

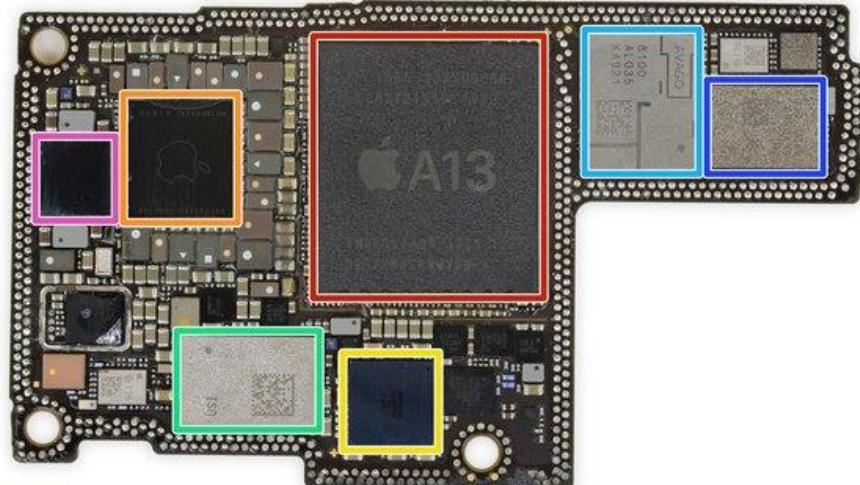
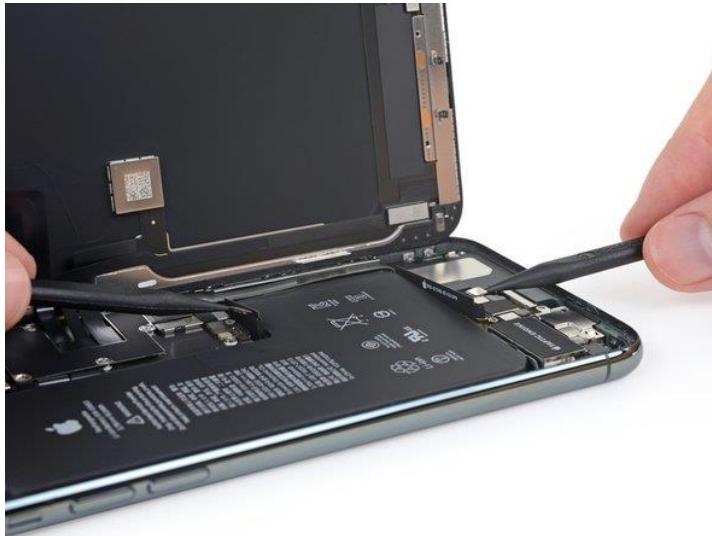
IT eszközök technológiája

1. előadás

- Rövid bevezetés
- Az alkalmazott technológiák rövid összefoglalása egy okostelefon felépítésén keresztül bemutatva
- Integrált áramkörök, technológiák
- Félvezetők



Miről lesz szó?

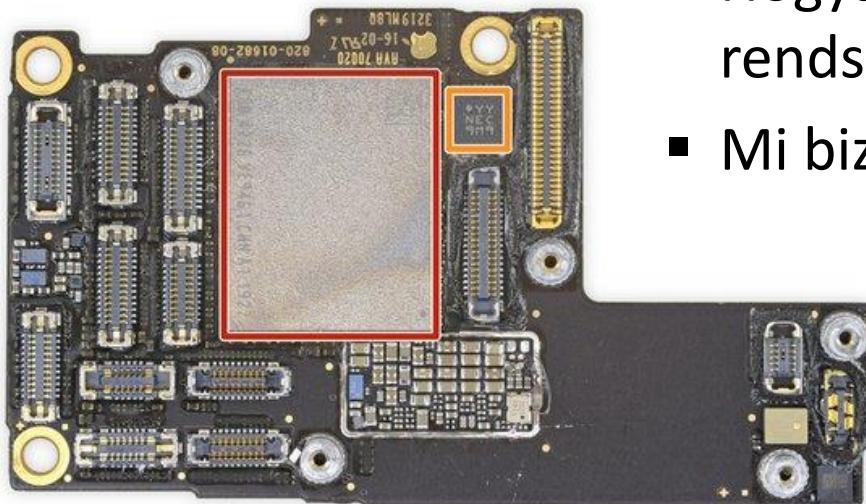


- Arról ami belül és kívül van...
 - Egy komplett számítógép, mikroprocesszor, memóriák, segédprocesszorok
 - Érzékelők, kijelzők
 - ~~RF kommunikáció~~—ehhez kevés az időkeret és az előtanulmány...



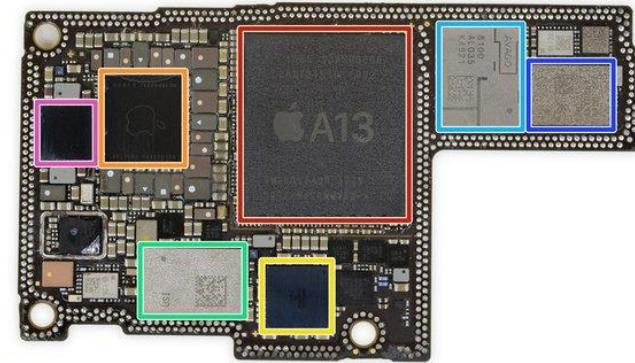
Rövid bevezetés

- Milyen komponensekből áll a rendszer?
- Hogyan tervezik ezeket a komponenseket?
- Melyek a legfontosabb szempontok a tervezés során?
- Hogyan szerelik őket össze egy rendszerré?
- Mi biztosítja az energiát a működéshez?



Az integrált áramkörök és összekötésük

- A fekete tokokban többmilliárd komponenst tartalmazó **integrált áramkörök** (IC-k) vannak.
- A nyomtatott huzalozású lemez feladata, hogy összekösse ezeket illetve a szükséges egyéb (szokásos elnevezéssel **diszkrét**) alkatrészeket.
- Az integrált áramkörökben további alkatrészek vannak akár milliárdszámra.
- A legfontosabb komponens az ún. MOS tranzisztor, ami – első közelítésben – egy (nem teljesen ideális), vezérelhető kapcsoló.
- Ezekből a MOS tranzisztorokból készülnek el a digitális kapuk, amelyeket 8-16 szintű fémezéssel kötnek össze.



Az IPHONE 11 főbb alkatrészei

- **Apple APL1W85 A13 Bionic SoC layered over SK Hynix H9HKNNNCRMMVDR-NEH LPDDR4X**
- **Toshiba TSB 4226VE9461CHNA1 1927 64 GB flash**
- Intel PMB6840,
- Apple 343S00355 (APL1092)
- Apple 338S00510,
- Texas Instruments TPS61280 Battery DC/DC Converter
- STMicroelectronics STB601
- Texas Instruments SN2611A0 Battery Charger
- Samsung S2DOS23 Display Power Management
- STMicroelectronics STPMB0 (Wireless charging)
- Apple 338S00509 audio codec
- Apple 338S00411 Audio Amplifiers
- Murata 339S00647 WiFi / Bluetooth module
- SN200 NFC&SE Module
- Apple U1 UWB(6,24GHz és 8,2368GHz)
- Intel PMB9960 baseband modem
- Intel PMB5765 RF Transciver
- Avago (Broadcom) AFEM-8100 Front-End Module
- Skyworks SKY78221-17 Front-End Module
- Skyworks SKY78223-17 Front-End Module
- Skyworks SKY13797-19 PAM
- 6,1" OLED screen Samsung
- 2x 12MP dual + 1.4MP IR camera
- Barometer
- Gyroscope
- Accelerometer
- Proximity sensor
- Ambient light sensor

Számítógép

Tápellátás

Audio

Wireless

Mobil

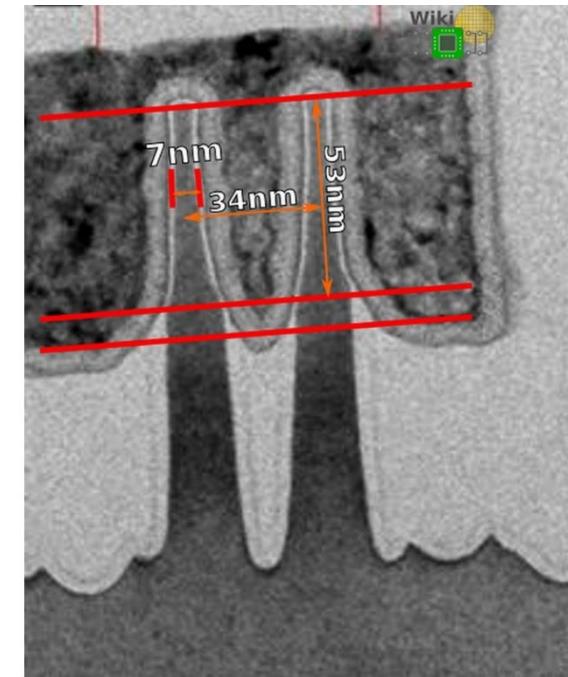
Kijelző

Szenzor



Az IC és MOS tranzisztor – 1-2. előadás

- Mit jelent az, hogy egy anyag félvezető?
- Milyen anyagokból épül fel egy tranzisztor?
- Hogy működik? (nagyjából és levezetések nélkül...)
- Miért lesz jó logikai áramkörök megvalósítására?
- Az ábrán egy modern ún. FinFET tranzisztor keresztmetszete látható.
 - A mintázat az atomok elektromos tere.

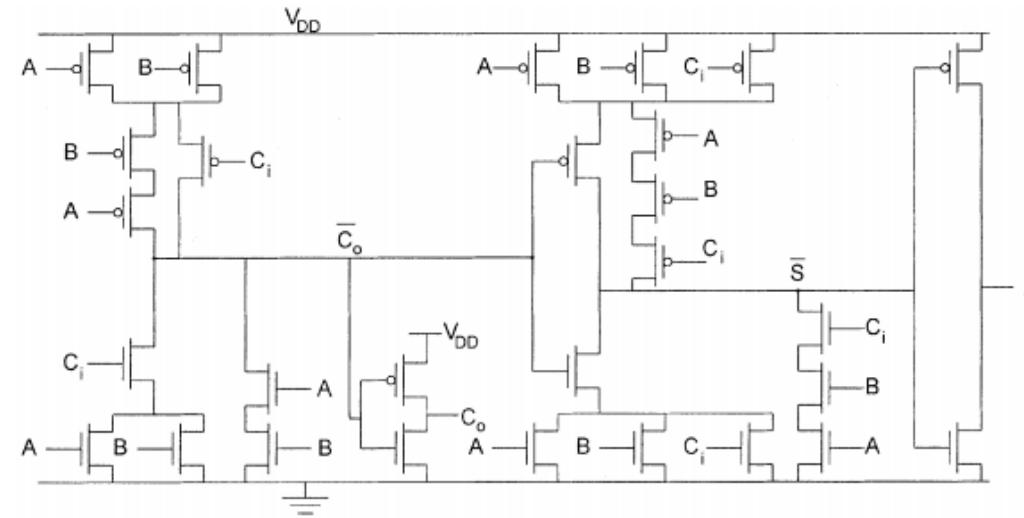


10 nm 3rd Generation
Tri-gate Transistor



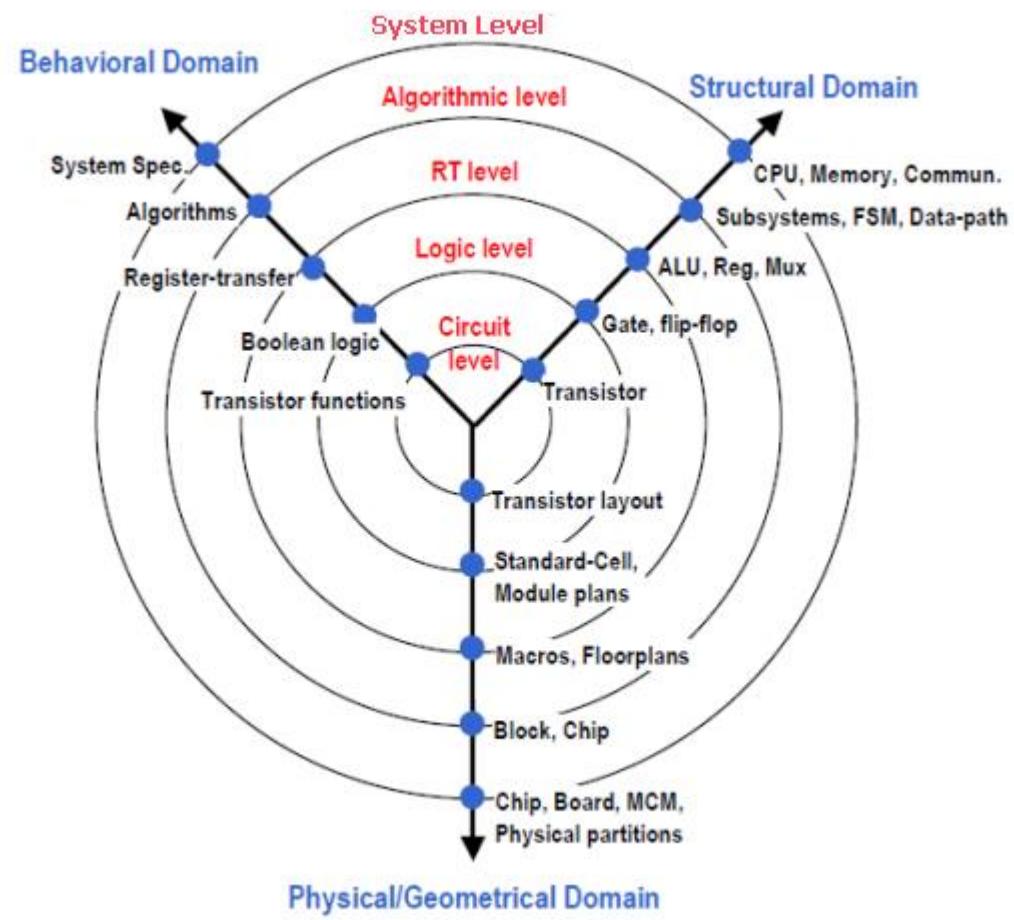
A digitális logika megvalósítása – 2-3. előadás, 1. labor

- Logikai áramkörök
 - Inverter és az alapkapuk, a NOR és NAND kapu
- A rossz hírek:
 - Fogyasztás, késleltetés, és ezek összefüggései
- Kombinációs és szekvenciális hálózatok megvalósítása
 - Komplex kapuk, többszintű logika, tárolók
 - Milyen kapu van az ábrán? (a nevekből könnyű kitalálni...)



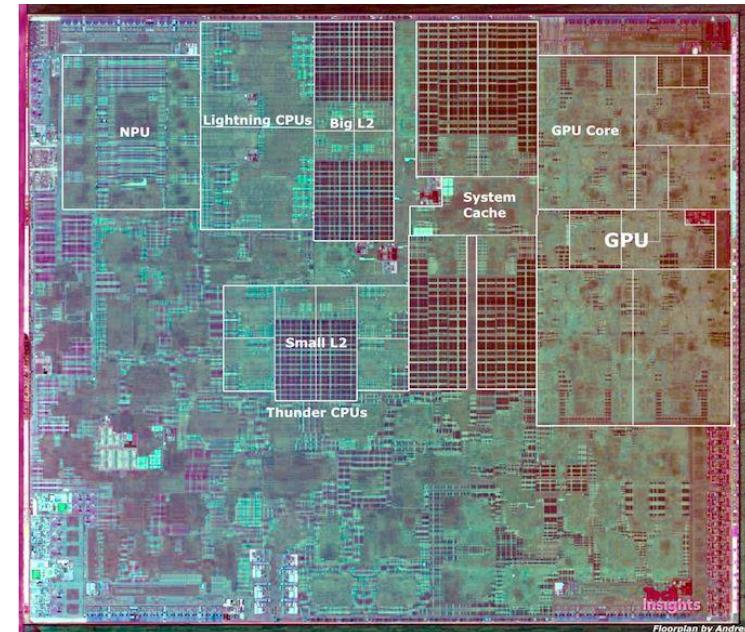
Digitális rendszertervezés 4. előadás, 2-3-4-5. labor

- A rendszertervezés folyamata
- Hardverleíró nyelvek
- Logikai és fizikai szintézis



Apple A13 application processor

- Ez egy SoC (System-on-a-chip)
- 2,66GHz hat magos ARM processzor
 - Utasításkészlet: ARM (UK)
 - Fejlesztés, mikroarchitektúra: Apple (US)
 - Gyártás TSMC (Taiwan)
 - 98mm², 4,3milliárd tranzisztor



Memória technológiák 5. előadás

- RAM memóriák
 - Operatív memória → Dinamikus RAM
 - Cache memória → Statikus RAM (?)
- ROM memóriák
 - Program memória, adat memória, háttértár – ugyanazok az alkatrészek, csak más elrendezésben
- CAM (content addressable memory)
 - $O(1)$ keresés!
- Kitekintés: új technológiai lehetőségek



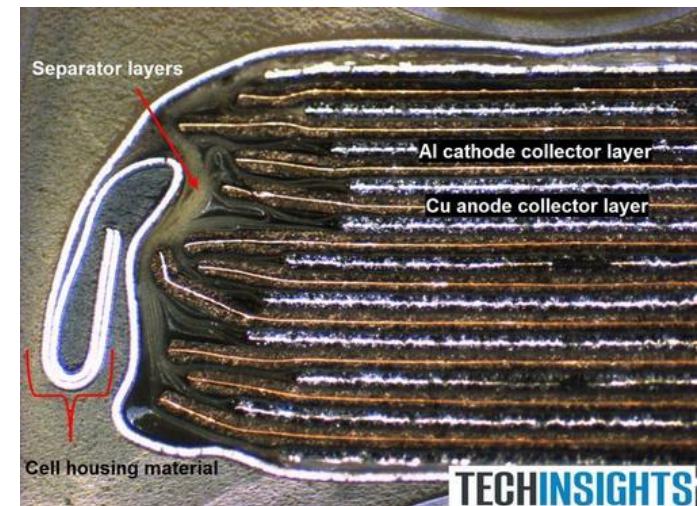
ASIC és Programozható logikai eszközök – 6. előadás

- Mit teszünk akkor, ha nem elégünk meg a polcról levehető (rendelhető) termékkel, hanem valami egyedi IC kell a rendszerünkbe?
 - Az iPhone példáját tekintve az A13 pont ilyen!
- Hogyan működnek a programozható logikai eszközök?
- Melyek az egyes megvalósítások előnyei és hátrányai?
- **A rendszertervtől a Linux bootig FPGA-n**

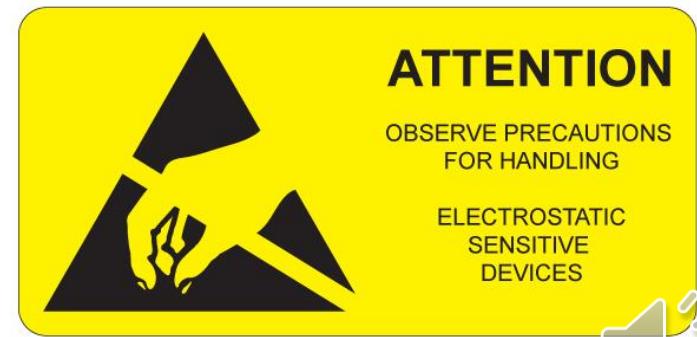


Hogyan illesztjük a digitális IC-t egy rendszerbe? – 7. előadás

- Miért nem szabad puszta kézzel IC lábakat megérteni?
- Hogyan generálunk órajelet?
- Milyen külső alkatrészek szükségesek ahhoz, hogy a rendszer működjön?
- Hogyan állítunk elő tápfeszültséget?
 - A hálózati 230V-os váltakozó feszültségből
 - Egyenfeszültségből.
 - Hatékonyan, kevés veszteséggel!

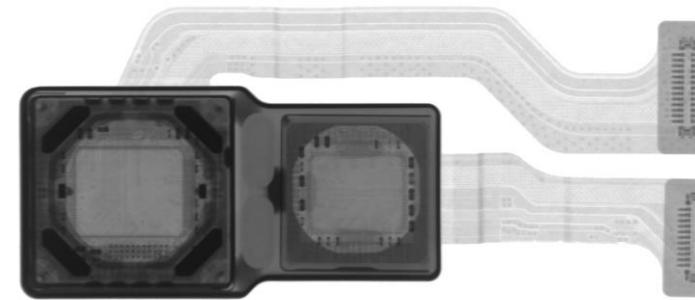
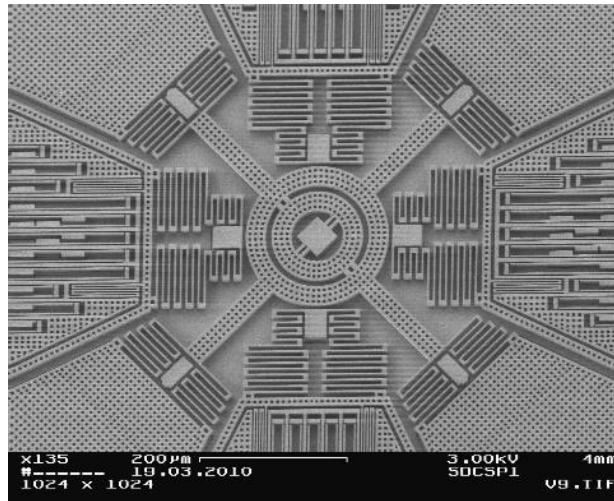


TECHINSIGHTS



Érzékelés minden szinten – 8. előadás

- Mágneses tér, fényintenzitás, hőmérséklet, elmozdulás, gyorsulás, érintés, közelség...
- Milyen fizikai hatást észlelünk és milyen pontossággal?
- Mit jelent a MEMS gyártástechnológia?
- (az ábrán egy giroszkóp elektronmikroszkópos képe látható, mellette pedig két képérzékelő röntgenképe)



További előadások

- Megjelenítő eszközök technológiája (9. előadás)
- Átjárás az analóg és a digitális világ között, az AD/DA átalakítók (10. előadás)
- Teljesítmény és hőmérsékleti problémák. Hogyan történik egy rendszer hűtése, hogyan lehet egyszerű módszerekkel közelítőleg meghatározni egy komponens hőmérsékletét? (11. előadás)
- Mágneses adattárolás (12. előadás - kamarad)
- Hogyan készül a nyomtatott huzalozású lemez? Milyen alkatrészeket használunk még és hogyan rögzítjük? (13. előadás)





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Emlékeztető digitális áramkörökről



A digitális áramkörök

- Digitális logikát leggyakrabban **áramkörökkel** valósítunk meg.
 - A leggyakoribb megvalósításban **feszültséglogikát** használunk
 - Ebben az esetben általában a tápfeszültséget feleltetjük meg a logikai igaz, a 0V-ot pedig a logikai hamisnak.
 - A tápfeszültség megállapodás kérdése, 5V, 3.3V, 2.5V, 1.8V vagy még kevesebb, sőt a rendszer változtathatja is, erről majd bővebben beszélünk.
 - A műveletet elvégző egységek a Digitális technikából megismert kapuk.
 - A kapuk olyan alkatrészeket tartalmaznak, amelyek egy vezérelhető kapcsolónak felelnek meg. Ezeket **TRANZISZTOROKNAK** hívjuk.
 - (nagysebességű áramkörökben áramlogikát, vagy differenciális feszültséglogikát használnak)





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

A mikroelektronika



Mikroelektronika

- Az Elektronika azon ága, amely kisméretű integrált áramkörök tervezésével és gyártásával foglalkozik
 - Általában (legalábbis jelenleg) félvezető alapanyagokból, egy kisméretű szilícium lapkán (chip) készülnek el az áramkörök.
 - Digitális integrált áramkörökben az alkatrészek tranzisztorok, azaz **kisméretű kapcsoló elemek**.
 - (analóg integrált áramkörökben természetesen megvalósíthatók a „megszokott” további alkatrészek, azaz ellenállás, kapacitás, tekercs – ezek értékkészlete korlátozott, minősége jóval rosszabb, mint az egyedi alkatrészeké – így érthető a digitális jelfeldolgozás irányába történő eltolódás)
 - Az integrált áramköri gyártás **TÖMEGGYÁRTÁS**
 - Az egy darabra jutó költség emiatt kicsi



A Moore-törvény

- 1965-ben Gordon Moore megjósolta, hogy az egy lapkára integrálható tranzisztorok száma másfél – kétévente 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
 - 39,54 milliárd tranzisztor, AMD Epyc Rome, TSMC 7nm
 - Intel, 10nm 100,8M tranzisztor/ mm²



Moore eredeti cikkének ábrája

- A „merész” becslés talán nem túlzás

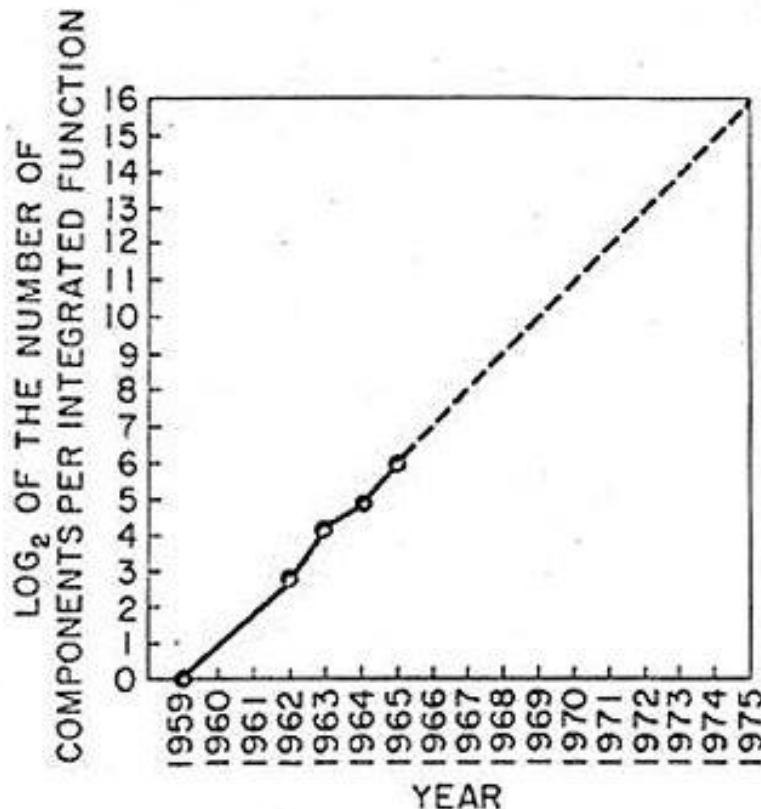


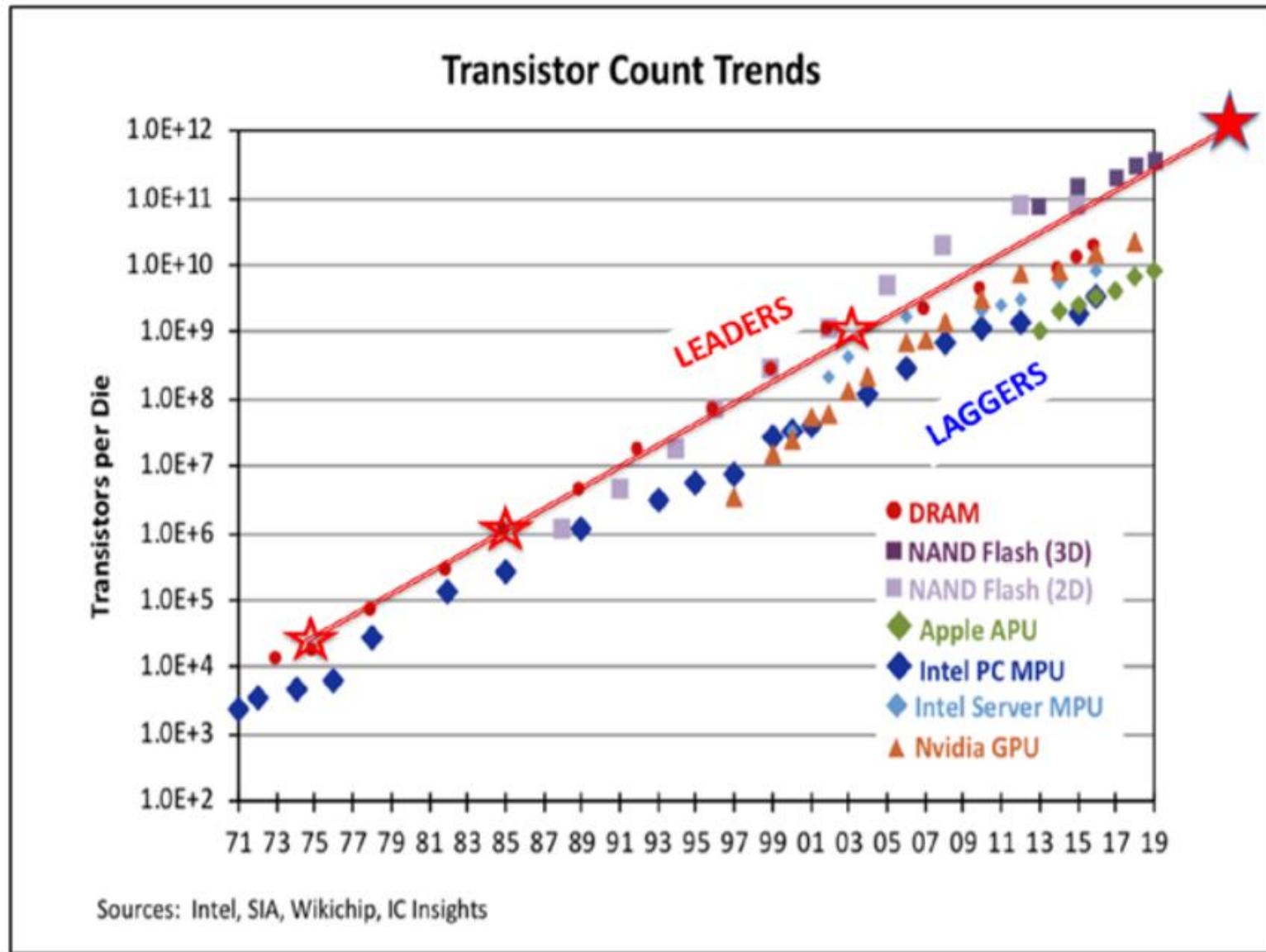
Fig. 2 Number of components per integrated function for minimum cost per component extrapolated vs time.

Cramming more components onto integrated circuits

With unit cost falling as the number of components per circuit rises, by 1975 economics may dictate squeezing as many as 65,000 components on a single silicon chip

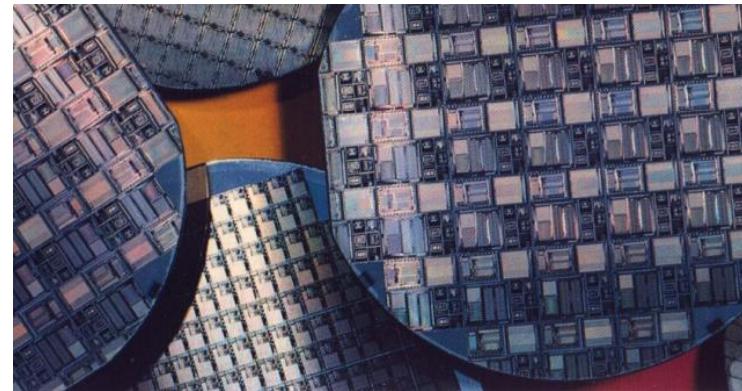


A tranzisztorszám növekedése

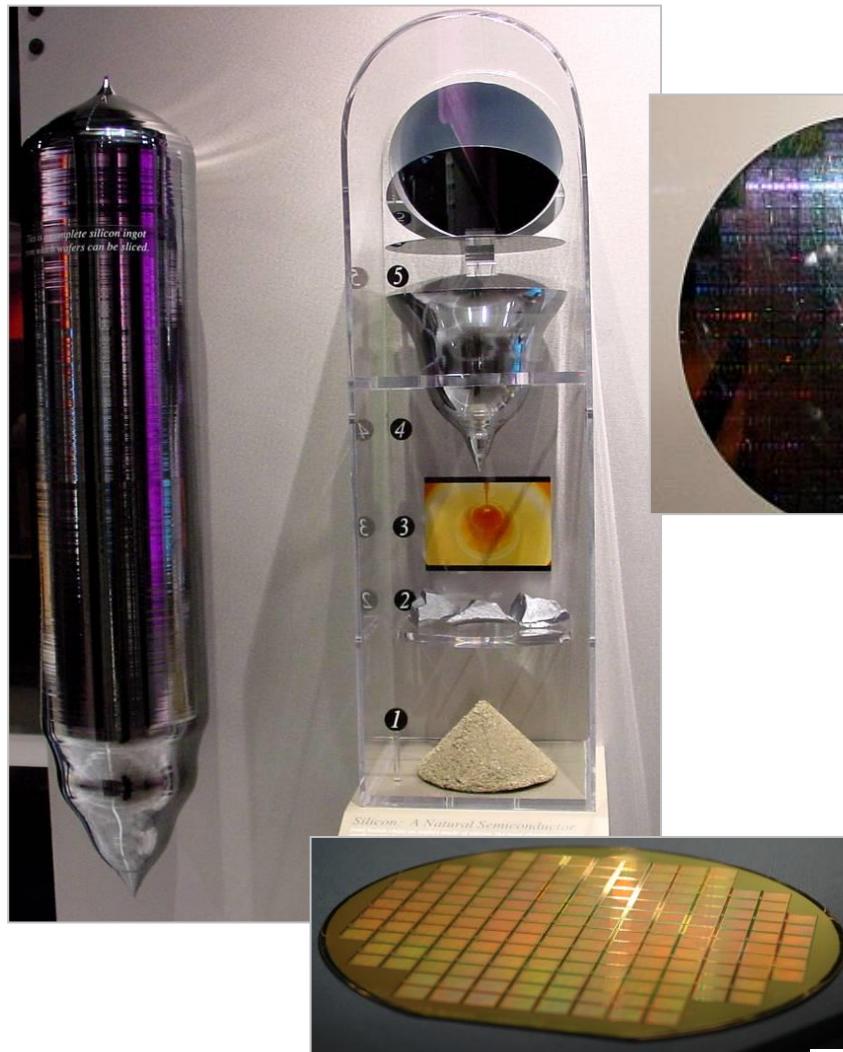


A planár technológia

- VLSI – very large scale integration.
 - 1980-as évek óta $\geq 10\ 000$ tranzisztor
- 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 50-450mm átmérőjű, 0,25-0,7 milliméter vastag szeletek
- Egy szeleten több ezer IC (chip vagy die) készül egyszerre



Kiindulási alapanyag: a szilícium egykristály, ~30-45cm



Megmunkált Si szelet



Fotolitográfia

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

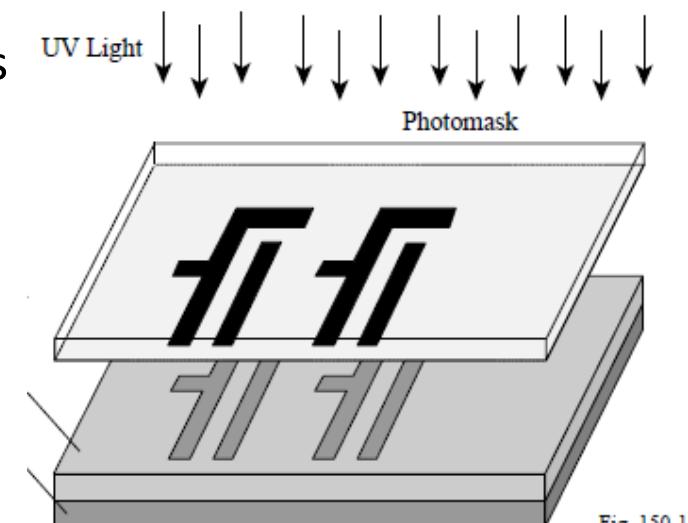


Fig. 150-1



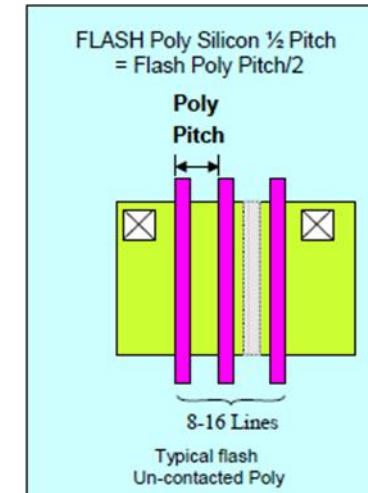
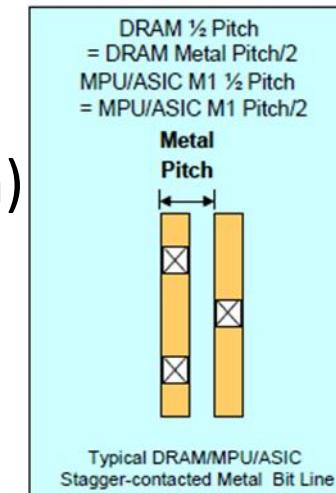
A méretcsökkentés

- Az elemek számát kétféleképpen növelhetjük meg:
 - Meg kell növelni a chip méretét. Ennek akadálya, hogy a gyártási hiba valószínűsége a chip felszínével egyenesen arányos. Így létezik egy optimális chip méret, aminél nagyobbat nem érdemes gazdaságosan gyártani. Ez kb. 500mm^2
 - Csökkenteni kell az elemek és az összeköttetések méretét.
 - Ha minden fizikai méretet pl. a felére csökkentünk, akkor kb. 4x annyi alkatrészt lehet kialakítani felületegységenként.
 - Ez utóbbi a méretcsökkentés
- A méretcsökkentés hatása
 - A késleltetés csökken (órajel növelhető)
 - Egy kapu fogyasztása csökken
 - Viszont a felületegységnyi fogyasztás **megrövidül!**



Méretcsökkentés

- “x nm-es” technológia
 - jelentése: a megvalósítható legkisebb méret x nm.
 - (manapság persze ezt is „érdekesen” értelmezik / egy lehetséges definíció az ábrán)
- Ez az ún. MFS (minimum feature size)
- 1970 környékén ez kb. 10µm (10 000nm) volt.
- Jelenleg ez az érték 7-10nm, gyártásban
 - Intel, Samsung, TSMC
- A szilícium rácsállandója (az elemi cella mérete) 543pm..., két atom középpontja közötti távolság pedig 235pm...



IRDS roadmap (2016 előtt ITRS)

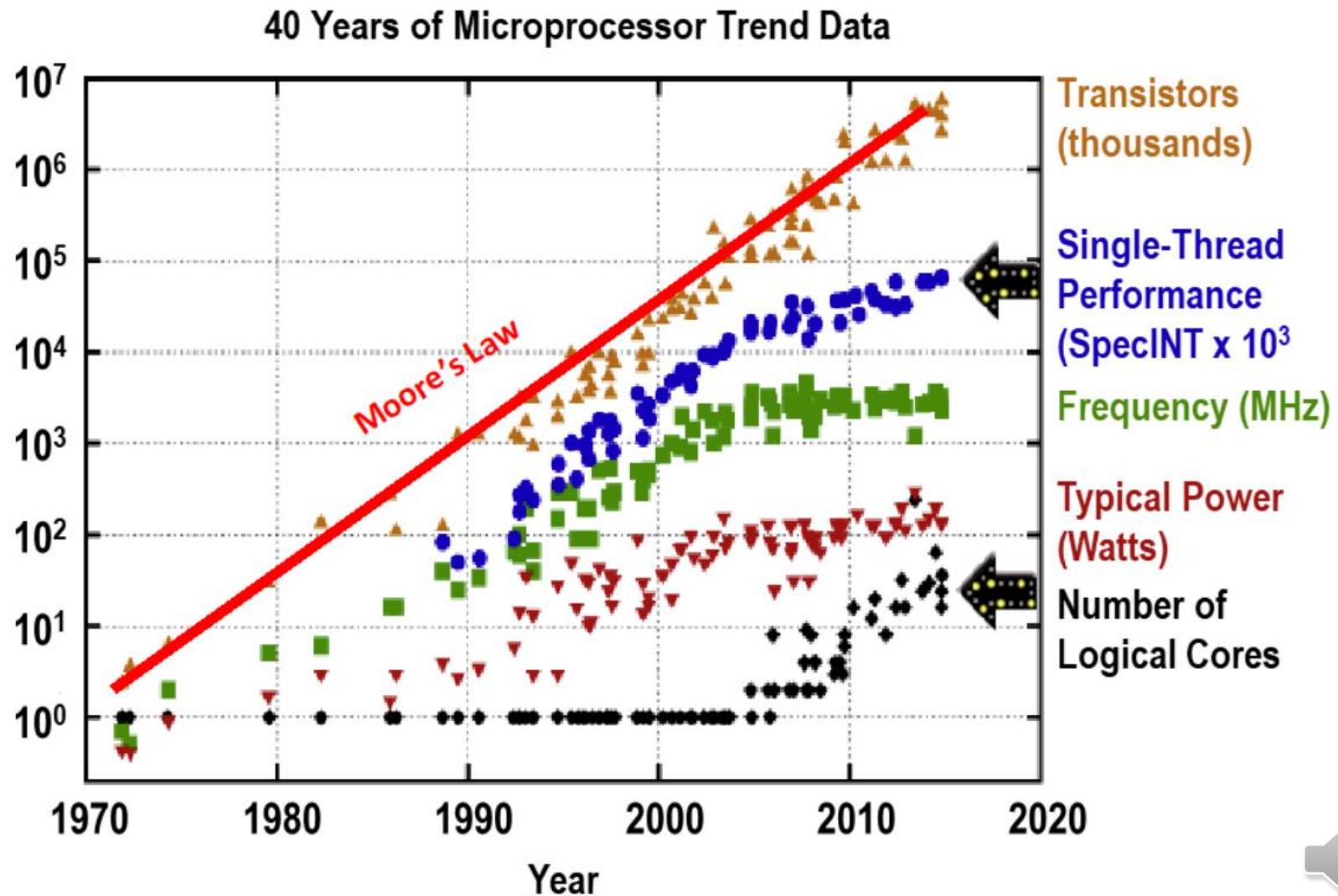
- Vezető ipari szakértők által **folyamatosan frissített** előrejelzések a mikroelektronikai technológiák (IC gyártás) várható fejlődési irányairól.

YEAR OF PRODUCTION	2020	2022	2025	2028	2031	2034
	G48M36	G45M24	G42M20	G40M16	G38M16T2	G38M16T4
Logic industry “Node Range” labeling (nm)	“5”	“3”	“2.1”	“1.5”	“1.0 eq”	“0.7 eq”
IDM-Foundry node labeling	i7-f5	i5-f3	i3-f2.1	i2.1-f1.5	i1.5e-f1.0e	i1.0e-f0.7e
Logic device structure options	FinFET	FinFET LGAA	LGAA	LGAA	LGAA-3D	LGAA-3D
Mainstream device for logic	FinFET	FinFET	LGAA	LGAA	LGAA-3D	LGAA-3D

- A rövidítések feloldása (FinFET, LGAA, LGAA – 3D) az utolsó előadáson.



Mikroprocesszor trendek





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

A félvezetők



Félvezetők

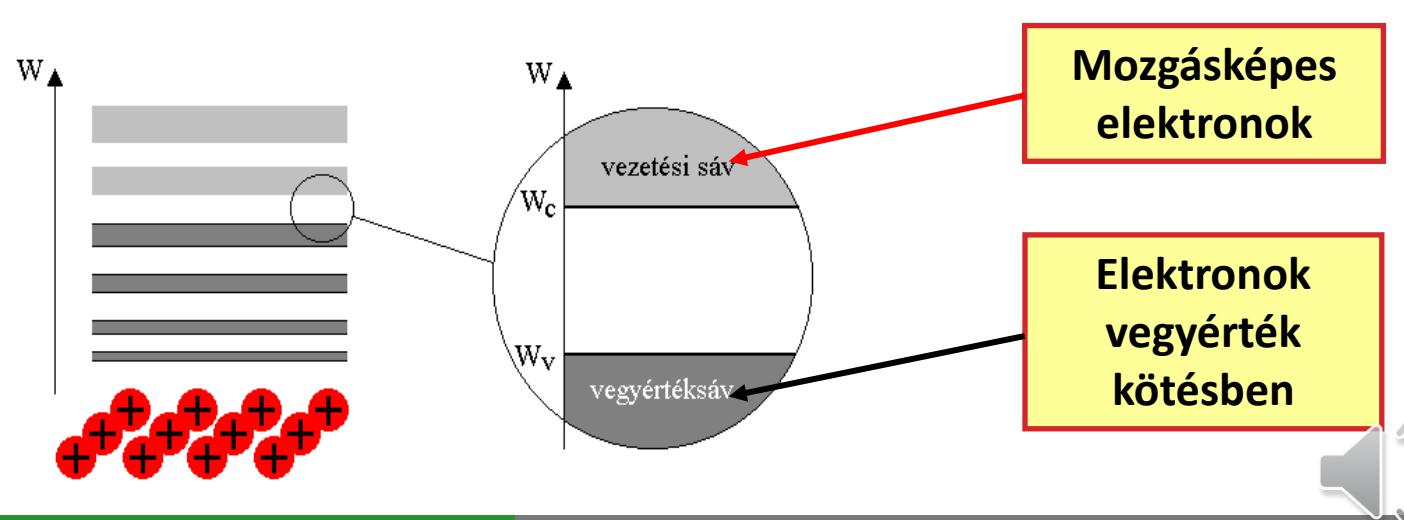
- Átmenetet képeznek a szigetelők és a vezető anyagok között.
- Vezetik az áramot.
 - NTC, azaz növekvő hőmérsékletre az ellenállásuk csökken. (ellentétben a fémekkel!)
- Fontosabb félvezető anyagok (önkényes és nem teljes felsorolás!)
- Elemi félvezetők: Si, Ge (periódusos rendszer IV. oszlop)
 - Szilícium: integrált áramkörök, tranzisztorok, napelem
- Vegyületfélvezetők: pl. GaAs, GaAsP, GaN, SiC stb.
 - LED, HEMT (high electron mobility transistor – nagyfrekvenciás analóg feldolgozás), teljesítmény félvezetők
- szerves anyagú félvezetők
 - OLED



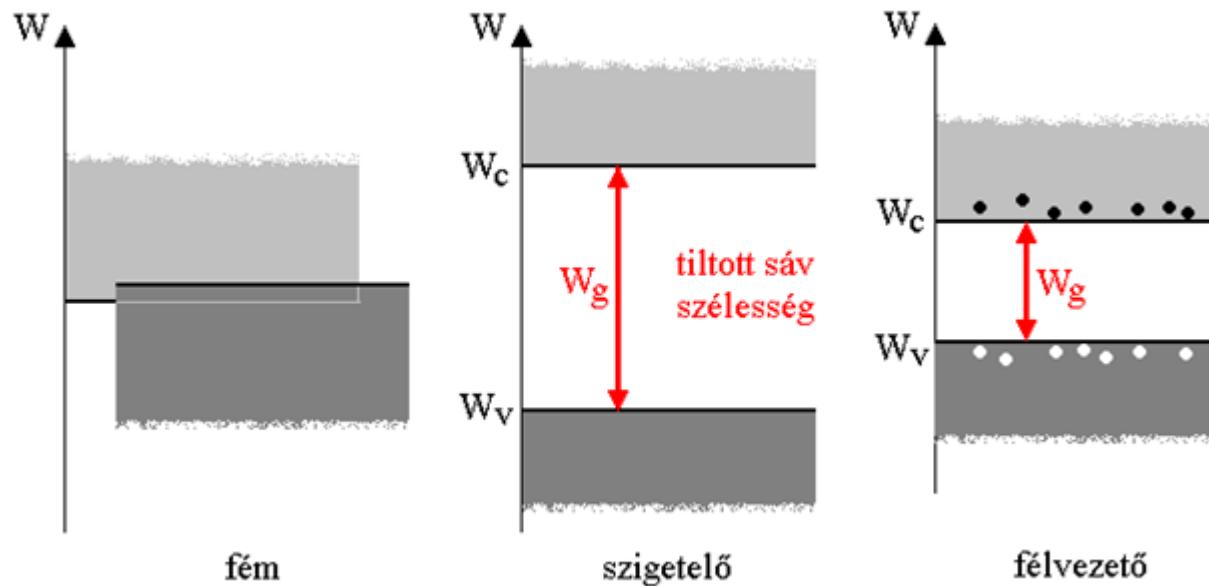
Mitől lesz egy anyag vezető, félvezető, szigetelő?

■ Ehhez vissza kell nyúlni a kvantummechanikához.

- Egy atomban az elektronok csak meghatározott diszkrét (kvantált) energiaállapotokat vehetnek fel. Egy energiaállapotban összesen két (!) elektron lehet. Termikus egyensúlyban az elektronok az alacsonyabb energiájú szinteket töltik be.
- Kristály esetén hasonló a helyzet. A megengedett állapotok sávokká szélesednek, amelyek között nem megengedett állapotok, ún. tiltott sávok vannak.
- Áramvezetés szempontjából a legfelső, teljesen betöltött sáv (**vegyértéksáv**) és az annál nagyobb energiájú, csaknem üres **vezetési sáv** viszonya számít.



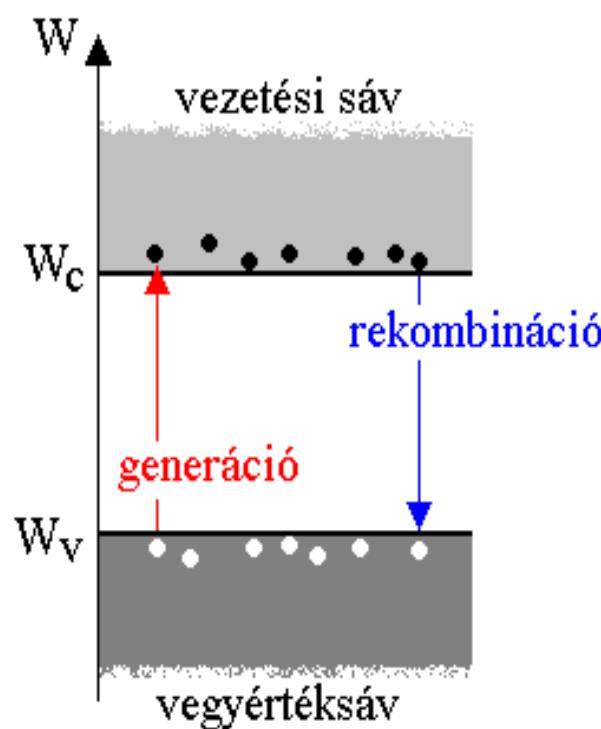
Vezetők, félvezetők és szigetelők



- **Fémek** esetén a vezetési és vegyértéksáv között nincs tiltott sáv, a fémek jól vezetik az áramot
- Ha a tiltott sáv széles, a termikus átlagenergiához képest ($kT=26\text{meV}$) a vegyértéksávból történő felkerülés valószínűsége nagyon kicsi, közel 0, **szigetelő**
- Ha a tiltott sáv néhány eV, pl. Si esetén 1,1eV, akkor bizonyos valószínűsséggel felkerülhet elektron a vezetési sávba. Ekkor **félvezetőkről** beszélünk. Ha a hőmérséklet növekszik, akkor ez a valószínűség is növekszik, azaz nő a töltéshordozók száma
 - Megjegyzés: eV – elektron volt – energia nem SI mértékegysége, 1 elektron 1V feszültséggel gyorsítva, $1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$



Töltéshordozók



- Elektronok a vezetési sáv alján
- Lyukak (elektron hiányok) a vegyértéksáv tetején
- Mindkettő szolgálja az áramvezetést.
 - nemcsak az elektron, hanem az elektron hiány is el tud mozdulni.
- A „tiszta” (szakszóval intrinsic) félvezetőben viszonylag kevés töltéshordozó van.
 - Szilíciumban pl. $10^{10}/\text{cm}^3$, miközben $5 \cdot 10^{22}/\text{cm}^3$ atom van
 - Így az intrinsic félvezető nem túl jó áramvezető



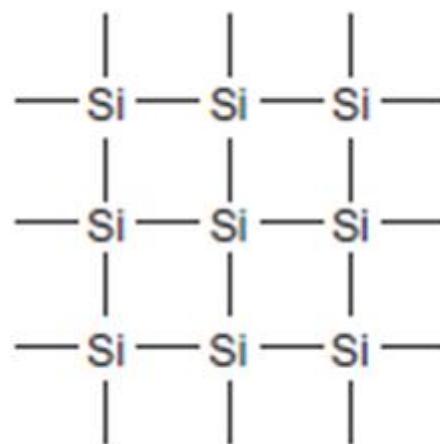
Adalékolás

- A félvezető kristályba kis mennyiségben idegen atomokat juttatnak be, amelyek beépülnek a kristályrácsba.
- Attól függően, hogy az adalék atom a félvezetőhöz képest több vagy kevesebb elektronnal rendelkezik, két adalékolási módot különböztethetünk meg.
 - n típusú adalék: az adalék atomok több elektronnal rendelkeznek a külső elektronhéjon. A többlet a kristály vezetési sávjába kerül, így az elektronok száma megnövekszik, az elektronok lesznek a többségi töltéshordozók
 - p típusú adalék: az adalék atomok kevesebb elektronnal rendelkeznek a külső elektronhéjon. A kristály szabad elektronjait befogják, így mozgóképes elektronhiány (lyuk) alakul ki.
- Nagyjából annyi „új” töltéshordozó keletkezik, amennyi adalékatom a kristályba került. Pl. $10^{15}/\text{cm}^3$ adalékolás Si esetén azt jelenti, hogy az anyag 99,999998%-ban szilícium. Viszont 50 000-szer több mozgóképes elektron keletkezik, azaz ennyivel jobban vezeti az áramot!

