} U_1 + \frac{R}{R_2} U_2 + \dots + \frac{R}{R_N} U_N \right)$$

Kivonó (differenciál) erősítő

Kivonó áramkör



A fázist nem fordító erősítő kapcsolás erősítése:

$$\frac{U_{ki}}{U_p} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

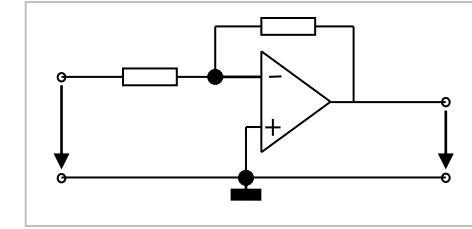
így $U_{ki} = \frac{R_2}{R_1} U_1$

A megoldás a két eredmény összegzésével:

A szuperpozíció elvét alkalmazzuk

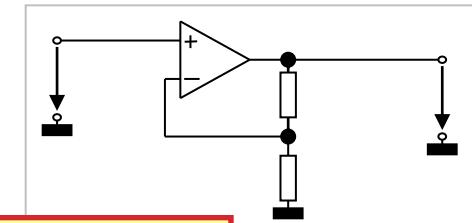
Ha $U_1 = 0$, akkor **fázisfordító erősítőként** üzemel a kapcsolás:

$$U_{ki} = -\frac{R_2}{R_1} U_2$$



Ha $U_2 = 0$, akkor **fázist nem fordító erősítőként** üzemel a kapcsolás:

$$U_p = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_1$$



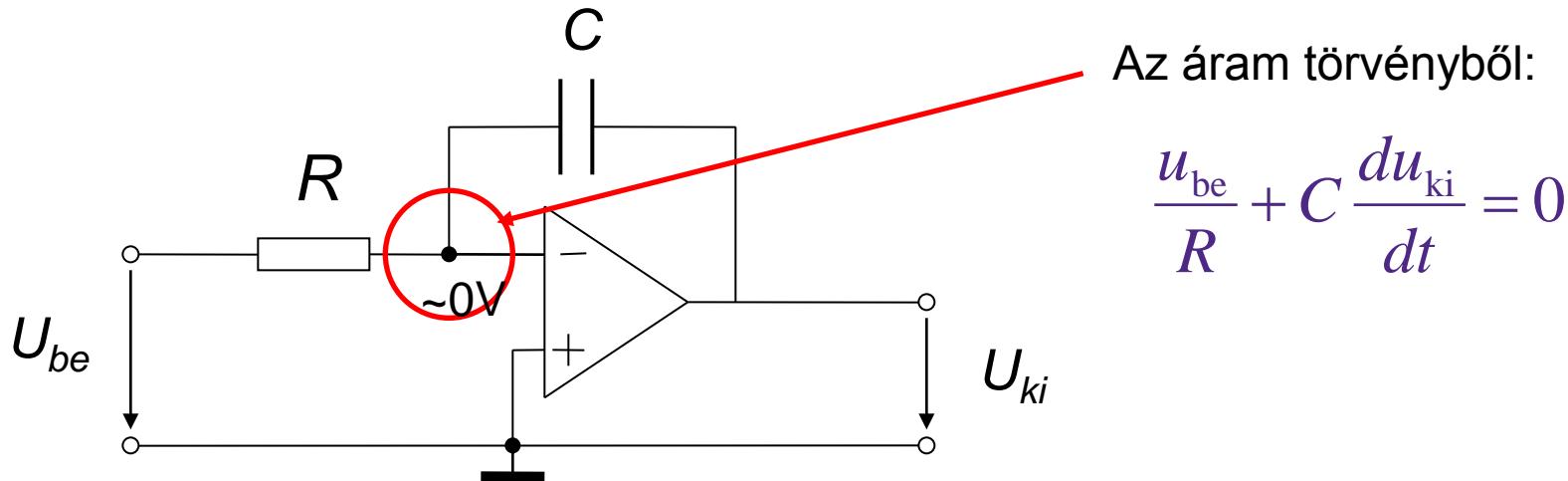
$$U_{ki} = \frac{R_2}{R_1} (U_1 - U_2)$$

Integrátor

Az integrátorok általában az

$$u_{ki}(t) = K \int u_{be}(t) dt + u_{ki}(t = 0)$$

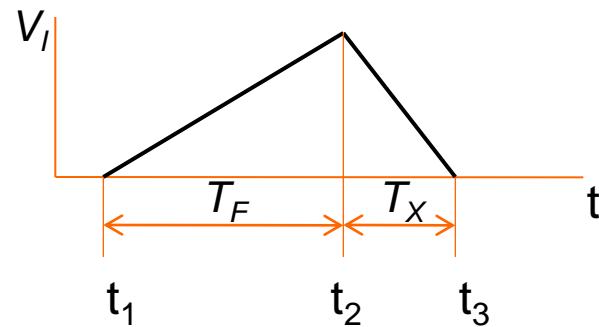
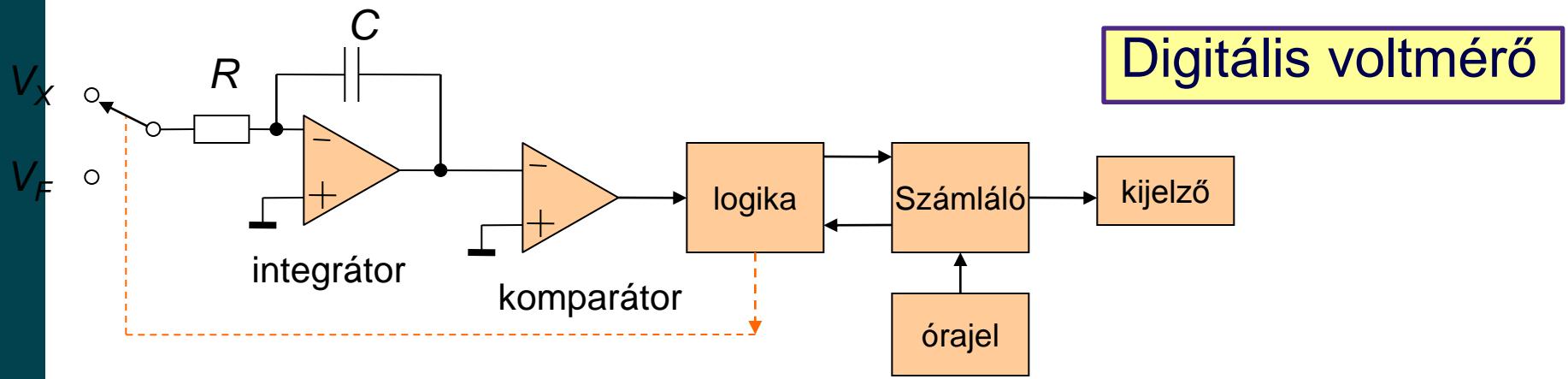
kifejezést valósítják meg.



Megoldva:

$$u_{ki} = -\frac{1}{RC} \int_0^t u_{be}(t) dt + u_{ki}(0)$$

Példa integrátor alkalmazására

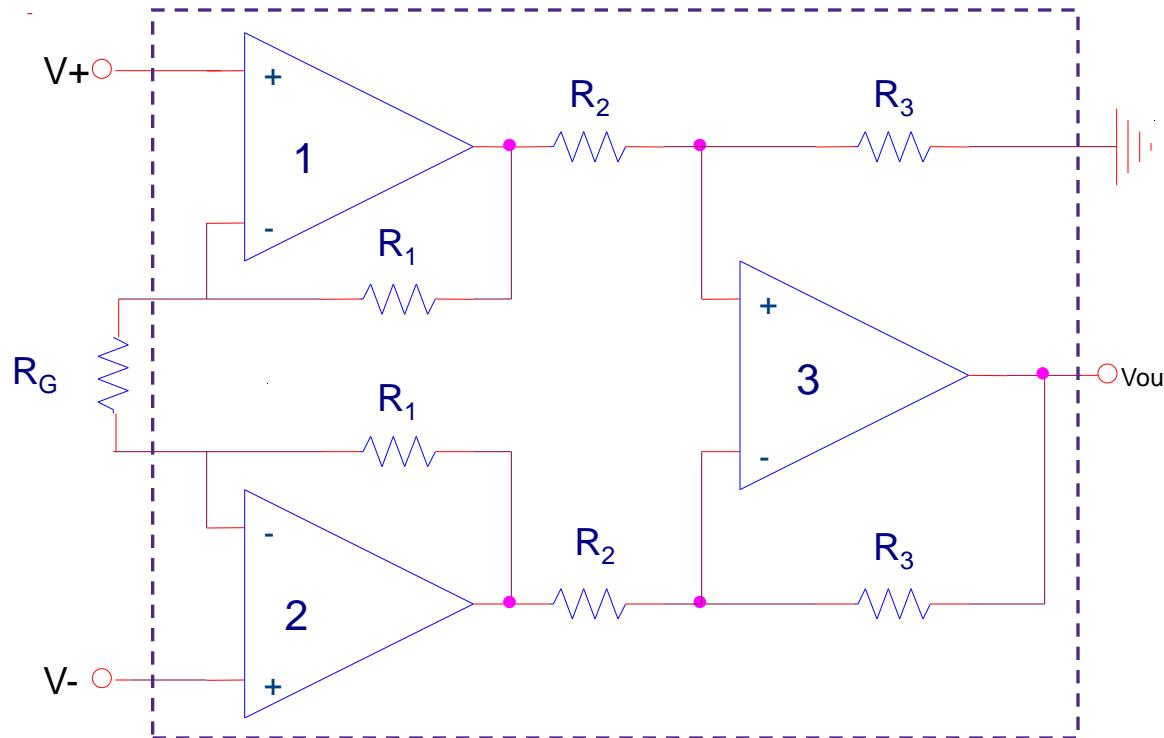


$$Q = \frac{V_X}{R} T_F = \frac{V_F}{R} T_x \rightarrow U_X = U_F \frac{T_x}{T_F}$$

- (1) t_1 időpillanatban a mérendő jelet rátakapcsoljuk az integrátorra és T_F fix ideig integráljuk.
- (2) t_2 pillanatban átkapcsolunk egy negatív referenciafeszültségre és kisütjük a kapacitást.
- (3) A számlálóval mérjük a T_x időt.

Mérőerősítő

Instrumentation amplifier



- ▶ Egy integrált áramköri kapcsolás, az ellenállások értékét nagyon pontosan állítják be.
- ▶ Differenciál erősítő, a pontos erősítést a kívülről kapcsolt R_G ellenállás állítja be, általában kb. 1..1000×

A mérőerősítő erősítése

- A bekeretezett rész egy kivonó erősítőkapcsolás

$$U_{ki} = \frac{R_3}{R_2} (U_1 - U_2)$$

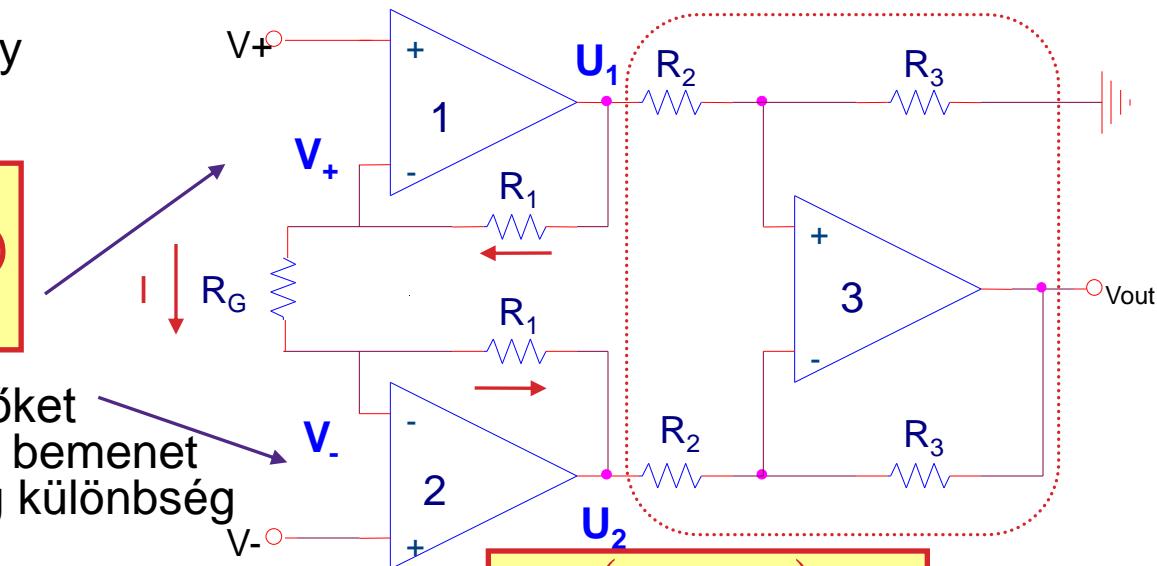
- Ideális műveleti erősítőket feltételezünk, így a két bemenet között nincs feszültség különbség
- Az R_G ellenállás árama tehát:
- Mivel a műveleti erősítő bemeneti ellenállása végtelen, az áram az R_1 ellenállások irányában halad, tehát a műveleti erősítők kimeneti feszültségének különbsége:

$$I = (V_+ - V_-)/R_G$$

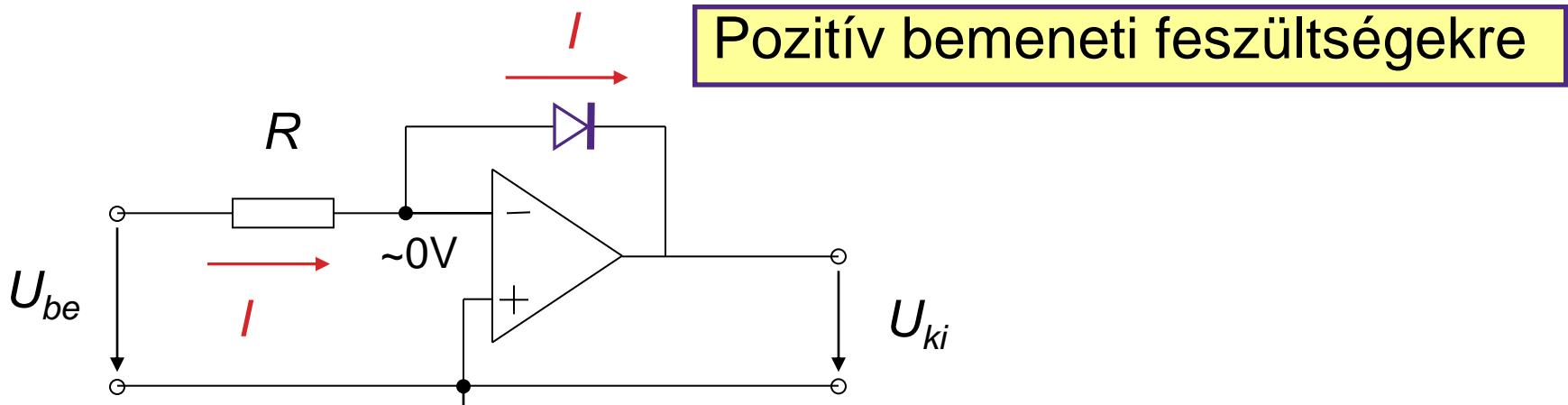
$$U_1 - U_2 = I(R_G + 2R_1)$$

Azaz:

$$U_{ki} = \frac{R_3}{R_2} \left(1 + \frac{2R_1}{R_G} \right) (V_+ - V_-)$$



Logaritmáló erősítő

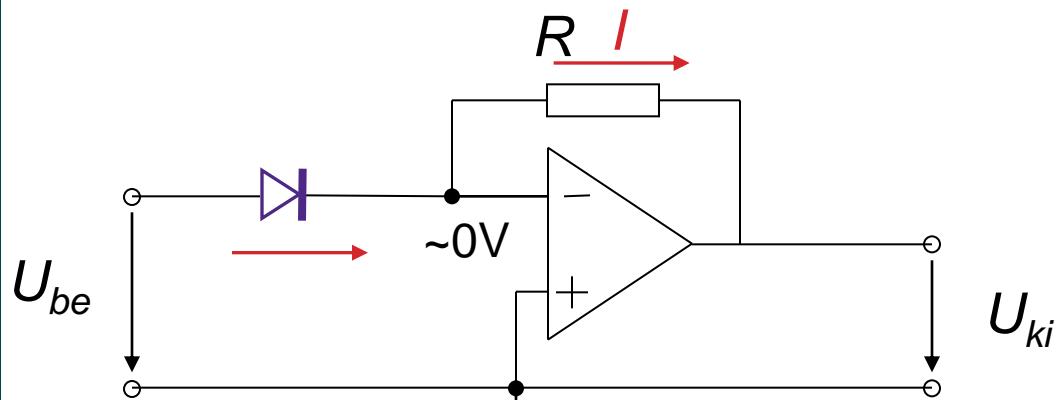


- ▶ Az ellenállás és a dióda árama megegyezik.
- ▶ A dióda feszültsége a kimeneti feszültség ellentettje
- ▶ Azaz:

$$\frac{U_{be}}{R} = I_0 \left(e^{-U_{ki}/mU_T} - 1 \right)$$

$$U_{ki} = -mU_T \ln \frac{U_{be}}{I_0 R}$$

Exponenciális erősítő

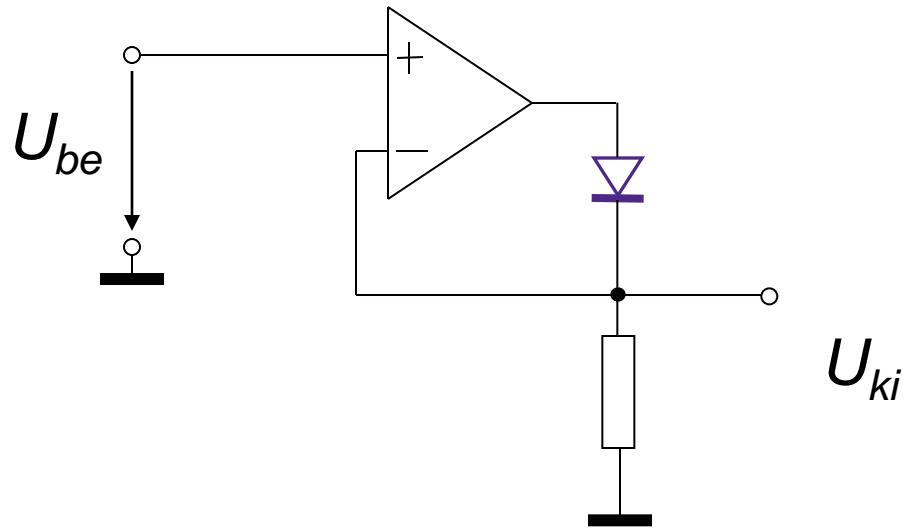


- ▶ Az ellenállás és a dióda árama megegyezik.
- ▶ Azaz:

$$-\frac{U_{ki}}{R} = I_0 \left(e^{U_{be}/mU_T} - 1 \right)$$

$$U_{ki} \approx -I_0 R e^{U_{be}/mU_T}$$

Egyenirányító (szuperdióda)

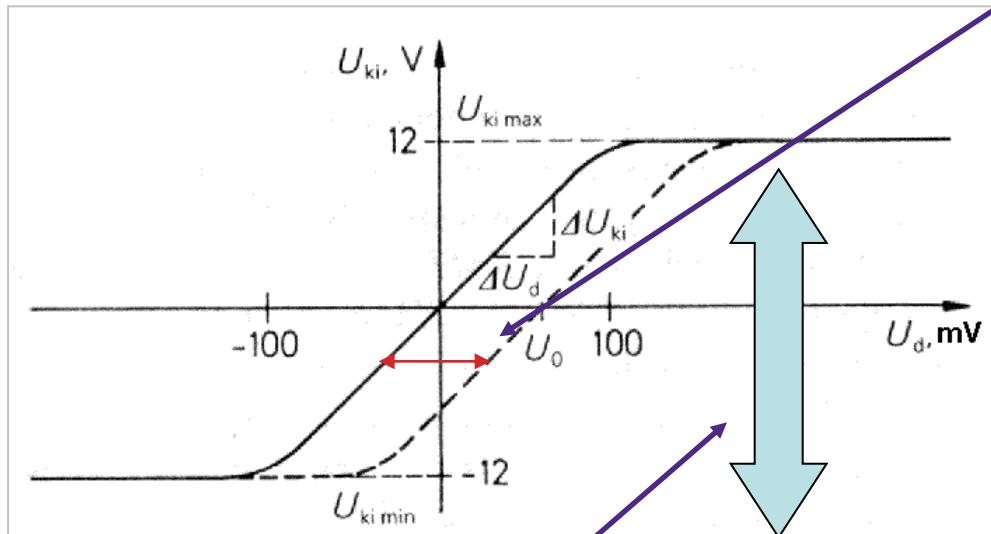


$$U_{ki} = U_{be}, \text{ ha } U_{be} > 0$$

$$U_{ki} = 0, \text{ egyébként}$$

Valós műveleti erősítők paraméterei 1.

Valós műveleti erősítő transzfer karakterisztikája



Kivezelhetőségi határ

Amin túl az erősítő kimeneti feszültsége nem fog növekedni,

- ▶ általában a tápfeszültség – néhány V,
- ▶ léteznek olyan műveleti erősítők is amelyek a tápfeszültségekig vezérelhetők (rail-to-rail működés)

Offset feszültség

A bemenetre valamekkora feszültséggel különbséget kell adni ahhoz, hogy a kimenet 0 legyen. Ez az ún. bemenetre redukált offset feszültség, néhány mV nagyságrendű.

Maximális jelváltozási sebesség (slew rate)

A kimeneten a jel véges sebességgel változhat meg.
 $SR = dU_{ki} / dt$ maximuma.

Valós műveleti erősítők paraméterei 2.

Közös módusú erősítés

Ha a két bemenetre ugyanazt az U_k feszültséget kapcsoljuk, a kimenetnek ideális esetben 0-nak kellene lenni.

A valóságban az erősítő kimeneti feszültsége függ az U_k feszültségtől, ez az ún. közös módusú erősítés.

Legyen $U_m = U_k - U_d / 2$ és $U_p = U_k + U_d / 2$
Ekkor a differenciális feszültségerősítés:

a közös módusú
feszültségerősítés:

$$A_d = \frac{\partial U_{ki}}{\partial U_d}$$

$$A_k = \frac{\partial U_{ki}}{\partial U_k}$$

$$A_k \ll A_d$$

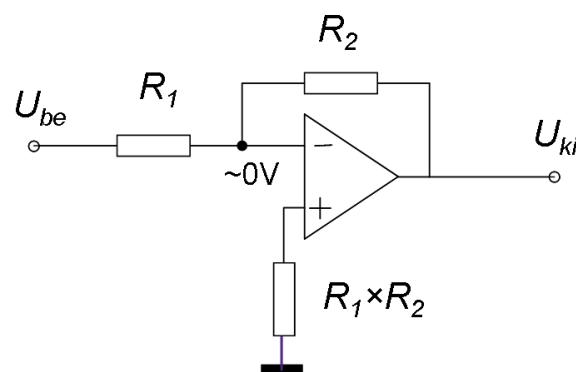
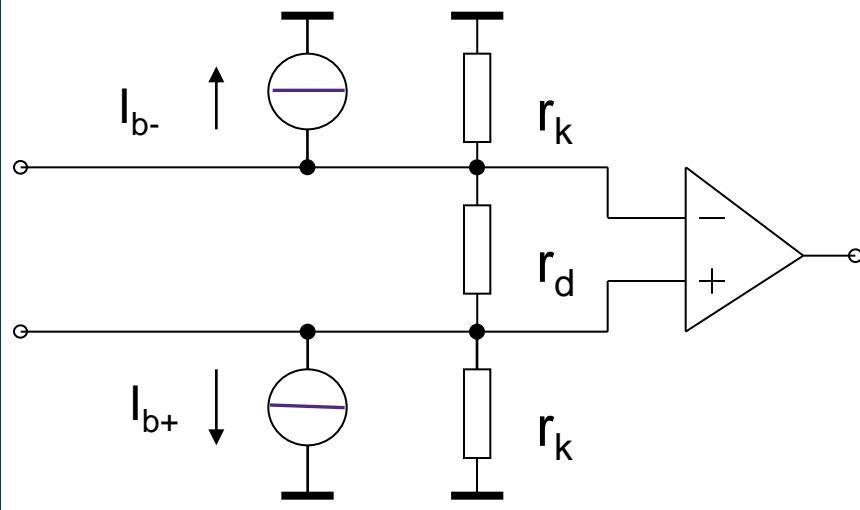
A katalógusok általában a közös módusú feszültség elnyomást
adják meg
(Common Mode Rejection)

$$CMRR = \frac{A_d}{A_k}$$

értéke 10^4 körül van.

Valós műveleti erősítők paraméterei 3.

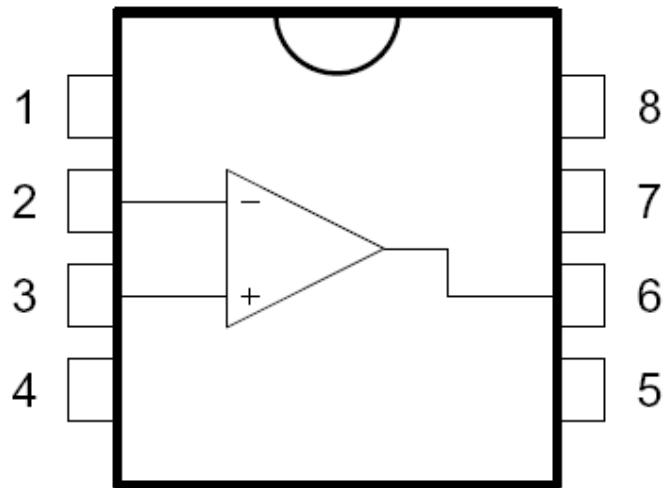
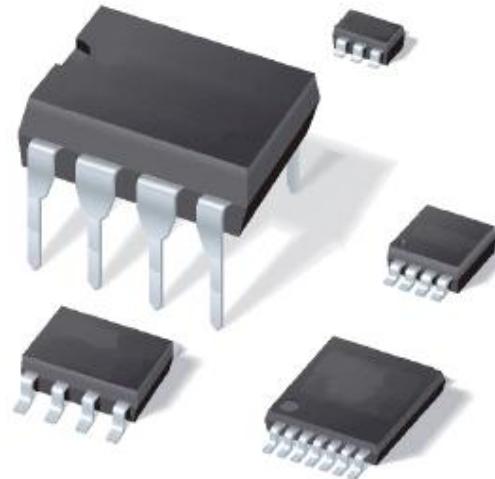
Valós műveleti erősítő bemenetének modellje



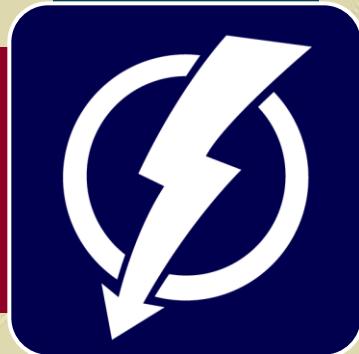
r_k közös módusú ($G\Omega$), r_d ($M\Omega$) differenciális bemeneti ellenállás.
 I_{b+} , I_{b-} a bemenetek állandó munkaponti áramai

	$\mu A741$ (bipoláris)	$TL081$ (JFET)
A_d	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$
CMRR	90dB	86dB
GBW	1 MHz	4 MHz
r_d	$2M\Omega$	$10^{12} \Omega$
r_c	$10^9 \Omega$	$10^{14} \Omega$
I_b	80 nA	20 nA
U_0	1 mV	3mV
SR	0,5 V/ μ s	16 V/ μ s
r_o	75 Ω	100 Ω

Műveleti erősítő tokozása



- 1 - Offset null 1
- 2 - Inverting input
- 3 - Non-inverting input
- 4 - V_{CC}^-
- 5 - Offset null 2
- 6 - Output
- 7 - V_{CC}^+
- 8 - N.C.

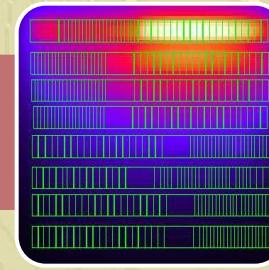
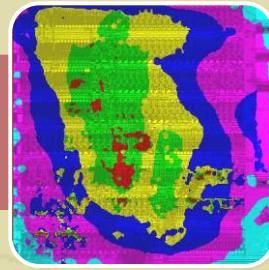
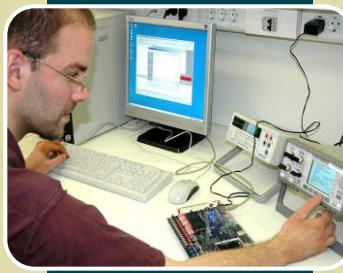


Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi
Egyetem

Elektronikus Eszközök Tanszéke

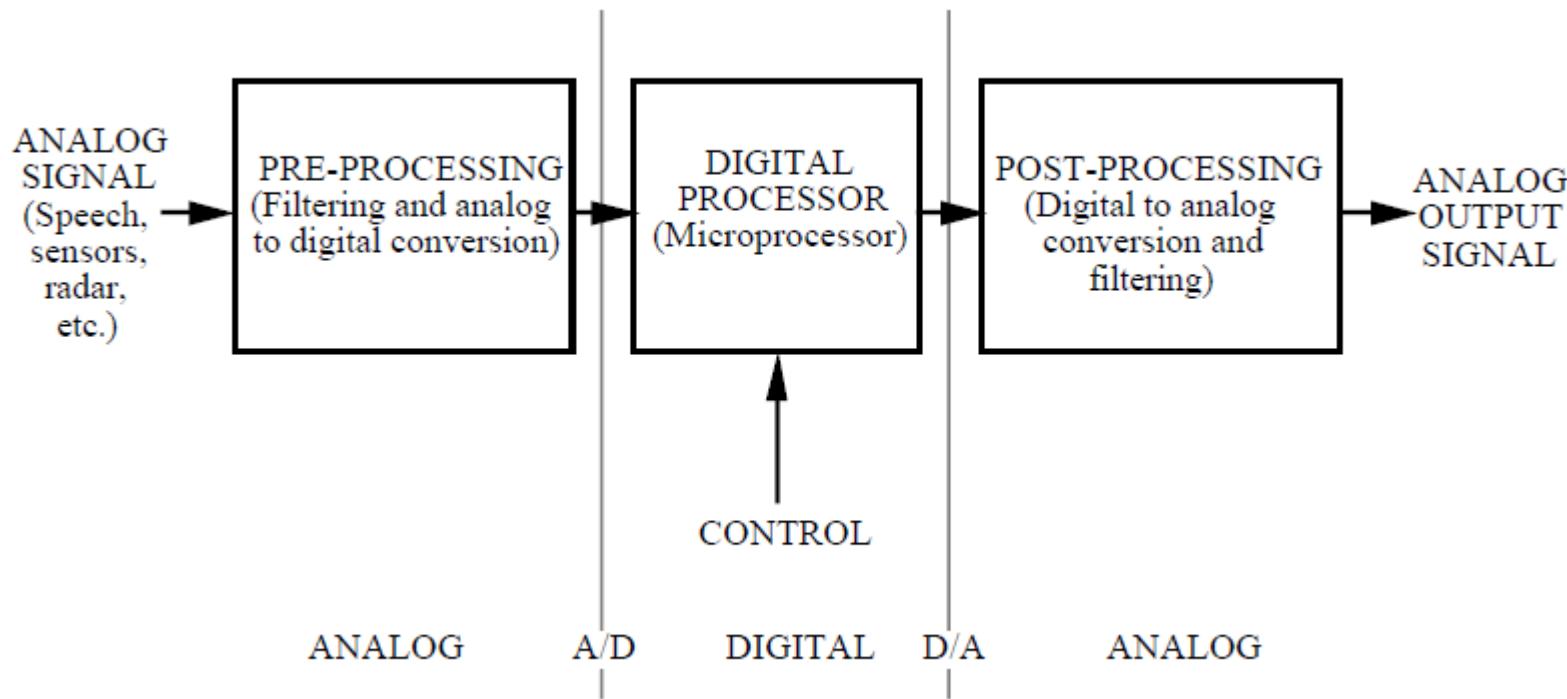


A/D és D/A konverterek

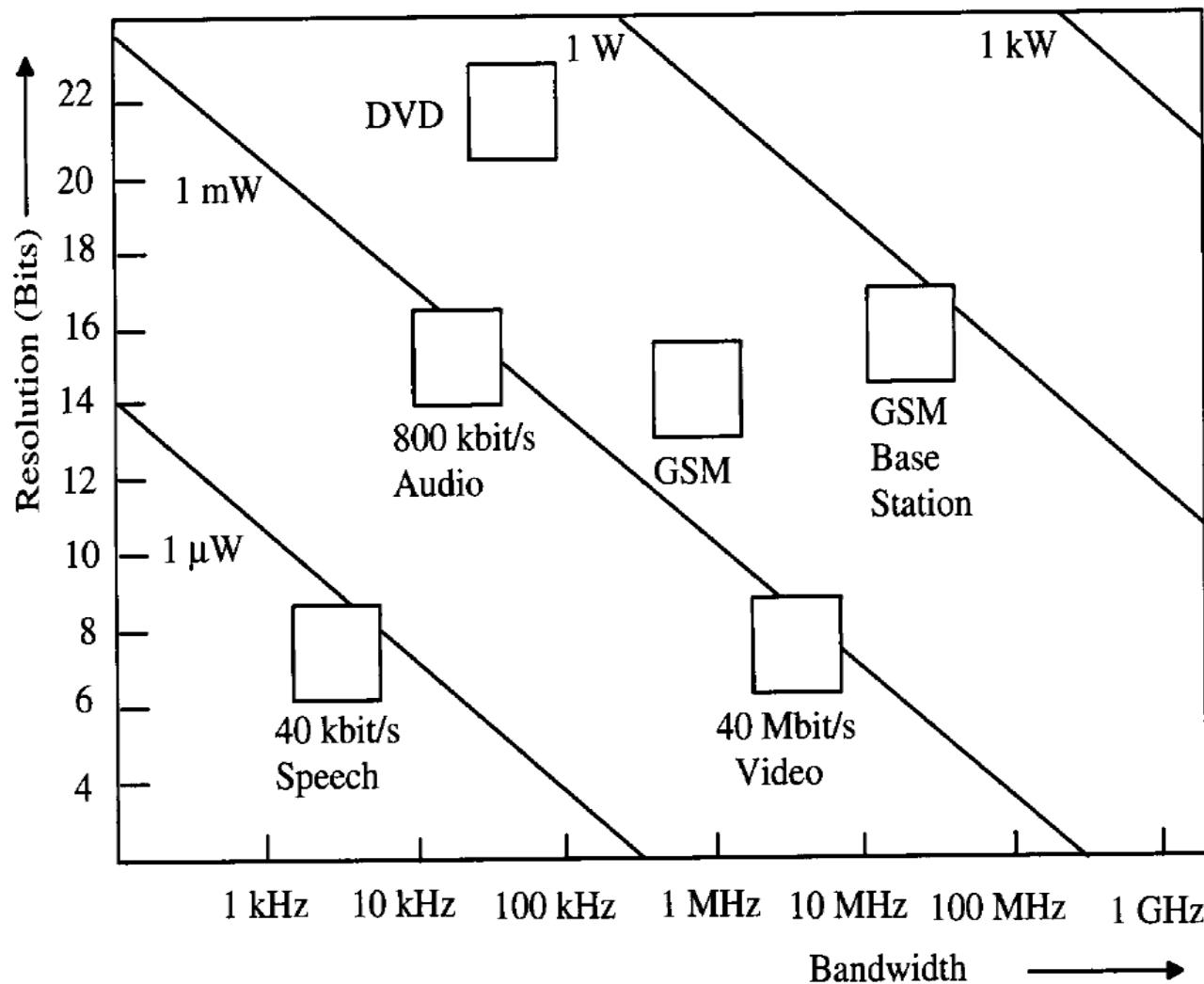


A/D ill. D/A átalakítók

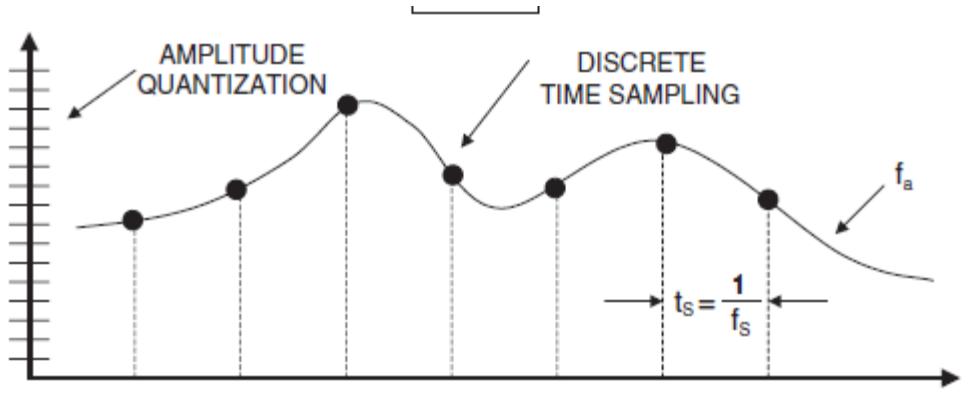
- ▶ A világ analóg, a jelfeldolgozás viszont digitális...
- ▶ A kapcsolattartáshoz A/D ill. D/A átalakításra van szükség.
 - A bemeneti jelet egy analóg előfeldolgozás után (konverzió, erősítés, szűrés stb.) digitalizáljuk. Ez az A/D konverzió.
 - A digitális jelet feldolgozzuk, szabályozzuk stb.
 - Majd a kimeneten újra analóg jellé kell alakítani, ez a D/A konverzió.



Felbontás, sávszélesség, energia



Mintavételezés



Egy analóg bemeneti jel diszkrét jelek sorozatává alakítható, ha $t[i] = i \cdot T_s$ egyenlő időközönként mintát veszünk a bemenetről. A kapott lépcsős függvény annál jobban közelíti az eredeti jelet, minél nagyobb a **mintavételi frekvencia: $f_m = 1/T_m$**

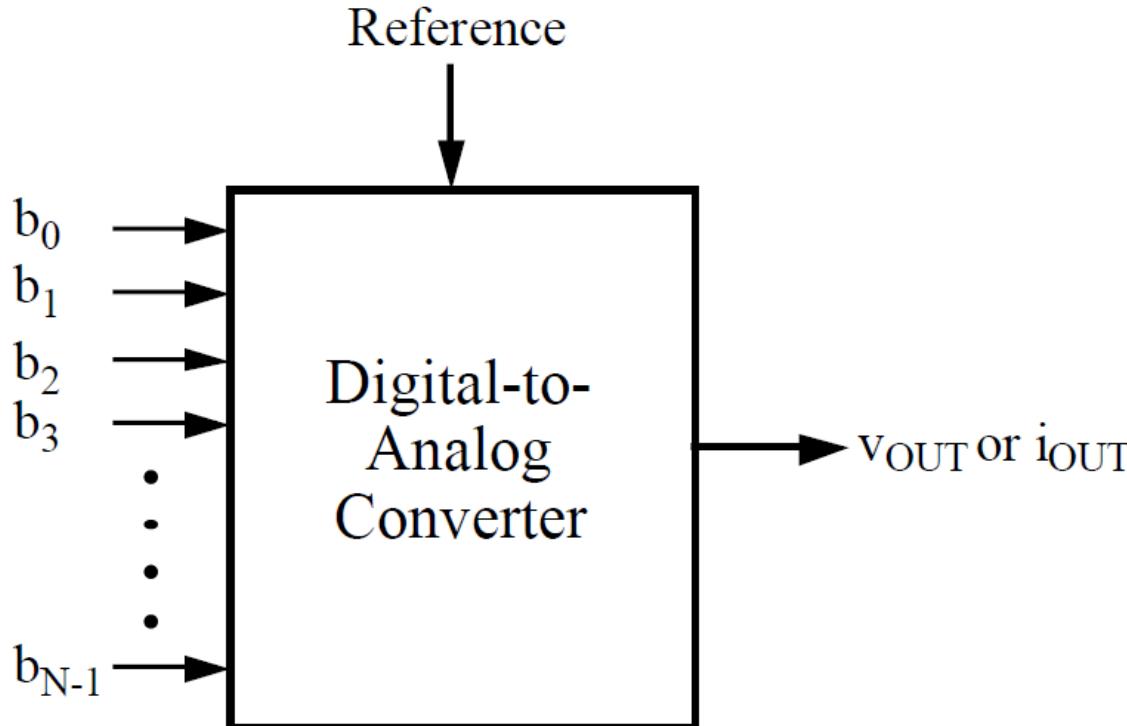
Nyquist -Shannon-tétel

Ha a bemeneti jel spektruma (Fourier-transzformáltja) f_{\max} frekvencia felett nem tartalmaz érdemleges összetevőket, akkor

$$f_m \geq 2 \cdot f_{\max}$$

D/A konverzió

$$V_{OUT} = \frac{V_{REF}}{2^N} B = V_{LSB} B$$



V_{LSB} = a legkisebb helyiértékű
bithez tartozó feszültség

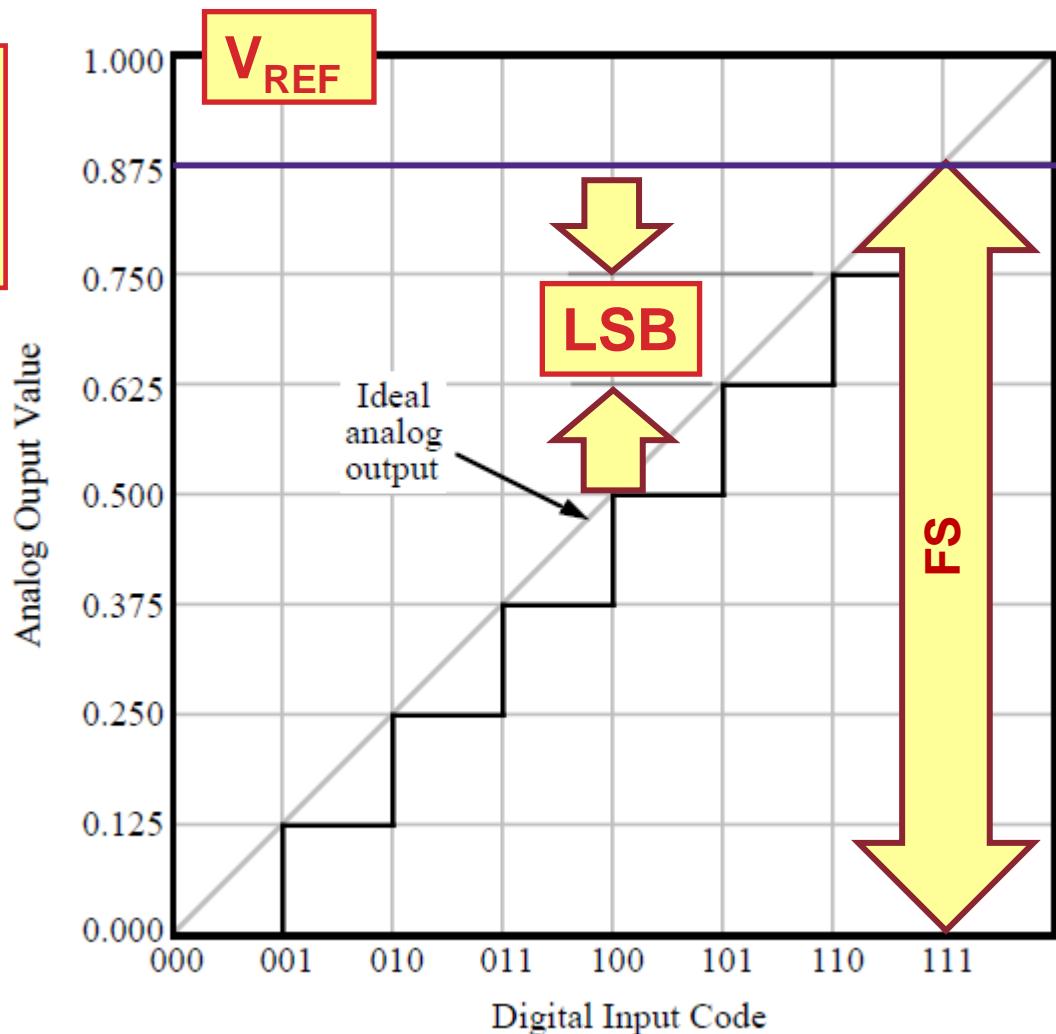
Az ideális D/A konverter karakterisztikája

Full scale

$$V_{OUT,MAX} = \frac{V_{REF}}{2^N} (2^N - 1) = FS$$
$$V_{OUT,MIN} = 0$$

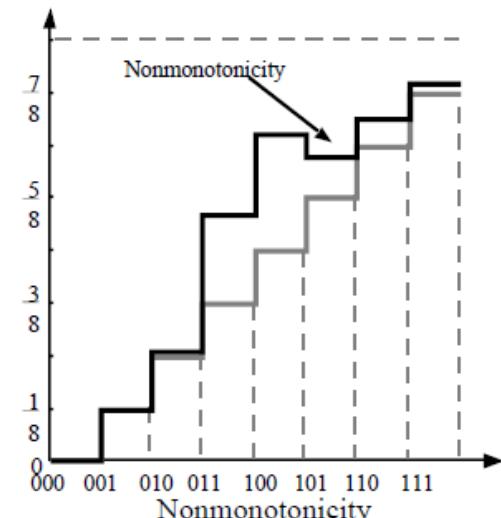
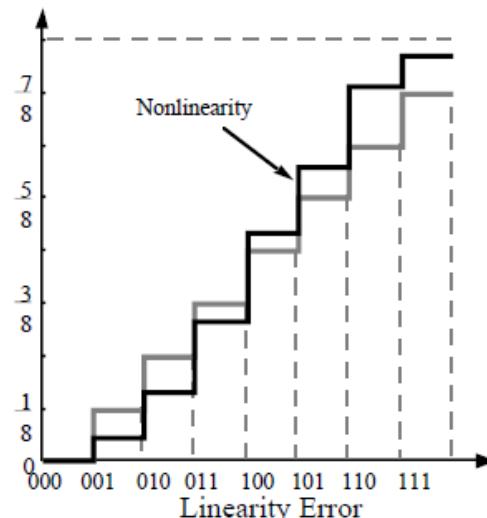
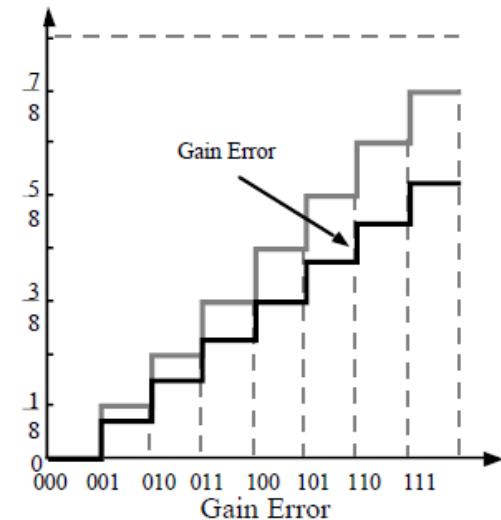
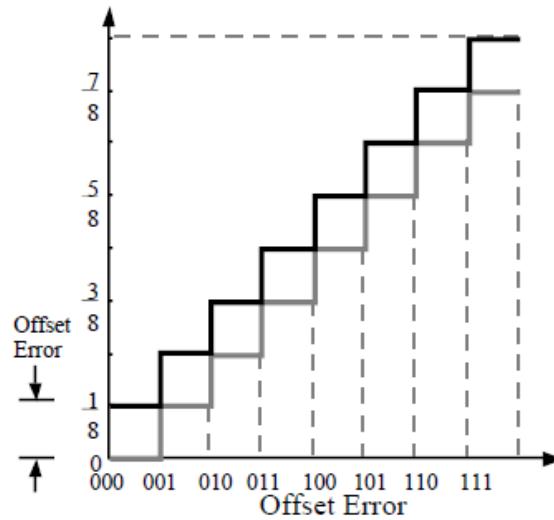
LSB

$$V_{LSB} = \frac{V_{REF}}{2^N}$$



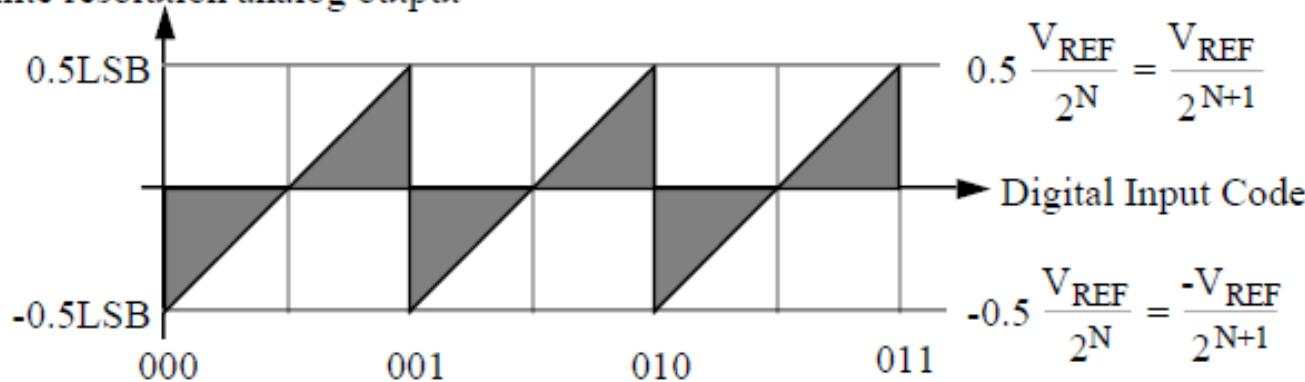
Valós D/A konverter karakterisztikája

- ▶ Offsethiba
- ▶ Erősítéshiba
- ▶ Nemlinearitás
- ▶ Monotonitási hiba



Kvantálási zaj

Infinite resolution analog output
- finite resolution analog output



- ▶ A lépcsős közelítés miatt lép fel.
- ▶ A jel/zaj viszony:

$$\text{SNR}(dB) = 1,76 + 6,02N \text{ dB} \approx 6N \text{ dB}$$

- ▶ Pl. mekkora CD (16bit) elméleti jel/zaj viszonya?
 - >96dB

Párhuzamos (direkt) D/A átalakítás

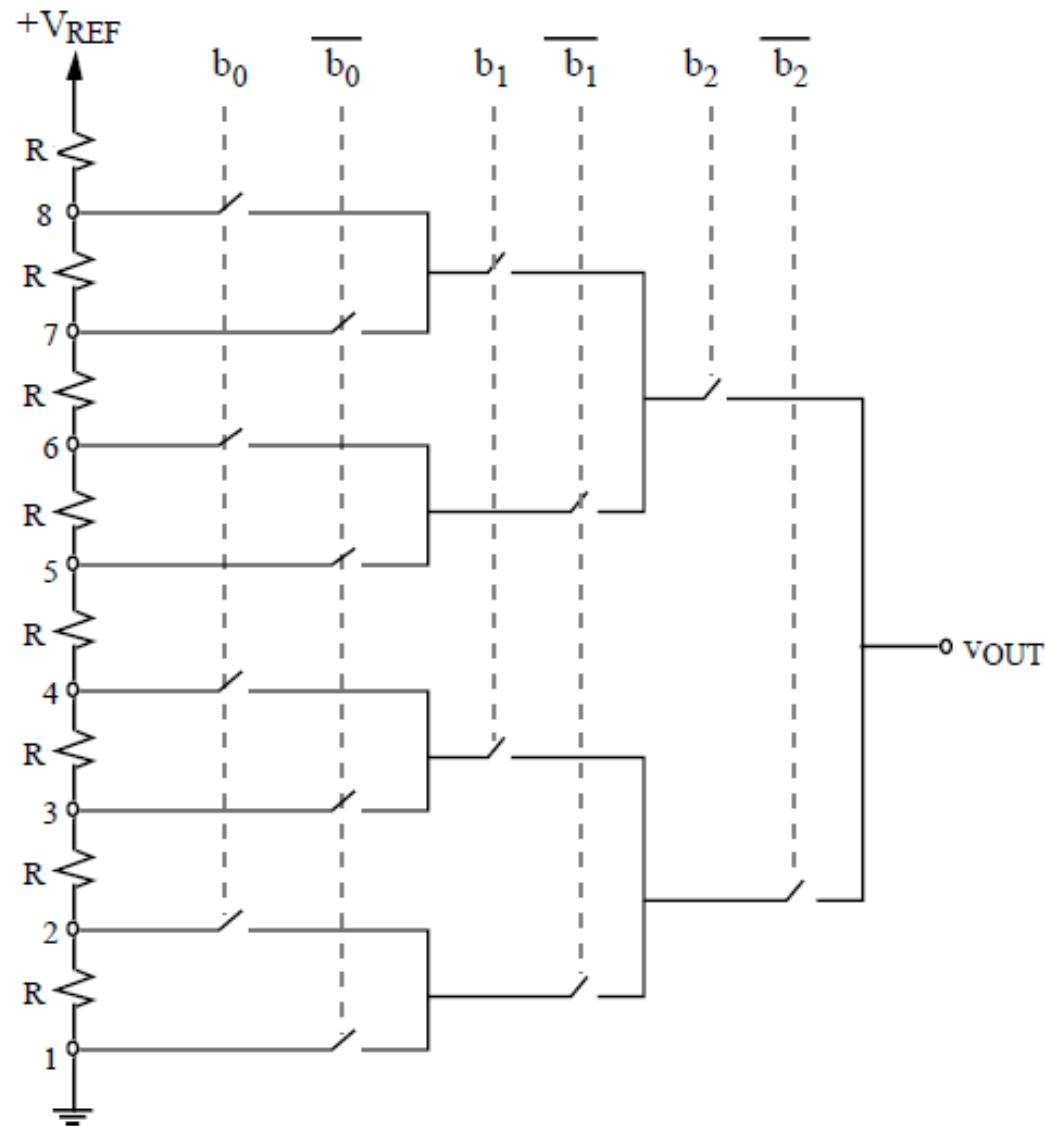
A referencia feszültséget egy

ellenállás lánc osztjuk.

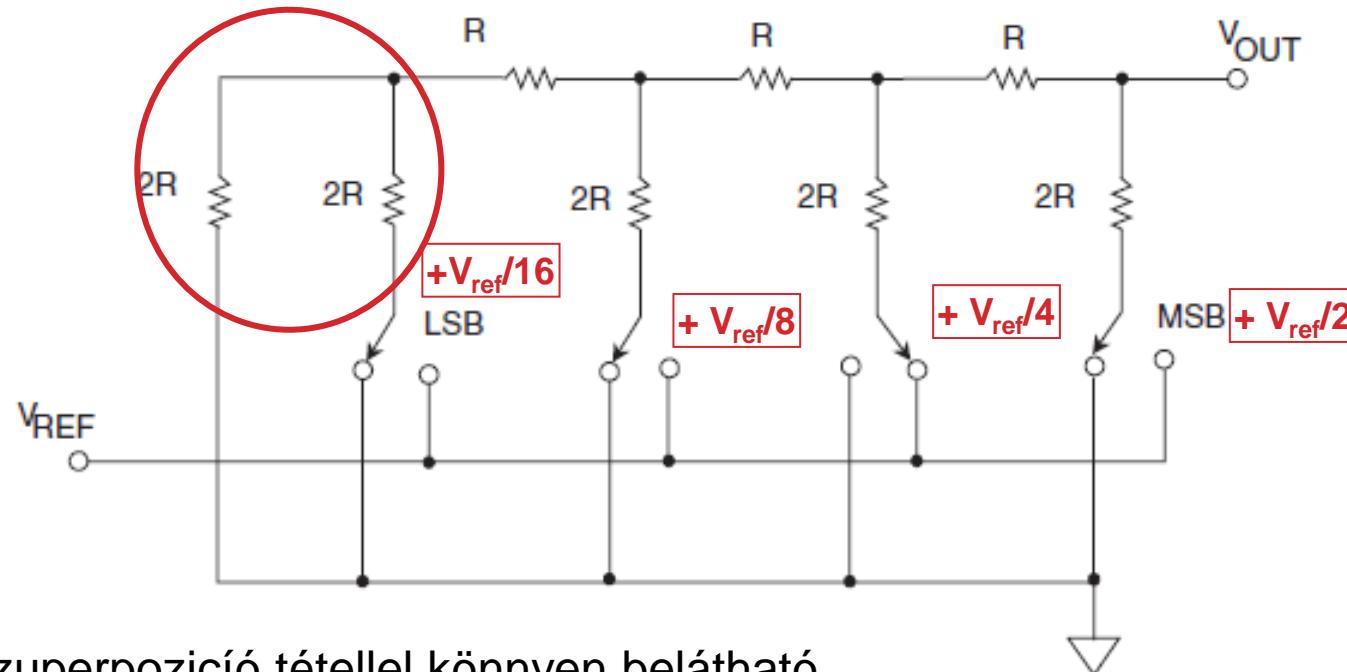
Az analóg kapcsolókon keresztül az átalakítandó számnak megfelelő érték kerül a kimenetre.

(analóg multiplexer)

- ▶ Analóg kapcsoló = CMOS transzfer kapu
- ▶ Egyforma ellenállásokat igényel...
- ▶ A felépítésből következően monoton
- ▶ N bit, 2^N ellenállás



R-2R létrahálózattal megvalósított D/A

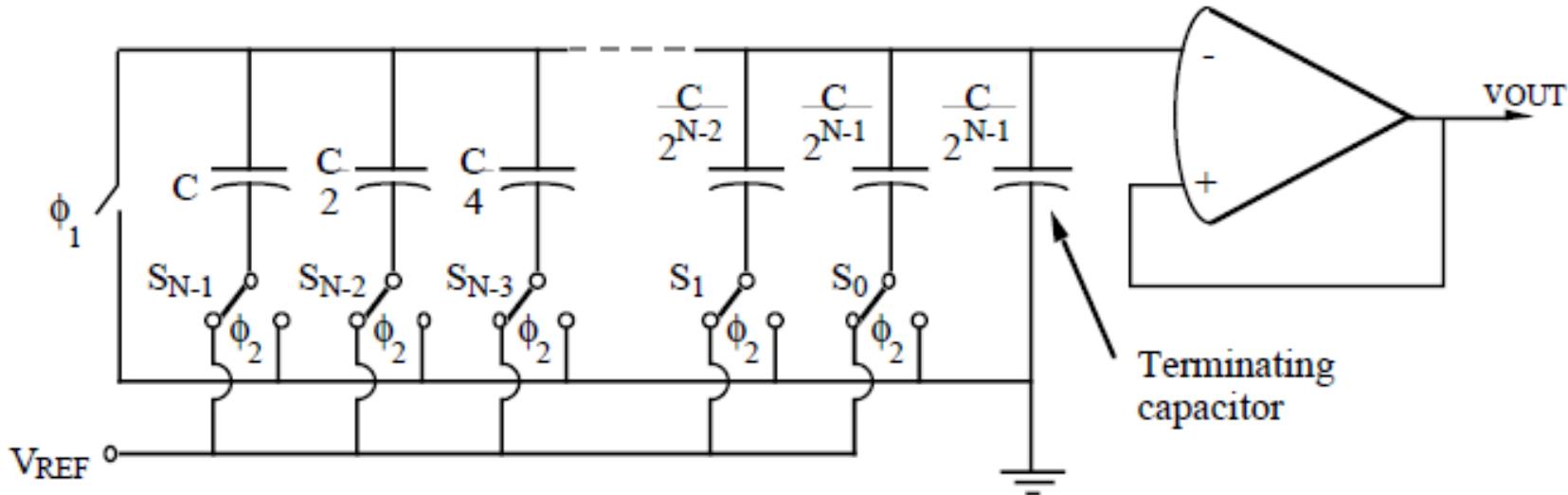


A szuperpozíció tételekkel könnyen belátható,
hogy egy adott kapcsoló zárásakor a bináris súlynak megfelelő feszültség kerül a
kimenetre.

Előnye: IC-kben pontos ellenállások nehezen valósíthatóak meg, viszont megfelelő
relatív pontosság érhető el.

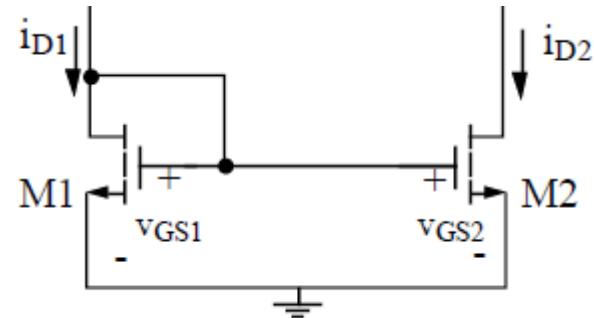
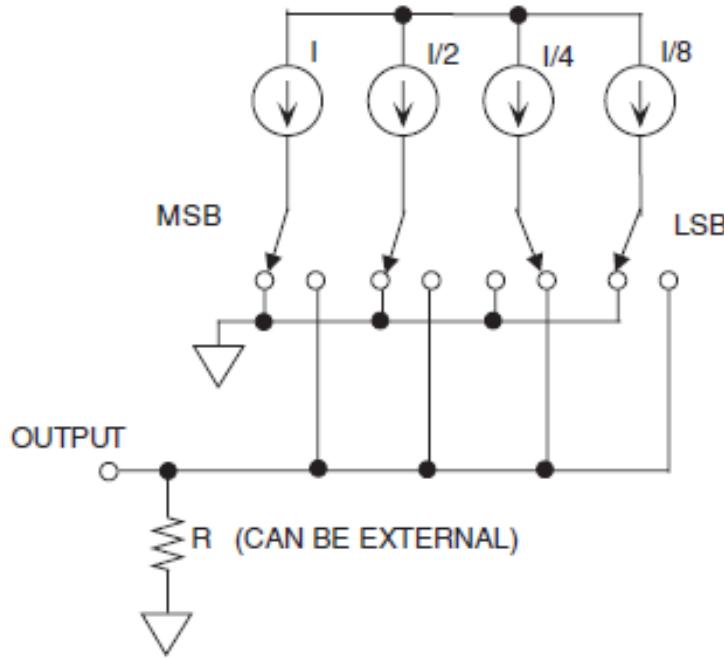
Csak R ellenállásokat tartalmaz (a $2R$ ellenállás helyettesíthető 2 db.
 R ellenállással) N bithez kb. $3N+1$ ellenállás szükséges

Töltésmegosztás



- ▶ Φ_1 fázisban az összes kapacitás kisül
- ▶ Φ_2 fázisban ha bináris érték 1, a referencia feszültséget, ha a bináris érték 0, a földet kapcsoljuk a súlyozott kondenzátorra
- ▶ A szuperpozíció tétele segítségével bizonyítható.
 - Párhuzamosan kapcsolt kondenzátorok kapacitása összeadódik
 - Sorbakapcsolt kondenzátorokon a feszültség a kapacitások reciprokának arányában oszlik meg.