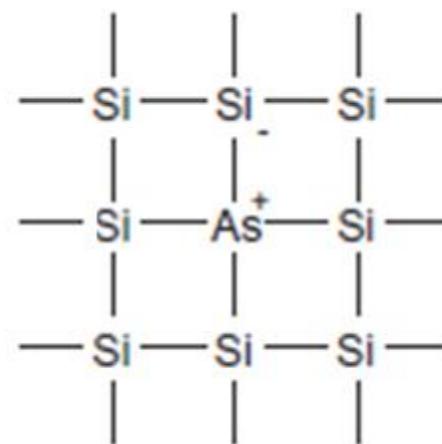


Példa: szilícium

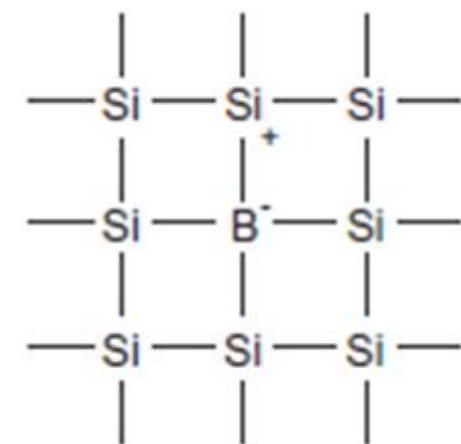
Példa: szilícium adalékolása arzénnel ill. bórral



intrinsic szilícium



n szilícium



p szilícium



Források, ajánlott irodalom, érdekességek

1. [iPhone 11 szétszedve](#)
2. [iPhone alkatrészei](#)
3. [Gordon Moore eredeti cikke](#)
4. [IDRS roadmap 2020 \(ingyenes regisztrációt igényel\)](#)
5. [From Sand to Silicon: The Making of a Microchip](#)



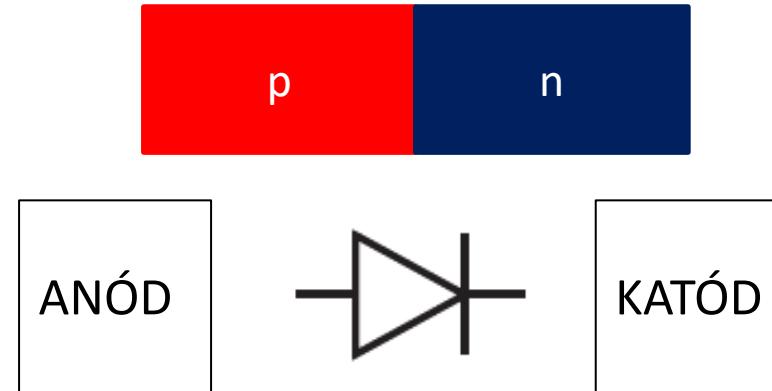
IT eszközök technológiája

2. előadás

- A félvezető dióda
- A MOS tranzisztor
- A digitális logika alapvető tulajdonságai
- A statikus CMOS logika



pn átmenet vagy félvezető dióda



Ahol a kristályban egy n és egy p zóna érintkezik kialakul egy ún. **pn** átmenet.

- A p vezetéses területet szokásosan anódnak, az n vezetéses részt katódnak hívjuk
- Ha az anód pozitívabb feszültségű, mint a katód, az átmenet nagy árammal vezet, az áram nagyjából exponenciálisan nő a feszültséggel, a dióda *kinyit*
- Ha az anód negatívabb feszültségű, mint a katód, az átmeneten nagyon kis áram folyik, a dióda *lezár*.
- Azaz a dióda **EGYENIRÁNYÍT**.



Egyenirányítás





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

A MOS tranzisztor



A MOS tranzisztor

MOS: Metal-Oxide-Semiconductor

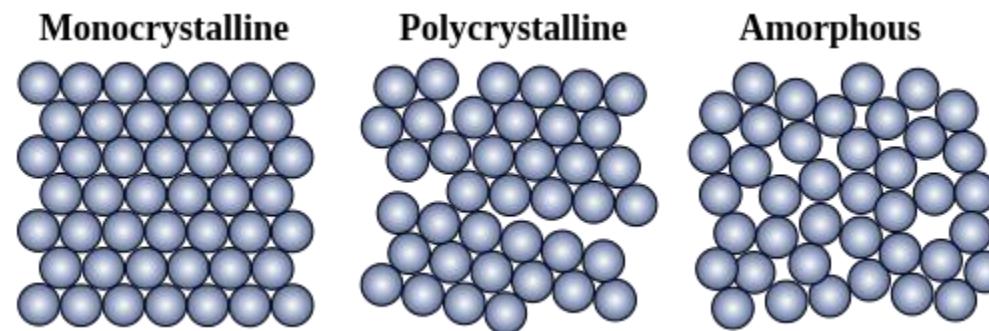
- Nevét a működést biztosító anyagstruktúráról kapta, azaz fém, a félvezető oxidja, félvezető.
- A félvezető szilícium, mivel a SiO_2 (más néven kvarc) stabil anyag.
- Valójában ez az egyik fő oka annak, hogy Si-ot használunk más félvezetők helyett
- A fém kezdetben alumínium volt, később szinte minden 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: több milliárd MOS tranzisztor/chip
- 2005-ben állítólag több MOS tranzisztor készült, mint ahány szem rizst termesztettek. (forrás: „SEMI Annual Report'05” – nem ellenőrzött...)



Kitérő: egykristály, polikristály, amorf anyag



Egykristály: hosszú távú rendezettség

Polikristály: egykristály szemcsékből áll

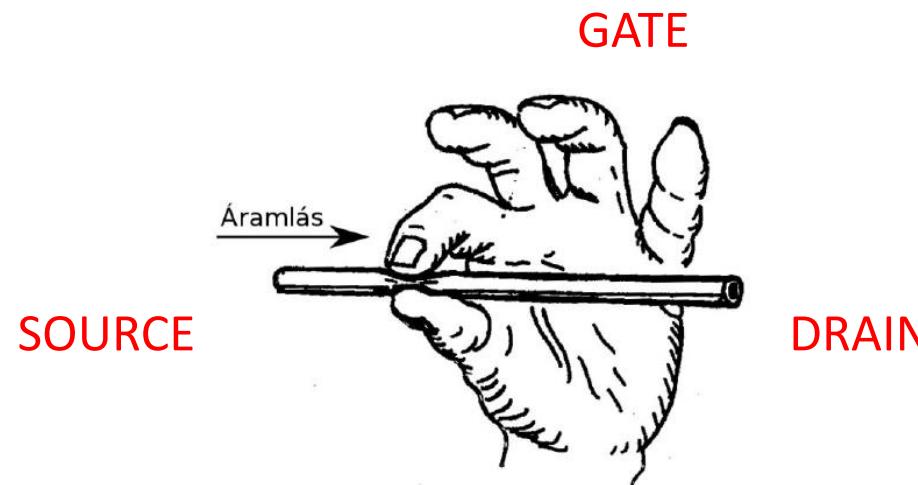
Amorf anyag: nincs, vagy csak nagyon rövidtávú a rendezettség

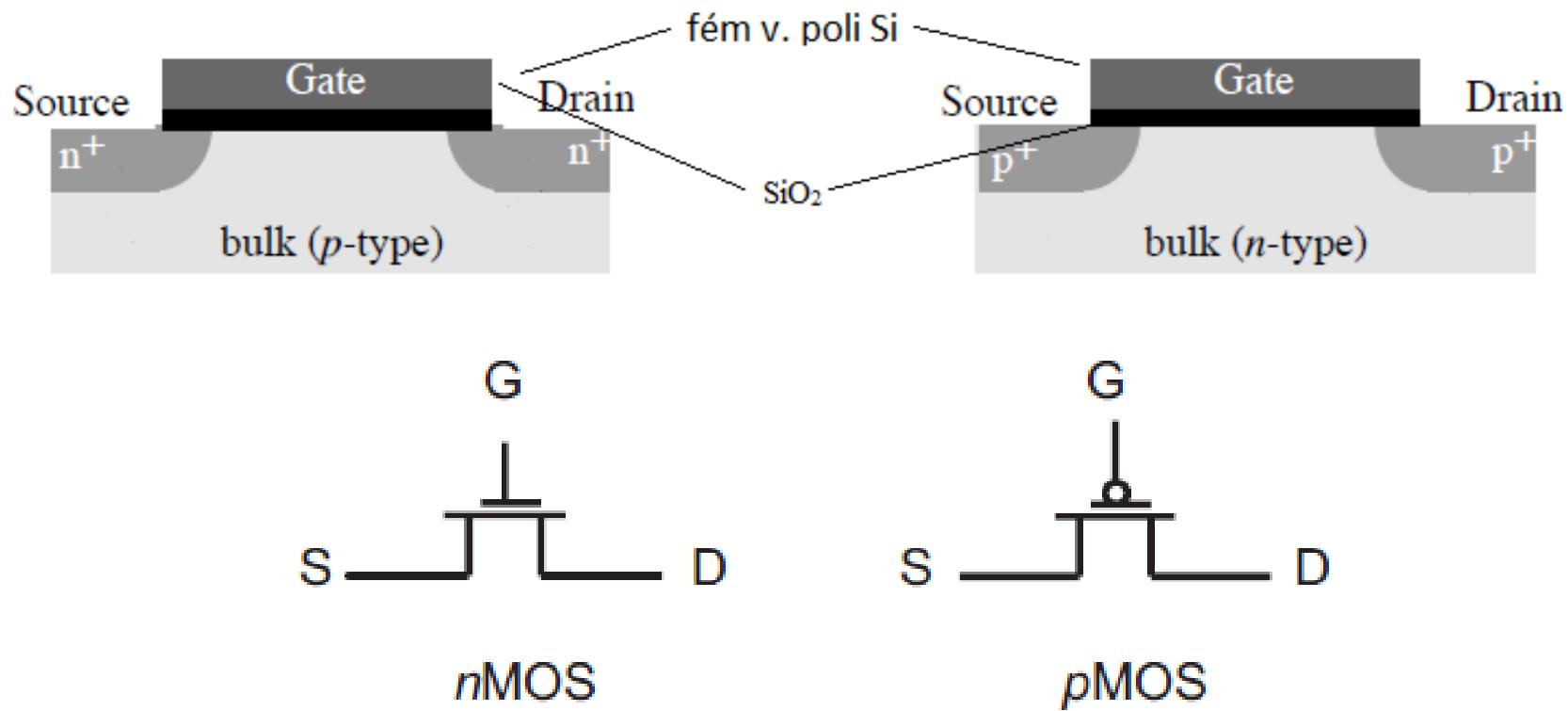


A MOS tranzisztor

A működés elve:

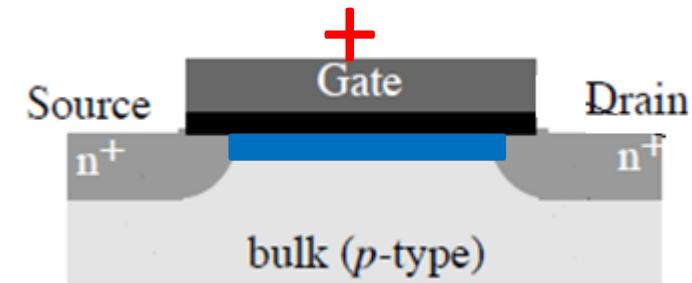
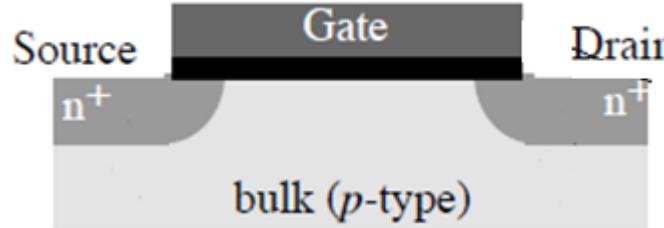
- Egy félvezető alapon („szubsztrát”) létrehozunk két elektródát, amely között folyó áramot szabályozzuk
- A két elektróda neve „**source**” és „**drain**”
- A **source**-ból származnak a töltéshordozók, amelyeket a **drain** gyűjt össze.
- A szabályozó elektróda neve: **gate**
- Mintha egy szívószálon keresztülfolyó folyadékot vezérelnénk nyomással.





Mivel kétfajta adalékolás is létezik, kétféle kialakítás képzelhető el.
nMOS ill. pMOS tranzisztorokról beszélünk

A MOS tranzisztor vázlatos működése



Tekintsük az nMOS tranzisztort!

- Alapesetben nem vezet, hiszen a source és a drain között lezárt pn átmenetek vannak.
- Ha a gate feszültsége egy bizonyos szintet meghalad, a gate alatt elektronok jelennek meg és kialakul egy csatorna, ami összeköti source-drain elektródákat.
- A jelenség neve **INVERZIÓ** ehhez szükséges feszültség a **küszöbfeszültség**.
 - (inverzió: hiába p vezetési típusú a félvezető, mégis a nagy térerősség hatására a felületen az elektronok kerülnek többségbe, mintha n típusú lenne)
- **PONTOSAN ÚGY MŰKÖDIK, MINT EGY RELÉ – de nincs mozgó alkatrész!**
- pMOS esetén fordítva



Mire jó ez az egész?

KAPCSOLNI!

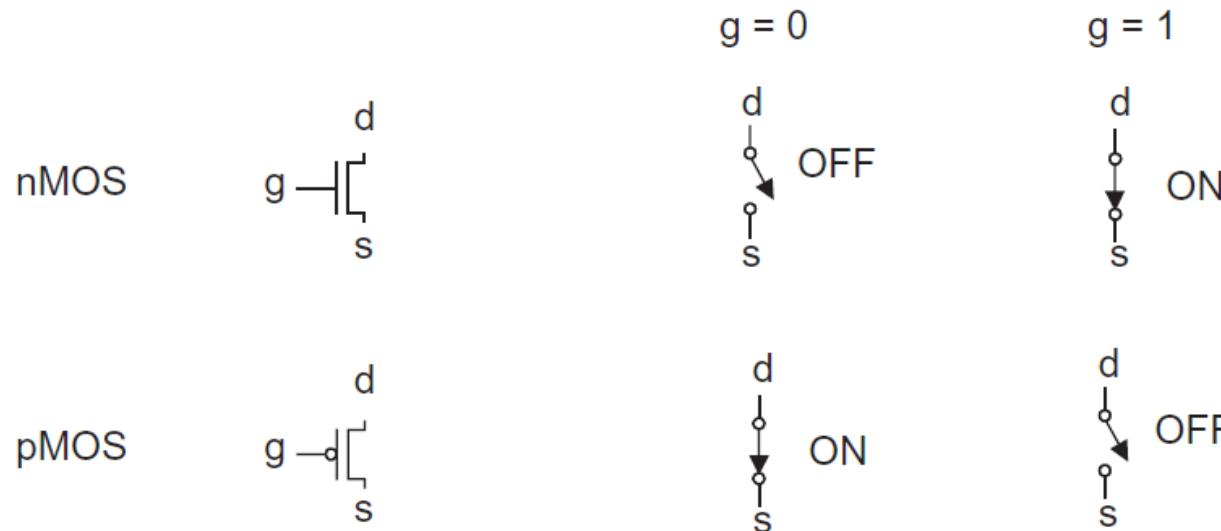
- Emlékezzünk vissza: a kételemű Boole algebra egy másik elnevezése az ún. kapcsoló algebra.
- A MOS tranzisztor egy nem teljesen ideális, de jól működő kapcsoló.
- Rögtön két változatban is rendelkezésre áll.

Vizsgáljuk meg, hogyan működik egy digitális rendszerben

- Reprezentáljuk az logikai igazat a tápfeszültséggel, a logikai hamist pedig a 0V-al.
- Feltételezzük, hogy a tápfeszültség nagyobb, mint a küszöbfeszültség.
 - valójában – ökolászabály – kb. a négyeszerese.
- Feltételezzük, hogy az nMOS tranzisztor szubsztrátja földre, a pMOS tranzisztor szubsztrátja pedig a tápfeszültségre van kötve
- Nézzük meg, mi történik a kétfajta tranzisztorral!



nMOS ill. pMOS kapcsolók



A nMOS logikai 0 esetén nyitott kapcsoló, nem vezet áramot, logikai 1 esetén zárt kapcsoló, vezet.

A pMOS logikai 0 esetén vezet, logikai 1 esetén nem vezet

Nem véletlen a jelölés

- Figyeljük meg az invertálás kis karikáját a pMOS tranzisztor gate-jén!
- (ebben a tárgyban igyekszünk ezt az ún. „digitális” MOS szimbólumot alkalmazni, így „ránézésre” látszik, hogy melyik logikai jelszintnél mi történik)



A CMOS

Minden adott tehát, hogy logikai kapukat készítsünk.

Van kétfajta tranzisztorunk, az egyik logikai magas szintű vezérlésre kapcsol, a másik logikai alacsony szintűre.

- Ha ezeket egy áramkörben alkalmazzuk, ezek lesznek az ún. komplementer MOS áramkörök, rövidítve CMOS

Ha ügyesen kombináljuk, tudunk készíteni

- Invertert
- Alapkapat
- (itt már megállhatnánk, hiszen pl. kétbemenetű NAND kapuból minden logikai függvény megépíthető)
- Bonyolultabb logikai függvényt is. (majd látni fogjuk, ez lesz egy hatalmas előnye a CMOS-nak!)





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

A digitális logika alapfogalmai



A Boole algebra áramkori megvalósítása

A Boole algebra

- Matematikai szemszögből egy absztrakció
 - Értékkészlete $x \in \{0,1\}$
 - Műveletei: $\neg \wedge \vee$

Az értékkészlet elemeihez valamelyen könnyen feldolgozható fizikai mennyiséget rendelünk, ami általában a feszültség.

- (lehet áram vagy feszültsékgükönbség – nagysebességű logikákban)
- A logikai 1-hez a V_H , a logikai 0-hoz a V_L feszültségszintet rendeljük.
- Az eseten nagy részében a V_H megegyezik a tápfeszültséggel, a V_L pedig a föld.
- A V_H - V_L mennyiséget hívjuk **swing**-nek.
- A tápfeszültség (VDD) és a föld (OV) különbséget pedig **RAIL**-nek.
 - (honnan jön a név? – a tápfeszültség és a föld széles vezetékei, mint egy sínpár húzódnak végig – a kapcsolási rajzon is és a fizikai valóságban is...)



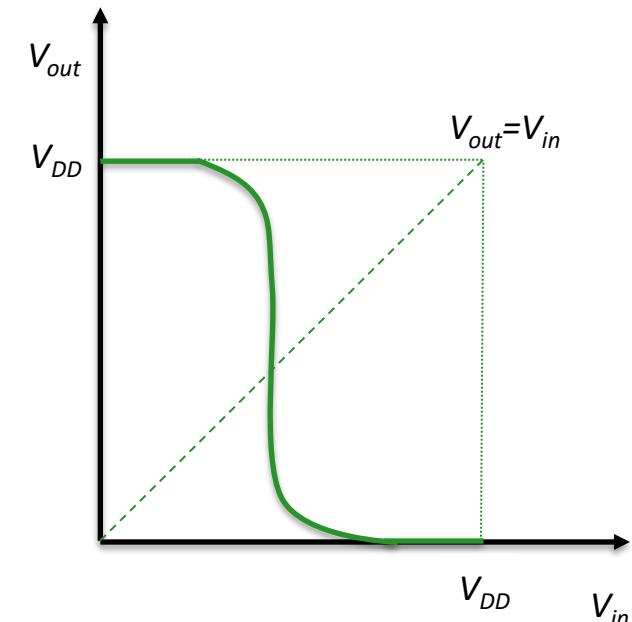
A transzfer karakterisztika

Az inverter az $V_L = f(V_H)$ ill $V_H = f(V_L)$ függvényt kell, hogy megvalósítsa.

Ez az ún. transfer karakterisztika

A komparálási feszültség az a feszültség, ami felett logikai 1, ami alatt pedig logikai 0-nak tekintünk egy jelet.

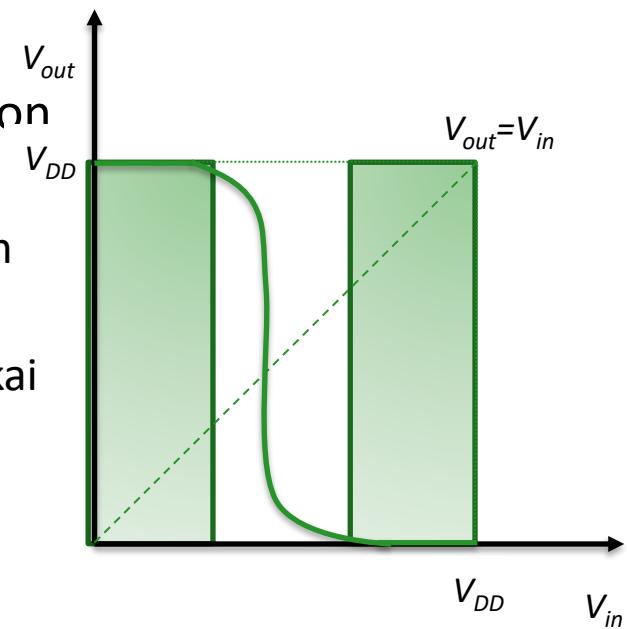
- Komparálási feszültségen: $V_{OUT} = V_{IN}$
- Azaz a transfer karakterisztika és a 45° -os egyenes metszéspontja.



Zaj/zavar védettség

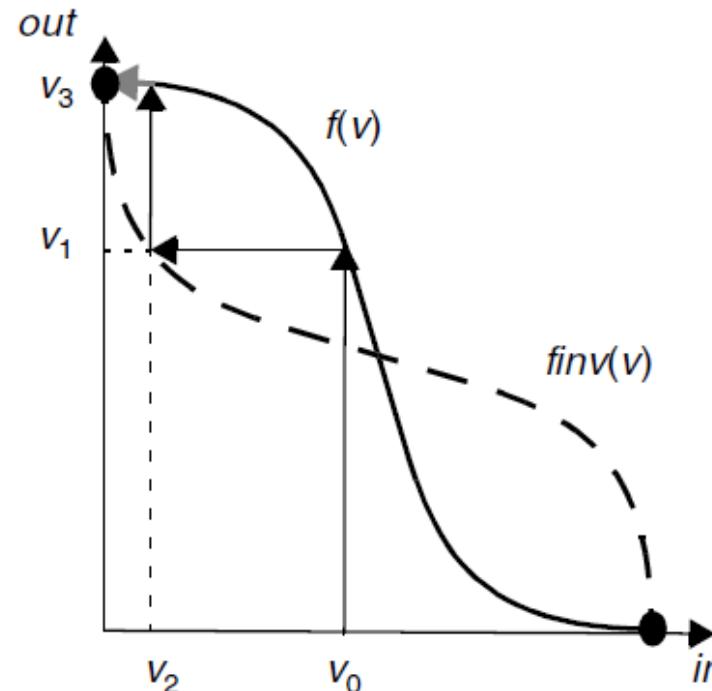
A karakterisztika három szakaszból áll:

- A két szélső szakasz laposan fut, azaz a bemeneten lévő feszültségváltozások csak nagyon kis változást okoznak a kimeneten.
 - Azaz ha a zaj/zavar ennél kisebb, a kimeneten nem jelenik meg, **elnyomja!**
 - Ez lehetőséget teremt arra, hogy biztonságos logikai szint tartományokat jelöljünk ki.
- A középső szakasz meredek.
 - (nagy az erősítése, azaz $A = \left| \frac{dV_{OUT}}{dV_{IN}} \right|$ nagy)
 - kis bemeneti megváltozásra nagy kimeneti feszültségváltozás történik



Jel-regeneráció

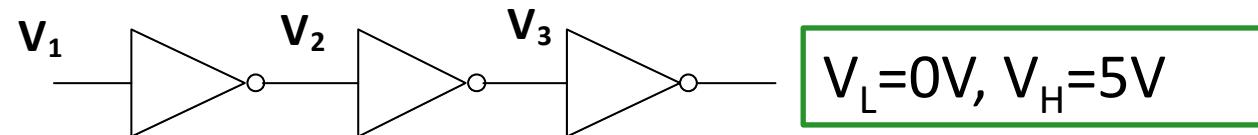
A digitális feldolgozás során a logikai jel szintje regenerálódik



- Ha egy ábrán ábrázoljuk a $f(V)$ transzfer karakterisztikát és $finv(V)$ inverzét, nagyon szemléletesen belátható.
- Így lesz egy „rossz” V_0 jelből egyre jobb V_1, V_2, V_3 feszültség.
- Így a digitális logikai kapunak két egyensúlyi helyzete van

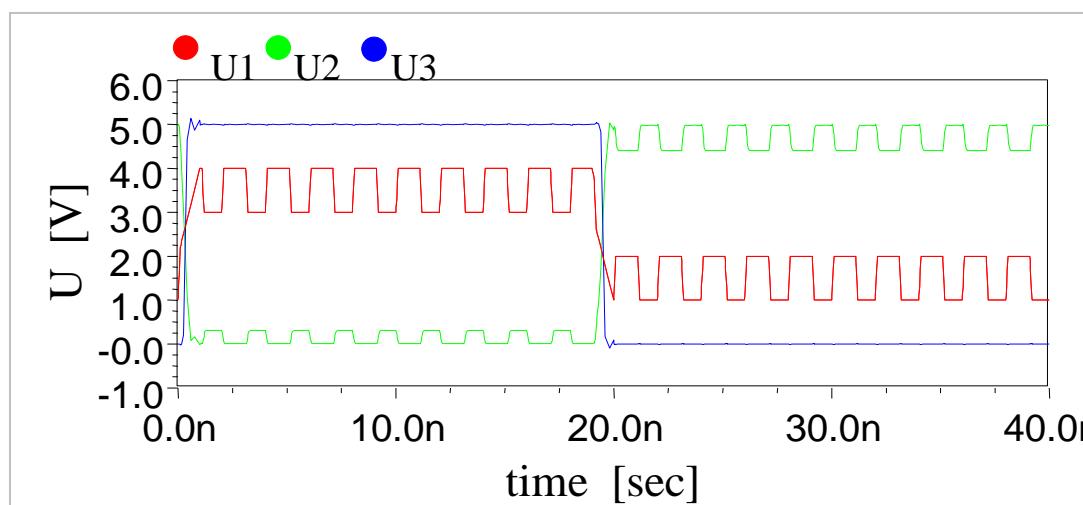


Példa: jelregeneráció (áramköri szimuláció)



Oktatási célú áramköri szimuláció, a valóság jobb!

- 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.
- Tehát a jelszint és a jel alakja is tökéletesen helyreállítódott



Robosztusság

A digitális logikai áramkör **ROBOSZTUS**

A működés lényege kevéssé érzékeny (természetesen a megadott abszolút határok között) többek között

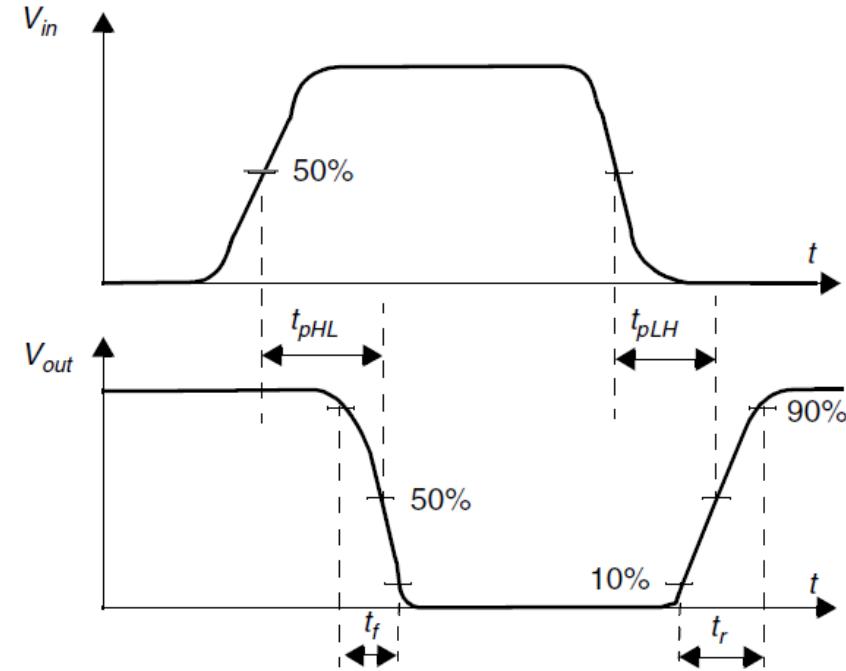
- A bemeneten lévő zaj-zavarra
- A tápfeszültség megváltozására
- A környezeti hőmérsékletre
- Az egyes elemi alkatrészek paramétereinek véletlenszerű megváltozására
- Stb.



Késleltetés

A logikai kapu nem végtelen sebességű

- Ennek oka a kapu nem tökéletes alkatrészkből épül fel, van egy belső késleltetés – (intrinsic delay)
- A késleltetést az 50%-on mérjük, a fel és lefutást a pedig a 10%-90% között.



A késleltetés függ attól, hogy a kimenet milyen irányban vált

- t_{pHl} – a kimenet magasról alacsony szintre vált
- t_{pLH} – a kimenet alacsonyról magas szintre vált

Ha egy logikai hálózatban megkeressük a leghosszabb késleltetésű útvonalat, ez lesz az ún. kritikus út. (**critical path**)

A kritikus út határozza meg a teljes hálózat sebességét.



Teljesítmény és energia

Vigyázat! Könnyű összekeverni, mert minden kettő szinonimájakként használjuk a „fogyasztás” szót (helytelenül)!

Teljesítmény = egységnyi idő felvett energia. (**Power**)

- Mértékegysége a Watt (J/s)
- $P = VI$
- átlagos teljesítmény: $P_{av} = \frac{V_{DD}}{T} \int_0^T I(t)dt$
- ahol V_{DD} a kapu tápfeszültsége, I pedig az árama.

Energia

- $E = \int P(t)dt$
- Mértékegysége a Joule (kWh)
- $1\text{kWh} = 1000\text{W} \cdot 3600\text{s} = 3,6\text{MJ}$



A teljesítmény-késleltetés szorzat (PDP)

A késleltetés és az elektromos teljesítmény **EGYSZERRE** jellemzik a digitális kaput.

- A kapu sebessége ugyanis attól fog függeni, milyen gyorsan lehet megváltoztatni a kapacitások energiáját.
- Kis késleltetést csak nagyobb teljesítményfelvétellel lehet elérni.

A késleltetés és az elektromos teljesítmény szorzata egy energia dimenziójú mennyiség

Ez az ún. **Power-Delay product**

- Szemléletesen azt mutatja meg, hogy egy bit feldolgozása mennyi energiát igényel.
- (pontosabban egy kapcsolási esemény mennyi energiát igényel)
- Ez a technológia **mérőszáma**
- Érdekesség: az elméleti határ az ún. Landauer limit, $kT \ln 2 \approx 3 \cdot 10^{-21} J$





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

CMOS logikai áramkörök



CMOS logikai áramkörök

Complementary MOS

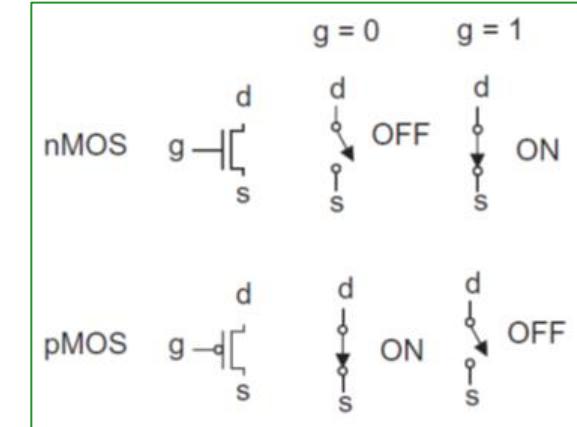
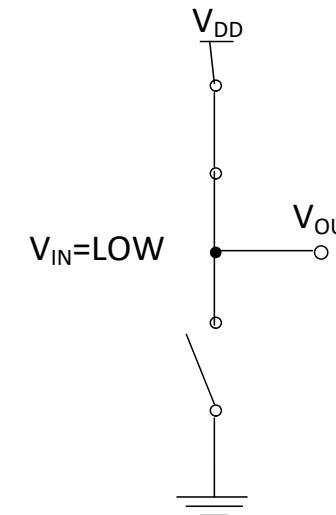
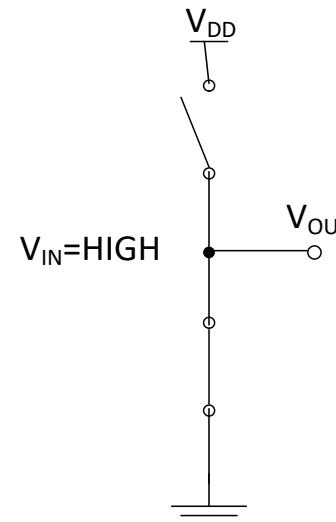
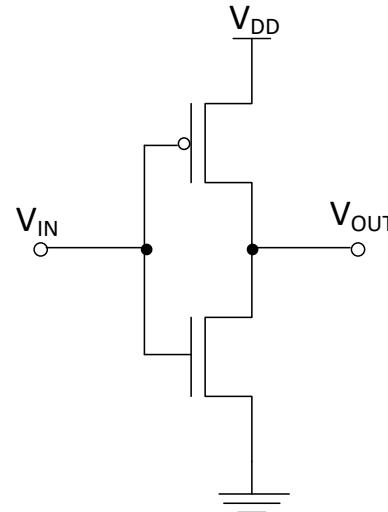
- n és p csatornás tranzisztorokból állnak a kapuk, innen származik a név

Manapság egyeduralkodó logikai áramkörökben

- 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.
- A jelváltozás esetén a fel és lekapcsolási késleltetések (nagyjából) megegyeznek. (szimmetrikus működésre méretezett kapuk esetén.)
- Tápfeszültség-érzéketlen, széles tápfeszültség tartományokban működik.
- Jól integrálható, a kapuk egyszerűek. (kevés tranzisztort igényelnek)
 - Mit jelent ez?
 - Egységnyi területre jóval több kapu fér, mint más technológiákban
 - Nem véletlen, hogy – a nagyon speciális, pl. nagyfrekvenciás területek kivételével minden más logikai áramkört kiszorított.



A CMOS inverter



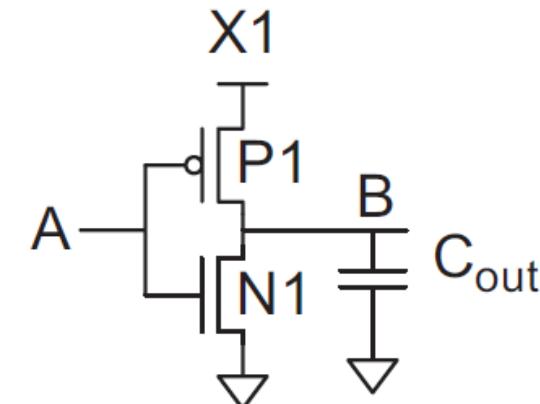
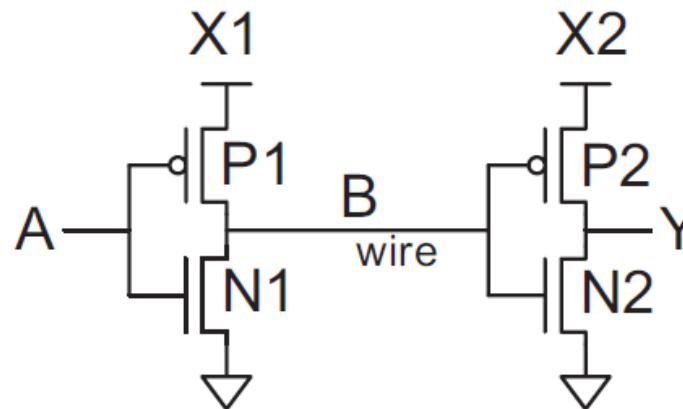
Egy n és egy p csatornás MOS tranzisztorból áll.

- Állandósult állapotban a két tranzisztor közül csak az egyik vezet, a másik minden szakadás.

Azaz, mint egy olyan kapcsoló, ami a kimenetre a bemeneti jel szintjétől függően vagy a tápfeszültséget, vagy a földet kapcsolja.



CMOS inverter (kapu) terhelése



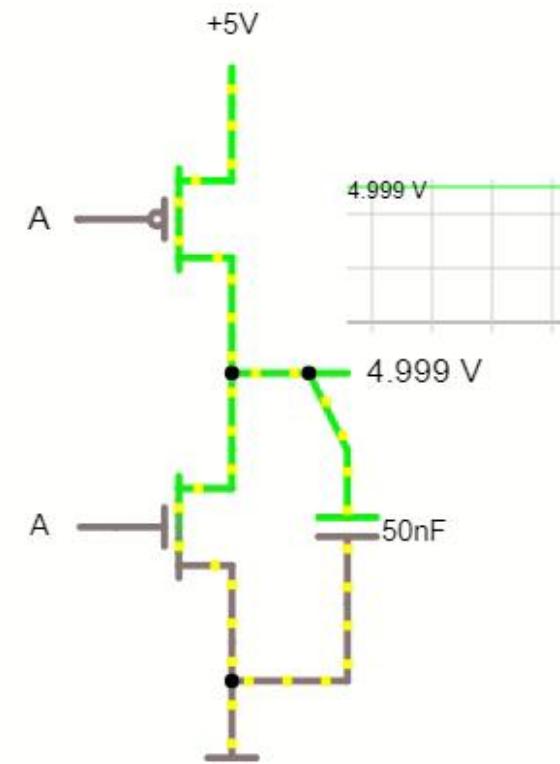
A terhelés kapacitív

- A tranzisztorok belső kapacitásai (intrinsic kapacitás)
 - Ezekről nem beszéltünk...
- A következő kapu bemenetének kapacitása
 - Ez látható a keresztmetszeti ábrán: a MOS tranzisztor gate-je mint egy síkkondenzátor
- Az összekötő vezeték kapacitása – **egy modern technológiában ez határozza meg a késleltetést leginkább.**



Szimuláció

L ————— A



Inverter

A késleltetés

Láttuk, hogy a késleltetést tulajdonképpen egy kapacitás töltésekisütése határozza meg.

Minél nagyobb a kapacitás, annál nagyobb a késleltetés (kb. arányosan)

A tápfeszültség növelésével a késleltetés csökken, mivel nagyobb árammal töltjük a kapacitásokat.

$$t_{pd} \sim \frac{Q}{I} = \frac{CV}{I}$$

- (a pontosság kedvéért: $Q = CV_{DD}$ de $I \sim V_{DD}^2$)
- Pontosan így működik a „turbo boost” pl. Intel processzorok esetén.
 - A magfeszültség növelésével a mikroprocesszort a névlegesnél magasabb órajelfrekvencián lehet járatni.
 - (de nem sokáig, csak ameddig a hőmérsékleti viszonyok megengedik)



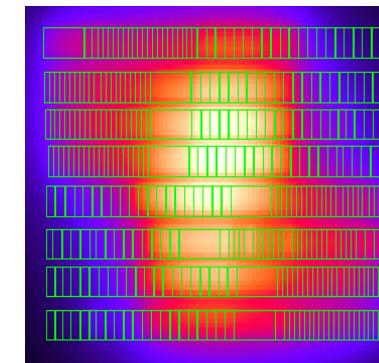
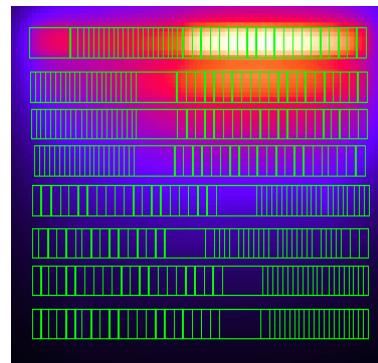
Teljesítmény

A statikus fogyasztás alacsony, oka a szivárgási áram. (leakage)

- Modern áramkörökben már nem hanyagolható el...

A dinamikus fogyasztás minden kapcsolási eseménynél fellép

- Arányos az eseménysűrűséggel, amit
 - az órajelfrekvencia és az áramkör aktivitása határoz meg.



A dinamikus fogyasztás

Két komponense van

- Átkapcsolás: a bemeneti jel felfutó szakaszában minden tranzisztor egyszerre nyitott.
 - (ha sok tranzisztor kapcsol egyszerre, pl. órajel váltáskor, akkor hirtelen áramcsúcs keletkezik, ennek csökkentésére találhatók a szűrőkapacitások az IC-k mellett)
- Töltéspumpálás
 - A dinamikus működés során a kimeneti kapacitást a jelváltáskor először tápfeszültségre töltjük.
 - Majd amikor logikai 0-ra vált a kimenet, kisütjük.
 - Azaz **szemléletesen** töltést pumpálunk a tápfeszültségből a föld irányába!

A fogyasztás legnagyobb részét a töltéspumpálás adja.



A töltéspumpálás

Tételezzük fel, hogy feltöltöttük a kimenetet!

- Ekkor a kapacitásban tárolt energia:

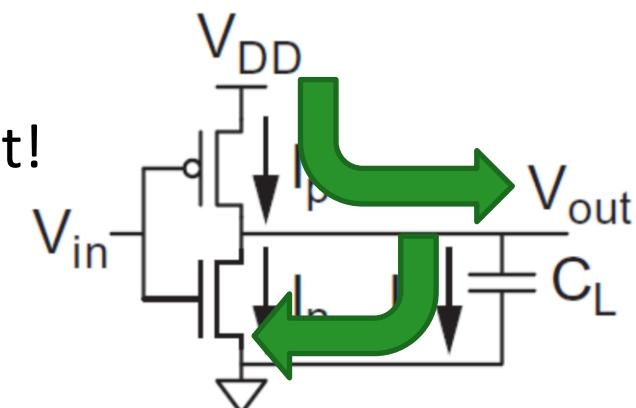
$$E_C = \frac{1}{2} C_L V_{DD}^2$$

- A tápfeszültség által szolgáltatott energia:

$$E = \int_0^\infty I(t) V_{DD} dt = \int_0^\infty C \frac{dV}{dt} V_{DD} dt = C V_{DD} \int_0^{V_{DD}} dV = C V_{DD}^2$$

Az energia fele a kapacitásba került, a másik fele „elveszett”, eldisszipálta a pMOS tranzisztor.

- Kisütéskor az nMOS tranzisztor fogja a töltést eltávolítani. Ilyenkor azonban a tápfeszültségből nem vesz fel energiát.



A töltéspumpálás

Ha T idő alatt f_{sw} frekvenciával kapcsolgatunk, akkor a kapacitást Tf_{sw} alkalommal töltjük fel és sütjük ki.

Így a szükséges teljesítmény:

$$P = \frac{E}{T} = fCV_{DD}^2$$

Ez általánosságban is igaz. Azaz egy CMOS áramkör fogyasztása egyenesen arányos az órajelfrekvenciával, és négyzetesen arányos a tápfeszültséggel!

$$P \sim fV_{DD}^2$$



Dynamic Voltage Frequency Scaling/SpeedStep/Speed Shift

Az OS az igényeknek megfelelően változtatja a mikroprocesszor órajelfrekvenciáját és tápfeszültségét.

Miért is?

- Nagyobb órajelhez nagyobb tápfeszültség szükséges!
- Csökkentett órajel esetén kevesebbel is beéri.
- A felvett teljesítmény viszont NÉGYZETESEN változik a tápfeszültséggel.

Csak azt a magot kapcsoljuk nagyobb órajelfrekvenciára, amire valóban szükség van.

big.LITTLE (DynamIQ)

- Különböző teljesítményű magok.
- (architektúra és/vagy technológia)
- Mindig a tasknak megfelelő processzort választja ki a rendszer.



Energia (J, kWh, Ah, akkumulátoridő, Ft)

Energiahatékony működés nem csak azt jelenti, hogy kicsi a teljesítmény

Pl. egy processzor esetén azt is kell vizsgálni, mennyi ideig tart egy adott taszk. Ha f frekvenciájú az órajel és a taszk N órajel alatt fut le, akkor

$$E = P \cdot t = P \cdot \frac{N}{f} = \text{const } f V_{DD}^2 \cdot \frac{N}{f} = \text{const} \cdot N V_{DD}^2$$

Azaz a felhasznált energia az **órajelek számával és tápfeszültség négyzetével** arányos. Önmagában a frekvencia csökkentése energiahatékony működés szempontjából egy feldolgozás jellegű taszk esetén nem sokat ér. A teljesítmény csökken, de felhasznált energia nem változik, mert a taszk arányosan tovább tart.



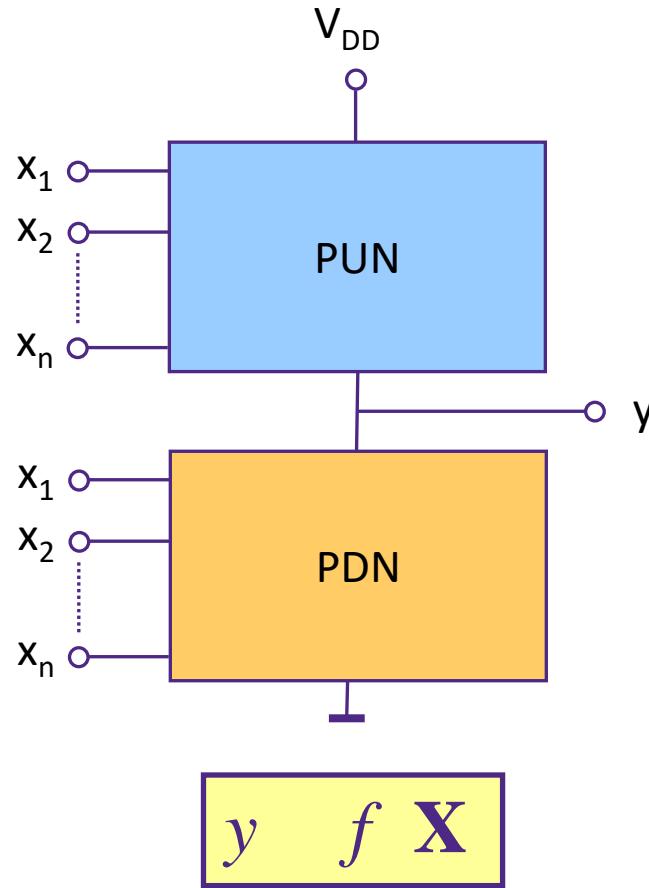


Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Statikus CMOS alapkapuk



CMOS kapu felépítése



A kapuk esetében egy p csatornás tranzisztorokból álló „pull up” (PUN) ill. n csatornás tranzisztorokból álló „pull down” hálózat (PDN) alkotja a kaput, minden hálózat annyi tranzisztorból áll, ahány bemenete van a függvénynek

pull up network

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

pull down network

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



CMOS kapu felépítése

Kapcsoló jellegű működés:

- ÉS jellegű kapcsolatot két tranzisztor(vagy hálózatrész) soros kapcsolása ad.
- VAGY jellegű kapcsolatot pedig két tranzisztor (vagy hálózatrész) párhuzamos kapcsolása ad.

A PUN és a PDN működése ellentétes. Amikor az egyik vezet, a másiknak szakadást kell adnia és fordítva

- Reciprok hálózat
- (Ez bonyolultan hangzik. Arról van szó, hogy amit az egyik hálózatban sorba kapcsoltunk, a reciprok hálózatban párhuzamosan kell kapcsolni és fordítva. Ld. a következő dián)

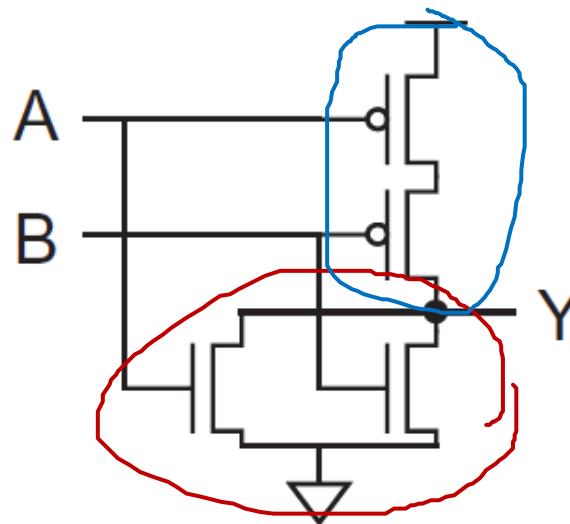


CMOS NOR kapu

A pull down network két párhuzamosan kötött nMOS tranzisztorból áll, a pull up pedig két sorbakapcsolt pMOS-ból.

Ha minden bemenet 0, akkor minden pMOS vezet és egyik nMOS sem vezet. Így a kimenet 1.

Ha A vagy B bemenet igaz, valamelyik nMOS tranzisztor vezet, a hozzá tartozó pMOS viszont lezár, így a kimenet 0 lesz.

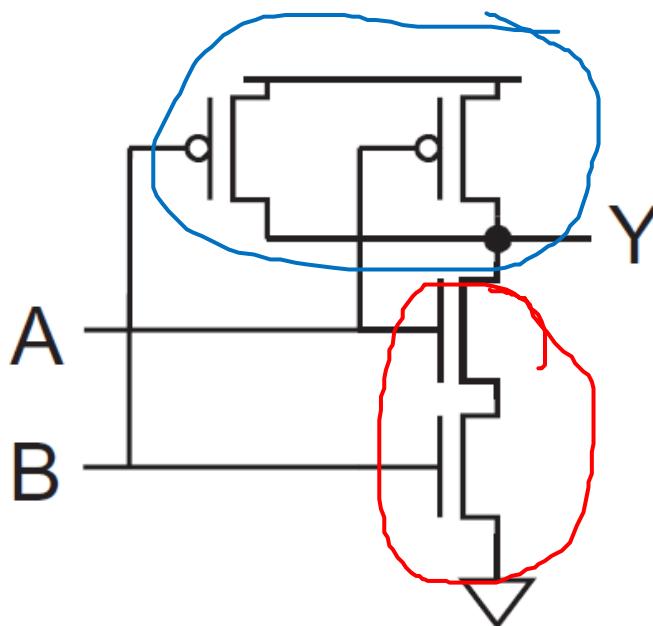


$$Y = \overline{A + B} = \bar{A} \cdot \bar{B}$$



CMOS NAND kapu

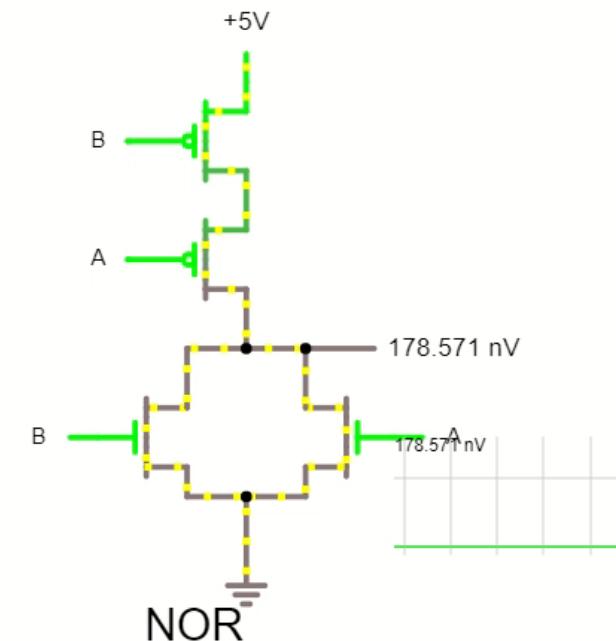
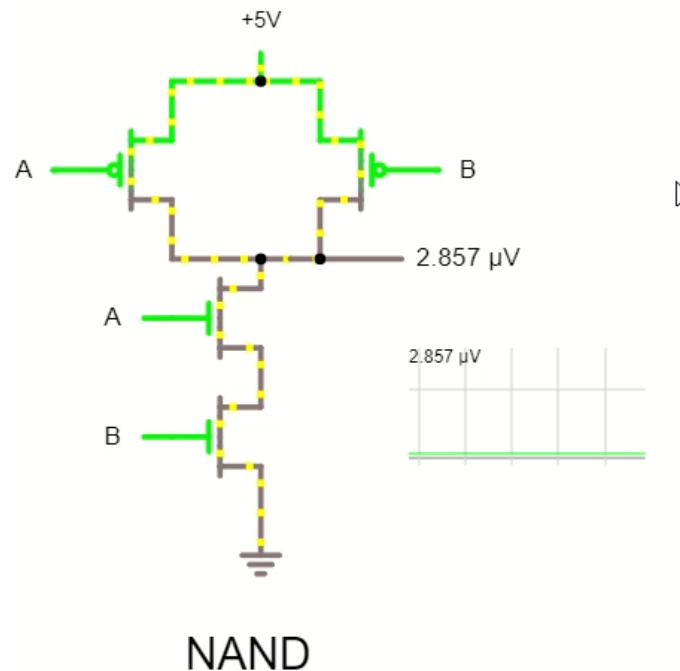
A pull-down network most két, sorba kötött nMOS tranzisztorból áll, a pull-up pedig két párhuzamosan kötött pMOS-ból.



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



Szimuláció



Források, ajánlott irodalom, érdekességek

1. Félvezető eszközök működése

- Dr. Székely Vladimír: Elektronika 1. Félvezető eszközök (Műegyetemi Kiadó, 2001)

2. A pn átmenet működése

3. MOS tranzisztor legegyszerűbb modellje és számítások 2. IMSC feladat

4. Egyenirányító dióda szimulációja

5. Intel Turbo Boost

6. Intel Speed Shift technológia

7. Digitális alapáramkörök szimulációja

8. Intel Extreme Tuning Utility

9. Intel Power Gadget



IT eszközök technológiája

3. előadás

Komplex kapuk megvalósítása

A transzfer kapu

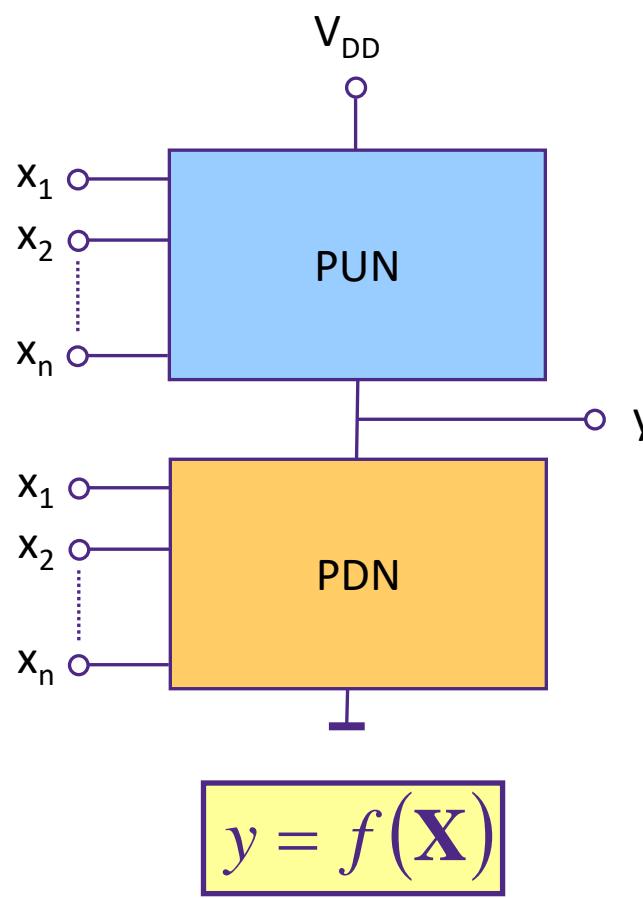
Tárolók (Regiszterek)

Nagysebességű CMOS logika

Aritmetika



CMOS kapu felépítése / emlékeztető



- A kapuk esetében egy p csatornás tranzisztorokból álló „pull up” (PUN) ill. n csatornás tranzisztorokból álló „pull down” hálózat (PDN) alkotja a kaput, minden hálózat annyi tranzisztorból áll, ahány bemenete van a függvénynek
- pull up network
 - p-csatornás tranzisztorok
 - rövidzár, ha $f(\mathbf{X})=1$
 - szakadás, ha $f(\mathbf{X})=0$
- pull down network
 - n-csatornás tranzisztorok
 - rövidzár, ha $f(\mathbf{X})=0$
 - szakadás, ha $f(\mathbf{X})=1$



Komplex kapuk

- Tranzisztor szinten tudunk bonyolultabb (nem alapvető) logikai függvényeket megvalósítani.
- Általában maximum 4 bemenettel, az és ill. vagy függvényeket kombináljuk.
- Például:
 - OAI21
 - $Y = \overline{(A + B)C}$
 - AOI22
 - $Y = \overline{AB + CD}$
- Általában n bemenet és/vagy kombinációja $2n$ tranzisztor segítségével megvalósítható.
 - Ha feltételezzük, hogy a bemenet ponált és negált változata is rendelkezésre áll
- Mivel egy kapu, a késleltetés a többszintű realizációhoz képest kedvezőbb.
- A többszintű realizációhoz képest kevesebb tranzisztort tartalmaz.