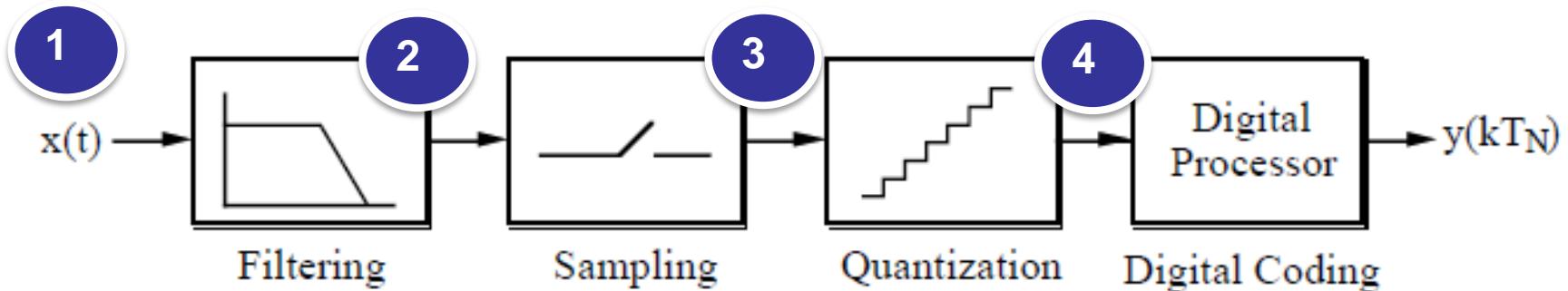
Kapcsolt áramok



$i_{D1} = i_{D2}$ ha a tranzisztorok
egyformák.

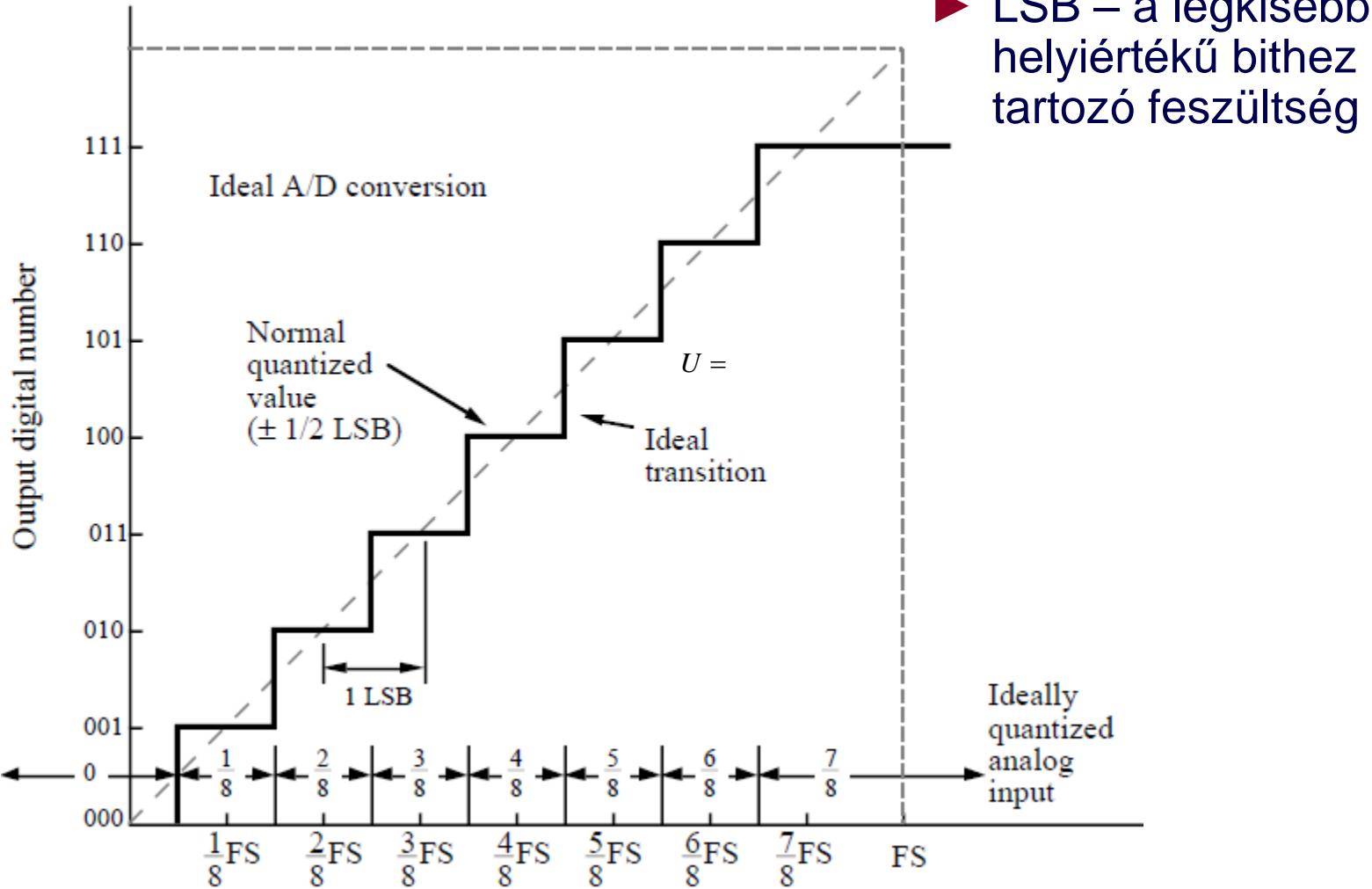
- ▶ Az áramokat párhuzamosan kapcsolt áramtükrökkel állítják be, a bináris súlynak megfelelően.

Az A/D átalakítás folyamata

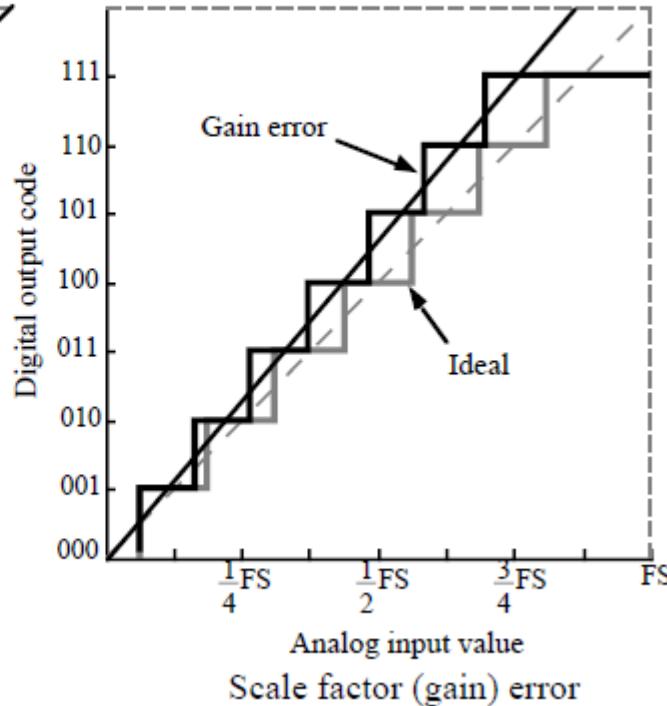
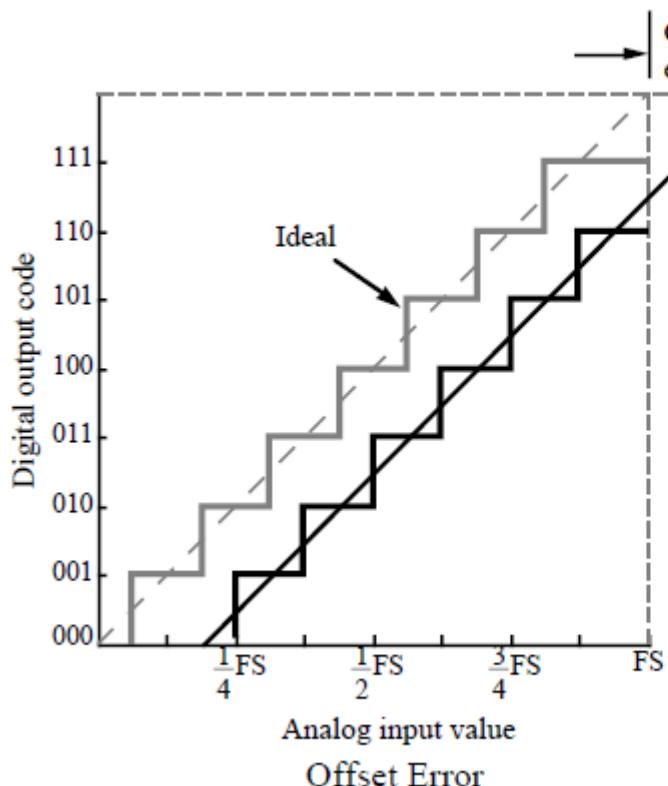


1. **Anti aliasing szűrő:** aluláteresztő szűrő, feladata a jelből eltávolítani az esetlegesen jelenlévő maximális frekvencia feletti komponenseket.
2. Mintavételezés
3. Kvantálás
4. Digitális kódolás

Az ideális A/D konverter



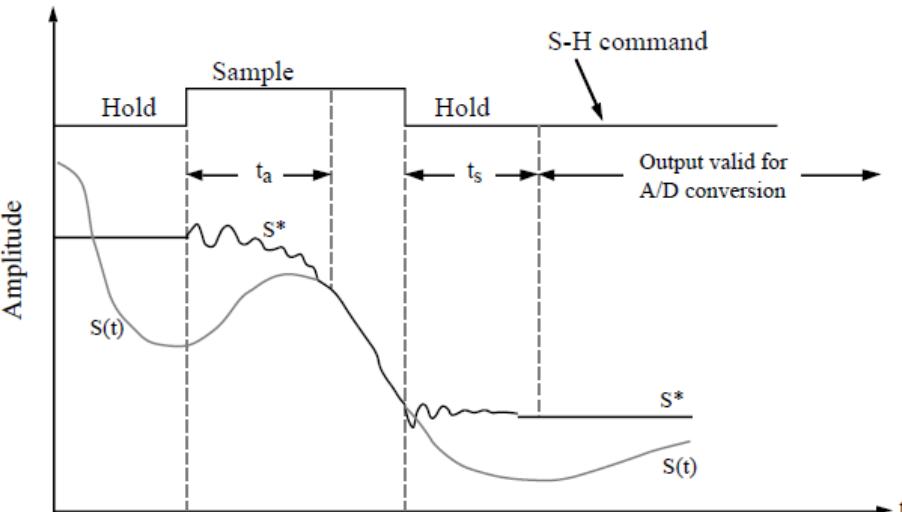
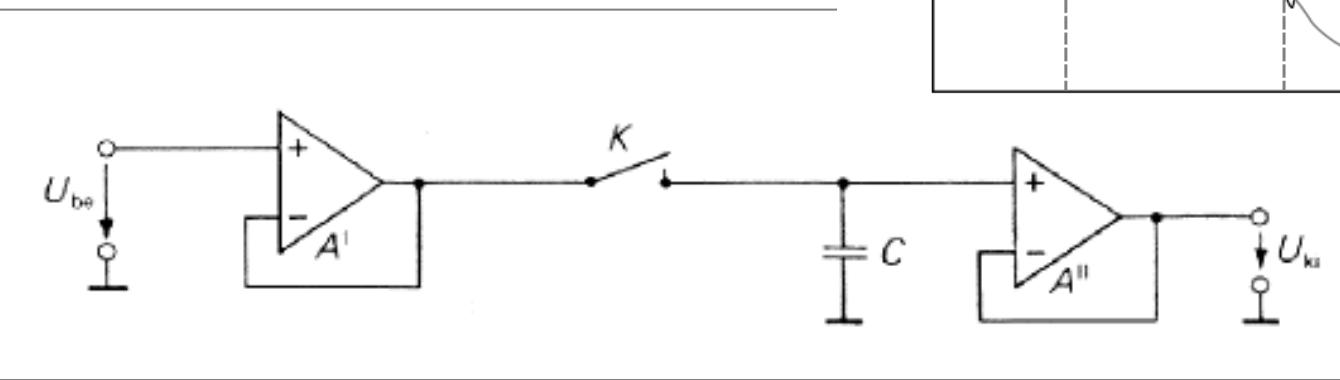
A valós A/D konverter



► Ld. A valós DAC

Mintavevő és tartó

- ▶ Bekapcsolt állapotban a kimeneti feszültség követi a bemeneti jel feszültségét.
- ▶ Kikapcsoláskor tartja a feszültséget addig, amíg az A/D átalakító elvégzi az átalakítást.



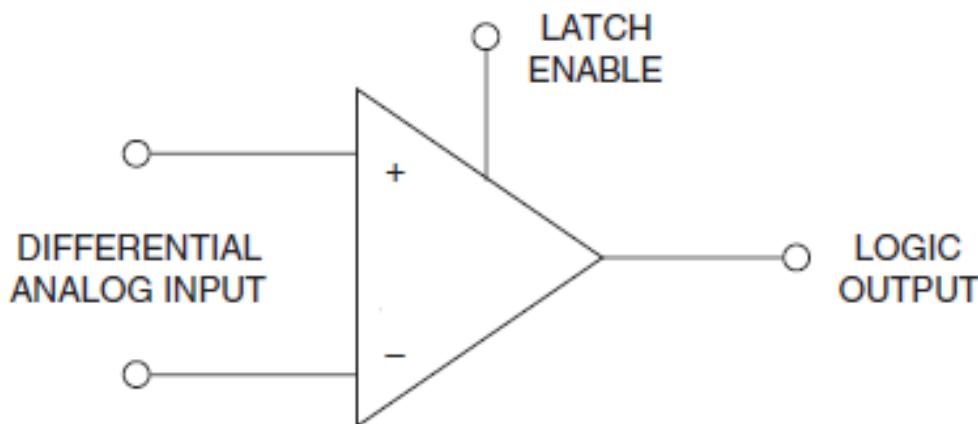
A tároló (tartó) funkciót a C kondenzátor látja el.

A **K kapcsoló zárásakor** a kondenzátor U_{be} feszültségre töltődik.

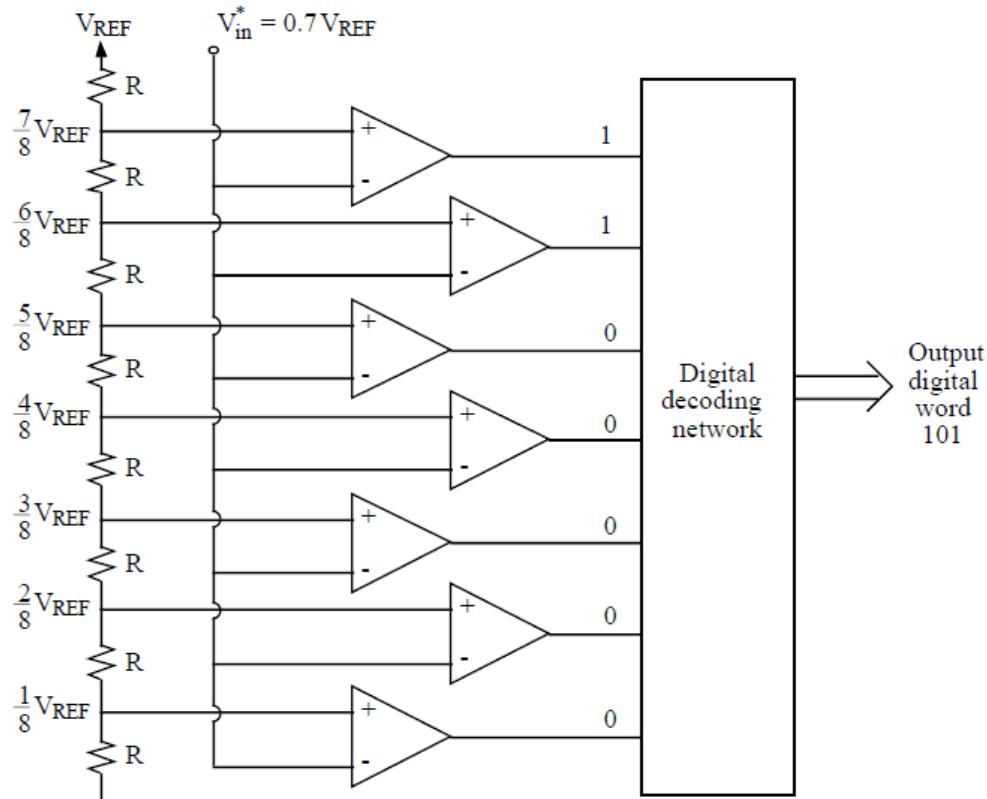
A **kapcsoló nyitásakor** a kondenzátor feszültsége U_{be} , amit minél tovább meg kell őriznie ezért egy feszültség-követő van utána kapcsolva, ami leválasztja a terhelést.

A komparátor

- ▶ A két bemenetén lévő feszültségek különbség előjelétől függően logikai 1 vagy 0-t ad.
- ▶ A szimbóluma szokás szerint ugyanaz, mint a műveleti erősítőnek.
- ▶ De a komparátor nem műveleti erősítő!

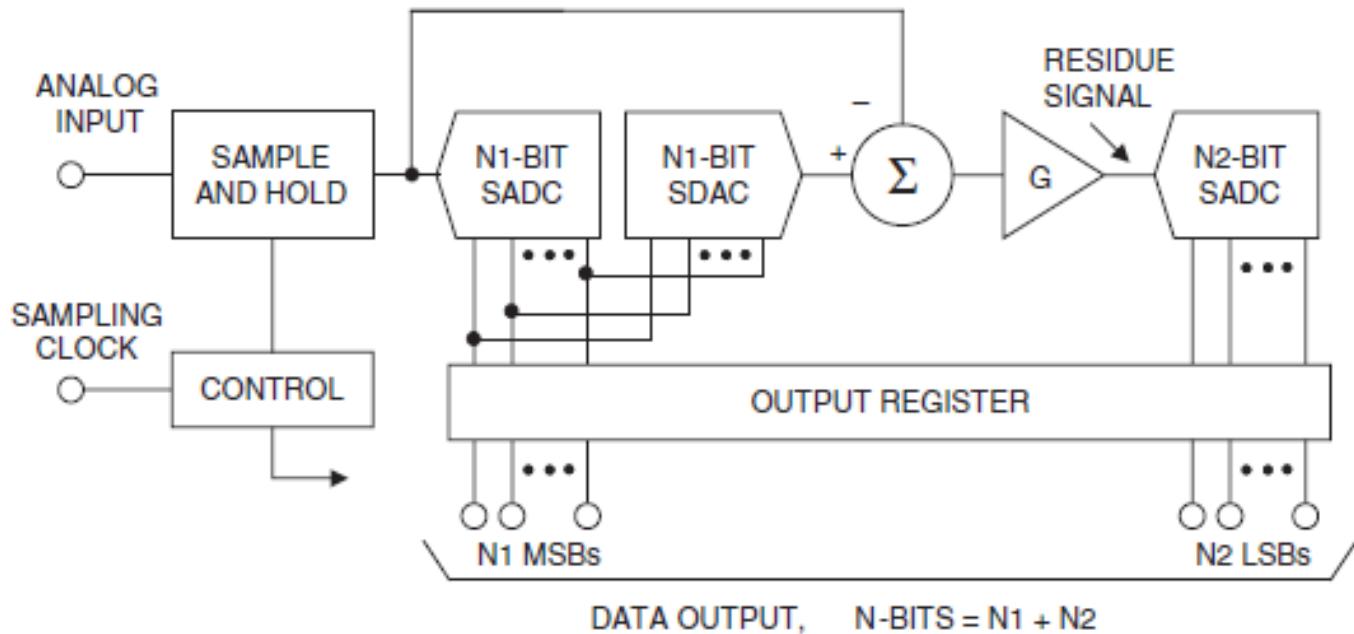


A flash konverter



- ▶ A referencia feszültséget egy feszültségesosztó **ellenállás lánc**kal egyenlő közökre osztjuk.
 - A bemenő feszültséget **komparátorokkal** (kimenete logikai szint, attól függően, hogy $U_p > U_{in}$) hasonlítjuk össze a felosztott referencia feszültségekkel.
 - A komparátorok kimenete egy ún. **thermometrikus kód**, ezt binárisá kell transzformálni.
 - **N bites felbontáshoz 2^N-1 komparátor kell**
 - Nagy chip területhez és fogyasztáshoz vezet, emiatt flash konverter kb. max. 8-9 bites felbontással készül.

Kaszkád flash

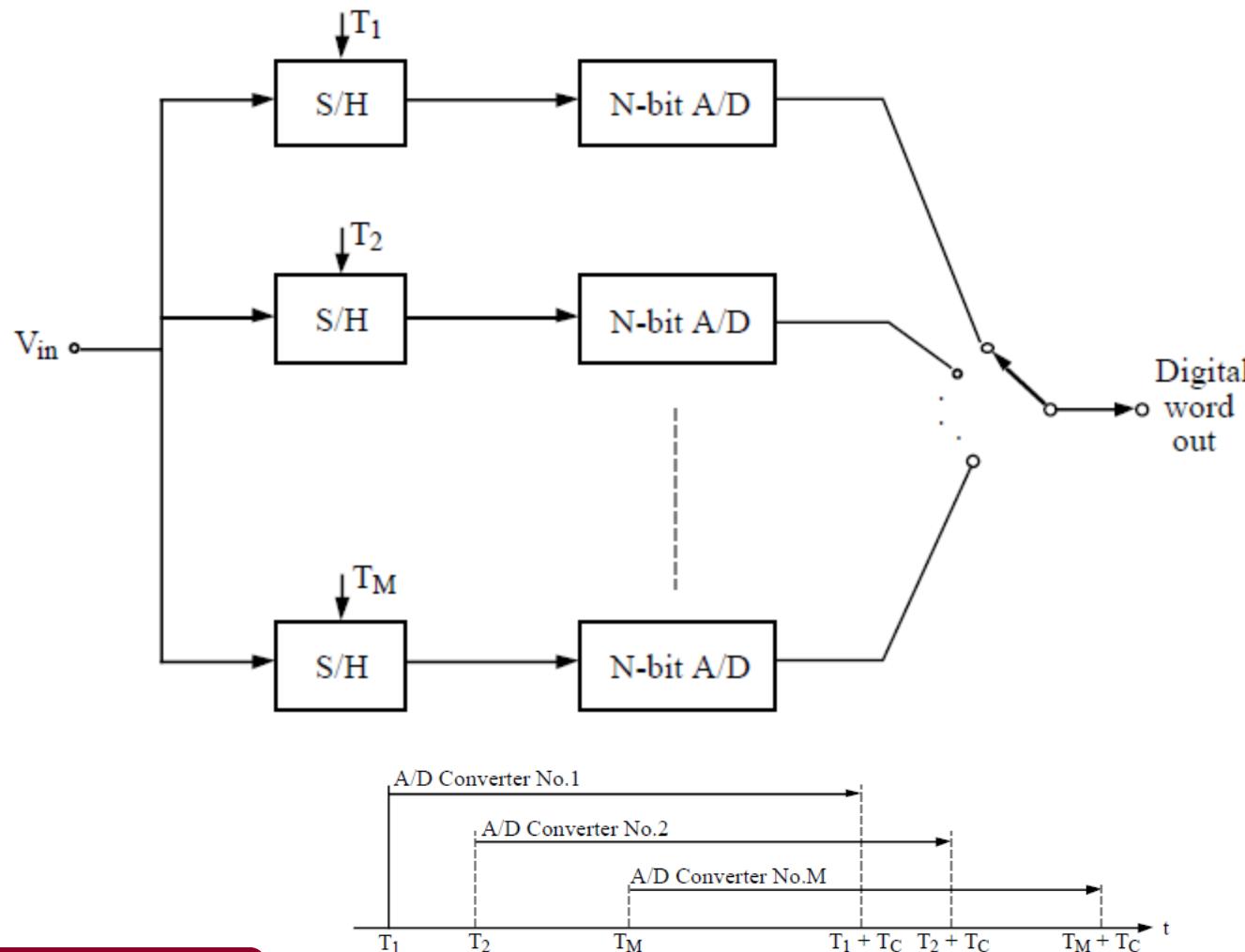


► Első lépésben **átalakítjuk a felső biteket**, majd ezt egy D/A konverterrel **visszaalakítjuk** és **kivonjuk** a bemenetről. A maradékot a másik konverterrel **digitalizáljuk**.

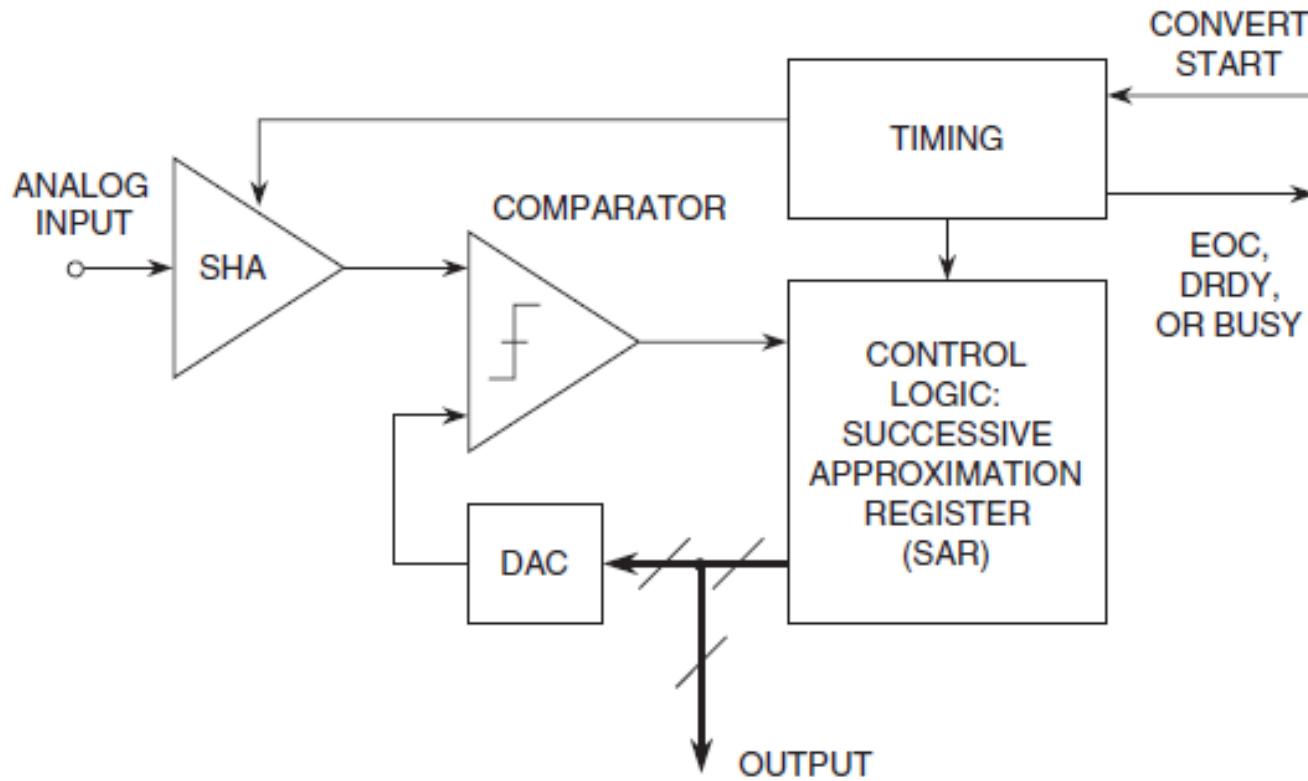
- A felbontás **N=N1+N2** bit,
az átalakítás ideje: kb. $t(A/D) + t(D/A) + t(\text{kivonás}) + t(A/D)$.
Kompromisszum a terület és a sebesség között...
- **A komparátorok száma: $2^{N1+N2}-1$ helyett $2^{N1}+2^{N2}-2$**

Nagysebességű átalakítás

- M db. kisebb sebességű átalakító felváltva dolgozik.
- A mintavételezés M szeresére növelhető



Szukcesszív approximációs A/D



► N bit – N lépés

Szukcesszív approximációs A/D

Az átalakítás kezdetekor a legfelső bit 1, a többi 0.

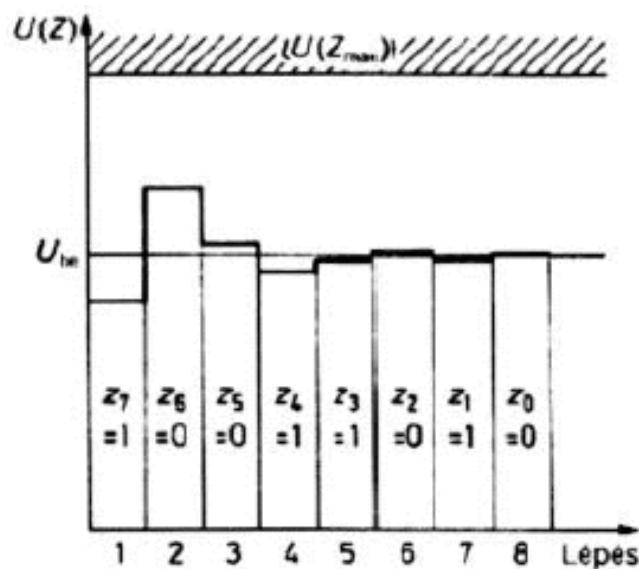
A D/A átalakítóval visszaalakított feszültséget összehasonlítjuk a bemenő jellel, ha nagyobb, a bitet töröljük.

Ezt **minden bitre** sorban elvégezzük.

átalakítási idő:

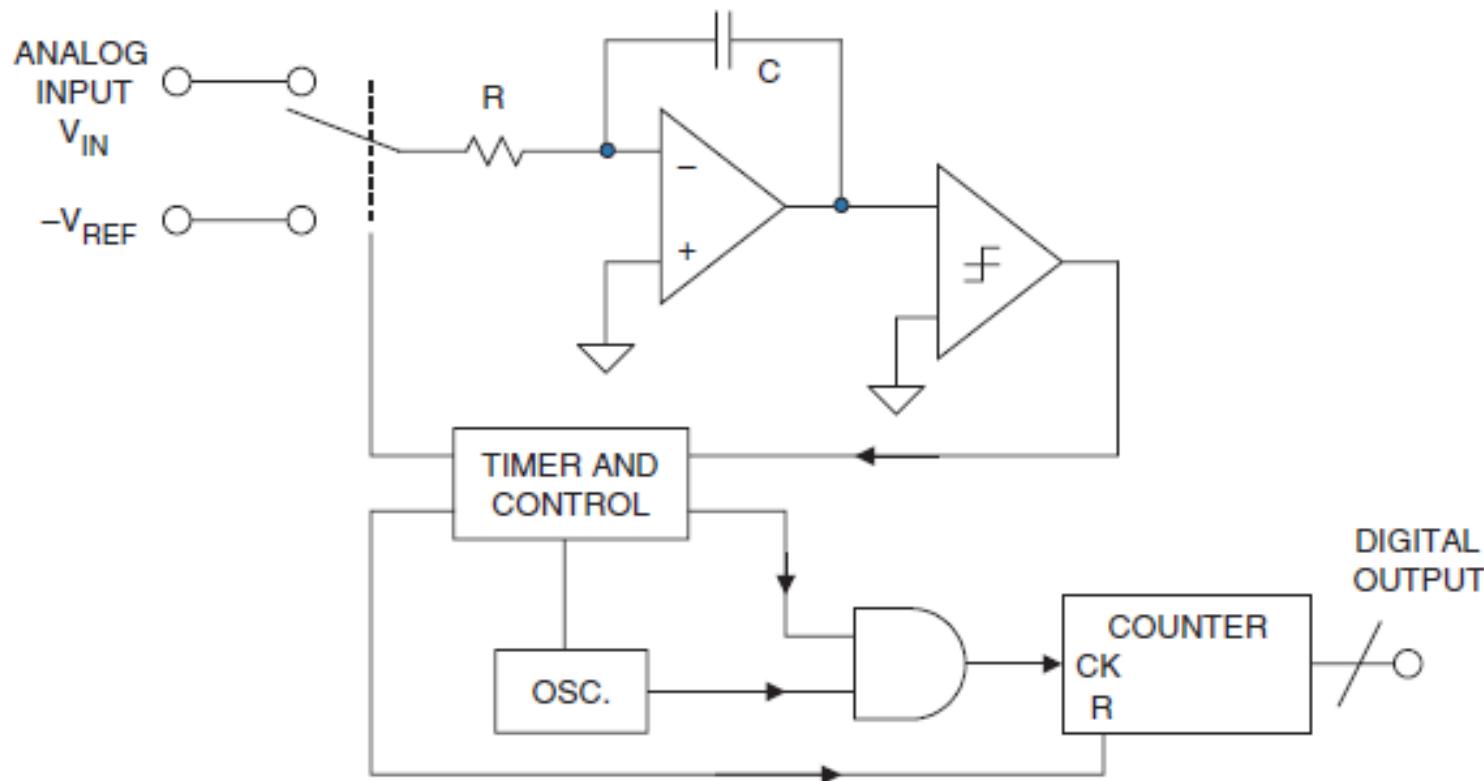
$$N \cdot T_{\text{step}}$$

közepes sebesség



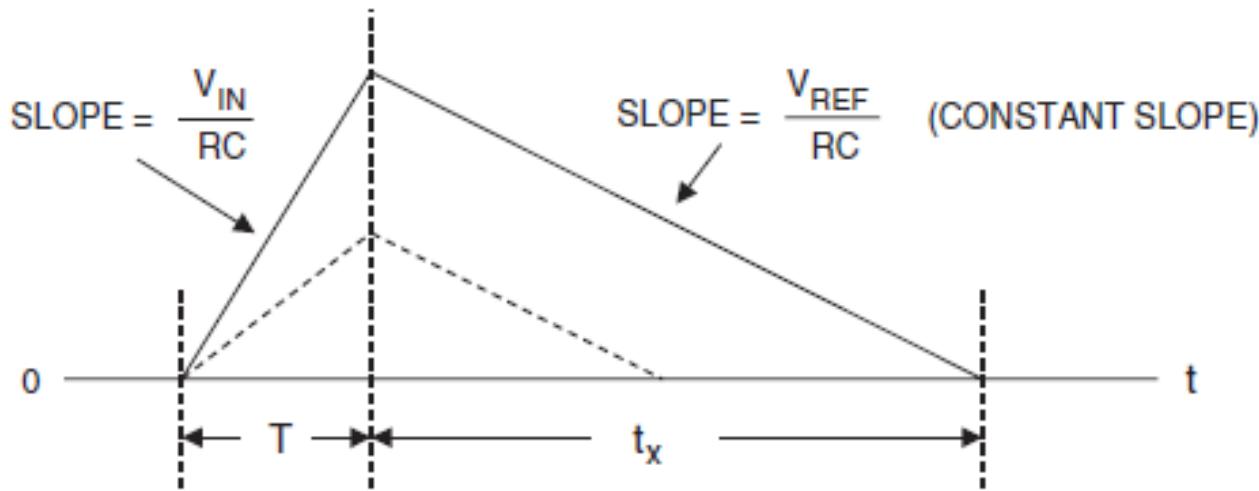
D	z_7	z_6	z_5	z_4	z_3	z_2	z_1	z_0
z_7	1							
z_6		0						
z_5			0					
z_4				1				
z_3					1			
z_2						0		
z_1							1	
z_0								0

Dual-slope A/D konverter



- ▶ A mintavételezés lassú
- ▶ A pontosság viszonylag nagy, 20-24bit

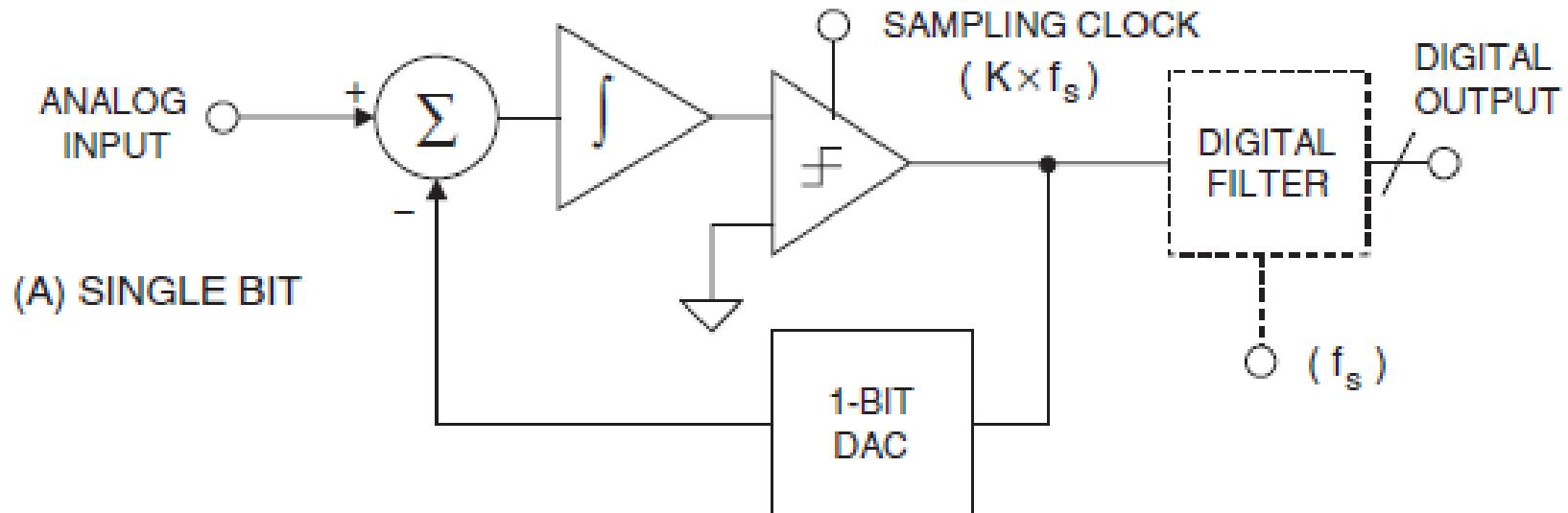
Dual-slope A/D, működés



1. A bejövő jel a mintavező és tartóra kerül, az integrátor (Id. Műveleti erősítők kapcsolások) kimenetét nullázzuk
2. Ekkor indul az átalakítás: a jelet N_{REF} órajel hosszan, T ideig integráljuk
3. Ezután az integrátor bemenetére a negatív referencia feszültséget kapcsoljuk (N_{REF} általában 2 hatványa, és a számláló carry-out-ja kapcsol át)
4. A 0 szint elérésekor a számlálót leállítjuk
5. $V_{IN} = N_x / N_{REF} \cdot V_{REF}$
Az átalakítás ideje max. $2 \cdot 2^N T$

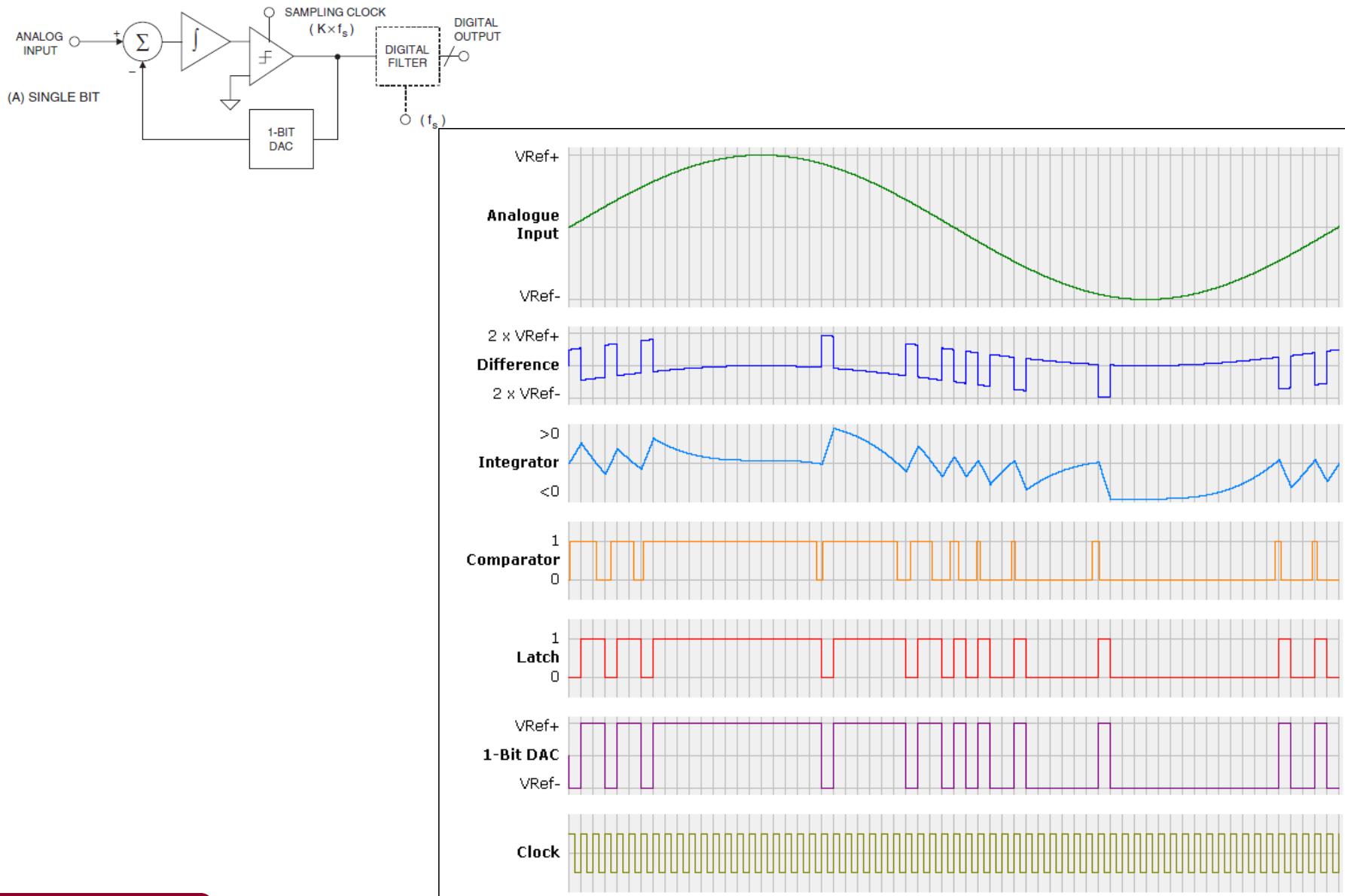
$\Sigma-\Delta$ (Sigma-Delta) A/D konverterek

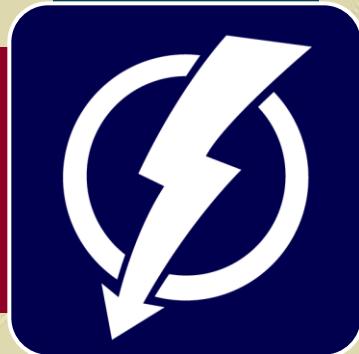
Elsőrendű



- ▶ Ún. oversampling.
 - Jóval nagyobb a mintavételezés frekvenciája, mint a Shannon tételeből következne
 - A kvantálási zaj nagyobb frekvenciatartományban oszlik el
- ▶ Érzéketlenebb az alkatrészek tűrésére, IC-ben könnyen megvalósítható
- ▶ Tipikus példa: 24 bites hangfrekvenciás (0-20kHz) átalakító: ötödrendű, $64 \times$ túlmintavételezés

Elsőrendű Sigma-Delta jelformák

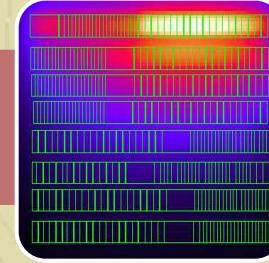
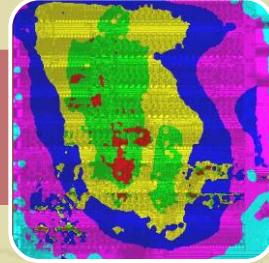
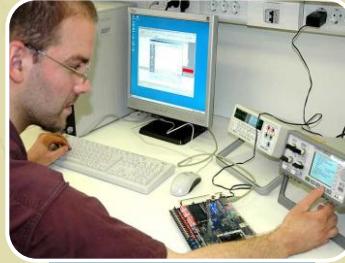




Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi
Egyetem

Elektronikus Eszközök Tanszéke

ASIC áramkörök



Integrált áramkörök felosztása

► Katalógus áramkörök (*COTS commercial off the shelf*)

- Általában széles körű használhatóság.
 - Néha még a tervező sem gondolta volna...
- A felhasználó nem azonos a tervezővel, a gyártó alkalmazási segédletekkel segíti a felhasználókat, akik rendszerbe építik az IC-t.
- Nagyon nagy számban gyártják, így a fejlesztés költsége és gyártás állandó költsége megoszlik.
 - Pl. az egyik legsikeresebb IC, az 555 időzítő
 - 1970 óta gyártják, jelenleg kb. évi 1 milliárd példányban...

► ASIC áramkörök (*Application specific Integrated circuits*)

régebben : Berendezés orientált IC-k

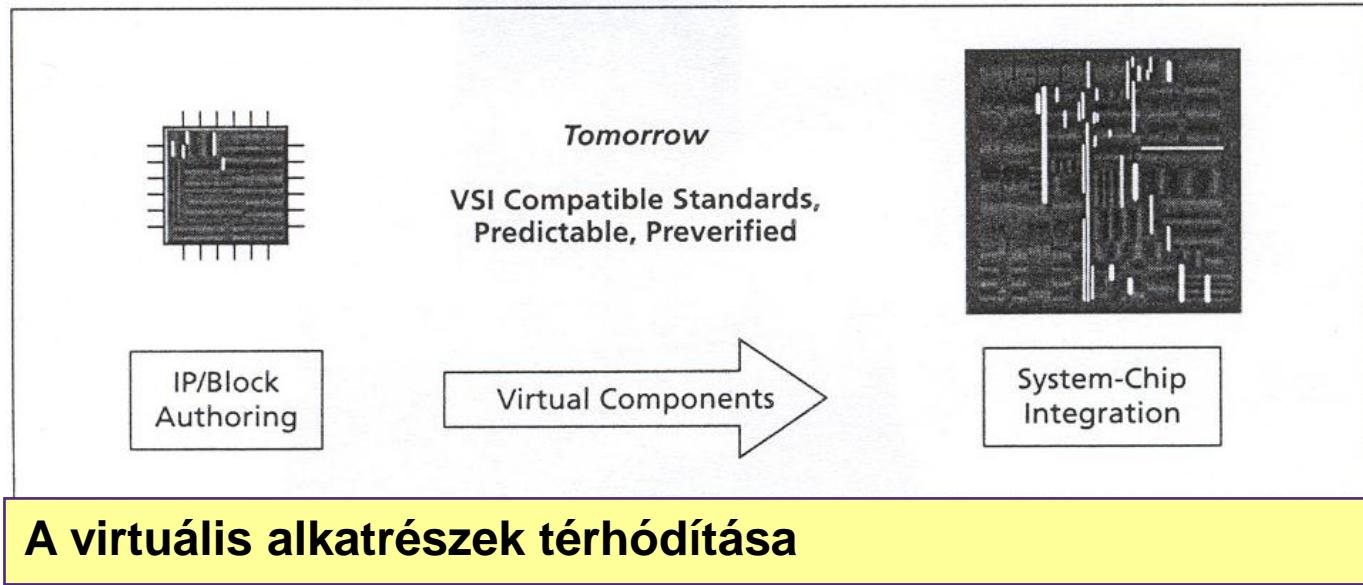
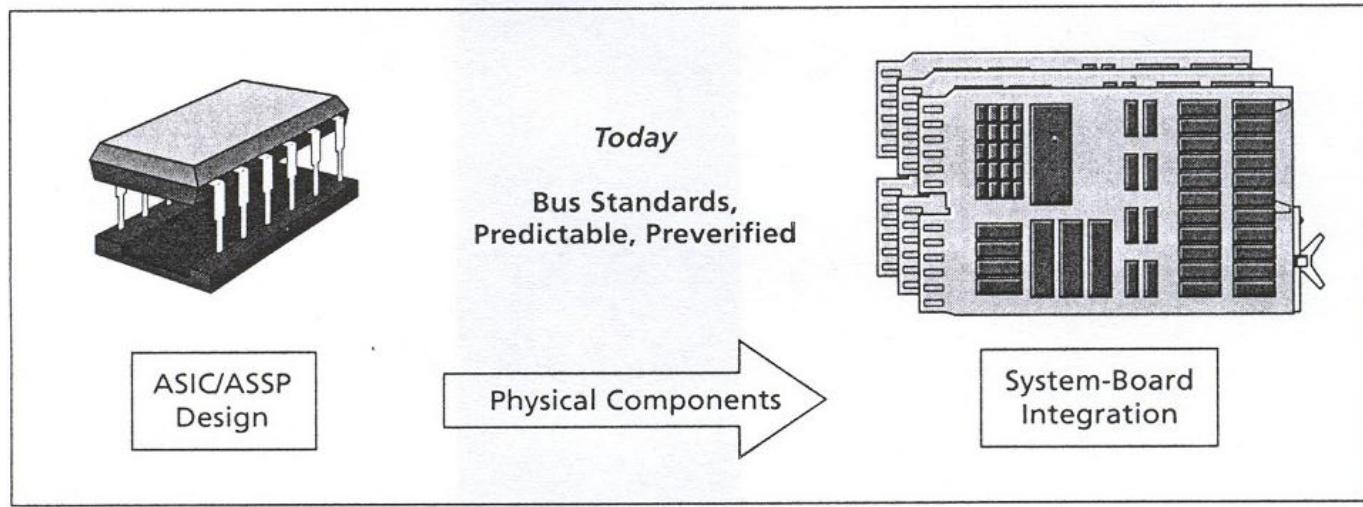
- Egy adott speciális célra készülnek.
- Általában a felhasználó tervezí (tervezeti), mert
 - Katalógus áramkörrel nem, vagy csak bonyolultan tudná megvalósítani a rendszert.
 - Egyéb okokból, pl. a másolás megnehezítése miatt.
- A sorozatszám nagyon széles határok között változhat



Integrált áramkörök tervezése

Katalógus áramkörök

- ▶ A mai IC bonyolultságok mellett képtelenség őket teljesen újratervezni, emiatt a főbb funkcionális blokkokon lehetőleg nem változtatnak
- ▶ A korábban bevált blokkok, makrocellák (pl. egy mikroprocesszor) ún. **IP-k (Intellectual property)** formájában használhatók újra.
 - általában viselkedés szintű leírás formájában
 - a kapcsolódást standard interface-ek (**Virtual socket-ek**) biztosítják
- ▶ *Az új IC gyártásához valamennyi maszkot meg kell tervezni és le kell gyártani → nagyon drága*



ASIC áramkörök

- ▶ A szükséges darabszám igen széles határok között változhat (1– több millió)
- ▶ Kis szériaszámok esetén kritikus az ár, emiatt törekedni kell arra, hogy minél kevesebb legyen az egyedi lépés
 - a tervezésben
 - a gyártásban
- ▶ *Éppen ezért az ASIC áramkörök*
 - *részben előre gyártottak,*
 - *részben előre tervezettek*



ASIC kategóriák

► Custom ASIC (full custom)

- Tervezésük és gyártásuk az összes maszk megtervezését és legyártását igényli.
- A tervezés költséges, nagy szakértelmet és bonyolult (drága...) szoftverháttérrel igényel.
- A maszkok költségei ~\$10 000 - \$1 000 000 (22nm)
- Igen nagy példányszámban éri csak meg.

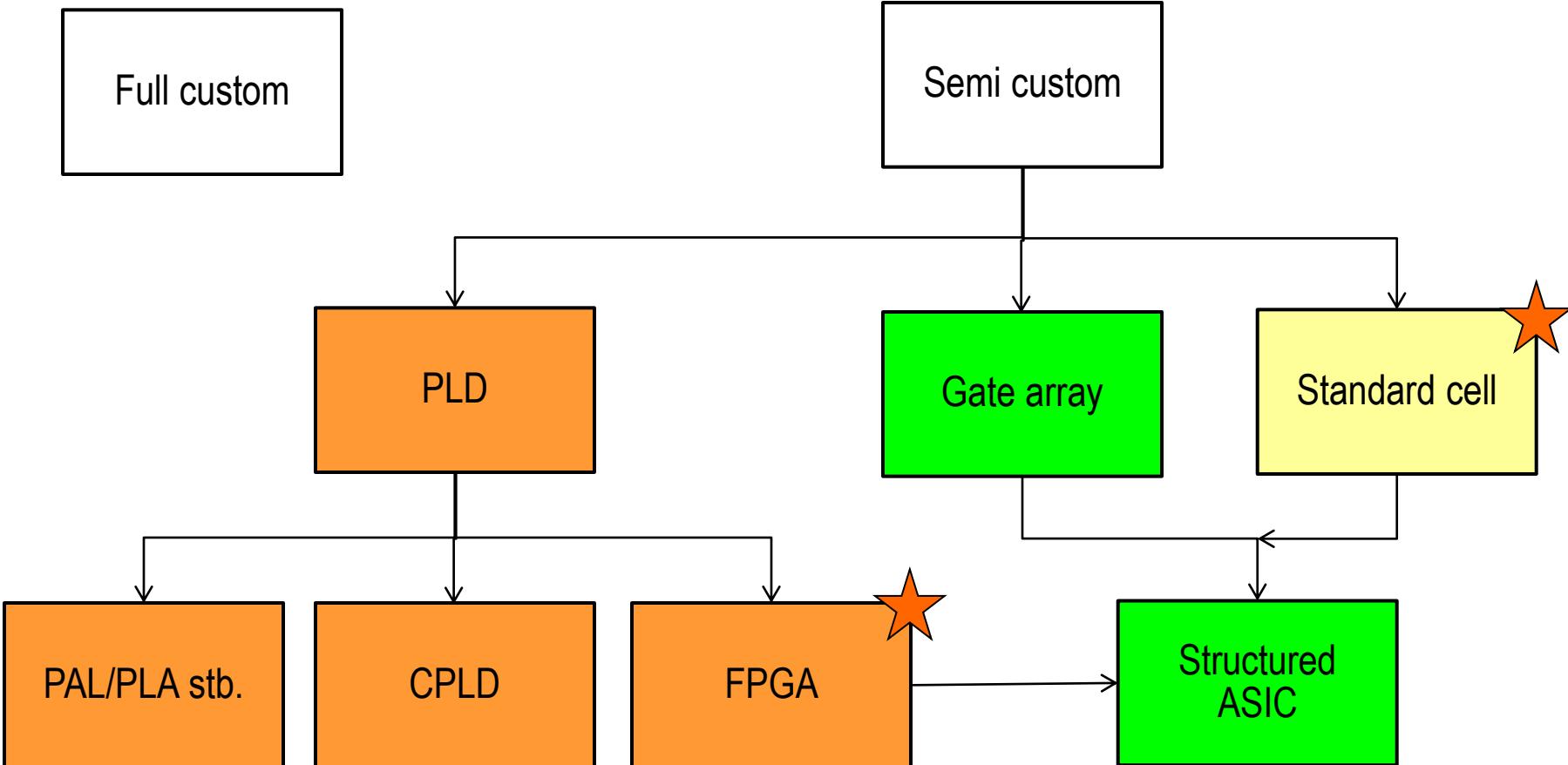
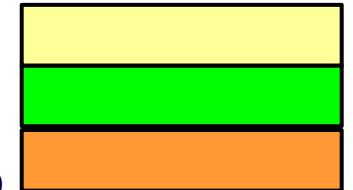
► Semi-custom ASIC

- Részben, vagy teljesen előre gyártottak, vagy előre tervezettek.
- Előre gyártott esetben a végleges kialakítás
 - A fémezés maszkjának megtervezésével történik
 - Vagy teljes mértékben sw úton,
- Előre tervezett esetben
 - Az áramkör strukturált, a maszk minták nagy része előre tervezett, kipróbált



ASIC kategóriák

- ▶ Előre tervezett
- ▶ Részben előre gyártott
- ▶ Teljes mértékben előre gyártott, elektromosan programozható



Gyakran használt

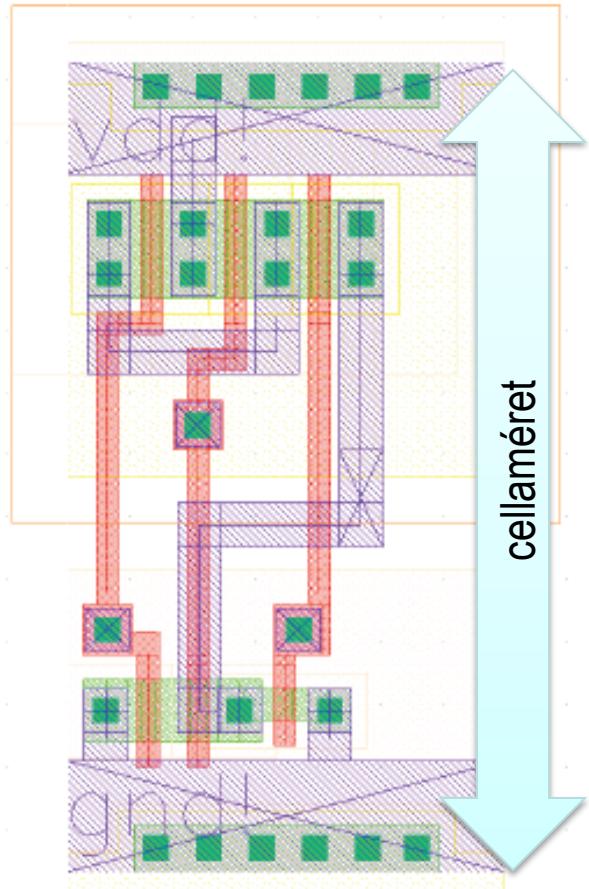
Standard cellás ASIC

► A maszk minták előre tervezettek, ezek az ún. cellák

- Van egy „standard könyvtár” – logikai funkciókkal
 - A szintézis ezeket fogja használni
- A cellák magassága adott, szélessége funkciótól függően változik.
- Az összeköttetések helye (táp és földsín, be és kimenetek stb.) rögzített.

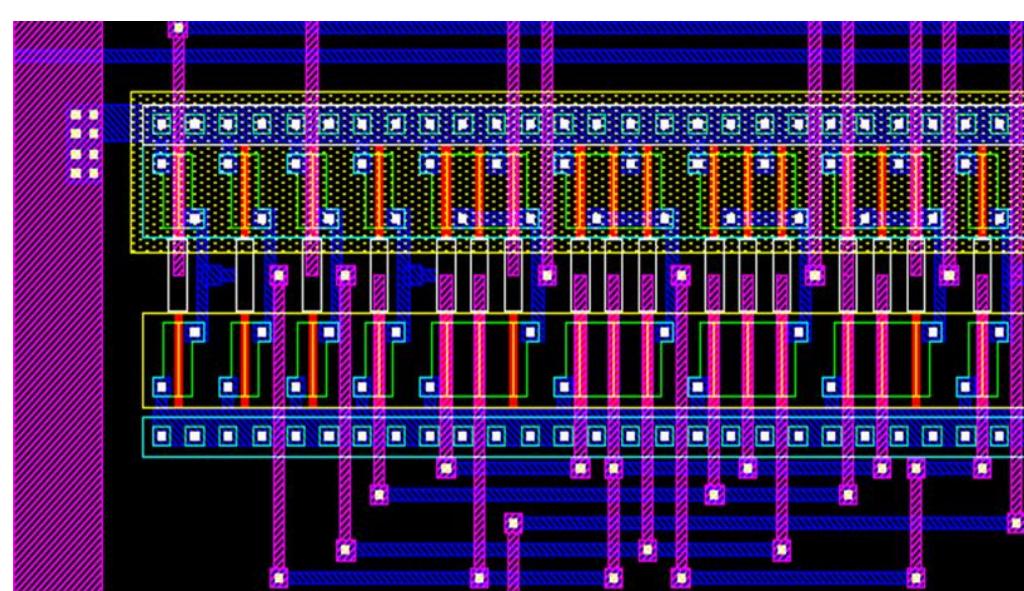
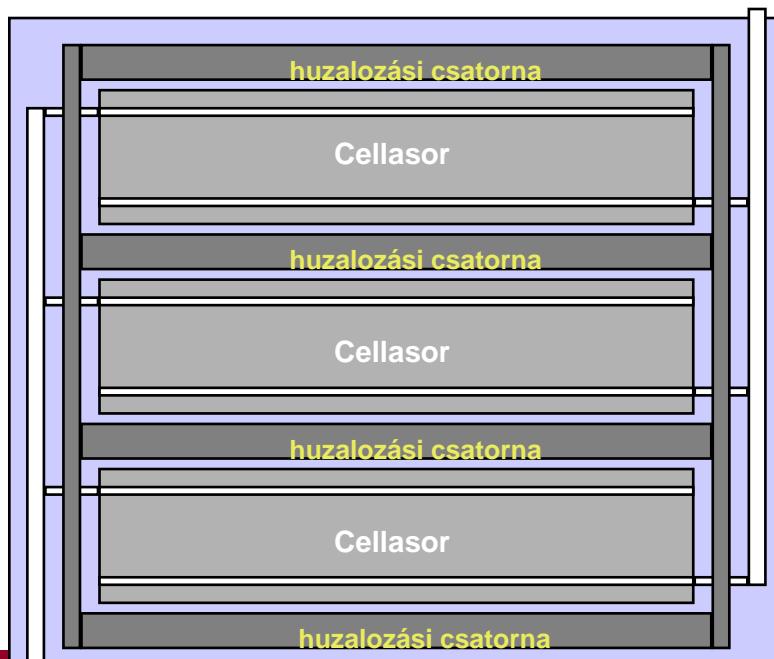
► Pl. $Y = \overline{AB} + \overline{C}$ komplex kapu terve

- Kék: 1.fémréteg
- Piros poliszilícium
- Zöld : az ún. aktív zóna, ide kerül adalékolás
- Kékes zöld: kontaktus a rétegek között



Standard cellás ASIC

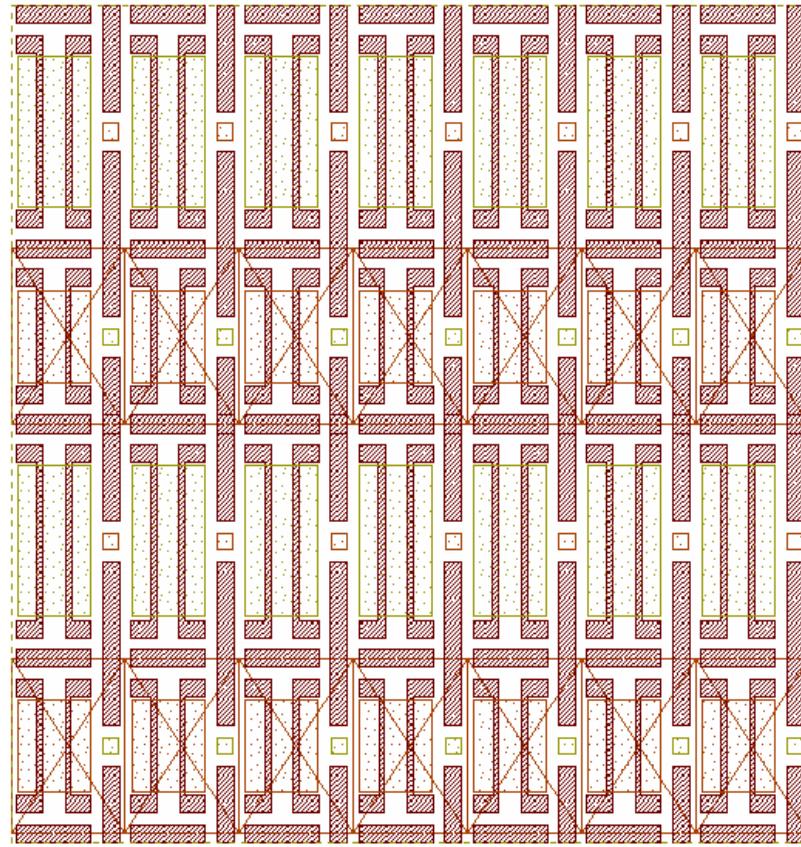
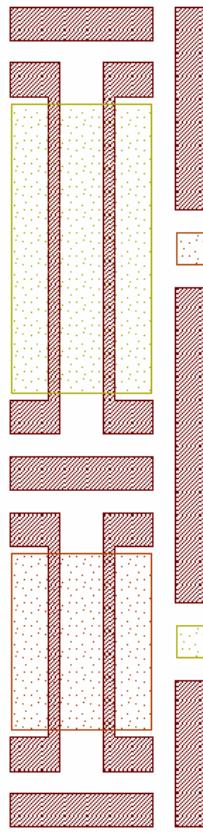
- A tervezés a standard cellák elhelyezéséből és huzalozásából áll
 - Teljes mértékben automatizált...
 - Memória elhelyezésére ún. generált megacella blokkok állnak rendelkezésre
 - Az elhelyezés szabályos, a cellákat sorokban helyezik el, majd összehuzalozzák.
 - Az összes maszkot le kell gyártani, így nem túl olcsó...
 - Prototípus gyártása esetén több, különböző forrásból származó tervet kombinálnak össze, hogy a maszk költségeket megosszák. (MPW – multi project wafer)



Gate array (mask programmable gate array)

- ▶ A fémezés kivételével előre gyártott.
 - „Sea of gates” elrendezésben a chipen n és pMOS tranzisztorokat találunk, előre meghatározott mintázatban és pozícióban.
 - Struktúrált ASIC esetén pedig FPGA-hoz hasonló logikai blokkokat. (Id. később...)
- ▶ Az áramkör végleges funkciójának kialakítása a két vagy több rétegű fémezés meghatározásával történik.
 - A tranzisztorok összekötésével kapukat alakítunk ki,
 - majd a kapuk összekötésével a végleges funkciót.
 - A logikai kapuk belső összeköttetései általában meg vannak tervezve.
 - Szintén a tervezés nagyrészt automatikus.
- ▶ Olcsóbb megoldás
 - Mivel a maszkok száma kevesebb
 - Pl. egy két fémréteges technológia esetében négy maszk szükséges csak
 - Kontaktus a félvezetőhöz, 1. fémréteg, viák az 1. és 2. fémréteg között, 2. fémréteg
 - a tranzisztorokat tartalmazó „félkész” szelet (az ún. master) előre elkészíthető és raktározható
- ▶ Kompromisszum
 - A felépítésből adódóan nem lehet a teljes Si területet kihasználni, mindig maradnak „üres” területek

Példa gate-array-re



- ▶ Az alapcella 2 PMOS és 2 NMOS tranzisztort tartalmaz.
- ▶ Egy 2×7 részlet látható az ábrán.

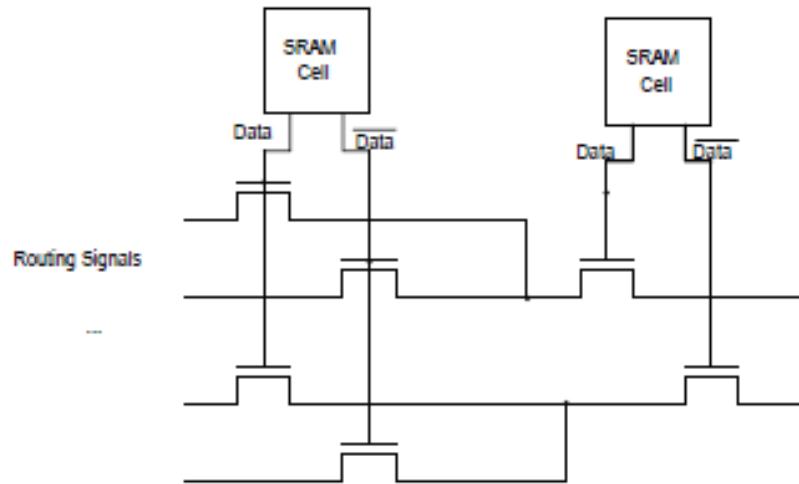
Programozható logikai eszközök

- ▶ Teljes egészében előre gyártottak, logikai funkciók és összeköttetésekkel áll.
 - A logikai funkció és az összeköttetés is programozható.
- ▶ A konfigurálás elektromosan történik.
 - Ugyanazokat a technológiákat használják, mint a memória áramkörök.
 - Volatile
 - A konfigurálást statikus RAM végzi.
 - Emiatt a rendszer indításakor egy EEPROM memóriából a beállításokat be kell tölteni, ezt néha magán a chipen helyezik el.
 - Működés közben újrakonfigurálható.
 - Non-volatile
 - Flash EEPROM tranzisztor
 - Antifuse (PLICE vagy ViaLink)

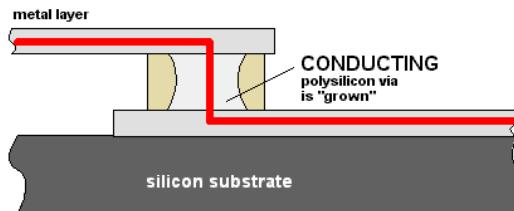


Összeköttetések programozása

► Pl. 4 – 1 multiplexer 2 SRAM cellával



- Tipikusan nMOS tranzisztor használnak, áteresztő tranzisztor céljára.
 - Ez a logikai magas szint sérülését okozza, mivel az nMOS csak $V_{DD} - V_T$ feszültségre tud feltölteni, viszont kevesebb helyett foglal, mint a transzfer kapu
- Az EEPROM programozás is így működik, SRAM cella helyett azonban egy EEPROM tranzisztor van.
- ViaLink esetén azonban az összeköttetés két fémréteg között van, Si területet nem foglal.



Programozási módszerek összehasonlítása

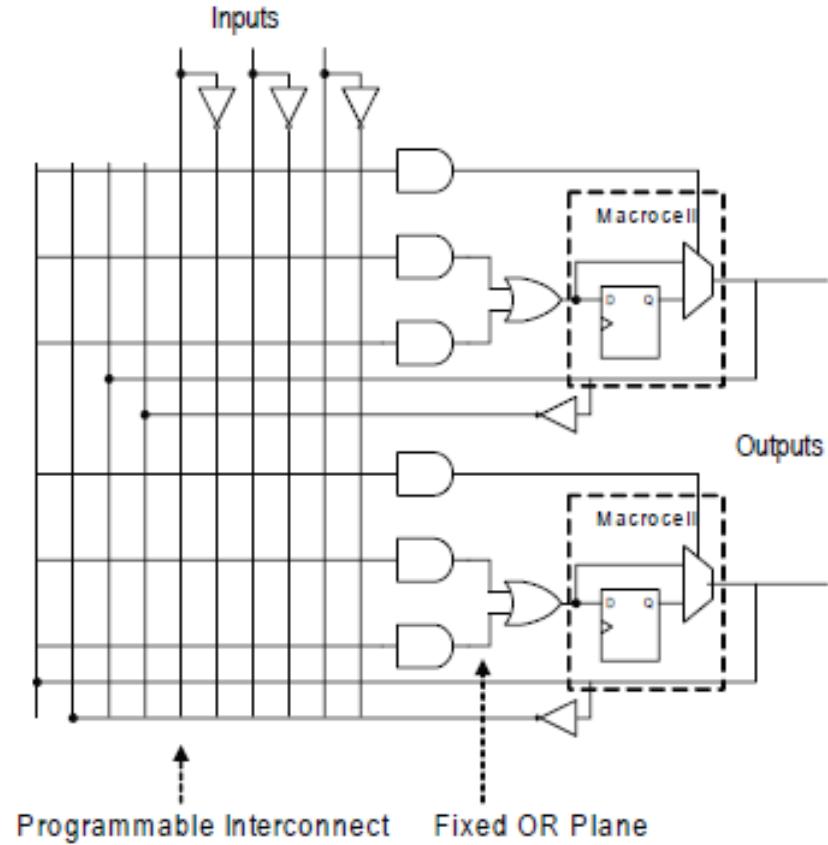
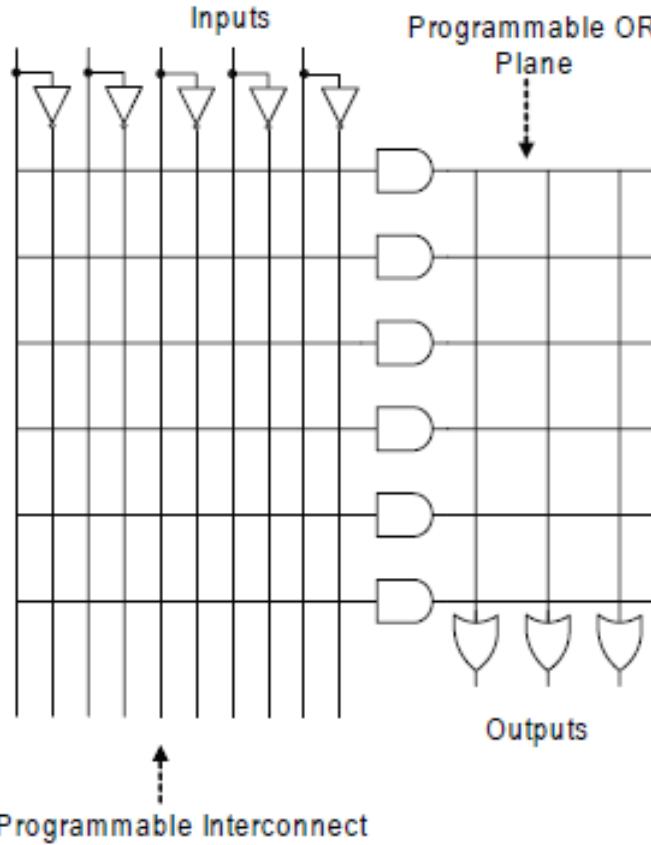
	SRAM	FLASH	Anti-fuse
Sérülékenység	Igen	Nem	Nem
Újraprogramozhatóság	∞	korlátozottan	Nem
Elfoglalt terület	6 tranzisztor	1 tranzisztor	Egy kontaktus
Technológia	Standard CMOS	Spec. flash	Spec. ViaLink
ISP	Igen	Igen	Nem
Kapcsoló ellenállása (Ω)	500-1000	500-1000	20-100
Kapcsoló kapacitása (fF)	1-2	1-2	<1
Visszafejthetőség	Titkosításra van szükség	Igen nehéz	Igen nehéz



PLA/PAL

► Ez már történelem...

- Még fuse-al történt a programozás
- PLA – logikai függvények megvalósítására.
 - 1-1 ben TTL kiváltására, mind az és, mind a vagy mező programozható. Így egy PLA segítségével többtucat TTL kapu spórolható meg.
- PAL – már regisztereket is tartalmazott.
- Ezekhez fejlesztették ki az első hardver leíró nyelveket...



CPLD – complex programmable logic device

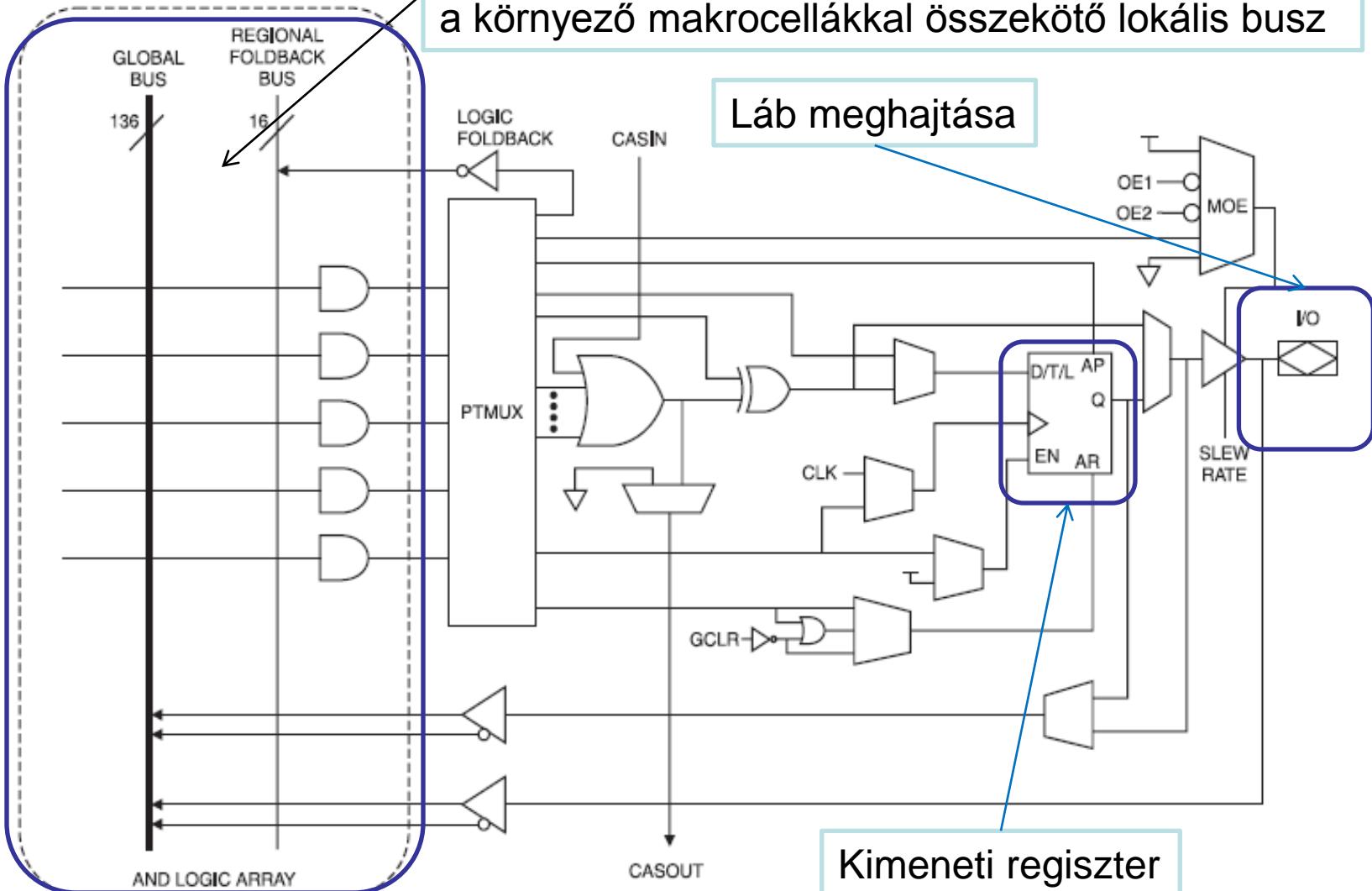
- ▶ A PLA/PAL utódja.
- ▶ A „segéd” logika előállítása a feladata (az ún. glue logic) egy több kereskedelmi IC-t tartalmazó kártya esetén pl. a feladat a busz illesztés illetve esetleges segéd logikai jelek generálása
 - Erre tradicionálisan a 74xx-t használták...
- ▶ Makrocellákból áll.
 - egy makrócellában a PAL-hoz hasonló ÉS mátrix van logikai függvények előállítására.
 - Egy programozható típusú (D, JK, T) flip-flop
 - A makrocella általában közvetlenül kimenetet is hajthat.
 - EEPROM segítségével programozható.



Példa: ATMEL CPLD makrocella

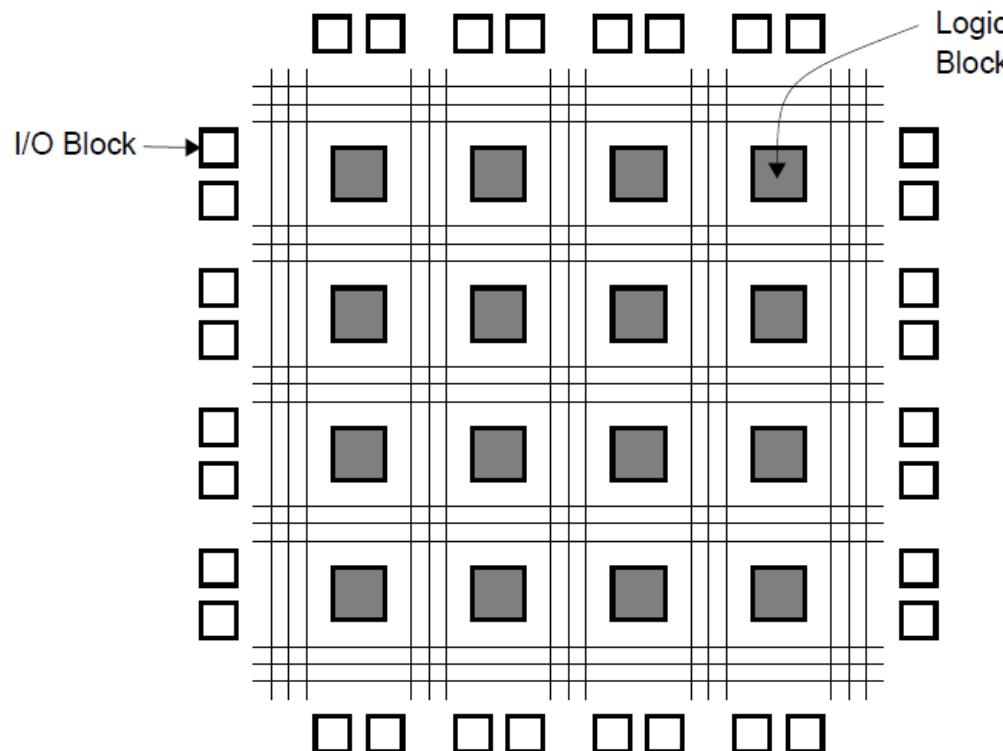
ATF1500A(L) Macrocell

ÉS mátrix – be van kötve a belső globális busz és a környező makrocellákkal összekötő lokális busz

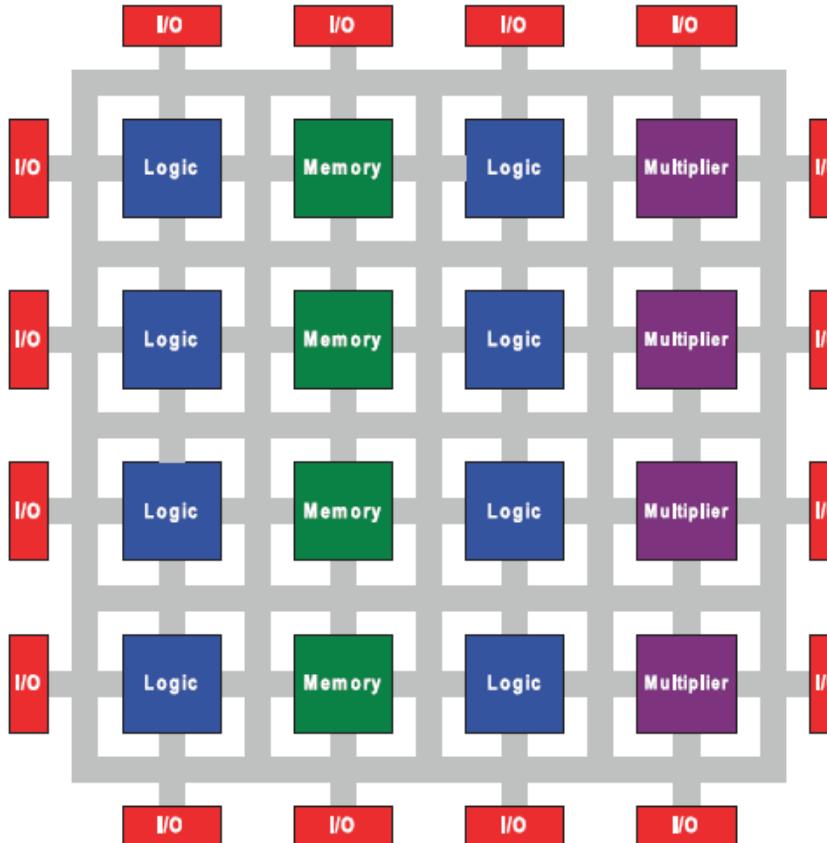


FPGA – field programmable gate array

- ▶ Teljes mértékben előre gyártottak
- ▶ SRAM vagy antifuse elven programozhatóak
 - Az SRAM a leggyakoribb, mert teljesen standard CMOS kompatibilitis.
- ▶ A legegyszerűbb változatok konfigurálható logikai cellákból és programozható összeköttetésekből áll.

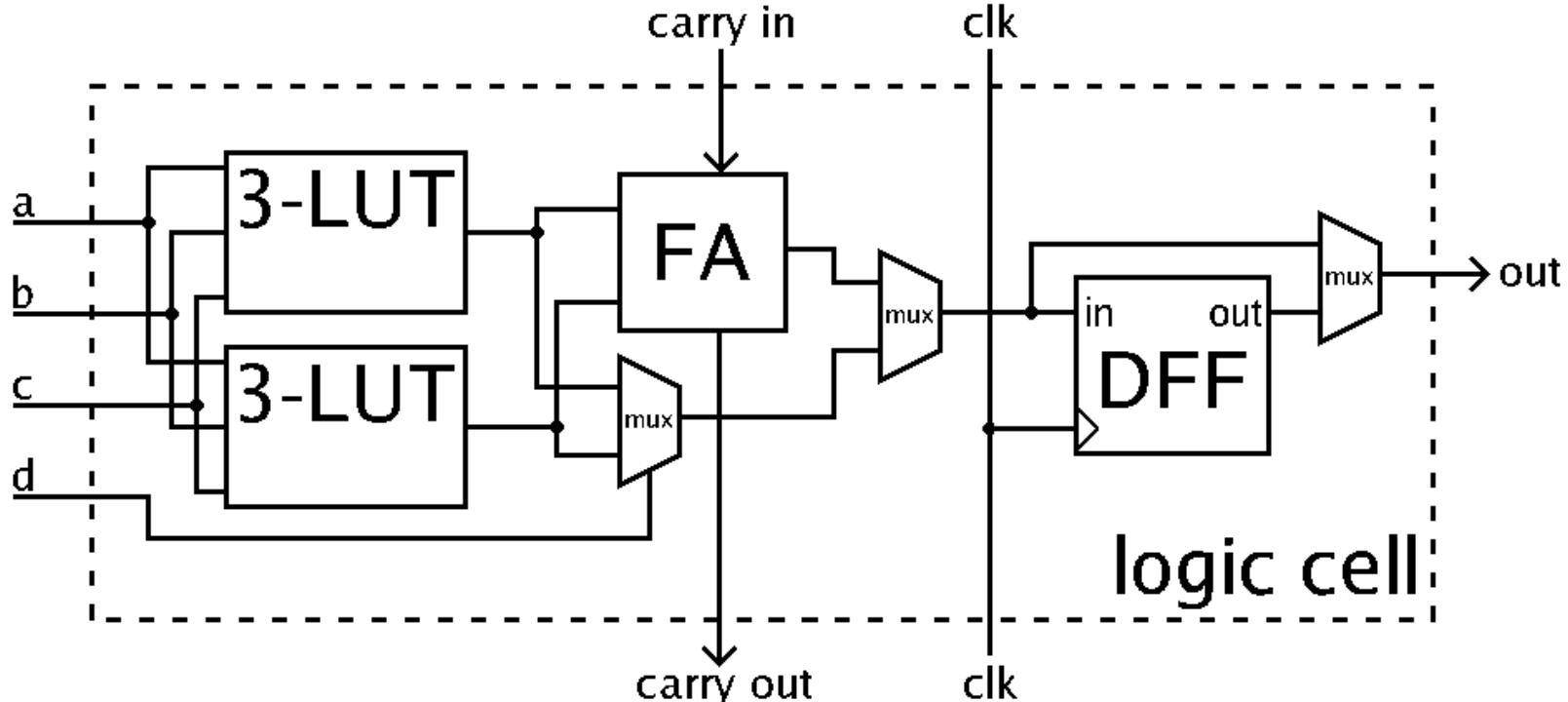


Modern FPGA-k



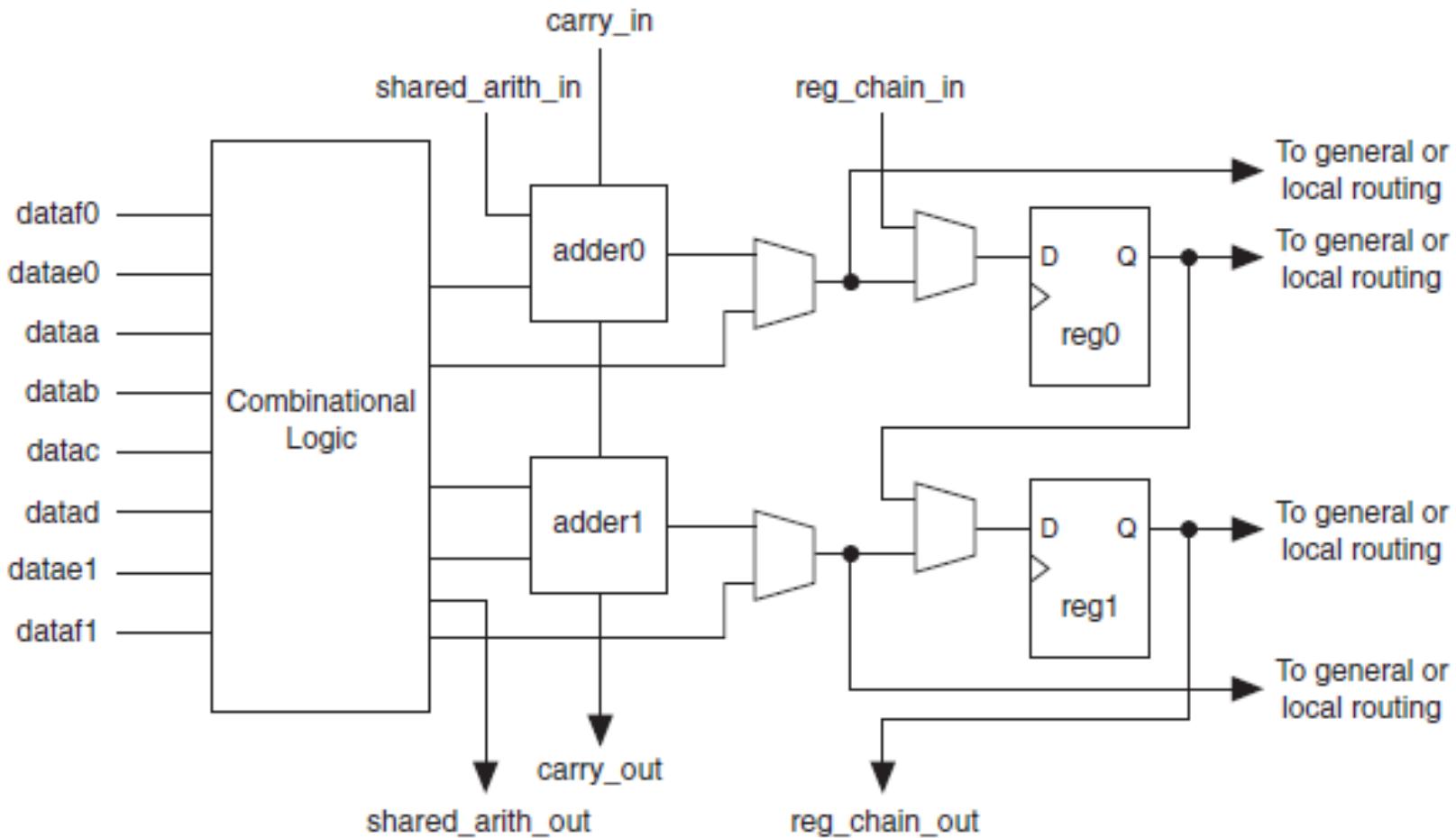
- A konfigurálható logikai blokkokon kívül tartalmaznak:
- Memóriát
 - Ún. DSP blokkokat – ezek leggyakrabban szorzók
 - PLL-eket a pontos órajel előállítására.

Egy konfigurálható logikai blokk elve



- ▶ A CPLD-től eltérően nem programozható ÉS mezővel valósítanak meg kombinációs logikát, hanem look-up table-el. (leginkább SRAM alapú FPGA-ban...)
- ▶ Általában tartalmaz egy teljes összeadót is a logikai blokk, mert az összeadás gyakran használt művelet.
- ▶ Az egyes elemeket programozható multiplexerekkel lehet összekötni.

Valódi logikai blokk - példa



► Altera Stratix II. adaptive logic module (2007...)

ALM kapcsolás – PÉLDA: 3db 3 bites szám összeadása

3-Bit Add Example

1st stage add is implemented in LUTs.

2nd stage add is implemented in adders.

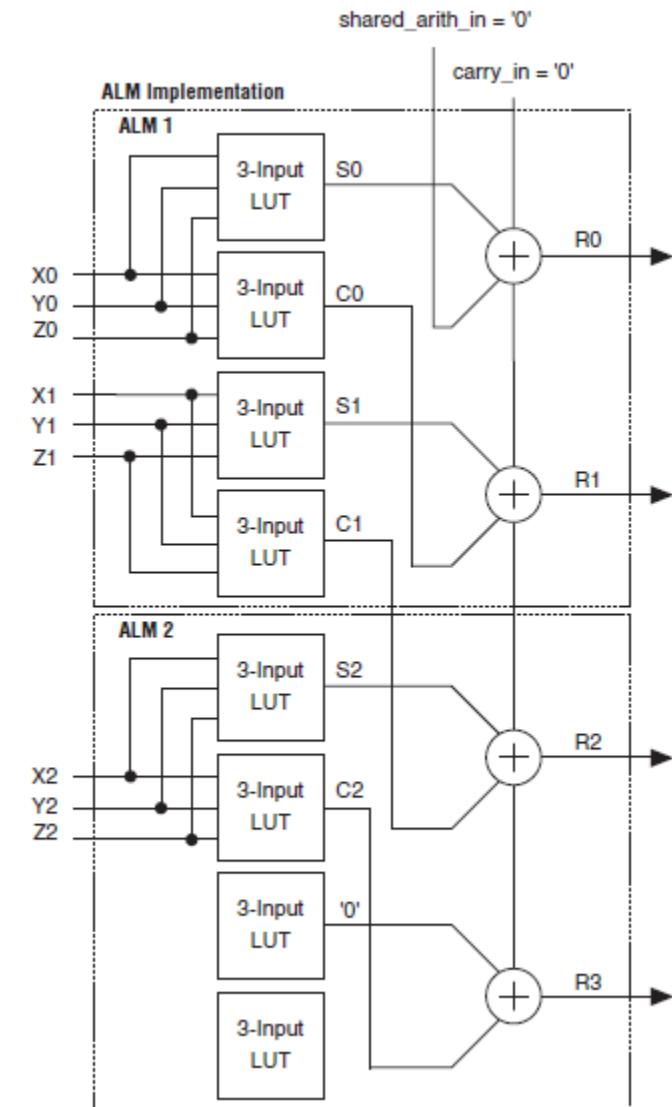
$$\begin{array}{r} X_2 \ X_1 \ X_0 \\ Y_2 \ Y_1 \ Y_0 \\ + \ Z_2 \ Z_1 \ Z_0 \\ \hline S_2 \ S_1 \ S_0 \\ + \ C_2 \ C_1 \ C_0 \\ \hline R_3 \ R_2 \ R_1 \ R_0 \end{array}$$

Binary Add

$$\begin{array}{r} 1 \ 1 \ 0 \\ 1 \ 0 \ 1 \\ + \ 0 \ 1 \ 0 \\ \hline 0 \ 0 \ 1 \\ + \ 1 \ 1 \ 0 \\ \hline 1 \ 1 \ 0 \ 1 \end{array}$$

Decimal Equivalents

$$\begin{array}{r} 6 \\ 5 \\ + \ 2 \\ \hline 1 \\ + \ 2 \times 6 \\ \hline 13 \end{array}$$

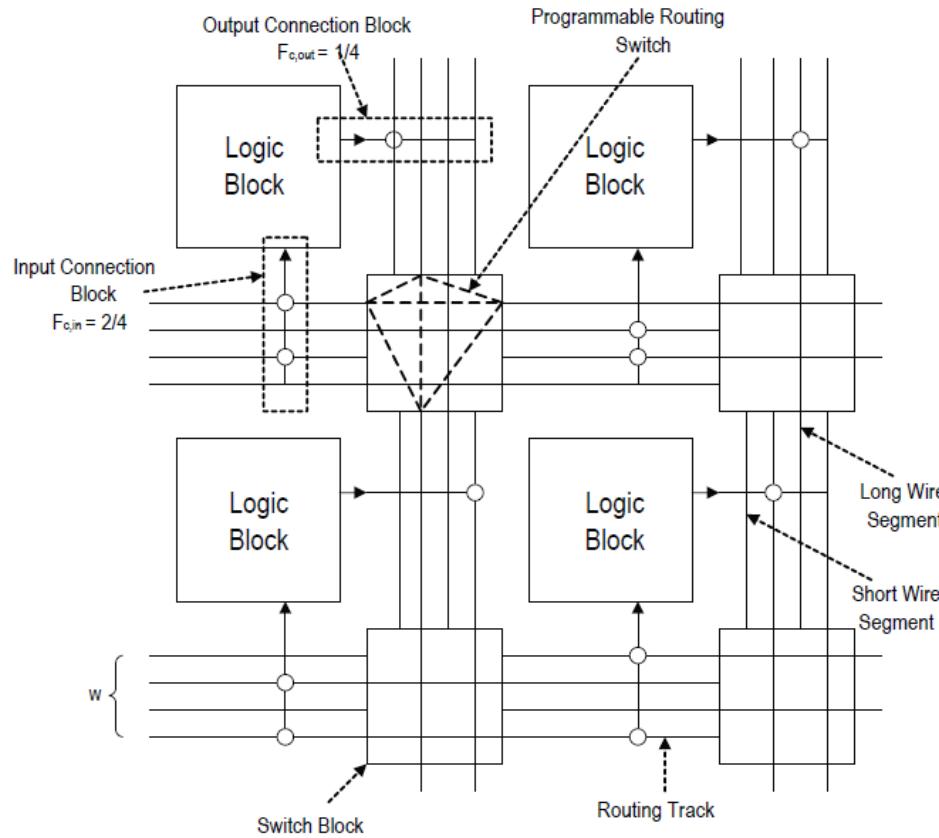


Logikai blokkok

- ▶ minden gyártónak más felépítésű, így nehezen összehasonlítható.
- ▶ Általában több logikai blokk alkot egy egységet, amin belül létezik lokális és globális huzalozás.
- ▶ A logikai blokkok és a memória vagy DSP blokkok vegyesen helyezkednek el, így a huzalozás egyszerűbb.
- ▶ Néha nemcsak DSP blokkokat, hanem teljes mikroprocesszorokat is elhelyeznek, ez az ún. hard core.
- ▶ (a soft core a logikai elemekkel megvalósított mikroprocesszort jelenti)



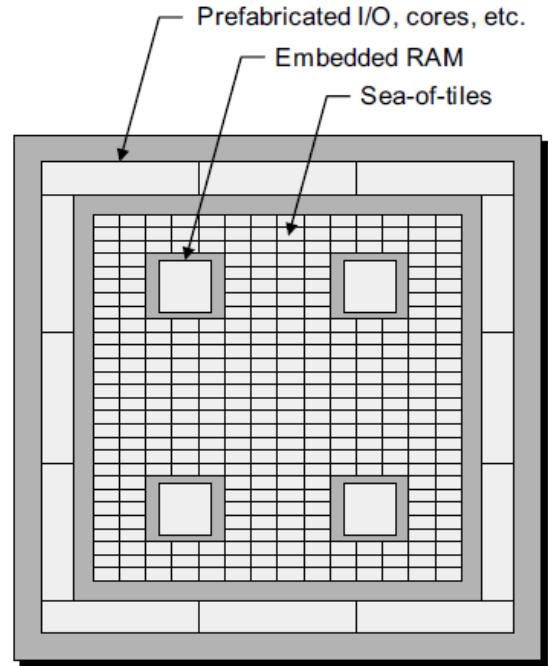
Összeköttetések kialakítása



- ▶ Általában „sziget” stílusú az összeköttetés.
- ▶ Az összeköttetés szintén egy korlátos erőforrás FPGA esetén...

Strukturált ASIC

- ▶ Az FPGA és a standard cellás IC tulajdonságait egyesíti.
- ▶ A megacellák (pl. beágyazott RAM, CPU stb.) az FPGA-hoz hasonló logikai blokkokkal vannak körülvéve.
- ▶ Nagyrészt előre gyártott, a programozás a felső 2-3 fémréteg elkészítését jelenti, ez jóval olcsóbb, mint az összes maszk legyártása.
- ▶ Mivel nincs kapcsoló tranzisztor, az összeköttetések okozta késleltetés jóval kisebb, mint az FPGA esetén
- ▶ Teljes rendszerek kialakítására alkalmas technológia (SoC – System on a Chip)
 - Processzor
 - Memória (ROM/RAM)



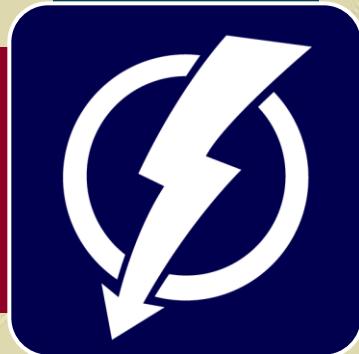
Összehasonlítás – a standard cellás IC-hez viszonyítva.

	std. Cell	FPGA	Struktúrált ASIC
Maximális órajel (%)	100	15	75
Teljesítmény (%)	100	1200!	300
Kapuszám egységnyi területen (%)	100	1	33

Egy másik összehasonlítás...

Table 7.1 The FPGA:ASIC gap from [120].

Metric	Soft logic only	Soft logic & DSP	Soft logic & memory	Soft logic, DSP & memory
Area	35	25	33	18
Delay	3.4	3.5	3.5	3.0
Dynamic power	14	12	14	7.1



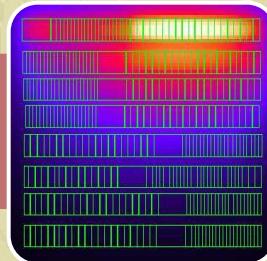
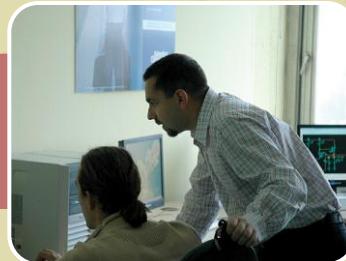
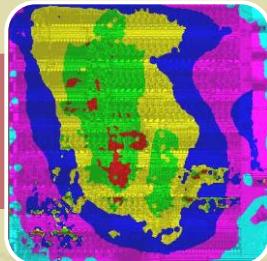
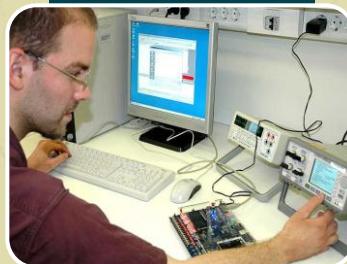
Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi
Egyetem

Elektronikus Eszközök Tanszéke



Digitális IC tervezés

Dr. Székely Vladimír,
Dr. Poppe András, Nagy Gergely,
Ress Sándor



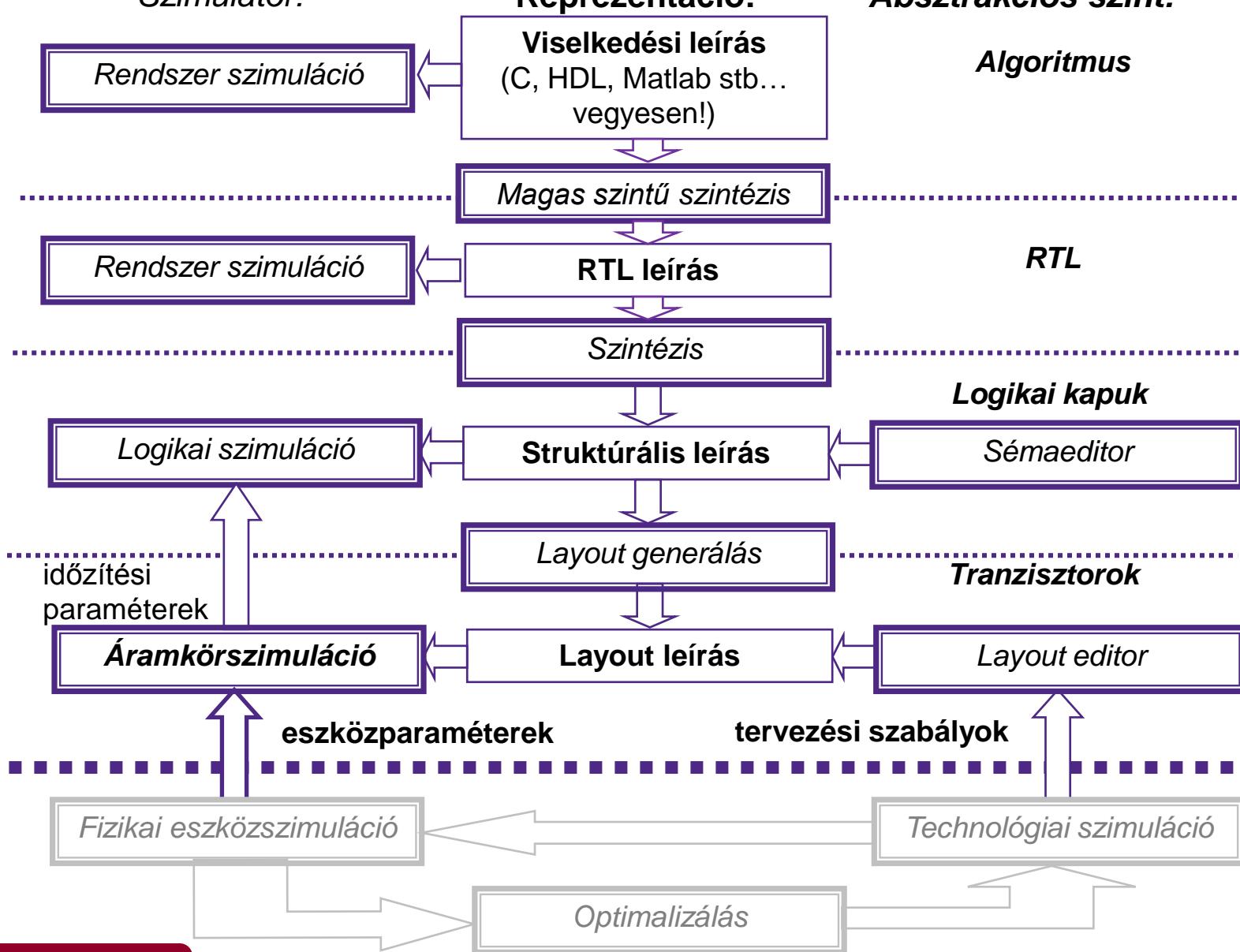
Digitális IC tervezés

- ▶ A digital design flow
- ▶ Tervezőrendszerek, (mikro)elektronikai CAD
- ▶ Az IC tervezés folyamata
- ▶ Az FPGA-s tervezés folyamata
- ▶ Tokozás, szerelés
- ▶ Tesztelés
- ▶ JTAG



A digitális design flow

Szimulátor:



Tervezőrendszerek elemei

► Áramkörbevitel

- HDL (Verilog, VHDL)
 - viselkedési leírás (Verilog, VHDL, SystemC, C, bármi ☺)
 - strukturális leírás (Verilog, VHDL)
- Grafikus megadás (strukturális)

► Szimuláció (minden absztrakciós szinten)

- rendszer, kapu szintű logikai, áramköri
- megjelenítő eszközök
- koncepcionális tervezés, fizikai tervek ellenőrzése

► Szintézis (átjárás az egyes absztrakciós szintek között)

- Magas szintű szintézis
 - Viselkedési leírás → RTL leírás
- Logikai szintézis
 - RTL leírás → strukturális leírás
- Layout szintézis
 - Strukturális leírás → maszkok leírása



Technológia-függetlenség

A felsorolt elemek nem utalnak semmiféle realizációs módszerre!

Ez miért lehetséges?

- ▶ IC technológiák tervezése - alkalmazás tervezés: **élesen szétválasztva.**
- ▶ Kapocs közöttük: **tervezési szabályok, eszközparaméterek.**

Ennek milyen következményei vannak?

- ▶ Nyílt tervezőrendszerek lehetségesek
(ugyanaz a szoftver tetszőleges technológiára, realizációs módra, pl. IC-re, FPGA-ra).
- ▶ A digitális IC tervezéséhez nem kellenek mély mikroelektronikai ismeretek. (Az analóghoz azonban igen.)



Tervezési szabályok

- ▶ A layout kialakítására vonatkozó egyszerű geometriai szabályok
- ▶ A technológia felbontóképességétől
- ▶ Ilyenek pl.:
 - különböző maszkokon kialakítható alakzatok minimális méretei
 - azonos, ill. különböző maszkokon elhelyezkedő alakzatok közötti távolságok, kötelező átfedések, stb.



Specifikáció – a tervezés első része

► Műszaki specifikáció (globálisan)

- Mi az a funkció, amit elektronikusan meg szeretnénk oldani?
 - Rendszermodell készítése

► Gazdasági specifikáció

- Milyen termékben kerül felhasználásra a rendszer?
- Mekkora a terméken belüli költséghányada?
- Vannak-e költségkorlátok?
 - Pl. zsebkalkulátor – a költség legnagyobb része a ház, billentyűzet, kijelző

► Egyéb szempontok

- ne legyen másolható (pl. katonai elektronika vagy egyéb nagy hozzáadott értékű rendszer)



Specifikáció – a tervezés első része

► Egyéb szempontok (folytatás)

- kis helyen elférjen
- kis fogyasztású legyen: telepes üzem – lásd laptop, mobil (*low power design*)
- kis tápfeszültségről (pl. 1.5V) is menjen (*low voltage design*)
- versenyképesség
 - time-to-market
 - technológiai előny
- kiszolgáltatottság
 - pl. FPGA-s terv – meddig kapható az adott FPGA?
 - az ún. *2nd sourcing* kérdése

► Szabványok



Specifikáció rögzítése

- ▶ Annak eldöntése, mi legyen analóg, mi legyen digitális
- ▶ Digitális rendszerkomponenseknél: HW-SW együttes tervezés, majd partícionálás (megint különböző költségfüggvények figyelembevételével)
- ▶ Digitális HW főbb rendszerparamétereinek optimalizálása, pl.
 - adat- és címbuszok mérete,
 - memóriák méretezése, stb.



Specifikáció rögzítése 2

► A nagyobb HW komponensek specifikációját *univerzálisan rögzítjük – HDL-ben leírjuk*

- viselkedési leírást készítünk – a realizációs módtól ez teljesen független
 - Ez az adott komponens műszaki specifikációjának egzakt rögzítése
 - Ez formális verifikációra alkalmas:
 - Valóban azt csinálja, amit elképzeltünk?
- ebből **RTL** –t készíthetünk (kézzel vagy szintézissel) – ez még mindig független lehet a végső realizációs módtól
- majd megadjuk, hogy **hogyan kell tesztelni** az adott modult (*test bench* készítése – ez a stimulusok leírása logikai szimuláció számára)

Pl. a US DoD is ezeket igényli, VHDL-ben

► **Az IP megvalósítási módtól függetlenül van leírva**



Realizációs módot választunk

► Mi befolyásolja?

- Tapasztalat: Mihez értenek a szóba jöhető tervezők?
- Rendelkezésre álló tervező eszközök
- Nem műszaki jellegű szempontok:
 - pénz- és időkorlátok, copy-safe megvalósítás, darabszám kontrol, versenyképesség, stb.

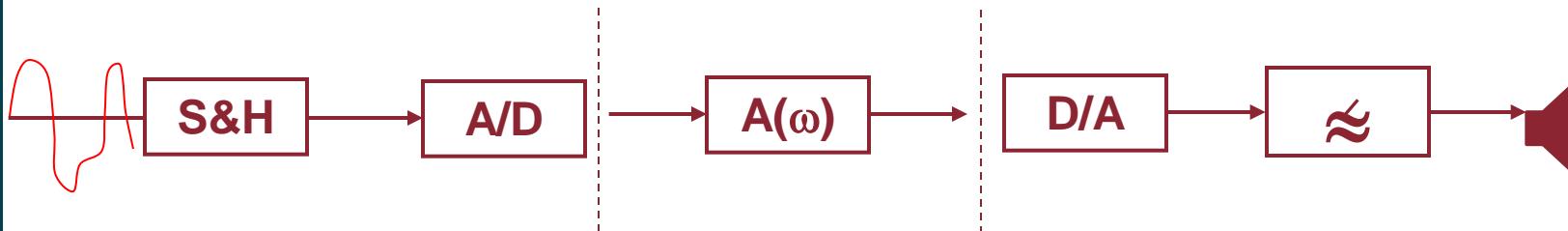
Pl. :

- gyorsan kell egy "deszkamodell" – FPGA
- 100 ezres darabszámú sorozat várható – egyedi IC



Példa: jelfeldolgozás

► $A(\omega)$ tisztán analóg megvalósítása



► vagy digitális szűrés: $A(\omega)$ -ból annak Z-transzformáltja

- késleltetők
- szorzók
- összeadók

► Realizációs mód választása

- DSP + szoftver
 - flexibilis, könnyű más átviteli karakterisztikát kialakítani
 - nem copy-safe, illékony, esetlegesen bonyolult környezet
- célhardver:
 - késleltetés – shift regiszter, összeadó/szorzó – kombinációs hálózat
 - FPGA – ez is újraprogramozható
 - egyedi IC – örökre rögzített architektúra

Összehasonlítás.

	full cust.	std. cell.	Strukt. ASIC	FPGA	NYÁK
Ár	10^6 felett	10^4 körül	10^3 körül	mindig	10^3 alatt
Átfutás	1 év	4 hónap	4 hónap	percek	1 hét ..
Tervezés	drága, lassú	olcsó, gyors	olcsó, gyors	olcsó, gyors	olcsó, gyors
Kivitelezés	drága	drága	közepes	olcsó	olcsó
Max. bonyolultság	nagy	nagy	nagy	nagy	????
Másolhatóság	nehéz	nehéz	nehéz	nehéz	könnyű



Magas szintű szintézis

► Viselkedési szintű (algoritmikus) leírásból készül RTL leírás

- Változatosak a lehetőségek
 - A hardverleíró nyelvek alkalmasak viselkedési szintű leírásra
 - Léteznek különböző eszközök, amelyek pl.
 - Időzítésmentes C kód
 - MATLAB kód
 - Egyéb, akár grafikus felülettel rendelkező eszközök
- Itt történik az architektúra kiválasztása
 - Az RTL ugyanis már a megvalósított architektúrához kötött, ami nem minden esetben ad optimális megoldást.
 - Egyetlen algoritmikus leírásból keletkezhet sok különböző RTL leírás
 - Automatikusan
 - Más és más terület, késleltetés és teljesítmény igénynyel.
- Nem kell törődni a megvalósítás részleteivel
 - Órajel, reset, start/stop stb. ez a szintézér feladata lesz.
 - A HLS eszköz automatizálja a hardver erőforrások kiosztását, ütemezését.
 - Az újrafelhasználhatóság emiatt sokkal hatékonyabb...

Példa architektúra választásra

- ▶ Egyszerű feladat, adjunk össze 4db 32 bites számot...

- A példa C leírást használ

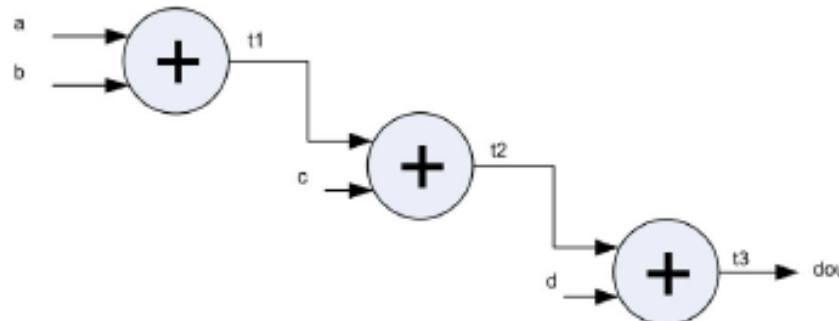
```
#include "accum.h"
void accumulate(int a, int b, int c, int d, int &dout){
    int t1,t2;

    t1 = a + b;
    t2 = t1 + c;
    dout = t2 + d;
}
```

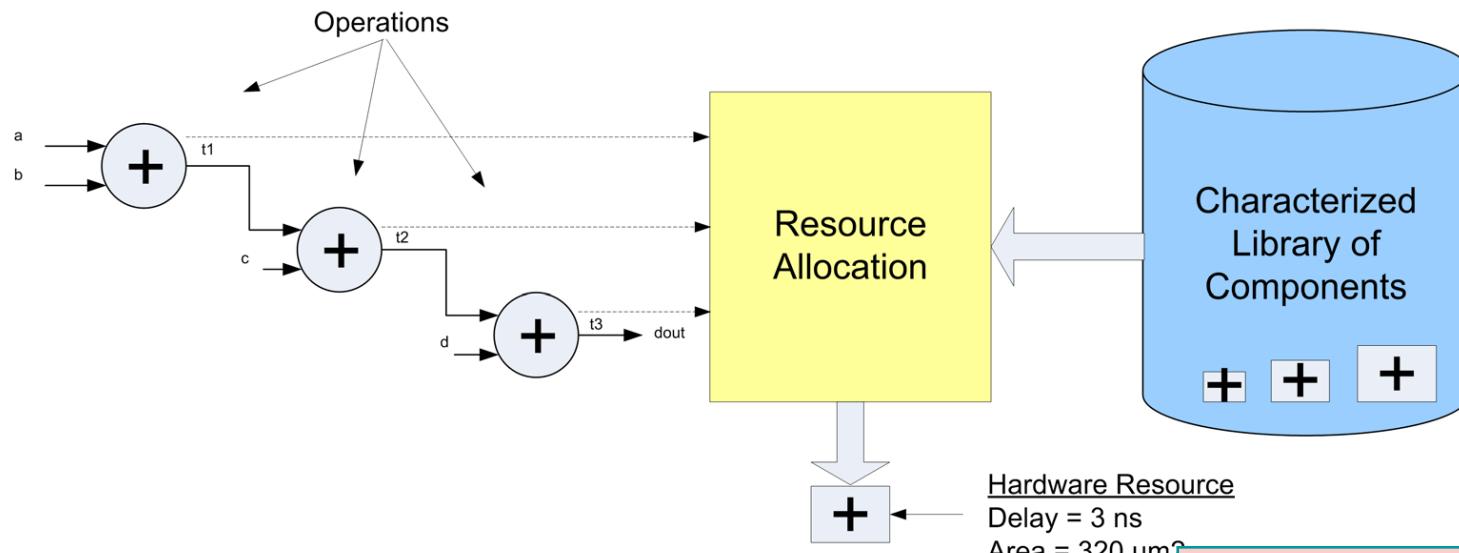
- C függvényként definiáljuk a hardvert.
- A bemeneteket érték szerint, a kimenetet pedig cím szerint adjuk át.

- ▶ Első lépésként a szintézis elkészíti az adatfolyam gráfot

- minden csomópont egy utasításnak felel meg
- A kapcsolatok meghatározzák a sorrendet.

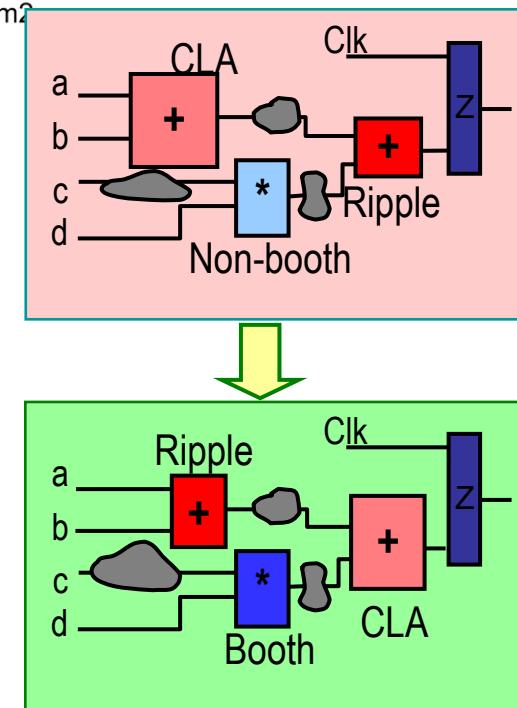


Példa: erőforrás kiosztás

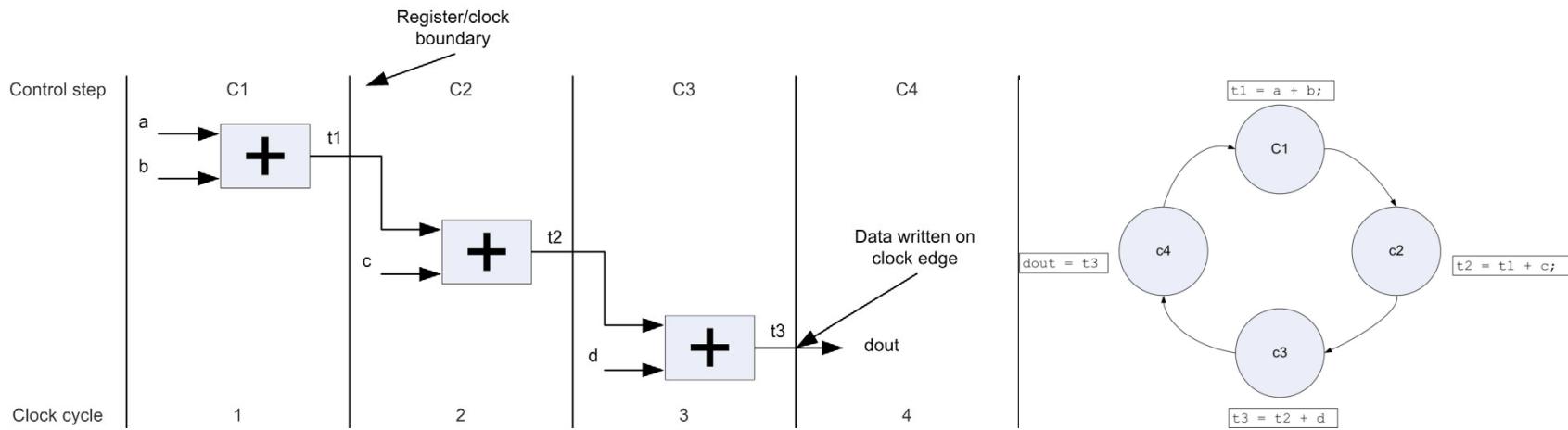


► A következő lépés az erőforrás kiosztás

- Az adott technológiai könyvtárban rendelkezésre álló elemek közül.
- A megadott kényszereknek megfelelően változhat.