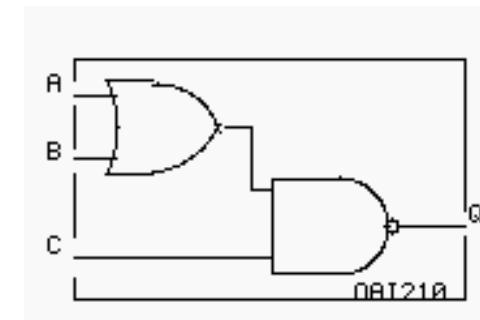
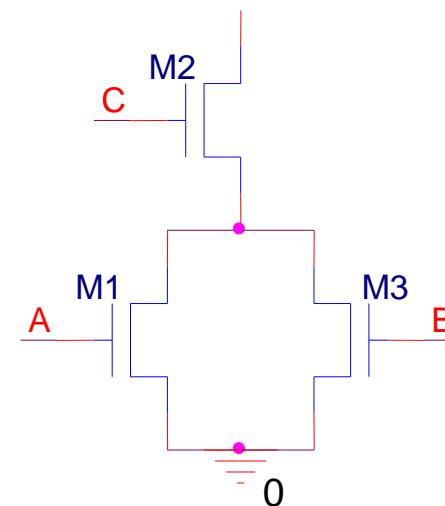
Példa

- Tervezzük meg az $Y = \overline{(A + B)C}$ függvényt megvalósító 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 áramutat kell biztosítani, a függvényben szereplő összegnek párhuzamosan, a szorzatoknak sorba kapcsolt hálózatrészek felelnek meg.

- Itt tartunk:

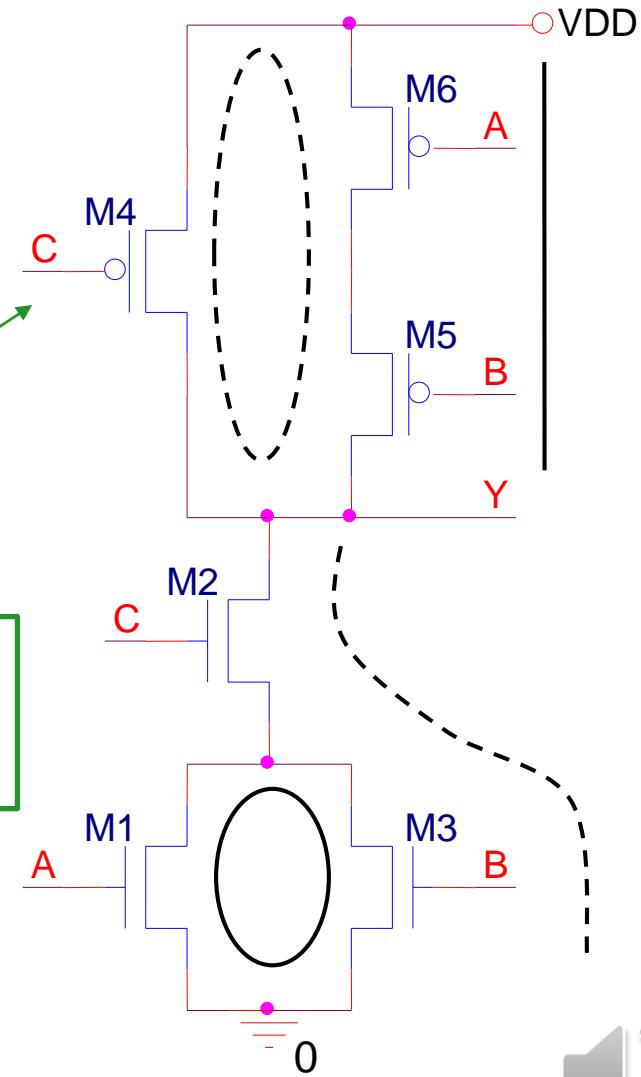


Példa, folytatás

- A második lépés PUN (pull-up network) megtervezése, ezt a p vezetéses tranzisztorokkal kell megvalósítani.
 - A pull-up network a negált függvény minden értékéhez a tápfeszültség és a föld között áramutat kell, hogy biztosítson.
 - $$Y = \overline{C(A + B)} = \bar{C} + \overline{A + B} = \bar{C} + \bar{A}$$

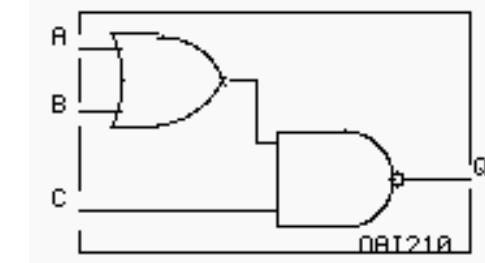


Vigyázat! A PUN is ugyanazt a vezérlést kapja, tehát semmiképpen sem negáltat! (a pMOS logikai 0-nál vezet!)

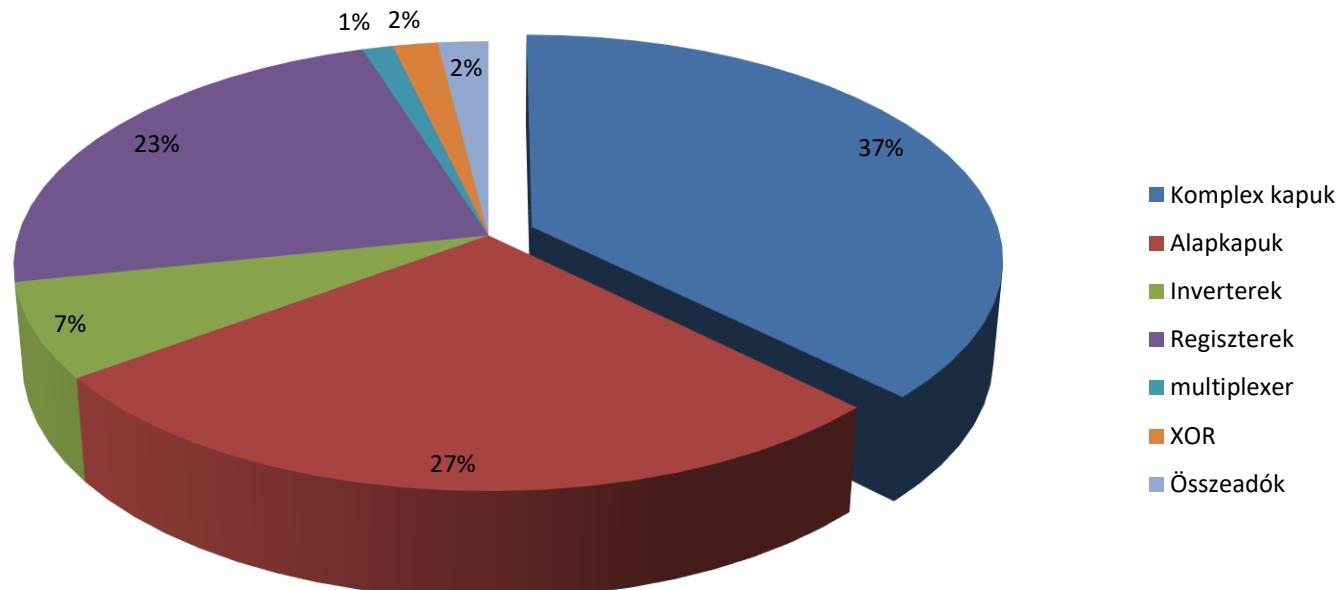


Összehasonlítás

- A kétszintű változat
 - OR nincs, tehát NOR + inverter és egy NAND kapu
 - Összesen $4 + 2 + 4 = 10$ tranzisztor
 - Az (intrinsic) késleltetés $A \rightarrow Q$ ill. $B \rightarrow Q$ irányban kb. háromszorosa a $C \rightarrow Q$ iránynak
- Ha nem foglalkozunk az invertálással
 - $Q = \overline{(A + B)C} = \overline{A + B} + \bar{C}$
 - Két darab kétbemenetű NOR kapu, 8 tranzisztor
 - A késleltetés $A \rightarrow Q$ ill. $B \rightarrow Q$ irányban kb. kétszerese a $C \rightarrow Q$ iránynak
- Komplex kapu
 - 6 tranzisztor
 - A késleltetések közel egyformák (ha jól van méretezve a kapu)

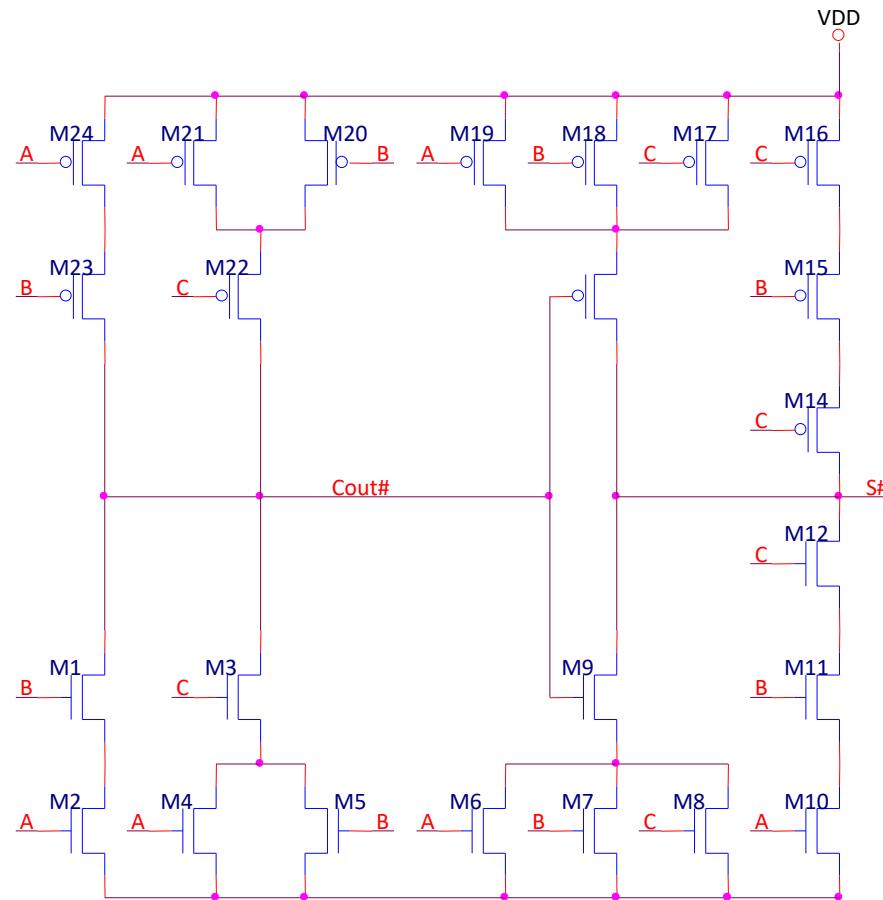


6502 processzor mag, kb. 12000 tranzisztor



Teljes összeadó (full adder)

- Minden aritmetikai áramkör alapja
 - Összeadó, számláló, komparátor stb.
 - A teljes összeadónál – ha több bites számokat adunk össze – a kritikus út a carry lesz.
- Ezt kihasználva a carry-t felhasználjuk az összeg képzésekor:
 - $C_{OUT} = AB + C(A + B)$
 - $S = ABC + (A + B + C)\overline{C_{OUT}}$
 - 24 tranzisztor + a 4 a két inverter.
- A kapcsolás teljesen szimmetrikus
- Először a carry készül el, majd utána az összeg.



■ Mitől lesz szimmetrikus?

- Filozófikus magyarázat: muszáj annak lennie, mert nem biztos, hogy az '0' számjegy a logikai hamis. Fordítva is működik, sőt! (általában váltott logikát használnak, hogy ne kelljen invertálgatni)
- Bizonyítás (De Morgan hegyek)
- $\overline{AB + C(A + B)} = \overline{AB} \cdot \overline{C(A + B)} = (\bar{A} + \bar{B})(\bar{C} + \overline{A + B}) = \bar{C}(\bar{A} + \bar{B}) + (\bar{A} + \bar{B})\overline{A + B}$
- És $(\bar{A} + \bar{B})\overline{A + B} = (\bar{A} + \bar{B})\bar{A}\bar{B} = \bar{A}\bar{B}$
- Azaz
 $\overline{AB + C(A + B)} = \bar{A}\bar{B} + \bar{C}(\bar{A} + \bar{B})$



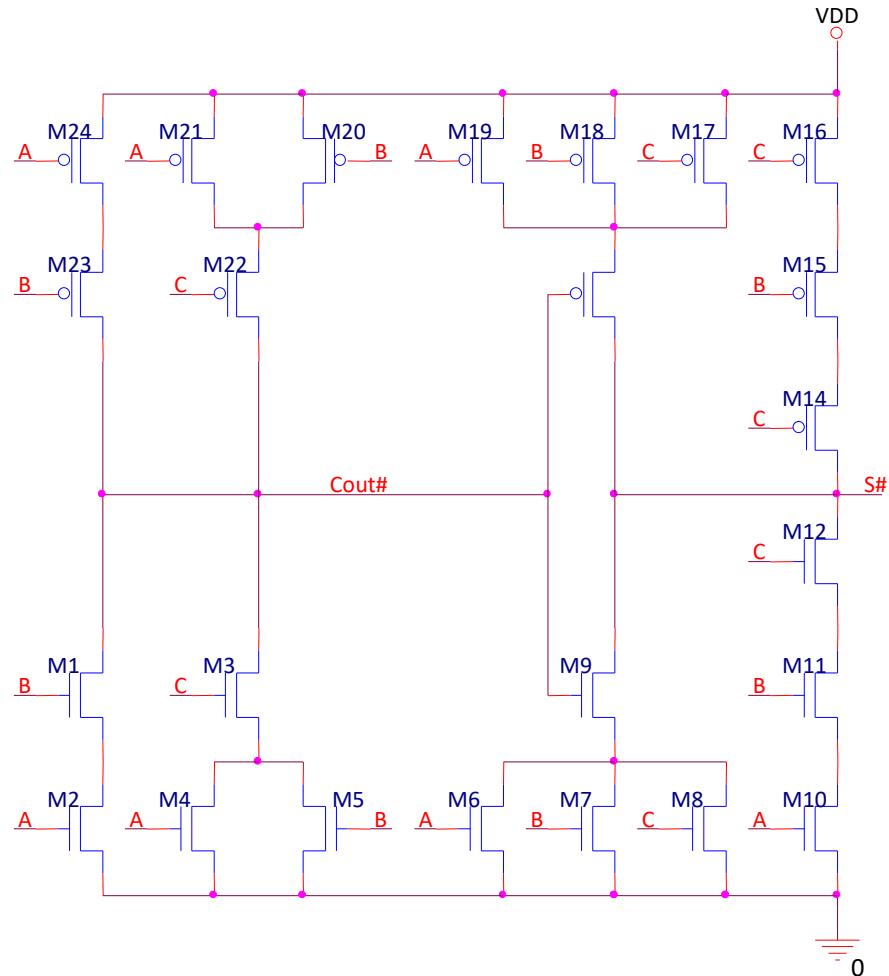
Egy komplex mintapélda – teljes összeadó

- Miért pont a carry-t emeljük ki?
- $C_{OUT} = AB + C(A + B)$

Matematikailag ez egy többségi kapu.
(majority)

$$C_{OUT} = AB + AC + BC$$

- Az átvitel az előző fokozatból jön, és az a kritikus út. Így csak 1-1 nMOS és pMOS tranzisztor gate-je van kötve, így gyorsabb lesz.





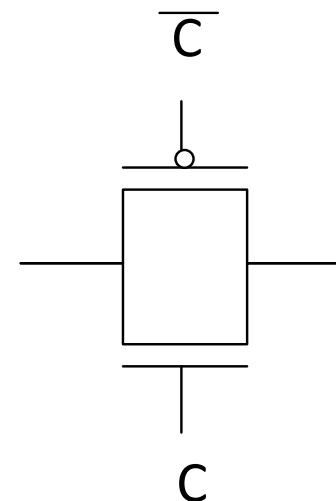
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

A CMOS transzfer kapu



CMOS transzfer kapu

- A jelfolyam útjába helyezett kapcsoló.
- CMOS kivitelben egy n és egy p típusú tranzisztort kapcsolnak össze, a vezérlő jelek egymás inverzei.
 - A tranzisztorról eddig tanultak alapján erre nem lenne szükség, de a valós tranzisztor karakteristikái miatt ezt így kell csinálni
- Transzfer kapuk alkalmazásával tovább egyszerűsíthetők az áramkörök.

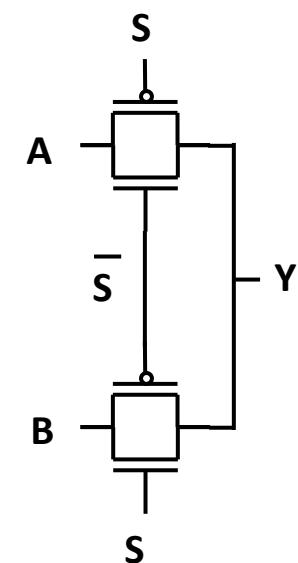


C=0 -> szakadás
C=1 -> rövidzár

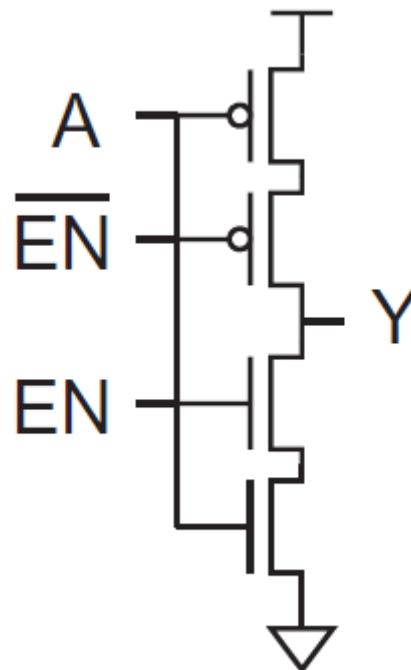


Transzfer kapuk alkalmazása

- Bizonyos funkciók transzfer kapuk alkalmazásával jóval egyszerűbben, kevesebb tranzisztorral valósíthatóak meg.
- Tipikusan a kiválasztó jellegű funkciók ilyenek.
 - Sok függvény ide vezet.
 - Programozható logikák egy részében a kiválasztás így történik. (Id. FPGA)
- Tekintsünk például egy kétbemenetű multiplexert!
 - $Y = A\bar{S} + BS$
- Komplex kapuval 8 tranzisztor szükséges, a transzfer kapus pedig csak 4 tranzisztorból áll!



Órajel vezérelt CMOS (Clocked CMOS, C²MOS)



- Háromállapotú (tri-state kapu)
 - Buszok meghajtására
- EN=0 – a kimenet lebeg
- EN=1 – a kimenet a bemenet inverze.





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

CMOS tárolók

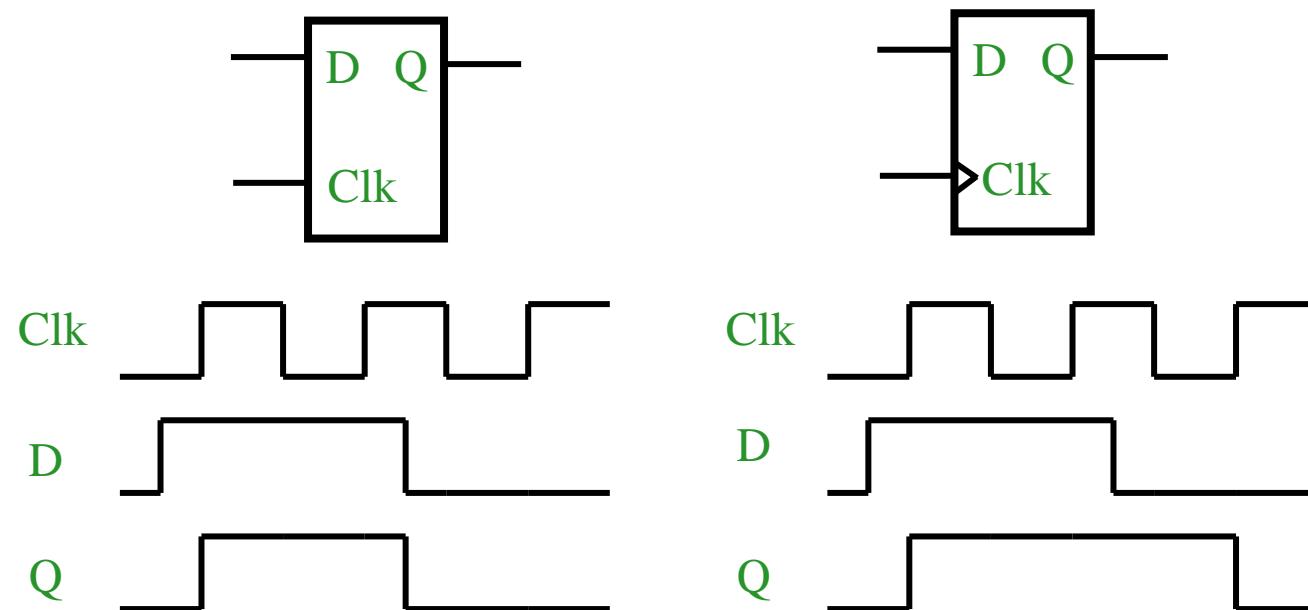
Latch

Flip-flop / regiszter



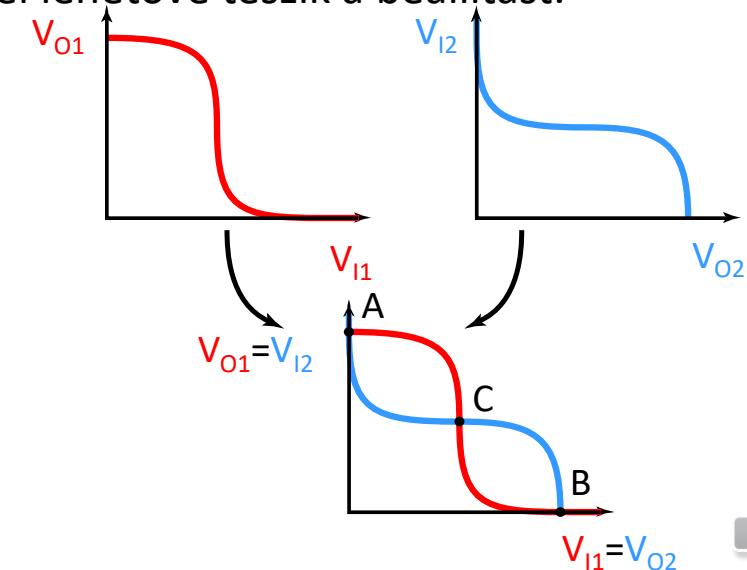
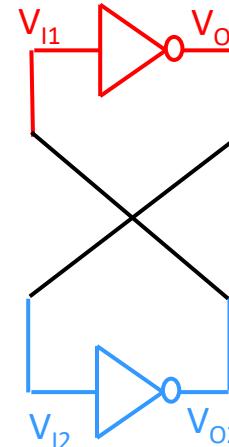
Latch és flip-flop

- Sok helyen ekvivalens a két fogalom. Ebben az anyagban így használjuk:
 - latch: az engedélyezett latch átlátszó, a bemeneti változás (késleltetés után a kimenetre jut), tehát **SZINTVEZÉRELT**
 - flip-flop: a beírás az órajel fel vagy lefutó élére történik, tehát **ÉLVEZÉRELT**



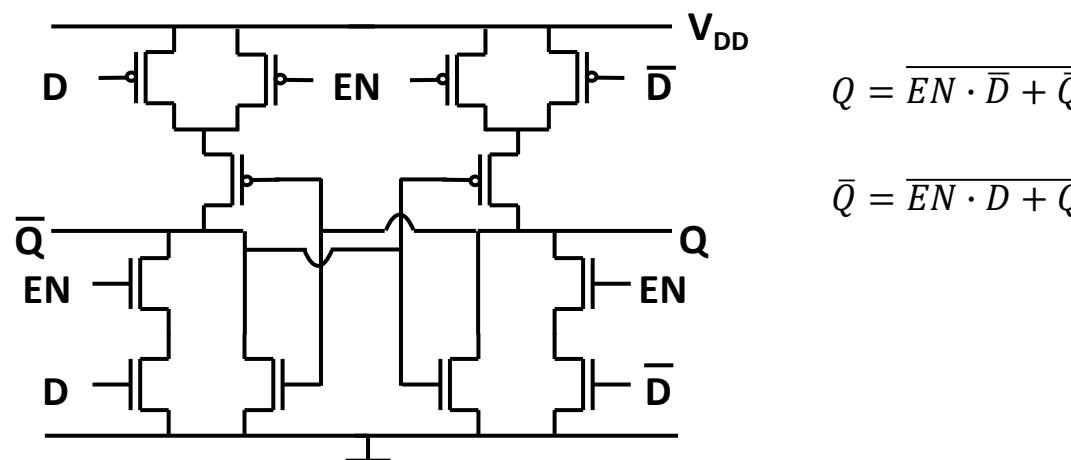
A tárolás alapelve

- Két állapotú (bistabil) áramkörök alapja: két, gyűrűbe kapcsolt inverter
 - Ennek az elrendezésnek két stabil állapota van (A, B)
 - (ezen kívül egy metastabil, (C) ekkor minden feszültség a komparálási feszültség, de az inverter karakterisztika gondoskodik róla, hogy ebben az állapotban ne maradjon meg – ezt csak szimulátorban lehet előállítani.)
- Ahhoz, hogy tárolóként lehessen használni, írhatóvá kell tenni.
 - Az invertálási funkciót megtartva az inverterek helyett negált kimenetű logikai kapukat használunk, amelyeknek a további bemenetei lehetővé teszik a beállítást.



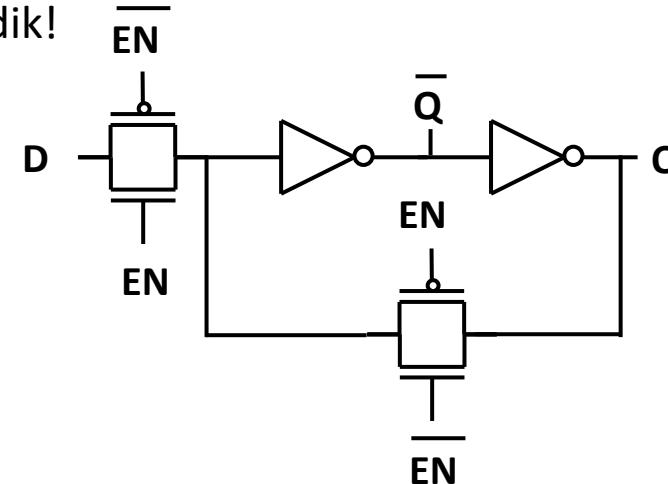
Tárolók felépítése

- Természetesen van lehetőség kapukból felépíteni a tárolókat, de ez tranzisztorszám szempontjából nem lesz kedvező.
 - Pl. SR latch engedélyező bemenettel felépíthető négy kétbemenetű NAND kapuból
- Kihasználjuk a CMOS áramkörökben könnyű komplex kaput készíteni (12 tranzisztor)
 - Két AOI (and-or-invert, $Y = \overline{AB + C}$) kapuból pl. lehet D-latchet készíteni.



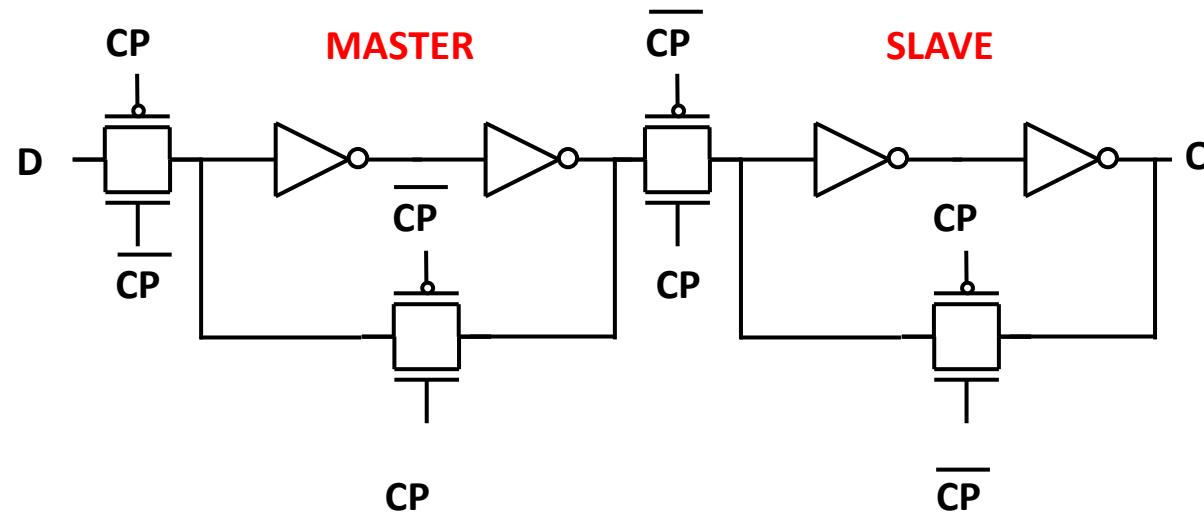
D-latch transfer kapuval

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



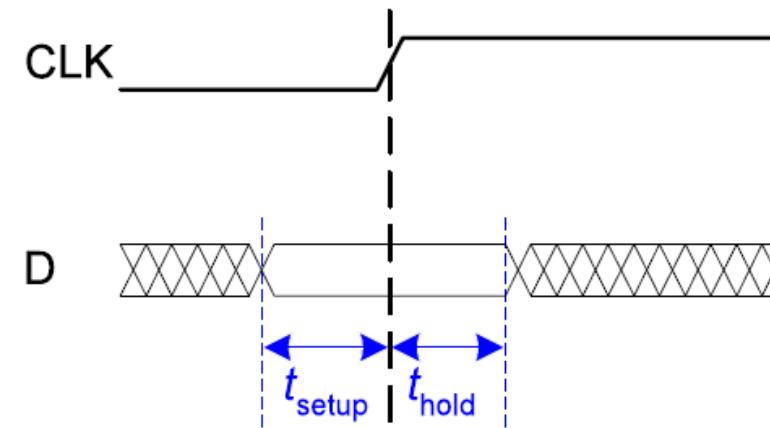
D-flipflop

- A master-slave flip-flop két sorbakötött, ellenütemű órajellel vezérelt latch
- CP alacsony szintjén az első tároló átlátszó.
- CP felfutó élére a master nemátlátszó lesz és a tartalom a slave-be íródik



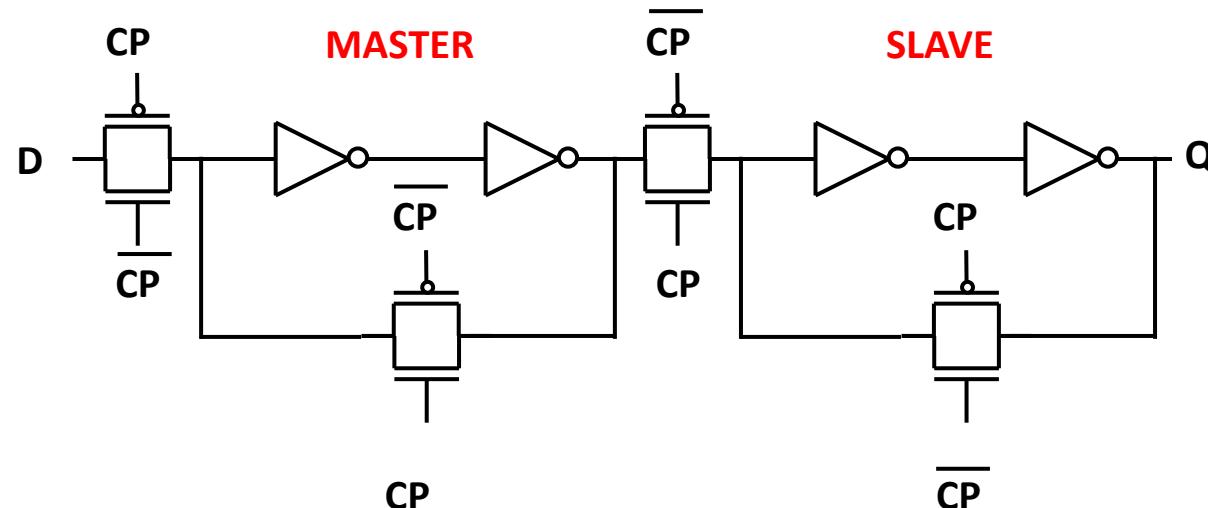
Flip-flop-ok időzítése

- Setup time: az órajel **aktív éle** előtt a mintavételezett adatnak stabilnak kell már lennie.
- Hold time: az **órajel aktív éle** után ennyi ideig nem szabad megváltozna.



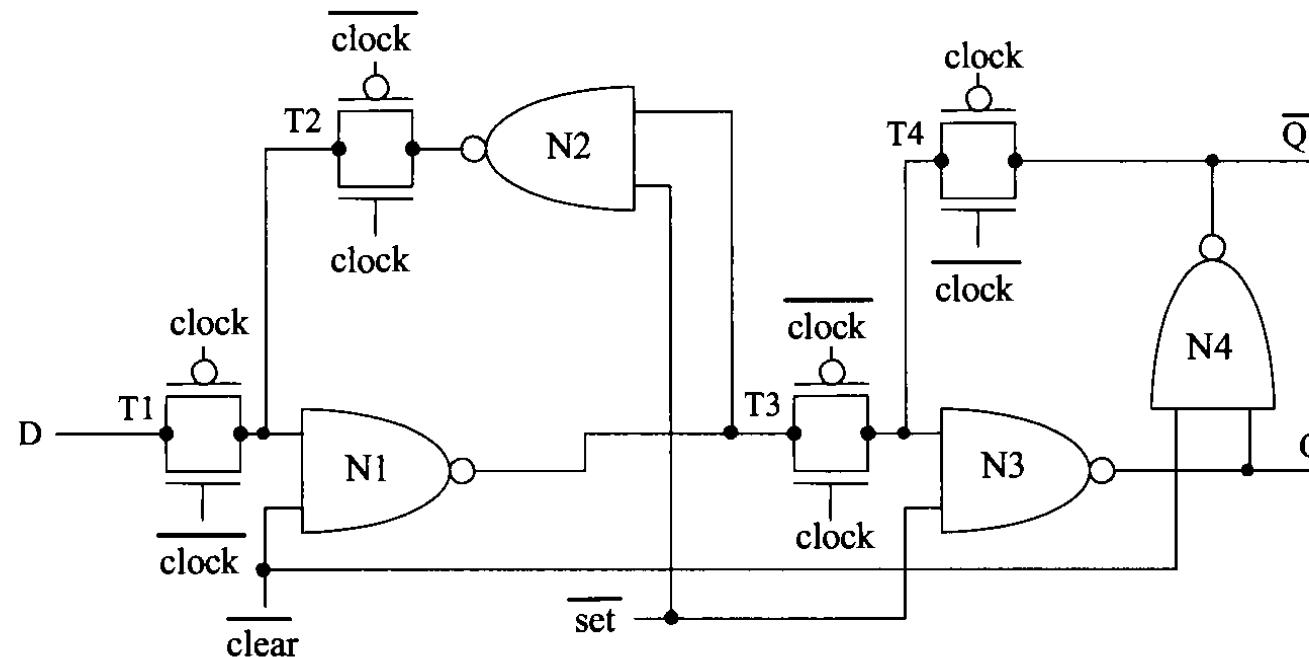
D-flipflop időzítései

- $t_{SETUP} > t_{PGTG} + 2t_{PGINV}$
 - Egy transzfer kapun és két inverteren kell keresztülhaladnia a bemenetnek, mire a mintavétel megtörténik.
 - Azaz az órajel felfutó éle előtt már stabilnak kell lennie.
- $t_{HOLD} > t_{PGTG}$
 - Amíg a MASTER transzfer gate-je elzáródik, addig nem szabad, hogy a bemenet megváltozzon



D flip-flop aszinkron clear és set-tel.

- A gyűrűbe kapcsolt inverter helyett (az invertáló funkciót megtartva) kétbemenetű kapukat használunk.
- Például:





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Nagysebességű CMOS logika

Áramköri lehetőségek a késleltetés csökkentésére



Nagysebességű CMOS logika

- A statikus CMOS logika késleltetése

- $t_{pd} \sim \frac{CV}{I}$

- Technológia gyorsítási lehetőségek:

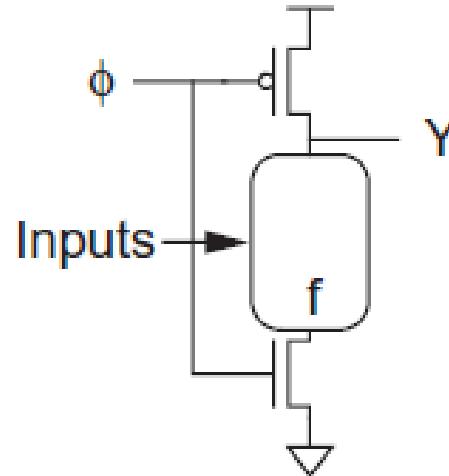
- A kapacitások csökkentése
- Az áram növelése (úgy, hogy a méret csökken!)

- Áramköri lehetőségek:

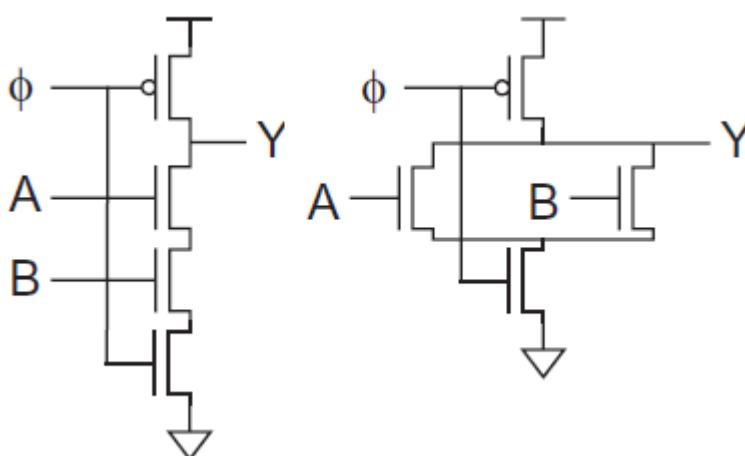
- A logikai szint távolság (swing) csökkentése és differenciális logika
 - Két feszültségszint különbségének előjele adja a logikai értéket.
 - SCL – ún. source-coupled logic. Csak megemlítjük.
- Kihasználjuk a mindenütt jelenlévő *szórt kapacitást* logikai szint *ideiglenes tárolására*
 - Ezáltal területet nyerünk és kapacitást csökkentünk, tehát gyorsabb lesz
 - CMOS domino logika, dinamikus tárolók



CMOS dominó logika



- A kimenetet terhelő szort kapacitást előtöltsük. (precharge)
- $\Phi=0$: előtöltés tápfeszültségre.
 - Ilyenkor pMOS nyitott, nMOS zárt, a pMOS tranzisztor előtölti a kimenetet logikai 1-re
- $\Phi=1$: kiértékelés



A pull-down network a bemenetek állapotától függően vagy eltávolítja a szort kapacitás töltését, vagy meghagyja

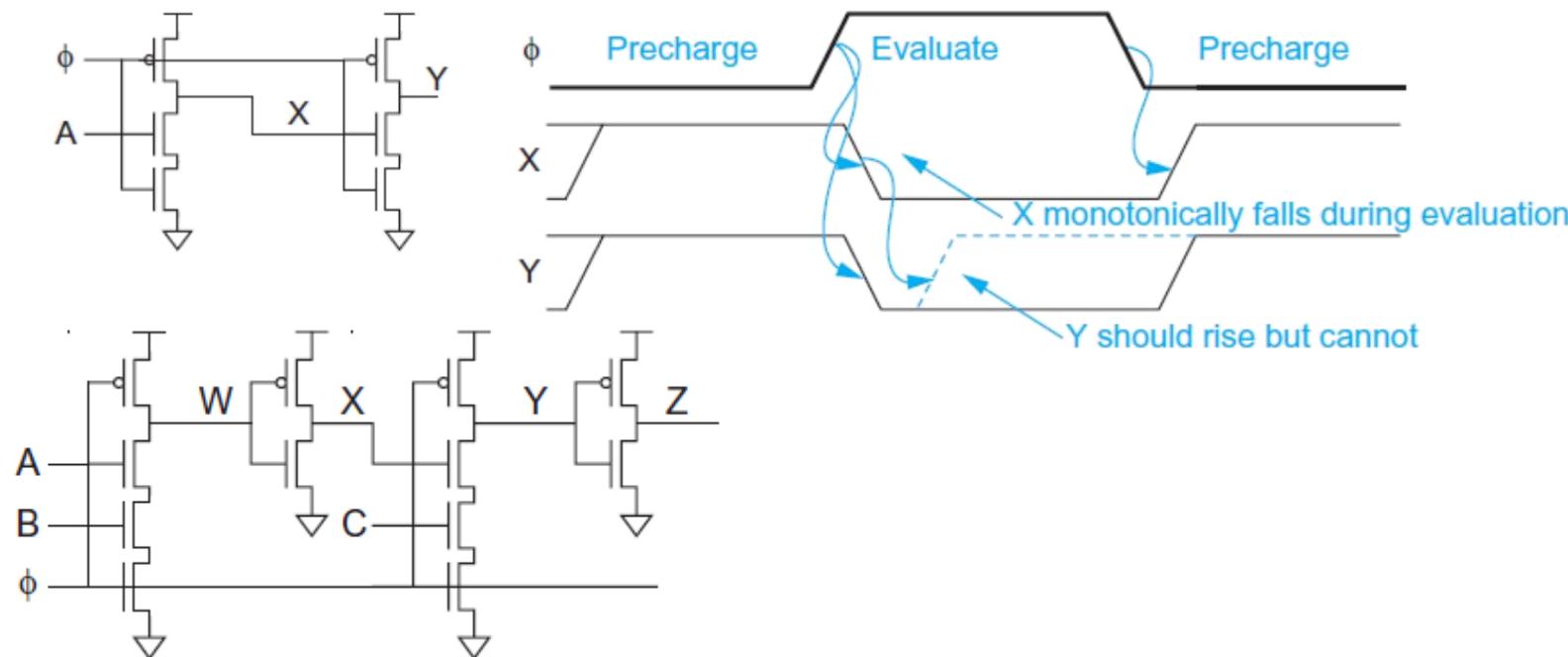
Előnyök:

- N bemenetű függvényhez $N+2$ tranzisztor szükséges
- Azaz gyorsabb, hiszen az előző fokozatot kisebb kapacitás terheli.



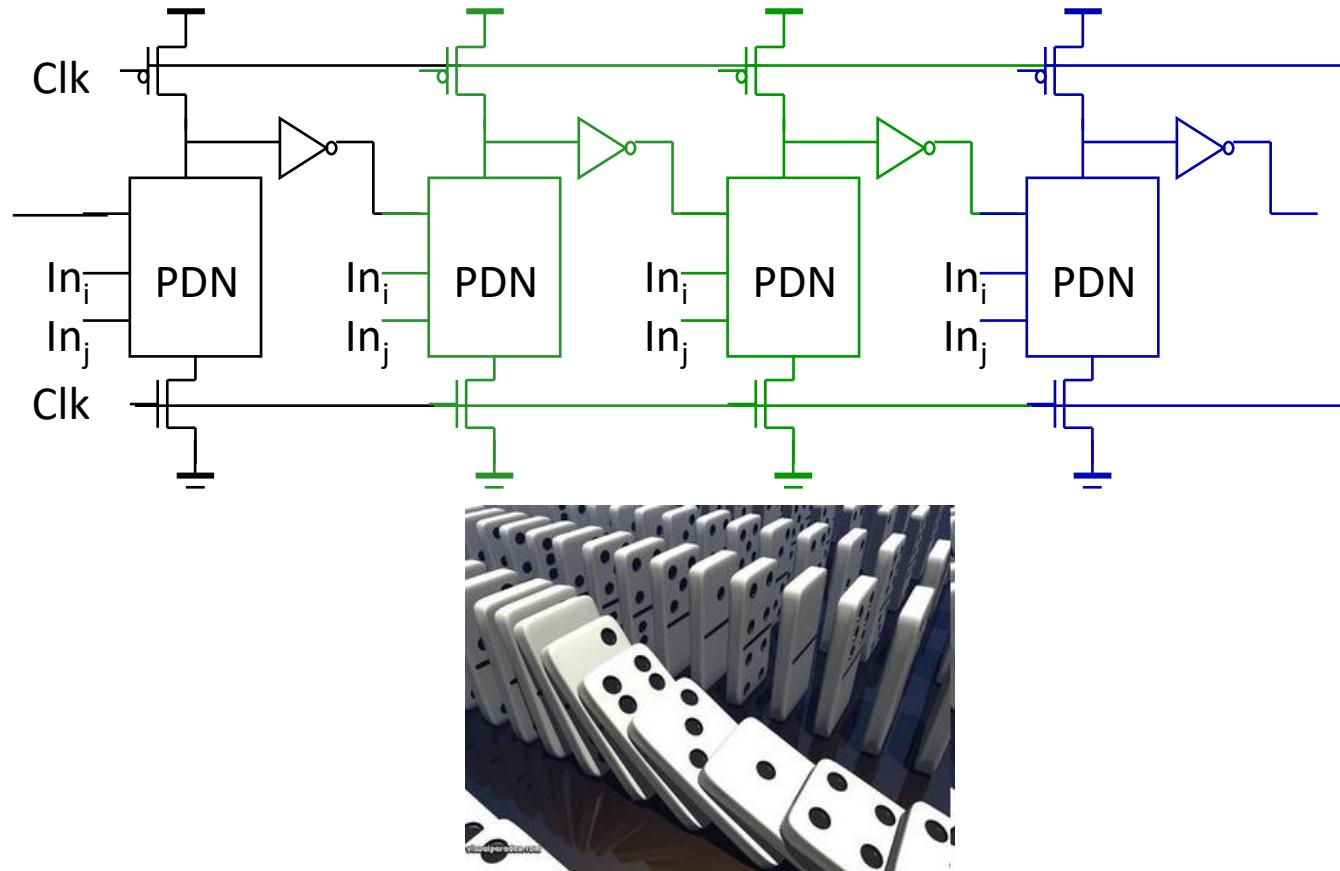
CMOS dominó logika

- A kapuk összekapcsolásakor vigyázni kell!
 - A kiértékelési fázis elején, ha függvény értéke 0 kellene, hogy legyen, egy hamis logikai 1 van a kimeneten egy rövid ideig.
 - Ez a következő kapu tranzisztorát kinyithatja, így a kapacitás töltése sérül.
 - Csak egy inverteren keresztül köthetjük a következő kaput. (a hamis logikai 0 gondot nem okoz.)



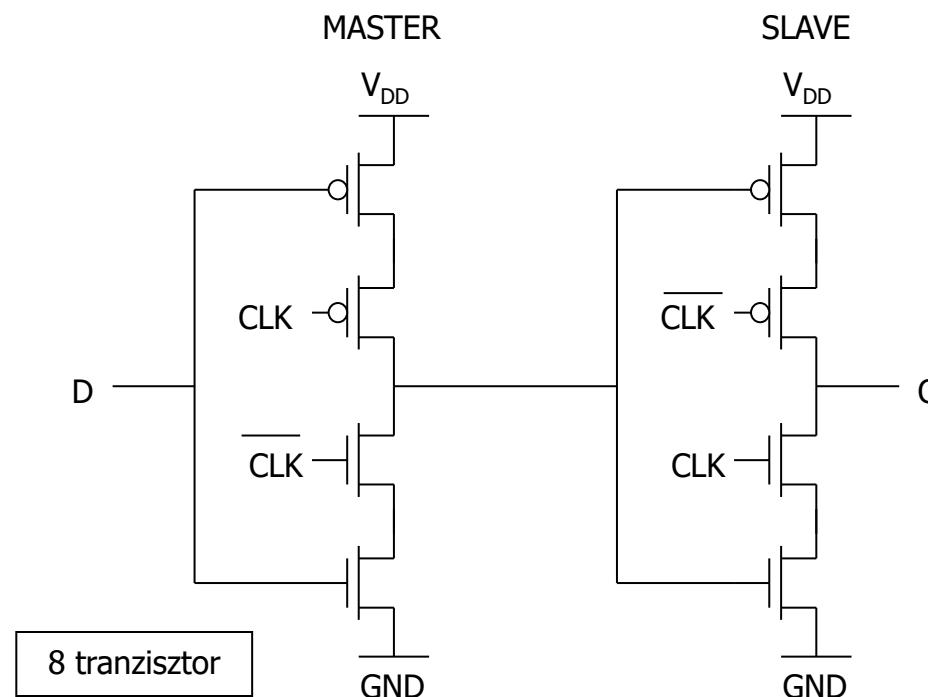
CMOS dominó logika

- Kb. 1,5× gyorsabb, mint a statikus CMOS



Dinamikus D flip-flop

- Két órajel vezérelt invertert kapcsolunk össze, amelyeket ellentétesen vezérlünk.
- Az információ a master és a slave közötti szórt kapacitásban tárolódik
- Következmény: van egy minimális órajel.



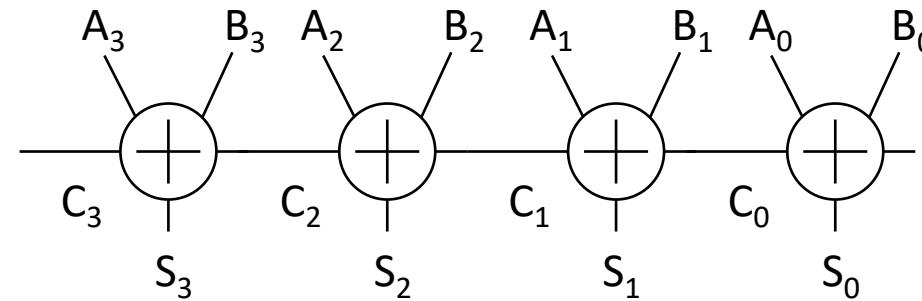
Az adatút elemei

- Összeadók
 - Ripple carry adder
 - Összeadó architektúrák
 - Carry Skip
 - Carry Look-Ahead
 - Carry Select
- Funnel shifter
- Kombinációs szorzó



Ripple-carry adder

- Több bites számok összeadására gyakorlatilag sorbakapcsolunk teljes összeadókat.
- A művelethez szükséges idő:
 - Az utolsó carry elkészülése + az utolsó összeg elkészülése
 - $O(N)$
- A kritikus út az átvitel terjedése
 - CMOS váltott logikával készül, így az inverterek megspórolhatók.
 - (páros ponált, páratlan negált logika, vagy fordítva, ez mindegy...)
 - Könnyen huzalozható, de egy bizonyos bitszám felett túl lassú lesz



Összeadás gyorsítása

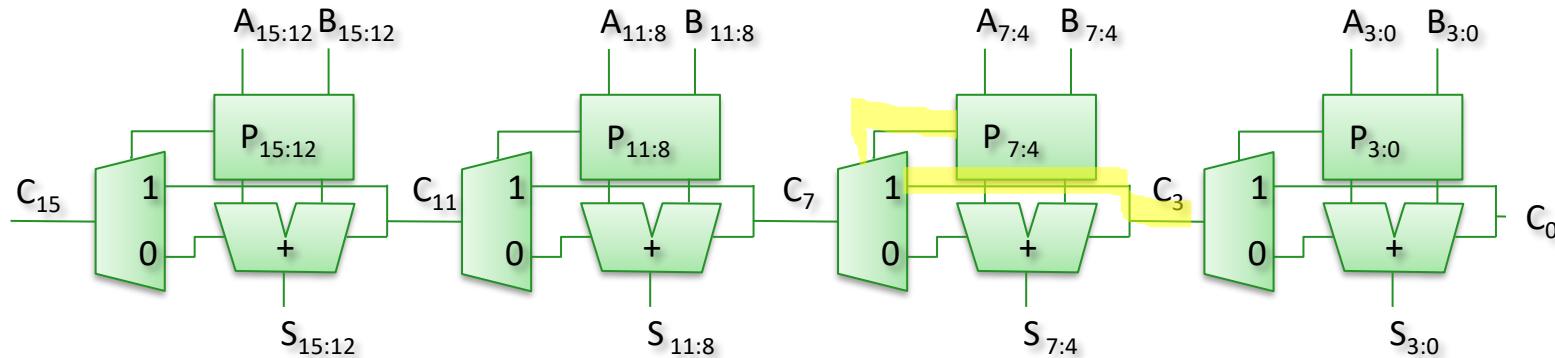
- A kritikus út az átvitel terjedési ideje – ezt kell gyorsítani!
- Definiáljuk a következő jeleket
 - *generate* – a fokozat mindenféleképpen átvitelt generál
 - *propage* – a fokozaton az előző fokozat átvitele áthalad
 - egy bitre például:
 - $G = AB$ illetve $P = A \oplus B$
 - ezeket a jeleket egyszerre nagyobb bitszámra rekurzívan számíthatjuk
 - $G_{i:0} = G_{i:k} + P_{i:k}G_{k-1:0}$ illetve $P_{i:0} = P_{i:k}P_{k-1:0}$
 - Pl. 8 bitre, 4 bites fokozatokat tekintve:

$$G_{7:0} = G_{7:4} + P_{7:4}G_{3:0} \text{ illetve } P_{7:0} = P_{7:4}P_{3:0}$$

- Azaz egy fokozat akkor generál átvitelt, ha vagy önmaga generált, vagy az előző fokozat generált és az áthaladt.