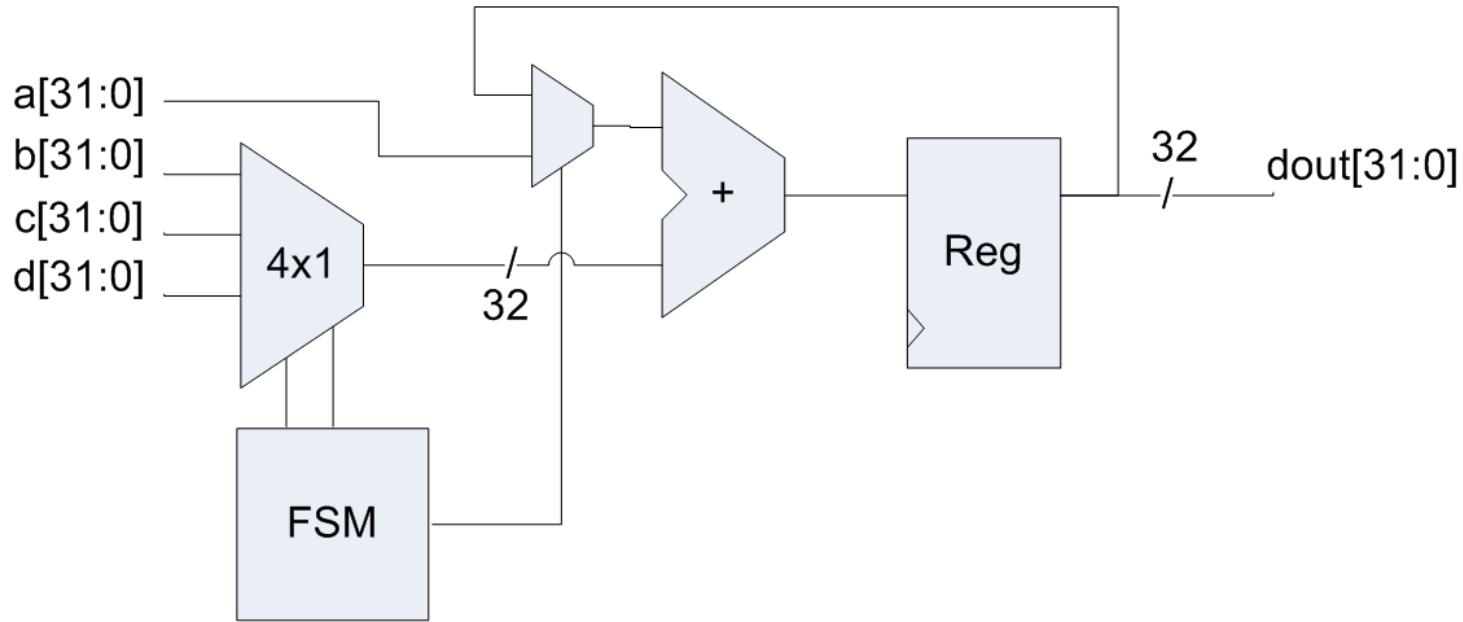


Példa: Ütemezés



- ▶ Egy lehetséges architektúra: minden összeadás saját órajelciklusba kerül.
- ▶ Készül egy adatút állapotgép az összeadó vezérlésére.
- ▶ Így az eredmény 4 ciklus alatt készül el, viszont a HW erőforrások száma (itt: a 32 bites összeadó) minimális.

Példa: a generált hw adatútja



► Egy összeadó, és multiplexerekkel történik a kiválasztás.

Példa: csővezeték

- Növelni szeretnénk az átbocsátóképességet.
- Átlapolhatjuk a működést.

Figure 4-9. Pipeline II=2, L=3, TP=2

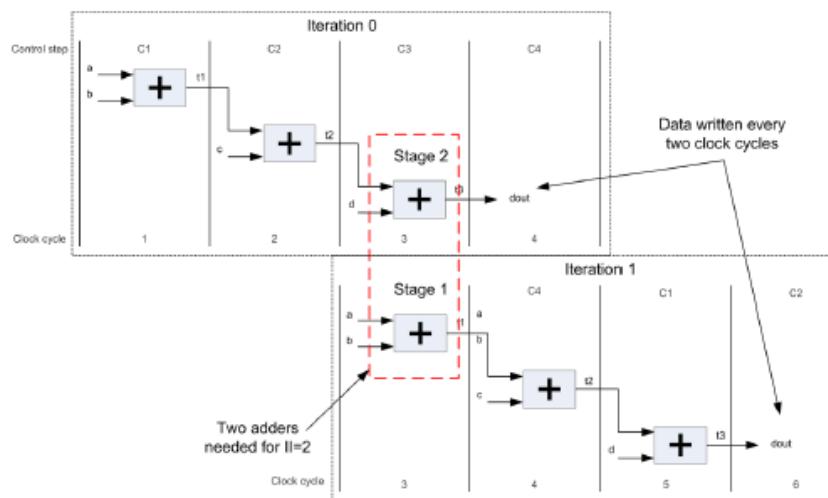
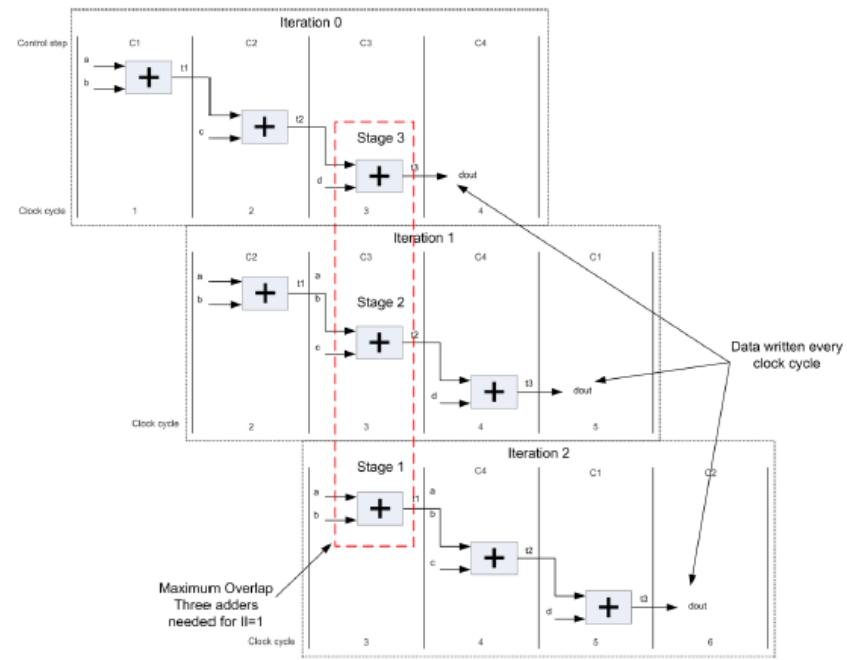


Figure 4-10. Pipelining II = 1, L=3, TP=1



- Két összeadó felhasználásával kétszeres sebességet érhetünk el.
- Hárrom összeadó felhasználásával négyszeres átbocsájtóképesség érhető el.

A logikai szintézis

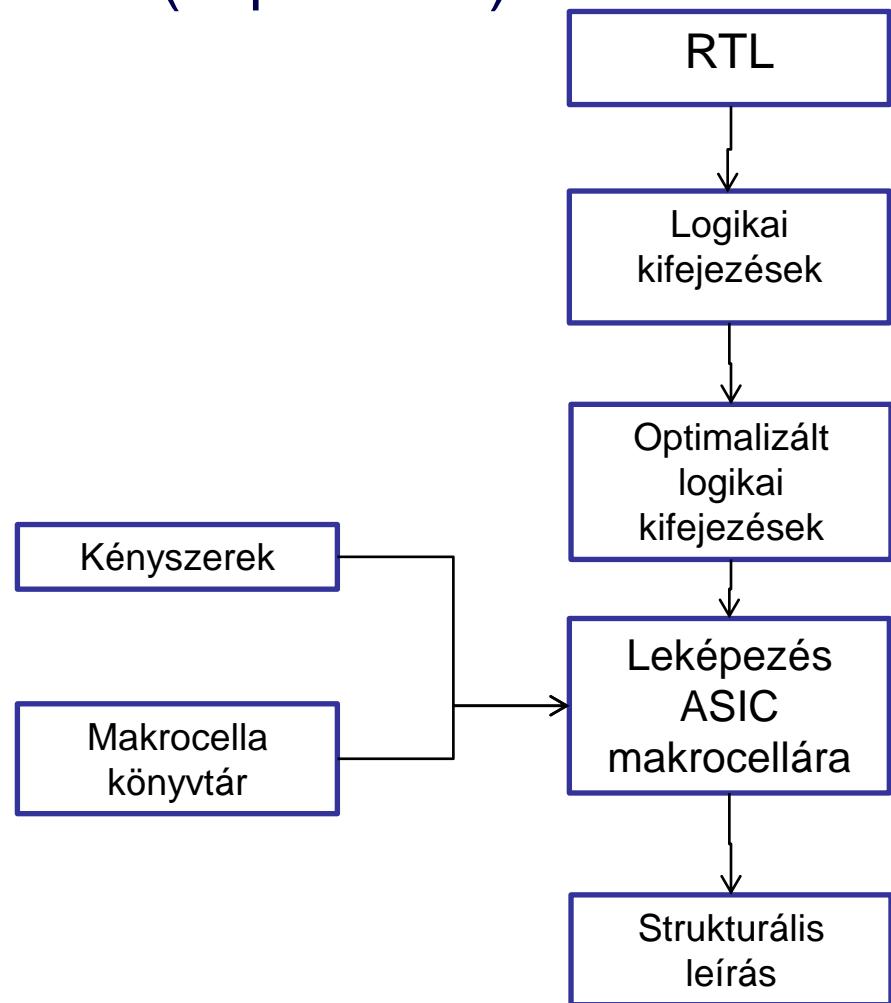
► RTL leírás → strukturális leírás (kapuszintű)

► Kényszerek:

- Időzítés
- Teljesítmény
- Terület

► ASIC makrocella

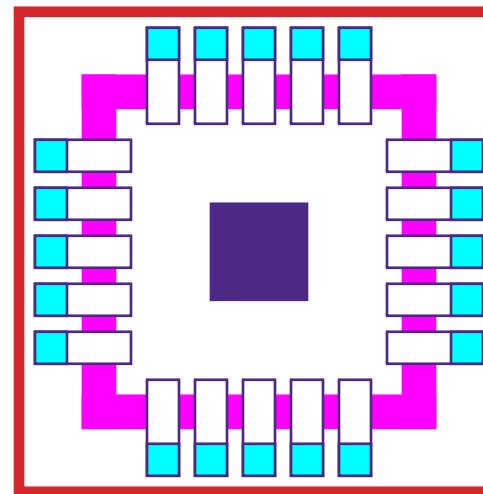
- Ami az adott technológiában megtalálható
 - IC: kapuk
 - FPGA: LE-k.



Layout szintézis

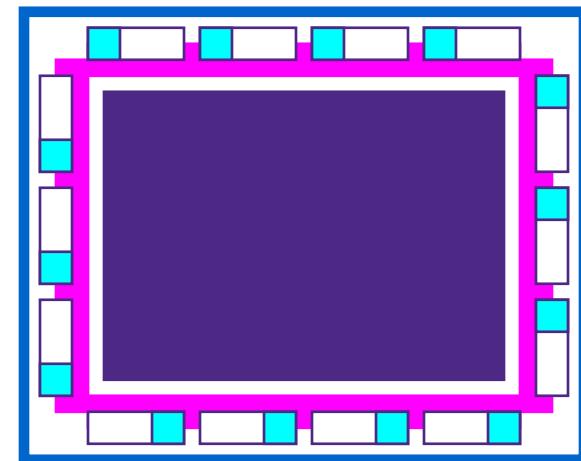
► Floorplan

- core kialakítása
- tappancsgyűrű kialakítása (**pad limited, core limited**)
- cellák elhelyezése (place)



► Globális huzalozás (global routing)

- huzalozási csatornák kialakítása
- föld és táp ellátás (*supply tree*)
- Az órajel szétosztás.



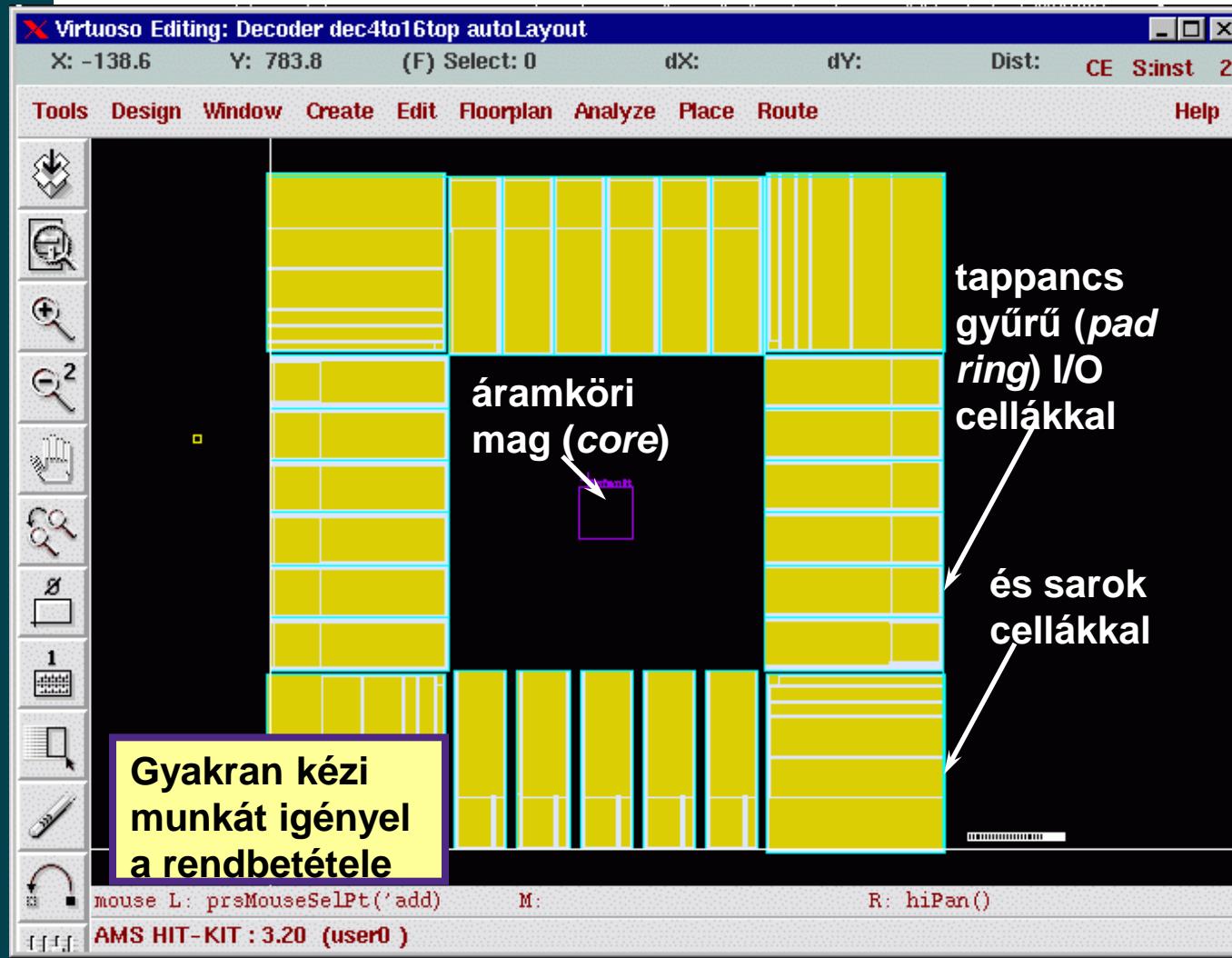
► Részletes huzalozás

► Időzítések visszavezetése!

- Ekkor vannak valós késleltetések, mert a vezetékhossz pontosan itt lesz ismert...

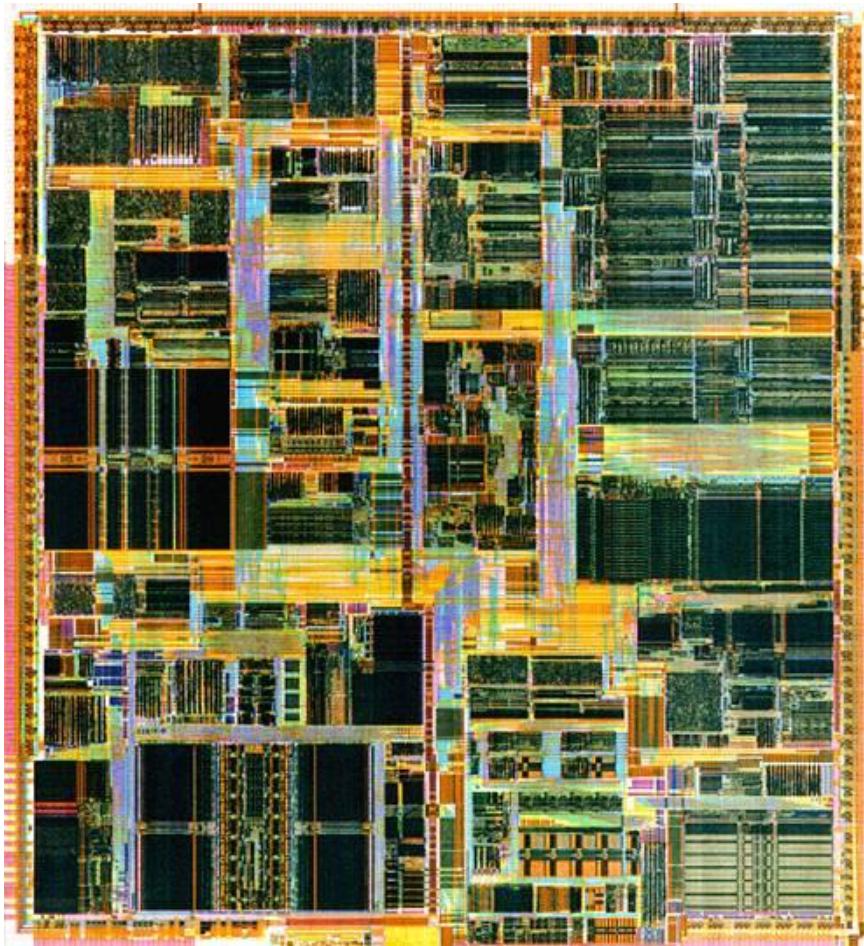
► DRC – tervezési szabályellenőrzés

Az ún. floorplan



Ez az IC layout globális alaprajza. A főbb blokkok helyét jelöljük ki rajta

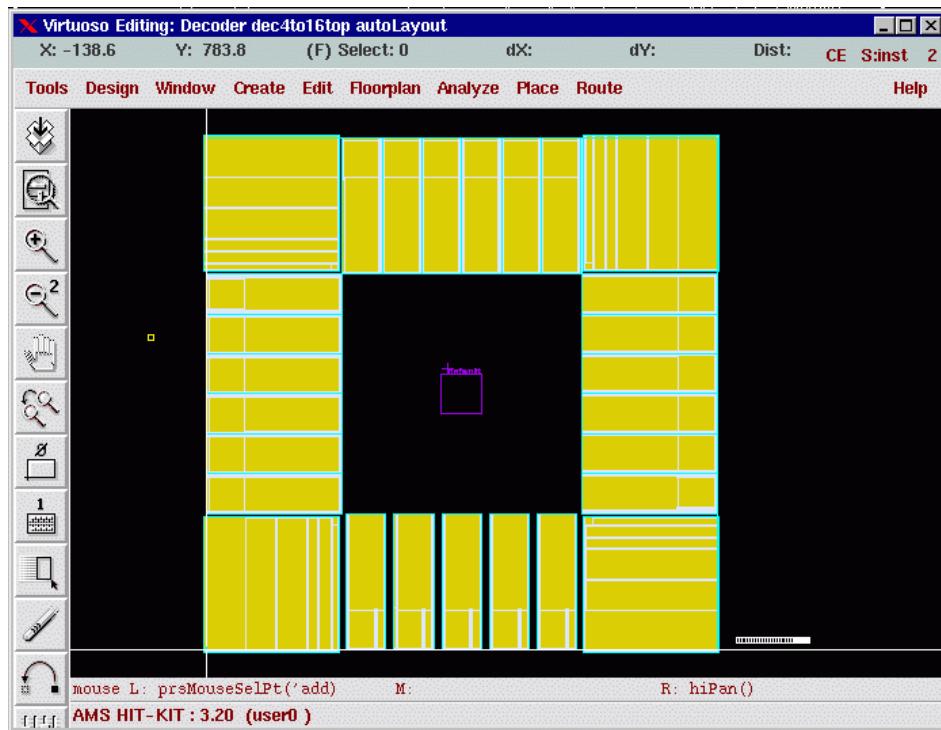
Az ún. *floorplan*



Az Intel Pentium processzor optikai mikroszkóppal készült fotóján a layout részletei nem látszanak, de a floorplan jól felismerhető.

A floorplan kialakítása

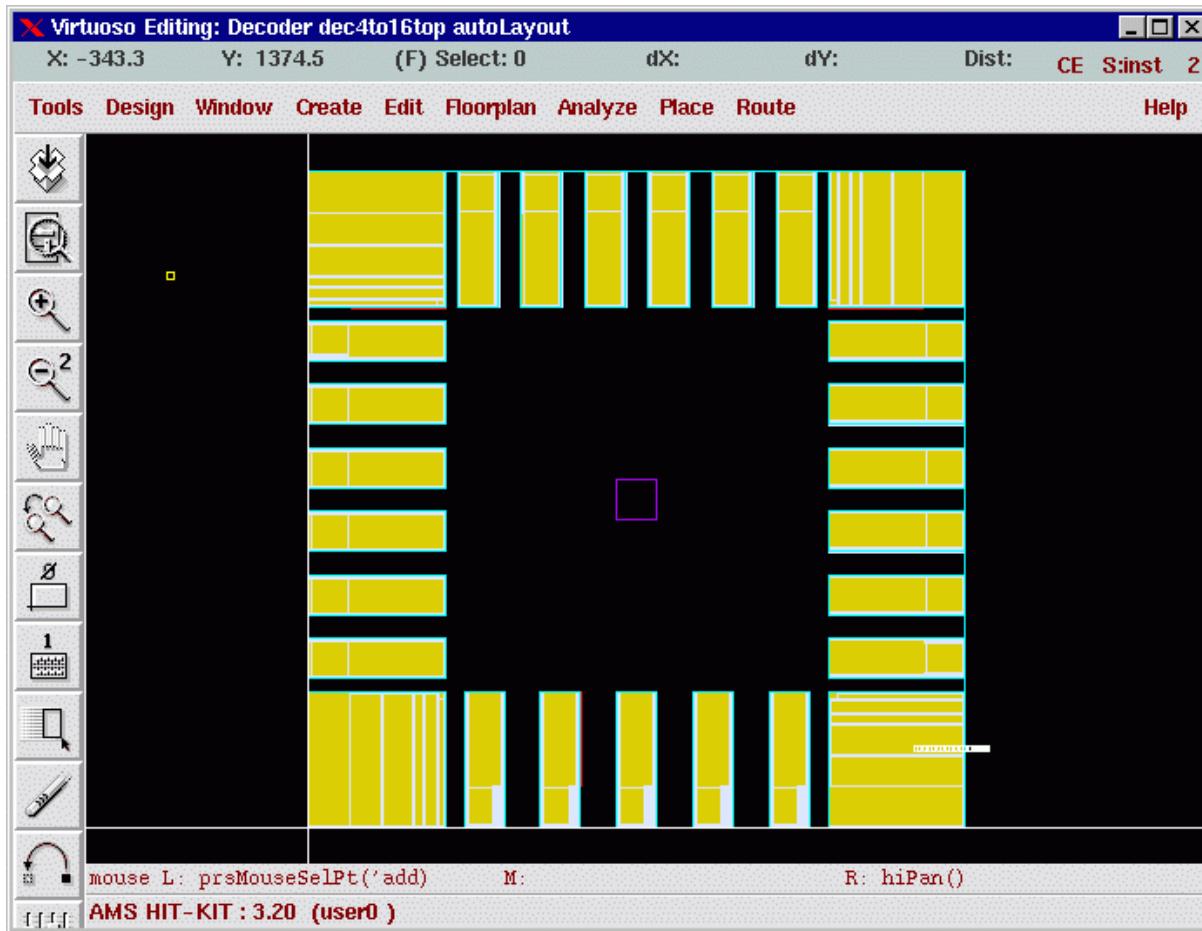
- ▶ Tappancsgyűrű kialakítása, pl. egy ún. floorplan file kézi szerkesztésével
- ▶ Sarok cellák hozzáadása



```
xterm
enable      bottom 0
input1      bottom 1
input2      bottom 2
input3      bottom 3
input4      bottom 4
ground      right  0
output0     right  1
output1     right  2
output2     right  3
output3     right  4
output4     right  5
output5      top   0
output6      top   1
output7      top   2
output8      top   3
output9      top   4
output10     top   5
supply      left  0
output11     left  1
output12     left  2
output13     left  3
output14     left  4
output15     left  5
"constraint" 23 lines, 371 characters
```

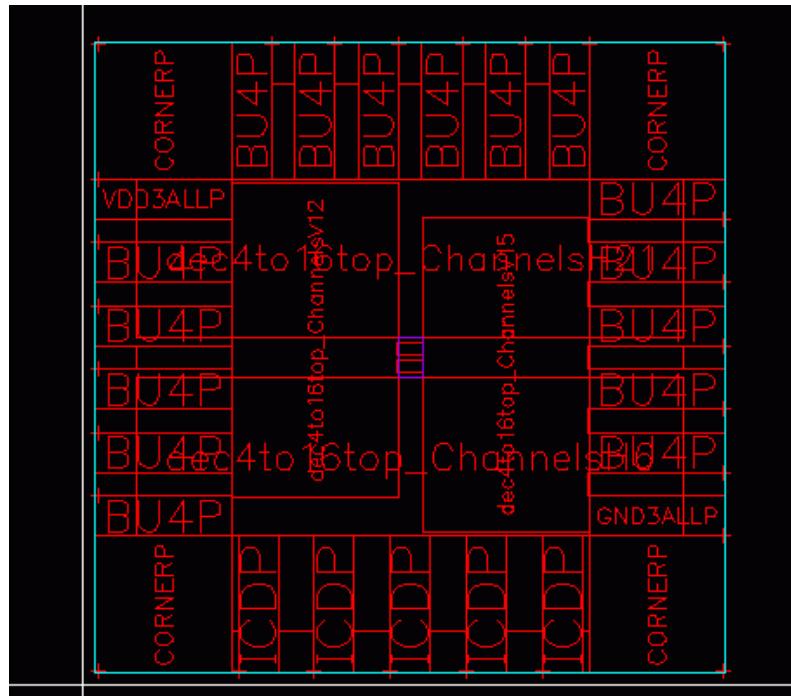
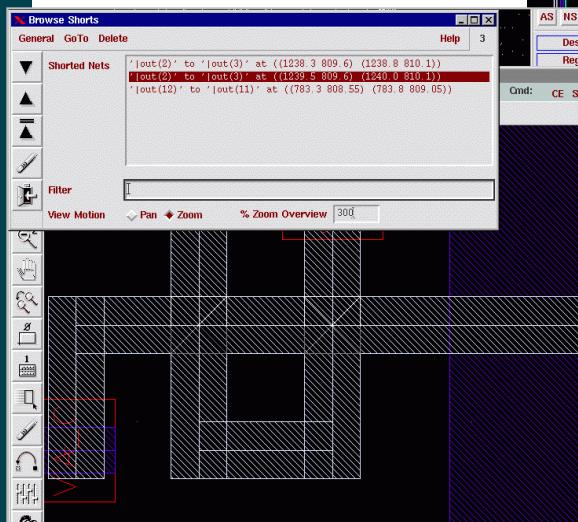
A *floorplan* kialakítása

► Kiegyenlítés után a kész *floorplan*:



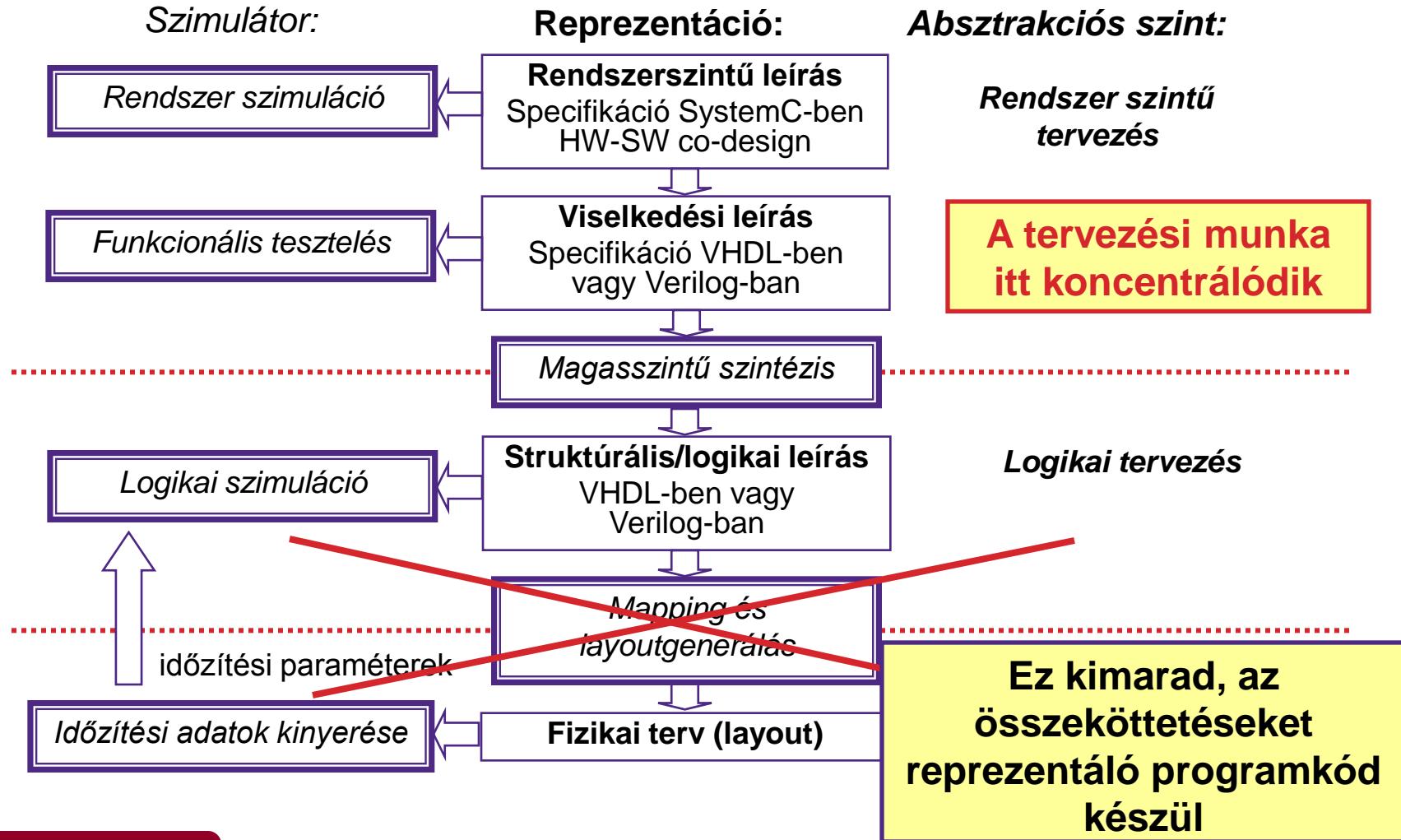
Következő lépés: *place & route*

- ▶ Huzalozási csatornák generálása
- ▶ Globális vezetékezés
- ▶ Részletes vezetékezés
- ▶ Hiba is lehet

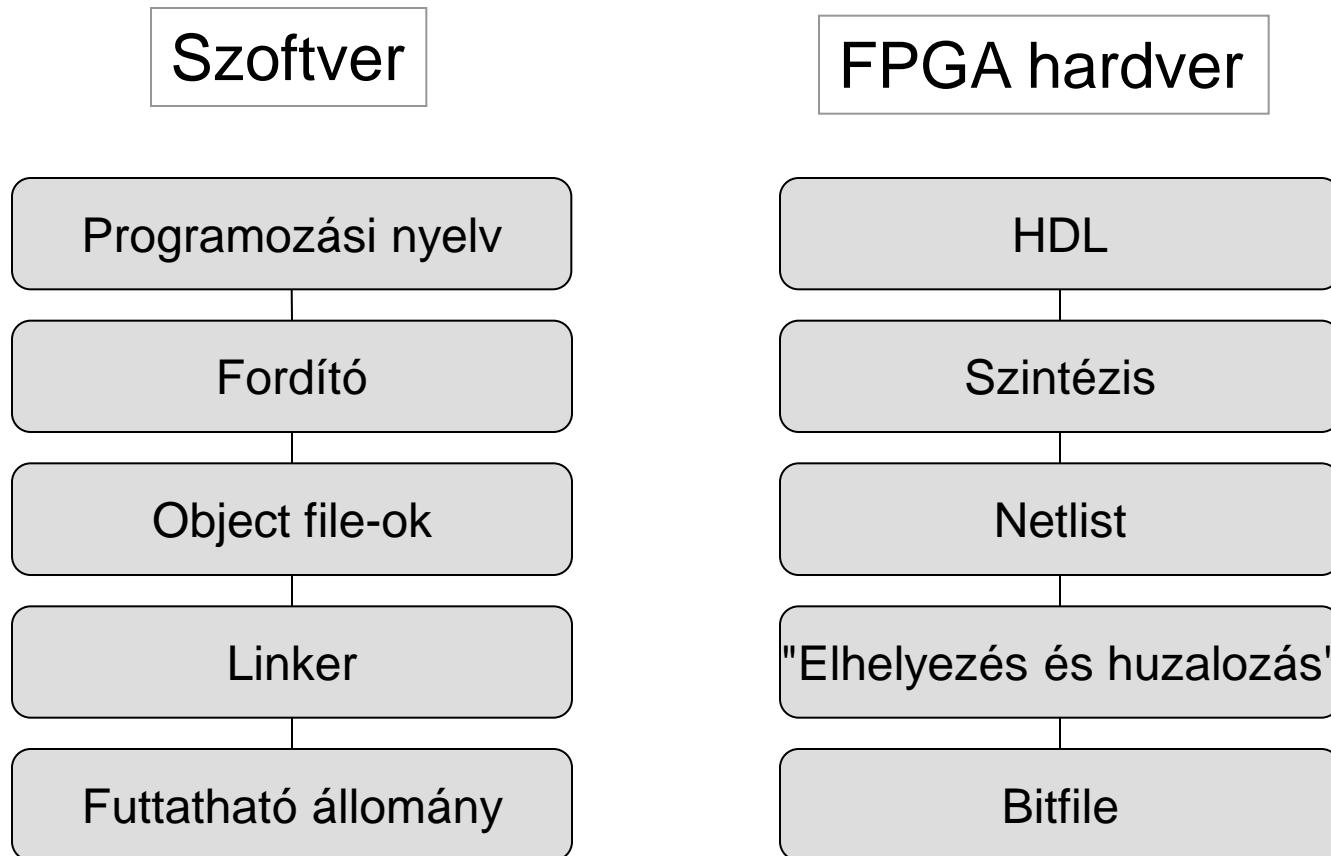


ERC: electric rule checking
DRC: design rule checking

FPGA-s tervezés folyamata



Programozás – FPGAs tervezés



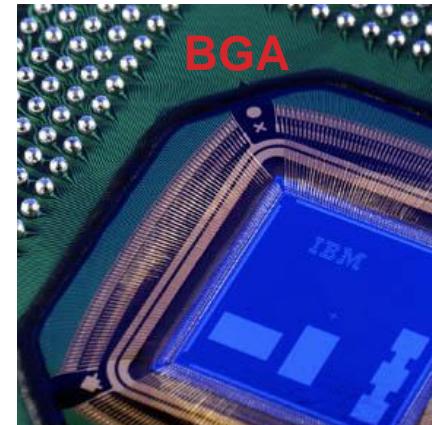
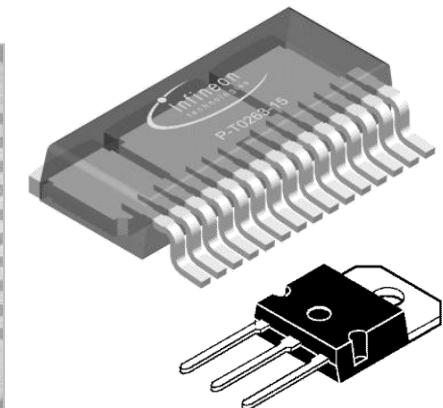
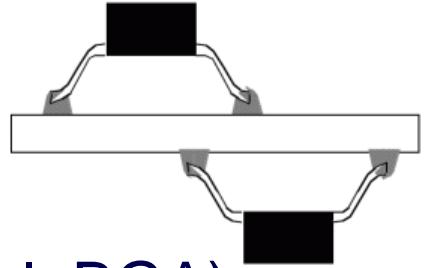
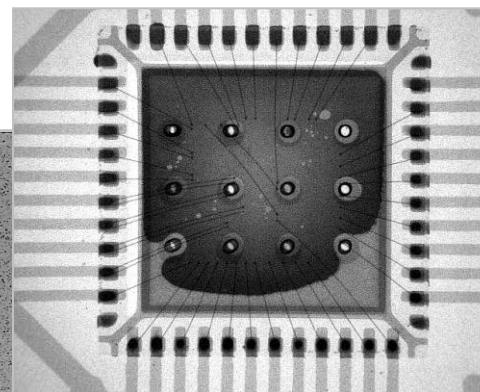
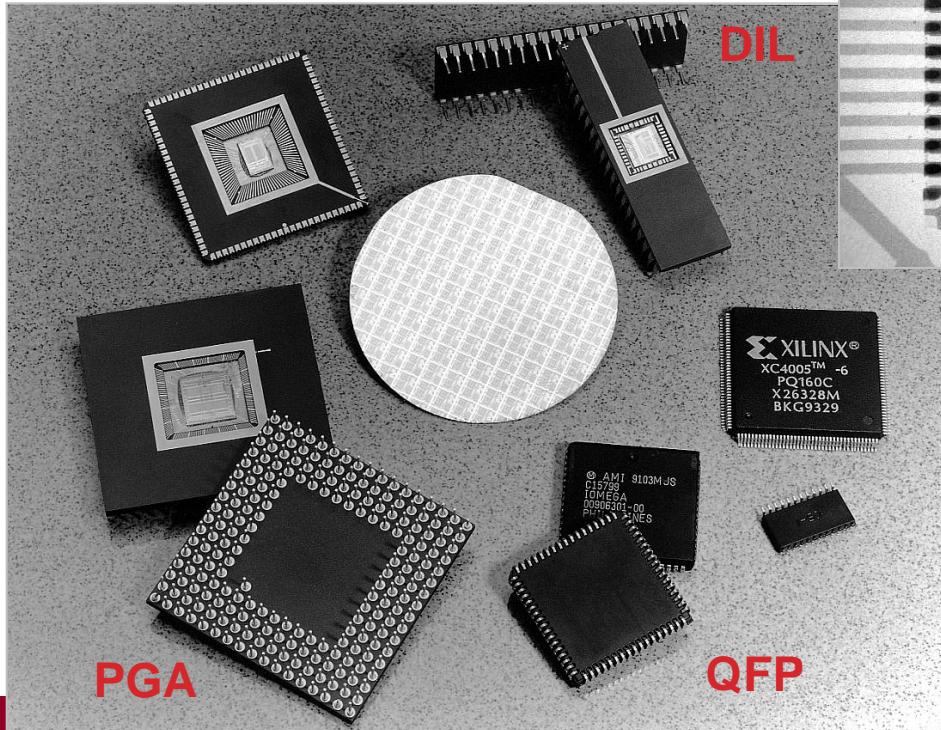
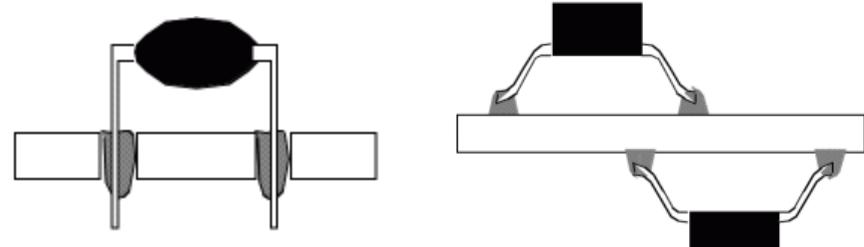
Fizikai tervezés egyéb részei

- ▶ A fizikai tervezés nem pusztán csak a chip layout előállítását jelenti
- ▶ A **tokozásra is gondolni kell**
 - hűtés
 - nagyfrekvenciás tulajdonságok
 - szereléstechnológia, kivezetések



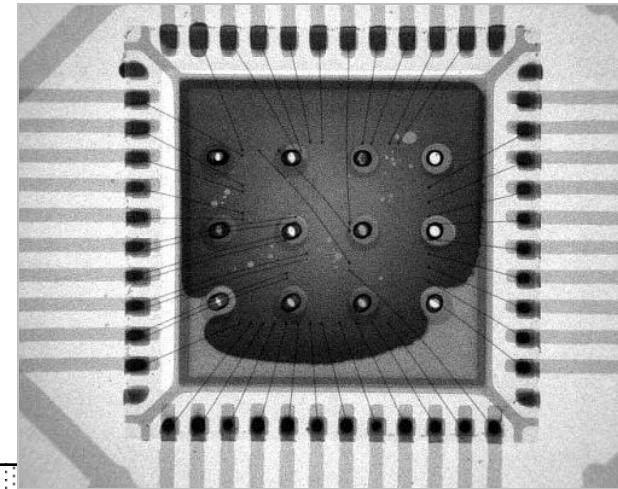
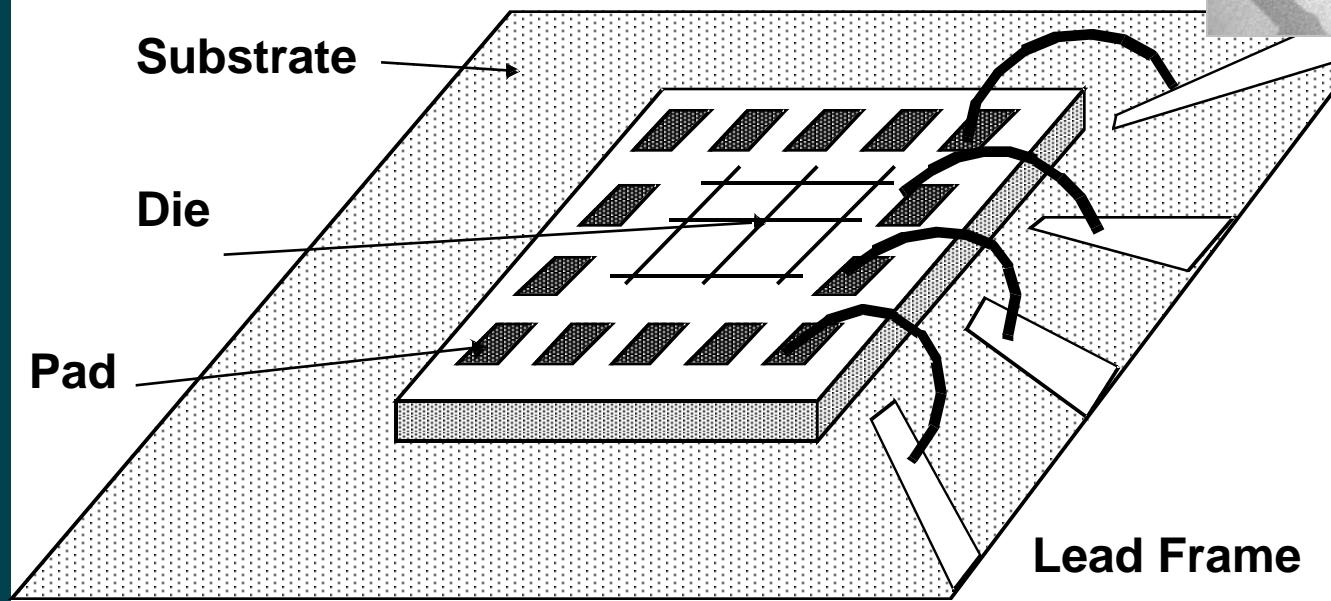
Tokfajták

- ▶ Kerámia / műanyag / fém
- ▶ Furatszerelt / felületszerelt
- ▶ lábai vannak (leaded) vagy forraszgömbök (pl. BGA)
- ▶ wirebond / flip-chip
- ▶ IC / diszkrét eszköz



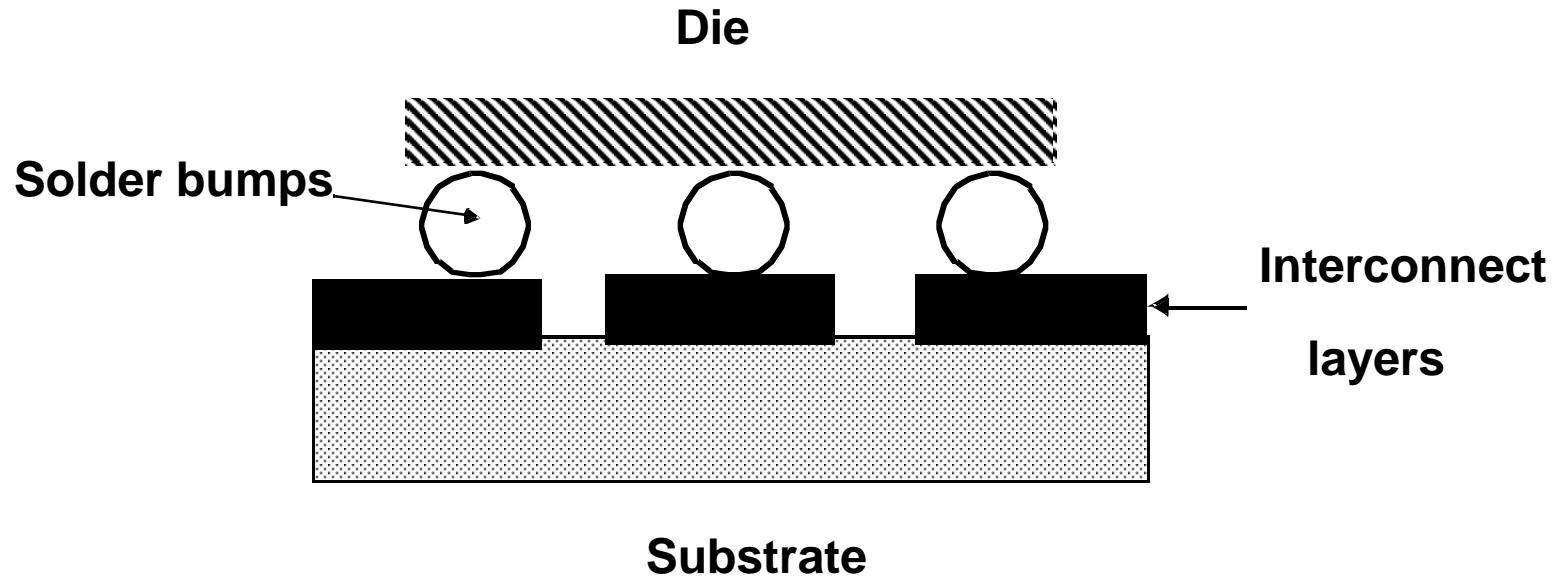
Tokozás – kivezetések

► Wire bonding

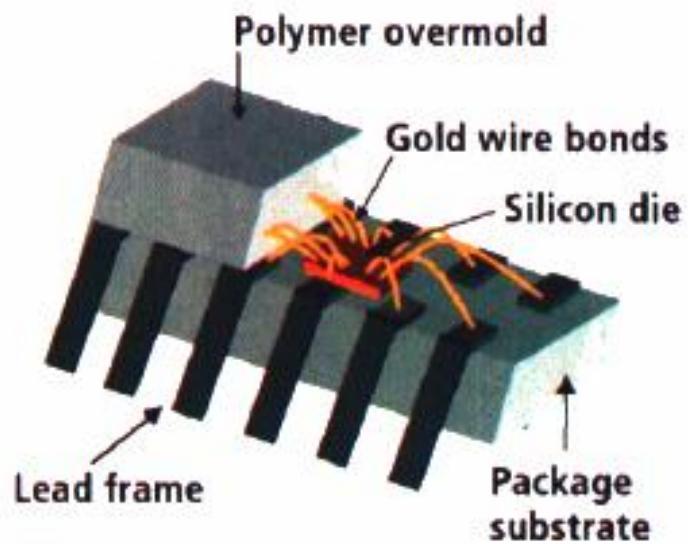


Tokozás – kivezetések

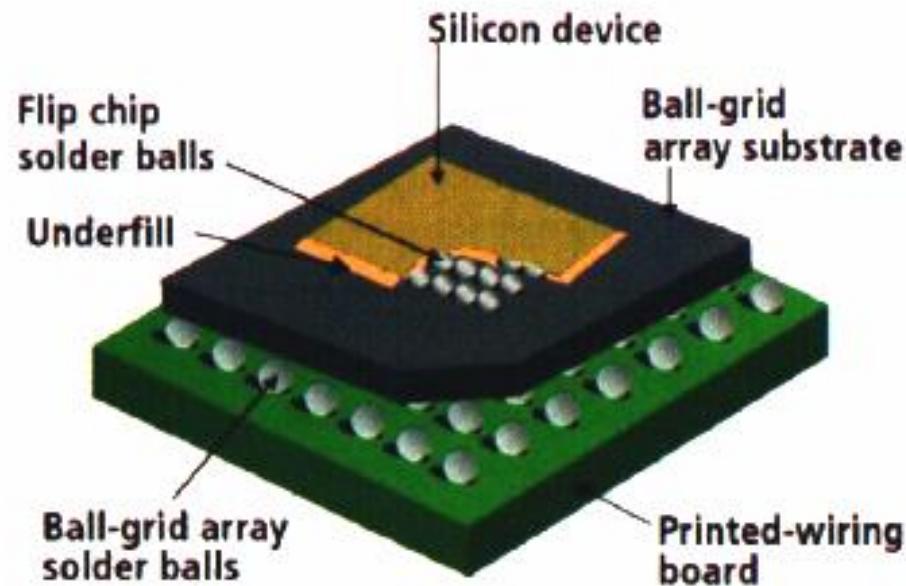
- ▶ Flip-chip (megfordított chip)



Wire-bond és flip-chip tokok

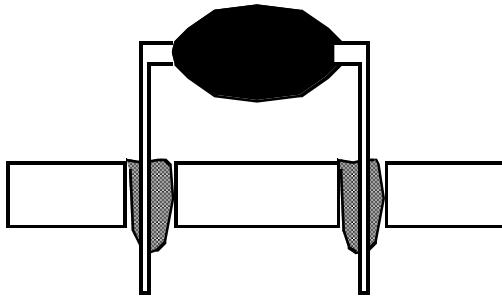


wire-bond
műanyag DIL tok

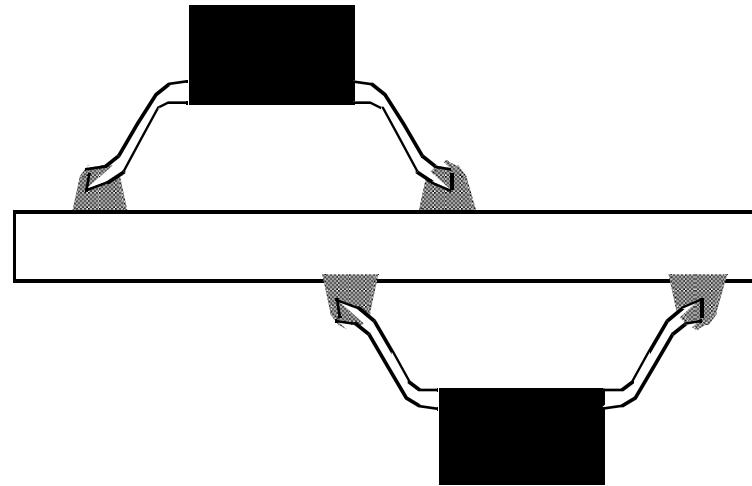


flip-chip
BGA tok

Tokozás – szereléstechnológia



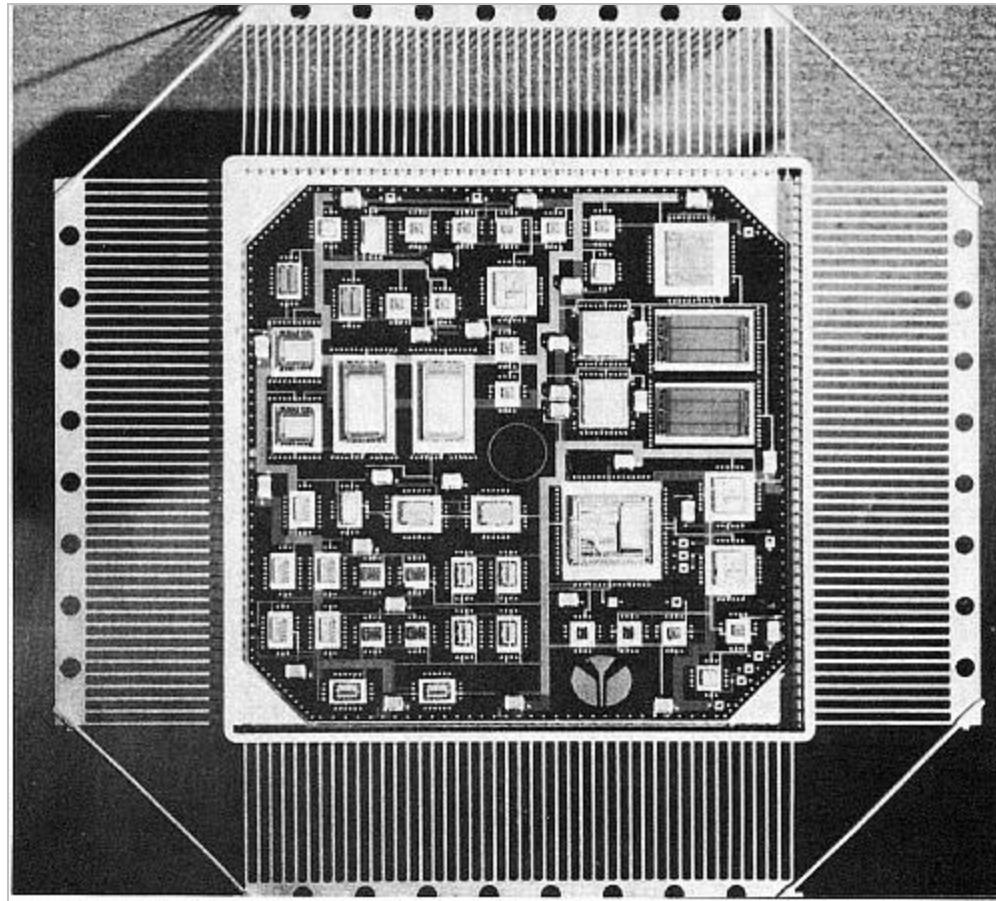
Furatszerelt
(Through-Hole Mounting)



Felületszerelt
(Surface Mount)

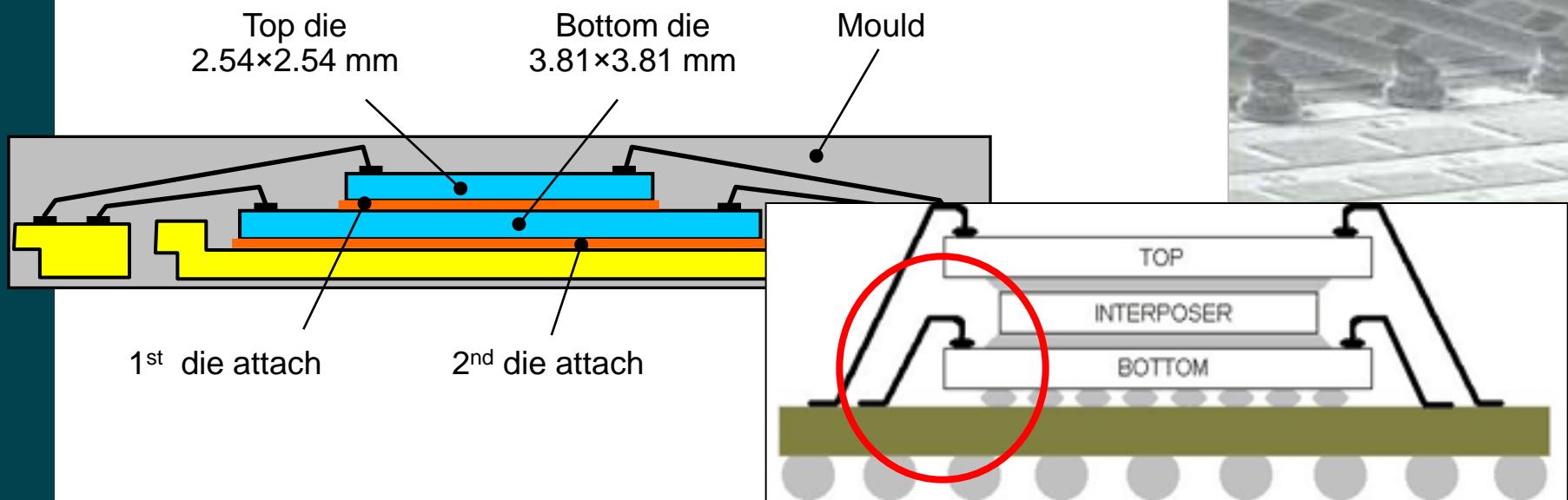
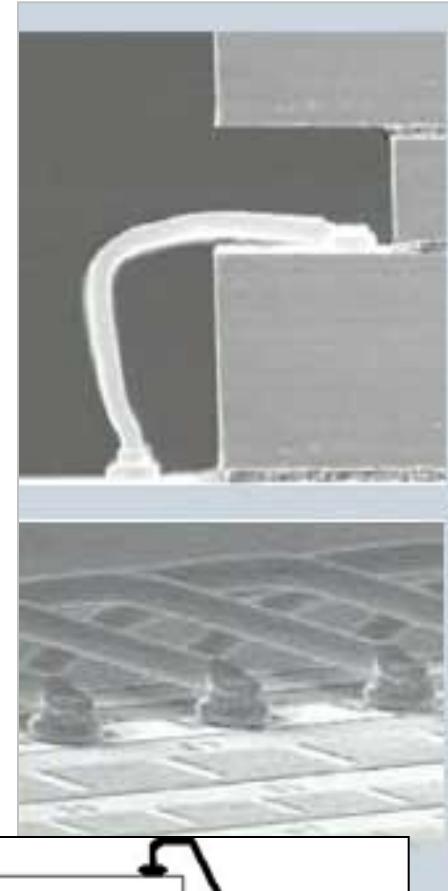
MCM: multi-chip module

- ▶ 1 külső nagy tok, benne több IC

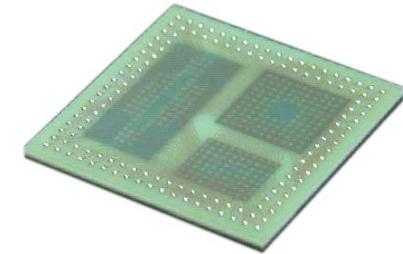


Stacked die package-ek

- ▶ 3D tokozási módszer, jellemzően RAM-ok esetében alkalmazzák
 - ~100 µm-re elvékonyított chip-ek
 - közöttük távtartó réteg / ragasztó réteg

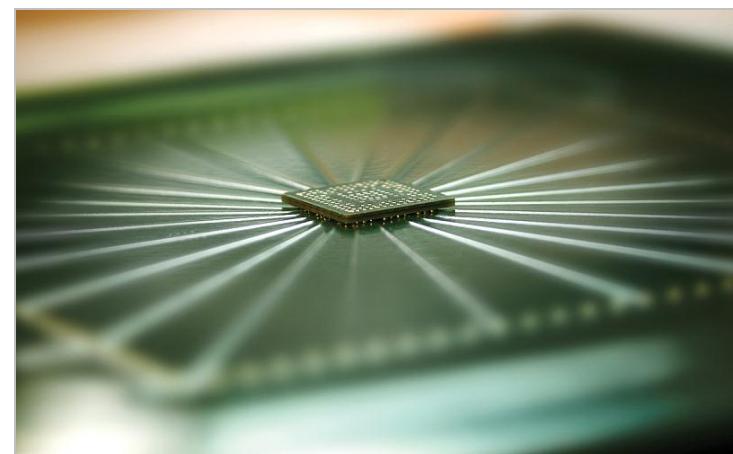
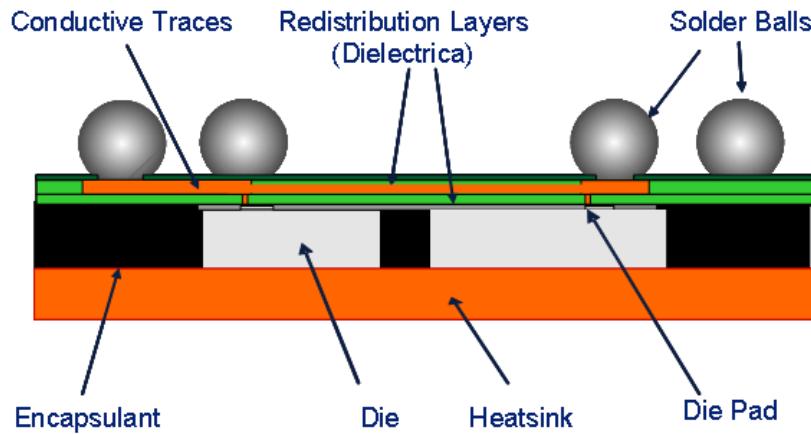


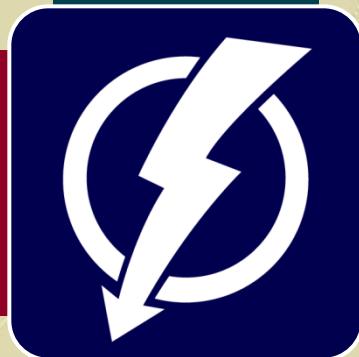
Egyéb irányzatok – SiP



► SiP = **System in Package**

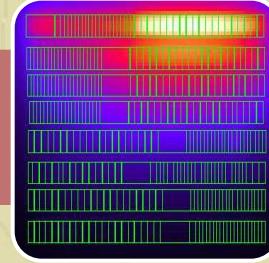
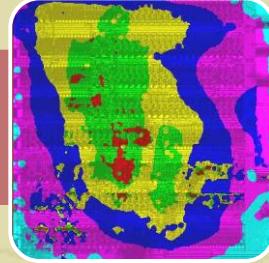
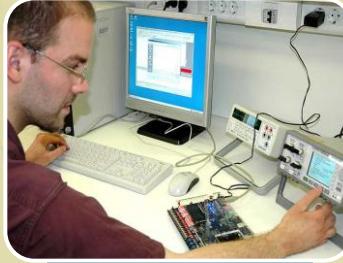
- Egy teljes rendszert egy (miniatürizált) tokban alakítanak ki – 1 tok, több chip
- Heterogén gyártástechnológia
 - digitális részek – CMOS chip
 - nagy frekvenciás részek – pl. Si-Ge chip-en (~100 GHz)
- Kritikus: maga a tokozás / chip-package co-design



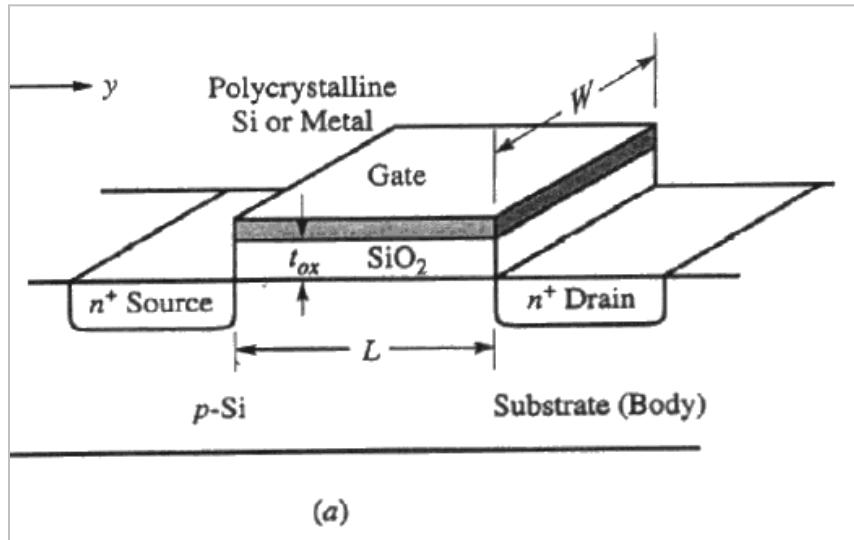


Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi
Egyetem

Elektronikus Eszközök Tanszéke



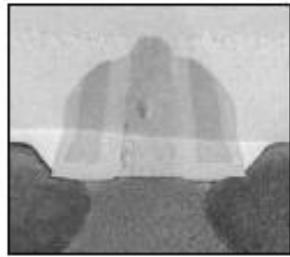
A MOS tranzisztor



► Ezt tanultuk...