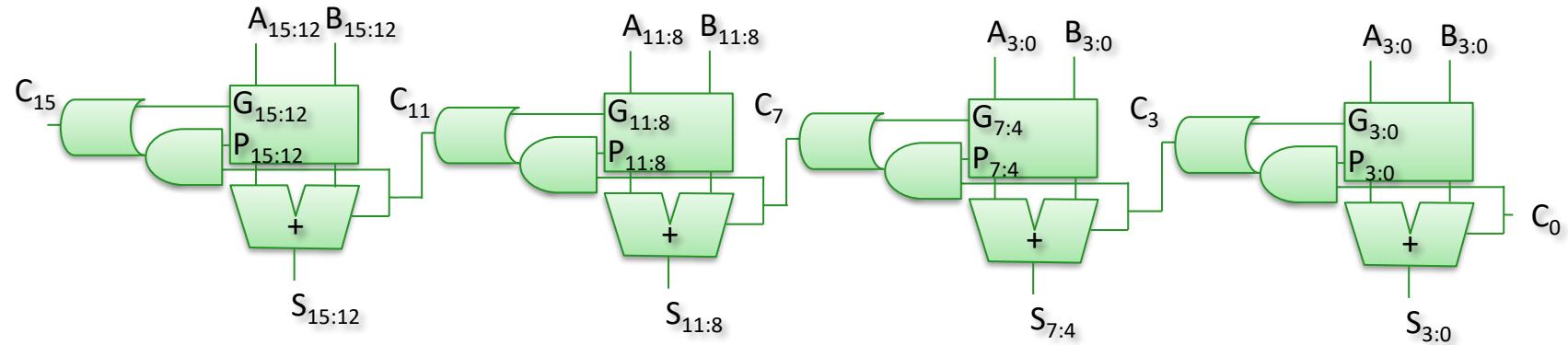
Carry skip adder



- Az ötlet nagyon egyszerű: számítsuk ki egy blokkra a *propagate*-t és ezzel vezéreljünk egy multiplexert, ami vagy az előző fokozat átvitelét, vagy a generált átvitelt teszi a kimenetre.
- A *propagate* könnyen kiszámítható (és kapu)
- A késleltetés $O(N/K)$ (K : blokkok száma)



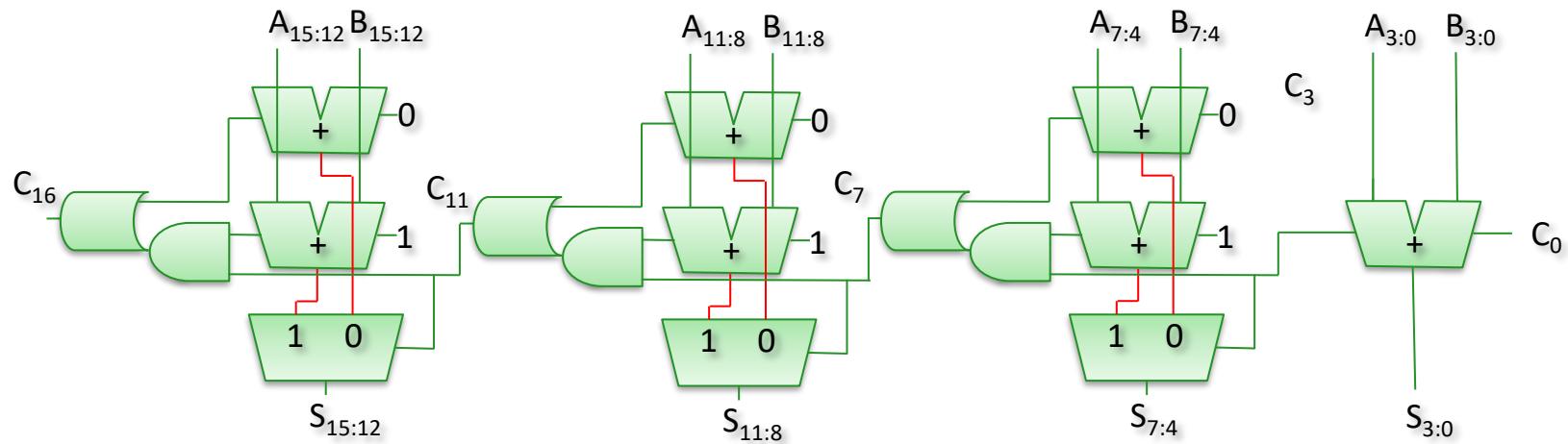
Carry-look-ahead



- Fokozatonként történik a carry gyors kiszámítása. minden fokozatra kiszámítjuk P -t és G -t.
- Ekkor a kimeneti átvitel $C_M = G + PC_{M-1}$
- A késleltetés a P és G kiszámítása adja, ezek viszont párhuzamos történnek.



Carry-select



- CSEL: fokozatonként kiszámolja az összeget átvitel és átvitel nélkül, amiből az előző fokozat átvitele választja ki a végeredményt egy multiplexer segítségével
- Kb. kétszerakkora területet foglal, mint a ripple carry adder



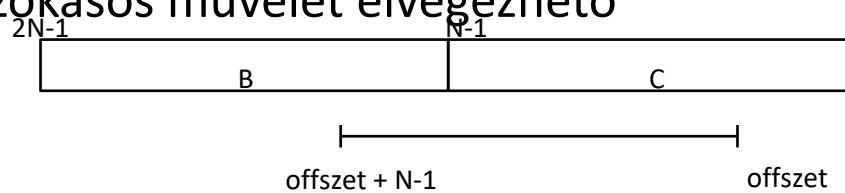
Összeadás

- A bonyolultabb összeadó struktúrák egyre nagyobb területet és teljesítményt igényelnek.
- Nincs optimális architektúra, mert minden technológia függő
 - Pl. hány bites fokozatokat érdemes készíteni, hogyan lehet összekötni stb.
 - Más lesz az optimum különböző technológiákon.
 - Az igazán nagysebességű architektúrák kézzel készülnek.
- A logikai szintézis feladata, hogy olyan megfelelő architektúrát találjon, ami még épp teljesíti az időzítési követelményeket.
 - ez általában kézzel felülírható



Eltolás (Shift)

- (Kis) konstanssal történő eltolás
 - Ez a legegyszerűbb, hiszen ez huzalozás / multiplexer kérdése.
- Funnel-shifter
 - Az N bites bemenetet $2N$ bitesre egészítik ki, művelettől függően, majd ebből választanak ki N bitet egy megadott offszettel.
 - Ezzel minden szokásos művelet elvégezhető

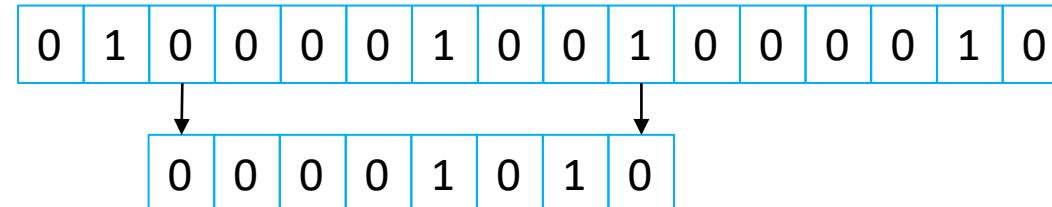


Eltolási művelet	B	C	Offszet
unsigned >> k	0..0	$A_{N-1}..A_0$	k
signed >> k	$A_{N-1}..A_{N-1}$	$A_{N-1}..A_0$	k
<<	$A_{N-1}..A_0$	0	N-k
rotate right	$A_{N-1}..A_0$	$A_{N-1}..A_0$	k
rotate left	$A_{N-1}..A_0$	$A_{N-1}..A_0$	N-k



Az eltolás - példa

- Pl. 8 biten forgassuk el balra kettővel a 0x42-t

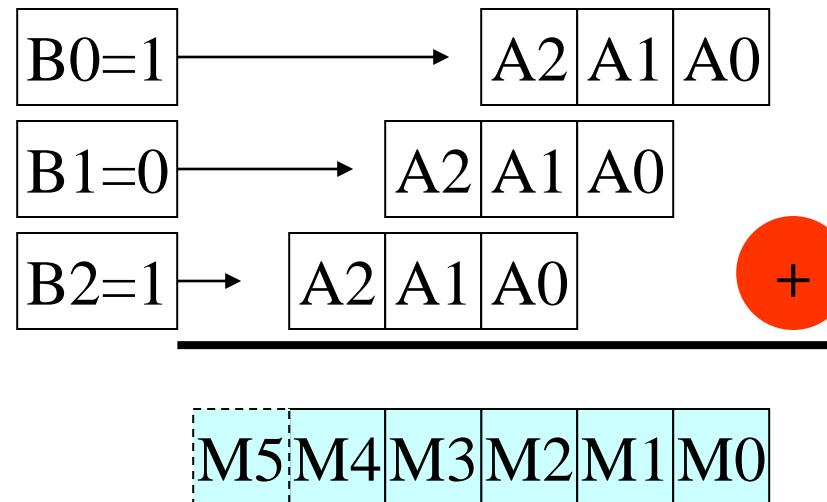


- A kiválasztás multiplexerek sorozatával oldható meg
- N bithez $\log_2 N$ multiplexer sor kellene, de lehet 4-1 vagy 8-1 multiplexereket is alkalmazni.
 - Az, hogy melyiket éri meg, az technológiafüggő... (huzalozás...)



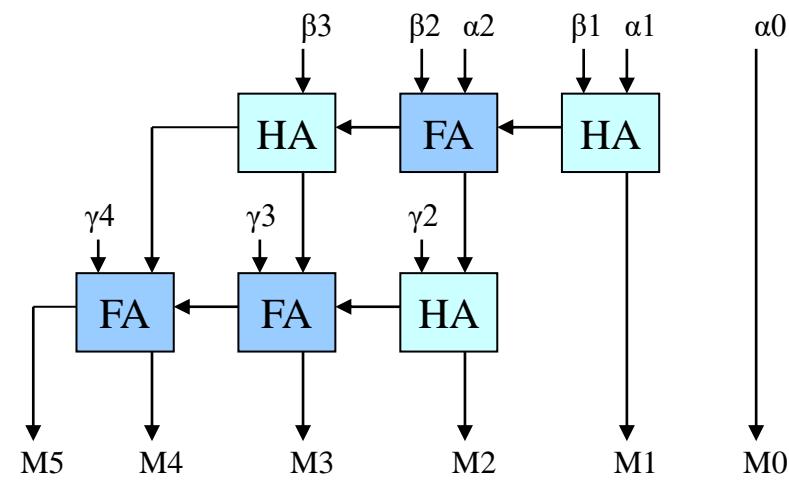
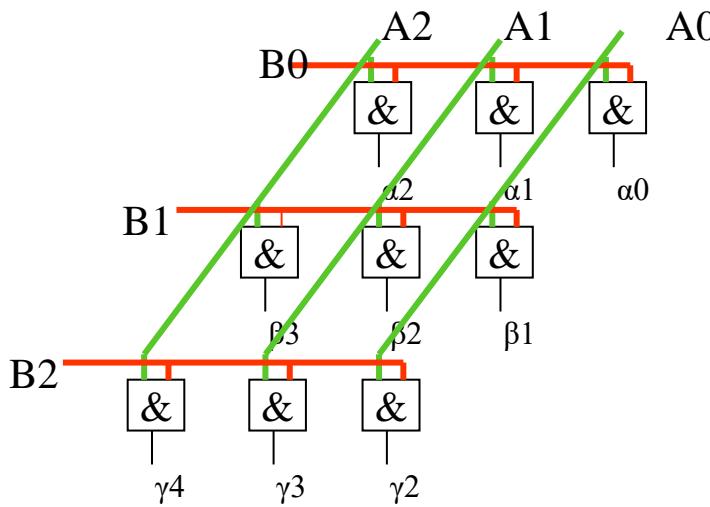
Szorzók

- Kombinációs szorzó
- Az összeszorzandó számok $A(n-1:0)$ és $B(n-1:0)$
- Ha B adott bitje 1, bekerül az összegbe, egyébként nem.



Kombinációs szorzó áramköri elrendezése

- Részösszegek előállítása + összeadása a helyiérték figyelembe vételével. (figyeljük meg az átvitel trükkös bekötéseit!)



Források, ajánlott irodalom, érdekességek

1. Komplex kapu szimulációja: [AOI21](#), [OAI21](#)
2. [Multiplexerek](#)
3. [Latch szimulációja](#)



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

IT eszközök technológiája

4. előadás

Digitális rendszertervezés



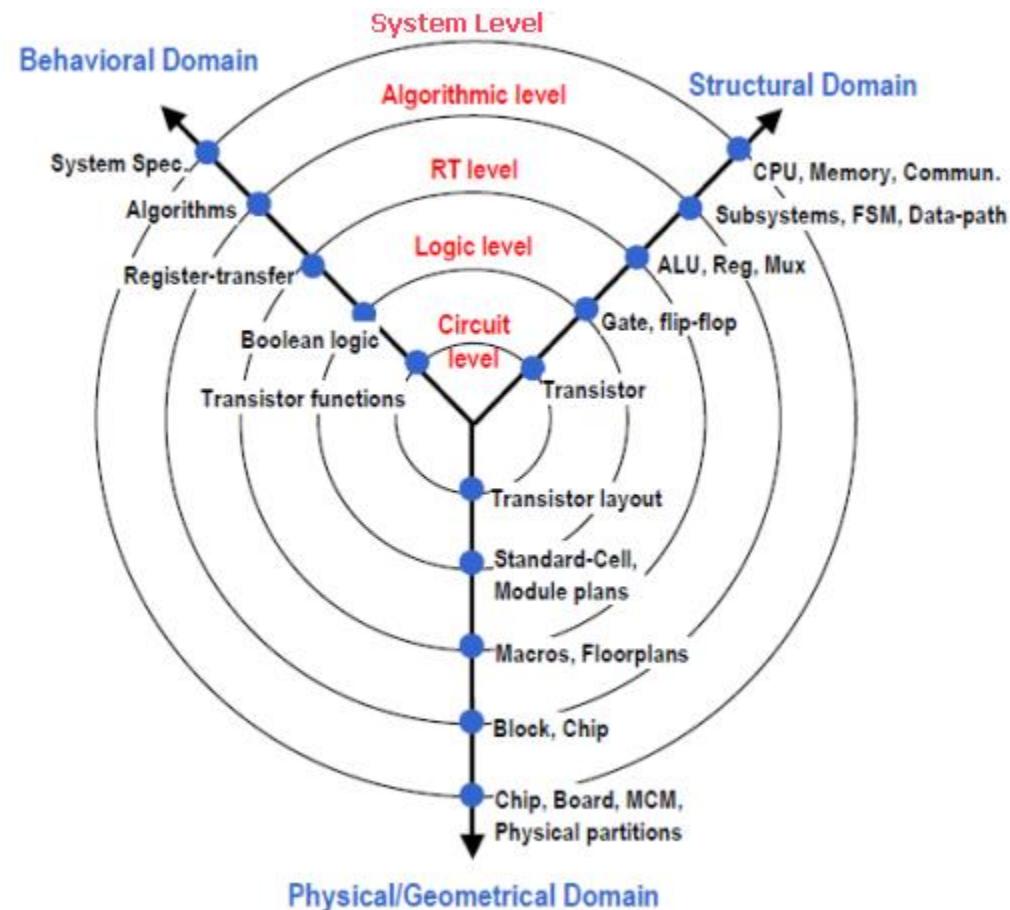
Absztrakciós szintek

- A digitális rendszerek bonyolultsága exponenciálisan növekszik
 - Egyszerűtlenítők, módosítások, átalakítások, követelmények...
- A tervezési metódusoknak ezzel kell(ene) lépést tartani
 - Ez csak úgy lehetséges, hogy egyszerűtlenítők a tervezés egyre **magasabb absztrakciós szinten** történik.
 - Az alacsonyabb absztrakciós szintre a leképezés **automatikusan**, de ember által felügyelt határok és **kényszerek** (design constrains) történik.
 - A tervezés több, egymást követő lépésből áll, amelyek során az emberi tényező szerepe egyre csökken.
 - Az automatikus eszközök használata kikerülhetetlen, még az elméletileg elérhető **hatékonyaság rovására** is.
 - vörös: ki kódol assemblyben 20XX-ban? Ki fog banki rendszert technológiai szempontból hatékony nyelven, pl. C++-ban megvalósítani?



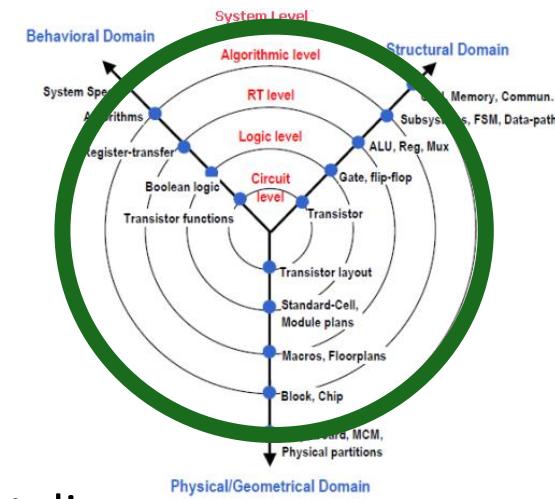
A Gajski-Kuhn Y diagramm

- Az absztrakciós szinteket a koncentrikus körök
- A vizsgálat szempontjait pedig a nyilak reprezentálják.
 - Pl. a rendszer specifikáció struktúrában CPU, memória, kommunikáció, míg fizikai szinten a chip, kártya stb.
 - A fizikai szinttel csak érintőlegesen foglalkozunk a továbbiakban.



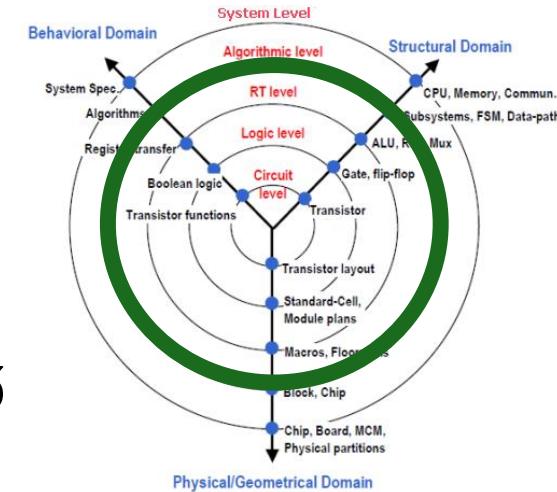
A rendszerszint

- A fő cél a terv **részekre bontása (partícionálás)**
 - Az egyes részek feladatainak rögzítése
 - A közöttük és külvilággal történő kommunikáció kipróbálása, kiválasztása, modellezése.
 - A tervező nem foglalkozik a megvalósítás részleteivel – teljesen hardverfüggetlen leírást készít – amelyből akár több különböző megvalósítás is keletkezhet.
 - Lehetőség van szoftver és hardver együttes tervezésére.
- Eszközök
 - Általános célú magas szintű programnyelvek illetve célszoftverek



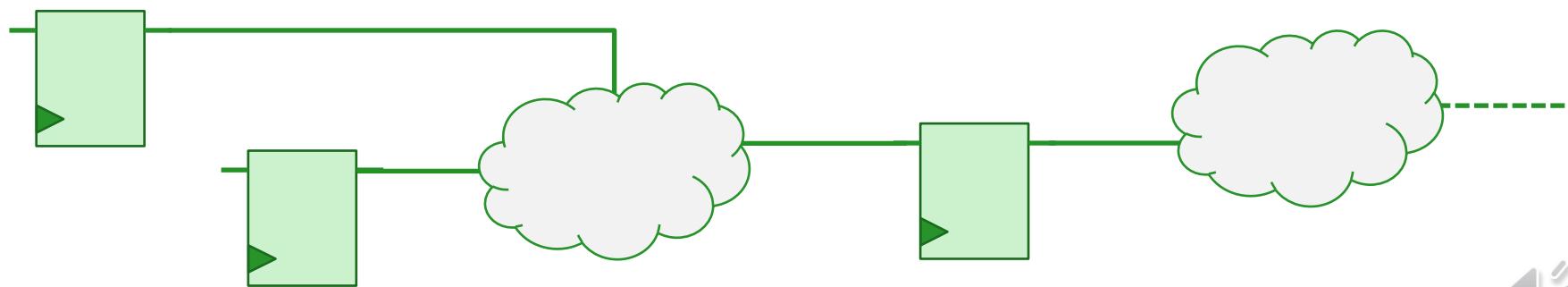
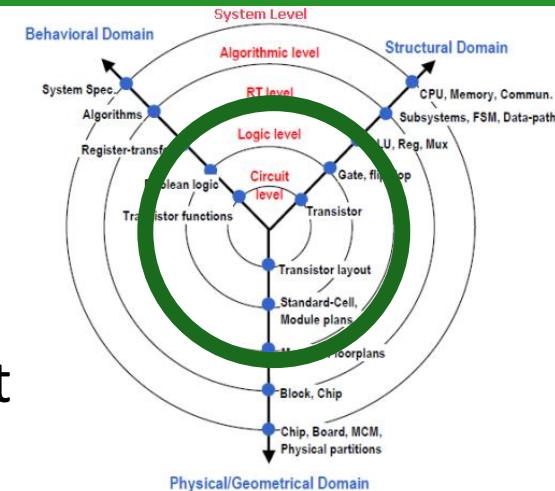
Az algoritmus szintje

- Az egyes alrendszerök által megvalósított funkció viselkedési szintű modellezése
- A viselkedési modellek segítségével elvégezhető szimulációja
- A szimuláció erőforrásigényes, így alapvetően a modellezés elsődleges eszközei a C, C++
- Léteznek olyan osztálykönyvtárak, amelyek lehetőséget adnak az algoritmus „bit” és időzítéspontos modellezésére is.
- Ilyen pl. a SystemC
 - Ingyenesen elérhető <http://accellera.org/downloads/standards/systemc>



A regiszter-transzfer szint (RTL)

- „Az az elvonatkoztatási szint, ahol a **regiszterekeket** és a közöttük végbemenő **adatátvitelt** definiáljuk, beleértve az adatátvitelt **összeköttetéseket** és az átvitel **időzítését**”
- Magyarul: Mi történjen az áramkörben az **órajel két aktív éle között**
- (feltételezzük, hogy szinkron hálózatokat tervezünk...)



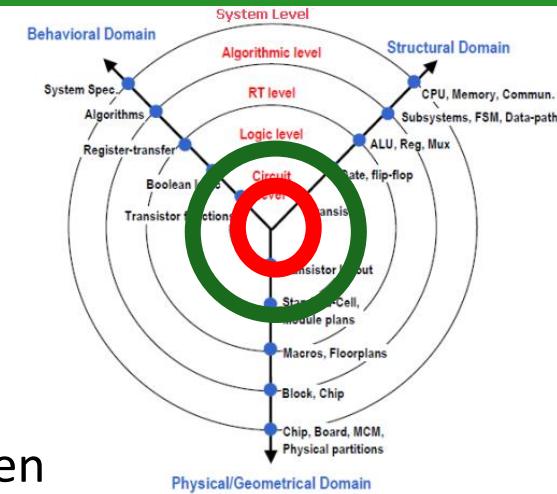
A logikai szint és az áramköri szint

■ Logikai szint

- Logikai kapuk és összeköttetései
- Azaz hálózatlista (netlist)
- A logikai szint eléréséig a tervezés megvalósításfüggetlen
- (többé kevésbé...)

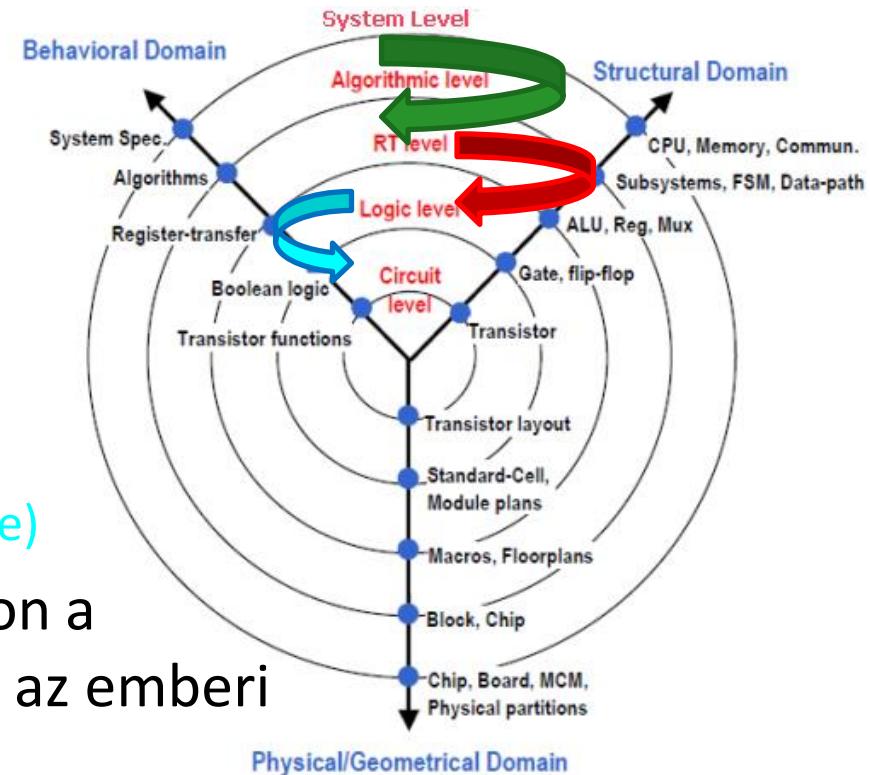
■ Áramköri szint

- Kapcsolási rajz
- Fizikai terv
 - (hogyan épülnek fel rétegből a tranzisztorok és hogyan vannak összekötve)
- Ez az ún. physical design.

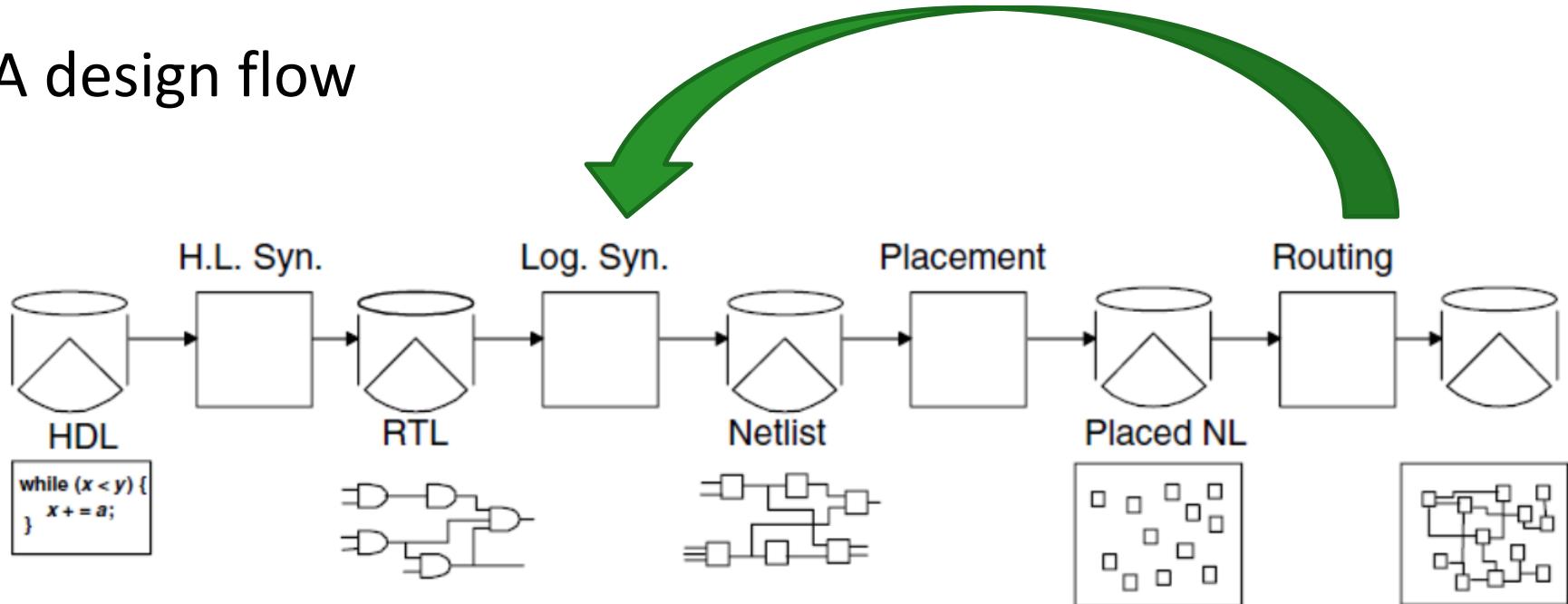


A szintézis

- A magasabb absztrakciós szintről az alacsonyabb absztrakciós szintre szintézissel kerülünk.
 - Ez történhet gépi vagy emberi úton
 - Magas szintű szintézis (HLS)
 - Logikai szintézis
 - Elhelyezés és huzalozás (place and route)
- Ahogy előre haladunk a diagrammon a mélyebb rétegek felé, úgy váltja fel az emberi tevékenységet az automatikus (de általában ember által felügyelt) szintézis.



A design flow



- A tervezés azonban (sajnos) nem ilyen egyszerű, hanem iteratív
 - A CMOS logikában ugyanis a késleltetés pontosan csak az összekötő vezetékhosszak ismeretekor számítható.
 - Azaz az elhelyezés és huzalozás után van pontos késleltetés.
 - Ez visszahat minimum a logikai szintézisig, de néha feljebb is.



Magas szintű szintézis

- Algoritmikus szintről RTL szintre
- Leggyakrabban még emberi közreműködéssel készült, de a magas szintű szintézér programok egyre jobb minőséget képviselnek.
 - Cadence / Stratus
 - Intel / HLS Compiler
 - Mentor Graphics / Catapult C
 - Synopsis / Synphony C compiler
- Időzítésmentes C kódból generálnak RTL szintű leírást
- 5-10x tervezői produktivitást ígérnek



Magas szintű szintézis

- Akár kézzel, akár számítógépes programmal történik a RTL kód előállítása, a következő problémákat kell megoldani:
 - **Vezérlés jellegű** funkció esetén
 - **Állapotgépek** konstruálása
 - Állapotgépek és **kisegítő áramkörök együttműködésének** megszervezése
 - **Adatfeldolgozás** jellegű funkció esetén: mikroarchitektúra választás/szintézis
 - Erőforrás-allocáció
 - Ütemezés
 - Erőforrás-vezérlési állapot összerendelés (*binding, resource sharing*)



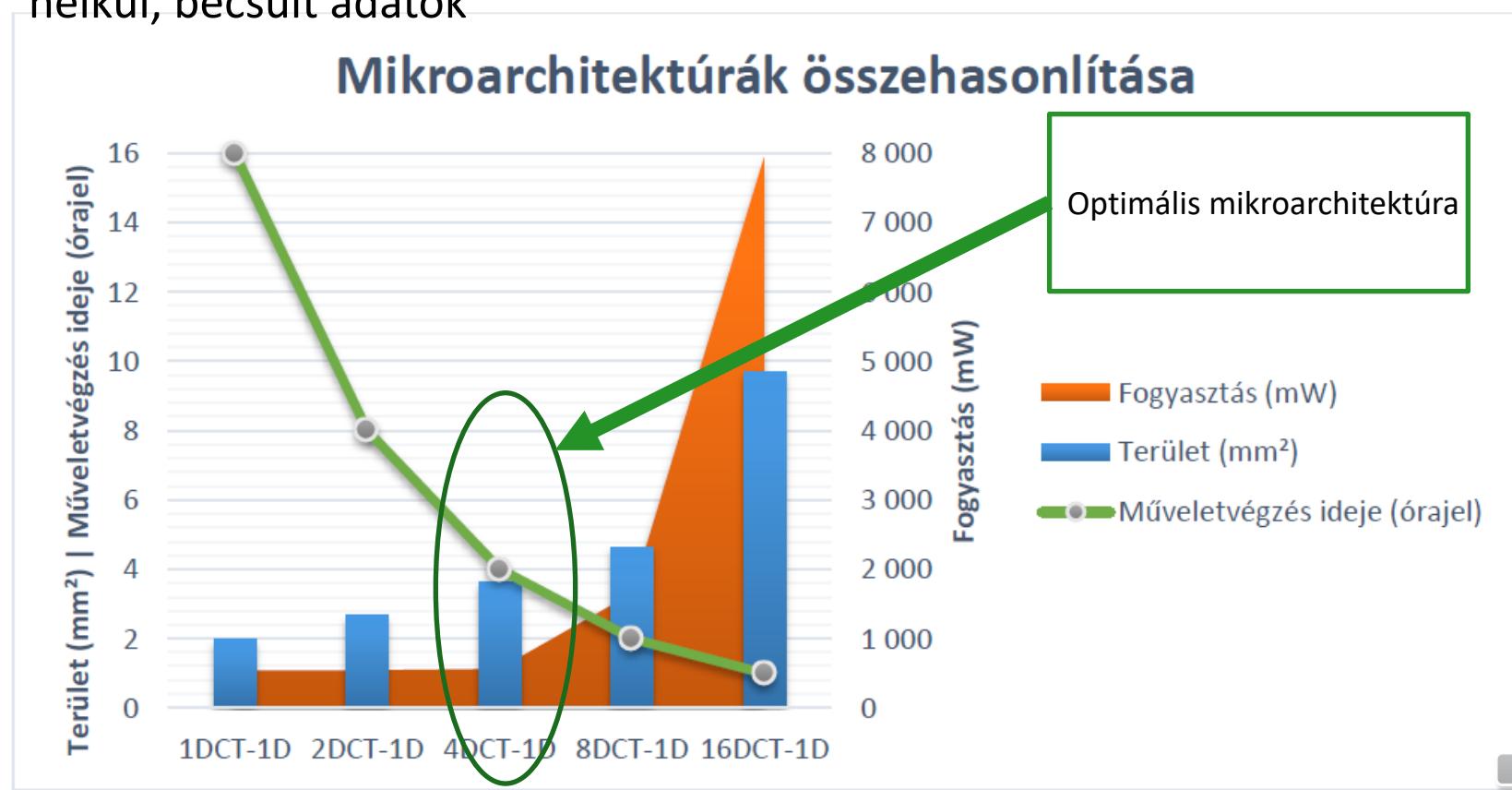
Az automatikus HLS előnyei

- Egy 1M ekvivalens kapuval rendelkező terv
 - Ez nem tekinthető igazán nagynak...
- (ekvivalens kapuszám: az elhelyezett cellák területe/a NAND2 területe)
 - Kb. 300k sor RTL szinten
 - 30-40k sor algoritmikus szinten
- Az újrafelhasználás könnyebb
 - Az RTL kód mikroarchitektúra és interface szinten kötött
 - Egy technológiai váltás esetén már nem lesz optimális
- A kényszereket magasabb szinten alkalmazzuk
- Egy algoritmikus leírásból készülhet több, különböző mikroarchitektúra, amiből a technológiai lehetőségek figyelembe vételével lehet az optimálisat kiválasztani.



HLS - mintapélda

- Diszkrét 2D koszinusz transzformáció 8×8
 - AMS 350nm technológia, Cadence C-to-Silicon compiler, fizikai szintézis nélkül, becsült adatok



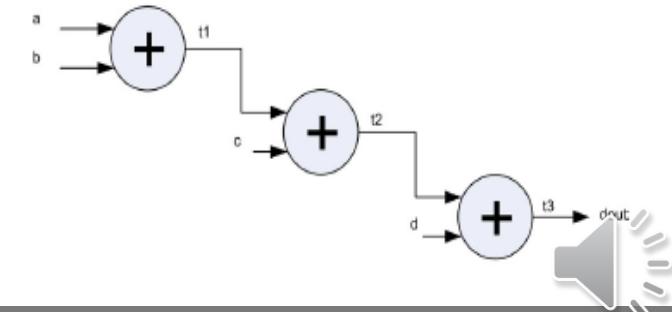
Példa: architektúra választás

- Egyszerű feladat, adjunk össze 4db 32 bites számot...
 - A példa C++ leírást használ. (Forrás: Michael Fingeroff: High-Level Synthesis Blue Book)

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

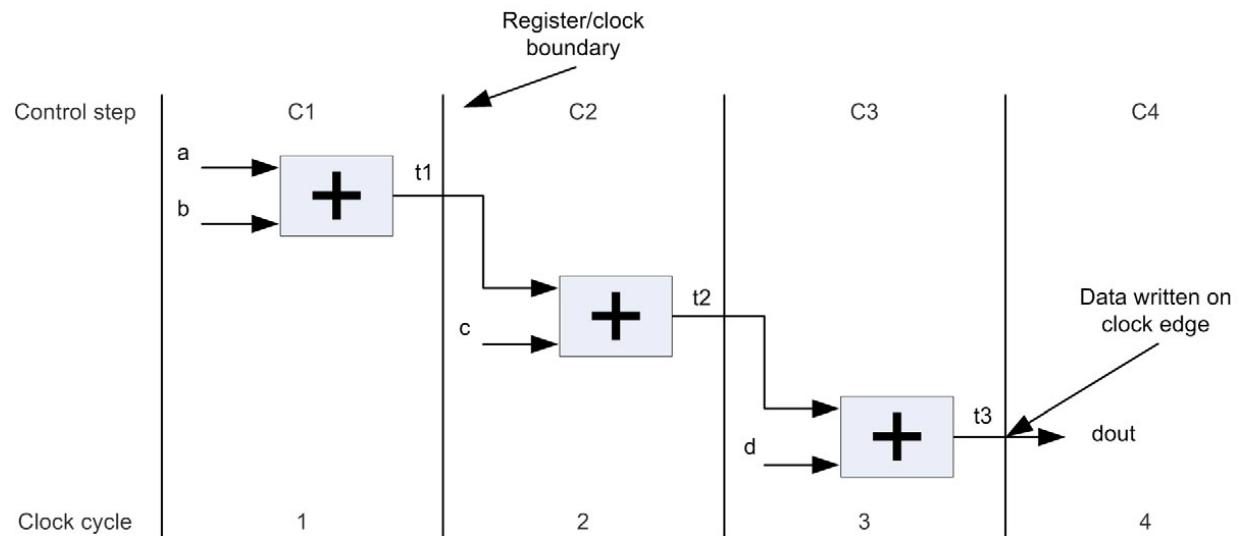
    t1 = a + b;
    t2 = t1 + c;
    dout = t2 + d;
}
```

- C++ függvényként definiáljuk a hardvert.
- A bemeneteket érték szerint, a kimenetet pedig cím szerint adjuk át.
- Első lépésként a szintézér elkészíti az adatfolyam gráfot
 - minden csomópont egy utasításnak felel meg
 - A kapcsolatok meghatározzák a sorrendet.

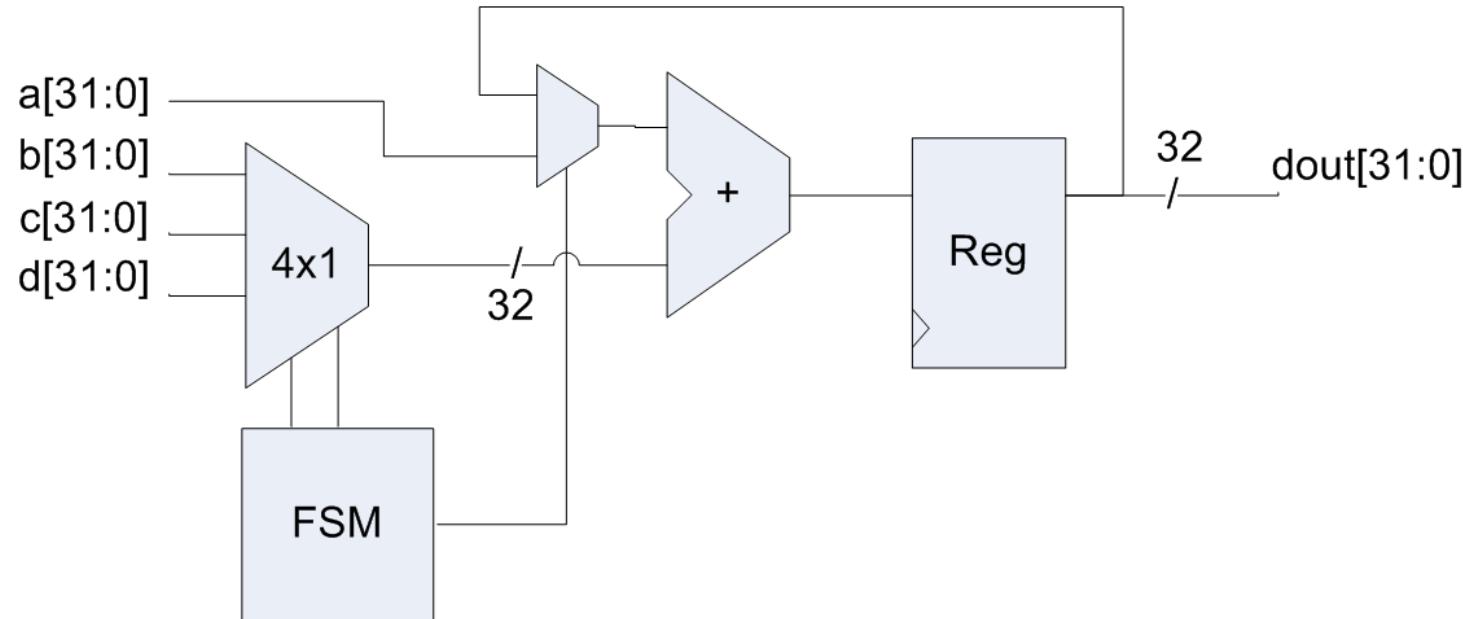


Példa: ütemezés

- 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 adatút



Példa: csővezeték

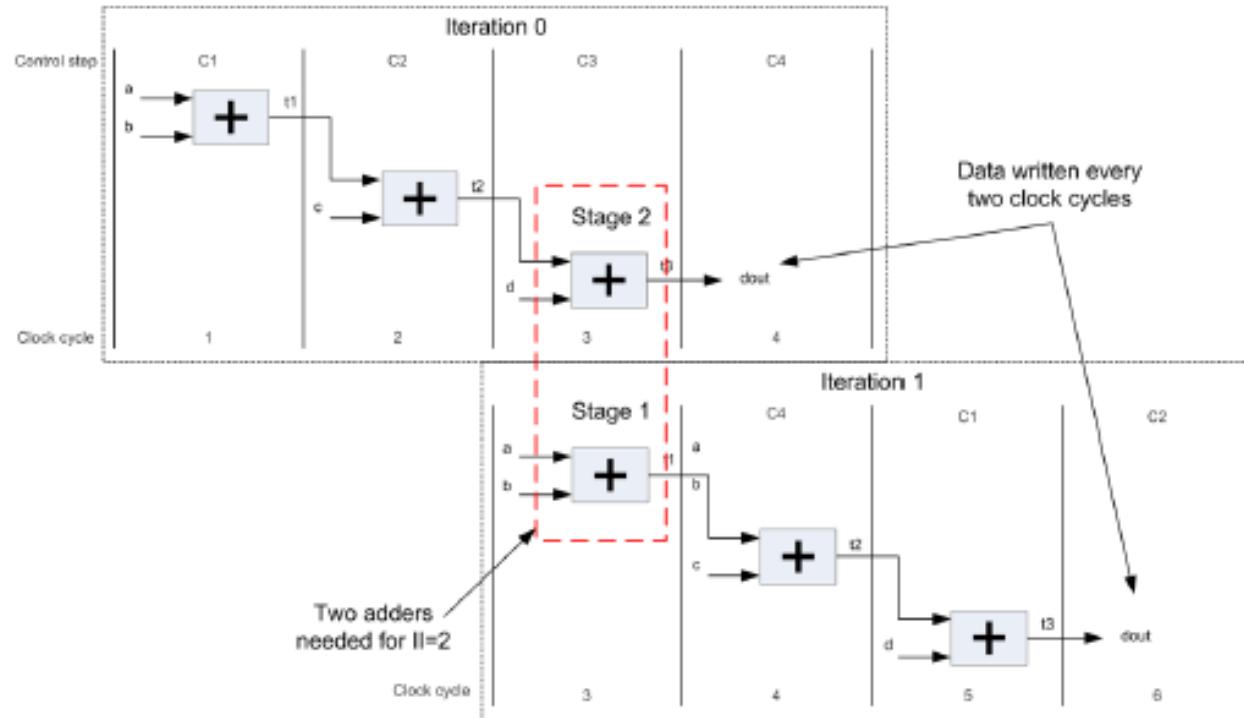
- Növelni szeretnénk a teljesítményt, így átlapoljuk a végrehajtási fázisokat
- Azaz **csővezetéket** készítünk
 - II = Initiation Interval – felkészülési idő – milyen gyakran indítjuk a csővezetéket, órajel ciklusban mérve
 - L = latency, késleltetés (lappangás): az első inputtól az első feldolgozott eredményig eltelt idő, órajel ciklusban
 - TP = throughput: milyen gyakran készül el eredmény, órajel ciklusban mérve.
Pl. TP=4 minden 4. órajelciklusban
 - Az előző példában
 - Minden negyedik órajelciklusban indítjuk el a számítást
 - Minden negyedik órajelciklusban lesz eredményünk
 - Tehát csővezeték nélkül: $L=3$, $TP=4$
 - Ezeket a beállításokat megadva a szintézer automatikusan átalakítja a tervet.



Példa: csővezeték

- Két összeadó felhasználásával kétszeres sebességet érhetünk el.
 - minden második órajelciklusban indítunk új feldolgozást és minden másodikban keletkezik eredmény is.

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



A logikai szintézis

- Bemenet
 - RTL kód
 - A cellakönyvtár (a rendelkezésre álló kapuk) leírása (hdl nyelven)
 - A cellakönyvtár időzítési és teljesítményadatai
- Kimenet
 - Strukturális HDL, ami már csak a cellakönyvtárbeli elemeket tartalmazza.
(valójában ez már netlistnek tekinthető)
- Kényszerek:
 - Időzítés, terület, teljesítmény
 - (alapesetben becsült)
 - Együtt tud működni a fizikai elhelyezést végző layout szintézis eszközzel, így jobb minőségű kimenetet szolgáltat.
 - (jobb lesz mindenki kényszer becslése)



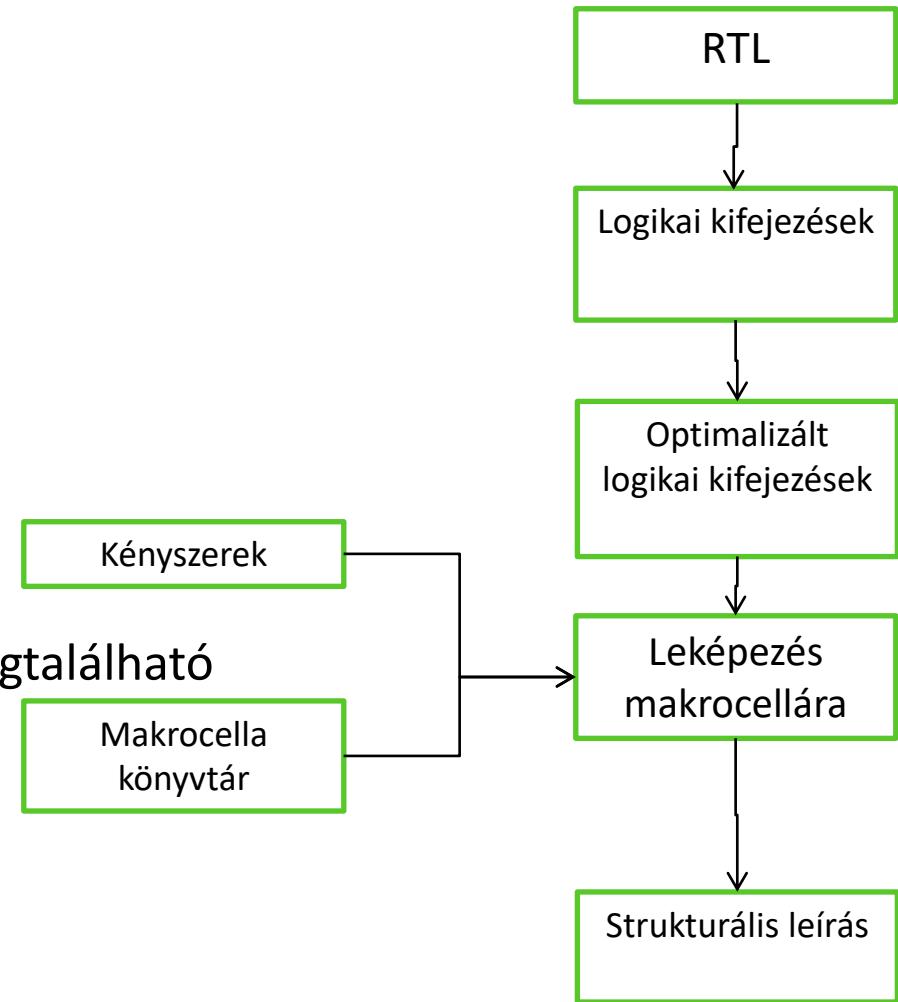
A logikai szintézis

- Bemenet
 - RTL kód
 - A cellakönyvtár (a rendelkezésre álló kapuk) leírása (hdl nyelven)
 - A cellakönyvtár időzítési és teljesítményadatai
- Kimenet
 - Strukturális HDL, ami már csak a cellakönyvtárbeli elemeket tartalmazza.
(valójában ez már netlistnek tekinthető)
- Kényszerek:
 - Időzítés, terület, teljesítmény
 - (alapesetben becsült)
 - Együtt tud működni a fizikai elhelyezést végző layout szintézis eszközzel, így jobb minőségű kimenetet szolgáltat.
 - (jobb lesz mindenki kényszer becslése)



A logikai szintézis

- RTL leírás → strukturális leírás (kapuszintű)
- Kényszerek:
 - Időzítés
 - Teljesítmény
 - Terület
- ASIC makrocella
 - Ami az adott technológiában megtalálható
 - IC: kapuk
 - FPGA: LE-k



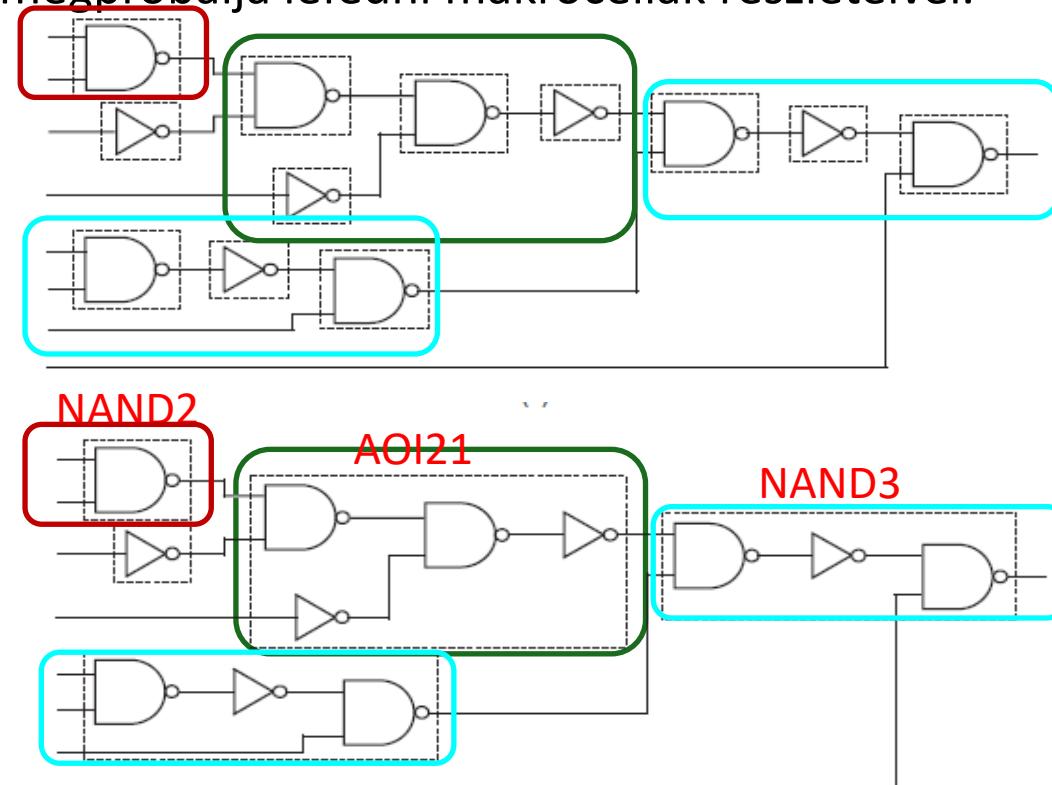
Lépések

1. HDL beolvasása, optimalizálás (pl. dead code removal)
2. A hierarchia kifejtése, ha szükséges
 - Ez az ún. flattening – jobb minőségű megoldás kapható globális optimalizációval – nagyságrendekkel erőforrásigényesebb, mintha modulonként készülne.
 - „spend CPU cycles rather than human cycles”
3. Logikai kifejezések optimalizálása (**generic**)
 - Felismer szerkezeteket, pl. összeadó, számláló stb.
 - (Itt fontos, hogy a szintézis „ízlése szerint” kódoljuk az RTL-t.)
 - Ezeket megfelelő template-tel helyettesíti
 - Automatikusan, vagy pragmával lehet megadni az architektúrát
Pl. összeadó esetén CLA, CSA stb.
 - Optimalizálja a logikai kifejezéseket
 - Hasonlóan, mint anno Digitben, de nem biztos, hogy kétszintű a megvalósítás.
4. Leképezés ASIC makrocellára
 - Template-ek esetében ez viszonylag egyszerű
 - Logikai kifejezések esetén a makrocella könyvtárból válogat megfelelő cellákat, amivel a kifejezést meg lehet valósítani.



Leképezés ASIC makrocellára – vázlatos elv

- A logikai kifejezésből egy fát épít, ami kétbemenetű NAND kapukat és invertereket tartalmaz.
 - Ugyanezt elvégzi az összes makrocellára.
- A logikai kifejezést megpróbálja lefedni makrocellák részleteivel.





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Hardverleíró nyelvek



HDL-ek

- **VHDL** (*VHSIC Hardware Description Language*, IEEE STD 1987)
 - VHSIC: *Very High Speed Integrated Circuit*
 - Amerikai Védelmi Minisztérium (DoD) megrendelésére
 - Eredeti célja: beszállított ASIC-ek funkciójának formális dokumentálása
- **SystemVerilog** (*VERIfication and LOGic*, IEEE STD 2005)
 - Gateway Design Automation → Cadence Design Systems
 - Eredeti célja: logikai szimuláció
 - Az eredeti nyelv (Verilog) 2005-ben továbbfejlesztve → SystemVerilog



Terminológia

- A HDL-ek **NEM programozási nyelvek!**
 - **Hasonló** nyelvi szerkezetek
 - Részben vagy teljesen **eltérő jelentés**
- Az elterjedten használt szakkifejezések félrevezetők, pontatlanok
 - **HDL program** → **HDL modell**
 - **HDL kód lefordítása** → **HDL modell elemzése** (*elaboration*) vagy **HDL-modell szintézise**, attól függően, hogy épp melyik folyamatot nevezzük helytelenül fordításnak...
 - **HDL program futtatása** → **HDL szimuláció**
 - **FPGA programozása** → **FPGA konfigurálása**
 - stb...



A VHDL

- Az ADA programozási nyelv az alapja.
- Erősen típusos, szimbólumok helyett inkább kulcsszavakat használ
 - Így ember számára jobban olvasható.
 - Kisbetű nagybetű érzéketlen.
- Nagy projektek létrehozására is alkalmas
 - Támogatja a hierarchikus tervezést
 - (könyvtár (library), csomag (package))



Félösszeadó (RTL szinten)

```

library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

entity half_adder is
    port (a:      in std_logic;
          b:      in std_logic;
          sum:    out std_logic;
          carry:  out std_logic);
end entity half_adder;

architecture rtl of half_adder is
begin
    sum <= a xor b;
    carry <= a and b;
end architecture rtl;

```

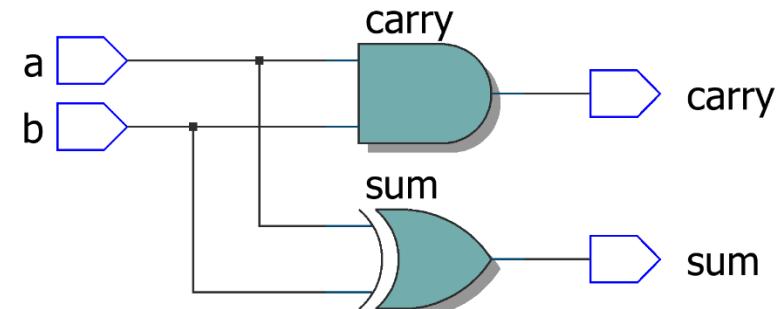
```

module half_adder (input a,
                     input b,
                     output sum,
                     output carry);

    assign sum = a ^ b;
    assign carry = a & b;

endmodule

```



D flip/flop

```
library ieee;
use ieee.std_logic_1164.all;

entity dff is
  port(
    clk : in  std_logic;
    d   : in  std_logic;
    rst : in  std_logic;
    q   : out std_logic;
  );
end entity dff;

architecture rtl of dff is
begin
  process(clk, rst)
  begin
    if (rst = '0') then
      q <= '0';
    elsif(rising_edge(clk)) then
      q <= d;
    end if;
  end process;
end architecture rtl
```

```
module dff( input d,
             input rst,
             input clk,
             output reg q);

  always @ (posedge clk or negedge rst)
  if (!rst)
    q <= 0;
  else
    q <= d;
endmodule
```



A koncepció

- Láthattuk, hogy minden elterjedt HDL hasonló koncepciók alapján működik. (legalábbis a szintetizálható részhalmaz)
- Az utasítások „párhuzamosan” hajtódnak végre! A sorrend mindegy!
- Definiálni kell az entitás/modul be és kimeneteit
- Kombinációs hálózat modellezésénél egyszerűen leírjuk, hogy mi történik
 - Azaz hogyan kapjuk meg a kimeneteket a bemenetek függvényében!
- Szinkron hálózat modellezése
 - Megadunk egy érzékenységi listát és leírjuk, hogy az érzékenységi listában szereplő változások esetén pontosan mi történik.





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

A SystemC

Történet
Alapfogalmak
Mintapéldák



A System C

- C++ osztálykönyvtár digitális rendszertervezésre
 - Alkalmas a „klasszikus” hardverleírásra is.
 - Azaz **bit** és **késleltetés** szinten pontosan leírható a hardver működése
 - (jelentős szintaktikai többlettel, még a VHDL-hez képest is...)
 - Alkalmas magas szintű tervezésre
- C++ fejlesztői környezetben reprezentálunk hardvert
 - Azaz: párhuzamosság, időzítés, késleltetés, port, bit pontos adattípusok
 - Ezért kell a C++ osztálykönyvtár
 - Alkalmas lefordított (compiled code) szimulációra (gyors!)
 - A magas szintű szintézer eszköz bemenete lehet.



A System C története

- Nagyon sok helyen használnak C++ -t hardver modellezésre és szimulációra
 - (nem véletlenül: eredetileg Stroustrup is...)
 - **An Efficient Implementation of Reactivity for Modeling Hardware in the Scenic Design Environment (1997)**
 - Érdemes lett szabványosítani
 - Synopsys kezdeményezésére első verzió 1999-ben.
 - Open SystemC Initiative
 - Mindhárom nagy EDA (Electronic Design Automation) cég (Cadence, Mentor Graphics, Synopsys) részt vesz benne.
 - IEEE 1666–2011 szabvány
 - Nyílt forráskódú
 - <http://www.accellera.org/downloads/standards/systemc>



Alapfogalmak

■ Modul

- Egy adott funkcionálitás megvalósítására szolgál. Más modulokat és processeket foglalhat magába. (VHDL entity vagy Verilog module)
- Egy (megfelelően származtatott) C++ osztály

■ Process

- A funkció leírására szolgál. A modult megvalósító osztály metódusa. (VHDL process vagy Verilog always szerkezet megfelelője)

■ Port

- A logikai jel csatlakozó pontja
 - Iránya van! (eltérően egy C változótól...)



Mintapélda, félösszeadó

```
#include <systemc.h>

SC_MODULE (halfadder)          // ronda makró az öröklésre az sc_module-ból
{
    sc_in<bool>  a, b; // bemeneti portok
    sc_out<bool> s, c; // kimeneti portok

    void halfadder_method() // a működés leírása
    {
        s= a ^ b;
        c= a &&b;
        // c.write(( a.read() && b.read() ));
    }

    SCCTOR (halfadder) // constructor for half adder
    {
        SCMETHOD (halfadder_method); // ez a függvény írja le a működést
        sensitive << a << b; // érzékenységi lista
    }
};
```



Mintapélda, D-FF

```
#include <systemc.h>

SC_MODULE (dff)
{
    sc_in<bool> clk;
    sc_in<bool> rst;
    sc_in<bool> din;
    sc_out<bool> dout;

    void dff_method()
    {
        if (!rst)
            dout = false;
        else
            dout= din; // dout.write( din.read())
    }