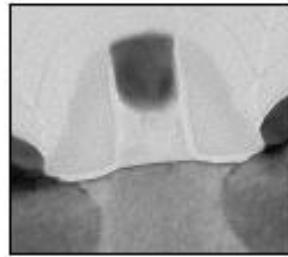
90 nm

2003



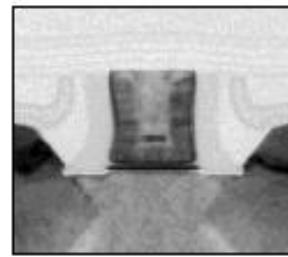
65 nm

2005



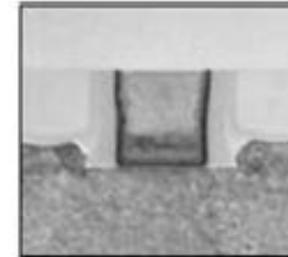
45 nm

2007



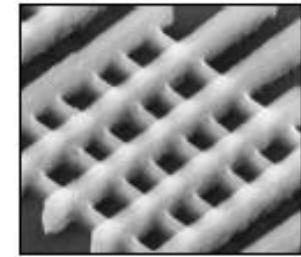
32 nm

2009



22 nm

2011

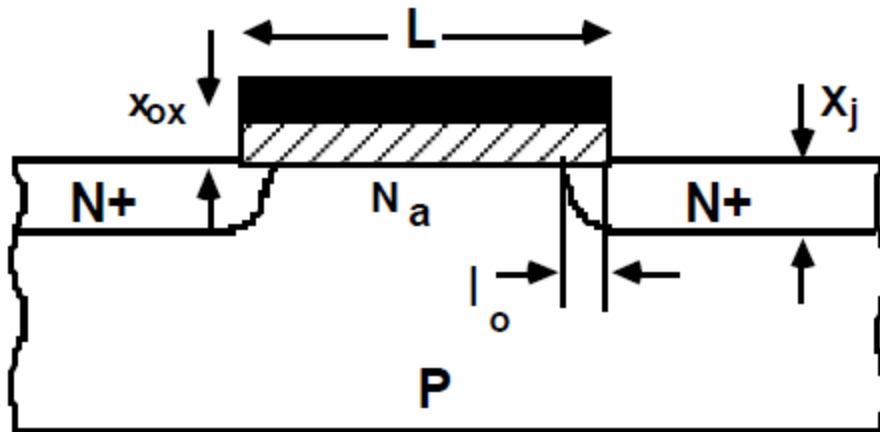


► Ez pedig a valóság...,
2013 14nm.

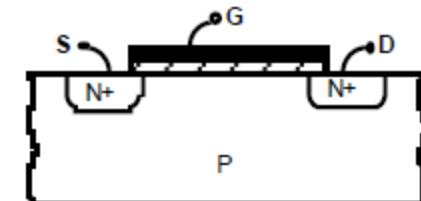
A MOS tranzisztor skálázása

► ugyanazt, „kicsiben”

- Mert így több logika fér el ugyanakkora helyen
- A tranzisztorok gyorsabbak lesznek, mivel a csatorna hossza rövidebb, így az órajel nagyobb lesz.
- Növelni kell a meredekséget, azaz a feszültségváltozásra bekövetkező áramváltozás nagyságát.
- $$g_m = \frac{dI_d}{dV_{GS}} = \frac{W}{L} \frac{\mu_{eff}\epsilon}{t_{ox}} (V_{GS} - V_T)$$



Scaled MOS Transistor



Az állandó térerősséget megtartó skálázás

► Dennard, 1974

- minden geometriai méretet K-ad részére kell csökkenteni.
- az alapszelet adalékolását K-szorosra kell növelni.
- a tápfeszültséget K-ad részére kell csökkenteni.

► Ebben az esetben

- az órajel K-szorosára növelhető, hiszen a meredekség nem változik, de a kapacitások csökkennek.
- egy kapu által disszipált teljesítmény K^2 arányban csökken
- De felületegységenként nem csökken a fogyasztás!

<u>Device/Circuit Parameter</u>	<u>Constant Field Scaling Factor</u>
Dimension : $x_{ox}, L, W, X_j,$	$1/K$
Substrate doping : N_a	K
Supply voltage : V	$1/K$
Supply current : I	$1/K$
Gate Capacitance : $W L/x_{ox}$	$1/K$
Gate delay : $C V / I$	$1/K$
Power dissipation : $C V^2 / \text{delay}$	$1/K^2$

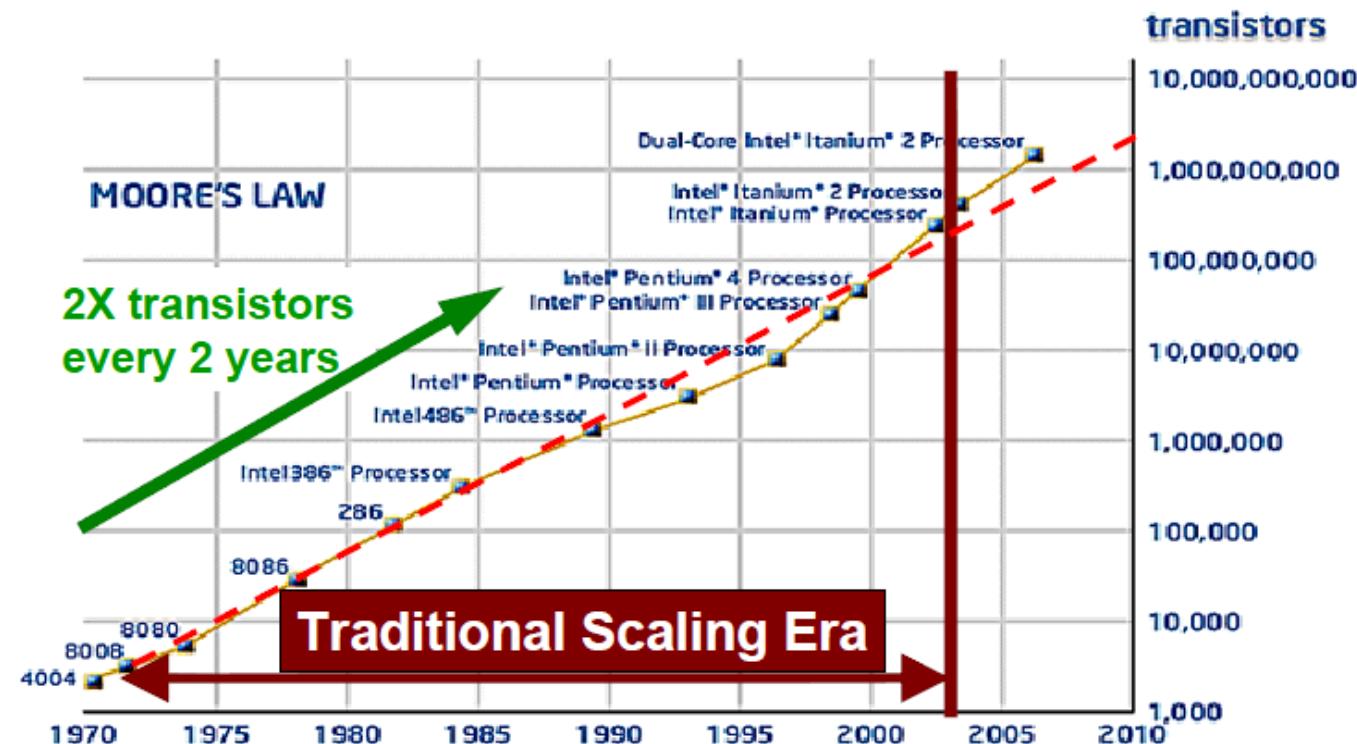
A valóság egy picit máshogy alakult

- ▶ A tápfeszültséget egy bizonyos határon túl nem lehet csökkenteni.
- ▶ Így a fogyasztás elkezdett növekedni.
 - Egy processzor esetén kb. 130W TDP a határ, ami a gyakorlatban konvencionális eszközökkel (hűtőborda + ventillátor) kezelhető.
- ▶ 100nm tájékán előtérbe kerültek olyan fizikai jelenségek, amelyek addig elhanyagolhatóak voltak...
 - Küszöb alatti áram
 - Tunneláram
- ▶ Elfogyott a gate-oxid! Az atomokat már nem lehet darabolni...

<u>PARAMETER</u>	<u>1970</u>	<u>1980</u>	<u>1990</u>	<u>2000</u>	<u>2006</u>
Channel length (μm)	10	4	1	0.18	0.1
Gate oxide (nm)	120	50	15	4	1.5
Junction depth (μm)	>1	0.8	0.3	0.08	0.02-0.03
Power supply voltage	12	5	3.3 - 5	1.5-1.8	0.6-0.9

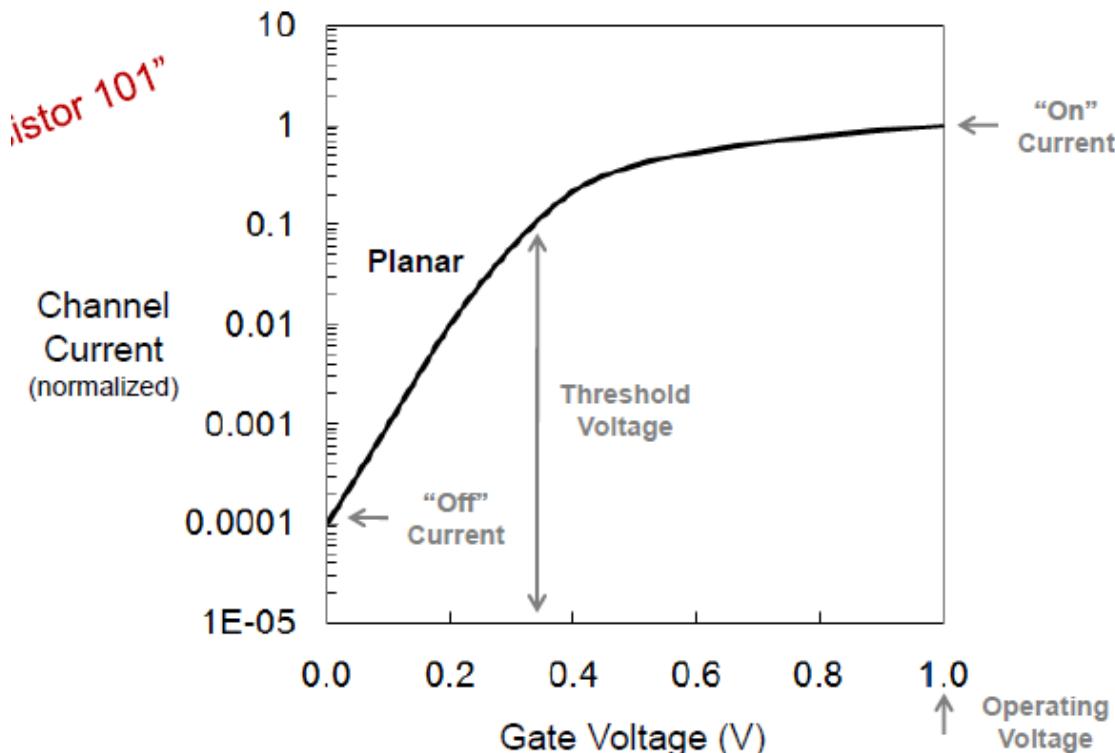
A geometriai skálázás véget ért... kb. 2003-ban

40+ Years of Moore's Law at INTEL: From Few to Billions of Transistors



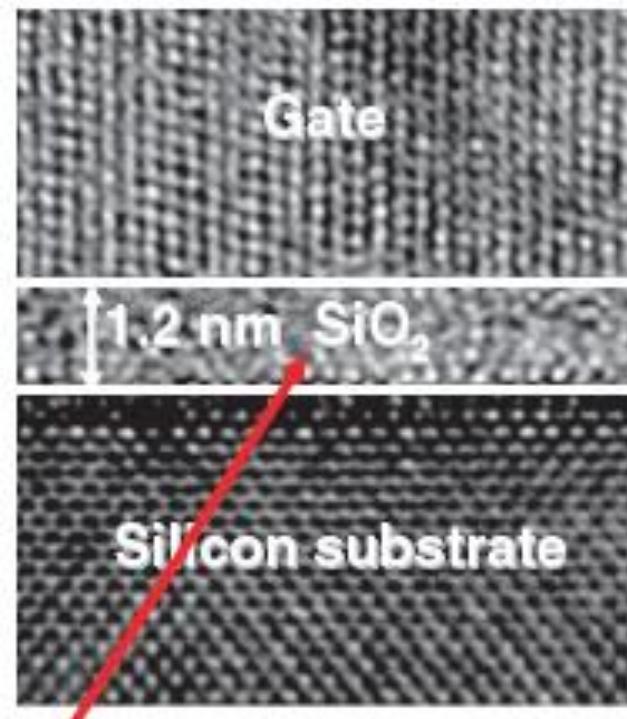
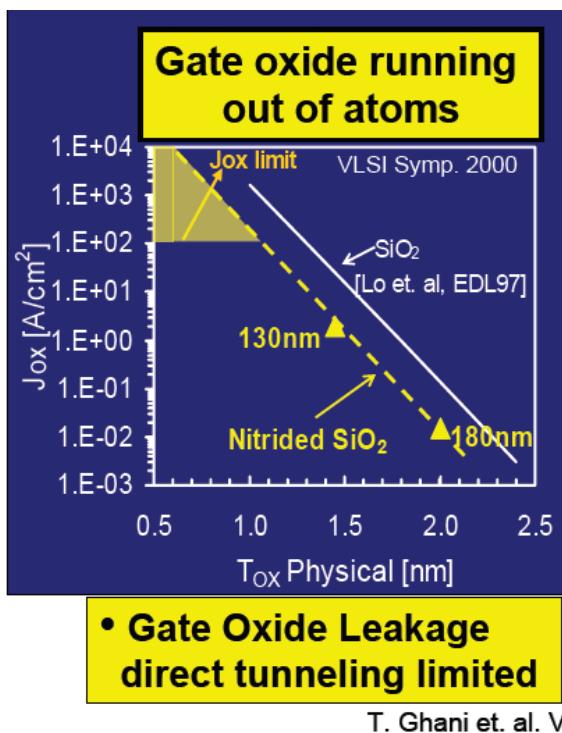
Küszöb alatti áram

- ▶ A küszöbfeszültség alatt az áram közel exponenciálisan csökken.
- ▶ $I_D \sim e^{(U_{GS} - V_T)/nU_T}$
- ▶ Amíg a küszöbfeszültség 1V, a 26mV-os termikus feszültség igen kis áramot eredményez 0V-os vezérlésnél...
- ▶ De 200mV-hoz képest a 26mV már nem annyira elhanyagolható...



Tunneláram, a gate oxidon keresztül...

- ▶ Ha az oxid szélessége 1nm környéki (ez a gyakorlatban 5 (öt!) atomsor, az elektronok „átalagutaznak” az oxid potenciálján.
 - Kvantummechanikai effektus...
 - Az áthaladás valószínűsége exponenciális csökken a potenciálját szélességével. Így a „normál” szélességű tranzisztoroknál ez mérhetetlenül kicsi volt.



Új utak keresése

- ▶ A küszöbfeszültséget tehát már nem lehet csökkenteni a szivárgás miatt.
- ▶ Az oxid szélességét sem lehet csökkenteni az alagútáram miatt.
- ▶
$$g_m = \frac{W}{L} \frac{\mu_{eff} \epsilon}{t_{ox}} (V_{GS} - V_T)$$
- ▶ Megoldások
 - A mozgékonyság növelése
 - SiO_2 helyett nagyobb dielektromos állandójú anyag keresése.
 - Ismét fémből készített gate
 - A kezdetek kezdetén a gate elektróda alumínumból készült, majd ezt cserélték le poliszilíciumra.
 - Ezeket a módszereket egyszerre vetették be, azaz gyorsabb és kevésbé szivárgó tranzisztort készítettek.

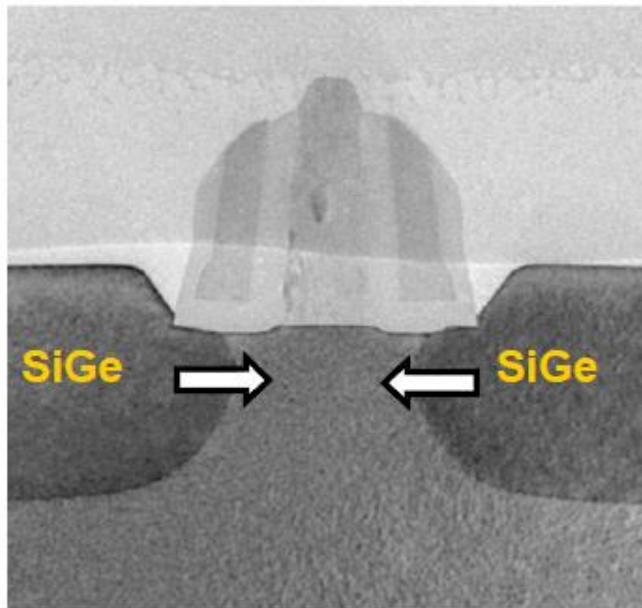


Feszített szilícium

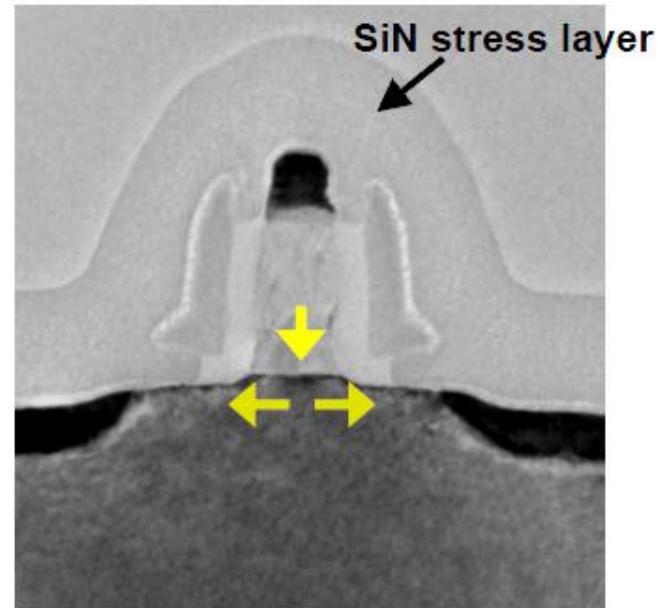
- ▶ Mechanikai feszültség hatására a kristályrácsban az atomok távolsága megváltozik.
- ▶ Növekvő távolság az elektronok mozgékonyiségeit növeli, az „összenyomott” rácsban pedig a lyukak lesznek mozgékonyabbak.

PMOS

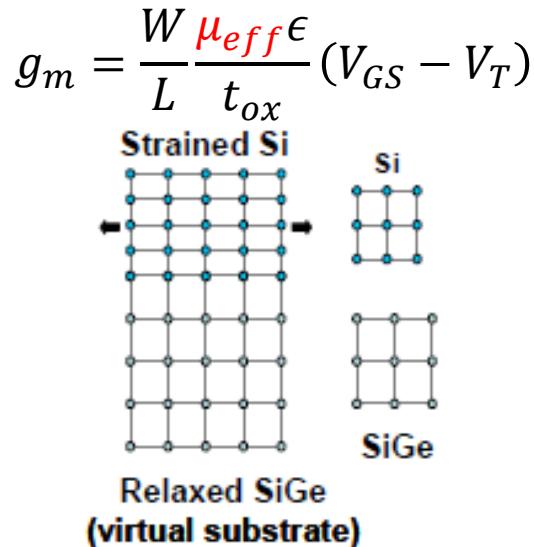
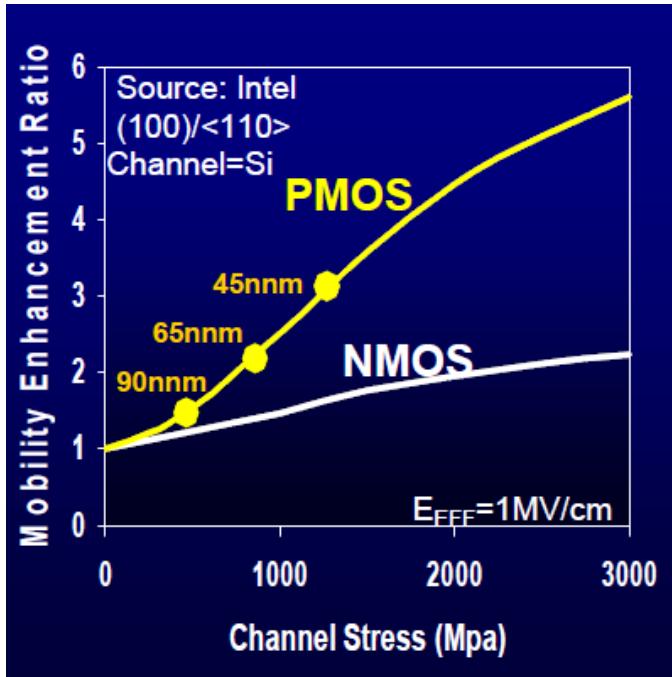
T. Ghani et. al. IEDM, 2003



NMOS



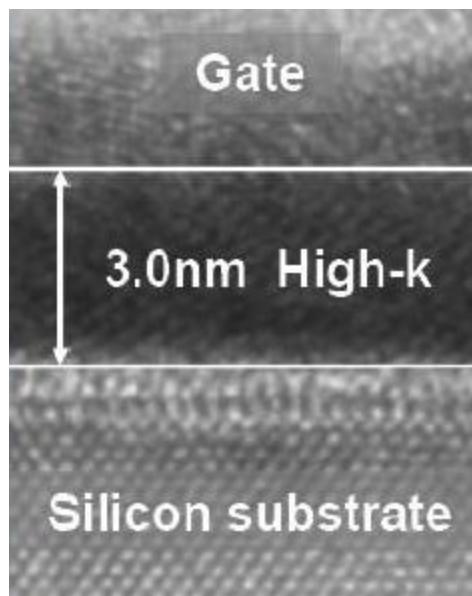
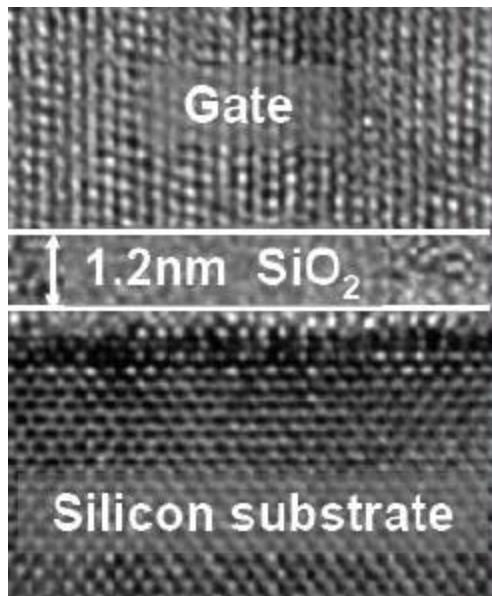
A feszített szilícium



- ▶ pMOS esetén SiGe epitaxiális réteget alakítanak ki, ennek rácsállandója nagyobb, mint a Si-é
- ▶ Ezáltal a csatornát „összenyomja”.
- ▶ nMOS esetén SiN „sapka” kerül a tranzisztorra, ami feszíti szét a csatornát...
- ▶ A lyukmozgékonyság igen jól növelhető...
 - nézzük pl. a 45nm technológiát, ha az ábra helyes, a lyukmozgékonyság 3×, az elektronmozgékonyság 1.5×. Azaz ugyanabban a méretben ennyivel meredekebb a tranzisztor!
 - A pMOS – nMOS kb. egyforma szélességű az inverterben, azaz nem kell kb. kétszeresére méretezni a pMOS tranzisztort.

High – K gate anyagok

- ▶ Magyarul nagy relatív dielektrikus állandóval rendelkező anyagok
- ▶ A gate szigetelő szélessége nem csökkenthető a tunneláram miatt.
- ▶ Ha az oxid helyett más, nagyobb relatív dielektrikus állandójú anyagot használnak, az áram és a meredekség növelhető, vagy azonos meredekség mellett az szigetelő szélessége nagyobb lehet, ezáltal a tunneláram töredékére csökken.



Azaz a tranzisztor több mint másfélszeresére gyorsul, miközben a szivárgási áram századrészére esik vissza.

	SiO ₂	High - K
$C = \varepsilon/t$	1×	1,6×
tunneláram	1×	< 0,01

High – K gate anyagok

Anyag	ϵ_r
SiO_2	3,9
Si_3N_4	7,5
ZrO_2	23
HfO_2	20

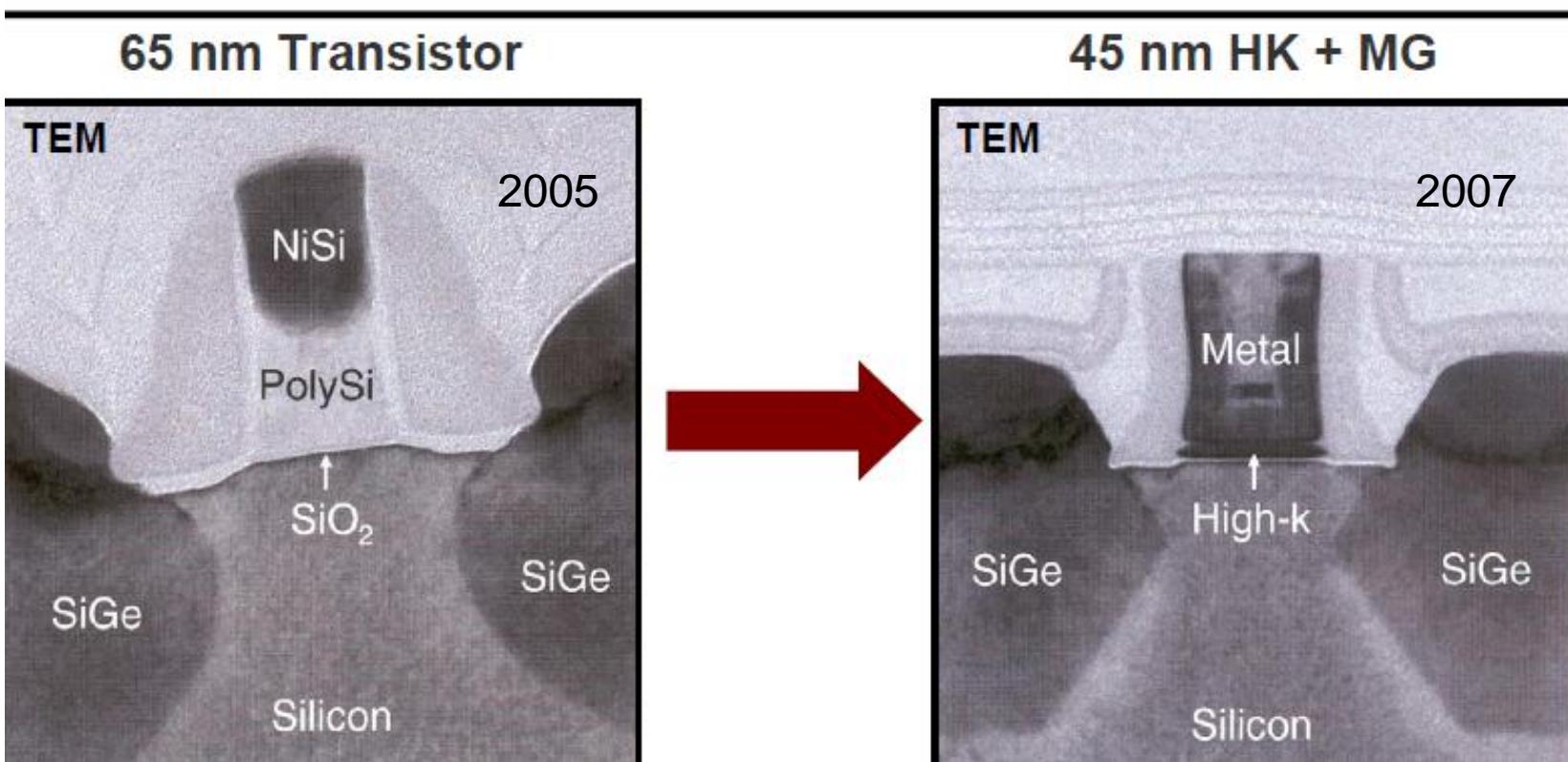
- ▶ A szigetelő réteget atomsorról atomsorra építik.
 - Ez az ún. ALD, atomic layer deposition.
- ▶ Kevert és titkos anyagösszetételeket alkalmaznak
 - Az Intel pl. csak annyit közöl, hogy „hafnium based”
 - Pl. HfSiON (nitrided hafnium silicates)
 - Az előző ábra adataiból a nagy dielektrikus állandójú anyagra:
 - $\frac{\epsilon_x}{3} = 1,6 \frac{\epsilon_{ox}}{1,2}$, azaz kb. a szilícium-dioxid dielektrikus állandójának négyeszerese.

Fém gate elektróda

- ▶ A küszöbfeszültség egy MOS szerkezetben függ többek között
 - az alkalmazott anyagok kilépési munka különbségétől.
 - a csatornába implantált adalék mennyiségétől
 - a félvezető – szigetelő határfelületek töltéseitől.
- ▶ Kezdetben alumíniumot alkalmaztak, majd polikristályos szilíciumot gate elektróda céljaira.
 - Poli Si esetén a kilépési munka különbség elhanyagolható.
 - A pontos küszöbfeszültséget ionimplantációval állítják be.
 - Hi-K anyagok esetén a határfelület nem olyan, mint Si-SiO₂ esetén
 - Az ionimplantációt alapuló küszöbfeszültség beállítás a kis méretek miatt lehetetlen, hiszen a csatornába szükséges ionok száma már nem statisztikai nagyságrendű, hatalmas szórást mutat
 - Emiatt fémet használnak gate anyagnak és a küszöbfeszültséget a fém anyagi minőségének (az „ötvözet” összetételének változtatásával állítják be.)

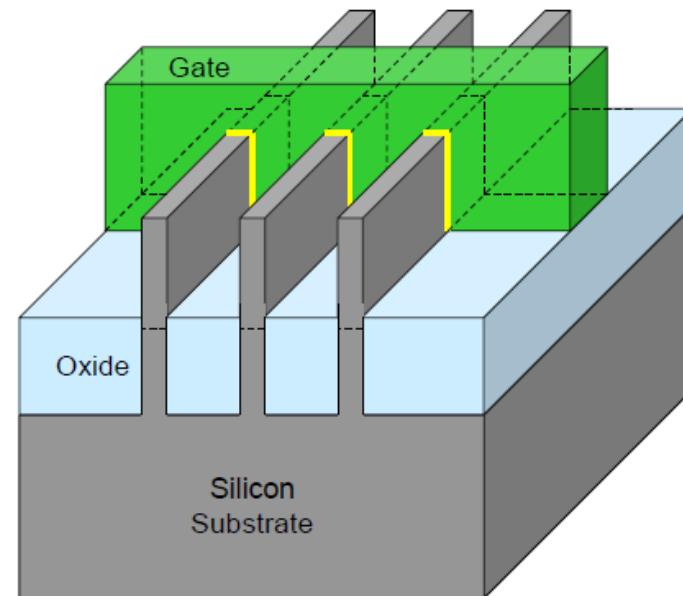
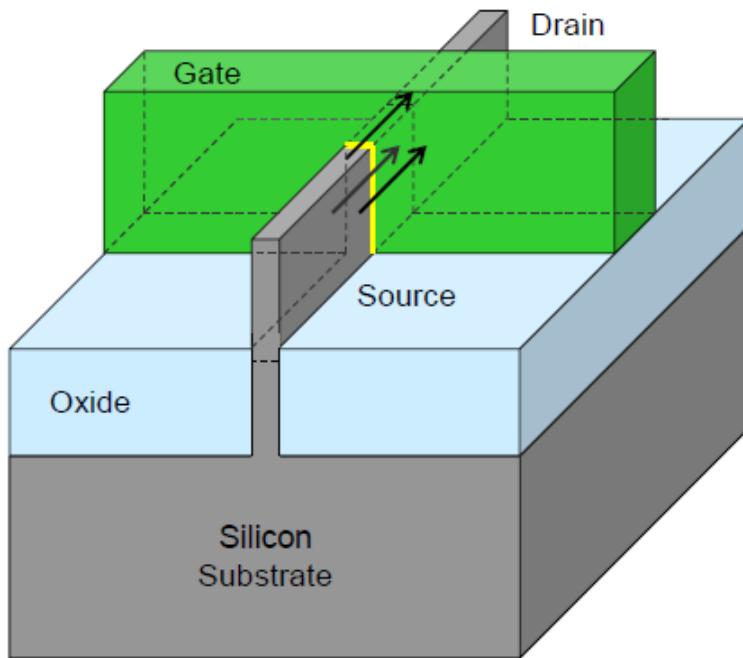


Feszített Si, High-K és metal gate tranzisztorok



- ▶ 1/25 részére csökkent a gate tunnel árama
- ▶ 33%-al kisebb teljesítmény
- ▶ Azonos tápfeszültség mellett 30%-al gyorsabb tranzisztorok vagy (nyilván csökkentett tápfeszültségnél) kb. 5× kisebb küszöbfeszültség alatti áram.

Multigate-FET, Tri-gate tranzisztor



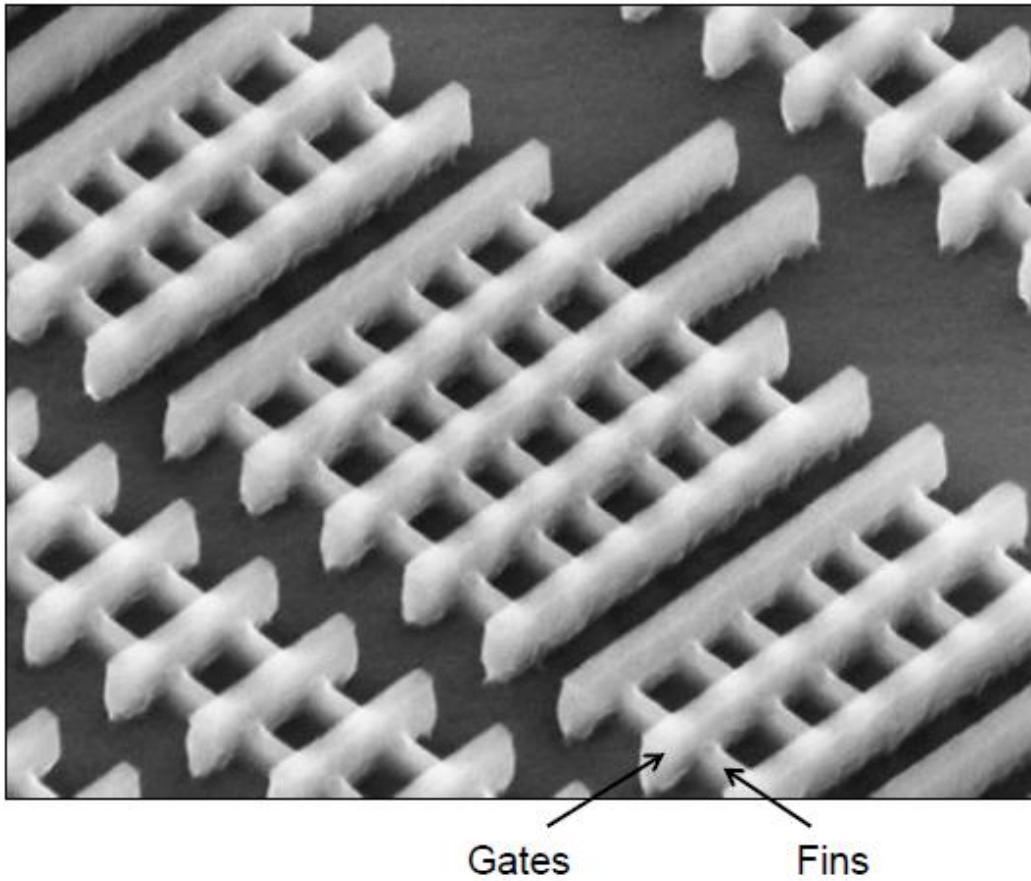
► Valódi háromdimenziós felépítés.

- A vezetés a kiemelkedő vékony rétegben történik, amelyet a gate elektróda körülöleli
- Így az inverziós réteg is három oldalon van jelen, innen az elnevezés
- Nagyon kis méretben gyártható.
- Nagyobb W/L arány eléréséhez több tranzisztor párhuzamosan.

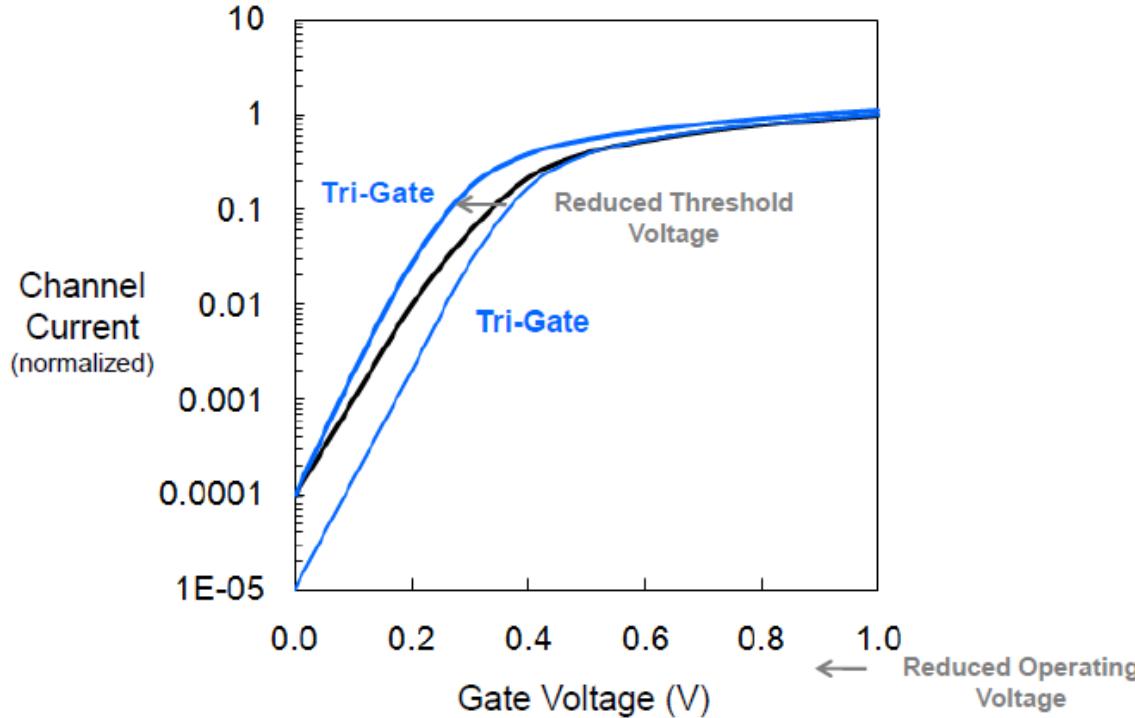
22nm tri-gate tranzisztor

► Intel Ivy Bridge platform, 2011-

22 nm Tri-Gate Transistor



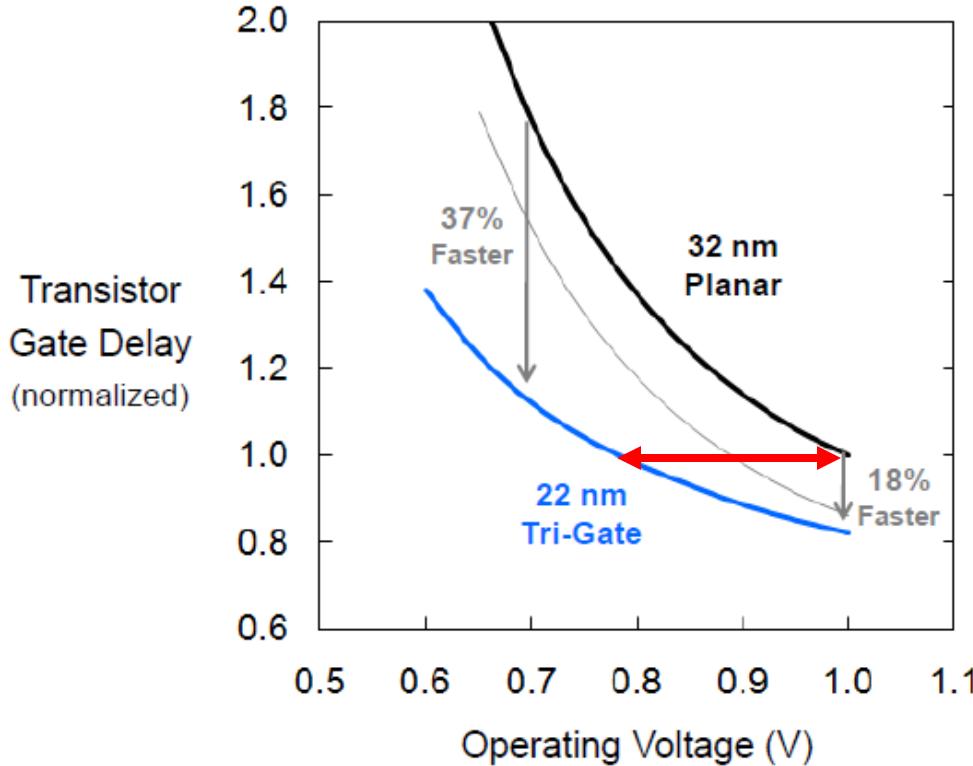
A tri-gate tranzisztorok előnyei



► Csökken a küszöbfeszültség alatti áram.

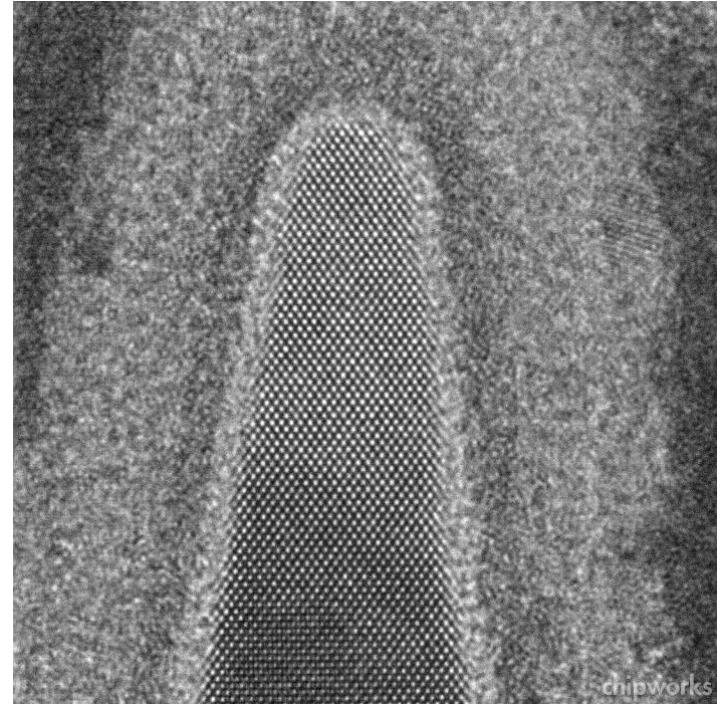
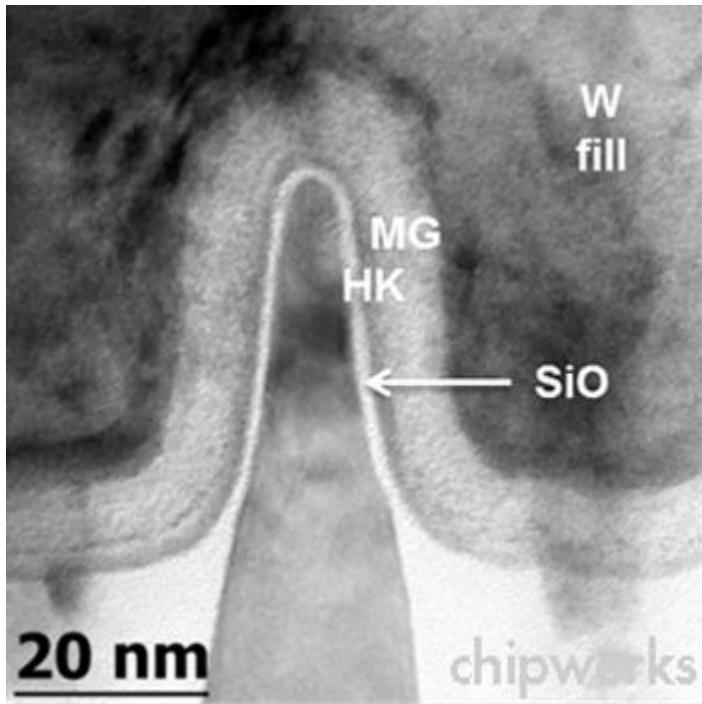
- Ugyanolyan paraméterek mellett lehetőség nyílik a küszöbfeszültség további csökkentésére.
 - Ez jó hatással lesz a sebességre, hiszen az $V_{DD} - V_T$ vel arányos
 - Vagy a tápfeszültség, és ezen keresztül a fogyasztás csökkenthető.

A tri-gate tranzisztorok előnyei



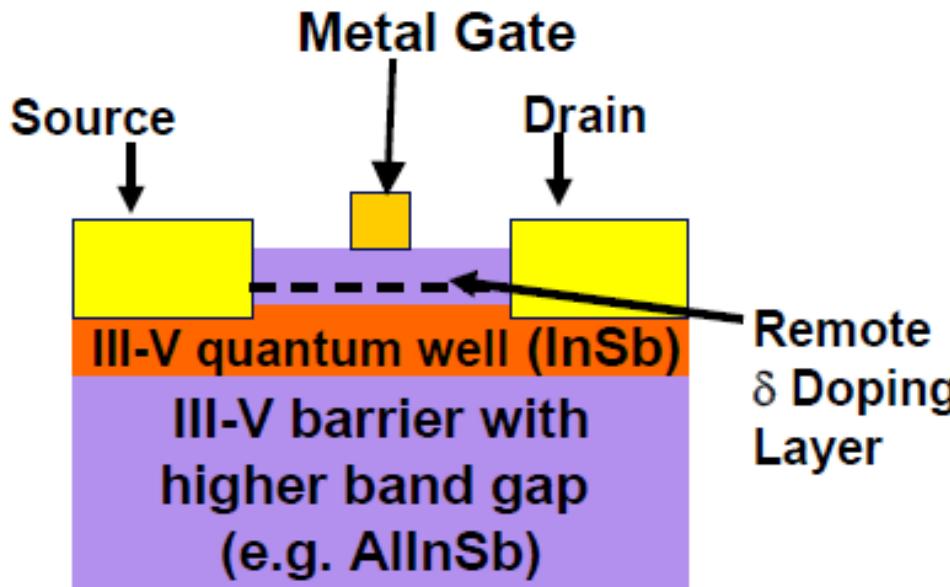
- ▶ Azonos órajel mellett kb. 0,2V-al csökkenhető a tápfeszültség.
 - Ez teljesítményben több mint 1/3-os csökkentést jelent.
 - Alacsony feszültségeken még látványosabb a sebességnövekedés.
 - A tápfeszültség értelmesen még lejjebb skálázható.

Trigate tranzisztor keresztmetszetee



► Forrás: [www.chipworks.com](http://www(chipworks.com)

QWFET – quantum well fet

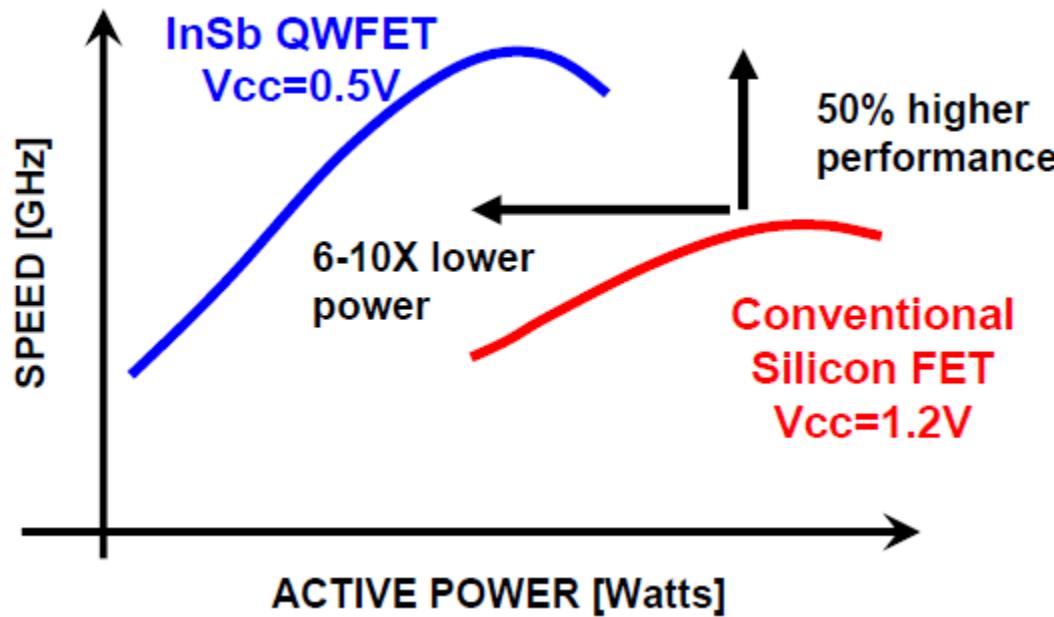


Properties of some NMOS candidates					
Material/Property	Si	Ge	GaAs	InAs	InSb
m_{eff}^*	0.19	0.08	0.067	0.023	0.014
μ_n (cm^2/Vs)	1600	3900	9200	40,000	77,000
E_G (eV)	1.12	0.66	1.42	0.36	0.17
ϵ_r	11.8	16	12.4	14.8	17.7

$$E_G (\text{InSb}) < E_G (\text{AlInSb})$$

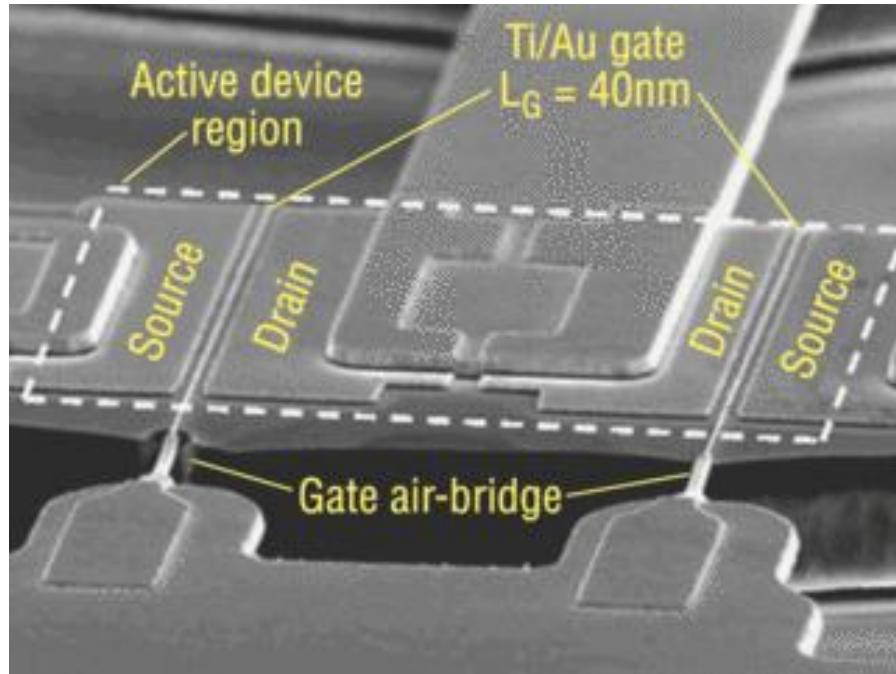
- ▶ A csatorna anyaga InSb, aminek a tiltott sáv szélessége kicsi.
- ▶ Körülötte nagyobb tiltottsáv-szélességű anyag van, amiről az elektron „visszapattan”. (hasonló az effektus, mint a fényvezető szálban...)
- ▶ A Si-hoz képest a mozgékonyúság jóval nagyobb.
 - Azaz kisebb feszültséggel lehet ugyanakkora áramot elérni

QWFET előnyei



- ▶ Másfélszéres órajel fele teljesítménnyel,
- ▶ Vagy ugyanakkora órajel, kb. hatodakkora elektromos teljesítmény igénnyel.

QW FET



- ▶ A legnagyobb probléma a vegyületfélvezetők beillesztése a Si alapú technológiába.
- ▶ Ez nem MOS tranzisztor.
 - Karakterisztikája a JFET-hez hasonlít

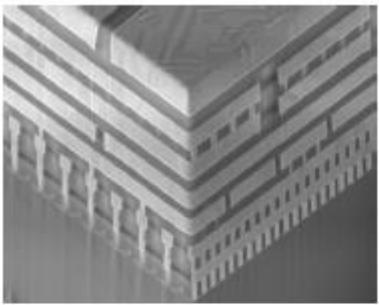
Vezetékezés

- ▶ A vezetékhálózat okozta késleltetés jelentősebb, mint a kapu intrinsic késleltetése.
- ▶ Egyenesen arányos a vezeték fajlagos ellenállásával és kapacitásával.
- ▶ $\tau = RC \dots$
- ▶ A fajlagos ellenállás csökkentésére először alumínium vezetékezés helyett viszonylag régen rézre tértek át.
- ▶ A kontaktusok illetve a gate felületén fém-szilícium ötvözleteket használnak az ellenállás csökkentésére, pl. TiS stb.
- ▶ Az egyes fémrétegeket elválasztó szigetelő anyag viszont hat a kapacitásra.
- ▶ Itt a gate-dielektrikummal szemben most kis dielektromos állandóval rendelkező anyagra van szükség.
- ▶ Ezek az ún. low-K anyagok.

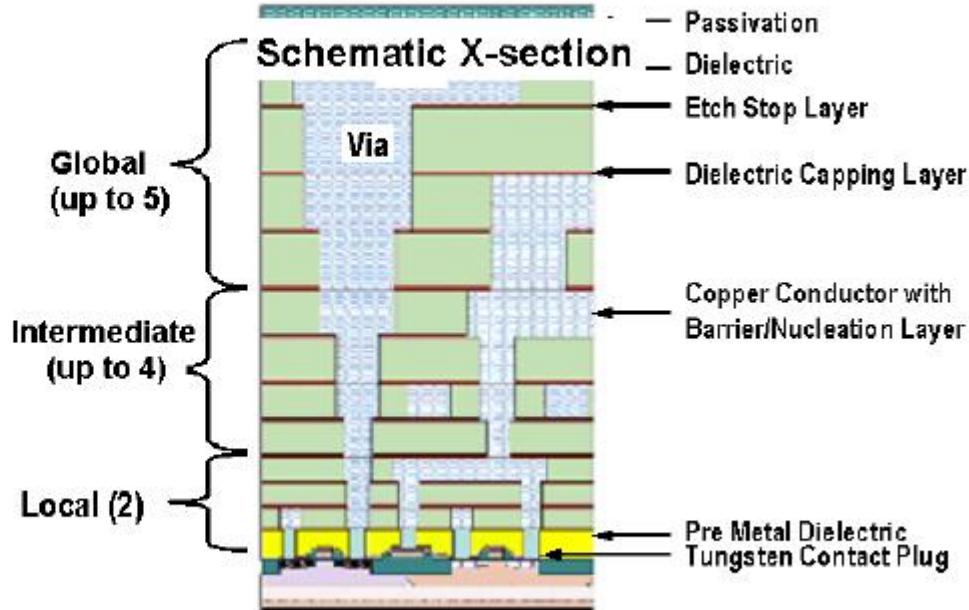
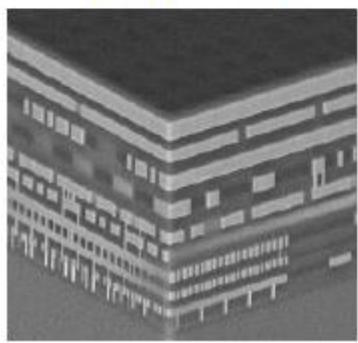


Összeköttetések

130nm – 6LM



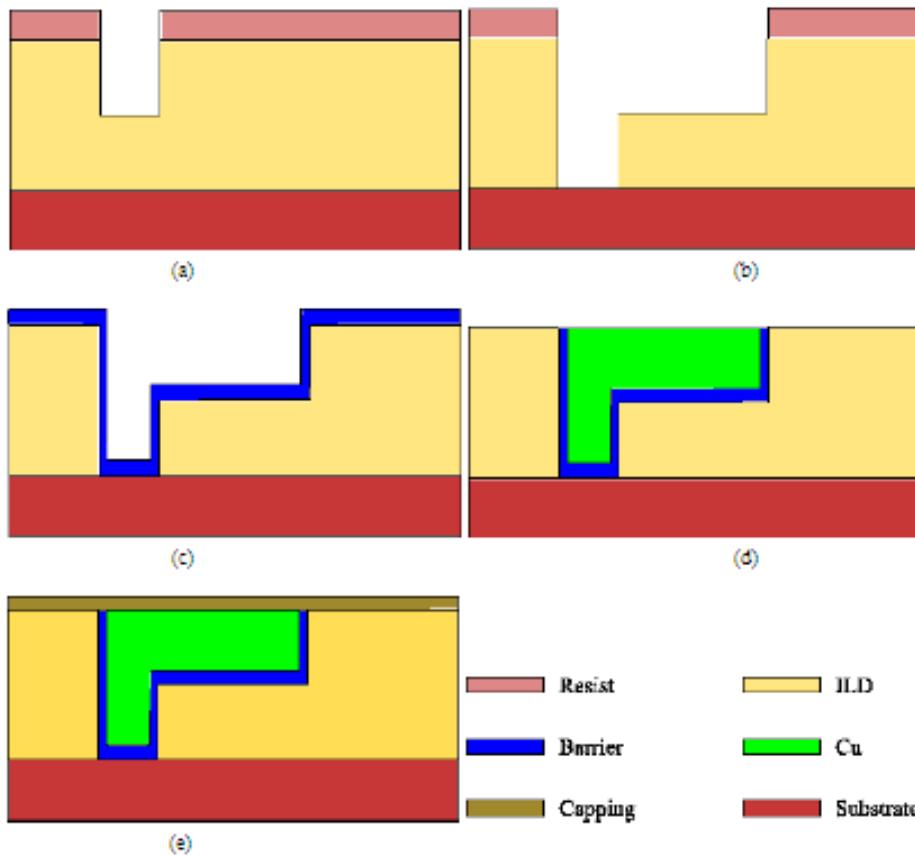
90nm – 9LM



- ▶ Barrier – a réz elvándorlását akadályozza meg.

Összeköttetés – 1 réteg.

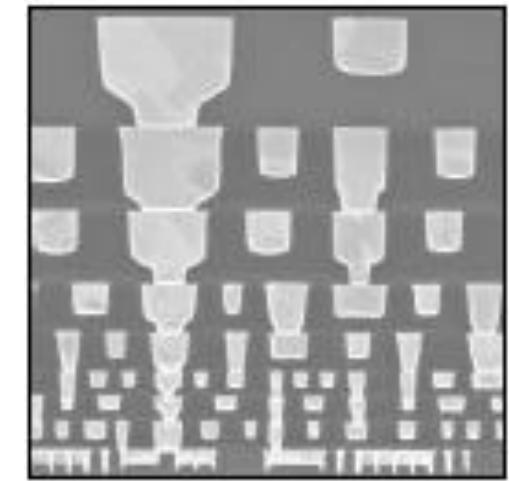
- ▶ Az ún. dual – damascene process
- ▶ A VIA és a vezetékezés együtt készül.
- ▶ A réz nem marható szelektítven a szokásos IC eljárásokkal.
 - Teli réz, utána CMP (chemical-mechanical polishing)



- ▶ Barrier = Ta
- ▶ Capping: SiN

Low-K anyagok

Anyag	ϵ_r
SiO_2	3,9
FDO – fluórral adalékolt oxid	3,5
CDO – szénnel adalékolt oxid	3,0
Pórusos SiO_2 (mechanikailag instabil)	2,0
Pórusos CDO	2,7
polimerek	2,2



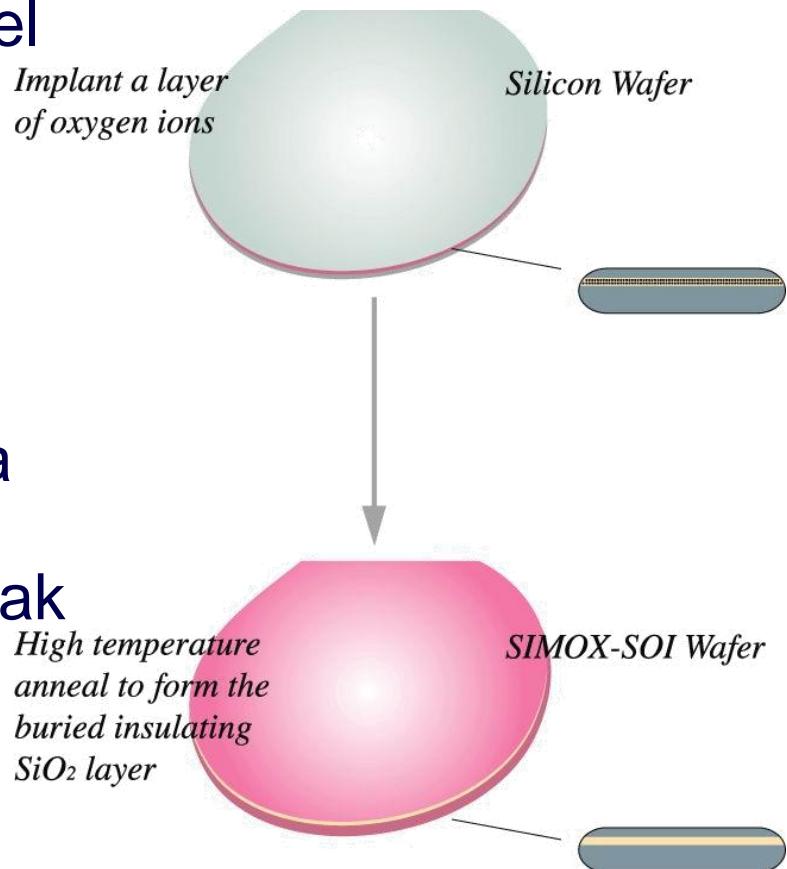
- ▶ Tehát pl. a SiO_2 -t CDO-ra cserélve 25%-al lehetett csökkenteni a késleltetést.