    SC_CTOR (dff)
    {
        SC_METHOD (dff_method);
        sensitive << clk.pos() << rst.neg();
    }
};
```



Szimulációs kernel

- A SystemC tartalmaz egy beépített **eseményvezérelt** szimulációs kernelt.
- A lefordított fájl maga a szimulátor!
 - Ez nagy szimulációs sebességet eredményez.
- A teljes C/C++ eszközkészlet és a rendszer könyvtárai rendelkezésre állnak a szimuláció kimenetének vizsgálatára
 - Ez modern HDL szimulátorokban is megoldható, bár nem egyszerű. (VPI/VHPI)
 - Már az **std::cout** lehetőségei is sokkal bővebbek mint a hullámforma kimenet.
 - Itt található egy komplett karakteres videokártya megvalósítás, SDL alapon
 - <http://www.eet.bme.hu/~czirkos/icterv/syscvideo-0.6.zip>





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

A fizikai tervezés



Fizikai tervezés

- A tervezés eddigi lépései nagyjából technológiafüggetlenek voltak
 - (valójában már az RTL esetén gondolkodni kell a megvalósítási technikán és ahhoz tartozó optimális mikroarchitektúrát választani... - ez akár az algoritmus szintjére is felkerülhet)
 - Pl. FPGA-ban általában van DSP blokk, így egy szorzást tartalmazó művelet kevésbé kínos, mint IC esetében.
- A kész terv megvalósítási lehetőségei:
 - Teljesen kézzel, tranzisztor szinten, „full custom” módon.
 - Ez csak kritikus blokkok esetében képzelhető el
 - Előre tervezett cellakönyvtár segítségével:
 - Ez az ún. standard cellás tervezés
 - Programozható logikai eszköz segítségével
 - FPGA, CPLD stb.
 - Ezekről majd később...



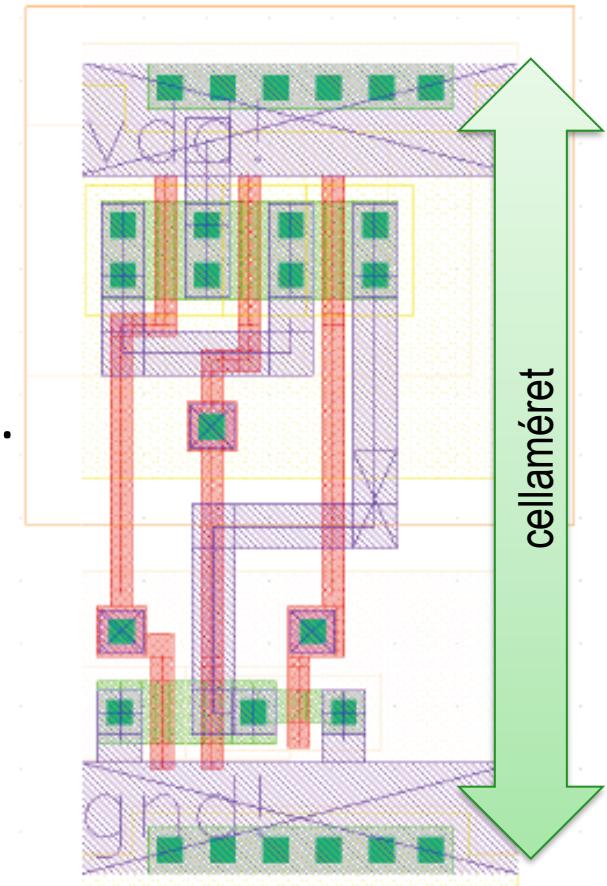
A cellakönyvtár

- Alapvető logikai áramkörök gyűjteménye
 - Alapkapuk, komplex kapu, flip-flop-ok stb.
 - Különböző meghajtóképességgel
 - (kimeneti árammal – ugyanazon terhelés mellett a nagyobb meghajtóképességű gyorsabb lesz.)
 - Ebből következően a fizikai méret és fogyasztás is más lesz
- A standard cella magassága rögzített, szélessége változhat.
 - Így a cellák azonos magasságú sorokban, az ún. cellasorokban helyezhetők el.
 - A cella tetején a táp, a cella alján a föld sín található.
 - A cella belsejében általában az első fémrétegen történik a huzalozás, így a magasabb szintű fémezés a cellán keresztülhúzható.



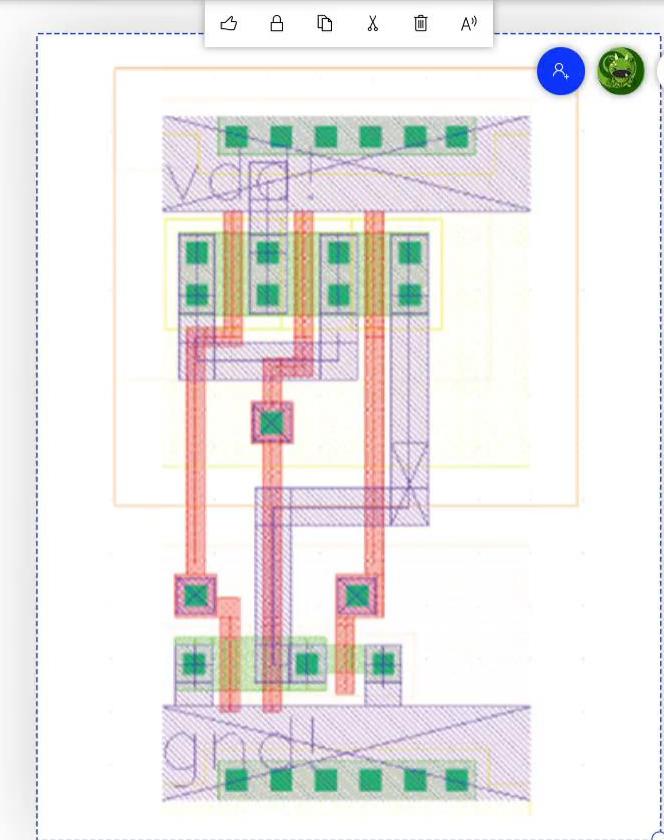
Példa: egy komplex kapu cellája

- A különböző színek a különböző rétegeket leíró geometriai alakzatokat jelképezik.
 - Ezek alapján készül el a litográfiai maszk a gyártáshoz
- Egyszerre ábrázolva jutunk az ún. **layout**-hoz.
 - Az összes, gyártáshoz szükséges mintázat.
- Pl. $Y = \overline{AB} + \overline{C}$ komplex kapu terve
 - Kék: 1.fémréteg
 - Piros poliszilícium, a tranzisztor gate anyaga
 - Zöld : az ún. aktív zóna, ide kerül adalékolás (S,D)
 - Kékes zöld: kontaktus a rétegek között



A fizikai tervezés (nem ZH anyag)

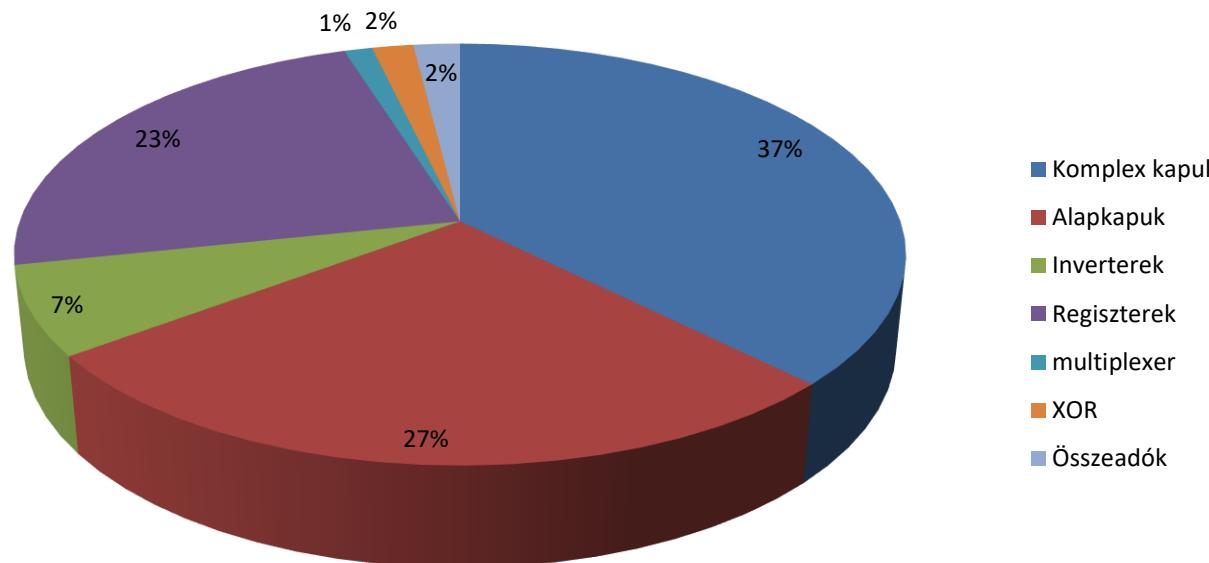
Microsoft Whiteboard



- Hogyan fejtsük vissza?

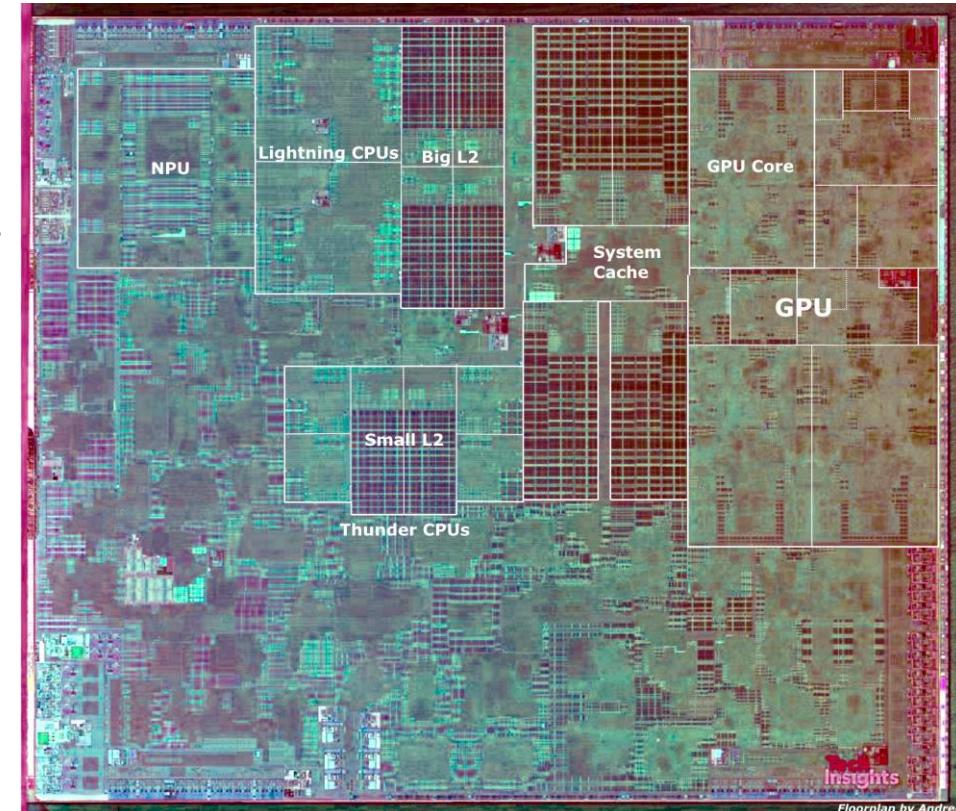
Példa cellakönyvtár használatára

- 6502 processzor mag (OpenCores.org)
- AMS 350nm, logikai szintézis: RTL compiler, alapbeállításokkal.
- 1679 cella, kb. $0,14\text{mm}^2$, 12088 db. tranzisztor



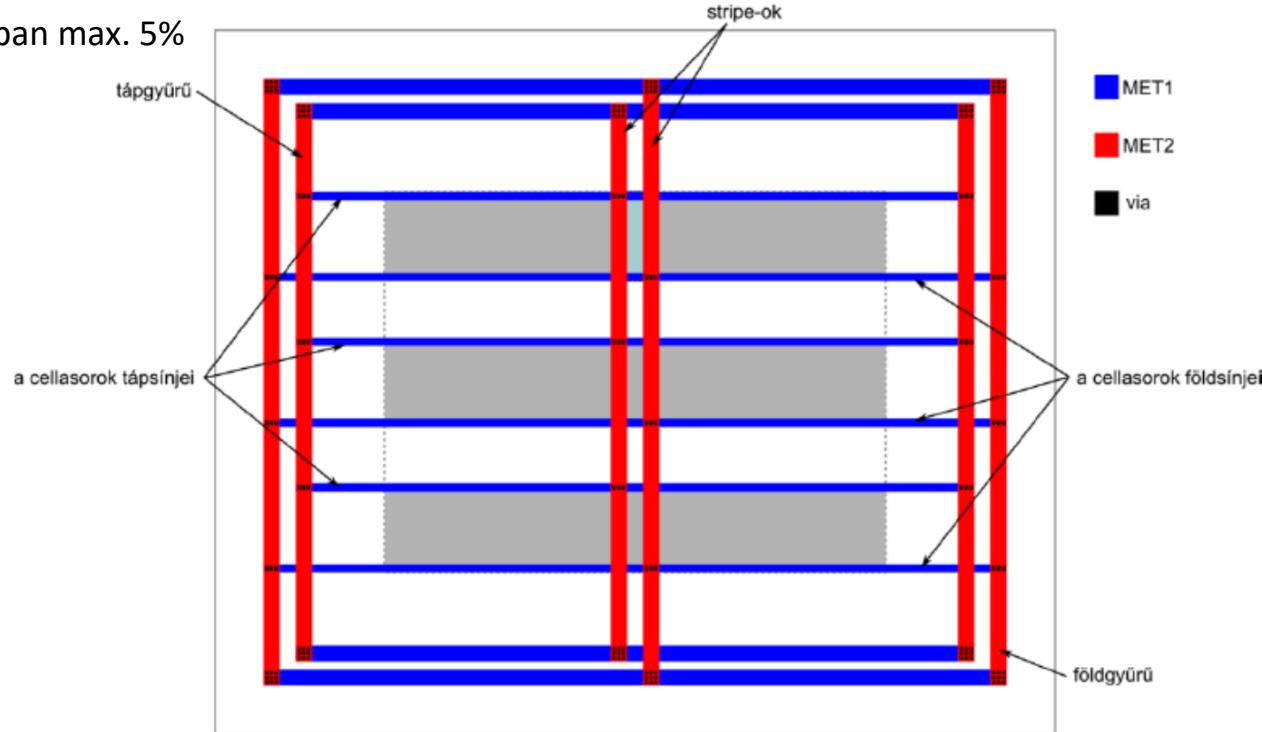
1. Floorplan

- Az áramkört alkotó blokkok, a be és kimenet elhelyezése a chip felszínén
 - Core: az áramköri mag
 - Pad: a kivezetések
 - A kivezetések körbeölelik az áramkör magját, innen az elnevezés: pad-ring.
 - (Apple A13 – jól követhető a floorplan. [Forrás](#))



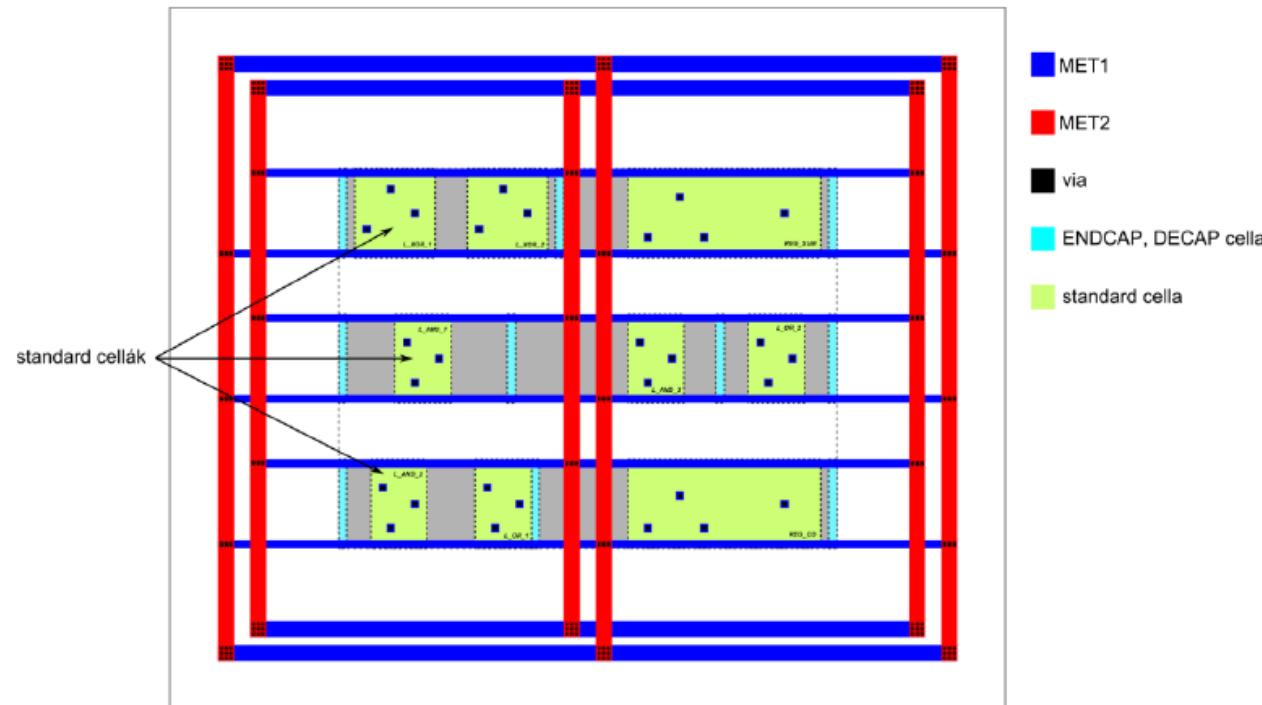
2. Tápellátás (power plan)

- Meg kell határozni a statikus és a dinamikus áramfelvételt.
 - CMOS esetben a dinamikus áramfelvétel adja a fogyasztás nagy részét.
 - Ehhez az egyes kapuk aktivitásának ismerete szükséges, amit logikai szimulációkkal kell előállítani.
- Az átlagos és a maximális fogyasztás ismeretében megtervezhető a tápellátó hálózat.
 - IR drop: a megengedett feszültségesés a cellán, maximális áram esetén
 - Általában max. 5%



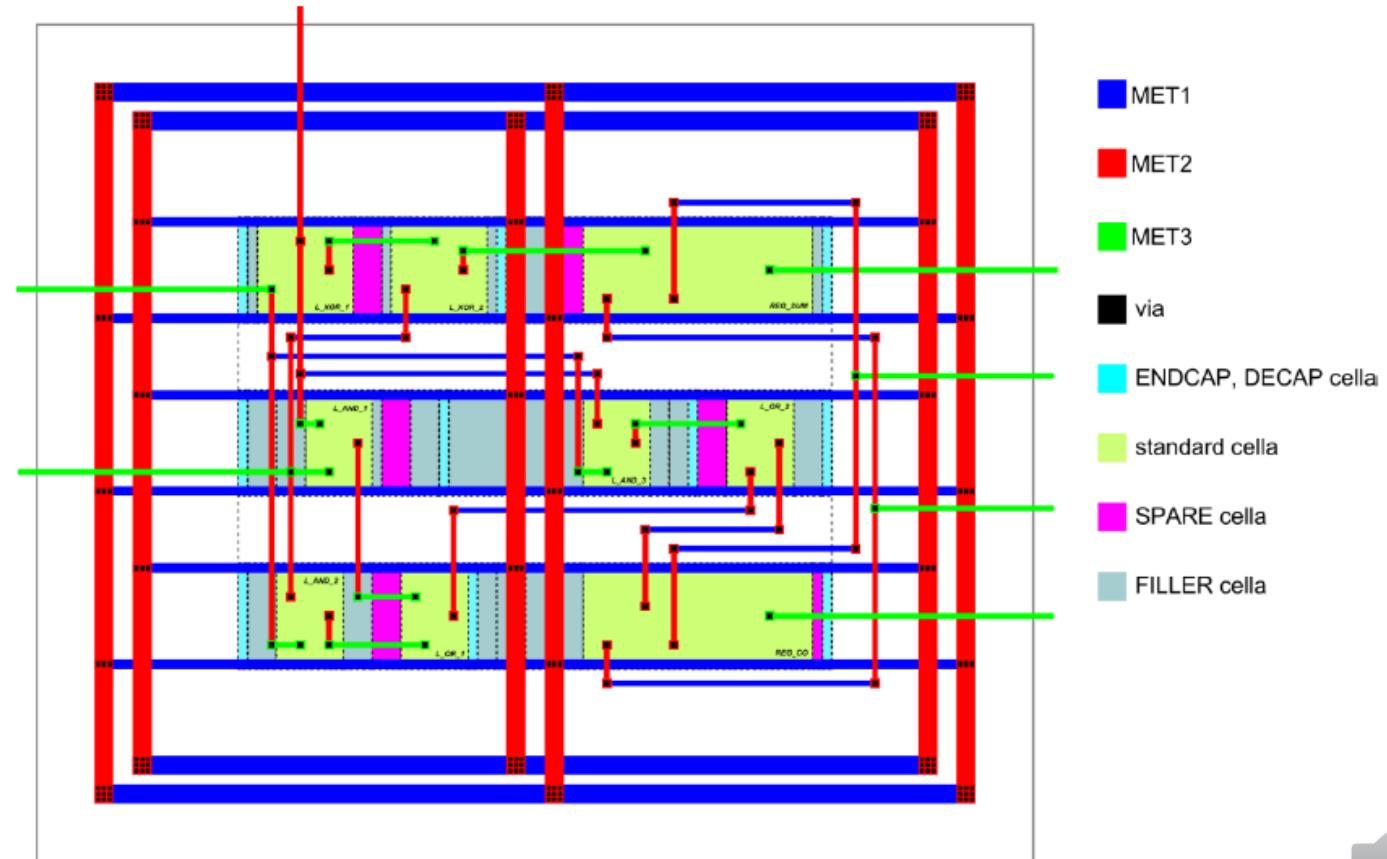
3. A cellák elhelyezése (place)

- A logikai funkciót megvalósító standard cellák elhelyezése



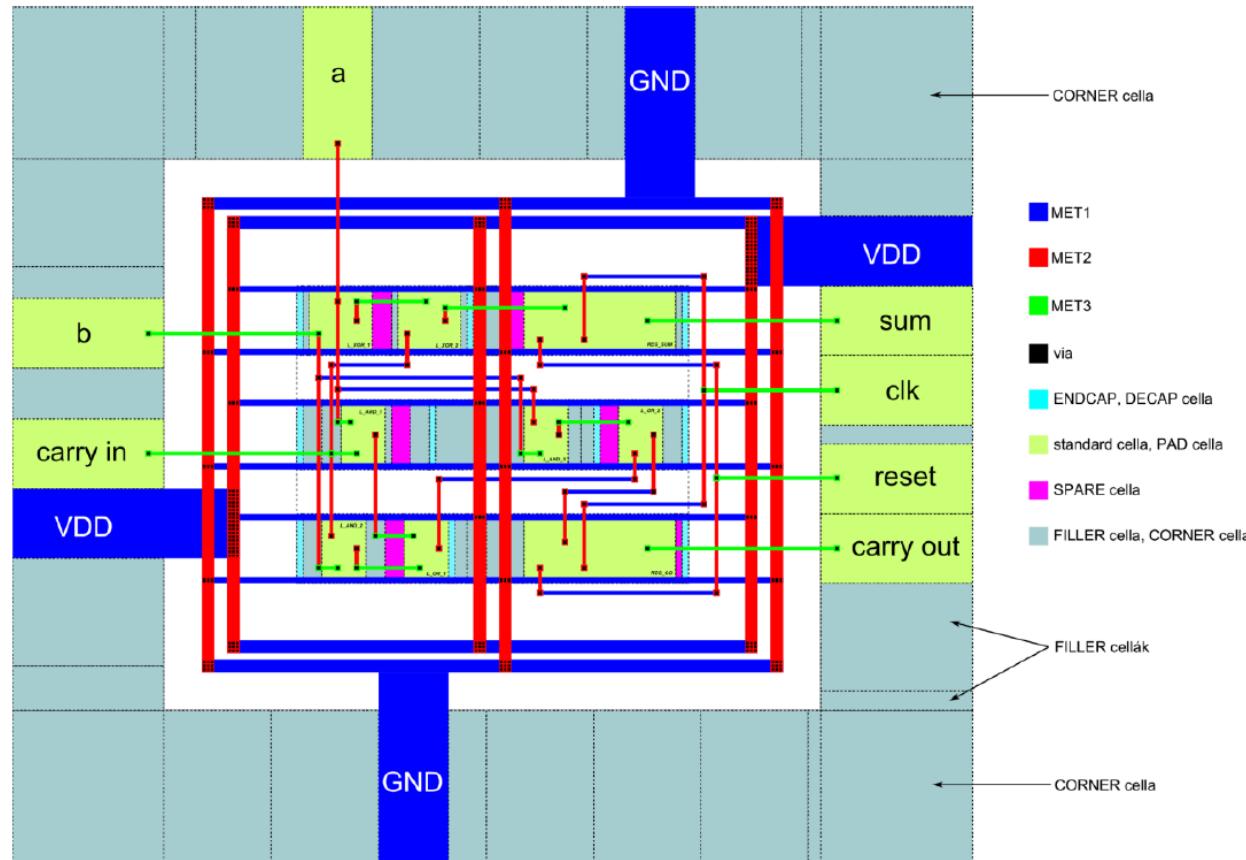
4. Huzalozás (route)

- A cellák közötti huzalozás elkészítése



5. A pad-ring elkészítése

- A fizikai tervezés folyamata (nem ZH anyag)



A post-layout szimuláció

- A fizikai tervezés befejezésével az összes kapu kimeneti terhelése pontosan ismert
 - A fizikai tervből a geometriai méretek visszafejthetők, ezek ismeretében pedig a kapuk terhelése kiszámítható.
- Így pontos késleltetési adatok állnak rendelkezésre
 - Ekkor hajtják végre a post-layout szimulációt.
 - Az időzítési adatok visszavezethetők a logikai vagy az RT szintű leírásba.
 - Így újra lehet ellenőrizni a tervet.
 - (és újrakezdeni, ha az időzítés nem megfelelő...)





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

A félvezető IP



A félvezető IP (semiconductor IP)

- IP core vagy IP block: egy újrafelhasználható egység, amely kereskedelmi vagy egyéb úton a végfelhasználóhoz (itt: a digitális rendszer tervezője) jut.
- Mintha alkatrészt venne és összeszerelné a chip felszínén
 - De ez az alkatrész csak virtuálisan létezik.
 - A helyzet hasonló, mint egy szoftverkönyvtár esetében.
 - A blokk felhasználásáért licenszdíjat fizet.
- A mai bonyolultságok mellett gyakorlatilag nem lehet minden „házon belül” kifejleszteni.
 - A jól bevált blokkokat érdemesebb megvenni.
 - Sok cég sikeres üzleti modellje, pl. ARM



Soft IP Core

- Szintetizálható RTL leírás (Verilog vagy VHDL nyelven)
 - A forrás titkosítható, a szintézist végző program tudja kikódolni a licenskulcs ismeretében.
- Vagy generikus netlista (Id. logikai szintézis lépései)
 - Az RTL leírásból készített általános, csak absztrakt kapukat és feldolgozó egységeket tartalmazó hálózatlista
- Mindkét esetben tetszőleges technológiára szintetizálható
 - Azaz hordozható különböző gyártók között
- Az adott technológiára történő fizikai tervezést és az optimalizálást azonban a tervezők végzik, ami nem mindig egyszerű feladat.
 - Sem az időzítés, sem az elfoglalt terület nem ismert előre és az IP gyártója sem tud garantálni emiatt semmit.



Hard IP Core

- A fizikai tervezés végeredménye, azaz a layout.
- Egy adott félvezetőgyártó adott technológiájához kötődik
 - A méret, a késleltetés és a fogyasztás garantált és ismert.
 - Analóg áramkörök esetén mindig, digitális áramkörök esetén pedig gyakran kézzel tervezett és optimalizált részeket is tartalmaz.
 - Emiatt minden paraméterében általában jobb minőségű, mint a soft IP
 - Viszont félvezetőgyártóhoz kötött
 - Más gyártó választása esetén újat kell licenszelní, nem hordozható.



Források, ajánlott irodalom, érdekességek

1. Gajski and Kuhn, "Guest Editors' Introduction: New VLSI Tools," in *Computer*, vol. 16, no. 12, pp. 11-14, Dec. 1983, doi: 10.1109/MC.1983.1654264.
2. EDA playground
3. System C
4. Czirkos Zoltán: SysCVideo 0.6
5. MOS Technology 6502 processzor visszafejtve és rétegszintű! szimulációja





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

IT eszközök technológiája

5. előadás

Memoriák



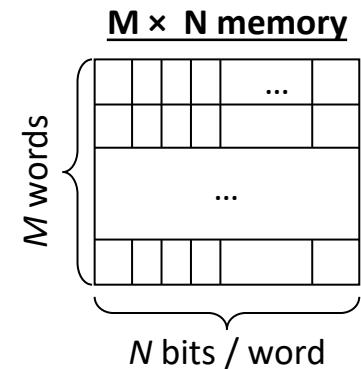
Memóriák

- Áttekintés
- RAM memóriák
 - statikus RAM
 - dinamikus RAM
- Tartalommal címezhető memóriák
- ROM memóriák
 - A maszk programozott ROM
 - A passzív terhelésű logikai kapu
 - A NOR / NAND elrendezés
- OTP ROM
 - Az egyszeri programozás eszközei: fuse, antifuse
- EEPROM
- FLASH EEPROM
- Új memória architektúrák

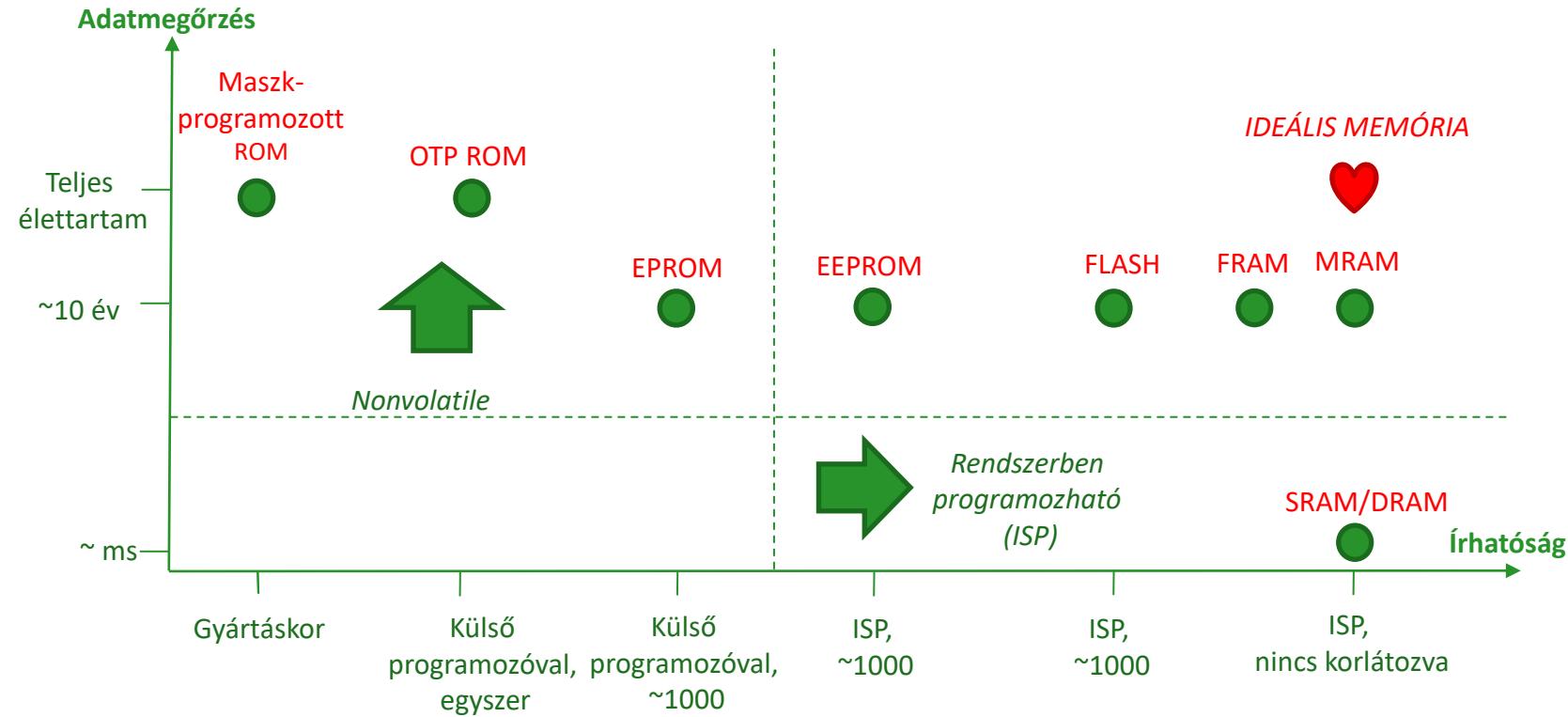


Félvezető memóriák alapfogalmai

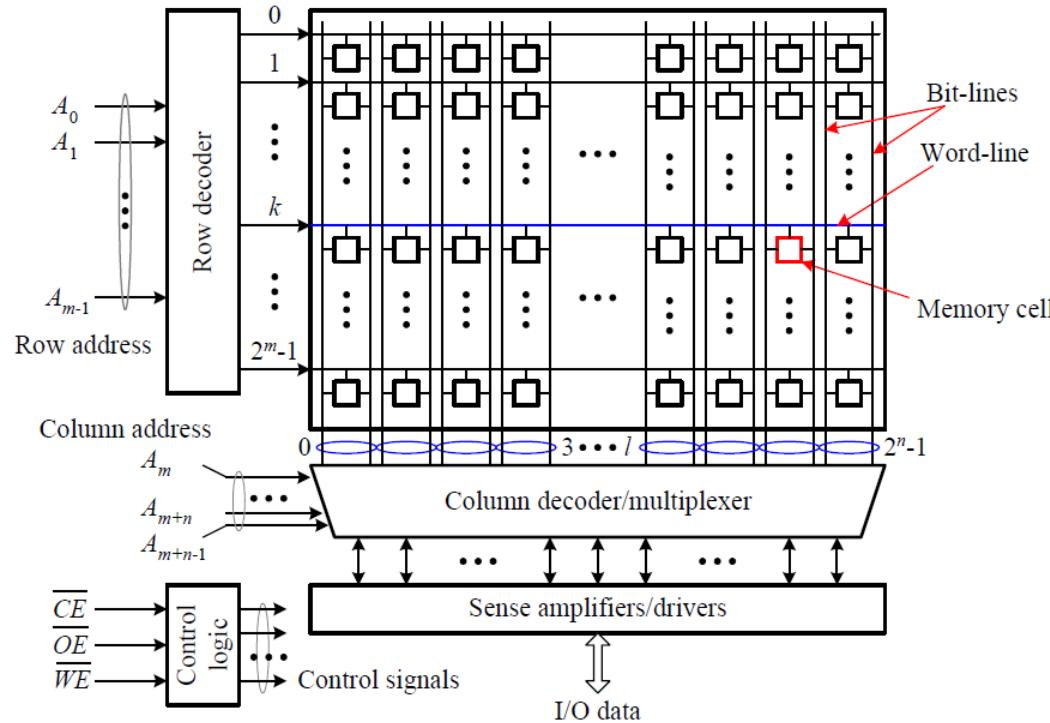
- **$M \times N$ memória**
 - M db N bit széles memóriaszó.
 M általában kettő hatványa,
 N általában 1, 2, 4, 8, vagy 8 többszöröse.
 - Pl. $64k \times 16$, azaz 1Mbit kapacitású memória.
- Tradicionális felosztás
 - ROM vs RAM, azaz csak olvasható ill. (nem szószerint) írható-olvasható memória
 - Kevésbé használható, a határok elmosódtak
 - Az EEPROM írható, az NVRAM nem veszíti el az információt a tápfeszültség megszűnésekor.
- Csoportosítás:
 - Írhatóság és adatmegőrzési idő szerinti csoportosítás jobb.



Félvezető memóriák csoportosítása



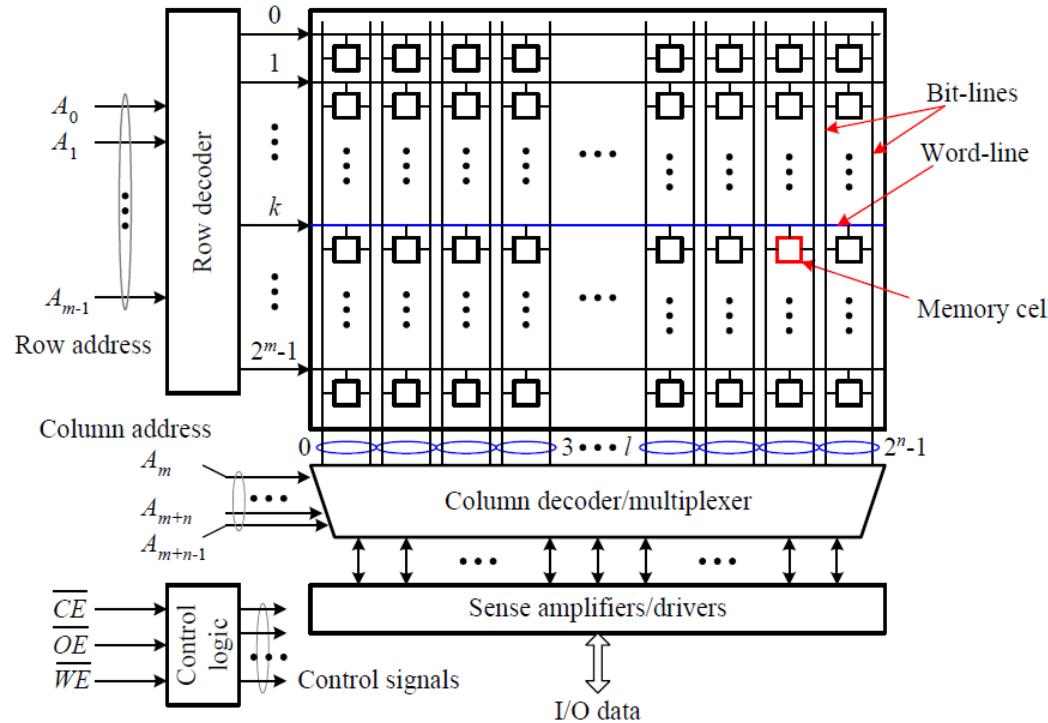
A tipikus memória struktúra



- A tárolás egy memória mátrixban történik.
 - A mátrix egy eleme, az elemi cella felel 1 vagy több bit információ tárolásáért.
 - Egy sorban lévő cellát az ún. **szóvonallal** (word line) aktiválunk, amelyet a cím egy részéből a sordekkódér állít elő.
 - Az aktivált cellák a **bitvonalra** (bit line) másolják a tartalmukat.
 - A cím másik részével a bitvonalaik közül választunk ki



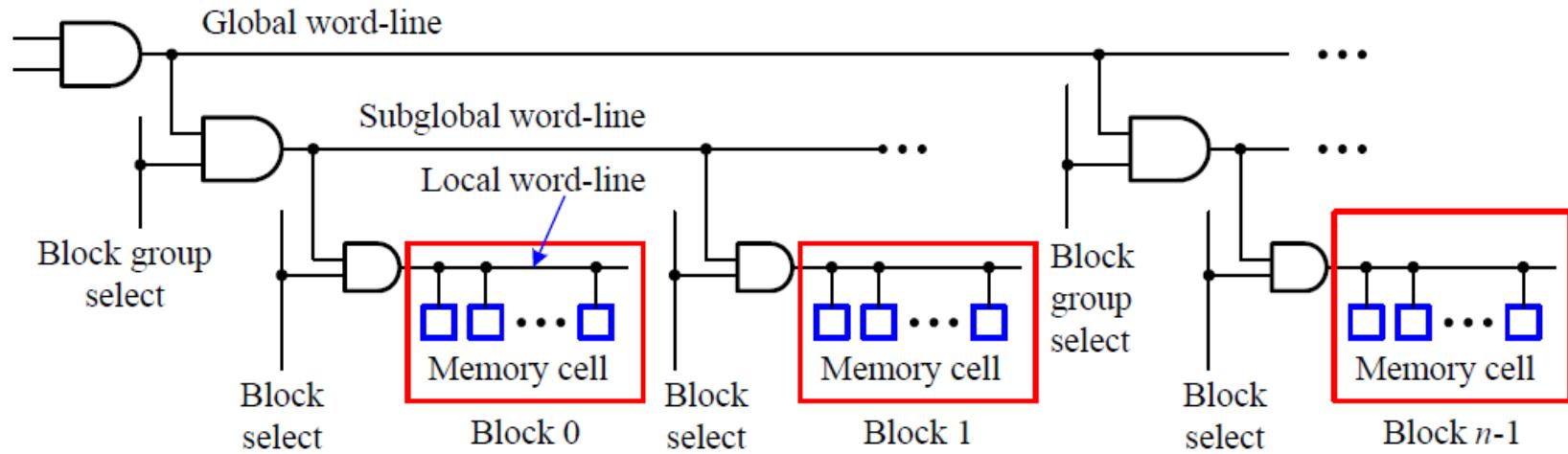
A tipikus memória struktúra 2.



- Az érzékelő erősítő állítja helyre a szokásos CMOS rail-to-rail jelet.
 - A cella tranzisztorai KIS MÉRETŰEK. (mivel minél kisebb a cella, annál nagyobb kapacitású memóriát lehet elhelyezni felületegységenként.)
 - Ezért nem teljesen digitális a működés, valójában néhány 100mV a logikai szint távolsága, amit az érzékelő erősítő állít helyre.



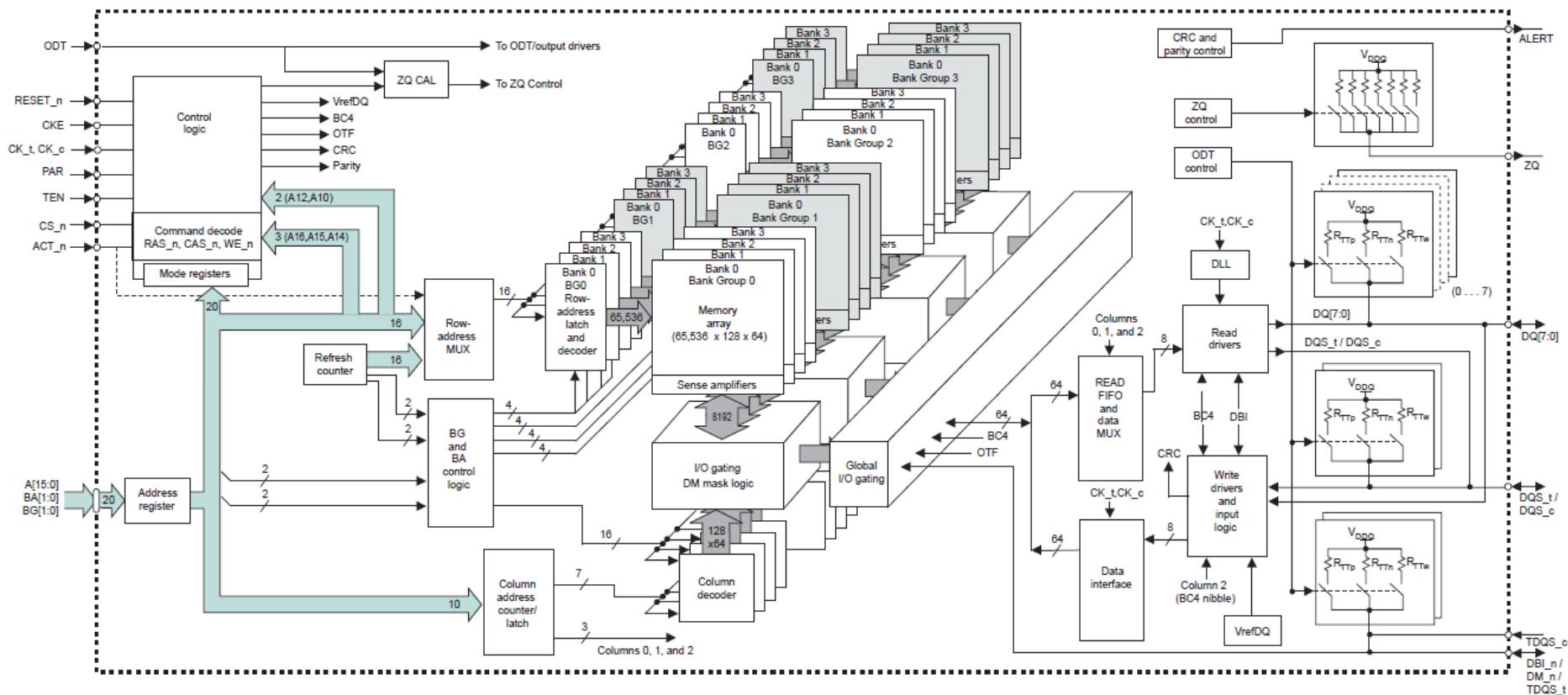
Nagykapacitású memóriák



- Túl sok sor lenne a mátrixban, ezért több részre bontják
 - Még további két szint hierarchia -> blokk csoport és csoporton belül blokkok.
- A hozzáférés hierarchikus
- A kívülről megjelenő forma a **bank**.



Egy valódi, 8Gbites, 1G x 8bit szervezésű memória (DDR4)





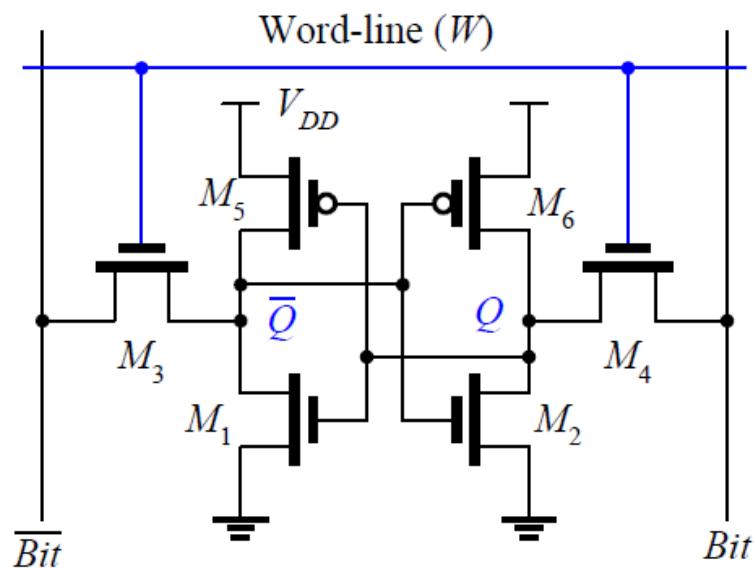
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

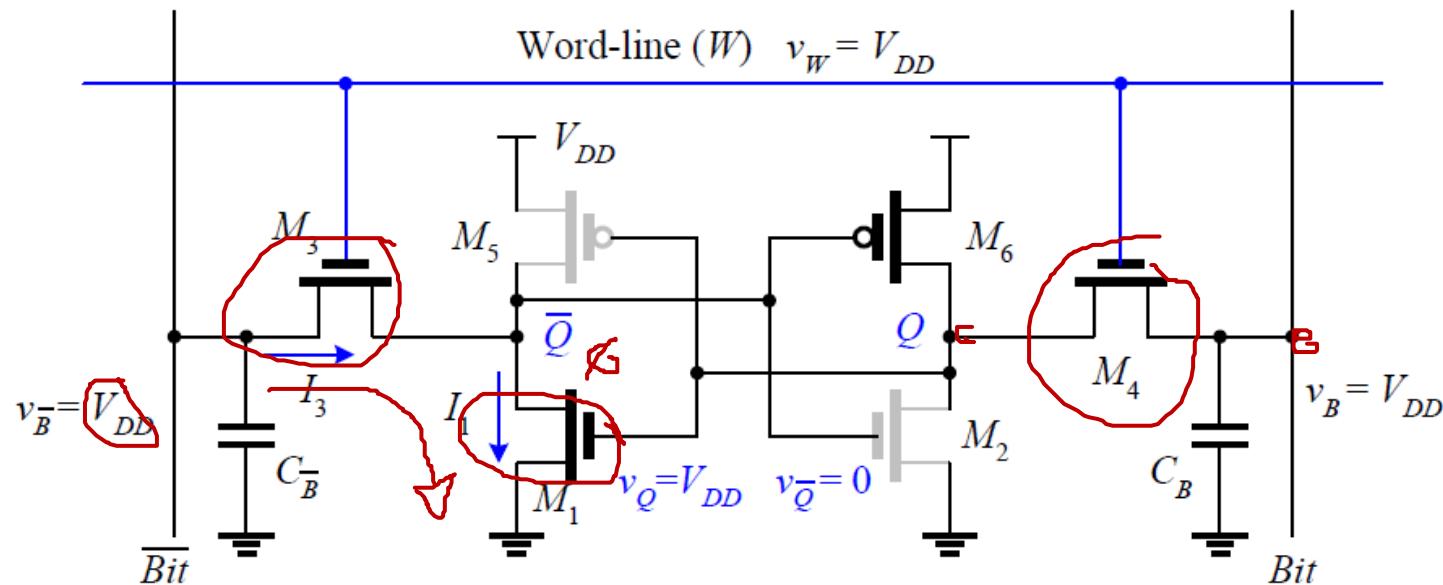
Statikus RAM (SRAM)



Statikus RAM memória

- A cellát 6 tranzisztor alkotja
- Két bitvonal van, ellentétes logikával.
 - Differenciális logikát fog használni.
- A két keresztbecsolt inverter felel a szokásos tárolási funkcióért.
- Hasonlít az SR latch-hez, de a beírás/olvasás 1-1 tranzisztoron keresztül történik, nem teljes a kapu.
 - (nyilván a kisebb helyfoglalás érdekében!)
- Az M3, M4 tranzisztorokat elérési (access) tranzisztornak hívjuk.
- A működés elvben csak „digitális” szemlélettel követhető, de a valóság nem ilyen egyszerű...

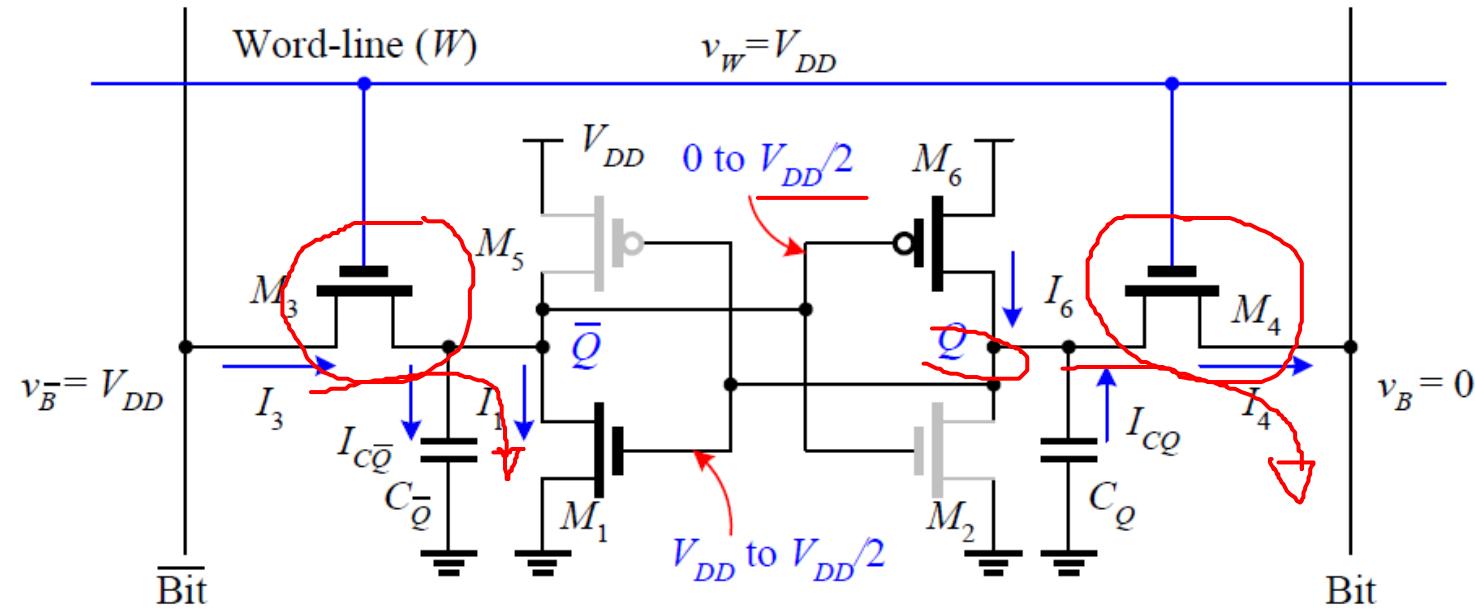




Feltételezzük, hogy a cellában logikai 1 van

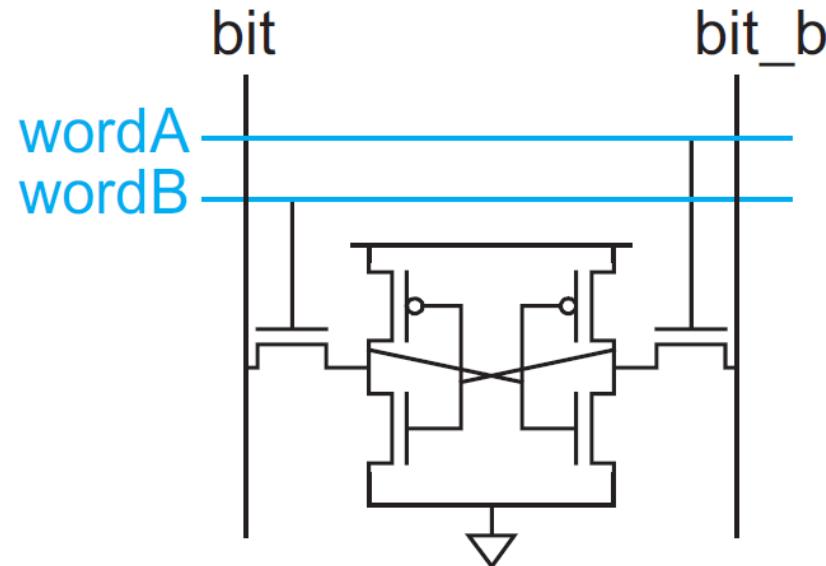
- A bitvonalakat tápfeszültségre töltik elő. (a cella kis tranzisztorain keresztül a feltöltés nagyon sokáig tartana!)
 - Az olvasás kezdetekor M3, M1 kinyit, a \overline{Bit} feszültsége lecsökken, miközben a Bit feszültsége változatlan.
 - Kb. 100-200mV feszültsékgülönbség elég ahhoz, hogy az érzékelő erősítő meghatározza a cella értékét.





- Feltételezzük, hogy a cellában logikai 1 van, és 0-t írunk be.
 - Most M_3 , M_1 ugyanúgy működik, mint olvasás esetén.
 - M_4 viszont Q szintjét a komparálási feszültség alá húzza
 - Ekkor M_1 árama csökken, M_5 pedig kinyit és a flip-flop átbillen.





- Láttuk, hogy az olvasáshoz tulajdonképpen nem szükséges minden két bitvonal az olvasáshoz.
 - Két szóvonal alkalmazásával egyidőben két cellából lehet olvasni.
 - Az íráshoz minden két bitvonalra szükség van.
 - "Ügyes" időzítéssel pl. egy ciklus első felében két olvasást, a második felében pedig egy írást lehet végrehajtani.
 - Tipikusan CPU regiszterfájlok esetén alkalmaznak hasonló elrendezést.





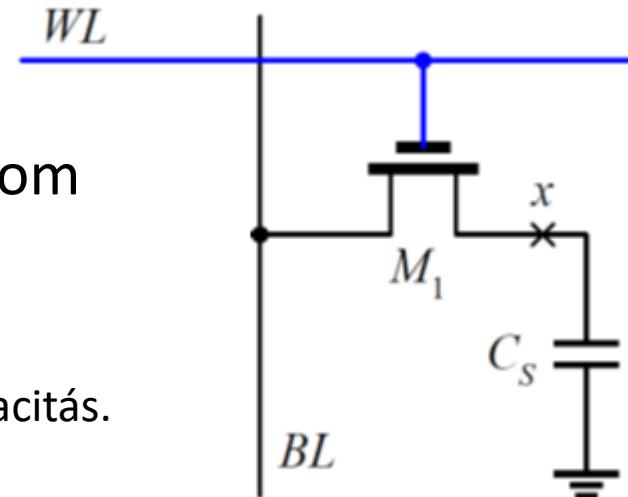
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Dinamikus RAM (DRAM)

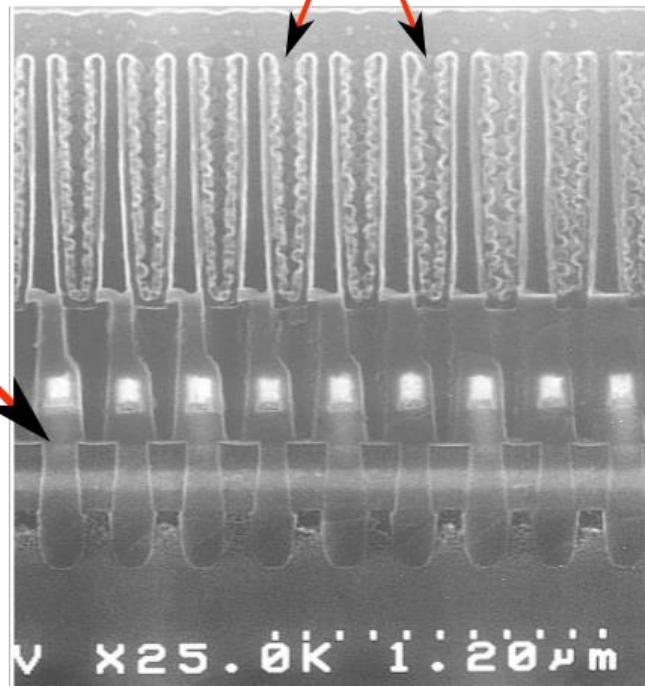


A dinamikus RAM cellája

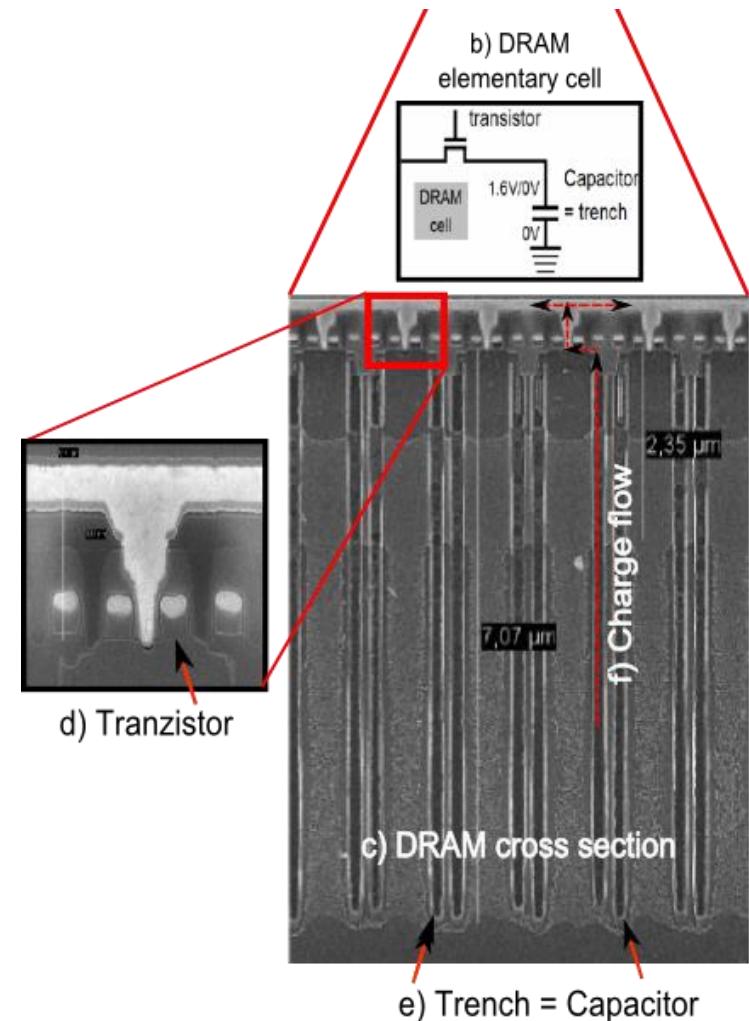
- A tároló kapacitás általában speciális, három dimenziós struktúra
 - Stack kapacitás (Samsung, Micron stb.)
 - A tranzisztor felett készül el egy vékonyréteg kapacitás.
 - Árok (trench) kapacitás
 - A tranzisztor mellett árkot marnak a szilíciumba, majd ebben alakítják ki a tároló kapacitást
- A kapcsolás a létező legegyszerűbb
- Az információt a C_S kapacitás tárolja, amit az M1 tranzisztor kapcsol a bitvonalra.
- A tároló kapacitás tipikusan 25-40fF



A tároló kapacitás megvalósítása (illusztráció)



b) Tranzistor



- Forrás



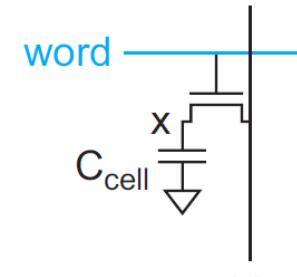
DRAM írás és olvasás

■ Írás

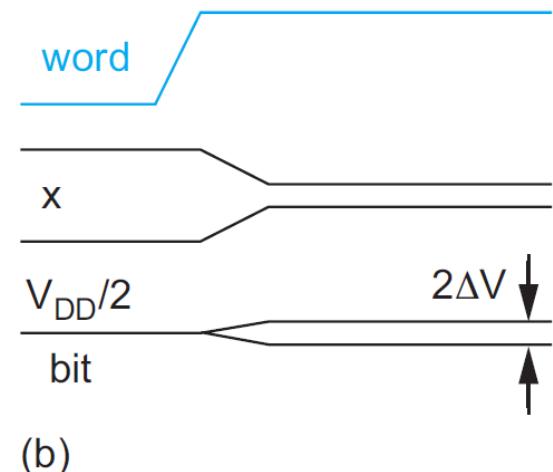
- A bitvonalat a logikai értékre állítva a szóvonal aktiválásakor a tároló kapacitás kisül, vagy feltöltődik.

■ Olvasás

- A bitvonalat a tápfeszültség felére előtöltik
- A szóvonal aktiválásakor a tranzisztor rákapcsolja a bitvonalra a tároló kapacitás töltését.
- Töltésmegoszlás történik, a bitvonal feszültsége:
- $\Delta V = \frac{C_S}{C_{BL} + C_S} V_{DD}/2$ változik meg, ez kb. 20-50mV
- Az érzékelő erősítő ezt állítja helyre.
- Az olvasás DESTRUKTÍV. A kiolvasott értéket vissza kell írni



(a)



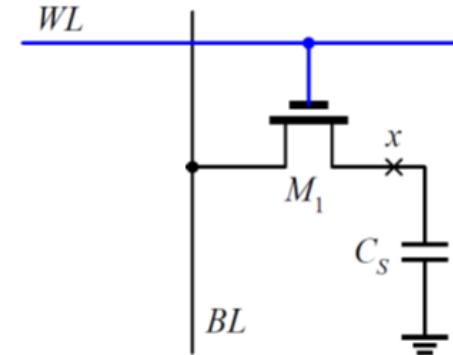
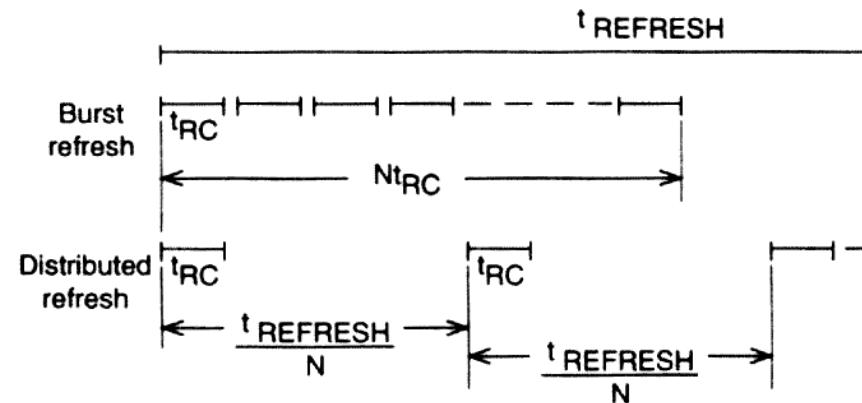
(b)



A töltésmegmaradásból vezetve

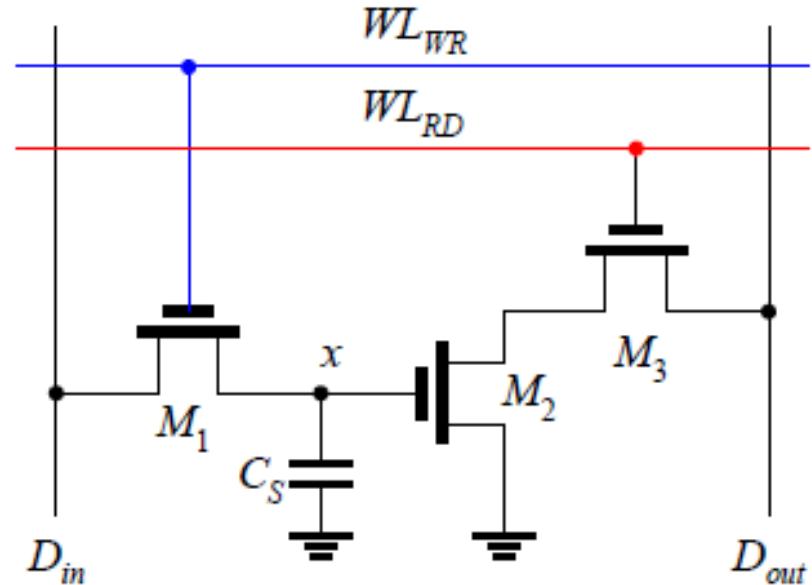
Frissítés

- A tároló kapacitásból a töltés szivárog. Leginkább a drain lezárt pn átmenetén. A szivárgási áram ráadásul hőmérsékletfüggő. Kb. 30°C hőmérséklet növekedés megtízszerezi a szivárgási áramot.
- A DRAM-ot frissíteni kell.
- egyszerre 1 sort frissítenek, ennek t_{RC} ideje kb. 100-200ns
 - **Burst refresh:** az összes sort egyszerre frissítik.
 - **Distributed (hidden) refresh:** van egy számláló, ami nyilvántartja az utolsó frissített sort, és minden soron következő kerül frissítésre.



A beágyazott DRAM (embedded DRAM)

- Az egytranzisztoros dinamikus RAM spec. technológiát igényel.
- SoC-ben általában „csak” standard CMOS áll rendelkezésre
- Tároló kapacitás helyett az M1-M2 tranzisztor szórt kapacitása tárol.
 - A C_S kapacitás **NEM** külön alkatrész!



- Érdekesség: eredetileg ez az elrendezés volt az első DRAM
- Nagyméretű cache memóriákban alkalmazzák, rejtett frissítéssel.
 - (kedvezőbb méret, mint az SRAM)



CAM

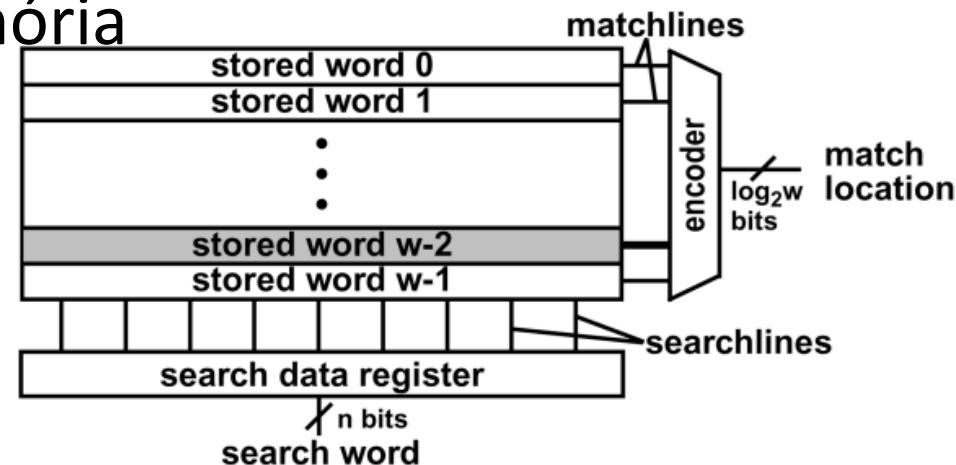
Content Addressable Memory

Azaz tartalommal címezhető memória
(Asszociatív memória)



Tartalommal címezhető memória

- A feladat most **fordított!**
- A tárolt adat címét keressük...

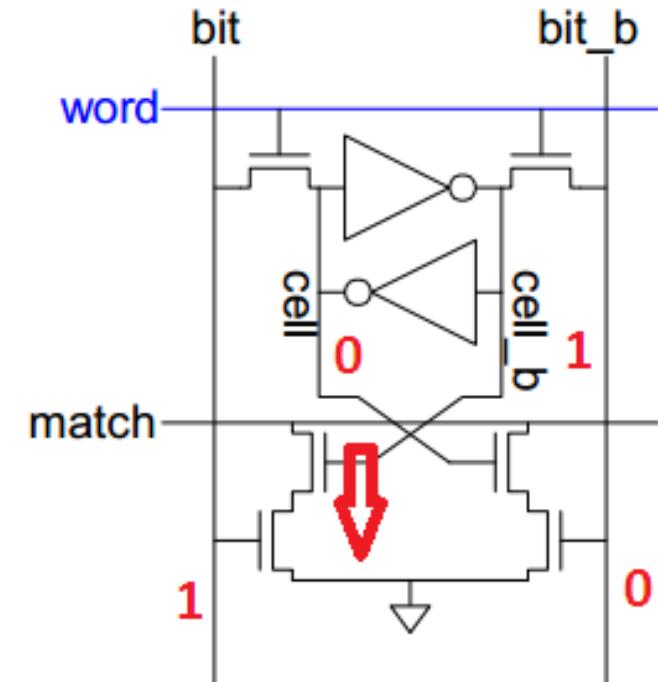


- 1 órajel alatt állítja elő a keresett információ címét
 - Azaz $O(1)$ a keresés, nem pedig pl. $O(\log_2 n)$ és ráadásul minden ugyanaddig tart!
 - A **search data register**-t hasonlítja össze párhuzamosan a tárolt információval
 - A match vonalak közül csak egy lesz aktív, ebből a cím előállítható
- Az előállított címhez a tartalom egy „hagyományos” memóriából előállítható (HW asszociatív tömb...)
- Használata:
 - TLB: virtuális page cím – fizikai page cím
 - Pl. routerekben MAC address – port
- Szokásosan kb. 2G keresés másodpercenként.



CAM elemi cella

- A statikus RAM celláját egészítik ki.
 - 10 tranzisztoros CAM cella
- A keresett bit a bitvonalra kerül.
- Ha megegyezik a tárolt bittel,
nincs áramút a match line és a föld között.
- Ha nem egyezik meg, akkor
viszont kialakul áramút!
 - Figyeljük meg a trükkös keresztbekötést! Mintha egy kizáró vagy kapu lenne.
 - A keresés a teljes soron zajlik, egyszerre.
 - Ha sehol sincs áramút, akkor a match line feszültsége nem változik meg.
 - Azaz pontosan ugyanaz az információ szerepel a bitvonalakon, mint a tárolt.
- Viszonylag nagy fogyasztású
 - Mivel az összes match vonal egyszerre működik és elő kell tölteni





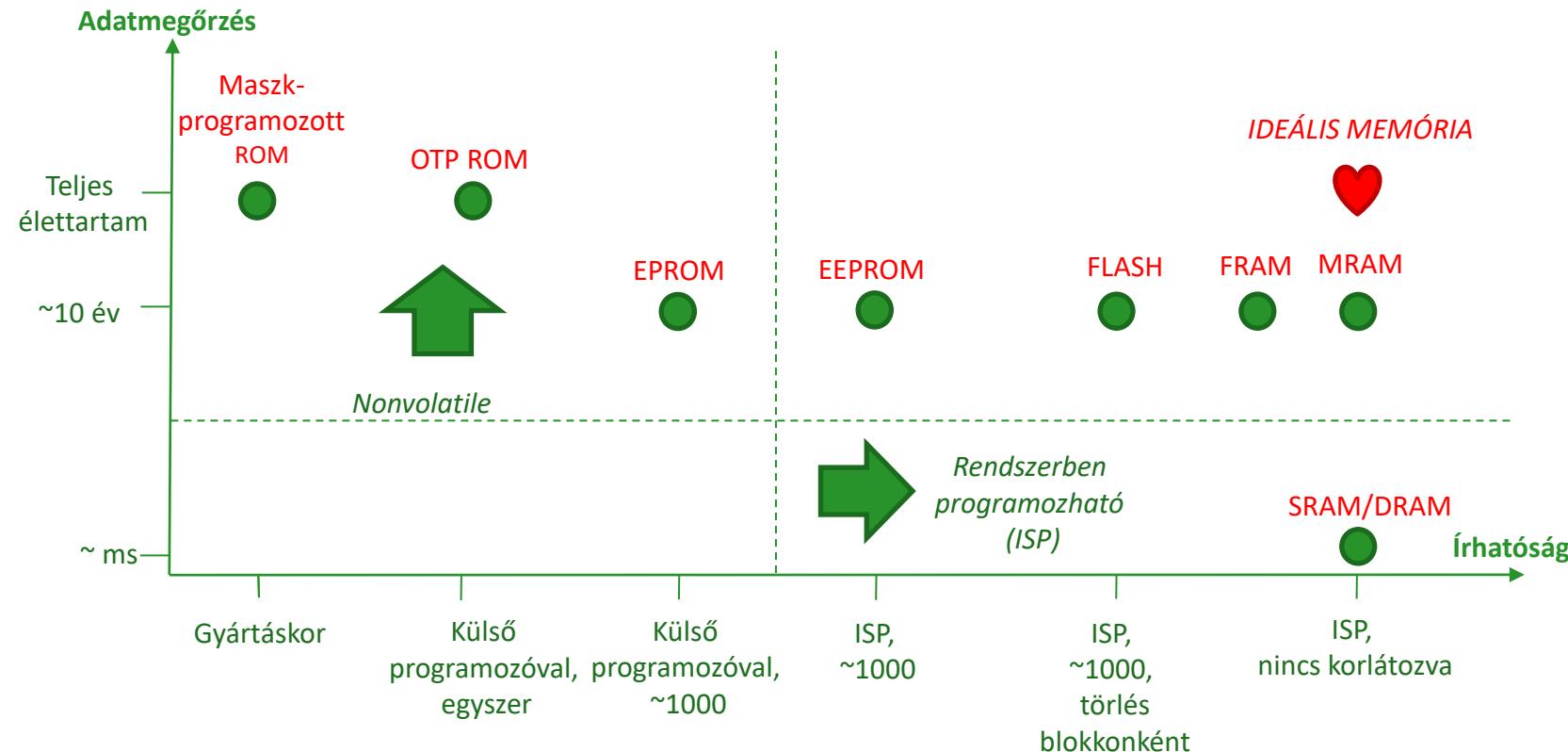
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

IT eszközök technológiája

ROM



Emlékeztető

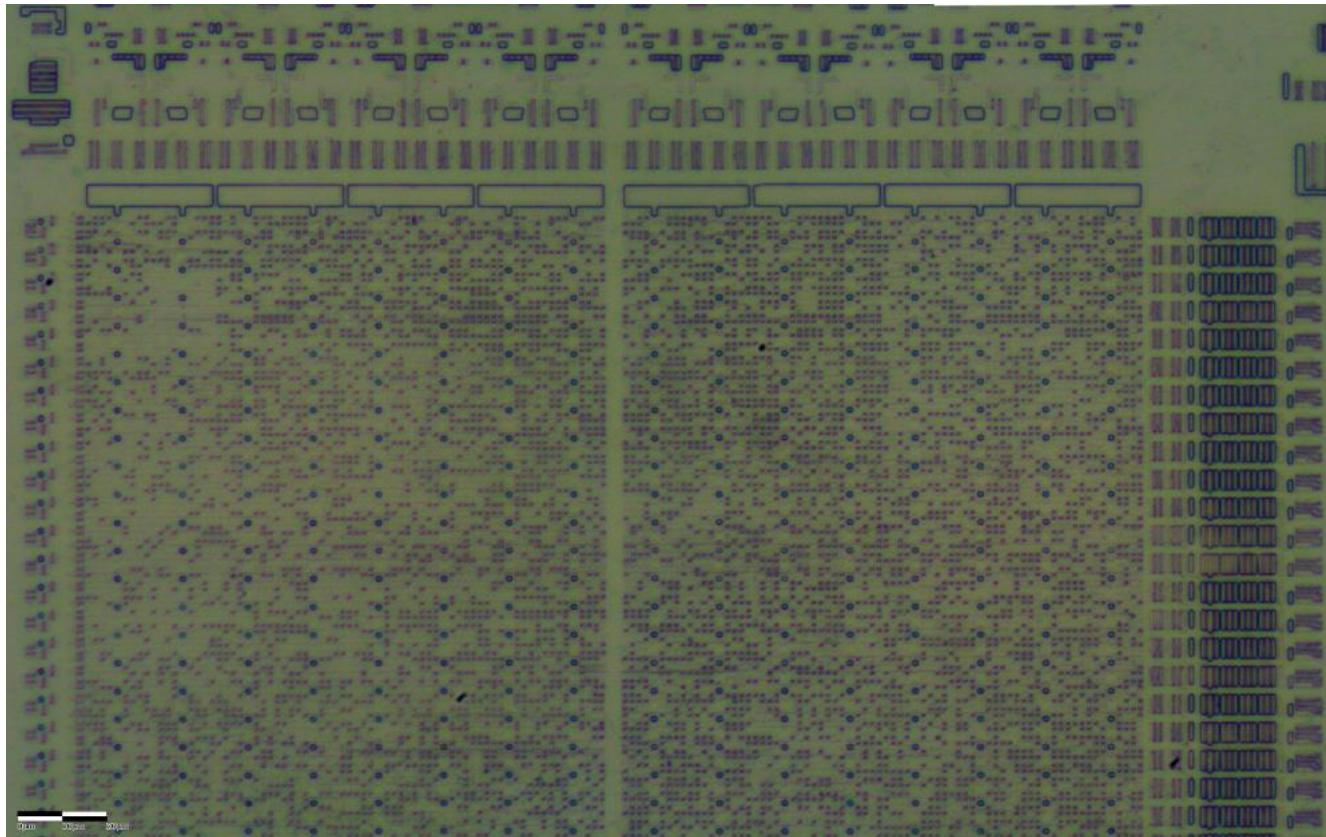


Maszk programozott ROM (MROM)

- Az információ **gyártáskor** kerül bele.
 - Az információ egy litográfiai lépéskor kerül bele, ehhez maszk szükséges, az elnevezés tehát innen származik.
 - Nagyon nagy sorozatú gyártásnál éri meg, mert a maszk elkészítése drága, viszont egy bit kis területet foglal, így egy bitre vetített ár kedvezőbb.
 - SoC-ben, mikroprocesszorokban a mikrokód, ill. a look-up táblázatok készülnek maszk programozott ROM segítségével.
 - Gyakran előfordul, hogy pl. mikrokontrollerek esetében a bootloader, a C runtime és a periféria könyvtár maszk programozott ROM-ban van, így kevesebb user flash memória szükséges.
 - Nagy sorozatban a gyártók megadott firmware-rel is hajlandóak legyártani a mikrokontrollereket.



Maszk programozott ROM – néha még a hamisítónak is megéri!

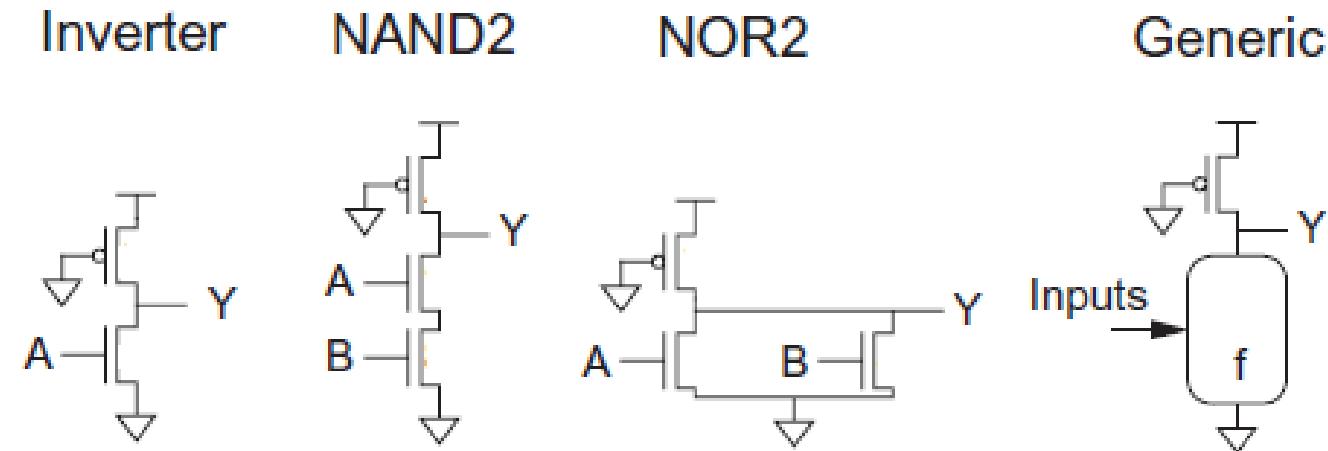


Forrás és történet: <http://zeptobars.ru/en/read/FTDI-FT232RL-real-vs-fake-supereal>, avagy miért nem működött az olcsó USB-RS232 átalakító...

„From now on one should pay more and more attention when working with small shady distributors. Their slightly lower price could cause numerous hours of debugging fun.”



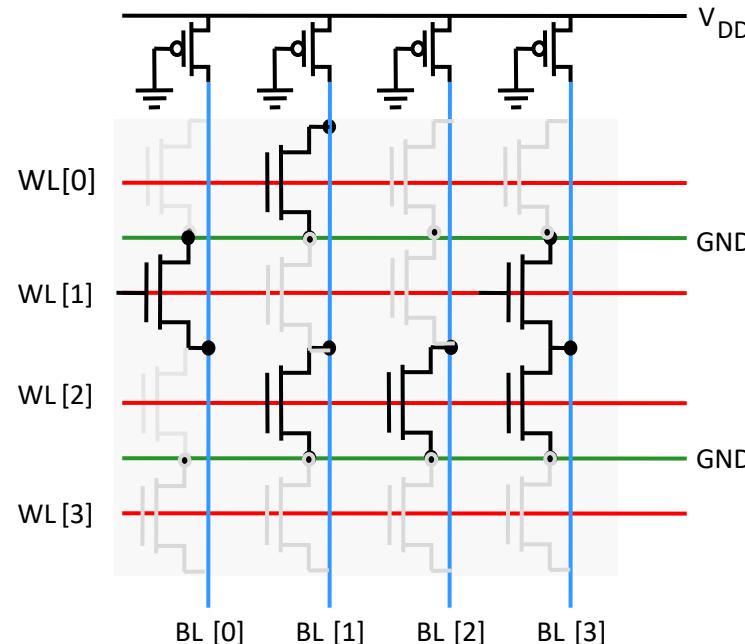
Pszeudo NMOS kapu



- A pMOS tranzisztort nem vezéreljük, hanem mindig nyitott.
 - Egy ellenállással modellezhető ilyenkor.
 - inverter esetén, ha $A=0$, $Y=1$, hiszen az nMOS zárt. Ha $A=1$, akkor áram folyik, a kimenet feszültsége: $V_Y = \frac{R_{NMOS}}{R_{NMOS}+R_{PMOS}} V_{DD}$
 - Tehát az alacsony szint nem 0V, hanem csak ahhoz közelálló, ~100mV feszültség
 - Statikus fogyasztása van, ha a kimenet 0.
 - Cserébe egyszerűbb: 2n helyett n+1 tranzisztor



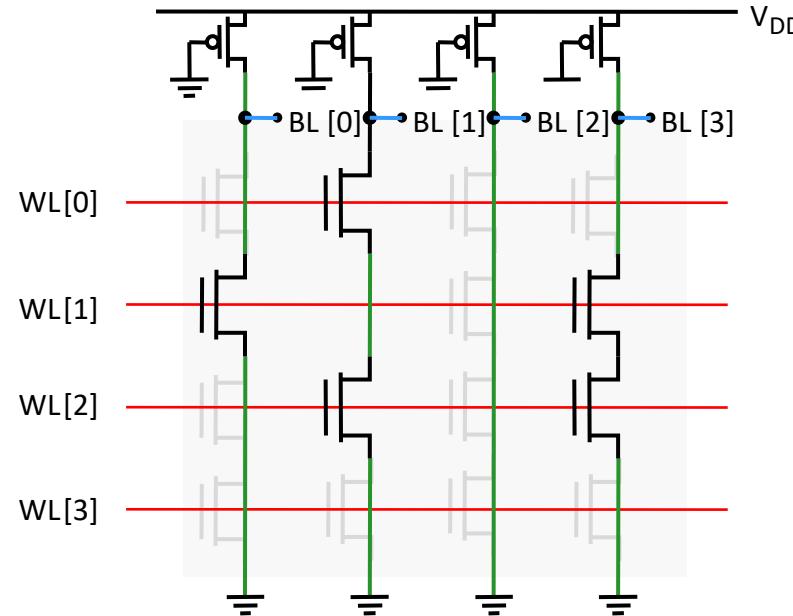
Maszk programozott NOR ROM



- Az elemi cella egy nMOS tranzisztor.
 - Az információt az tárolja, hogy egy adott helyen lévő tranzisztor elektromos szempontból jelen van-e vagy sem.
 - Az aktivált tranzisztor a bitvonalat a földre köti.
 - Egy adott bitvonalra nézve ez egy sokbemenetű pszeudo nMOS NOR kapu.
 - A bemenetek közül egyszerre csak egy lehet aktív – ha a tranzisztor vezet 0, egyébként pedig 1 a programozott érték.



NAND ROM



- A tranzisztorokat most sorba kapcsoljuk, így egy pszeudo nMOS NAND kaput kapunk.
 - Az információt az fogja tárolni, hogy egy adott helyen a tranzisztort rövidrezártuk-e fémezéssel, vagy sem.
- Kiolvasáskor minden szóvonalat aktíválunk, kivéve a kérdéses sort. Ha az adott helyen nincs tranzisztor, a kimenet 0, mert a NAND kapu összes további tranziszторa vagy vezet, vagy rövidrezárt. Ha van tranzisztor, a kimenet 1.

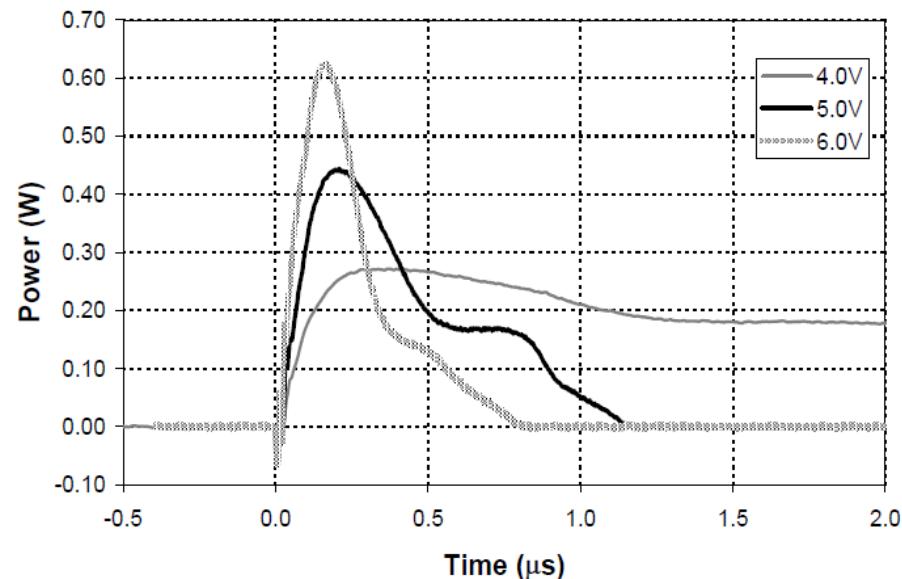
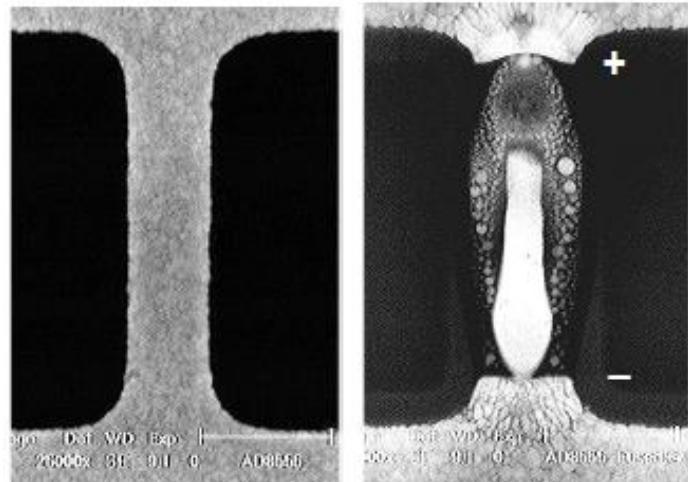


Egyszer programozható ROM

- Firmware
- On-chip konfiguráció kialakítása, akár működés közben is
 - Kalibrálási konstansok
 - Titkosítási kulcsok
 - Chip azonosító
 - Pl. nem működő részek megjelölése, összeköttetések kialakítása
- Programozható logikai eszközök (ld. később)
- Egyéb, pl. jogszabályban előírt, később nem módosítható adatok tárolása
- Az információtároló elem a fuse vagy antifuse.
 - Fuse: rövidzár, kiégetés (nagyobb energiájú impulzus) után nem vezet.
 - Keskenyített nagyobb ellenállású réteg pl. poliszilícium
 - Antifuse: kiégetés után vezet, égetté nélkül szakadás. Minél kisebb az ellenállása, annál kevesebb lesz a késleltetés.



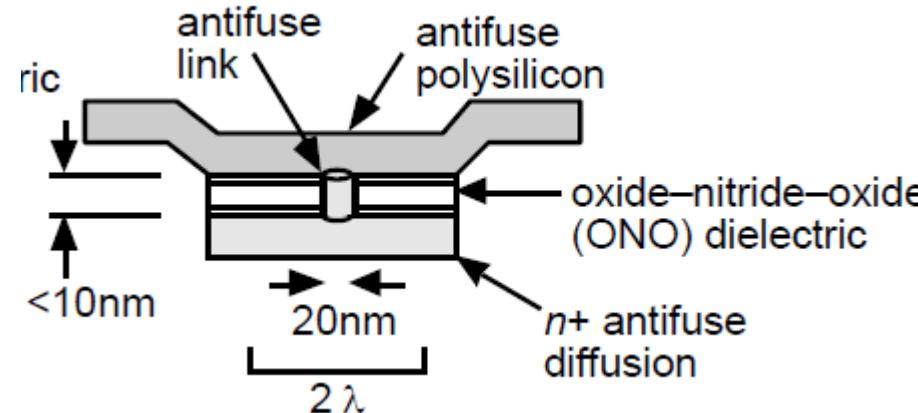
Fuse



- Poliszilícium vagy szilicid pl. NiSi (nikkel-szilícium ötvözöt)
- A keskeny rész ellenállása a legnagyobb.
 - Helyi melegedés jön létre.
 - Ahol a folyamat megindul, ott a visszacsatolás pozitív, hiszen a melegedés miatt az ellenállás is nagyobb.
 - Nagyobb teljesítmény esetén az anyag elpárolog, a kiégetés gyorsabb
 - Nagy területet foglal a felszínen.



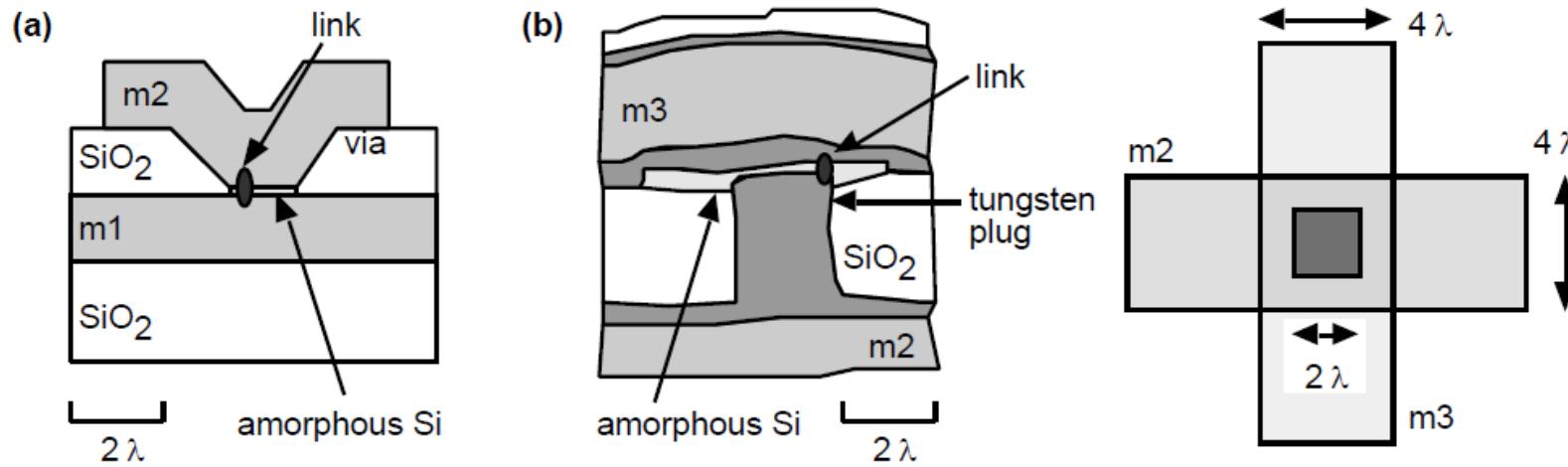
PLICE



- PLICE – programmable low impedance circuit element
 - Vékony $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{SiO}_2$ szigetelő.
 - A szigetelő átüt, majd megolvad.
 - Néhány 100 Ohm-os ellenállásként viselkedik kiégetés után
 - Felszínre merőlegesen helyezkedik el.



Fém – fém antifuse



- A két fémréteg között az amorf szilícium szigetelőként viselkedik.
- Nagyobb térerősség hatására átüt, majd újrakristályosodik, azaz vezetővé válik.
- Kb. 80Ω egy kontaktus.





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Elektromosan programozható memóriák



A tárolás fizikai elve

- Az információt egy speciális MOS tranzisztor **küszöbfeszültsége** tárolja.
 - A küszöbfeszültség változtatható (ez a programozás)
 - kiolvasáskor:
 - A tranzisztor vezet/nem vezet (SLC – single level cell)
 - Adott feszültségek mellett jól megkülönböztethető áramok folynak (MLC – multi level cell 4db, TLC - triple level cell 8db, QLC – quad level cell 16db)
- A küszöbfeszültség: az a gate-source közé kapcsolt feszültség, amikor a vezetőképes inverziós csatorna létrejön
- A küszöbfeszültség függ a szigetelőben lévő töltésekkel
 - Pl. n csatorna esetén a negatív töltés gátolja a csatorna kialakulását, azaz a küszöbfeszültség megnövekszik
 - a pozitív töltés viszont elősegíti. Szélsőséges esetben $V_{GS}=0$ esetén is vezethet a tranzisztor.



Tehát ha ki lehet alakítani töltés tárolására alkalmas konstrukciót, akkor a küszöbfeszültséget tetszőleges irányba változtathatjuk

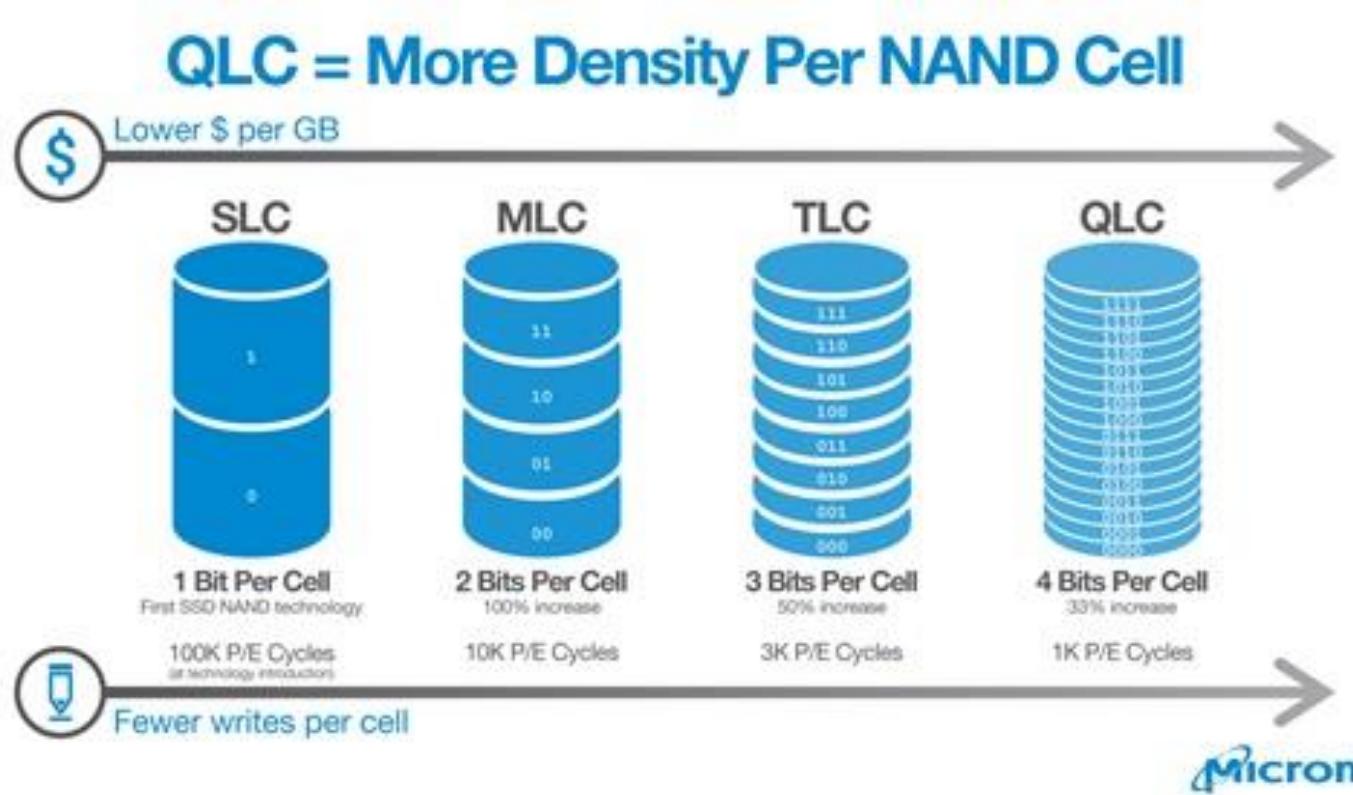
- Azaz **programozhatóvá** tessük a MOS tranzisztort!
- Többfajta konstrukció:
 - Lebegő (sehova nem kötött poli-Si) gate, az ún. floating gate
 - Többrétegű szigetelő anyagok határfelülete, amely töltéscsapdákat tartalmaz – charge trap flash

A programozás/törlés fizikai elve

- Elektronokat kell mozgatni a töltés-tároló eszközre, amelyet általában egy vékony szigetelő választ el.
 - Két fizikai hatás
 - Lavina letörés: nagymennyiségű, nagyenergiájú, ún. forró elektron jelenik meg, amelyek energiája elég ahhoz, hogy keresztülhaladjon a szigetelőn
 - Alagút (tunnel) jelenség: megfelelő térerősség hatására egy keskeny szigetelőn biz. valószínűséggel keresztülhalad az elektron.
 - Ha az elektron a szigetelőben „ragad” (töltéscsapda), akkor küszöbfeszültség változtatása egyre nehezebb, a tranzisztor „elhasználódik”



Programozás/törlési ciklusok száma és a kapacitás



- A wear-levelling Operációs rendszerekből ill. Számítógépes architektúrákból ismert.



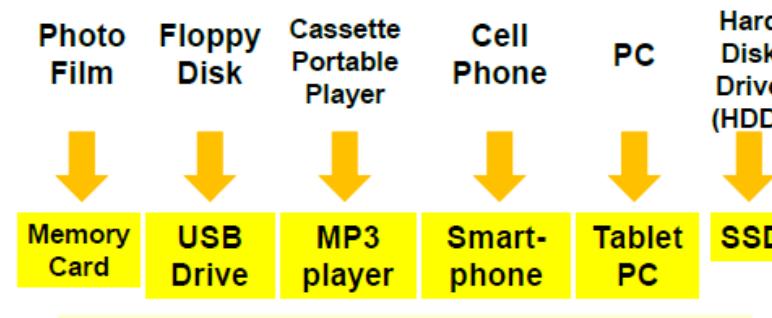
(E)EEPROM

■ Régi technológiák

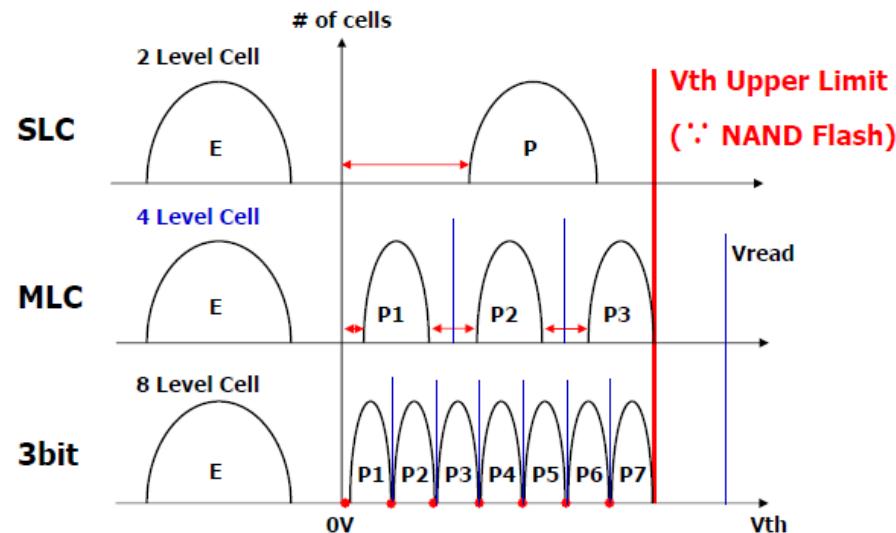
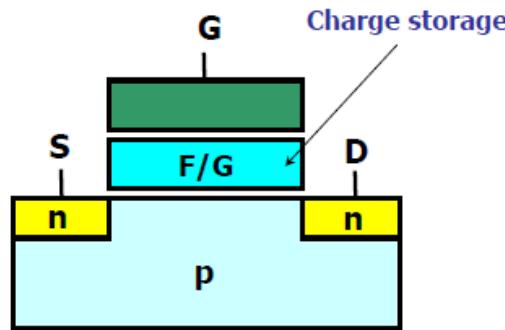
- **EPROM**: programozás lavaletöréssel, törlés UV fény segítségével
- **EEPROM**: programozás-törlés alagútjelenséggel.

■ FLASH EEPROM

- Programozás: lavaletöréssel vagy alagútjelenség segítségével, törlés alagútjelenség segítségével. A törlés nagyobb blokkonként (kezdetben egyszerre történt) innen a név.
- A legsikeresebb memóriatípus...
- 1980 környékén fejlesztették ki
- Évtizedes-évszázados technológiákat váltott le.



FLASH EEPROM



A lebegő gate-et vékony oxid választja el a szubsztráttól.

- A küszöbfeszültség megváltozása a lebegő gate-n az elektronok számának megváltoztatását jelenti.
- SLC – single level cell – azaz két, jól megkülönböztethető állapotot hozunk létre
- MLC – multi level cell - több V_T így a tranzisztor több bitet tárol
 - Marketing elnevezések: MLC 2bit/tranzisztor TLC 3bit/tranzisztor QLC 4bit/tranzisztor



FLASH memóriák elrendezése, főbb tulajdonságai

■ NOR elrendezés:

- Nagy teljesítménnyel kell programozni, a programozás és a törlés lassú.
- Az olvasás viszont gyors.
- **Program memória**

■ NAND elrendezés:

- Kis cellaméret, nagy sűrűség
- Kis teljesítménnyel programozható
- Törlés gyorsabb
- **Háttértárolás!**



Összehasonlítás

Feature	NOR Flash		NAND Flash	
	General	S70GL02GT	General	S34ML04G2
Capacity	8MB – 256MB	256MB	256MB – 2GB	256MB
Cost per bit	Higher	6.57×10^{-9} USD/bit for 1ku	Lower	2.533×10^{-9} USD/bit for 1ku
Random Read speed	Faster	120ns	Slower	30μS
Write speed	Slower		Faster	
Erase speed	Slower	520ms	Faster	3.5ms
Power on current	Higher	160mA (max)	Lower	50mA (max)
Standby current	Lower	200μA (max)	Higher	1mA (max)
Bit-flipping	Less common		More common	
Bad blocks while shipping	0%		Up to 2%	
Bad block development	Less frequent		More frequent	
Bad block handling	Not mandatory		Mandatory	
Data Retention	Very high	20 years for 1K program-erase cycles	Lower	10 years (typ)
Program-erase cycles	Lower	100,000	Higher	100,000
Preferred Application	Code storage & execution		Data storage	



Újabb technológiák

VNAND

Ferroelektromos RAM (FRAM)

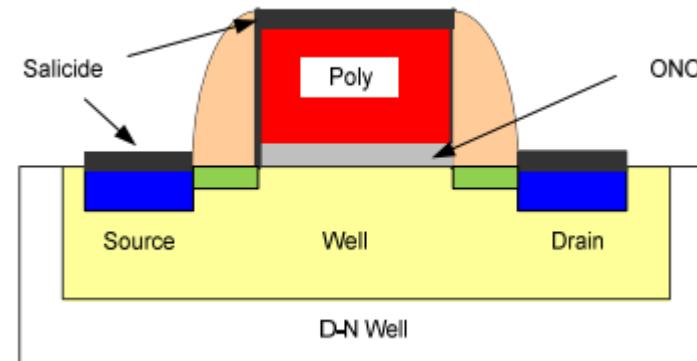
Magnetorezisztív RAM (MRAM)

Ezek mindegyike kereskedelmi forgalomban kapható!

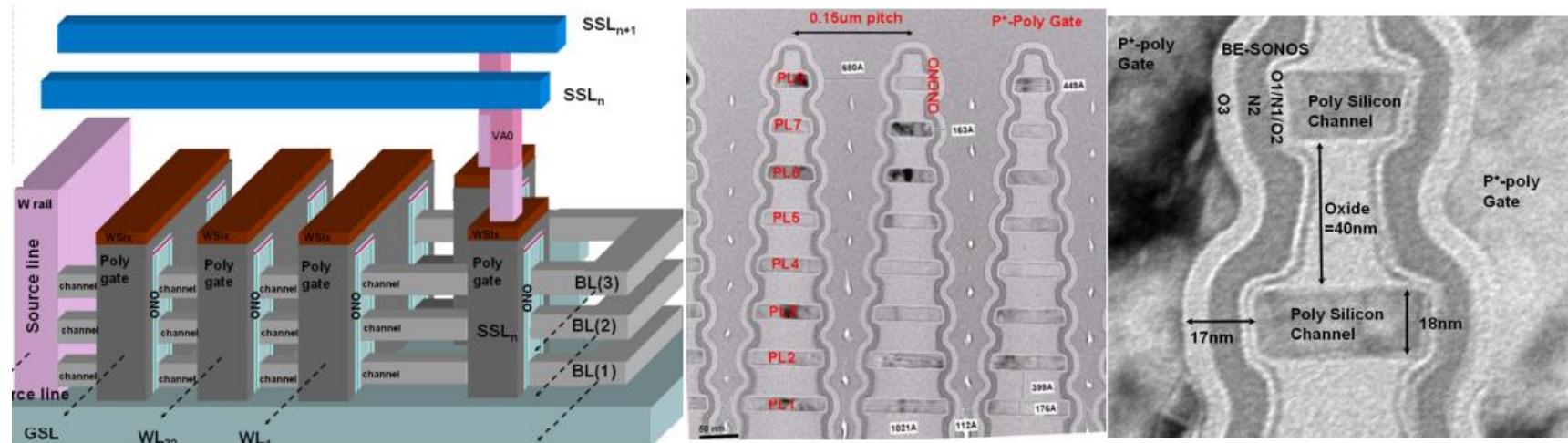


Modern FLASH – SONOS tranzisztor

- Lebegő gate helyett töltéscsapdás tárolás. (CTF – charge trap flash)
- A $\text{SiO}_2 - \text{Si}_3\text{N}_4$ határfelületen található töltéscsapdák töltése változtatható
 - Alacsonyabb feszültség (5-8V a 12-20V helyett)
 - Megbízhatóbb, több programozás/törlés ciklust visel el mint a lebegő gate.



VNAND – vertikális NAND



- A tranzisztor nem hagyományos MOS tranzisztor, hanem vékonyréteg (TFT) tranzisztor: a csatorna anyaga poliszilícium.
- A sorbakapcsolt tranzisztorok a „toronyban vannak”, a felszínre merőlegesen, ettől lesz vertikális
- A töltéstároló réteg ONO struktúra.
- Több mint 100 réteg építhető jelenleg. (2020 szeptember 176, Samsung 7. gen VNAND)



NVRAM megvalósítása

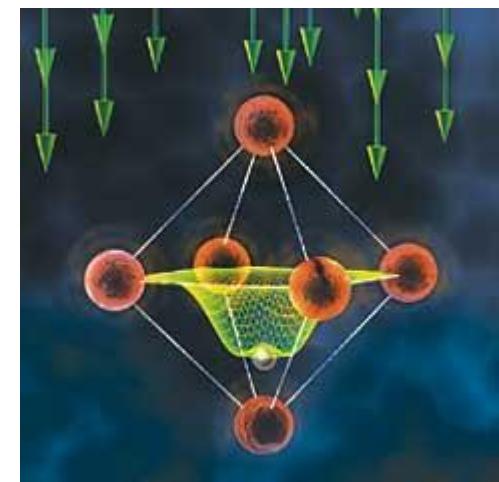
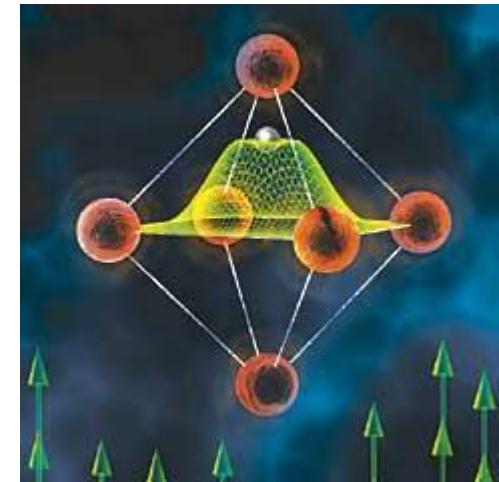
- Miért? Flash lassú, a programozás/törlés ciklusok száma korlátozott
- Statikus RAM + elem
 - Nagyon alacsony standby fogyasztású
- Statikus RAM + flash tároló
 - Reset után a flash tartalma a RAM-ba íródik
 - A tápfeszültség eltünésekor (egy kapacitás energiáját használva) a RAM tartalma a flash-be íródik
- Vagy újfajta elrendezések



Ferroelektromos RAM

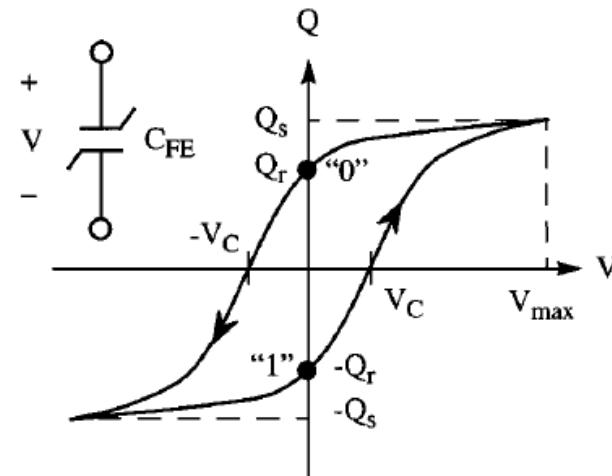
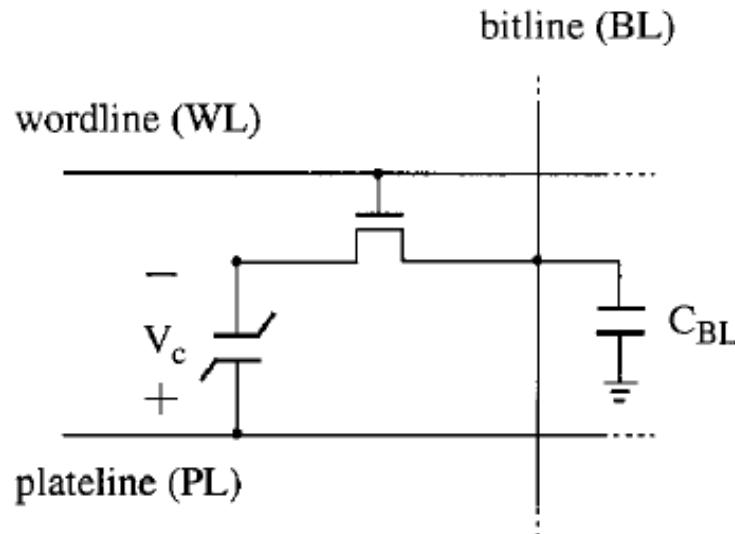
■ Ferroelektronos anyag

- Semmi köze a vashoz ☺, az elnevezés a ferromágnesesség mintájára született.
- A polarizáció (atomok, molekulák a térerősség irányába fordulnak) egyes kristályokban megmarad a térerősség megszüntetése után is.
 - PZT, azaz ólom-zirkónium-titanát ($\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$)
 - Két egyensúlyi állapot van, az oxigén atom középen el tud mozdulni.
- A polarizáció irányváltása töltésmozgással (árammal jár)
- Az ötlet 1952-ből származik...



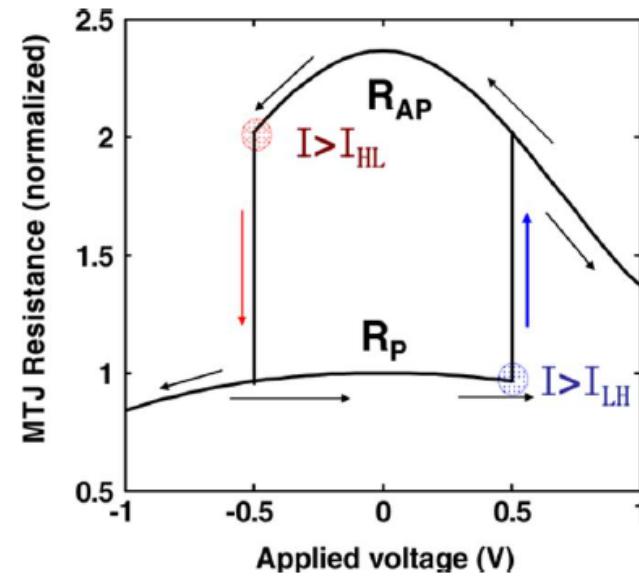
FERAM elemi cella

- Nagyon hasonlít a DRAM elemi cellára, a tároló kapacitás dielektrikuma PZT.
- Ez tehát egy memóriával rendelkező kapacitás.
- Attól függően, hogy melyik állapotban volt, kiolvasáskor az atomok átrendeződhetnek, ez az áramban egy ugrást jelent, ami detektálható.



Magnetorezisztív RAM

- A tároló elem egy speciális rétegszerkezet, két ferromágneses anyag között egy vékony szigetelő réteg, amin kvantummechanikai hatással az elektronok át tudnak haladni.
- A szerkezet ellenállása függ attól, hogy a két ferromágneses rétegben a mágnesesség iránya megegyezik-e, vagy ellentétes.



Források, ajánlott irodalom, érdekességek

- [Samsung VNAND demó videó](#)
- [NOR és NAND flash összehasonlítás](#)





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

IT eszközök technológiája

6. előadás

ASIC



ASIC áramkörök

- Integrált áramkörök csoportosítása
- ASIC kategóriák
 - Standard cellás ASIC
 - Gate array
 - Programozható logikai eszközök
 - CPLD
 - FPGA

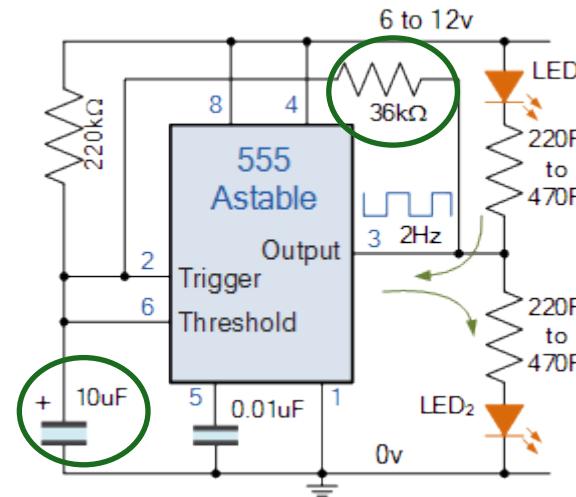


Integrált áramkörök felosztása

- Katalógus áramkörök
- (COTS – commercial off the shelf)
 - Általában széleskörű 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 1milliárd példányban...
- Katalógus áramkörökből összeállított rendszer
 - Kompromisszumok eredménye, nem lehet optimális a megvalósítás semmilyen tekintetben. (késleltesés, fogyasztás)
 - Nagy méretű, könnyen reprodukálható. (A sw tartalom kivételével.)



Bicikli LED villogó, 555-ös időzítővel



- A képlet adott:
- $f = \frac{0,72}{RC} \text{ Hz} = \frac{0,72}{36k10\mu} = 2\text{Hz}$
- A másik ellenállás: „legyen nagy”



ASIC / SoC

- Application specific integrated circuit
 - Egy adott speciális célra készülnek.
 - Általában a felhasználó tervezí (tervezteti), mert
 - Katalógus áramkörrel nem, vagy csak bonyolultan tudná megvalósítani a rendszert.
 - Egyéb okokból, pl. a másolás megnehezítése miatt.
- A sorozatszám 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



System on a chip (SoC)

- Egy teljes rendszer megvalósítása egy chipen
 - Digitális (processzorok, grafikus gyorsító, memóriák stb.)
 - Analóg (főleg rádiófrekvenciás) részek.
 - Tápellátás stb.
- Az integráció előnyei:
 - Kisebb késleltetés és fogyasztás
 - Kisebb fizikai méret.
 - Olcsóbb gyártás (kisebb az összeszerelés költsége)
- Hátrány
 - esetlegesen túl nagy integrált áramkör gyártási **kihozatala** nem megfelelő.
 - Bonyolult – és más tápfeszültségeket igénylő memória technológiákat kell ugyanarra a chipre integrálni.
 - Pl. digitális logika: 1,2V magfeszültség, 0,3V küszöbfeszültség DRAM 2,5V tápfeszültség, 0,7V küszöbfeszültség – csökkenteni nem lehet, mert romlik a zajhatár, megnő a szivárgás...)
 - Gyakran használt megoldás (főleg mobil platformokon)
 - Package on package: az EEPROM/DRAM chipeket az SoC-re szerelik.



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 maszksorozat költségei: ~\$10 000 - \$1 000 000 (7nm)
- Igen nagy példányszámban éri csak meg.

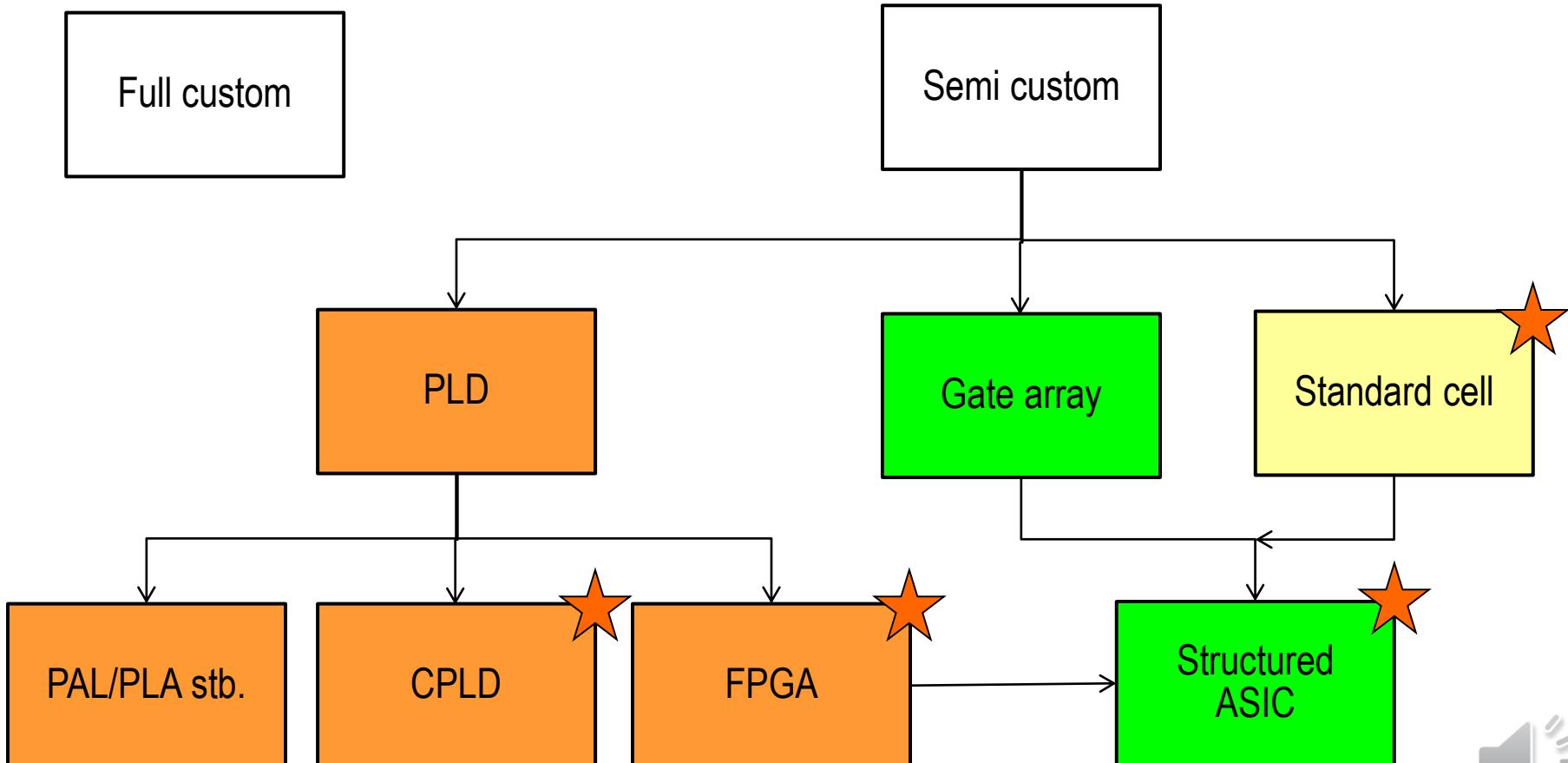
■ Semi-custom ASIC

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



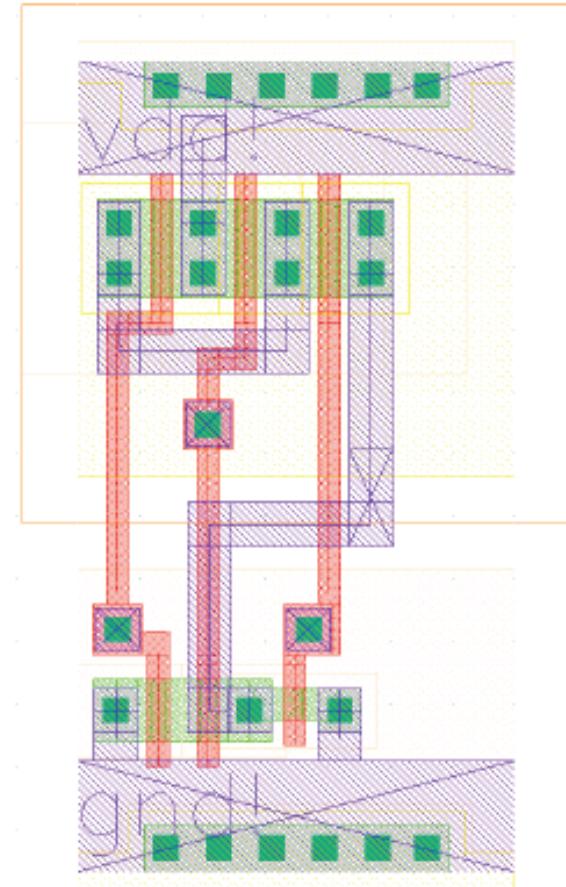
ASIC kategóriák

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

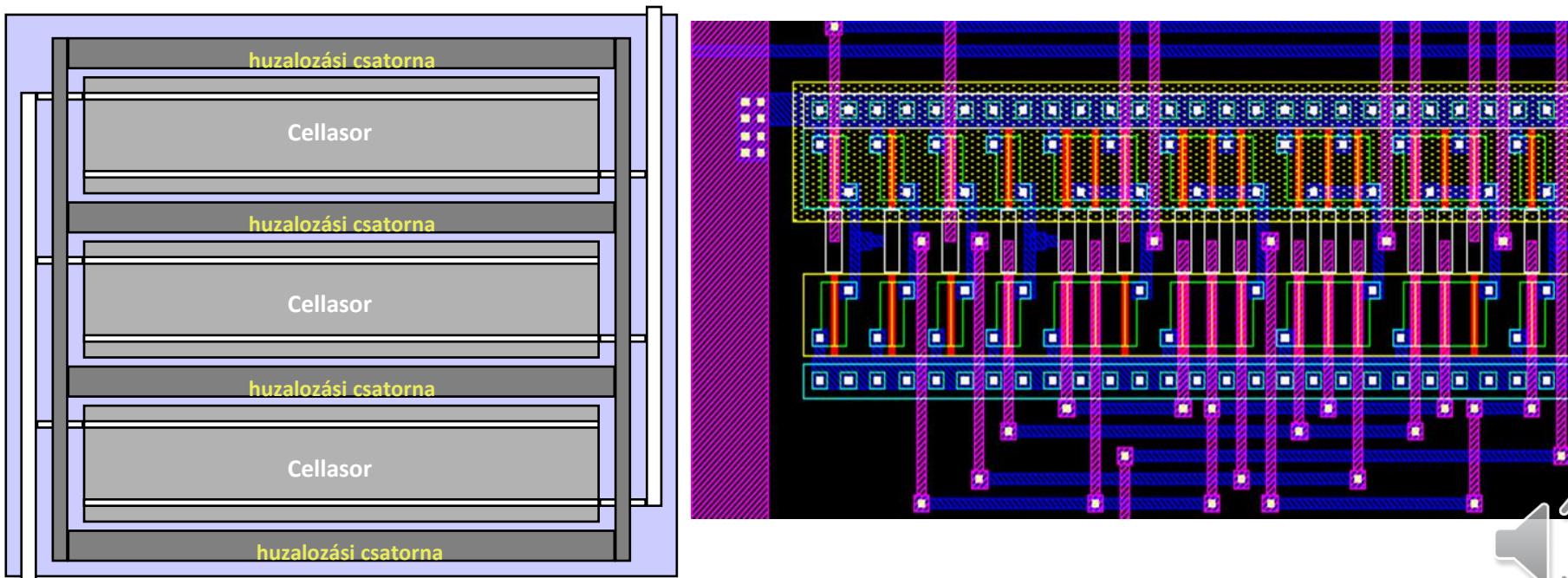


Standard cellás ASIC

- 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.
 - A standard könyvtárat a félvezető gyár fejleszti és bocsátja rendelkezésre.



- 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 megosztják. (MPW – multi project wafer)



Standard cellás ASIC

- Tehát a tervezés pont úgy zajlik, mintha a gyártó tervezné!
 - A félvezetőgyár rendelkezésre bocsátja
 1. A standard cellakészletet, logikai leírás és fizikai terv (vagy csak absztrakt) formájában. (absztrakt: a cella pontos felépítését nem ismerhetjük meg, csak a körvonalát és azt, hogy az egyes be vagy kimenetekhez hogyan lehet csatlakozni)
 2. A cellakészlet időzítési és fogyasztási adatait a logikai szimulációhoz
 3. Fizikai és elektromos tervezési szabályokat az elhelyezéshez és a huzalozáshoz.
 4. A visszafejtési szabályokat a parazita kapacitások meghatározásához.
 5. Áramköri modelleket az áramköri szimulációhoz.
 - Ezek segítségével zajlik a tervezés, pontosan úgy, ahogy az előző előadásokon bemutattuk.
 - nagyrészt megvásárolt hard ill. soft IP alapon.
 - Pl. Apple A14 processzor
 - Standard cella esetén tehát:
 - minden maszkot le kell gyártani, itt tehát nincs megtakarítás.
 - Viszont a cellakönyvtár elemei előre tervezettek, kipróbáltak és karakterizáltak.



Gate array

- A fémezés kivételével előre gyártott.
 - „Sea of gates” elrendezésben a chipen n és pMOS tranzisztorokat találunk, előre meghatározott mintázatban és pozícióban.
 - Strukturált 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

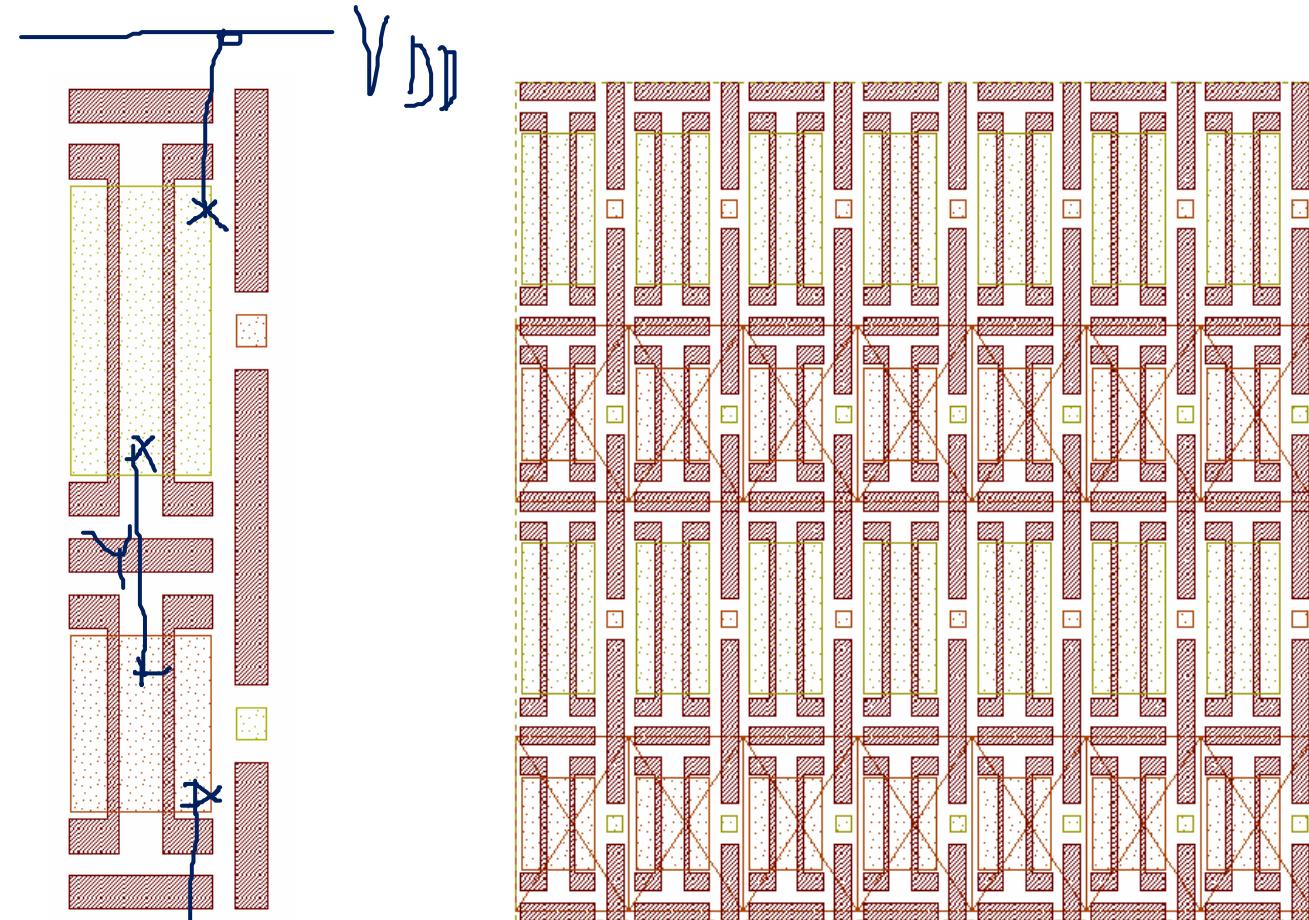
- Mivel a maszkok száma kevesebb
 - Pl. egy két fémréteges technológia esetében négy maszk szükséges csak Kontaktus a félvezetőhöz, 1. fémréteg, viák az 1. és 2. fémréteg között, 2. fémréteg
- A tranzisztorokat tartalmazó „félkész” szelet (az ún. master) előre elkészíthető és raktározható

■ Kompromisszum

- A felépítésből adódóan nem lehet a teljes rendelkezésre álló szilícium területet kihasználni, mindig maradnak „üres” területek
- Az elkészített kapuk nem optimálisak
- A huzalozás nem optimális, így a késleltetés nagyobb, mint a standard cella esetében



Példa



- Az alapcella 2 PMOS és 2 NMOS tranzisztor 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
 - Maszk programozott
 - Flash EEPROM tranzisztor
 - Antifuse (PLICE vagy ViaLink)



A 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

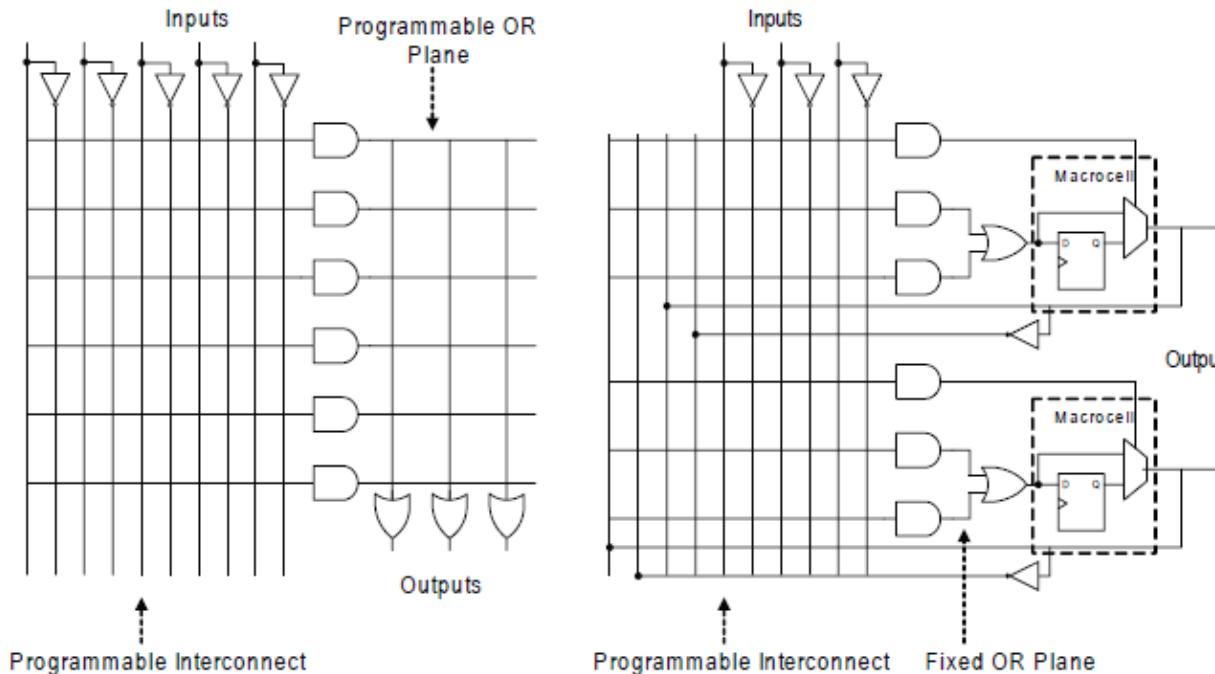
- Antifuse segítségével kisebb késleltetés érhető el
- (feláldozva az újrakonfigurálhatóságot)



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... (Pl. ABEL)



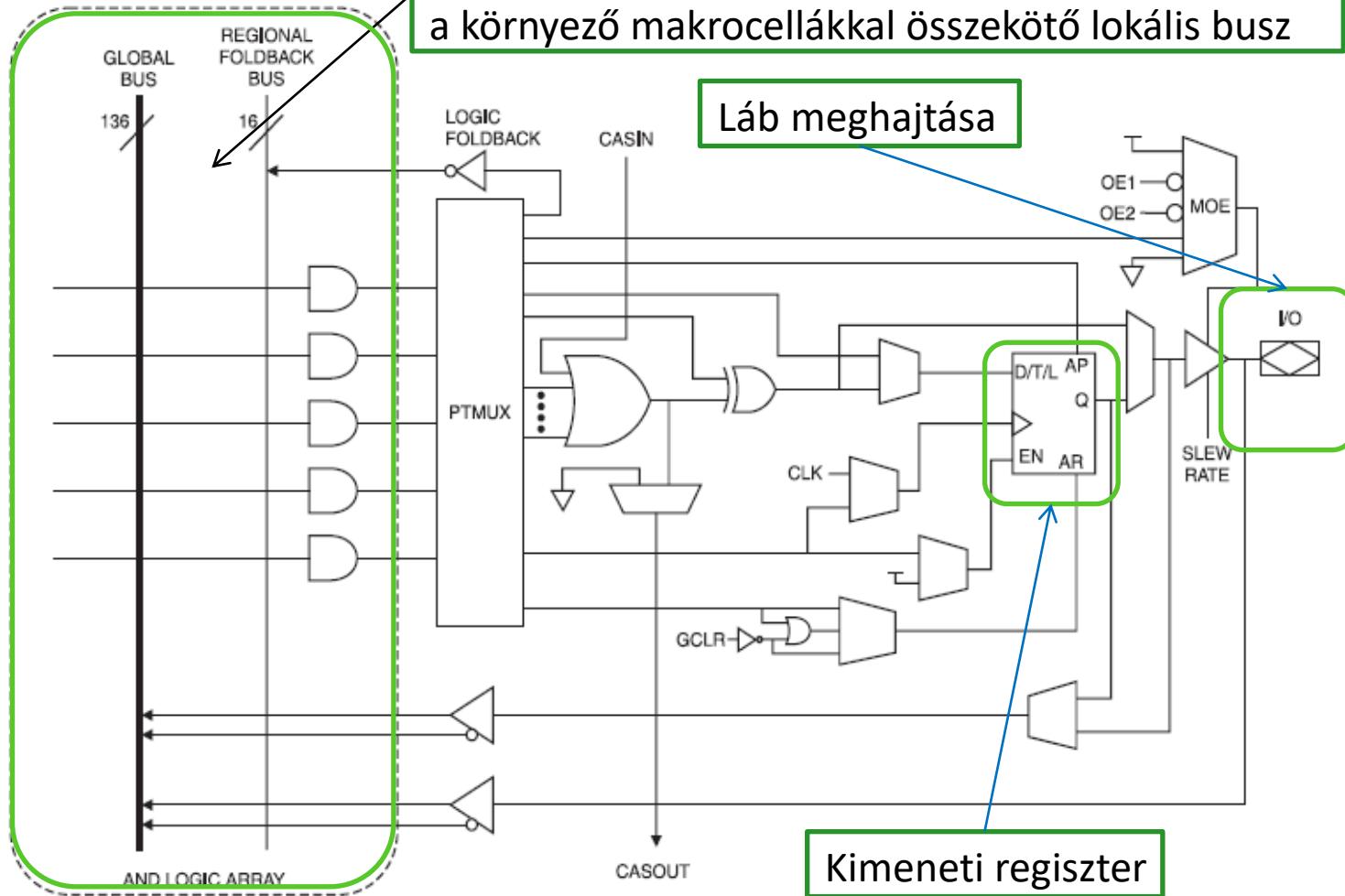
CPLD – complex programmable logic device

- 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...
 - “Illessze az egységet az xxx buszhöz” jellegű feladatok megoldására
- 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: Microchip (ATMEL) CPLD makrocella

ATF1500A(L) Macrocell

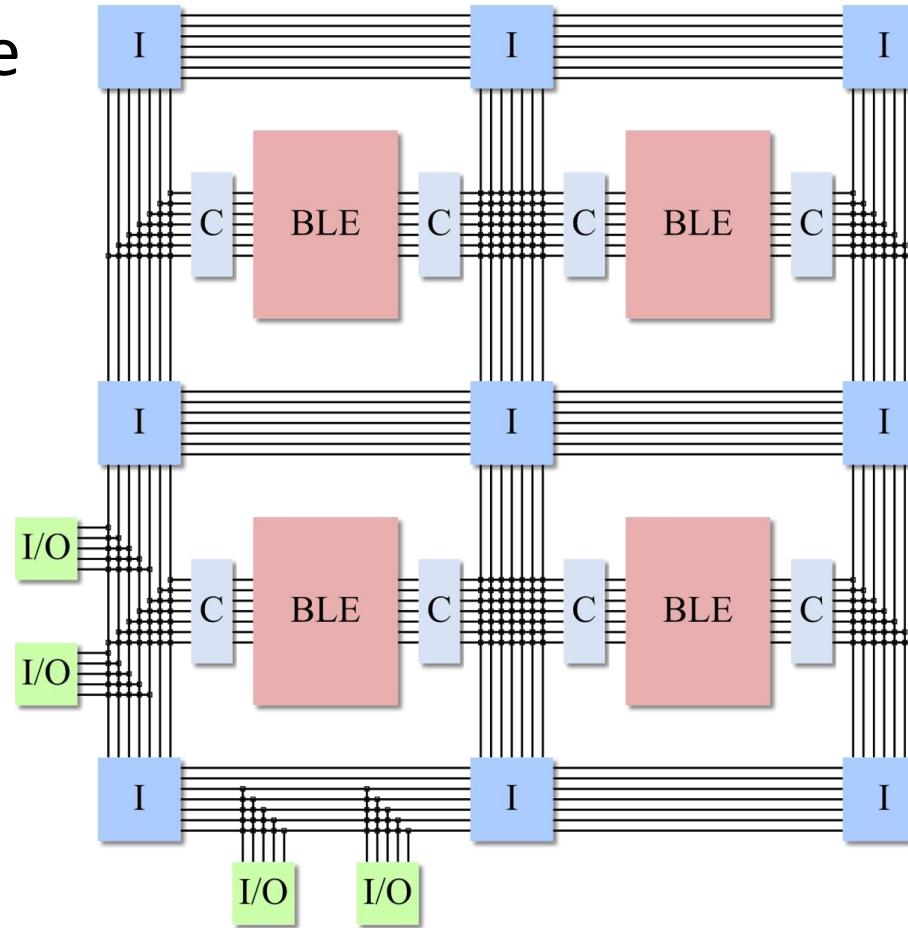


Field programmable gate array

- Általános célú, újrakonfigurálható eszközök
- Tetszőleges logikai funkció megvalósítható a programozható erőforrások segítségével.
- Erőforrások:
 - Konfigurálható logikai blokkok
 - (Basic Logic Element, BLE – minden gyártó máshogy hívja)
 - Konfigurálható I/O blokkok
 - Kommunikáció a külvilággal
 - Konfigurálható huzalozási erőforrások
 - A logikai blokkok és az I/O blokkok összekapcsolását valósítja meg.
 - Konfigurációs memória
 - Az előzőekben felsoroltak állapotának tárolására.
 - **Leggyakrabban SRAM**, de lehet EEPROM, FLASH, Anti-fuse stb...
 - Speciális célú erőforrások

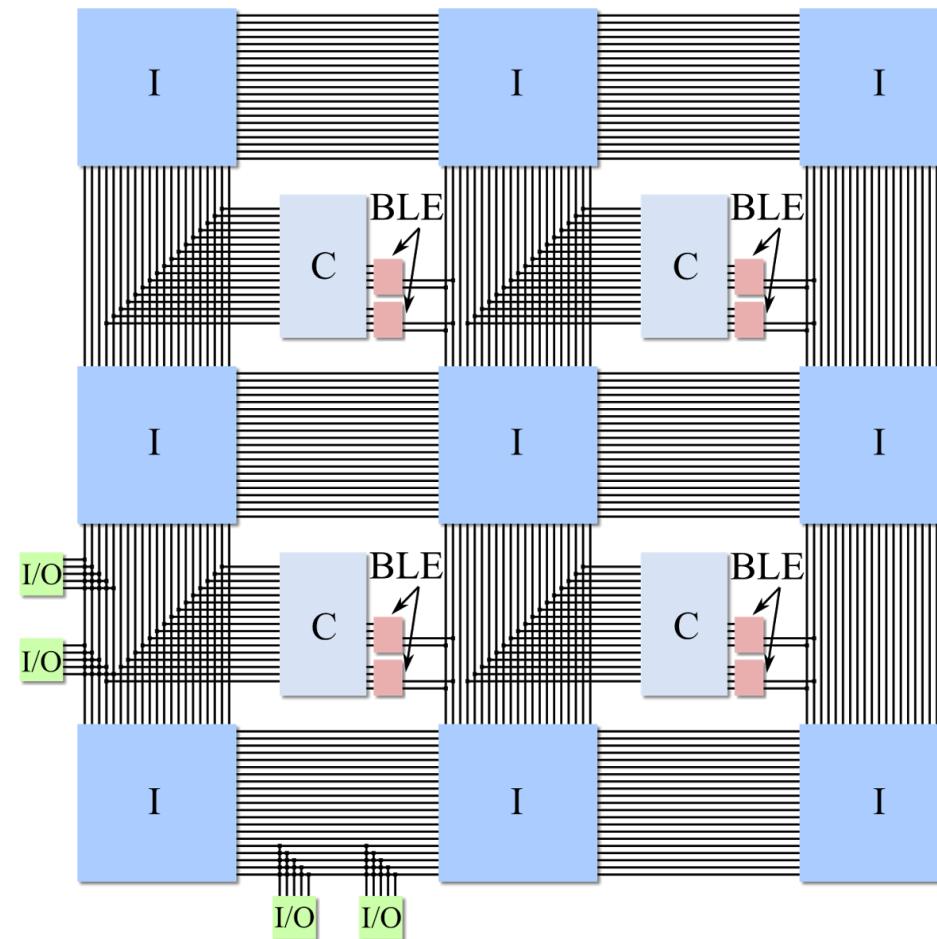


FPGA felépítése



- I : interconnect block egyes huzalozási csatornák összeköttetéseit valósítják meg
- C: connection block: a konfigurálható logikai blokkot kapcsolja a huzalozási csatornákhöz.

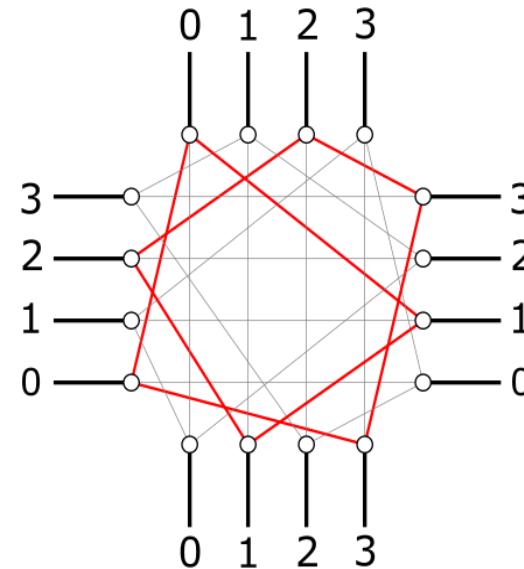
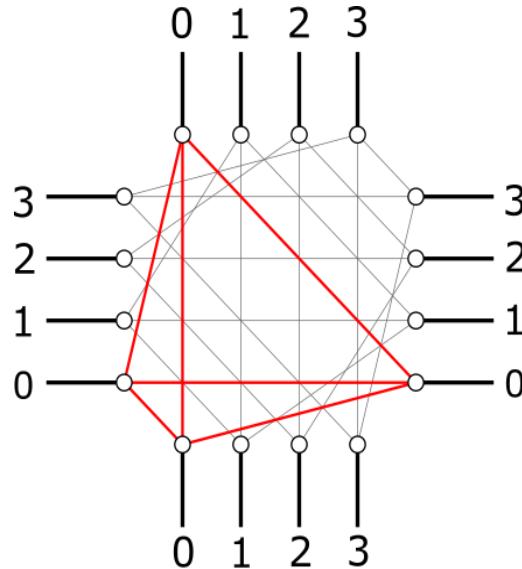




- A fizikailag elfoglalt területet szemléltető ábra.