Szubsztrát

- ▶ Jellemző méretek: 6" - 8" - 12" (150 - 200 - 300mm)
 - A 450mm egyenlőre technológiai demonstráció, óriási beruházásigényt jelent.
 - szélesség: 200mm - 725µm, 300mm - 775 µm, 450mm - 925µm
 - Előállítás: nagyrészt CZ
 - d átmérőjű szeleten S felületű chipből:
 - $DPW = d\pi(\frac{d}{4S} - \frac{1}{\sqrt{2S}})$ db. készül el egyszerre.
 - Pl. 87mm² chip esetén (Intel Atom Pineview) 200mm-en 310, 300mm 740, 450mm-es szeleten 1720 db IC/szelet
- ▶ SOI {Silicon on insulator} alapanyag
 - Spec. területek kivételével a szigetelőanyag SiO₂
 - Śr és a katonai alkalmazások: zafír, SOS {Silicon on sapphire}
 - Kb. 30% a részesedés az összes szelet között
 - IBM, AMD, Freescale a fő felhasználók – Intel pl. nem gyárt SOI-t
 - A fő előny
 - Nincs szivárgás a szubsztrát felé
 - Sokkal kisebb a drain-bulk és a source-bulk parazita kapacitás
 - Gyakorlatilag nincs szubsztrát hatás.
 - A rövidcsatornás effektusok „szelídebbek”

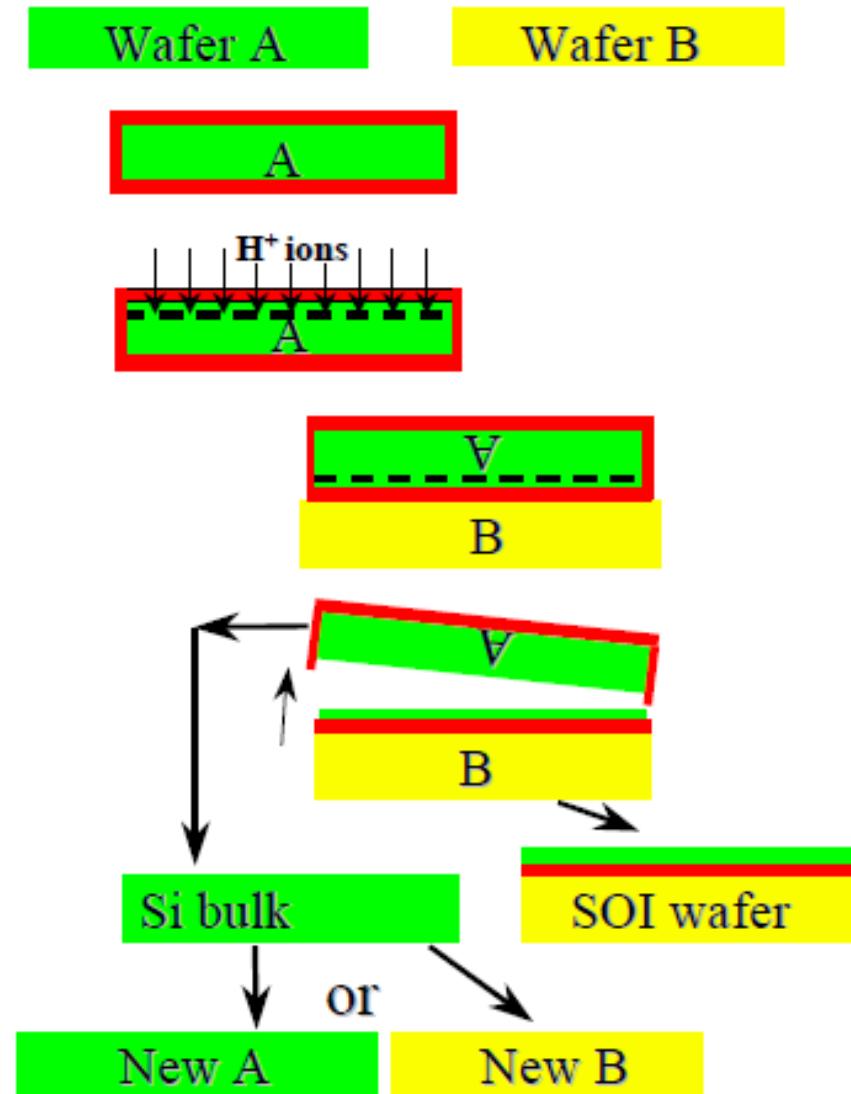
SIMOX

- ▶ A teljes szelet felületét oxigénnel implantálják.
- ▶ Majd magas hőmérsékletű hőkezelés következik
 - Kialakul egy belső, szigetelő SiO_2 réteg.
- ▶ Innentől kezdve a technológia a „hagyományos”, ugyanazt a technológiai sort használják, csak az alapanyag más...



„Smart – Cut”

- ① Initial silicon wafers A & B
- ② Oxidation of wafer A to create insulating layer
- ③ Smart Cut ion implantation induces formation of an in-depth weakened layer
- ④ Cleaning & bonding wafer A to the handle substrate, wafer B
- ⑤ Smart Cut - cleavage at the mean ion penetration depth splits off wafer A
- ⑥ Wafer B undergoes annealing, CMP and touch polish => SOI wafer complete
- ⑦ Split-off wafer A is recycled, becoming the new wafer A or B



Fotolitográfia

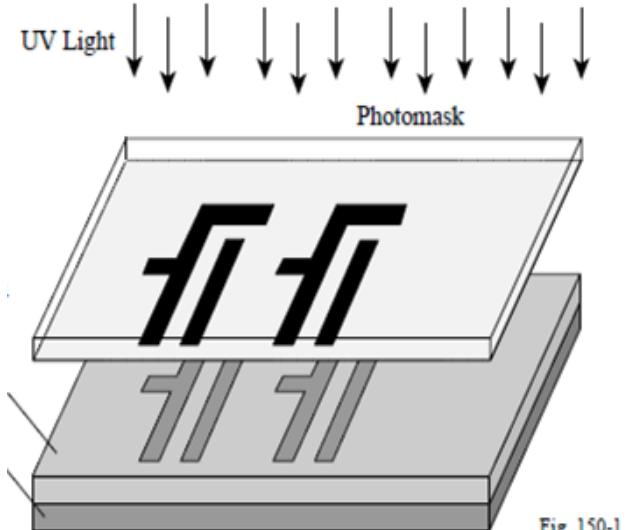
► Óriási erőfeszítések a nagyobb felbontóképesség irányába

- EUV (extreme-UV), kb. 13,5nm
- Röntgen (X-ray) kb. 1nm
- Elektronsugaras direkt írás 15nm
- Ionsugaras direkt írás
- Nano imprint 10nm

► Ennek ellenére a gyakorlatban 365- 248 - 193nm-es UV fényforrást használnak

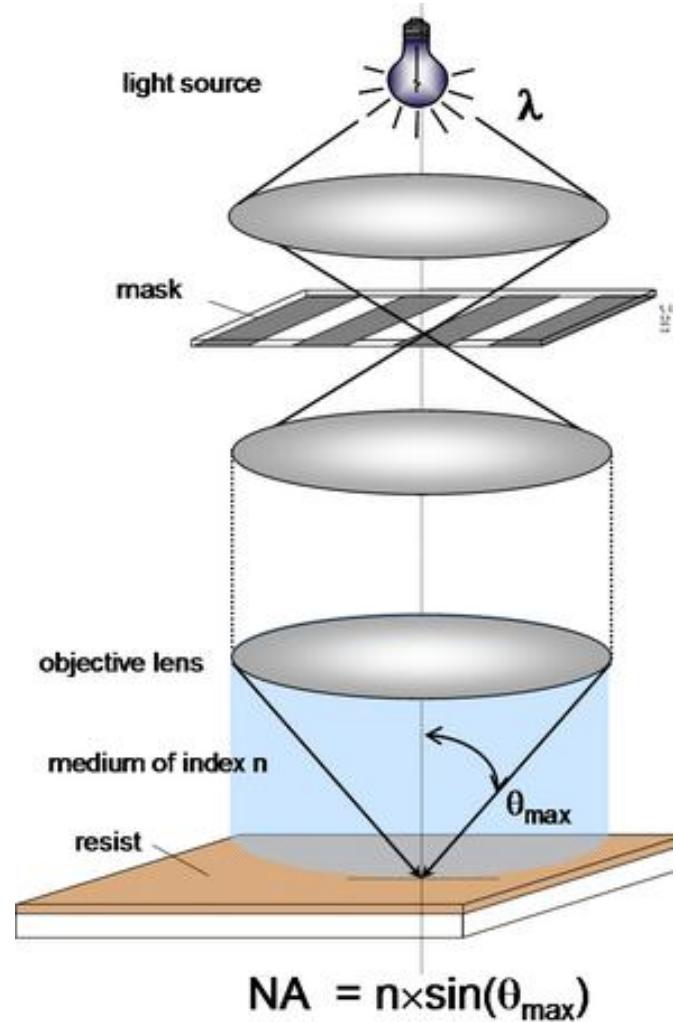
► A hullámhossznál kisebb méretű alakzat kialakítás

- Immerziós litográfia
- Kétszeres (háromszoros, négyeszeres) mintázás
- (double patterning)



Immerziós litográfia

- ▶ A maszk ábra 1 chip mintázatát tartalmazza, ezt kicsinyítik le optikai úton
- ▶ A megvalósítható legkisebb méret: $w_{min} = k_1 \lambda / NA$
 - Ahol k_1 egynél valamivel kisebb, az optikai rendszerre jellemző konstans
 - A numerikus appertúra pedig $NA = n \sin(\theta_{max})$, azaz a közeg törésmutatója és a maximális kilépési szög szinuszának szorzata
- ▶ Ha a reziszt és a lencse közé nagyobb törésmutatójú anyag kerül, a megvalósítható méret csökken.
 - Általában tiszta víz: $n=1,33$



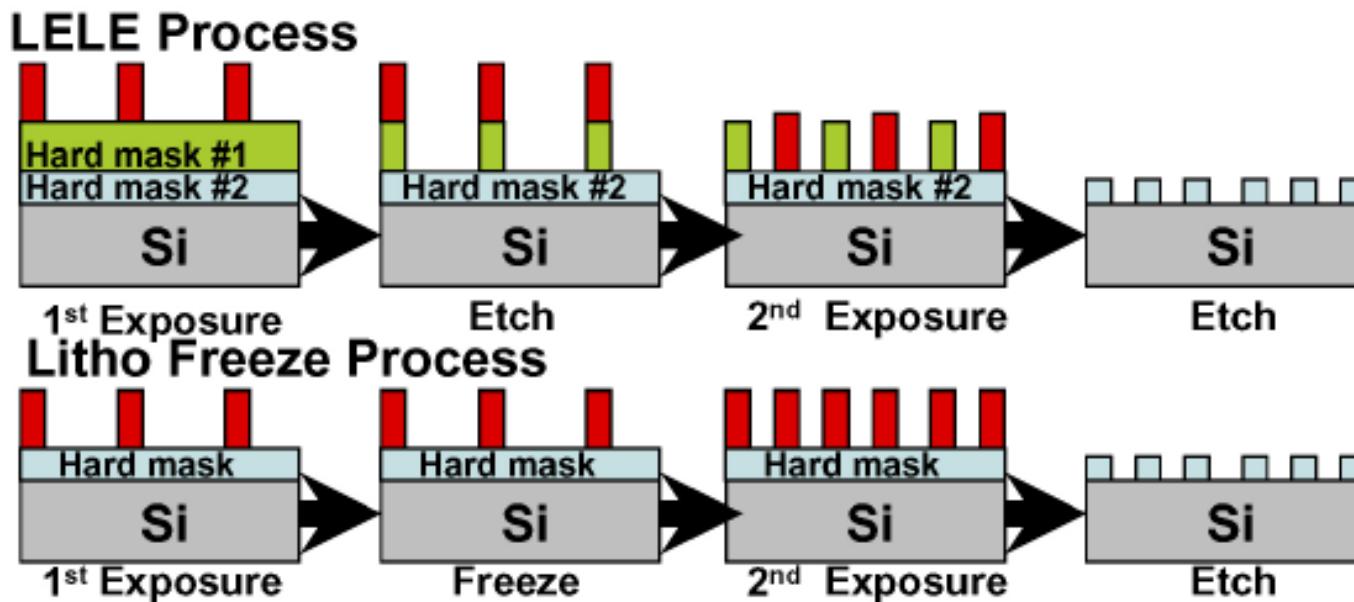
Kétszeres mintázás

► LELE = litho-ecth-litho-etch

- Két, különböző anyagú maszkoló réteget alkalmaznak, így a felbontás duplázható

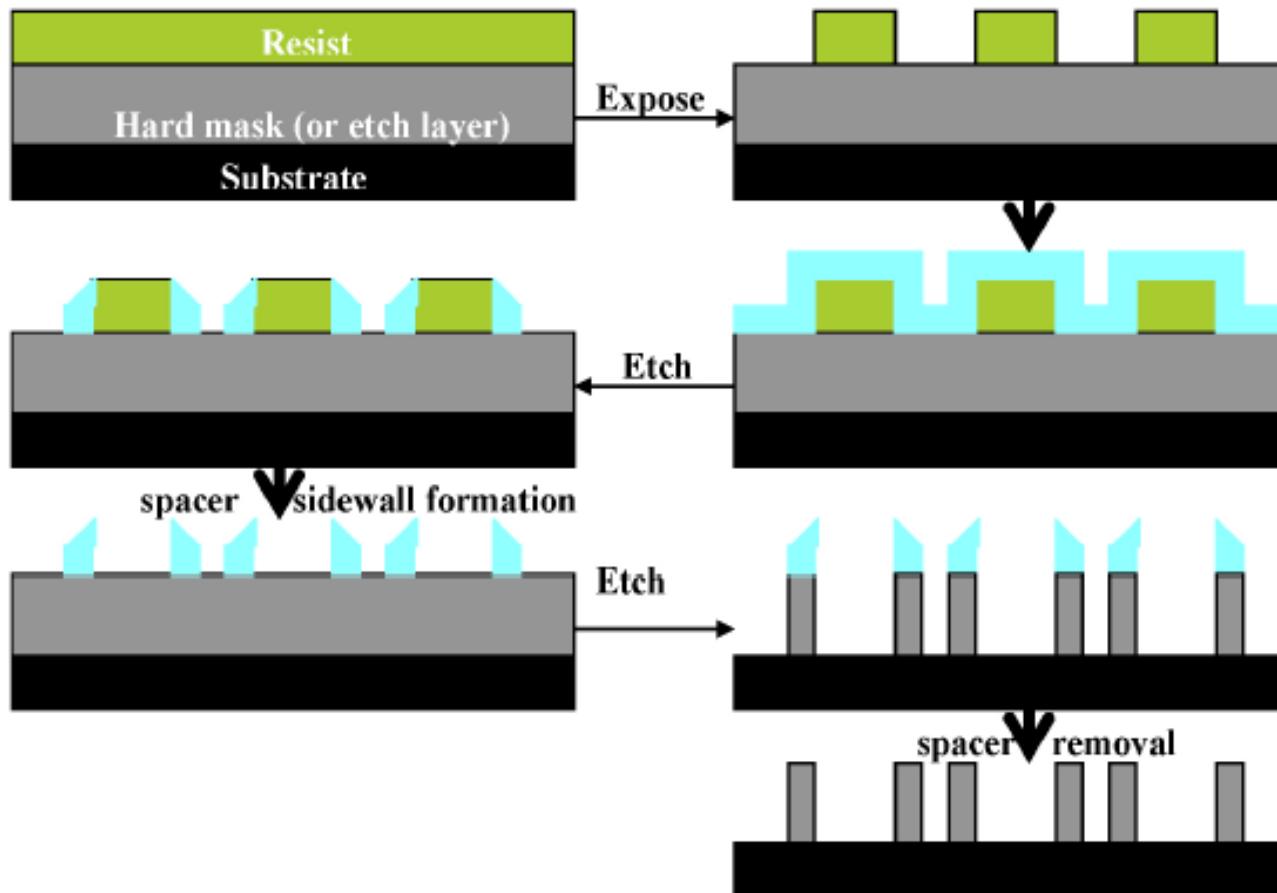
► Litho-freeze

- Elsőként a mintázat fele, majd kémia úton a reziszt „kikeményítése” (freeze), majd a második megvilágítás



Önillesztett kétszeres mintázás

- Az oldalfali anyag nehezebb marhatóságát használja ki.

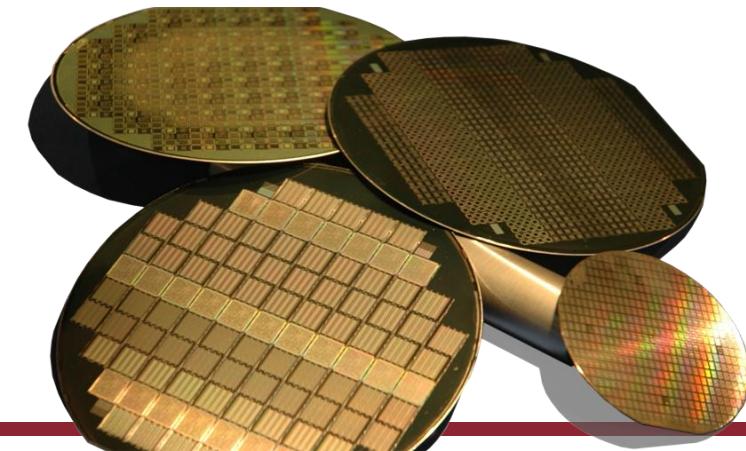




Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

MEMS tervezés alapjai I.

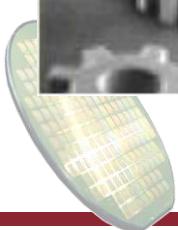
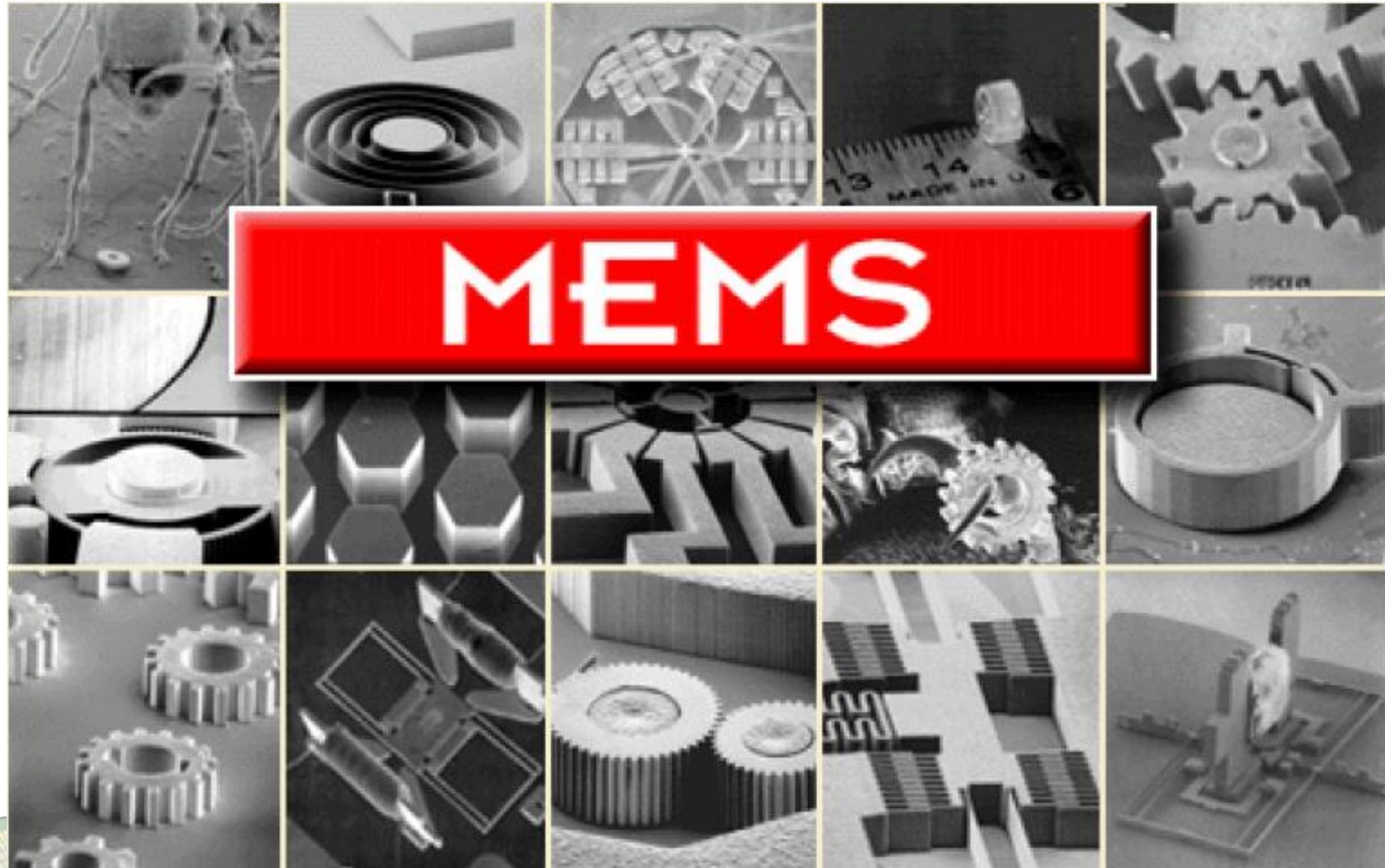
Szabó Péter
Szűcs Zoltán



<http://www.eet.bme.hu>



MEMS

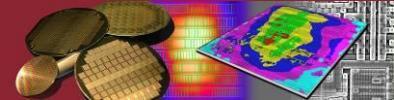




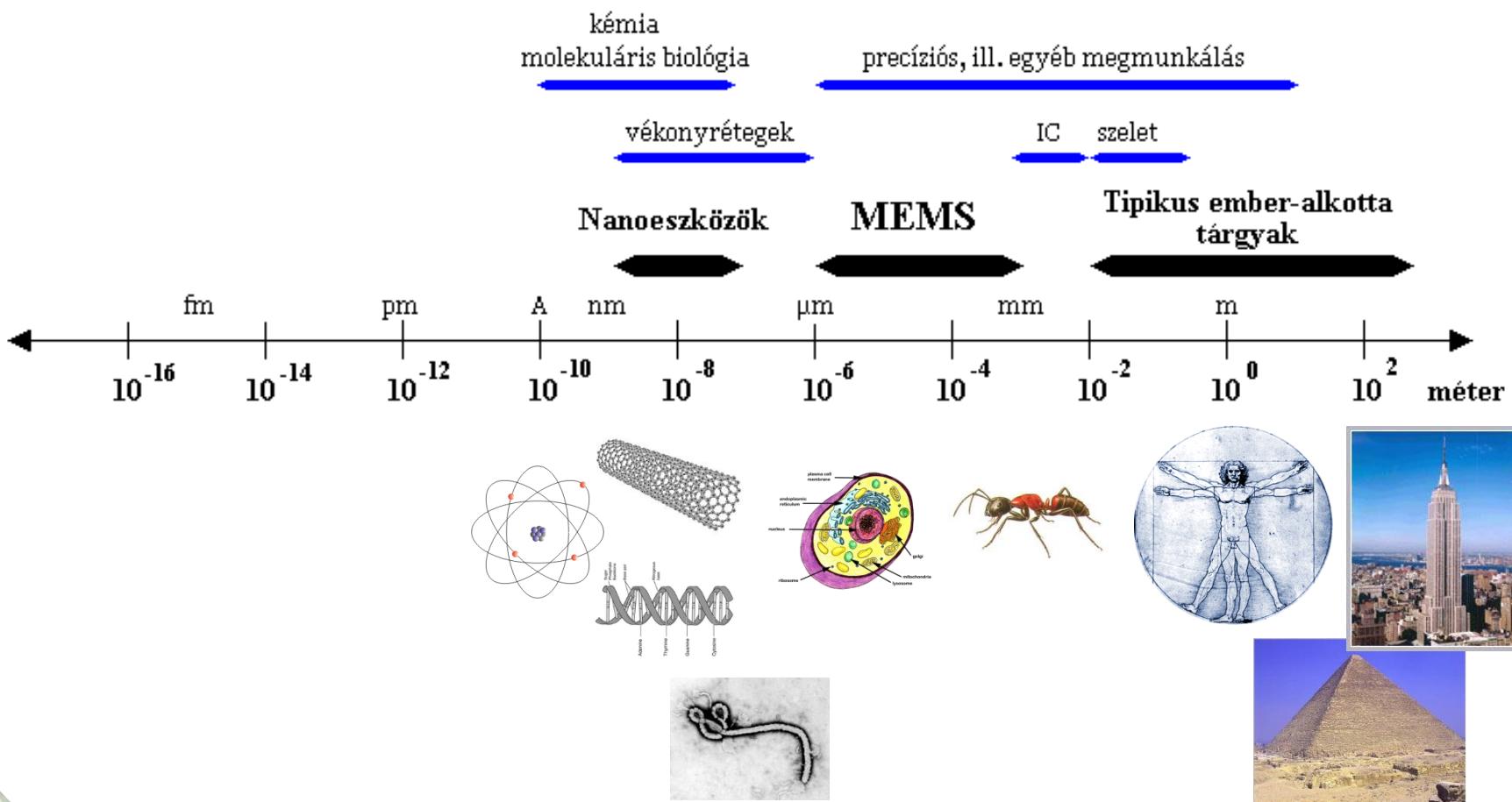
Mi a MEMS?

- ▶ A mikro-elektromechanikai eszközöket összefoglaló néven MEMS-eknek nevezzük
- ▶ A MEMS angol mozaikszó: Micro-ElectroMechanical System
- ▶ Olyan rendszerekre használjuk e kifejezést, melyek mérete tipikusan az $1\mu\text{m}$ és a néhány milliméter közötti tartományba esik



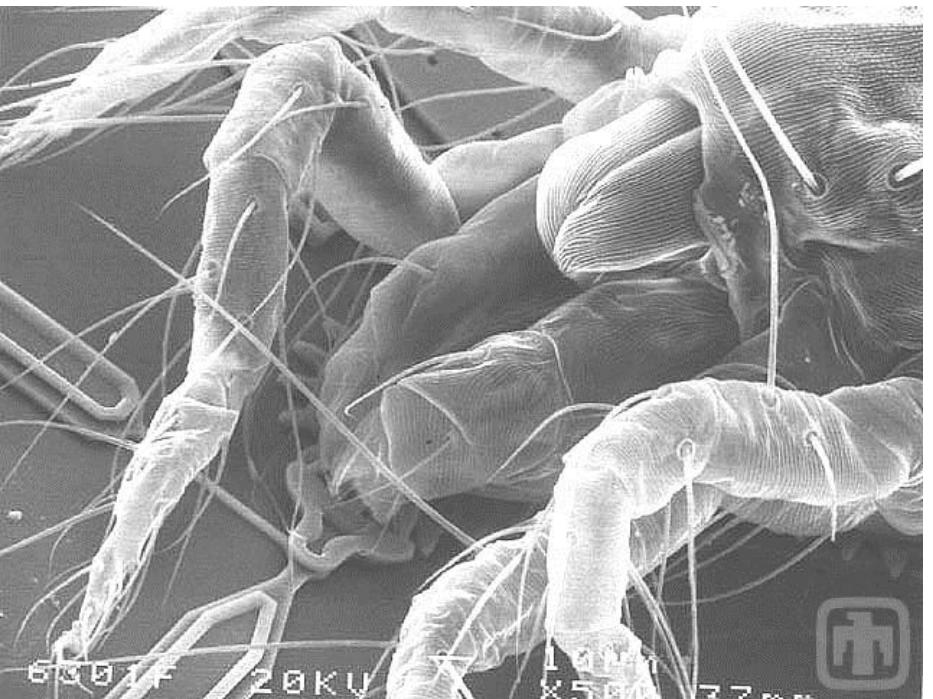
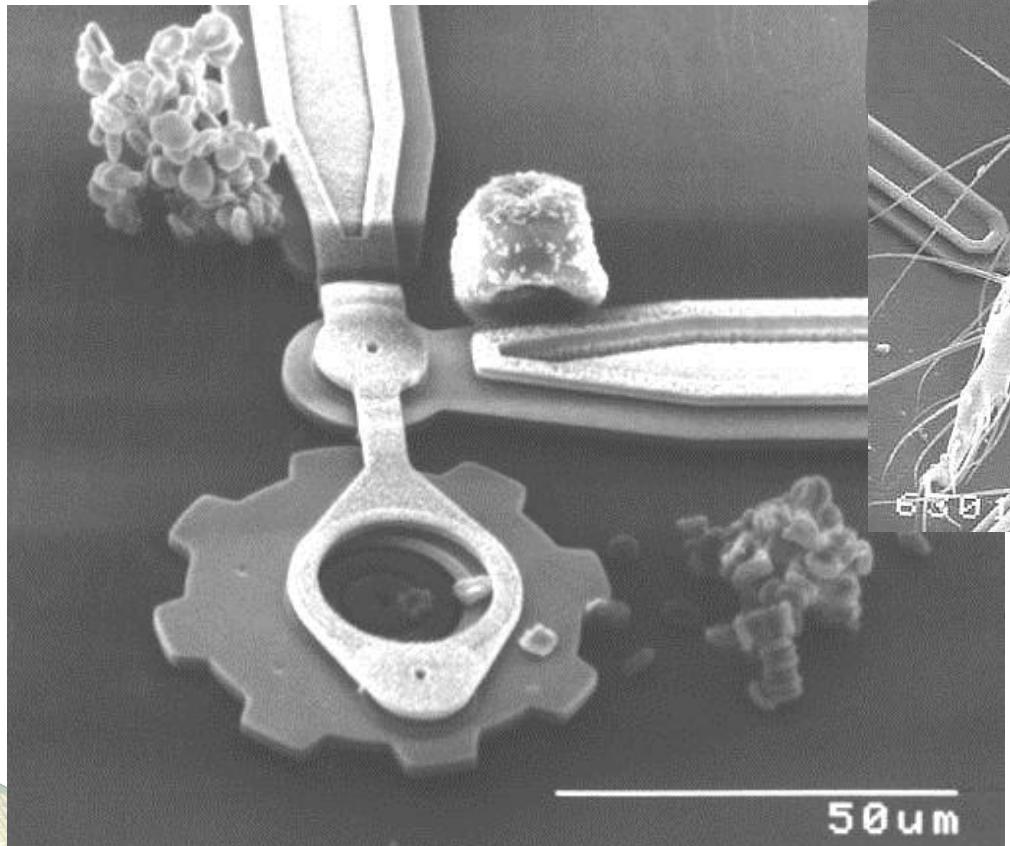


A méretskála





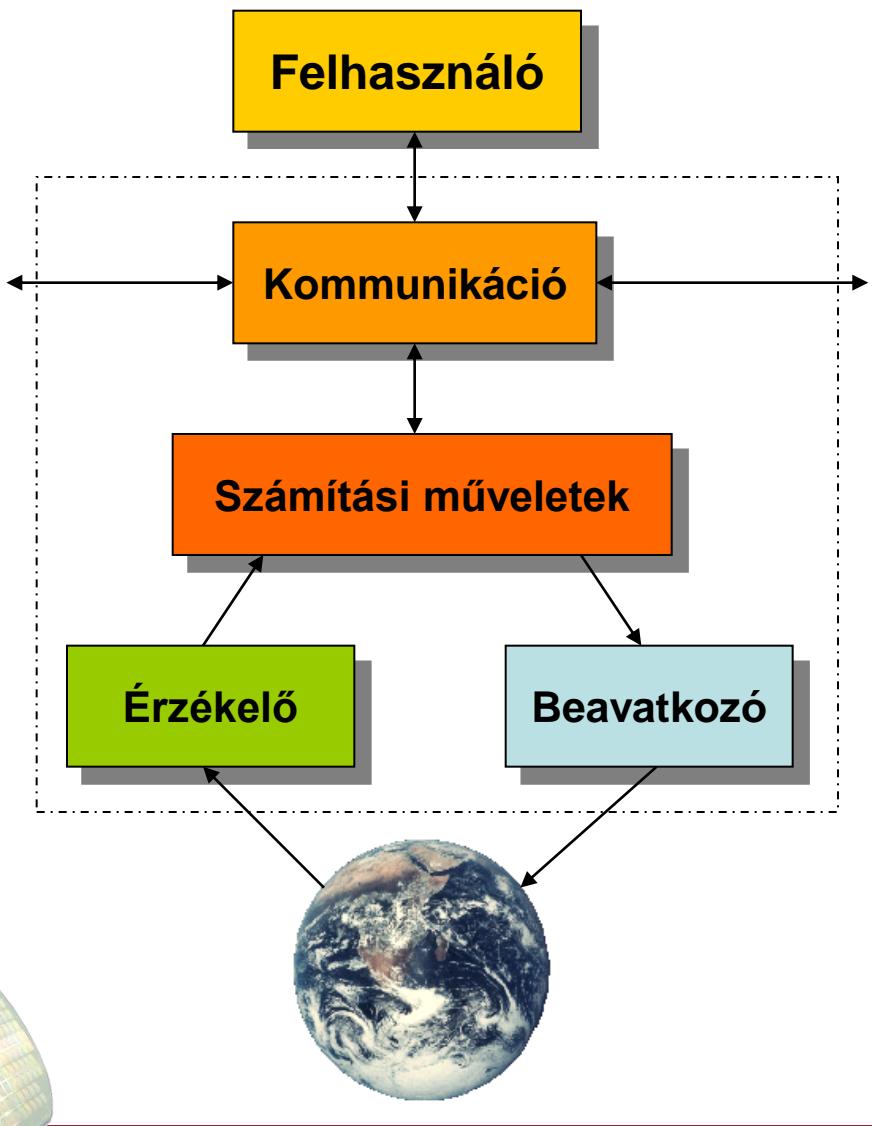
Mennyire kicsi?



Fotók: Sandia National Laboratories



Átalakító rendszer



► Átalakító: energiát alakít át egyik formából a másikba.

A MEMS-ek lehetővé teszik az érzékelők és a beavatkozók integrálását, sőt akár a számítási műveleteket és a kommunikációt is megvalósíthatjuk egyetlen eszközben!



A MEMS-ek alkalmazási területei

- ▶ Érzékelők és beavatkozók
 - Katonai berendezések
 - Ūrtechnika
 - Orvosbiológia
 - Ipar/termelés
 - Kereskedelmi eszközök

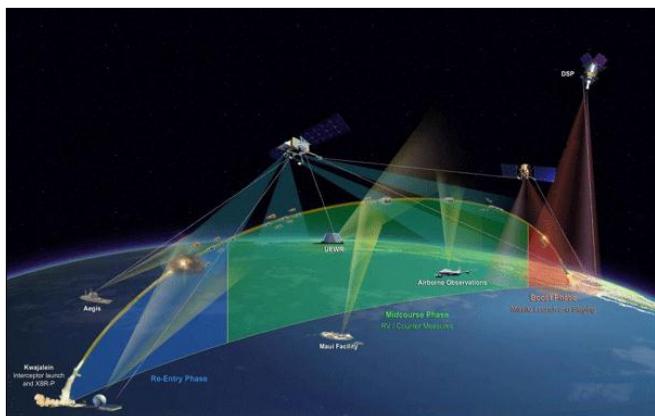




A MEMS-ek alkalmazási területei

► Érzékelők és beavatkozók

- Katonai berendezések
- Ūrtechnika
- Orvosbiológia
- Ipar/termelés
- Kereskedelmi eszközök

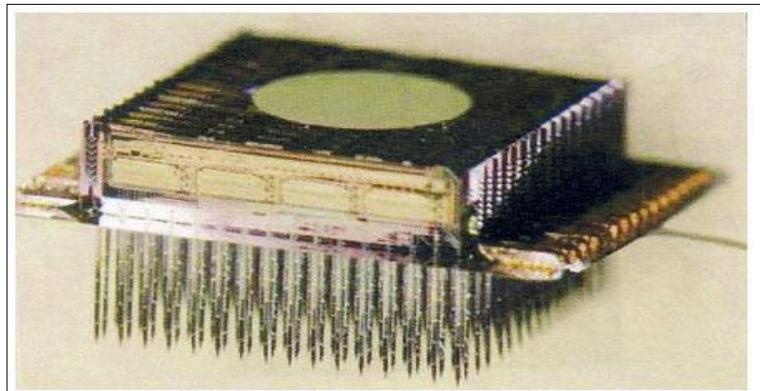




A MEMS-ek alkalmazási területei

► Érzékelők és beavatkozók

- Katonai berendezések
- Ūrtechnika
- **Orvosbiológia**
- Ipar/termelés
- Kereskedelmi eszközök



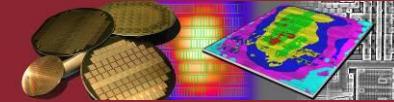


A MEMS-ek alkalmazási területei

► Érzékelők és beavatkozók

- Katonai berendezések
- Ūrtechnika
- Orvosbiológia
- Ipar/termelés
- Kereskedelmi eszközök





A MEMS-ek alkalmazási területei

► Érzékelők és beavatkozók

- Katonai berendezések
- Ūrtechnika
- Orvosbiológia
- Ipar/termelés
- **Kereskedelmi eszközök**

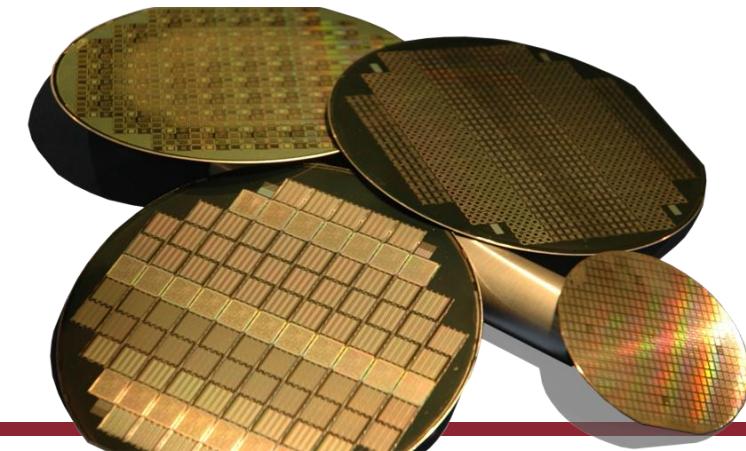




Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

SCALING

A méretcsökkentés
következményei...



<http://www.eet.bme.hu>



Mi a SCALING?

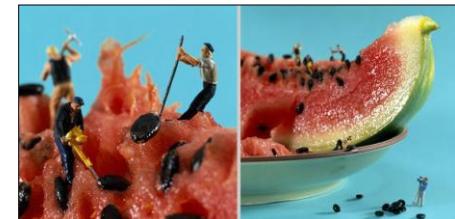
- ▶ A „scaling” elmélete egy hasznos útmutató ahhoz, hogy megjósoljuk mi fog működni és mi nem.
 - A különböző fizikai jelenségek működését és változásait vizsgáljuk, miközben a méretskálán egyre lejebb megyünk...
- ▶ Eszközünk: a MATEMATIKA





A mikrovilág csábító...

- ▶ A konvencionális megoldások gyakran nem működnek mikroméretekben, ezért nagy leleményesség szükséges a tervezéshez.
- ▶ Emiatt pedig megvan a lehetőségünk rá, hogy megtaláljuk a saját, új megoldásunkat egy-egy problémára.





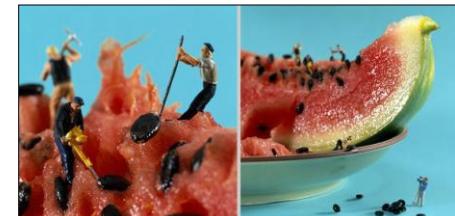
Számítások

► Legyen a skálatényező: S

Jelentése ugyanaz, mint mechanikai rajzoknál: ha $S=1:10$, akkor a készítendő objektum mérete 10-szer nagyobb, mint a rajz.

Mikrorendszerknél S lehet pl. $100:1$, ami azt jelenti, hogy a rendszer százszor kisebb, mint a rajzunk.

Az S skálatényezőt fogjuk használni arra, hogy leírjuk vele hogyan változnak a jelenségek.





Számítások

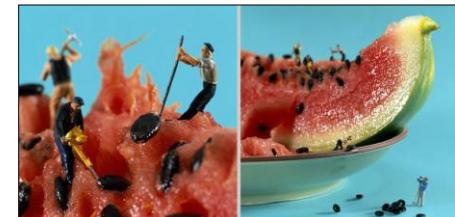
- ▶ A rendszer minden hosszmérete S szerint skálázódik. De más mennyiségek, mint pl. a térfogat (V) ettől eltérően:

$$V = l \cdot w \cdot h$$

ahol l a hossz, w a szélesség, h pedig a magasság

Ha a rendszer hosszméretei pl. 10-edére csökkennek, akkor a hossz is, a szélesség is és a magasság is rendre 10-ed részére csökken. A térfogat így 1000-ed részére fog csökkenni.

A térfogat S^3 -nal skálázódik!





Számítások

► Felületi feszültséggel kapcsolatos erők: S^1

$$F = \alpha \cdot 2l$$

► Elektrosztatikus erők: $S^1 S^2$

$$F = k \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

► Mágneses erők: S^2, S^3, S^4

$$G = \gamma \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

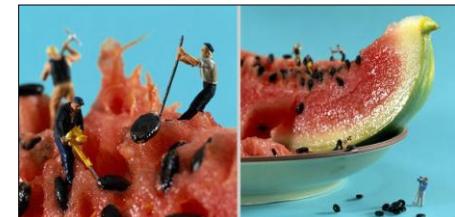
► Gravitációs erő: S^4





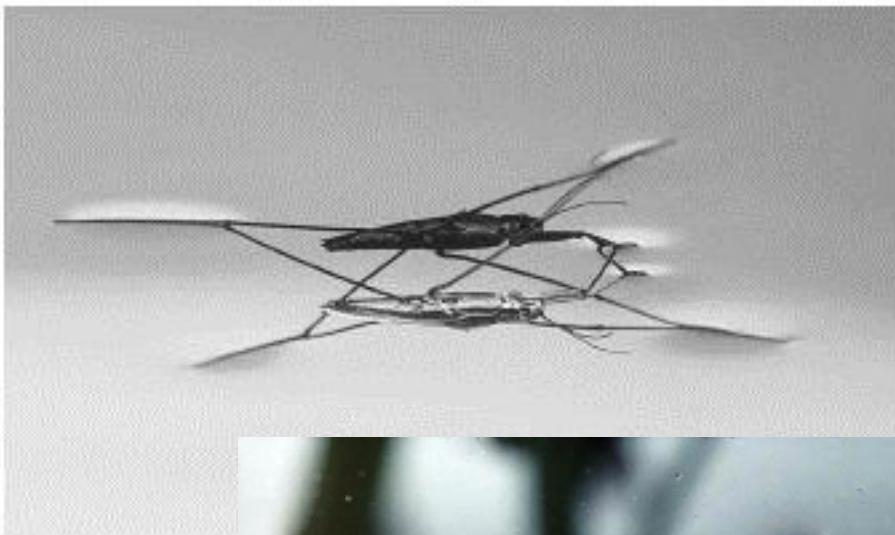
Egy példa a természetből...

- ▶ Egy vízipók súlya a térfogatával azonos mértékben skálázódik, azaz S^3 -bel. Míg az őt fenntartó erő: [a felületi feszültség (S^1) szorozva a lábak hatótávolságával (S^1)] $S^1 \times S^1 = S^2$ -tel.
- ▶ Ha a méreteket csökkentjük a súly gyorsabban csökken, mint a felületi feszültséggel kapcsolatos erők.





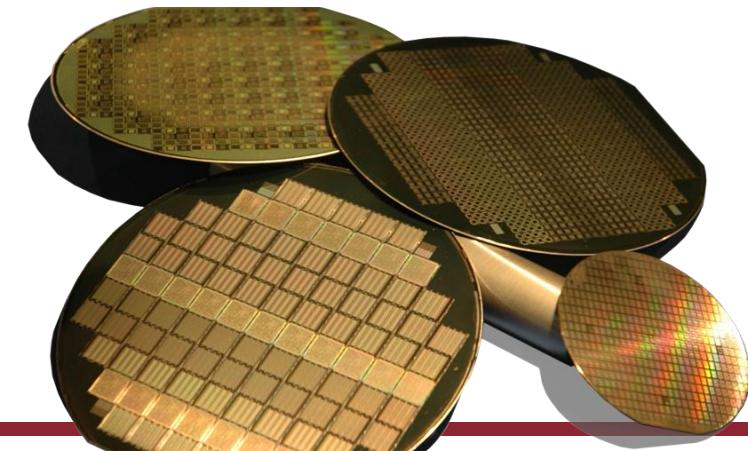
Egy példa a természetből...





Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Anyagválasztás



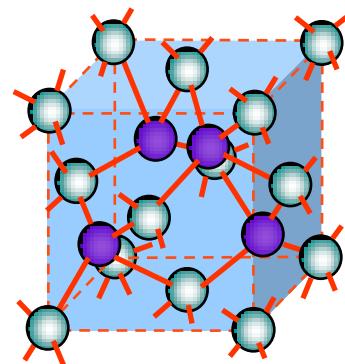
<http://www.eet.bme.hu>



Megvalósítás

► Kurt Petersen: A Si felhasználható, mint építőanyag!

- 1982. május 5. „Silicon as a Mechanical Material” c. cikk
- Már ebben az időben is ismert volt néhány érzékelő és átalakító, melyek Si alapon készültek.

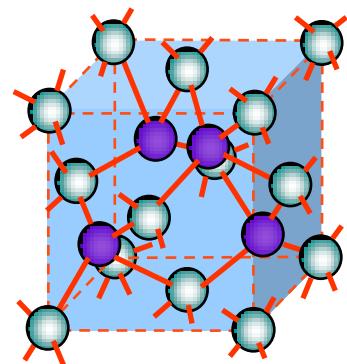




A Si, mint alapanyag

- ▶ „A mikromechanika alapjait az adja, hogy a Si”, melyet az elektronikában már oly elterjedten használnak „felhasználható, mint precíziós, nagy keménységű, megbízható mechanikai anyag, különösen ott, ahol elektronikával integrált mechanikai elemekre van szükség.”

(részlet Kurt Petersen: Silicon as a Mechanical Material. cikkéből...)

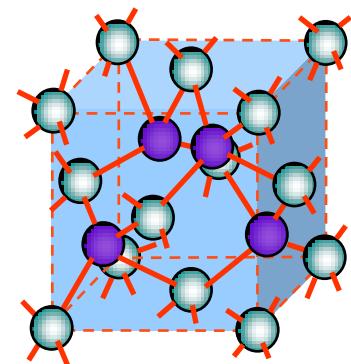




Az Si, mint alapanyag

► Miért ezt használjuk?

- Felhasználhatók az IC technológia eszközei
- Nagyon jól ismerjük az anyagi tulajdonságait
- Rendelkezésre áll rendkívül tiszta formában
- Integrált elektronika is megvalósítható
- Mechanikailag erős, de mégis könnyű anyag
- Fajlagos ellenállása adalékolással széles tartományban beállítható

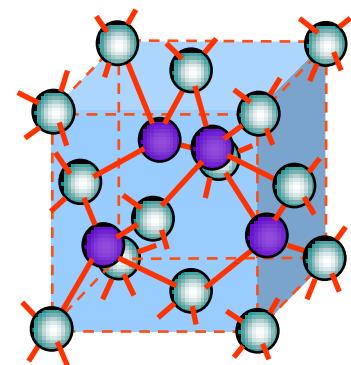




A Si, mint alapanyag

► A Si sikereségében 4 tényező játszik fontos szerepet:

- Nagy mennyiségen rendelkezésre áll, olcsón és nagy tisztaságban előállítható.
- A Si technikában használt vékonyrétegek technikája miniatürizálásra alkalmas.
- A fotolitografiában használt eljárások felbontóképessége és reprodukálhatósága lehetővé teszi a miniatürizálást
- A Si chipek tömeggyárthatók





A Si mechanikai tulajdonságai

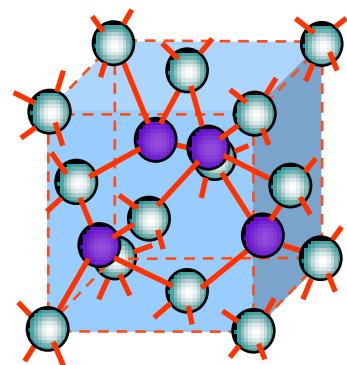
	Szakító-szilárdság [MPa]	Knoop-keménység [MPa]	Young-modulus [GPa]	Sűrűség [g/cm³]	Hővezetés [W/cm°C]	Hőtágulás [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]
Gyémánt	53	7000	1035	3.5	20	1
SiC	21	2480	700	3.2	3.5	3.3
Al_2O_3	15.4	2100	530	4	0.5	5.4
Si_3N_4	14	3486	385	3.1	0.19	0.8
SiO_2	8.4	820	73	2.5	0.014	0.55
Si	7	850	190	2.3	1.57	2.33
Fe (acél)	4.2	1500	210	7.9	0.97	12
W	4	485	410	19.3	1.78	4.5
Al	0.17	130	70	2.7	2.36	25

Összehasonlító adatok: K. Petersen nyomán...



A Si mechanikai tulajdonságai

- ▶ A Young-modulusa megközelíti az acélét és bőven meghaladja különböző üvegekét...
- ▶ A keménysége meghaladja a kvarcét és majdnem kétszer olyan kemény, mint a nikkel, vagy a közönséges üvegek...

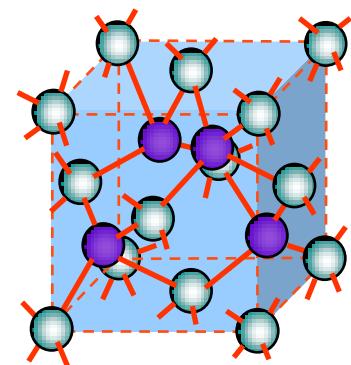




MEMS-ekben általánosan használt anyagok

► Szubsztrátok:

- Si, GaAs, más elemi vagy vegyület félvezetők
- Fémek (tömbi és fólia)
- Üvegek
- Kvarc
- Zafír
- Kerámiák
- Műanyagok, polimerek és egyéb szerves anyagok

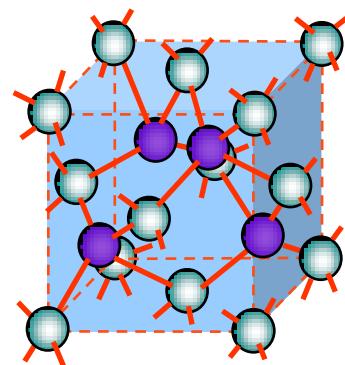




MEMS-ekben általánosan használt anyagok

► Kiegészítő anyagok:

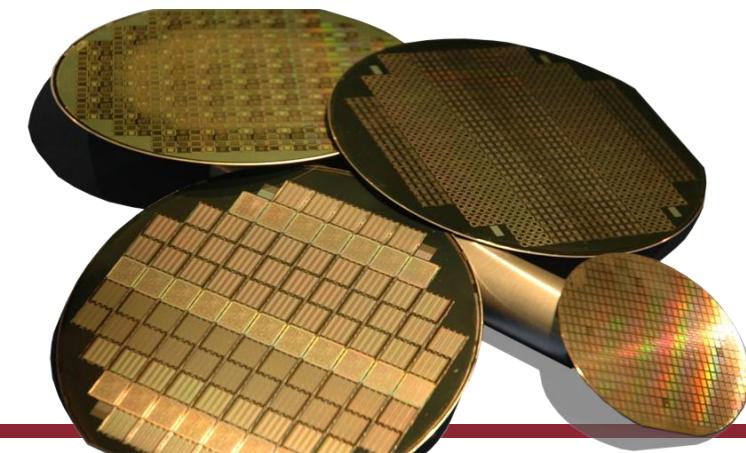
- Si (amorf, polikristályos)
- Si-vegyületek (oxidok, nitridek, karbidok, stb.)
- Fémek és fém ötvözetek
- Üvegek
- Kerámiák
- Polimerek és egyéb szerves anyagok
- Biológiai anyagok





Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Technológiai alapok



<http://www.eet.bme.hu>



A mikromegmunkálás tehnológiája – alapvető fogalmak

► Mit nevezünk mikromegmunkálásnak?

- Tág értelemben: minden olyan precíziós megmunkálási technika, mellyel pici (mm-től μm méretű) struktúrákat lehet készíteni.
- A mikromegmunkálás technikái eredetileg az IC-gyártáshoz lettek kifejlesztve a 60-as évektől kezdődően.

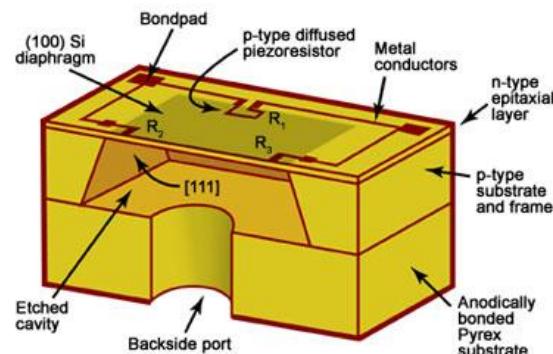




Két alapvető megmunkálási technika

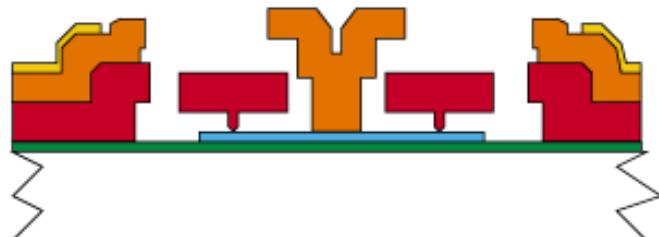
► BULK MICROMACHINING

- A szubsztrátot használja
- minden olyan folyamat, melynek során anyagot távolítunk el az alaplemez belsejéből



► SURFACE MICROMACHINING

- Az alaplemez felületére építjük fel a kívánt struktúrát leválasztott rétegekből.
- Maratás, lift-off, áldozati rétegek alkalmazása.





Aspect ratio – magasság/szélesség arány

Nagy aspect
ratio-jú alakzat

A 10-nél nagyobb
magasság/szélesség arányt már nagy
aspect ratio-nak szoktuk tekinteni.

Nagy aspect
ratio-jú lyuk

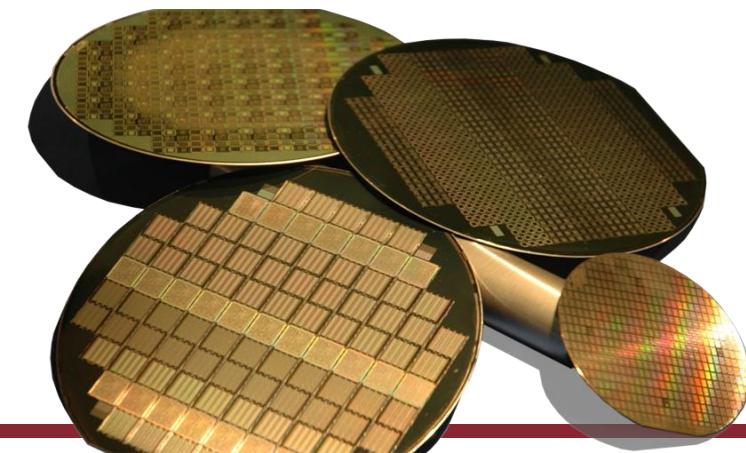
Szubsztrát





Budapesti Műszaki és
Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Tipikus építőelemek



<http://www.eet.bme.hu>



CMOS építőelemek és felhasználásuk MEMS-ekben

CMOS réteg/ struktúra	Felhasználása MEMS-ben
n-zseb/p-zseb	Szerkezeti réteg Hővezető / tömeg
Source / Drain implantáció	Ellenállás Piezoellenállás Termo-pár Elektróda
Gate oxid	Szerkezeti réteg Hőszigetelő Feláldozandó réteg
Gate poliszilícium (és esetleges második poli réteg)	Ellenállás Piezoellenállás Termo-pár Szerkezeti réteg Feláldozandó réteg





CMOS építőelemek és felhasználásuk MEMS-ekben

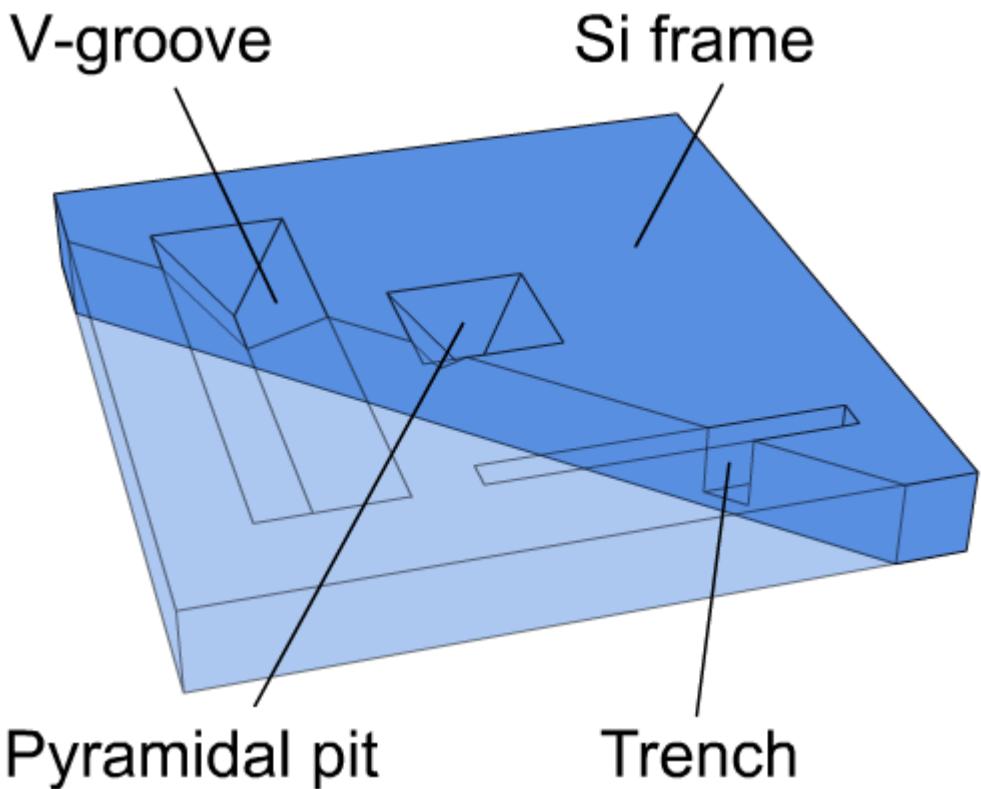
CMOS réteg/ struktúra	Felhasználása MEMS-ben
Intermetallikus oxidrétegek	Szerkezeti réteg Hőszigetelő Feláldozandó réteg
Fémezés	Vezető Tükör Hővezető Elektróda Szerkezeti réteg Feláldozandó réteg
Passziváló réteg	Szerkezeti réteg Hőszigetelő Mechanikai feszültséget kompenzáló réteg Infravörös abszorber

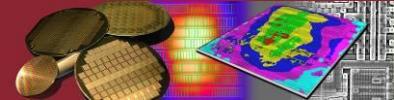




Árkok

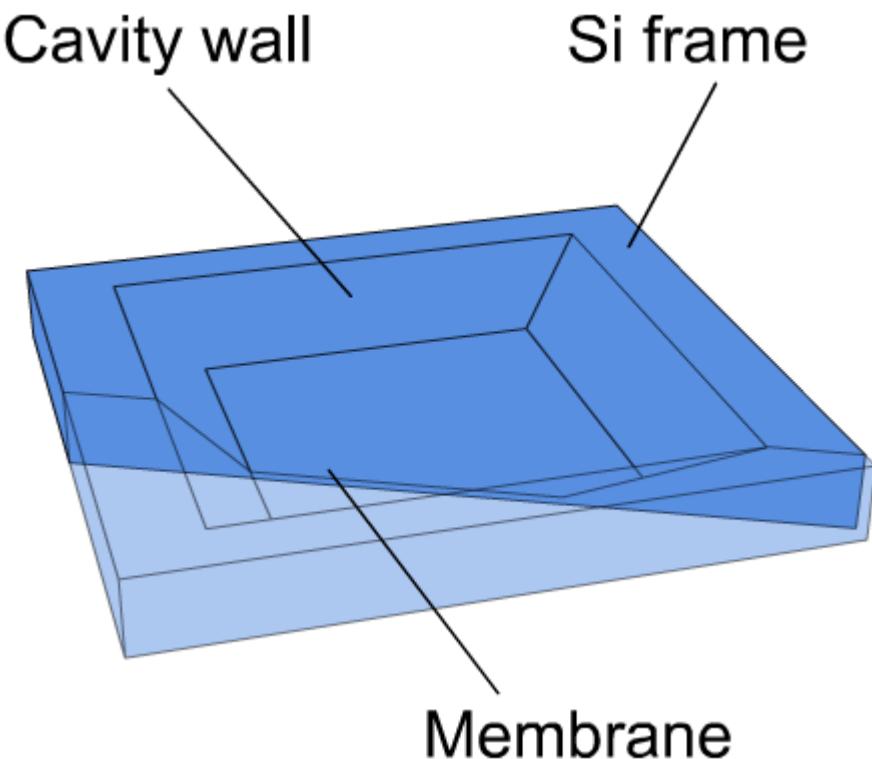
- ▶ Tömbi megmunkálás
- ▶ Anizotróp marás:
 - <100> szeleten KOH marás <111> síkokat méri, melyek fordított piramis alakzatot eredményeznek
 - <110> szeleten hasonló módon szűk függőleges falakkal rendelkező árok alakítható ki





Membrán

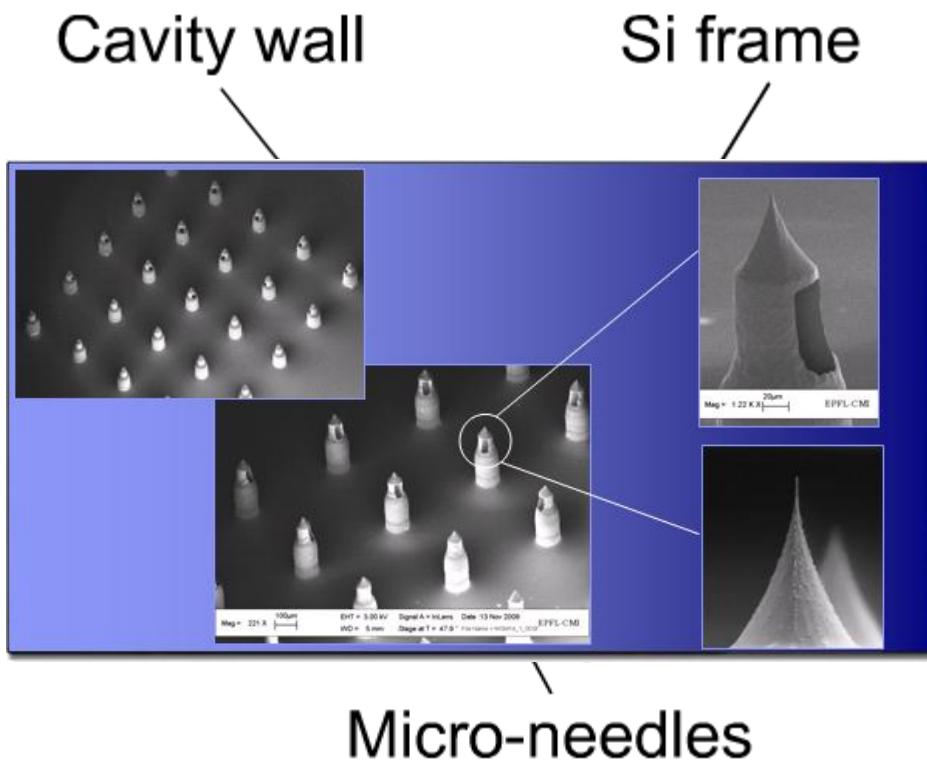
- ▶ Általában a hátoldali tömbi megmunkálás
- ▶ Csonkított piramis
- ▶ n típusú szeletben elhelyezett p „etch-stop” réteg, mellyel beállítjuk a membrán vastagságát





Tűhegyek

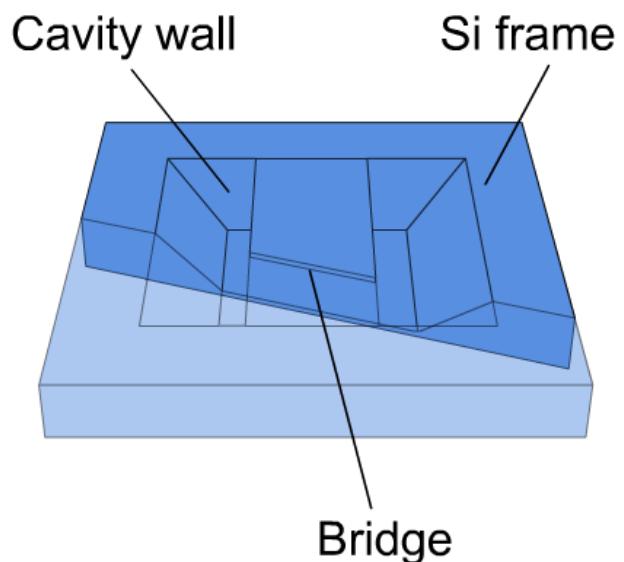
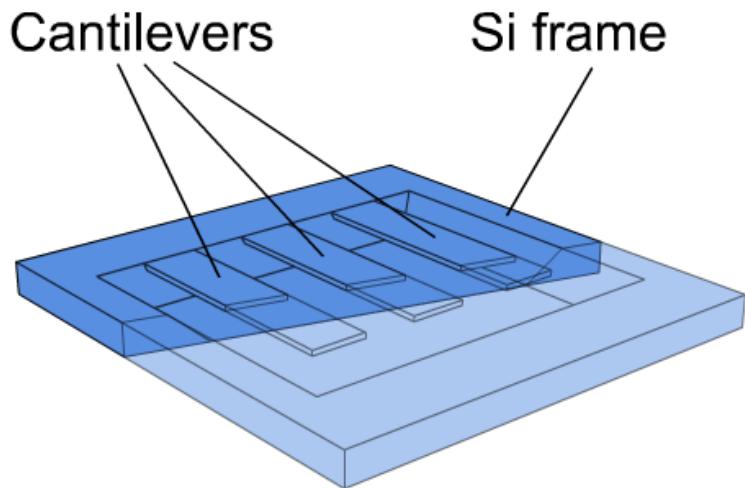
- ▶ Orvosi alkalmazások
- ▶ Intradermális hatóanyag bevitel
- ▶ Vérvétel





Híd és konzol

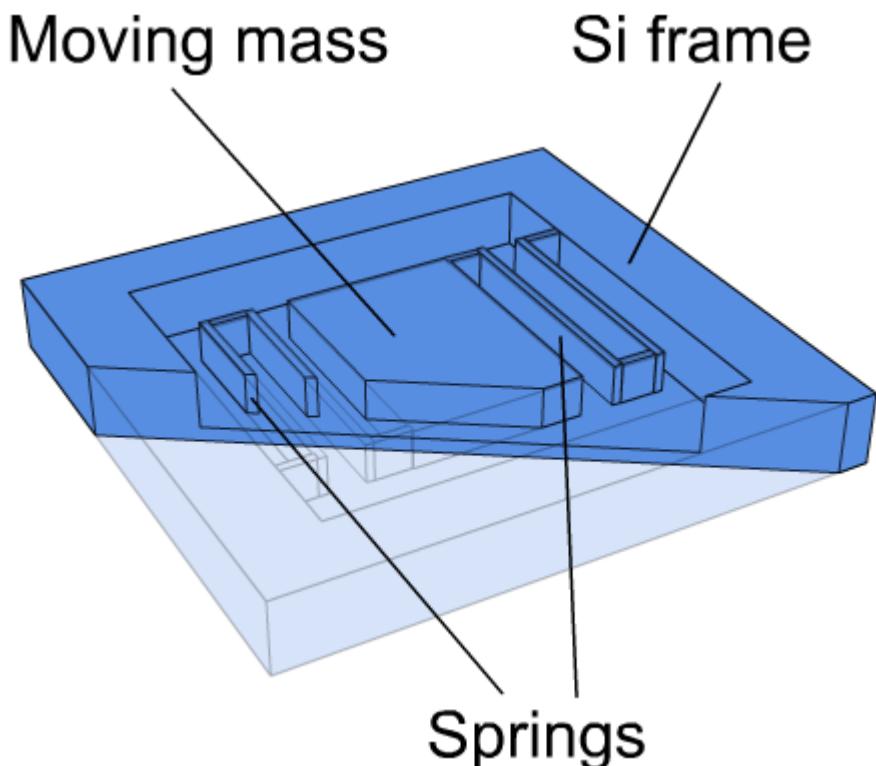
- ▶ Tömbi megmunkálás: maszkolás
- ▶ Felületi megmunkálás: feláldozandó réteg használata
- ▶ RF kapcsolók
- ▶ Termikusan elszigetelt szerkezetek: IR érzékelő, elektro-termikus konverter, elektro-termomechanikus mozgató





Mikrorugó

- ▶ Hasonló technológia, mint a konzoloknál és hidaknál, de bonyolultabb, nagyobb felbontású maszk kell
- ▶ Rugós szerkezetek alakjának optimalizálása:
 - Lineáris elmozdulás
 - Nagy út
 - 1 D-s vagy körpályán történő mozgás
 - Út/erő optimalizálás

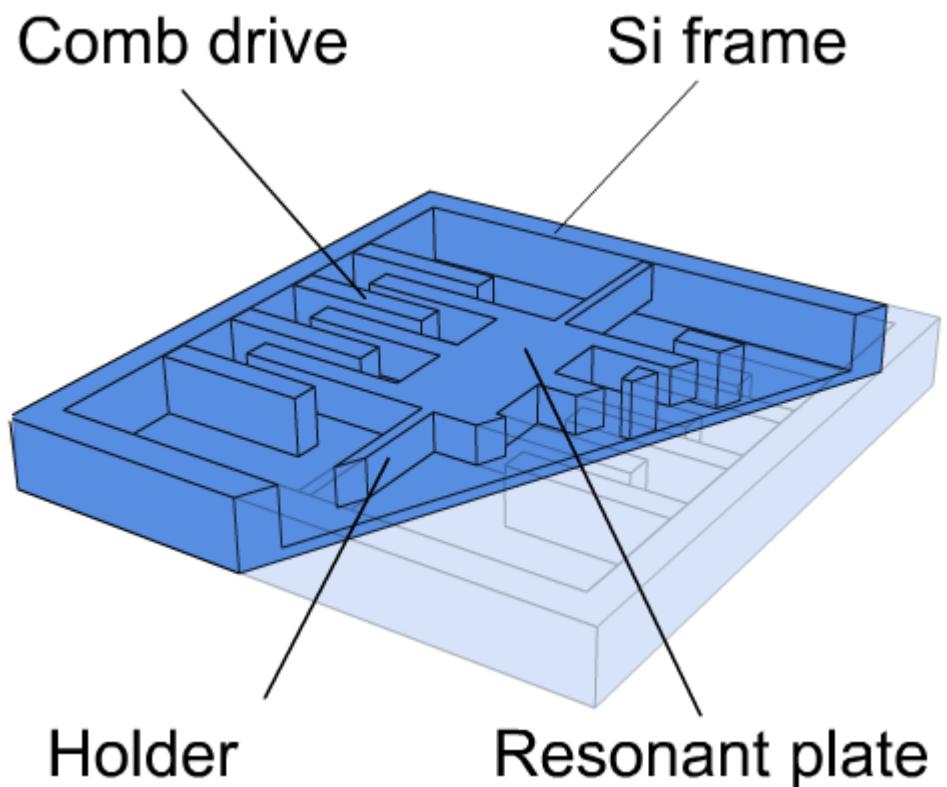




Interdigitális elrendezés – Fésűs meghajtó

► Elrendezés kialakításának szempontjai:

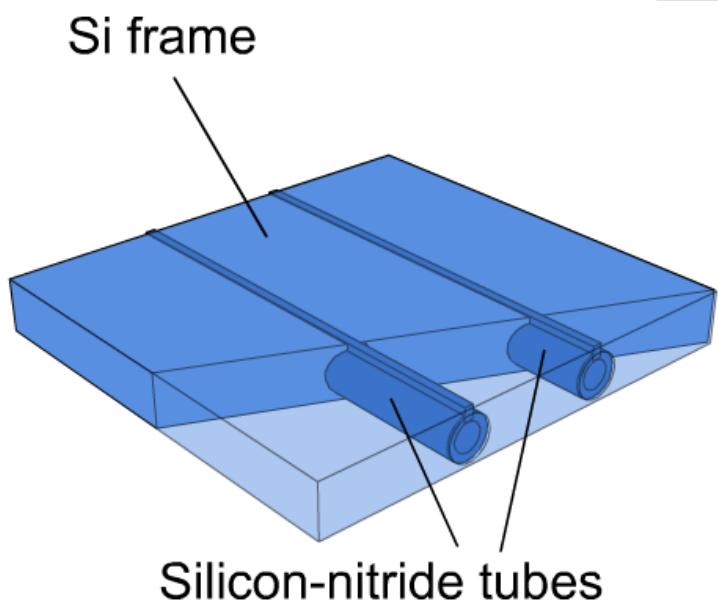
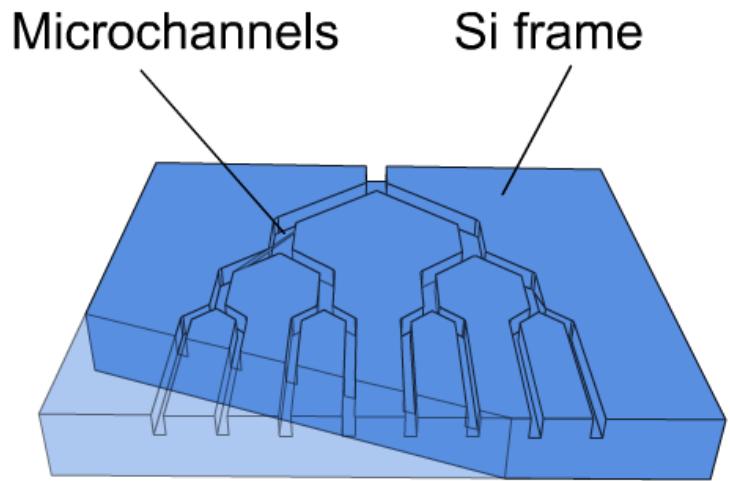
- A szembenálló fogak minél nagyobb kapacitásúak legyenek ->nagy felület
- Elmozdulás esetén minél nagyobb kapacitás változás jöjjön létre





Mikrocsatornák

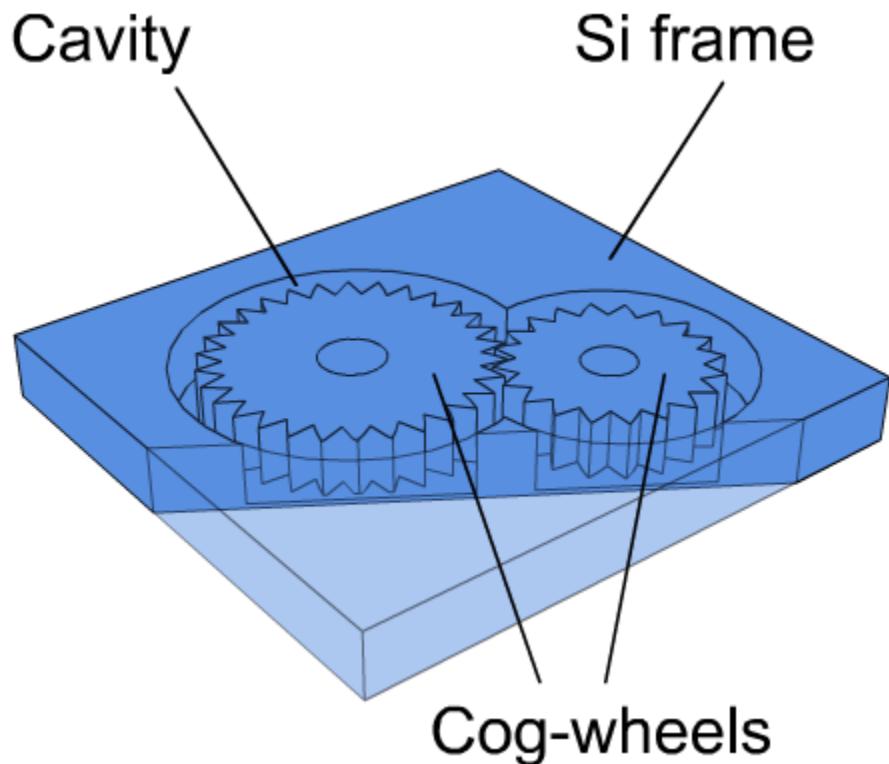
- ▶ Csatornák kialakítása:
DRIE technológiával
- ▶ SU8, mint lezáró réteget
- ▶ Szubsztrátban kialakított
eltemetett Si_3N_4
csatornák
- ▶ Mikrofluidika
- ▶ Lab-on-a-chip

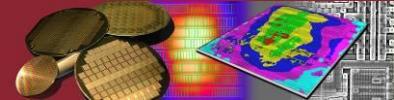




Fogaskerék, turbina

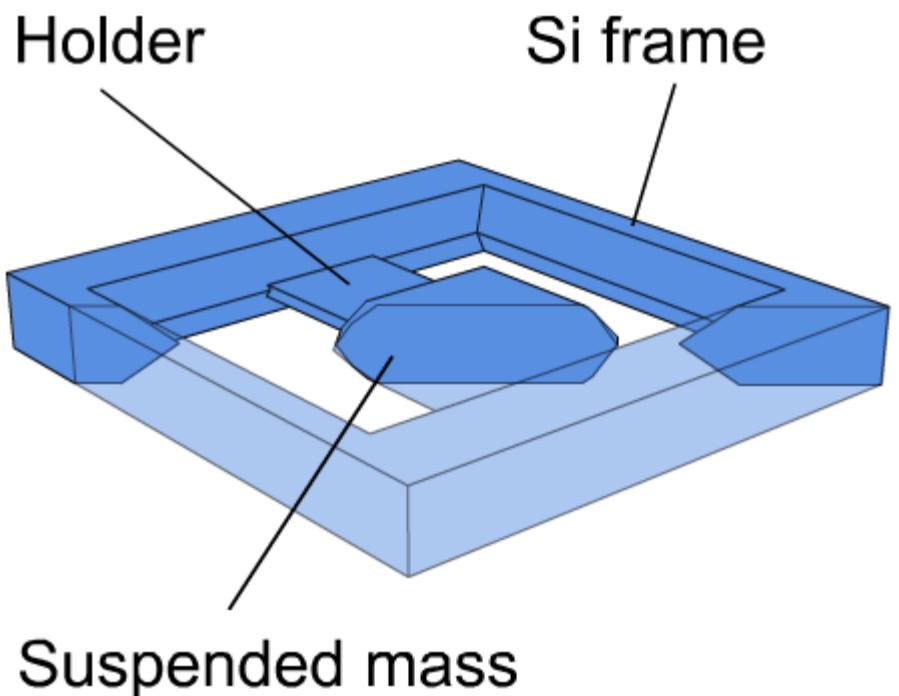
- ▶ Tömbi-, felületi és LIGA technológia
- ▶ Probléma a felfüggesztés és a kopás
- ▶ Folyadék áramoltatás
- ▶ Felfüggesztett elemek mozgatása
- ▶ Erőáttétel





Felfüggesztett tömeg

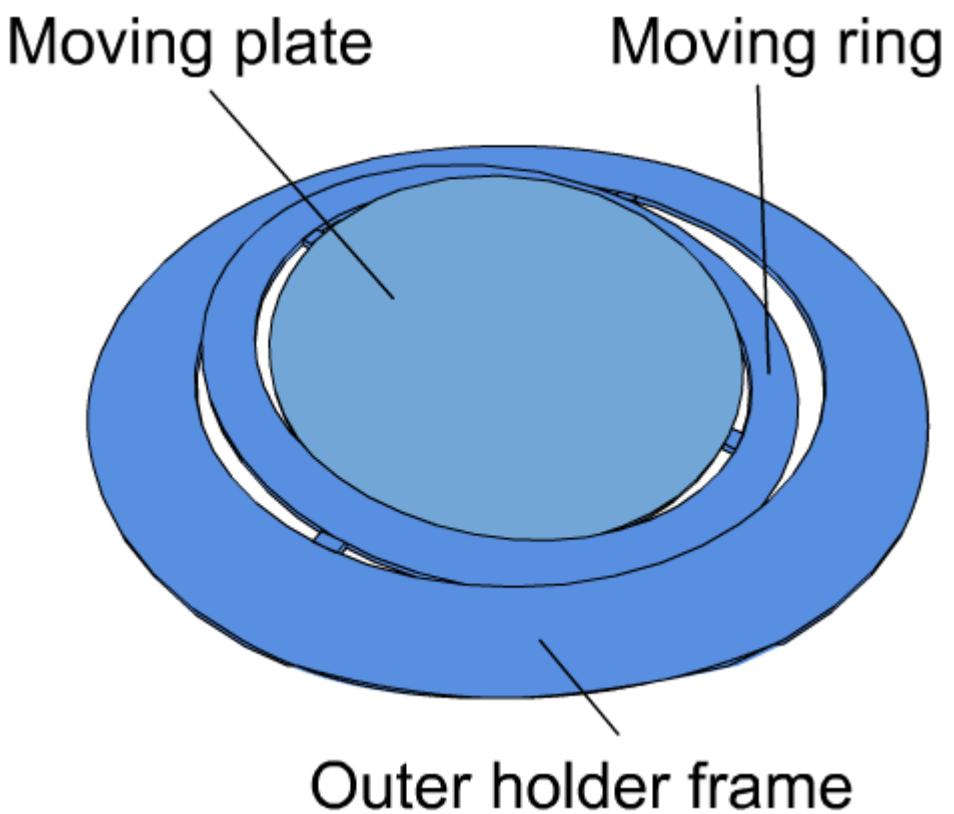
- ▶ Gyorsulás érzékelés
 - Nyúlásmerő bélyeg (piezorezisztív ellenállás)
 - Kapacitív fegyverzetek
- ▶ Mikrooptika megoldások

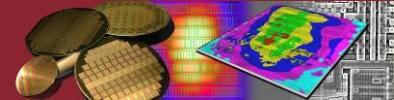




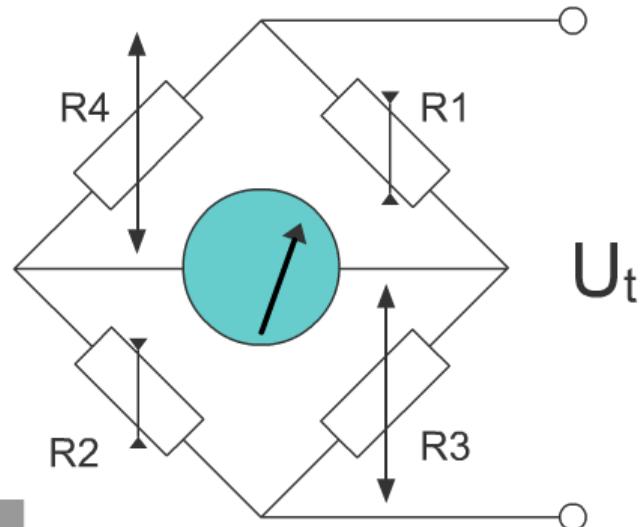
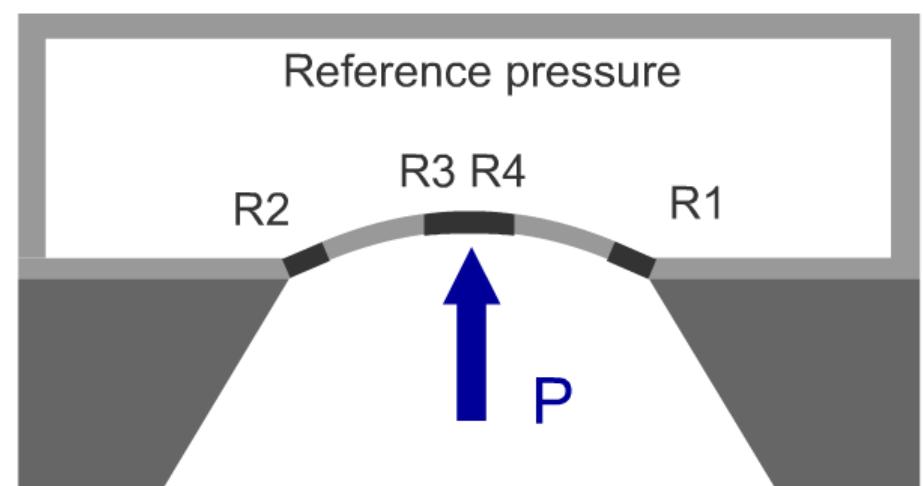
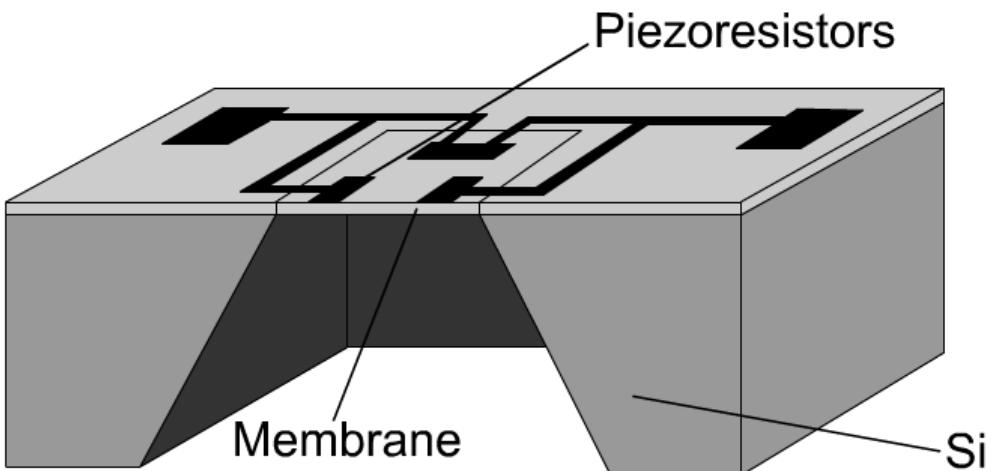
Titled-plate

- ▶ 2 D mozgatás
- ▶ Fénysugár irányítás:
 - DMD – Digital Micromirror Arrays
 - Scanning laser beam



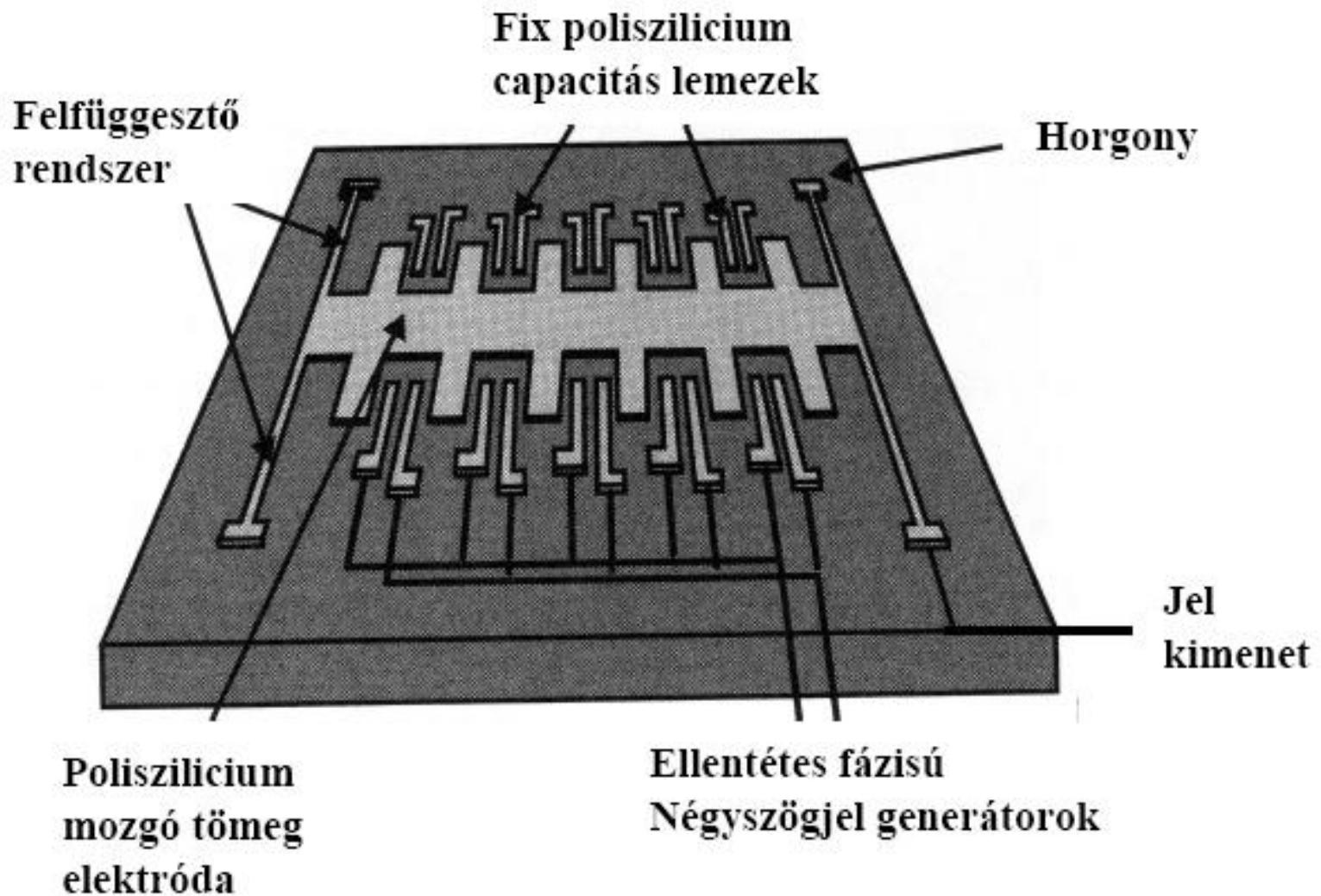


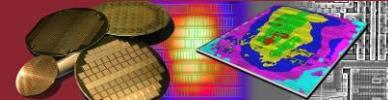
Nyomásmérő



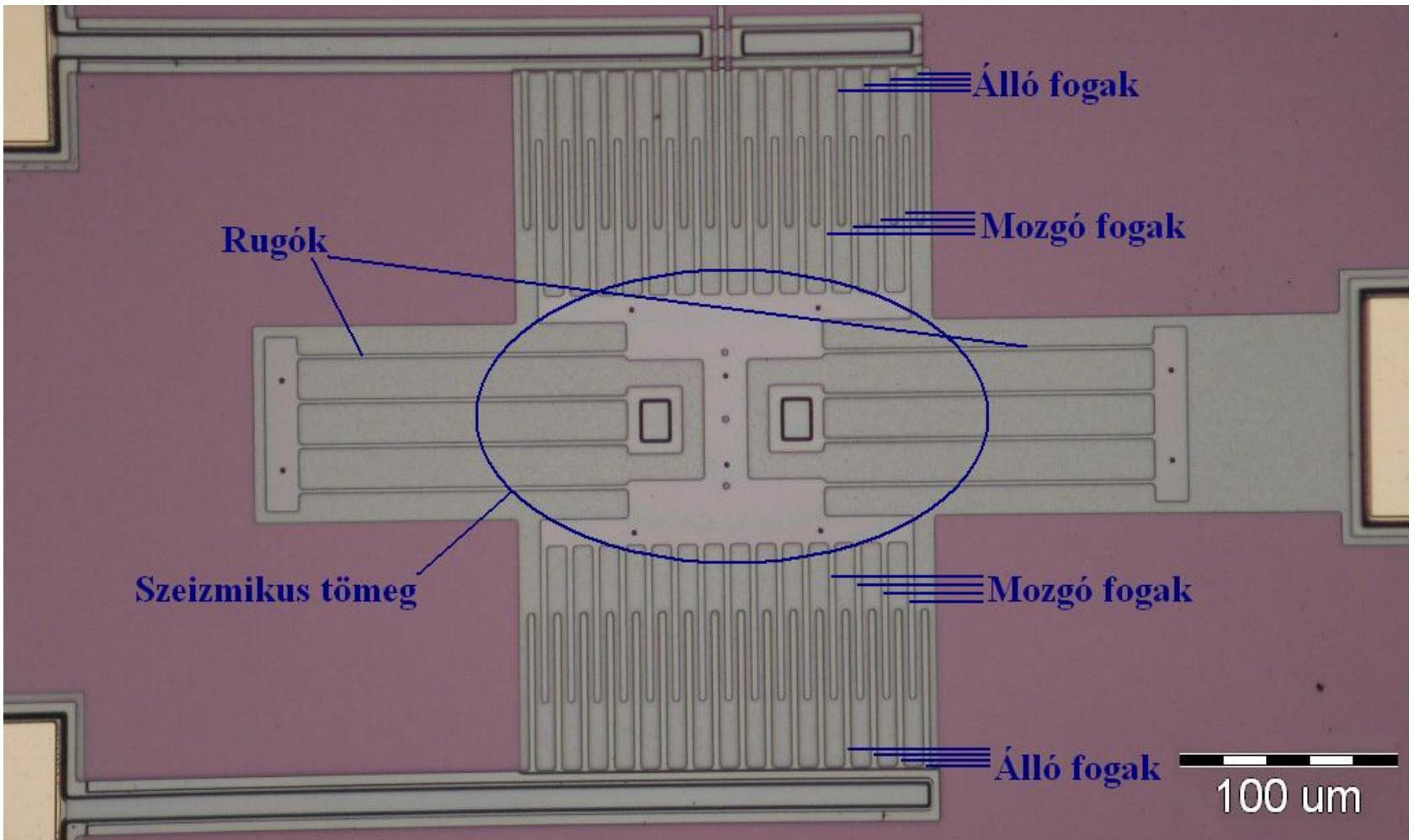


Gyorsulásérzékelő





Gyorsulásérzékelő

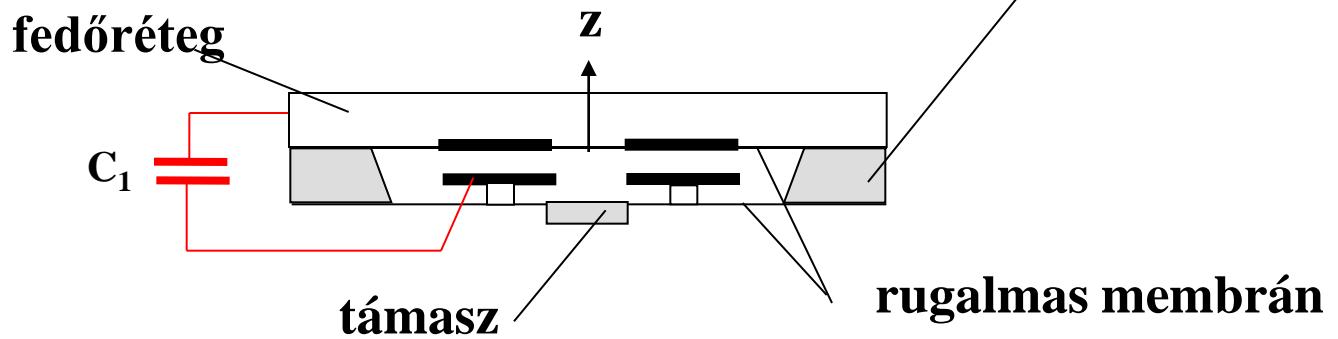
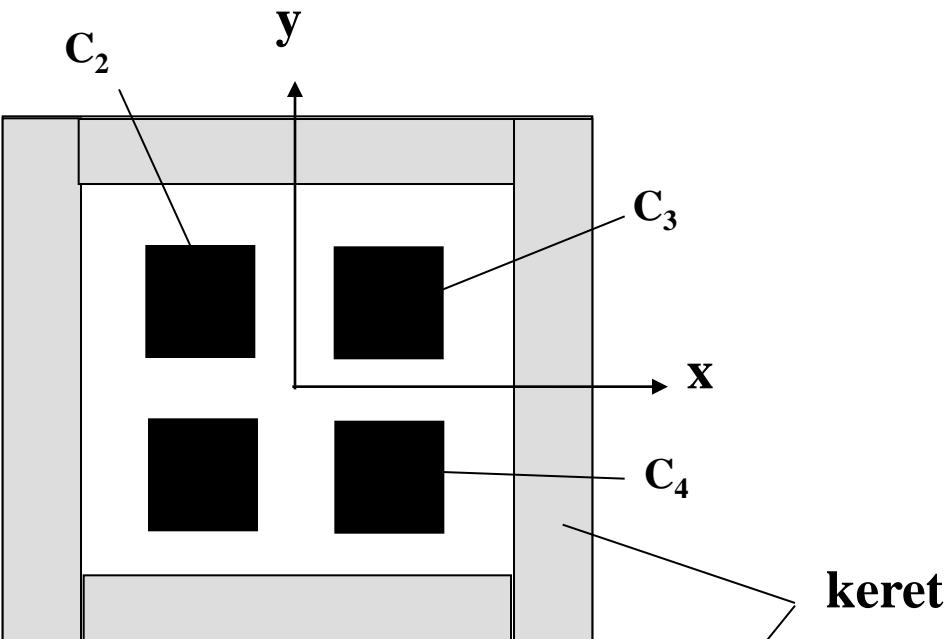




3D gyorsulásérzékelő

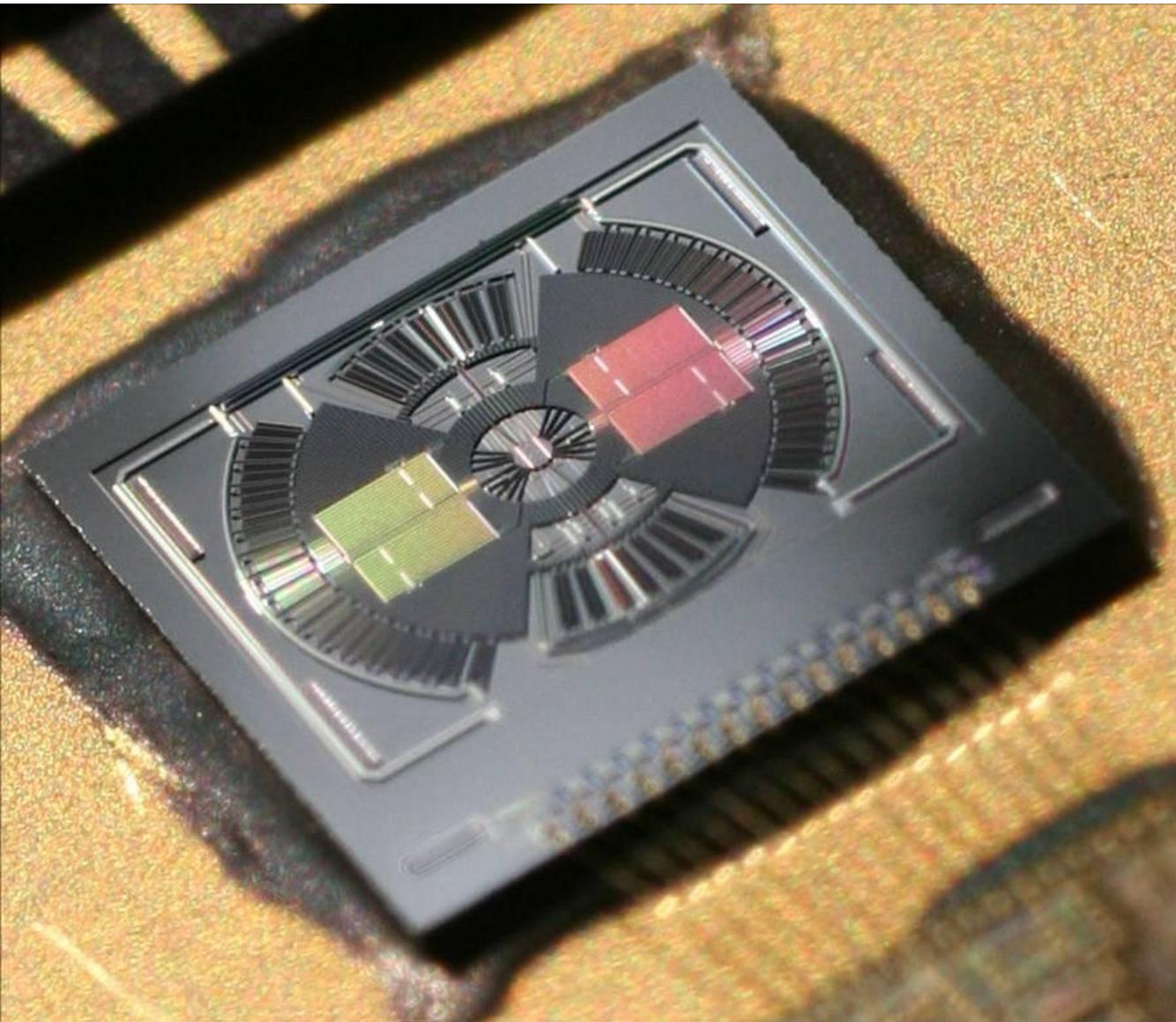
x-irányú lökés:
alsó membrán jobboldalt felfelé mozdul, C_3 és C_4 értéke nő

y-irány: C_2 és C_3 értéke nő
z-irány: $C_1 - C_4$ értéke nő



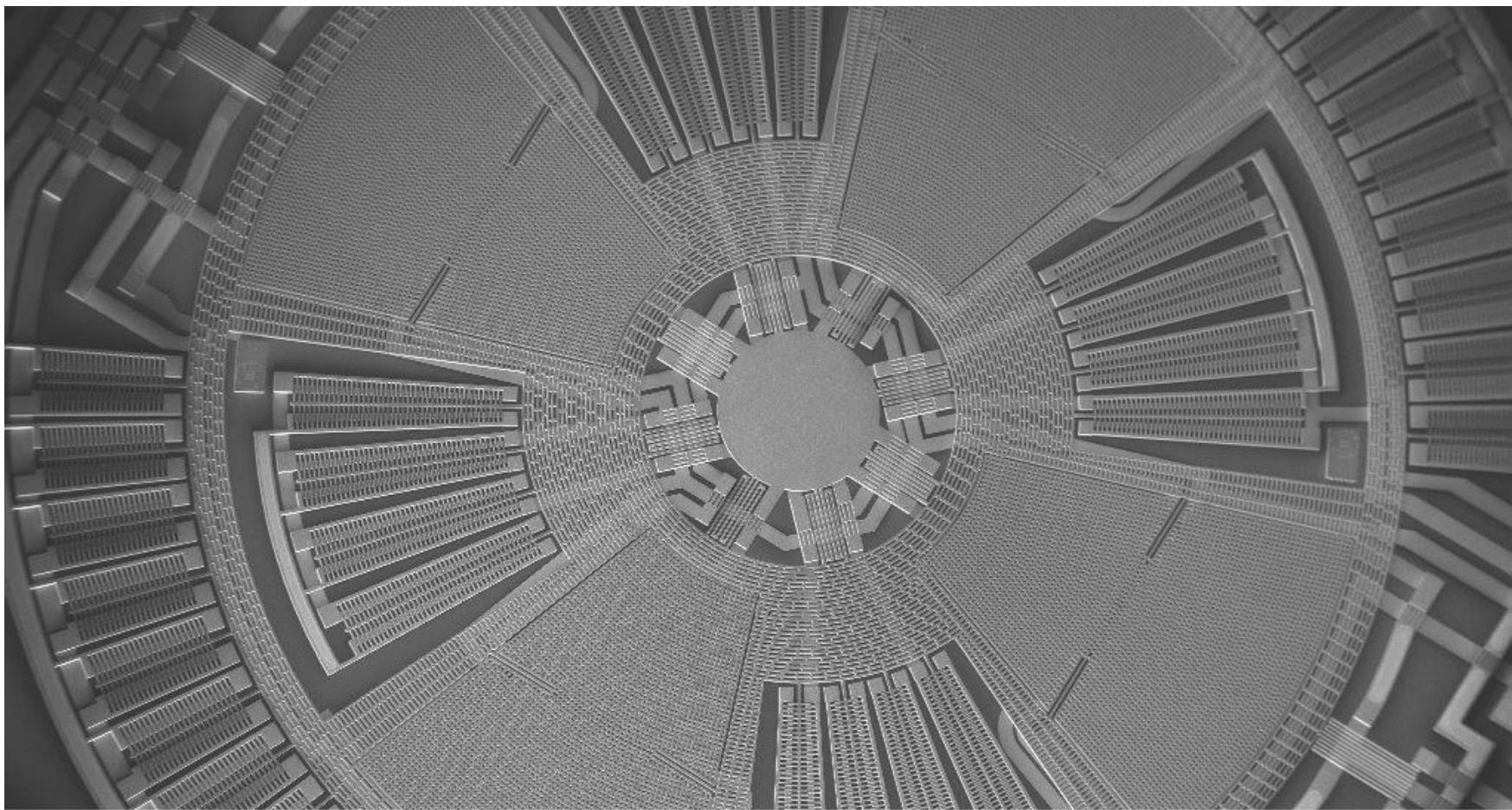


Giroszkóp





Giroszkóp



- FTM R&D MEMS Group

Mag = 149 X 200 μ m*
SUPRA 60-24-50

WD = 5 mm

EHT = 4.00 kV
Noise Reduction = Pixel Avg.

Signal A = InLens

Tilt Angle = 0.0 °

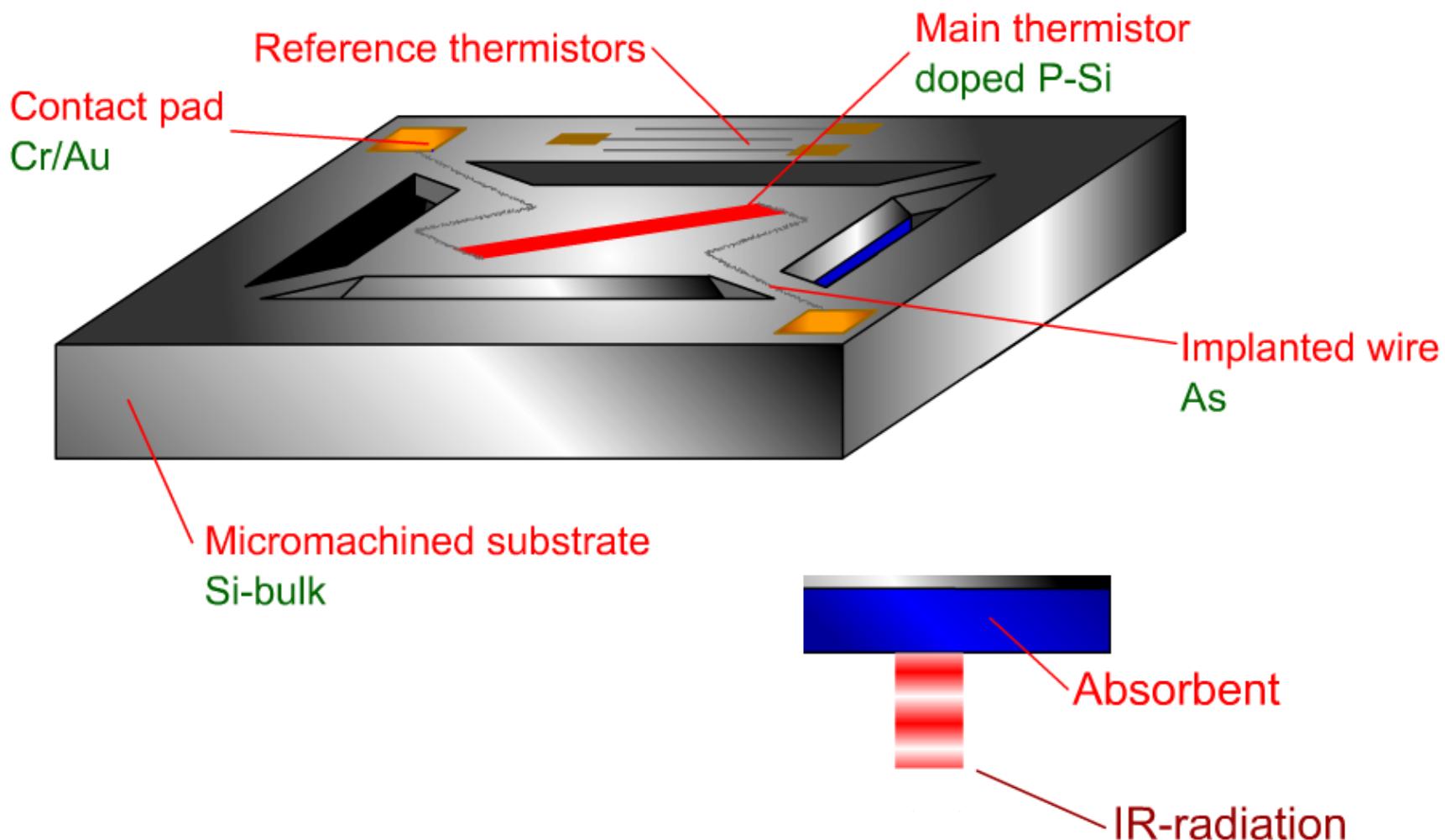
Date : 30 Aug 2007 Time : 18:30:56

System Vacuum = 7.80e-007 Torr



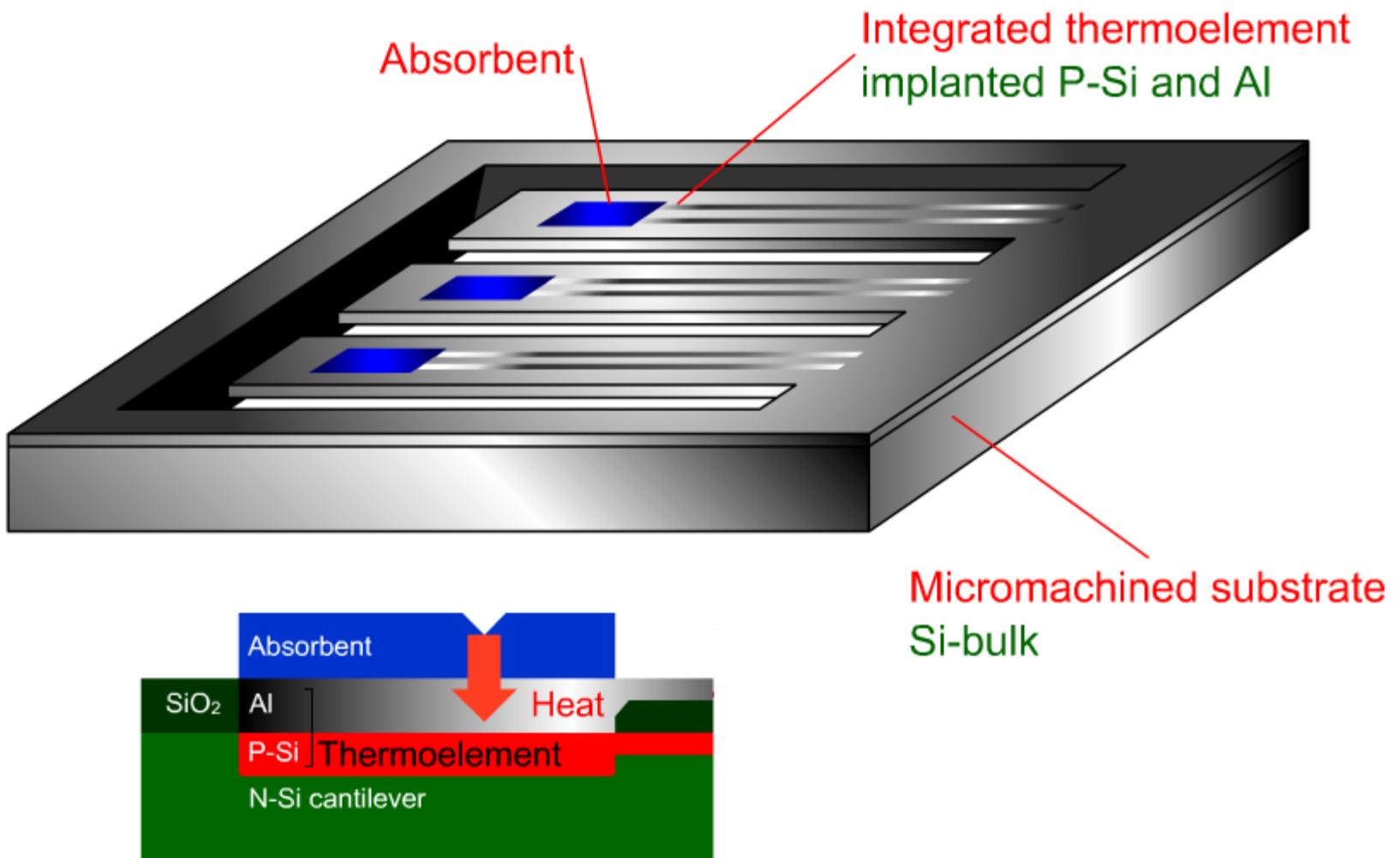


Infravörös sugárzás érzékelés



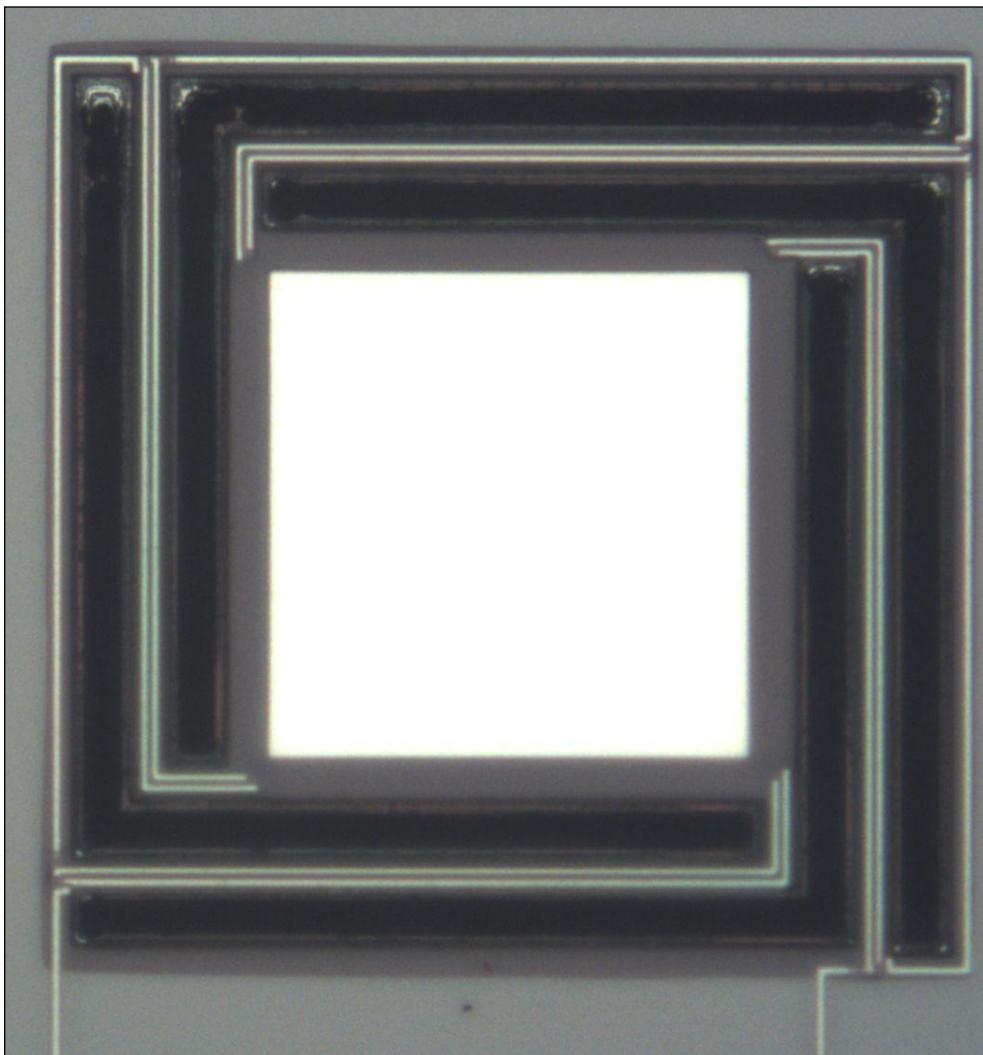


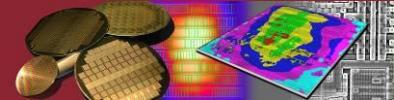
Infravörös sugárzás érzékelés



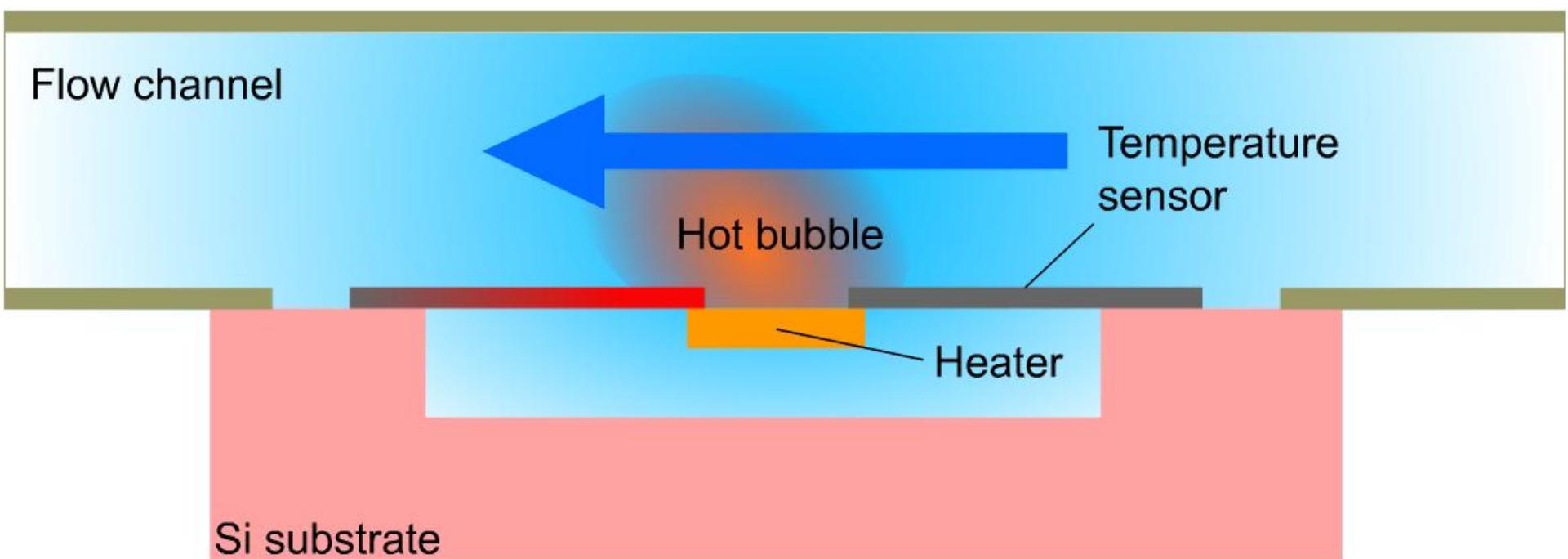


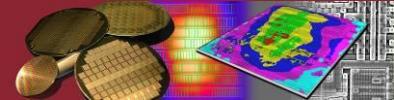
Infravörös sugárzás érzékelés



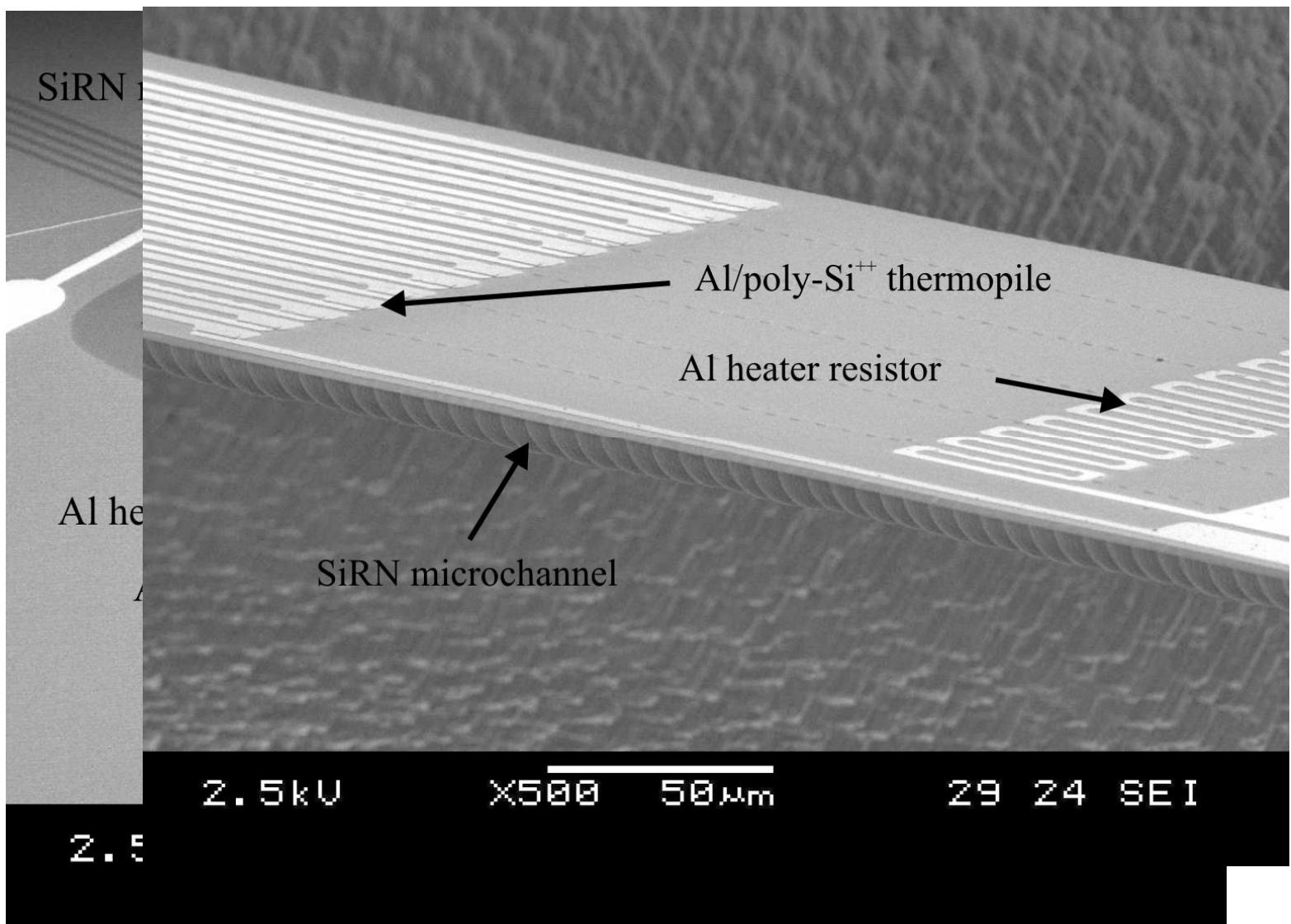


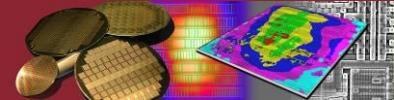
Áramlásmérő





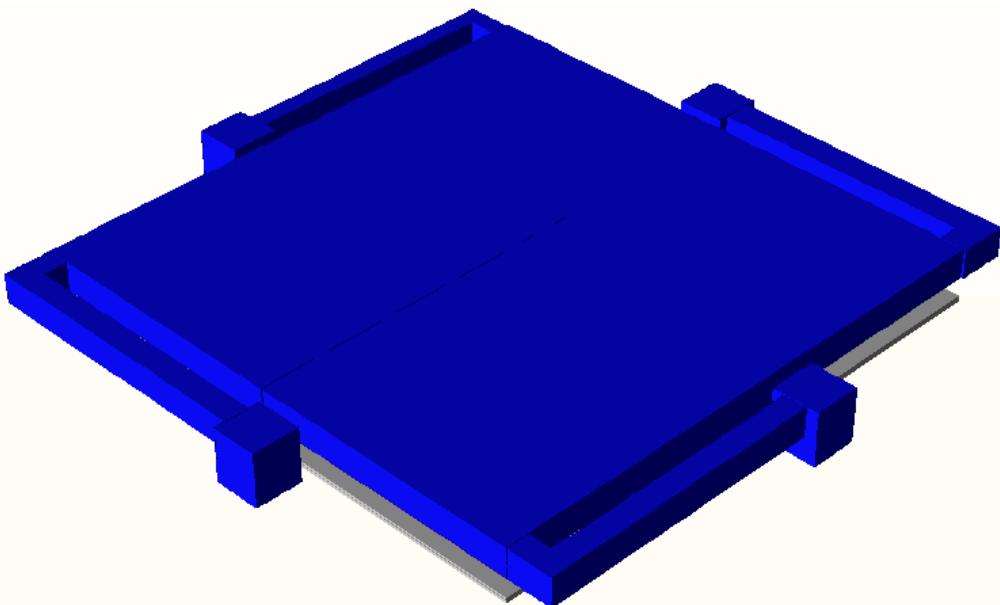
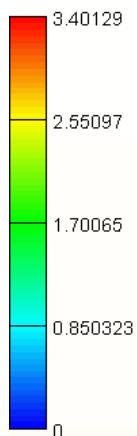
Áramlásmérő





RF kapcsoló

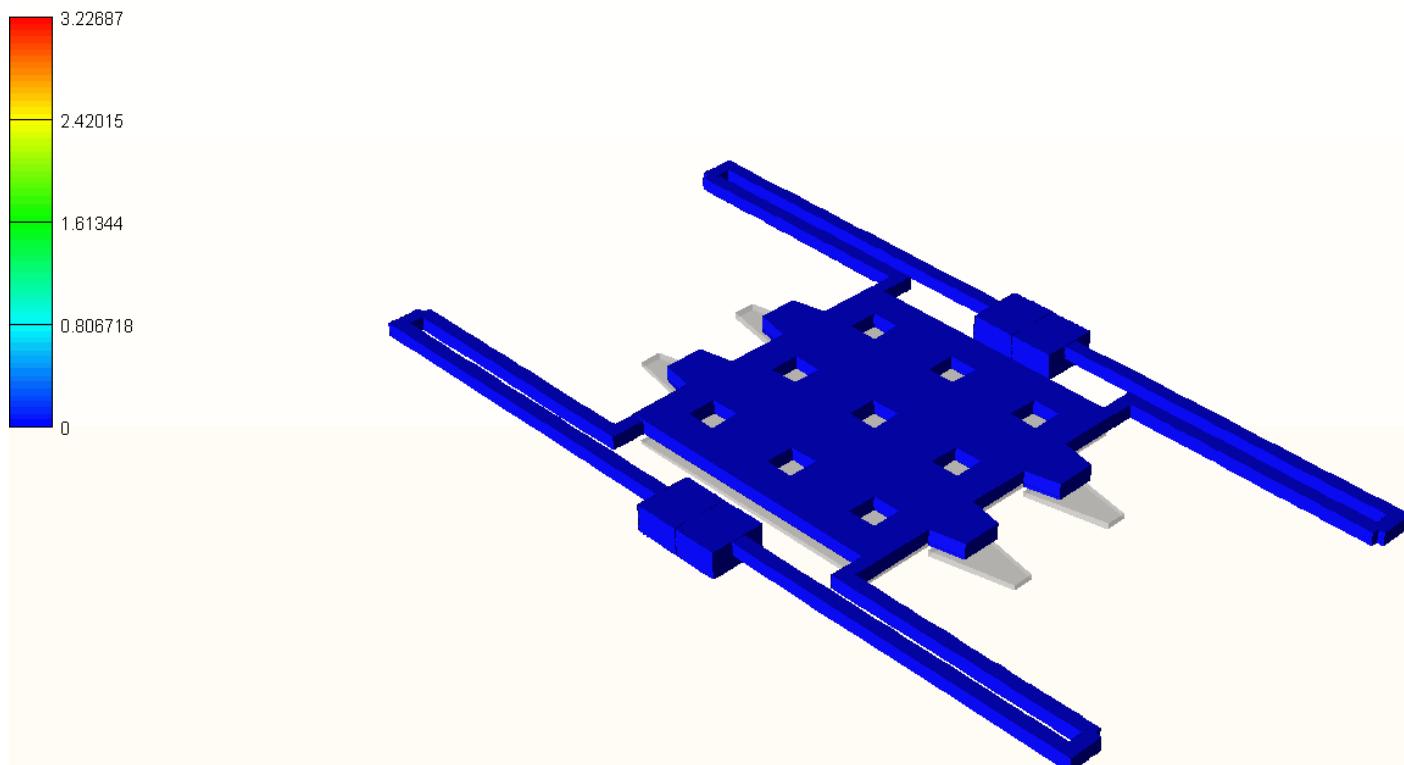
Displacement Mag. (um)





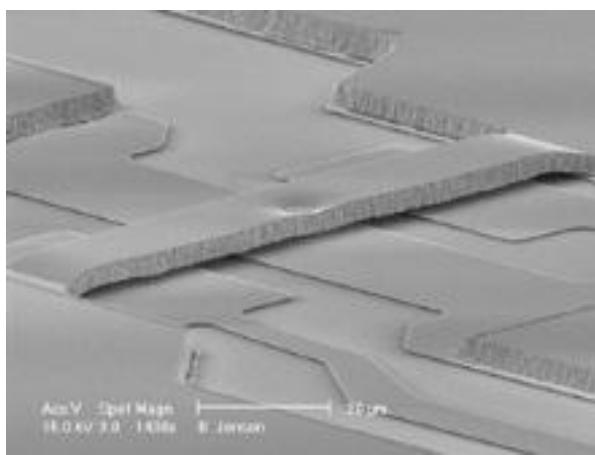
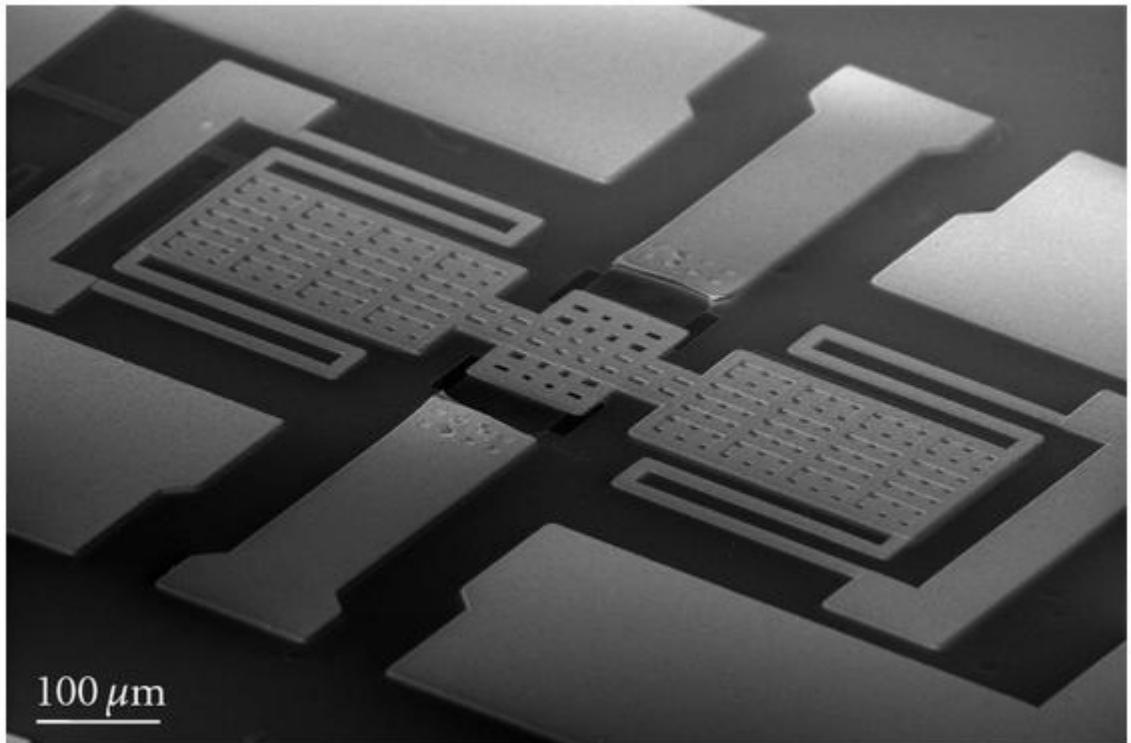
RF kapcsoló

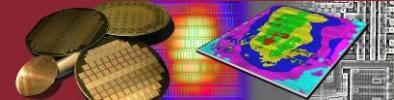
Displacement Mag. (um)





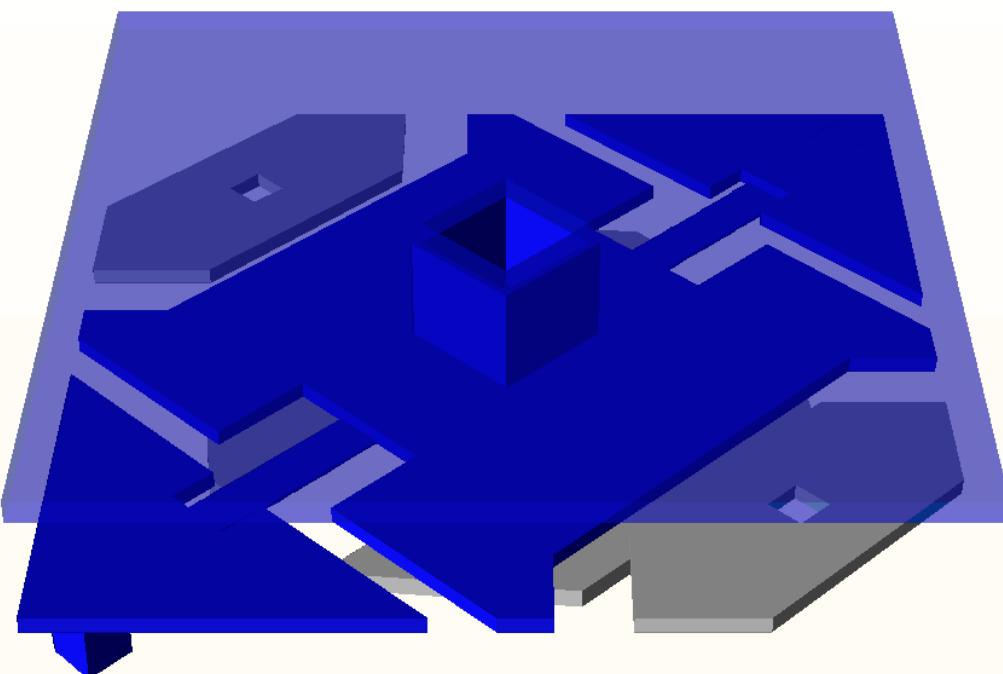
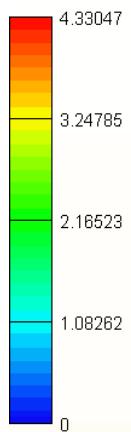
RF kapcsoló





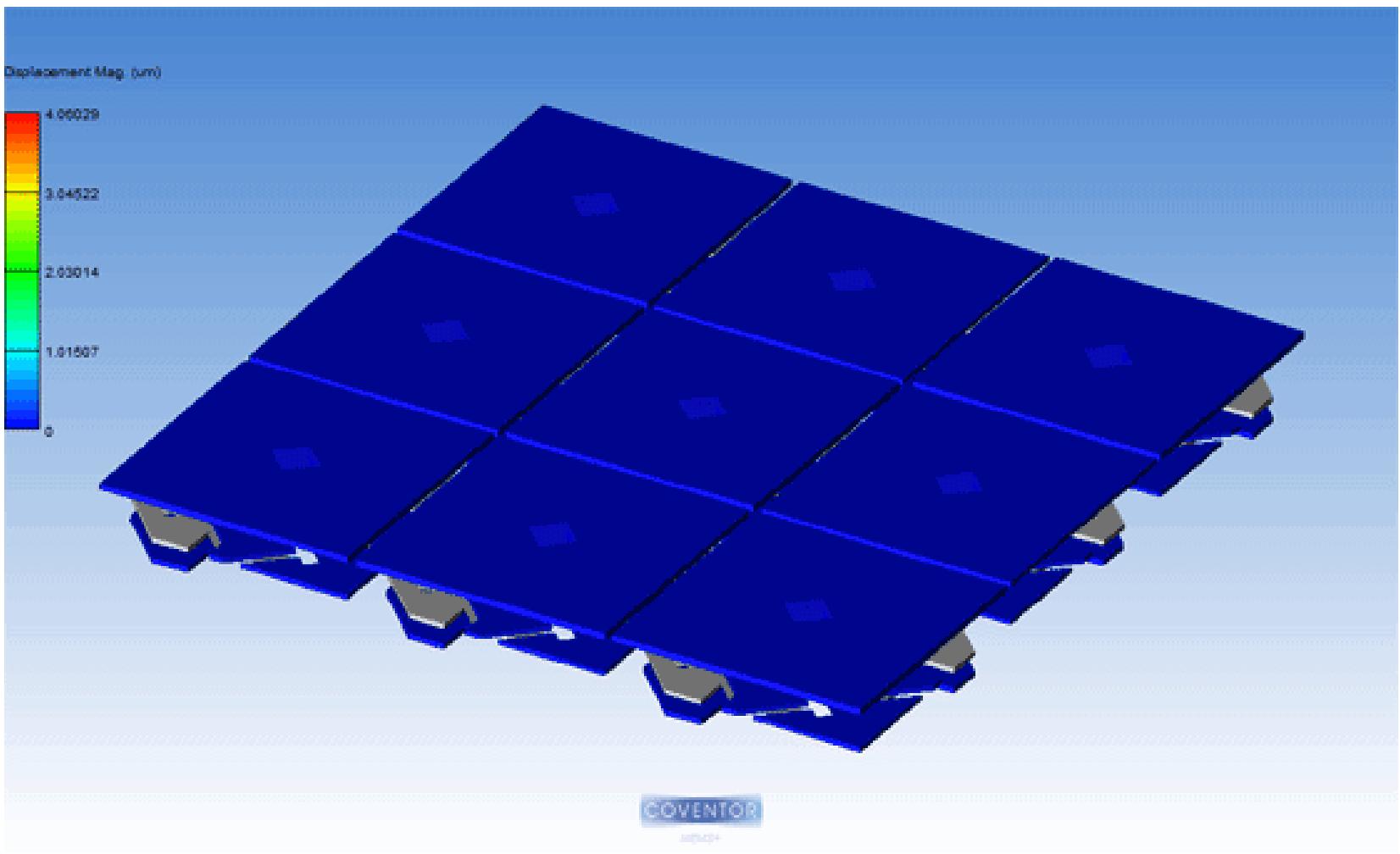
Optikai kapcsolók, tükrők

Displacement Mag. (um)



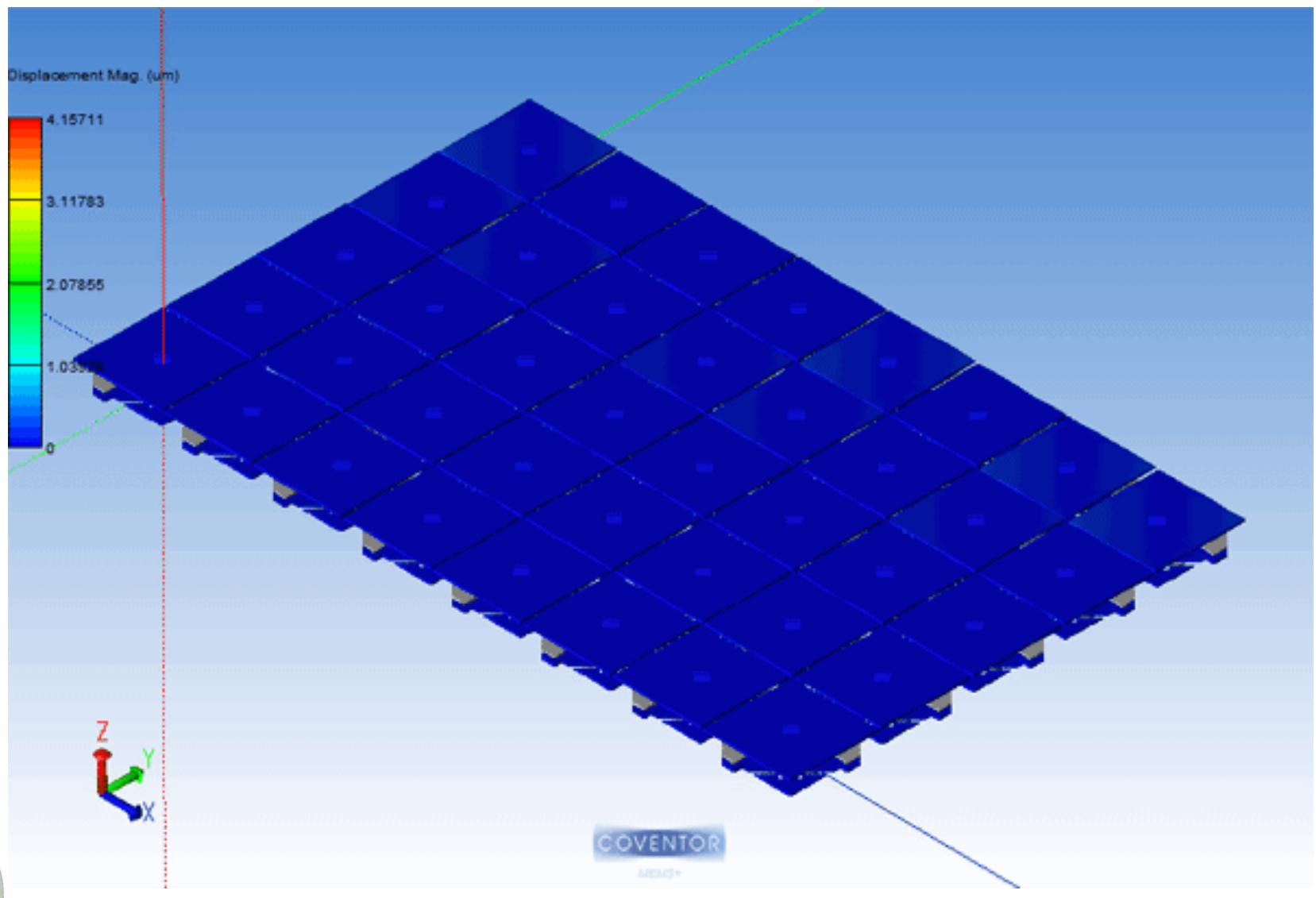


Optikai kapcsolók, tükrők



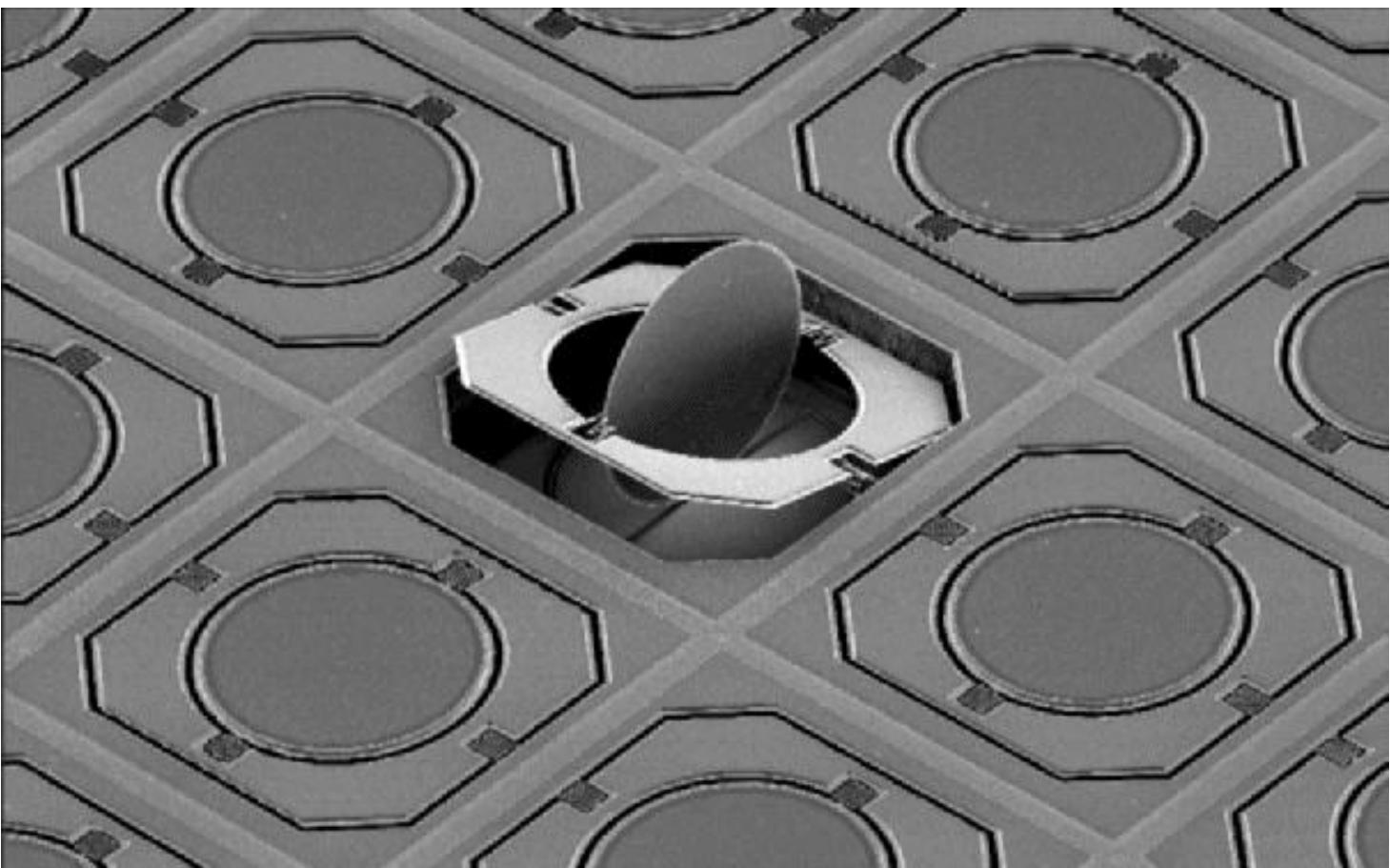


Optikai kapcsolók, tükrők



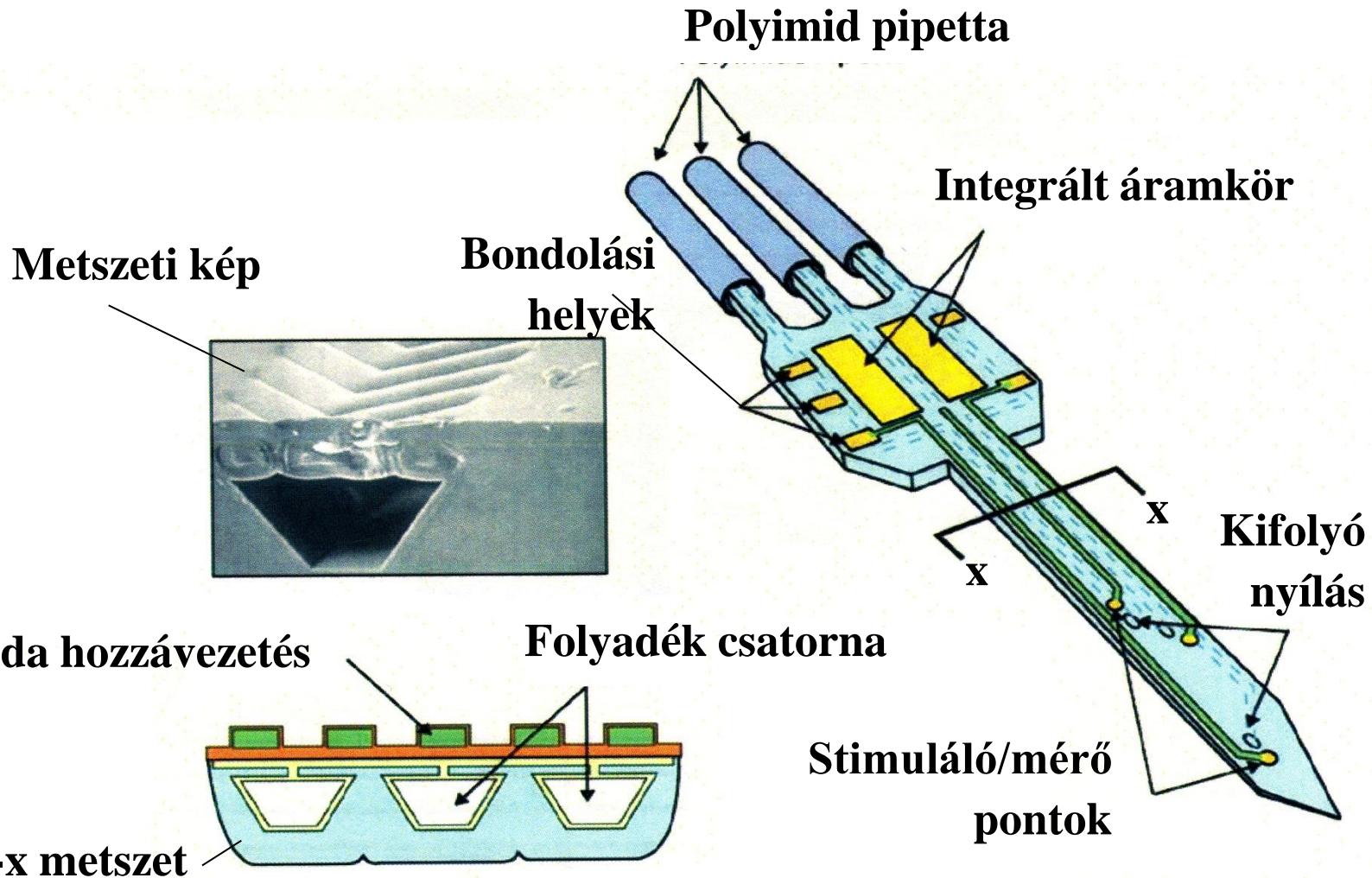


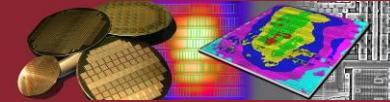
Optikai kapcsolók, tükrők



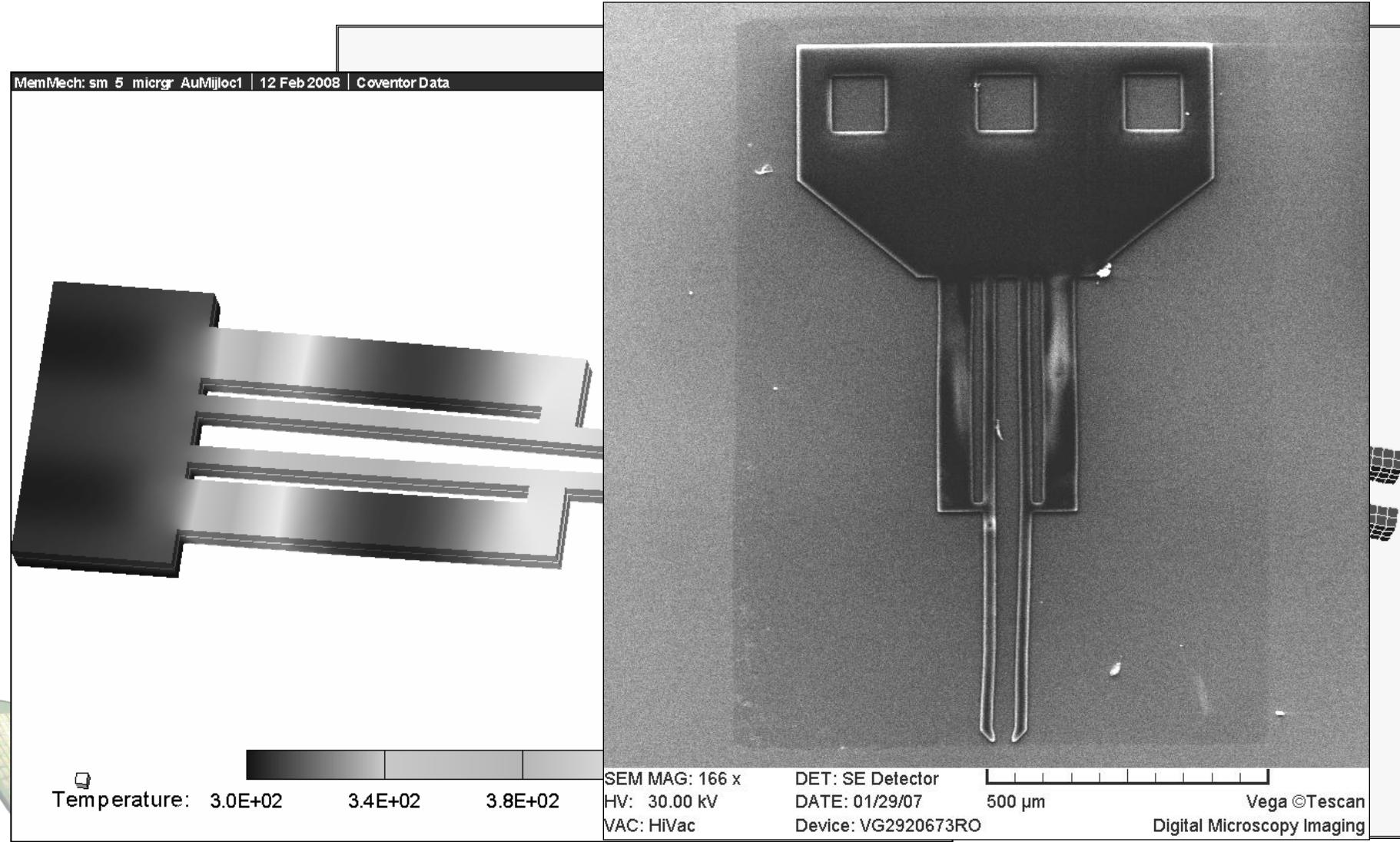


Mikrocsatornával rendelkező, gyógyszer-adagolásra is alkalmas mérőtű



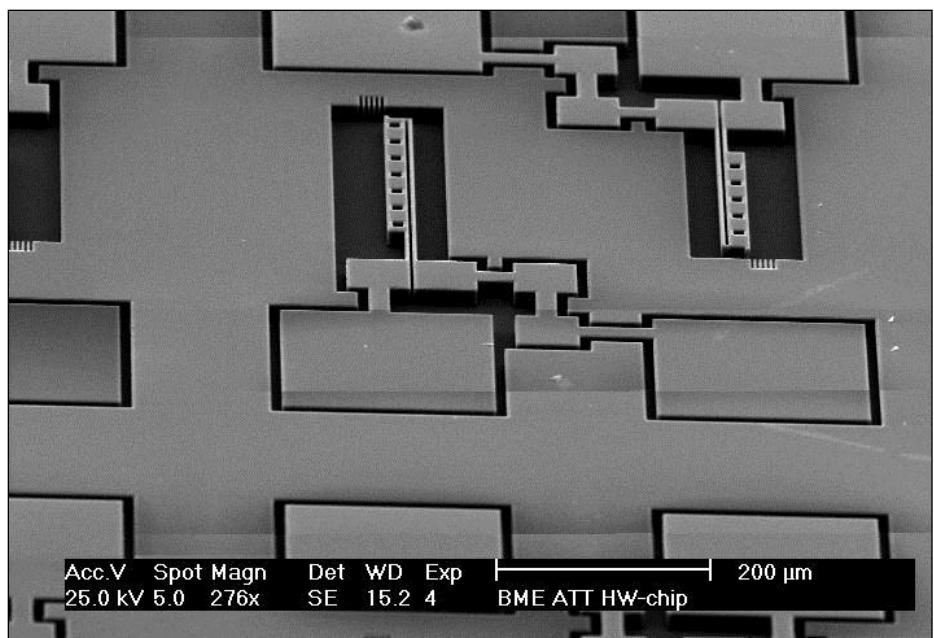
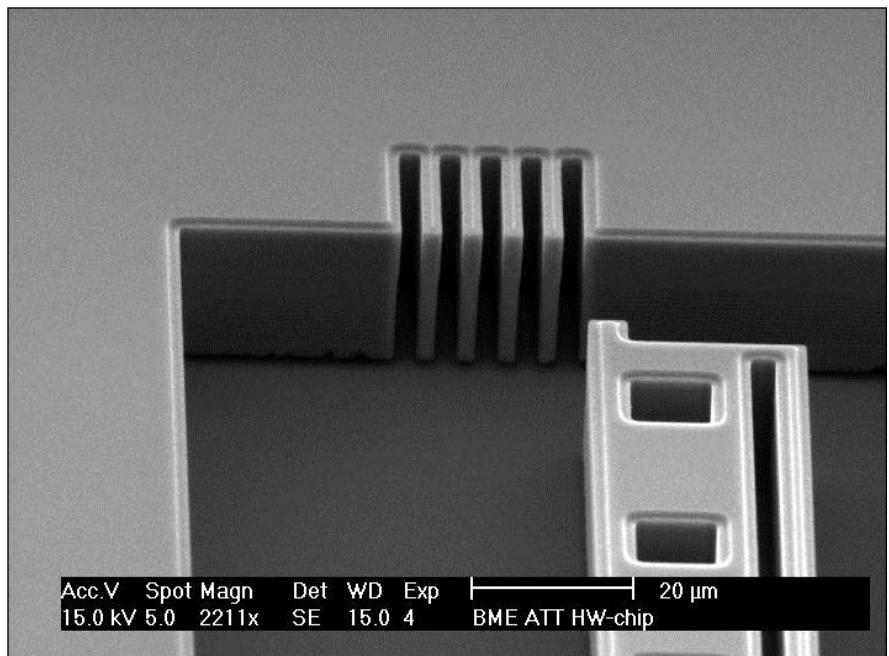


Elektromechanikus csipesz





Elektrotermikus tesztstruktúrák





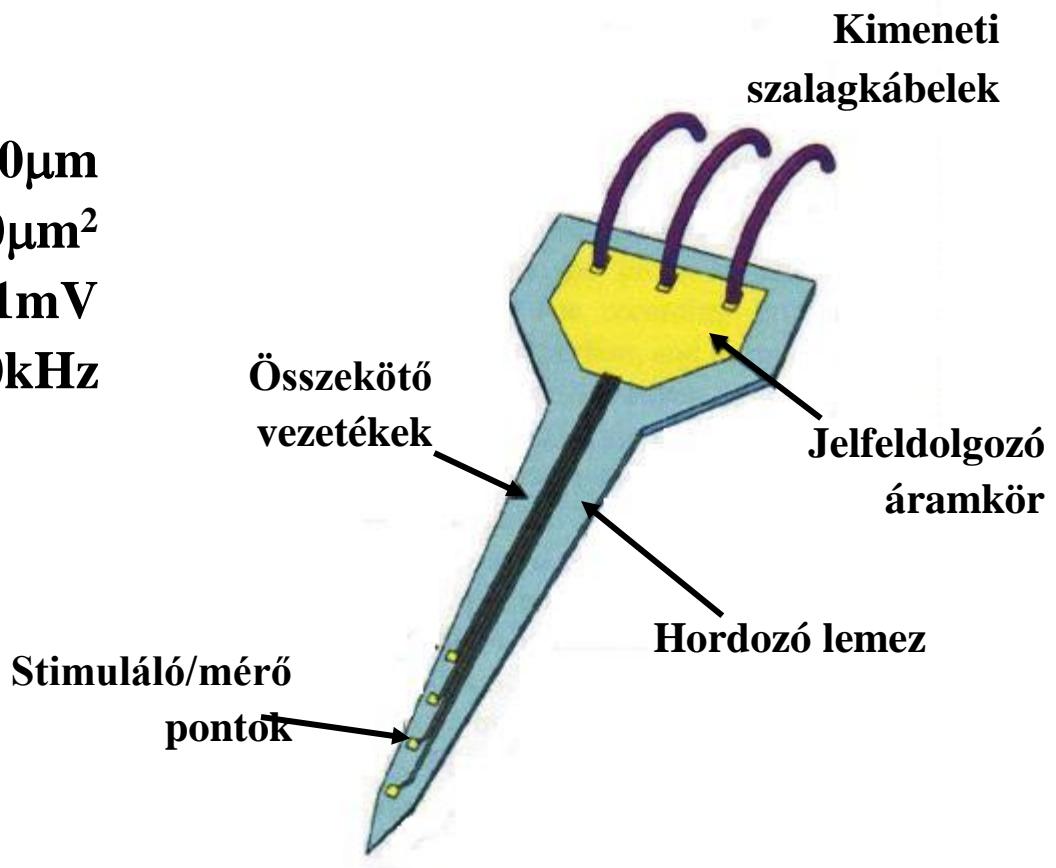
Szilícium MEMS mérőtű

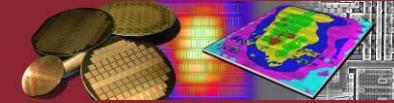
Átmérő: $25\text{-}50\mu\text{m}$

Mérhető terület: $100\mu\text{m}^2$

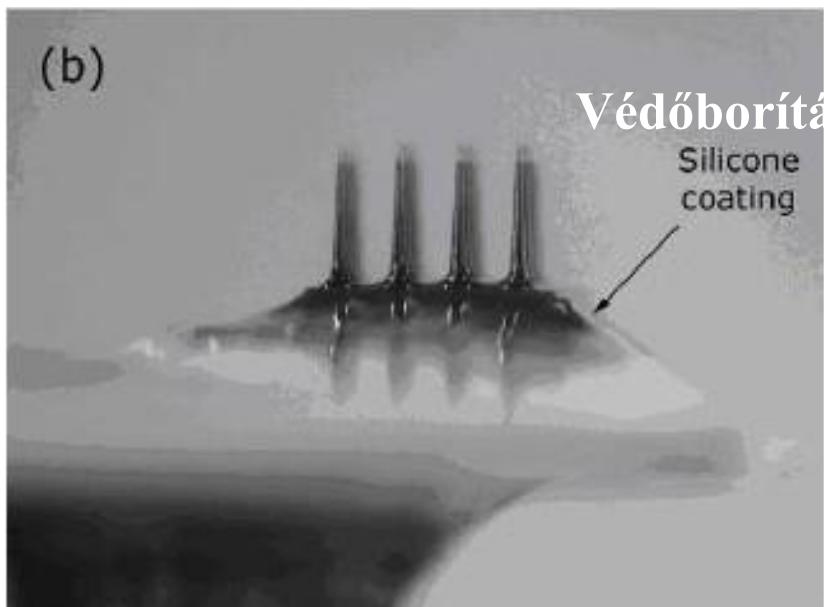
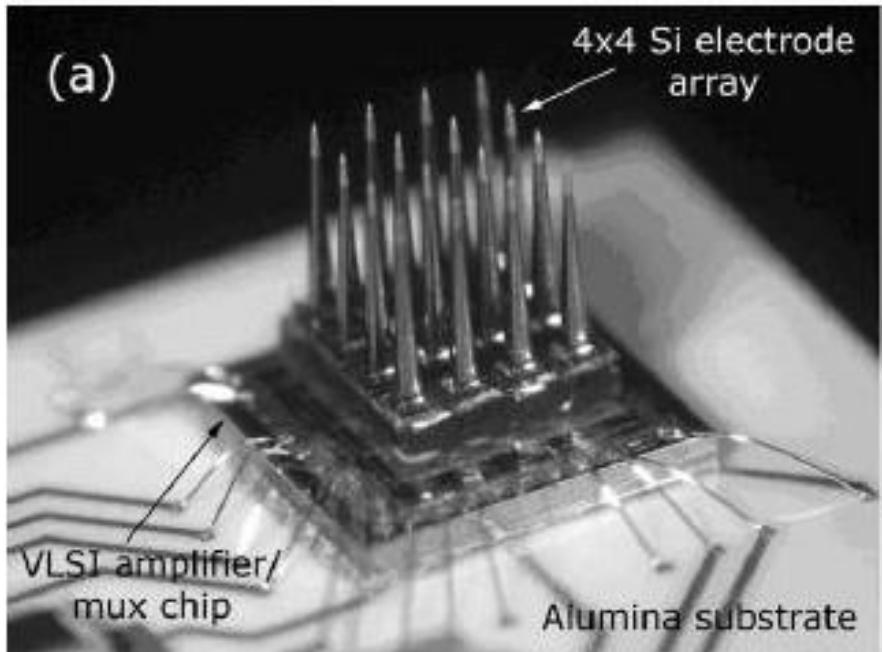
Méréshatár: $20\mu\text{V}\text{-}1\text{mV}$

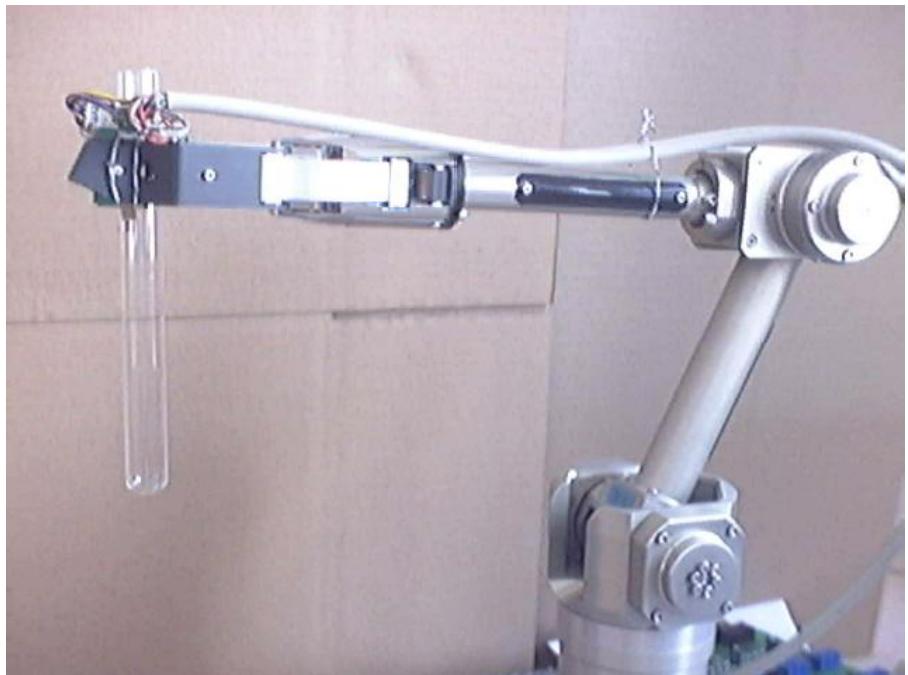
Sávszélesség: 10kHz





Közvetlenül a feldolgozó-chipre felültetett mérőtűkkel működő rendszer

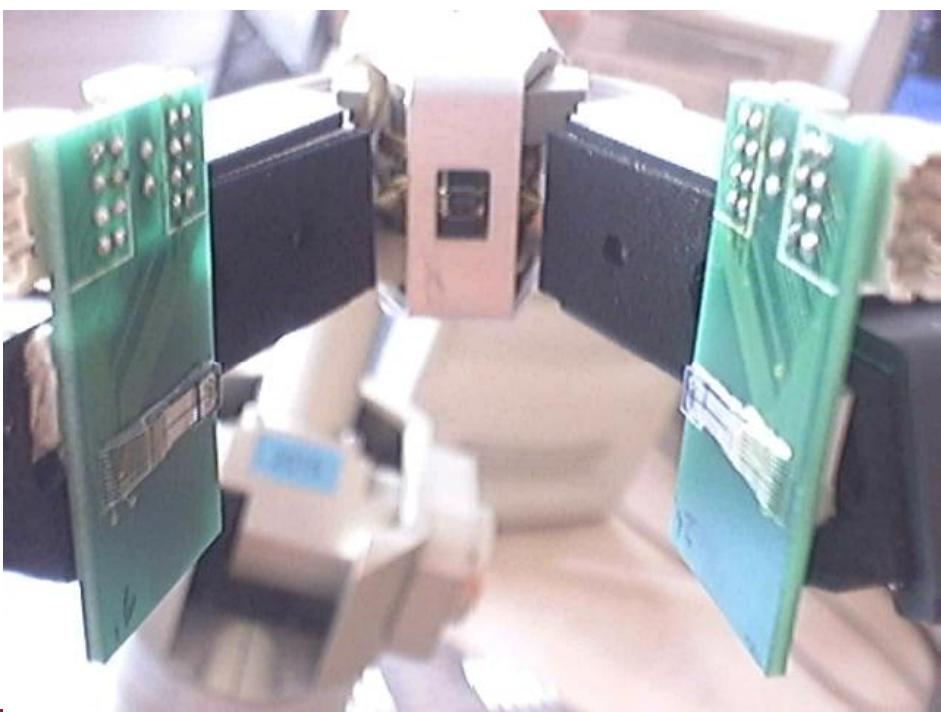


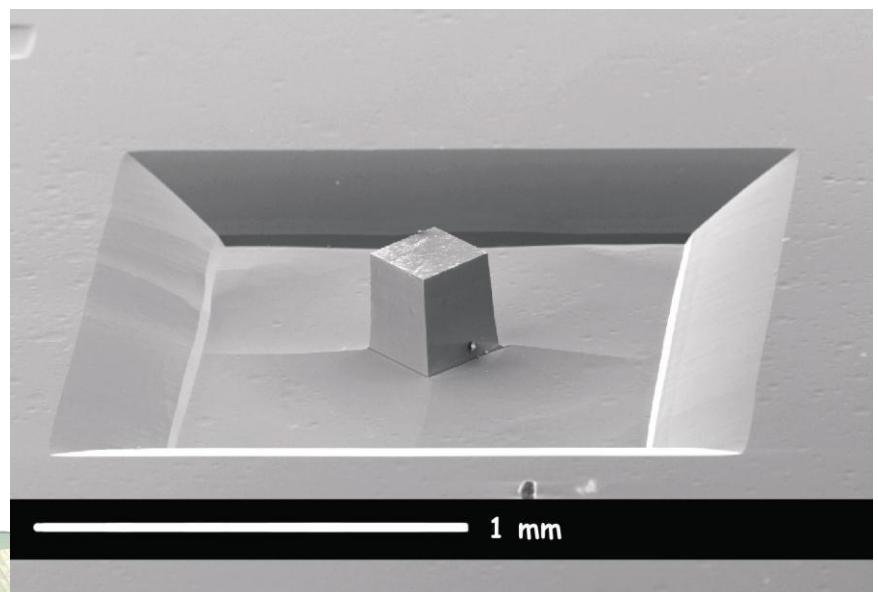
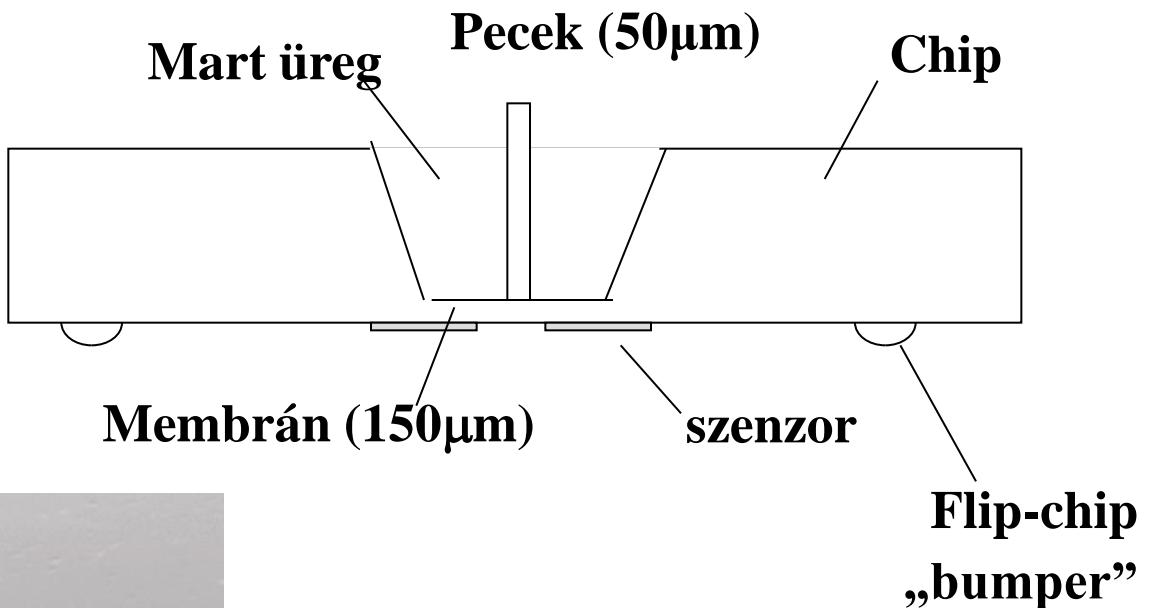
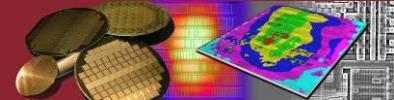


Érzékelés a
„nyeles” chip-pel



A robot és a kémcső

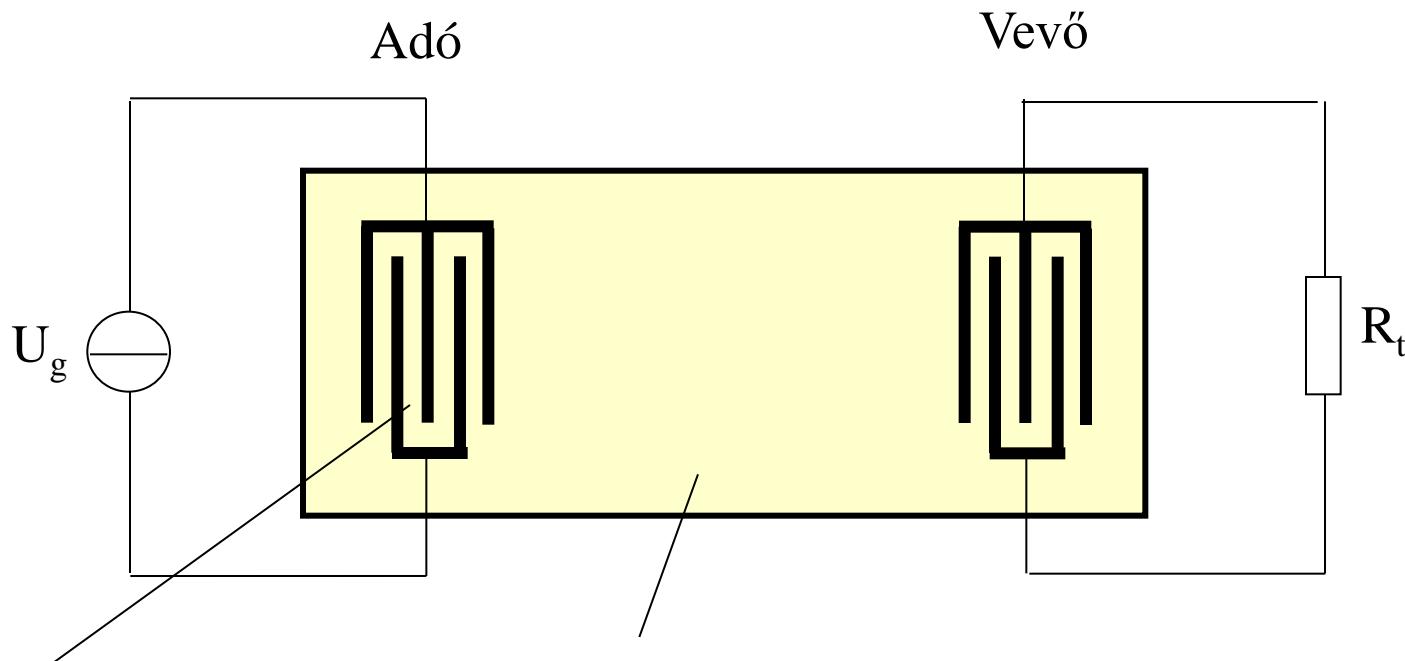




Pöcök-alakú MEMS
tapintásmérő



Felülethullámú szűrő (Surface Acoustic Wave, SAW)

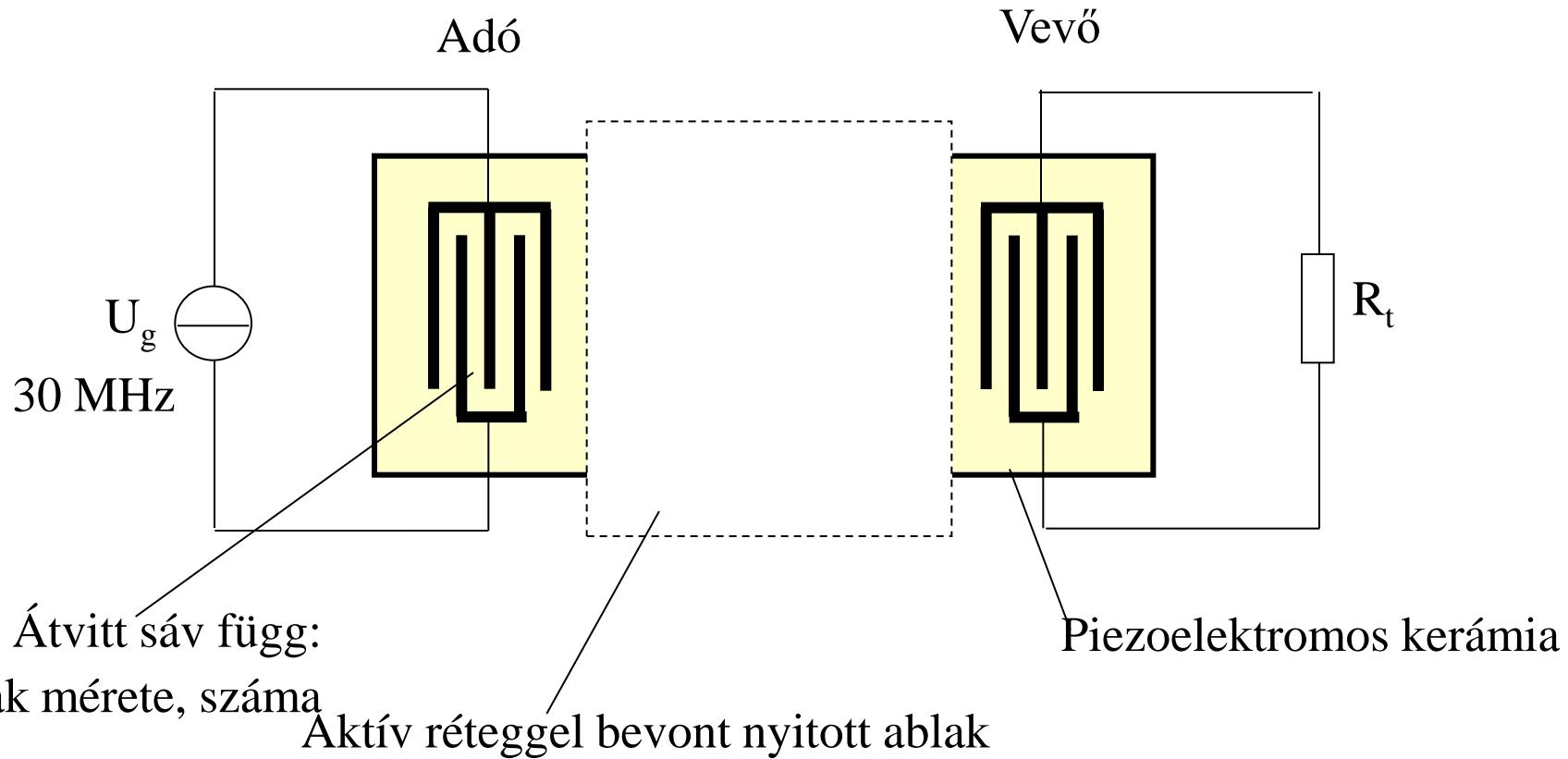


Hullámhossz: $\lambda_{piezo} = \frac{v_{piezo}}{f_g} = \frac{3100\text{m/s}}{30 \cdot 10^6} = 0,1\text{mm}$



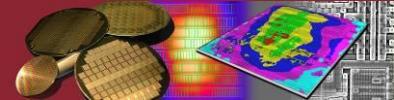


Felülethullámú szűrő (Surface Acoustic Wave, SAW)



Hullámhossz: $\lambda_{piezo} = \frac{v_{piezo}}{f_g} = \frac{3100 m/s}{30 \cdot 10^6} = 0,1 mm$

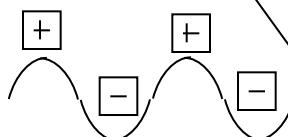




Felülethullámú szűrő (SAW) alkalmazása gázérzékelőként

**Piezo-elektrikus hordozó
Gázérzékelő bevonattal**

Gerjesztés



Levált szemcsék

Fém-elektródák

Hullám-terjedés



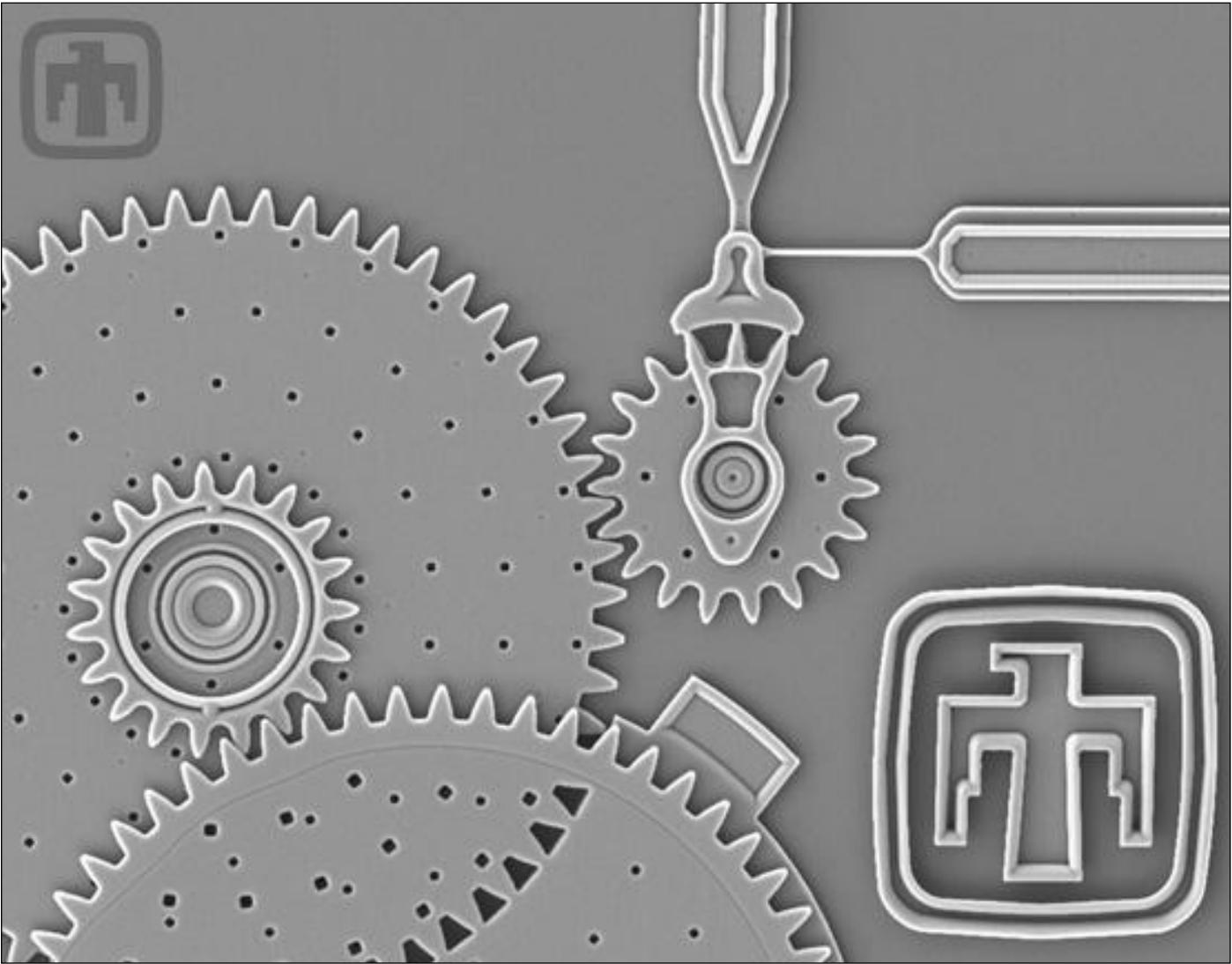
Detektálás



A levált szemcsék megváltoztatják a terjedési sebességet, zűrőt egy visszacsatolt rendszerbe helyezve, annak önfrekvenciája megváltozik.



Fogaskerekes sebesség redukáló





Torziós zárópecekkel ellátott elektrosztatikus aktuátor