- A konfiguráló erőforrások kb. 90-95%-ot foglalnak el...
 - Ez az ára a konfigurálhatóságnak



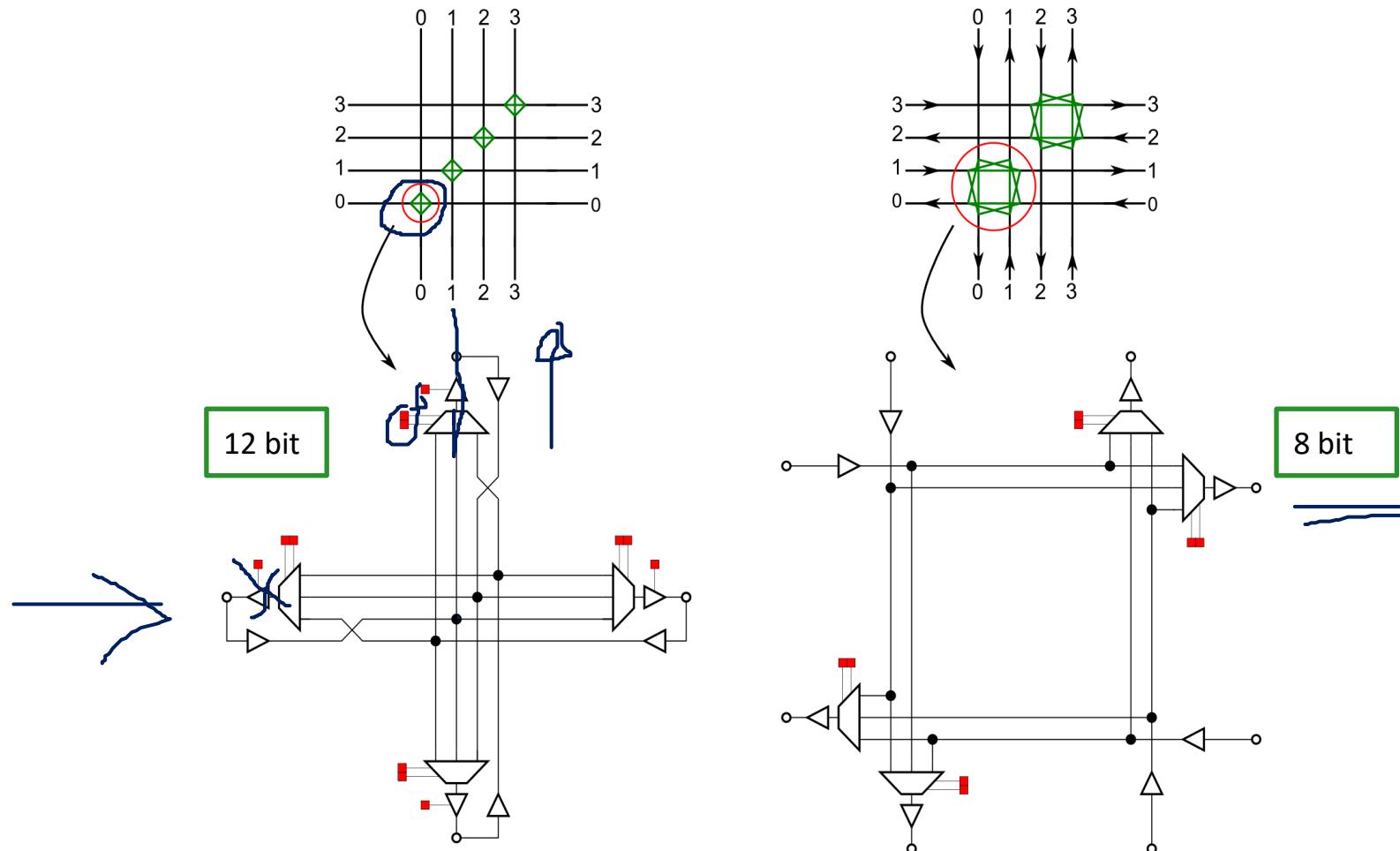
Kapcsolómátrixok



- Csak a lehetséges összeköttetések egy részét valósítják meg.
 - minden lehetséges összeköttetés megvalósítása túl bonyolult lenne.
 - Pl. Disjoint típusú mátrix – irányváltás vagy egyenesen halad tovább.
 - Wilton típusú mátrix – irányváltás + áttérés másik csatornára

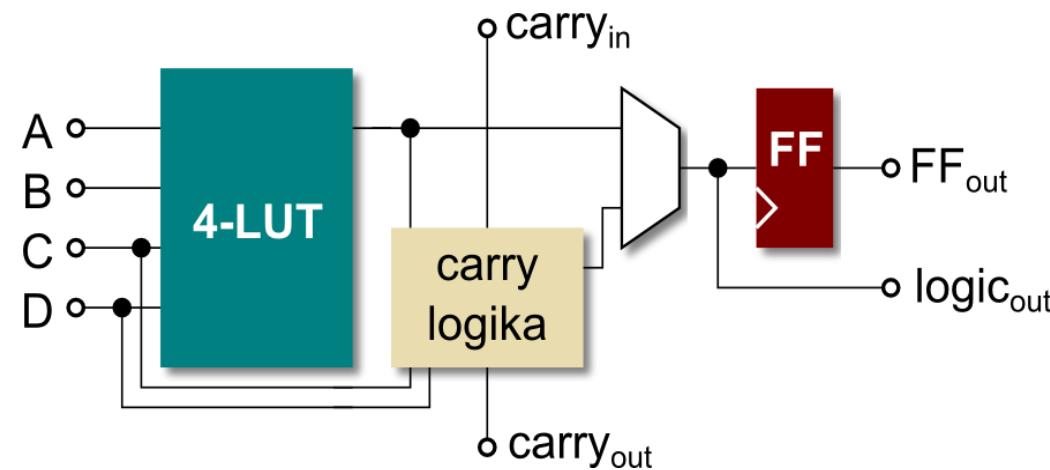


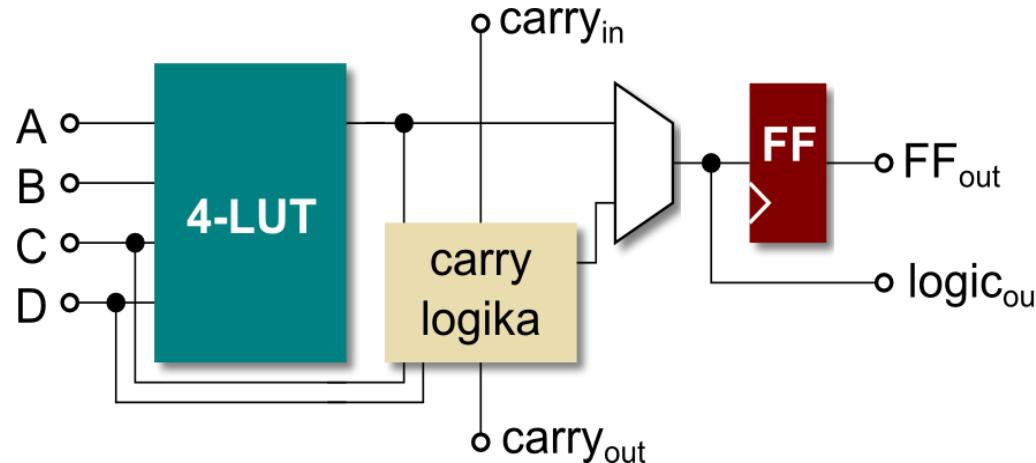
Kapcsolómátrixok megvalósítása - példa



Konfigurálható logikai blokk

- Granularitás
 - Egy logikai blokk mennyire összetett funkciót valósít meg önmagában.
- Modern FPGA – finom granularitás
 - Egyszerű funkció, de sok BLE.
 - Például egy egyszerűsített séma

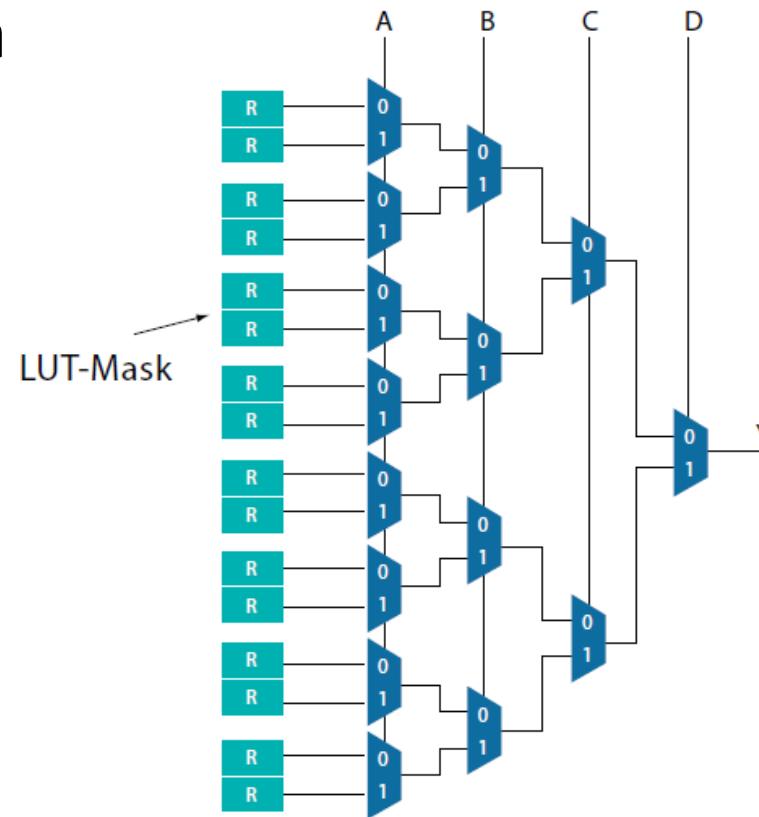




- A kombinációs logika megvalósítása nem programozható ÉS mezővel, hanem look-up table-el történik.
 - Tetszőleges 4 bemenetű, 1 kimenetű függvény megvalósítható.
- A carry logika az összeadó megvalósításának hatékonyságát növeli.
 - Az összeadás gyakori művelet.
- Konfigurálható bemenetű kimeneti flip-flop, amely vagy a logika, vagy a carry kimenetet tárolhatja.



LUT megvalósítása



- A LUT maszkot a konfigurációs memória tartalmazza.
- A négy bemenettel választunk ki értékeket.
- A multiplexer hatékonyan megvalósítható transfer kapukkal.

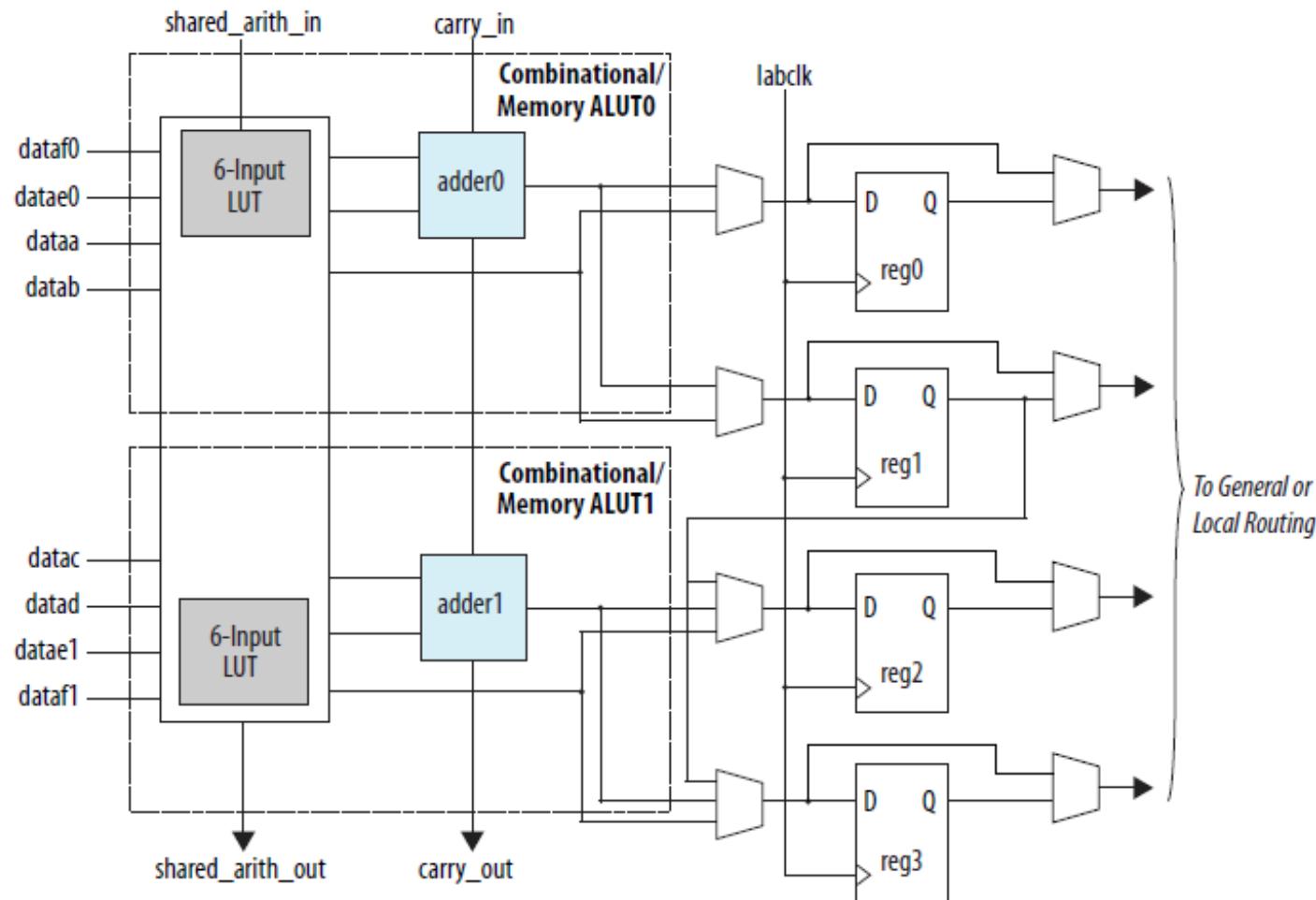


Példa: Altera Cyclone V.

- A legkisebb logikai egység az ALM
 - Adaptive logic module
- 10 ALM alkot egy logikai tömb blokkot
 - Logic array block = 10 ALM + 1 control block
- Két használati mód
- MLAB – dual portos SRAM memóriának használjuk a LUT-okat
- Így max. 32 x 20 bites memória alakítható ki
 - Egy ALM 32x2 bites, dual portos SRAM-má konfigurálható.



FPGA – Példa



- 4 regiszter, szinkron és aszinkron clear, szinkron load
- 2 x 6 bemenetű LUT (reg. visszavezetés a 6.)
- 2 teljes összeadó



Speciális célú erőforrások

- Az általános célú erőforrásokkal minden logikai funkció megvalósítható.
 - De nem lesz hatékony
- Ezért modern FPGA-kban további erőforrások állnak rendelkezésre
- Blokk RAM
 - Nagymennyiségű statikus RAM (Mbit nagyságrendben)
 - Single vagy dual portos, a szóméret és a kapacitás könnyen konfigurálható, viszonylag széles határok között.



■ DSP slice

- A digitális jelfeldolgozásban a szorzás megvalósítása az egyszerű logikai elemekkel nehézkes.
- Általában min. szorzóáramkört tartalmaznak.
- gyakran szorzó akkumulátort ($A+=BC$)
- Eltolást végző áramkör (több bittel)

■ SoPC – System on a Programmable Chip

- Egy vagy több mikroprocesszor mag, hard IP formájában
- Mikroprocesszoros rendszer kialakításához szükséges logika, pl.
 - DRAM vezérlő
- Külső, nagysebességű kommunikáció
 - Gigabit Ethernet, PCI Express stb.
- Általában hard IP formájában.



Cyclone III EP3C16F484

- 15k LE
 - Normál mód: kombinációs hálózat LUT
 - Aritmetikai mód: két bites teljes összeadó + carry
- DSP blokk: 56db 18x18 bites szorzó
 - Hány szorzó kell egy 32x32 bites szorzáshoz? A naiv válasz 4. Valójában pedig 3 elég...
- Memória: picivel kevesebb, mint 512kbit
 - M9K blokk 8kbit + paritás

Feature	M9K Blocks
	8192×1
	4096×2
	2048×4
	1024×8
	1024×9
Configurations (depth × width)	512×16
	512×18
	256×32
	256×36



Strukturált ASIC

- Átmenet az FPGA és a standard cellás ASIC között
 - Nagy jövőt jóslottak neki, de ez nem igazán jött be.
- A modern FPGA-hoz hasonlóan hard IP blokkokat és közöttük maszk konfigurálható (1-2 fémréteg) logikai blokkokat és összekötést tartalmaz.
 - Nincs konfigurációs RAM és ezek erőforrásai, mint az FPGA-ban.
 - Nincsenek konfigurálható huzalozások
 - Így nagy területet lehet spórolni és a késleltetés is sokat csökken.



Struktúrált ASIC szolgáltatás

- A nagy gyártók kínálnak (kínáltak) struktúrált ASIC szolgáltatást
 - Azaz működőképes FPGA tervből IC csinálnak
 - Intel(Altera) – EasiCopy
- Xilinx - EasyPath
 - Hat hét alatt FPGA tervből ASIC
 - 28nm technológián – ez nem a csúcstechnológia szilíciumon, de sima ASIC gyártásnál már a nehezen kifizethető kategória kis sorozat esetén.
 - Nincs külön fejlesztési költsége, a Xilinx elintézi
 - 35% költségmegtakarítás az FPGA-hoz képest, viszont nyilvánvaló módon nem újraprogramozható.
 - Garantálják a funkcionális működést és az időzítéseket.
 - Ez nem túl nehéz, mert minden időzítési paraméter javul...



Összehasonlítás

	Std. Cellás	FPGA	Strukturált ASIC
Maximális órajel (%)	100	15	75
Fogyasztás (%)	100	1200!	300
Kapuszám egységnyi területen (%)	100	1	33

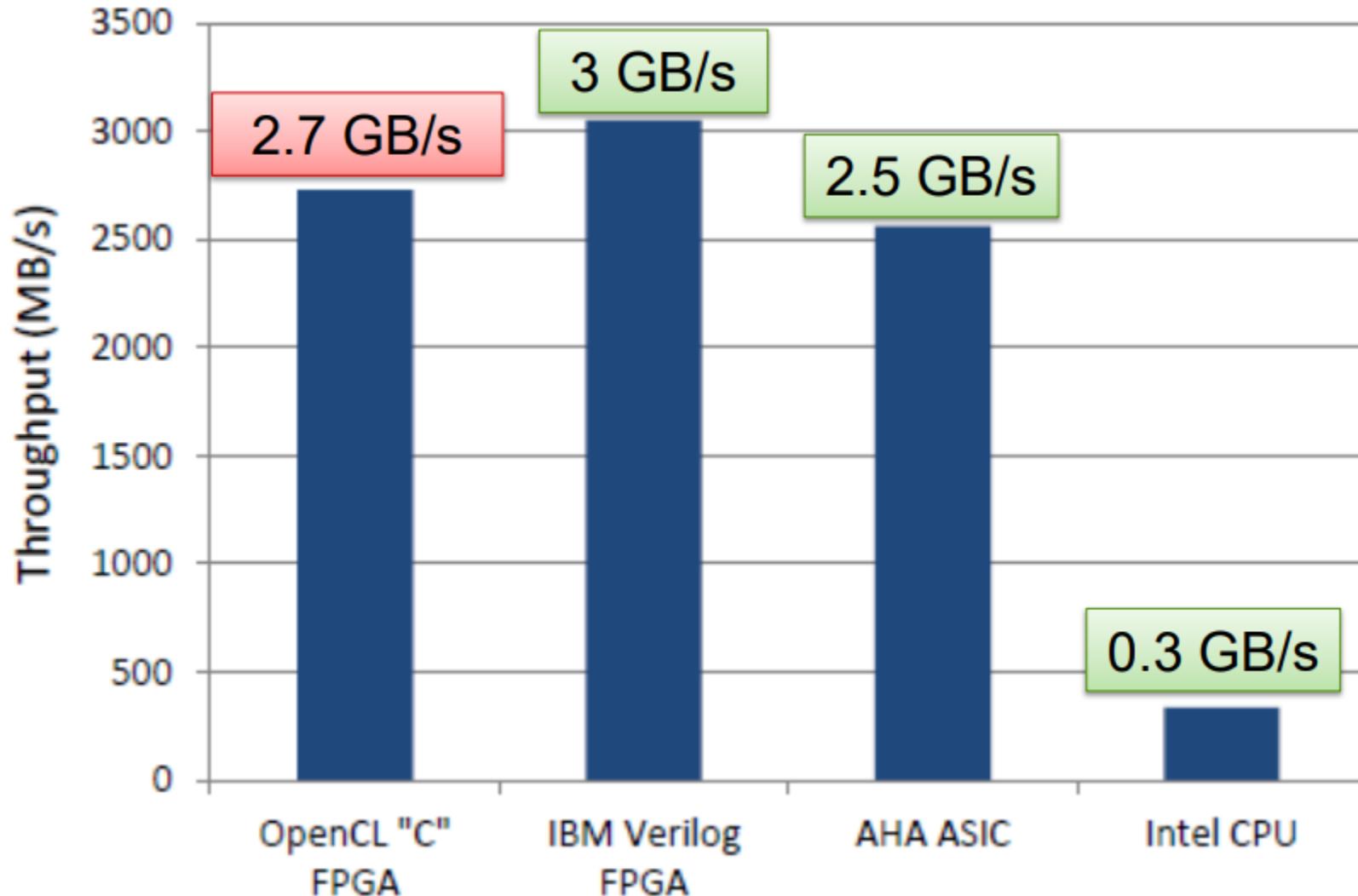
- De ez csak azonos technológián igaz!
- FPGA-ból olyan fejlett technológia érhető el, ami ASIC esetén nagyon drága (vagy nem is elérhető)

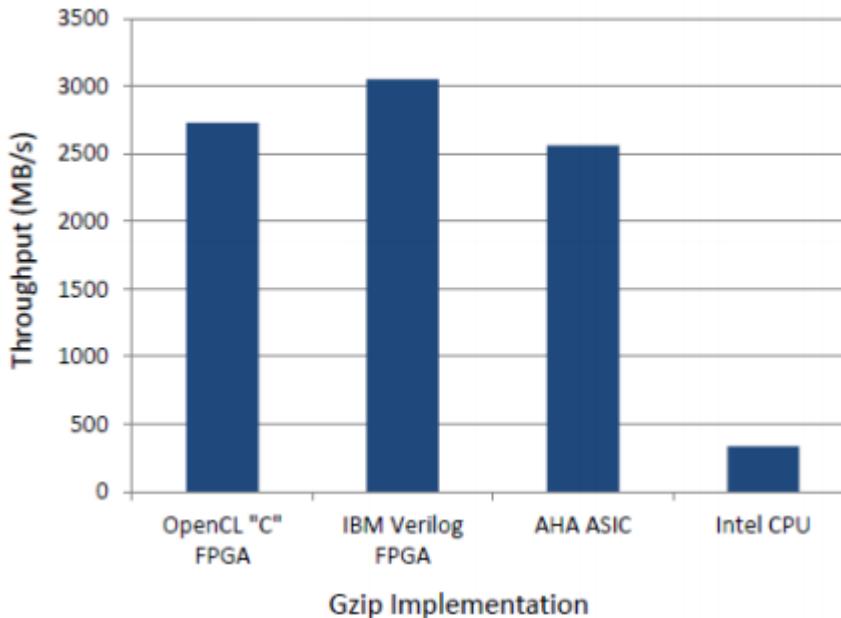


- M. S. Abdelfattah, A. Hagiescu, D. Singh, "Gzip on a Chip: High Performance Lossless Data Compression on FPGAs using OpenCL", *IWOCL 2014: 2nd International Workshop on OpenCL*, 2014.
- OpenCL
 - Usernek: C kód + pragmák! Nem HDL!
- Veszegésmentes tömörítés == sávszélesség vagy tárkapacitás bővítés!
- Főleg, ha valósidejű ☺ (és már nem eleve tömörített adatokon)
- GZIP = LZ77 + Huffman
- LZ77 – nagyszámú összehasonlítást és hash számítást igényel
 - FPGA
 - Hiába kisebb az órajel, a párhuzamosítás miatt nagy a nyereség
- Metrika:
 - Átbocsátóképesség: MB/s
 - Energiahatékonyság (performance/Watt) MB/Ws, azaz MB/J



Esettanulmány: Gzip on a Chip: High Performance Lossless DataCompression on FPGAs using OpenCL





Same compression ratio

12X better performance/Watt

TABLE I: Comparison between our OpenCL FPGA and the best CPU implementation of Gzip.

	Performance	Performance/Watt	Compression Ratio
OpenCL FPGA	2.71 GB/s	111 MB/J	2.17×
Intel Gzip	338 MB/s	9.26 MB/J	2.18×
Gap	8.2× faster	12× better	on par



Források, ajánlott irodalom, érdekességek

- [555 adatlap](#)
- [555 projektek](#)
- [Apple 14 details](#)
- [Cycle III handbook](#)
- [Karatsuba algoritmus](#)
- [GZIP on a chip](#)



IT eszközök technológiája

7. előadás

I/O, órajel, buszok, tápellátás
(azaz minden más, ami a működéshez kell)



- I/O, azaz be és kimenet megvalósítása
 - Az ún. IO pad felépítése, működése
 - ESD védelem
 - GPIO fontosabb beállításai
- Órajelek
 - Órajel előállítása
- Buszok
 - Párhuzamos és soros buszok
- Tápellátás
 - Az energiaátalakítás módjai AC és DC között.
 - Egyenirányítás
 - DC/DC konverzió
 - Tápegységek



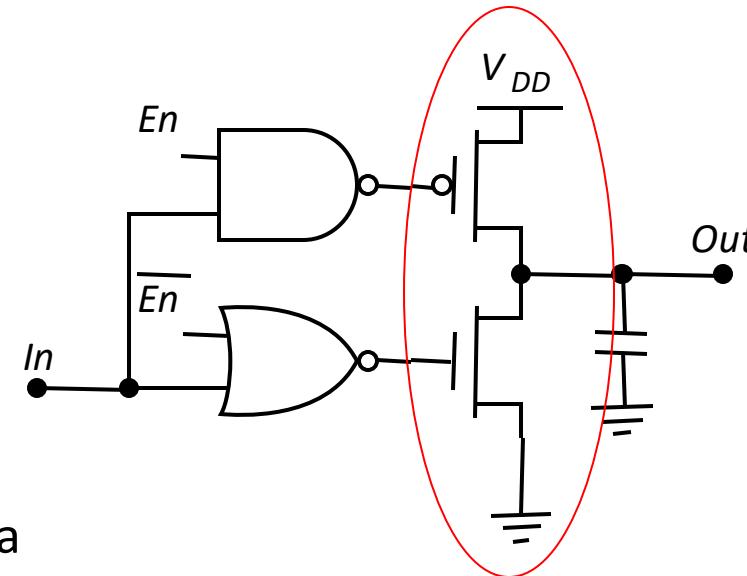
I/O áramkörök

- A külvilággal történő kommunikációt látják el
- A bemenetek védi az integrált áramkört a bemeneti túlfeszültségtől és az elektromos kisülésektől (ESD protection)
 - 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 kimenetek nagy kapacitású vonalakat kell, hogy meghajtsanak, azaz (viszonylag) nagy áramúak.
 - Általában regiszterrel kiegészített háromállapotú bufferek.
- Táp és föld hozzávezetések
 - Közvetlenül biztosítják az áramkör tápellátását.
 - Modern digitális integrált áramkörökben nagyon sok táp/föld láb található
 - Nagy áramok folynak, különösen az órajel kapcsolásakor



A tristate-buffer

- En=0 esetén
 - PMOS gate 1, NMOS gate 0
 - Azaz minden tranzisztor lezárt, a kimenet lebeg.
- En=1 esetén
 - A bemenet vezérli a kaput.
 - Pl. In=1, a NAND kapu kimenete 0, a NOR kimenete szintén 0.
 - Így a PMOS vezet és kimenet logikai 1.
- Szokásos elnevezése: **PUSH-PULL**fokozat.



Az ESD védelem

- ESD – Electrostatic Discharge
 - Elektrosztatikus kisülés – ember, vagy más feltöltődött tárgy, kV nagyságrendű, de kis energiájú.
- A gate oxid átütési feszültségét meghaladó feszültség a bemeneten lévő tranzisztor tönkreteszí
 - Általában a teljes áramkör tönkremegy.
 - Általában kb. 40V, kis tápfeszültségű áramköröknél pedig 5V is lehet az átütési feszültség
- Kimeneti tranzisztor esetén, működés közben a drain-re kerülő nagy feszültség rövidzárat okozhat.
 - (rövidzár a kikapcsolt tranzisztoron)
 - Túlmelegedés és végleges tönkremenetel lehet a következmény
- A be és kimeneteket védi a túlfeszültség és az ESD ellen.
 - IC-n belül és (legalábbis illik) az IC-n kívül is, a PCB-n.



A statikus feltöltődés

- A levegő relatív páratartalma és az alkalmazott anyagok befolyásolják

Examples of Static Voltage Generation At Different Levels of Relative Humidity (RH)		
Means of Generation	10-25% RH	65-90% RH
Walking across carpet	35,000 V	1,500 V
Walking across vinyl tile	12,000 V	250 V
Worker at bench	6,000 V	100 V
Poly bag picked up from bench	20,000 V	1,200 V
Chair with urethane foam	18,000 V	1,500 V

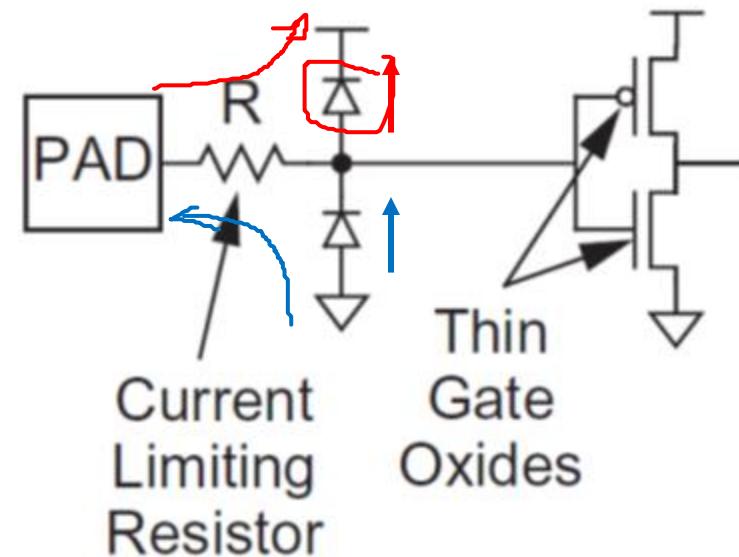


ESD védelem

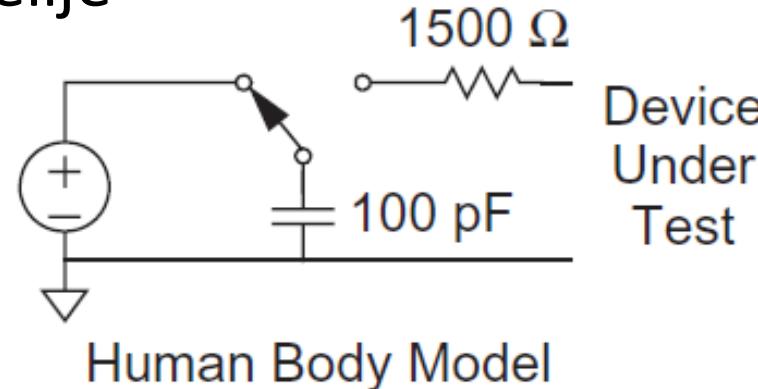
Emlékeztető

- Ha a dióda anódja nagyobb feszültségű, mint a katód, akkor nagy árammal vezet
- Egyébként pedig nem vezet.
- (ha a nyíl irányába esik a feszültség vezet...)

- A diódák kinyitnak, ha a bemenetre tápfeszültségnél nagyobb vagy kisebb feszültség kerül.
 - A piros nyíl mutatja az áram útját pozitív, a kék pedig negatív feszültségekre.
 - A tranzisztorokat egy áramkorlátozó ellenállás és egy dióda sor védi.



Az emberi test modellje

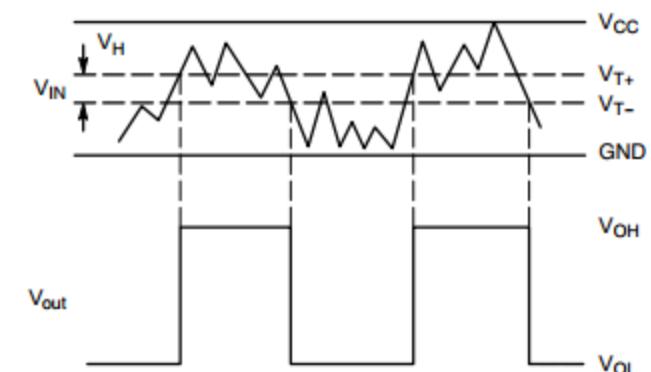
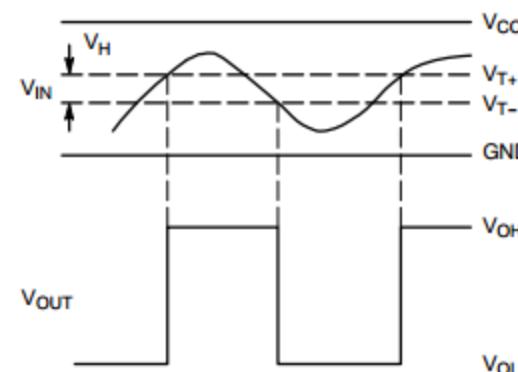
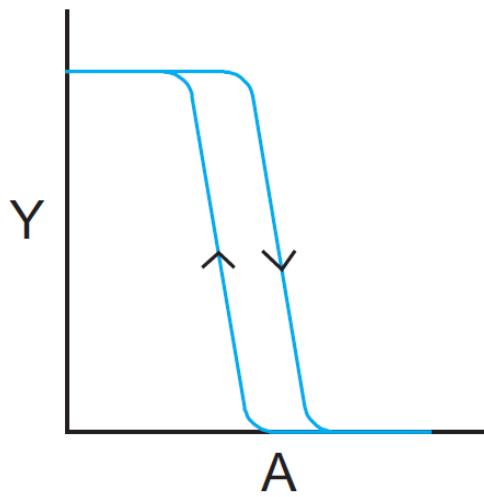


- Egy 100pF-os kondenzátort nagyfeszültségre feltöltenek, majd rásütik az eszköz lábára. Pl. 20kV esetén ez max. 0,02J energia.
- A „túlélt” feszültségtől függ az ESD minősítés
 - Pl. ESD 2 – 2kV és 4kV között
- ESD védekezés
 - Egyéni védőfelszerelés (cipő, karperec stb.)
 - Antisztatikus padló stb.



Bemenetek

- A bemenetek gyakran Schmitt trigger alkalmaznak.
 - A Schmitt trigger egy inverter, aminek a komparálási feszültsége magasabb, ha a bemenet alacsony és alacsonyabb, ha a bemenet magas szintű.
 - Ez a bemeneten esetlegesen jelenlévő zajt elnyomja.
 - A hiszterézis kb. 100-200mV általában.

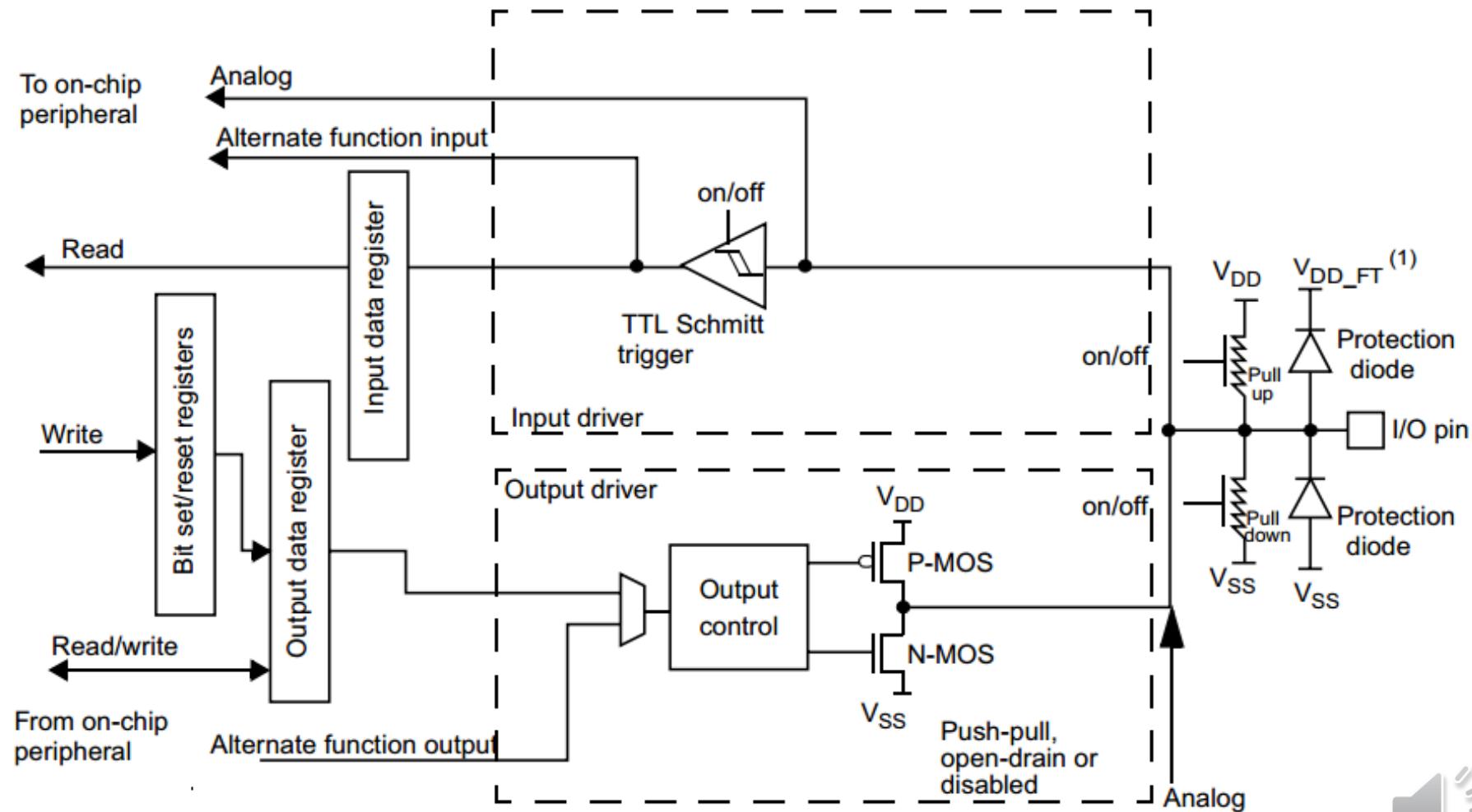


A logikai szint feszültsége

- Gyakran előfordul, hogy az I/O és az áramkör belső része (a **core**) eltérő feszültségű.
 - Vannak I/O és core feszültség pin-ek külön.
- I/O esetén szabványokhoz kell igazodni.
 - 5V (TTL) 3.3V, 2.5V, 1.8V, 1.5V, 1.2V (csökken folyamatosan)
 - Az áramköri mag feszültsége általában alacsonyabb.
 - Sok esetben (dinamikusan) változtatható, így a fogyasztás csökkenthető.

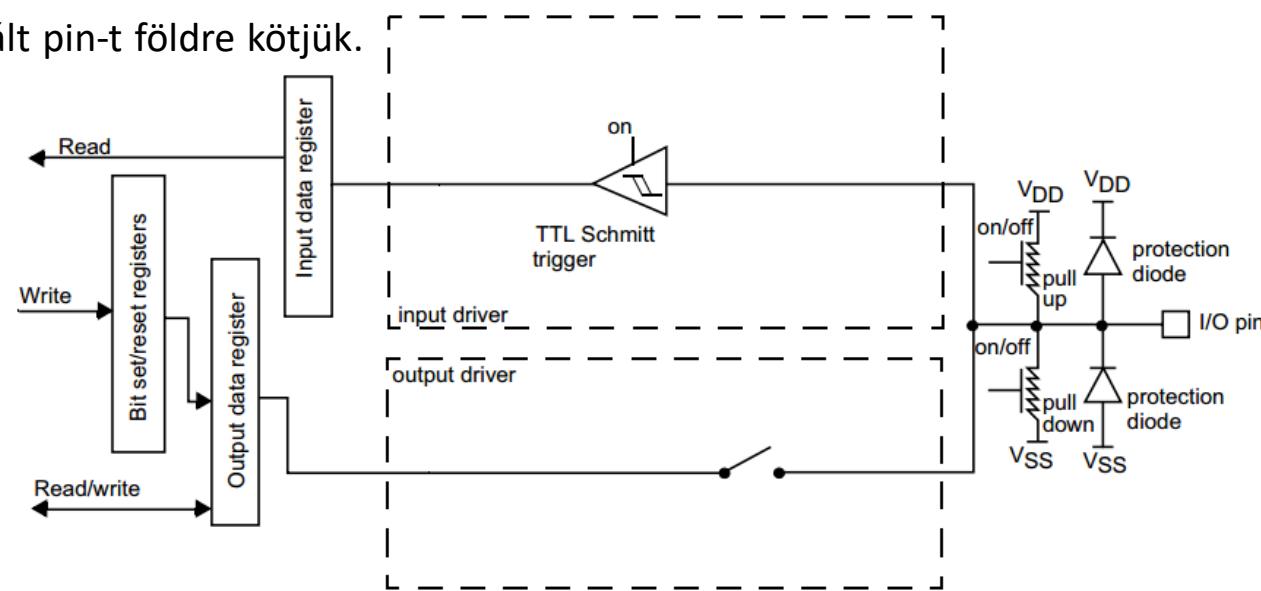


Példa – egy valódi GPIO. (STM32F407)



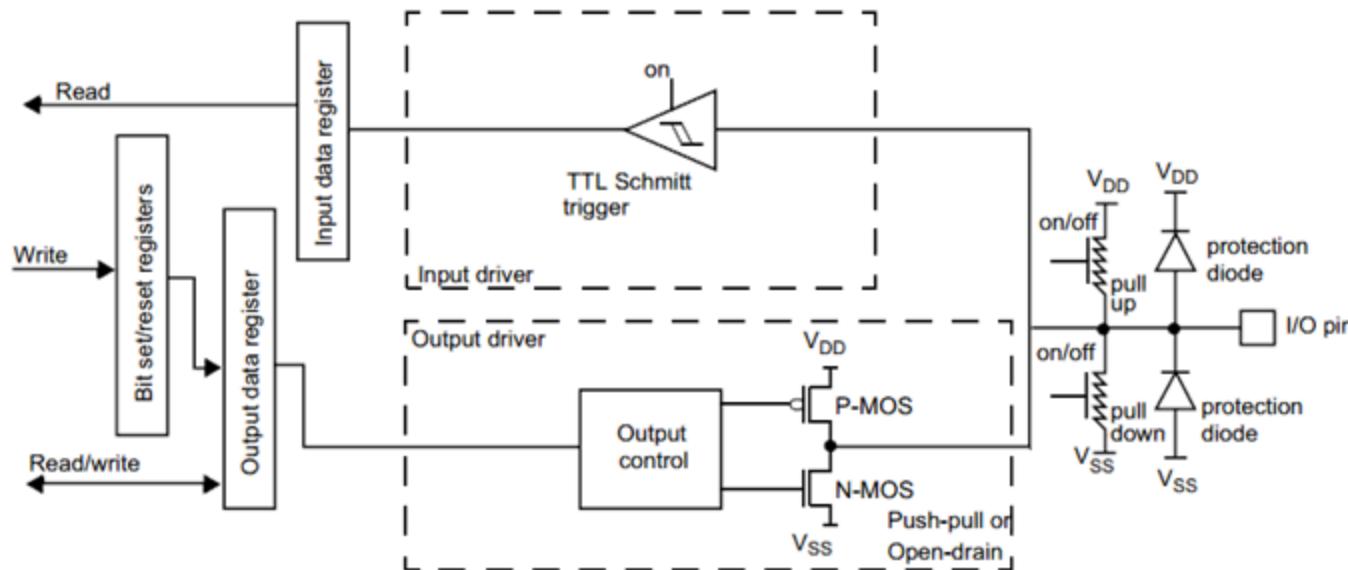
A bemenet beállításai

- VDD_FT, 5V toleráns input, azaz magas szintnek 5V-os feszültséget is elfogad. Emiatt a védődiódák nem a tápfeszültségre (1.8-3.6V, hanem annál magasabb feszültségre vannak kötve (V_{DD_FT})
- A bemeneten egy hiszterézises Schmitt trigger van, a hiszterézis 5% V_{DD} , de min. 100mV.
- A felhúzó/lehúzó ellenállások ki/be kapcsolhatók, értékük kb. 40k Ω
 - A logikai jelszintet rögzítjük, ha nincs „hajtva” a láb, elkerülendő, hogy esetleg az input „lebegjen”. Ez pl. egy IRQ jellegű pin esetén katasztrofális lenne.
 - A nem használt pin-t földre kötjük.



A kimenet beállításai

- Engedélyezett/nem engedélyezett.
- A kimenet lehet push-pull
 - Vagy az NMOS, vagy a PMOS van csak nyitva
 - Azaz tápfeszültségre tölt fel, vagy földre húz le.
- Open drain: csak a NMOS-t vezérlék
 - Így a pin csak 0-t tud kényszeríteni, azaz áramot nyel el.
 - Egy logikai bemenetet több másik IC hajthat, ha van felhúzó ellenállás, pl. \overline{IRQ}



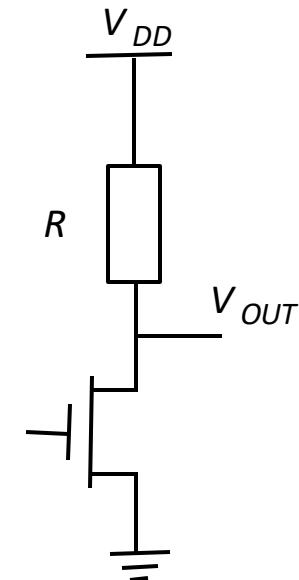
Az Open-drain működés

■ Egy NMOS tranzisztor kapcsol.

- Ha a tranzisztor nincs bekapcsolva, áram nem folyik – alapesetben logikai 1.
- Ha a tranzisztor bekapcsolt, akkor a tápfeszültség megoszlik az R ellenálláson és a bekapcsolt tranzisztoron.
- Lehetőség szerint R nagy, így a kimenet 0V környéki kis feszültség lesz, de nem 0V.
- Ha a kimenet alacsony szintű, áram folyik a táp és a föld között
 - **Statikus fogyasztást okoz!**

■ Sebesség beállítás

- Tranzisztorok áramát (valójában a párhuzamosan kapcsolt tranzisztorok áramát állítja)
- (low, medium, high, very high)
- Felesleges nagyobbra állítani.





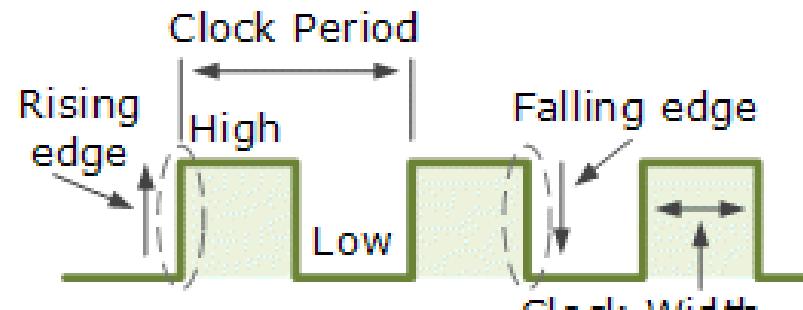
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Órajelek



Órajelek

- A digitális áramköreink nagyrészt szinkron működésűek
 - Az aszinkron tervezés, ami handshake jeleken alapul, energiahatékonyabb és gyorsabb is lenne – de nagyon sok nehézséggel kell megküzdeni. (versenyhelyzetek), és nincs megfelelő minőségű logikai szintézer
- Egyre nagyobb felületen kell eljuttatni az órajelet az integrált áramkör felszínén.
- Az órajel:
 - Kapcsolási valószínűsége 1
 - A legmagasabb frekvencián működik
 - Az összes flip-flophoz kapcsolódik
 - A fogyasztás nagy részét, kb. 40%-át adja.
 - Csökkentés: órajel-kikapuzás (clock gating)
 - Vigyázat! A fogyasztáscsökkentés miatt szinte minden modernebb SoC-ben a perifériák reset után kikapcsolt állapotban vannak. Használat előtt engedélyezni kell az órajelüket! (a nem használtakat pedig ki kell kapcsolni)

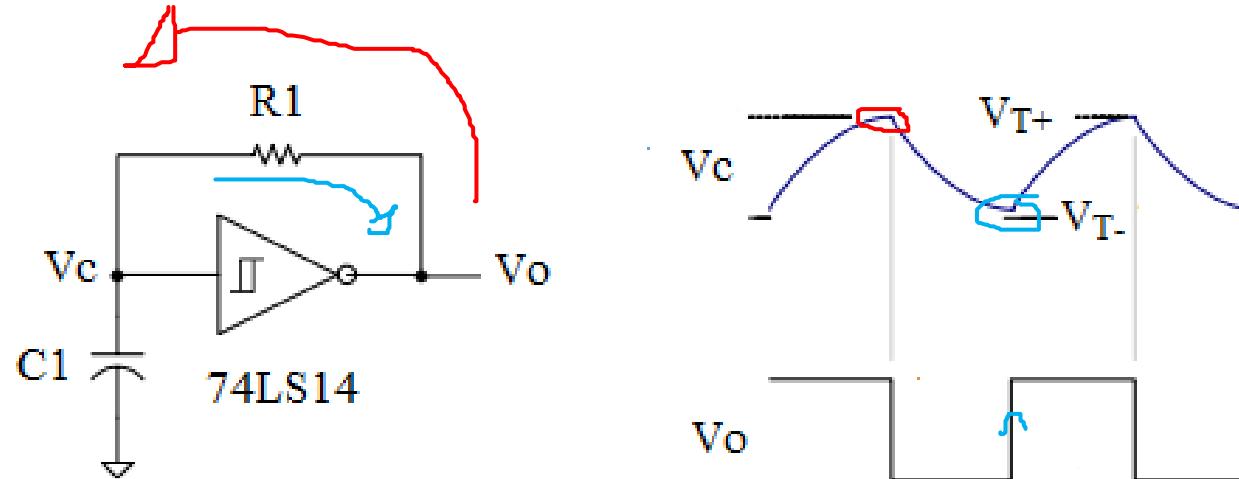


Órajel előállítása

- Oszcillátor
 - Nincs stabil állapota, periodikus jelet állít elő.
- RC oszcillátor
 - A rezgési frekvenciát ellenállások és kapacitások határozzák meg.
 - Integrált áramkörön belül nem lesz pontos, bár sokat javít a pontosságon a kalibráció. (gyártáskor vagy akár rendszer működése közben)
 - A pontosság nagyjából: 0,01%-1% (ez nem túl jó – és ráadásul nagyon hőmérsékletfüggő)
 - Gyors indulás
 - (addig nem szabad a rendszert elindítani, amíg az oszcillátor nem működik megfelelőképpen, hiszen nincs órajel...)
 - Belső RC-ről indítunk, ha van, megvárjuk, amíg a pontosabb pl. kristályoszcillátor stabil nem lesz, majd átkapcsolunk.



Egy egyszerű RC oszcillátor



- Schmitt triggerrel felépített kapcsolás.
 - Feltételezzük, hogy kezdetben C_1 feszültsége 0V
 - Ekkor az inverter kimenete tápfeszültség, ami az R_1 ellenálláson keresztül tölti a kapacitást.
 - Ha C_1 feszültsége a felső komparálási szintet meghaladja, az inverter átkapcsol, innentől kezdve C_1 kapacitás R_1 ellenálláson kisül.
 - Egészen az alsó komparálási szintig, amikor a kimenet újra logikai 1 lesz.



Rezonátorok (kristályoszcillátorok)

- Kristály (kvarc) vagy kerámiarezonátor
- Piezoelektrikus tulajdonságú
 - Mechanikai deformációra (nyomás, hajlítás, nyírás) töltések jelennek meg, illetve elektromos erőtérben deformálódik.
 - Ha váltakozó erőtérbe helyezzük, rezgésbe jön, ami maximális amplitúdójú a mechanikai rendszer sajátfrekvenciája esetén.
 - Ez utóbbi miatt alkalmas pontos frekvencia előállítására.
- A frekvencia a mechanikai méretekkel állítható, általában
 - $\pm 10..100 \text{ ppm}$ (parts per million)
 - pl. 4MHz-es kristály 10ppm esetén $3\ 999\ 960 - 4\ 000\ 040 \text{ Hz}$ közötti frekvenciájú.
 - A hőmérsékletfüggés kicsi, $1..10 \text{ ppm } /^\circ\text{C}$
 - (néha ez sem megengedhető, ezért a kristályt fűtéssel állandó hőfokon tartják – OCXO)

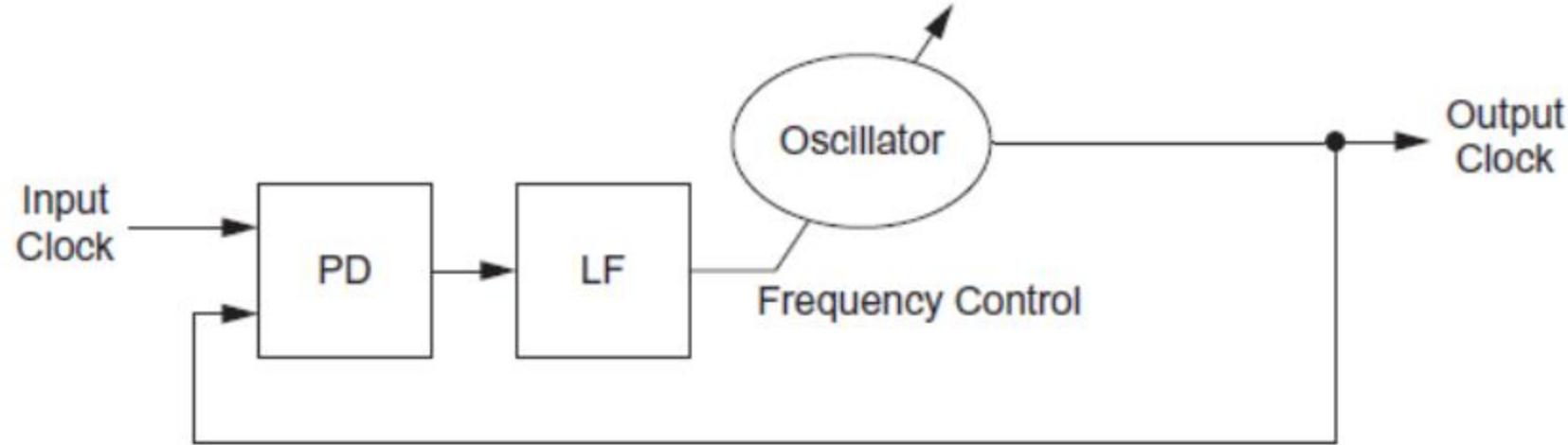


Szokásos kristályfrekvenciák

- Nagyon sok fajta van, a leglényegesebbek:
 - 32,768kHz – az összes RTC (real time clock) áramkör frekvenciája
 - 8MHz, 10MHz, 20MHz, 25MHz – általános célokra
 - 12MHz – USB, CAN
 - 27MHz – PAL, NTSC televíziótechnika...
 - Stb.
- Valójában egy adott frekvenciájú pontos forráslegendő
 - A kevésbé pontos oszcillátorokat hozzá tudjuk igazítani
 - Racionális számszorosát elő tudjuk állítani.
 - Erre szolgálnak az ún. PLL-ek.



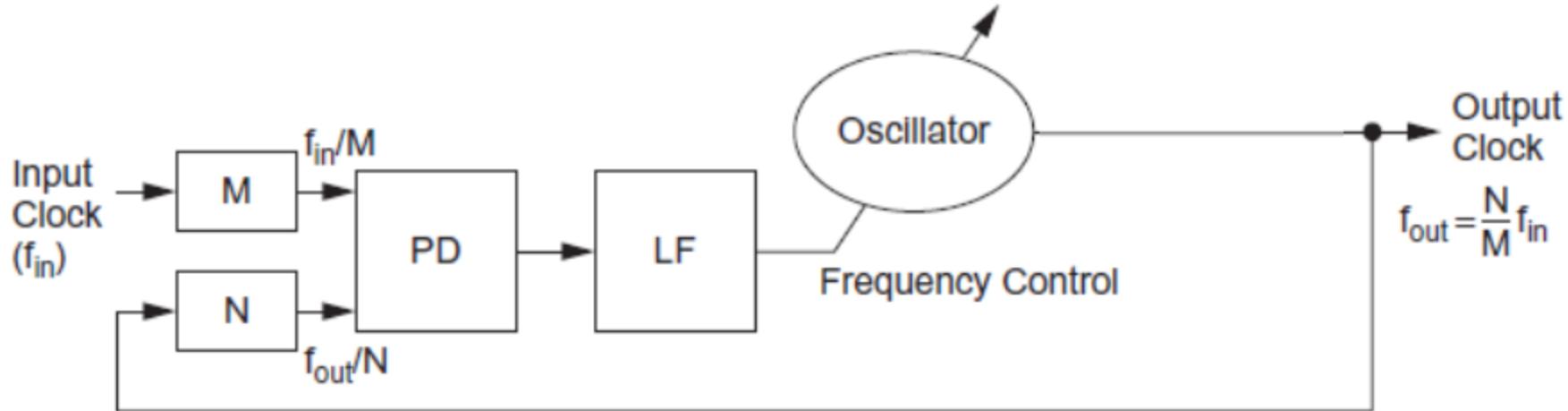
A fáziszárt hurok (PLL)



- Egy szabályozókör, ami a bemenetével megegyező frekvenciájú jelet állít elő.
- Alapelemei:
 - Fázisdetektor és aluláteresztő szűrő: a frekvenciaeltéréssel arányos vezérlő feszültséget állít elő.
 - Feszültségvezérelt oszcillátor – egy egyenfeszültséggel változtatható a frekvencia.



PLL – frekvencia szintézis



- Azaz az alapfrekvencia tetszőleges számszorosa előállítható.
 - Így működnek a szorzók
 - Így állítják elő a vezetékes vagy vezetéknélküli kommunikációhoz szükséges pontos csatorna frekvenciákat.





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Digitális kommunikáció



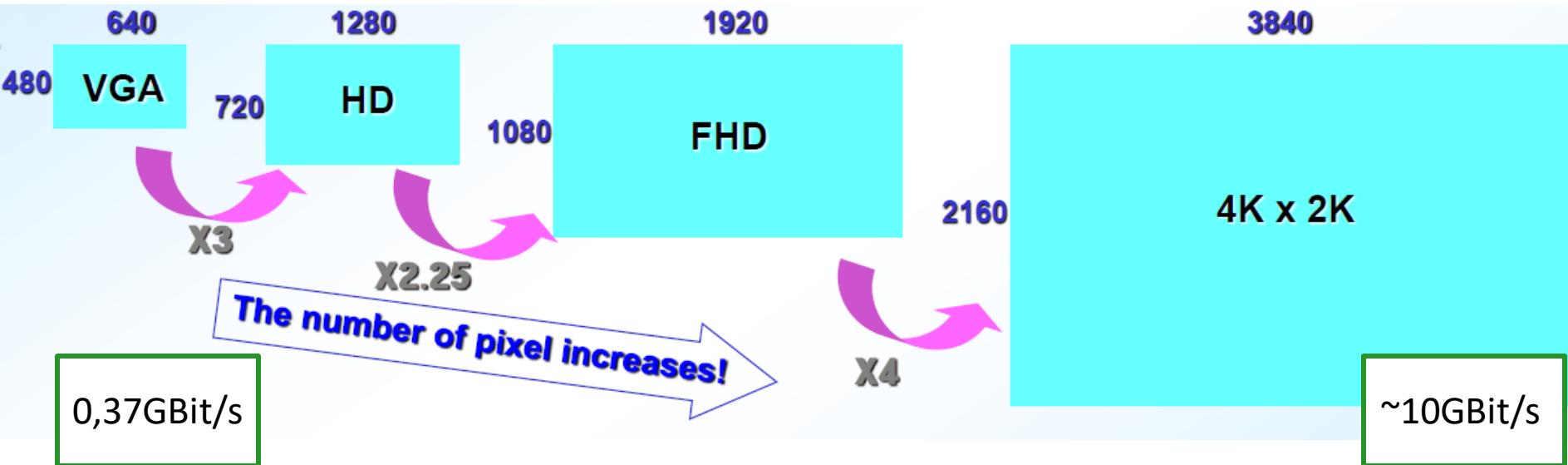
A digitális kommunikáció

- A szűk keresztmetszet *leginkább* nem az integrált áramkörön belüli kommunikáció.
- A leginkább problémás területek
 - Az integrált áramkörök közötti kommunikáció
 - Az egyes nyomtatott huzalozású kártyák közötti kommunikáció
 - Az eszközök közötti kommunikáció
- Nagy sávszélesség szükséges
 - De kevés energiával
 - Kis elektromágneses zaj kibocsátással.
 - Lehetőség szerint egyszerű kábelezéssel, vagy **vezeték nélkül!**



Példa: kijelzők

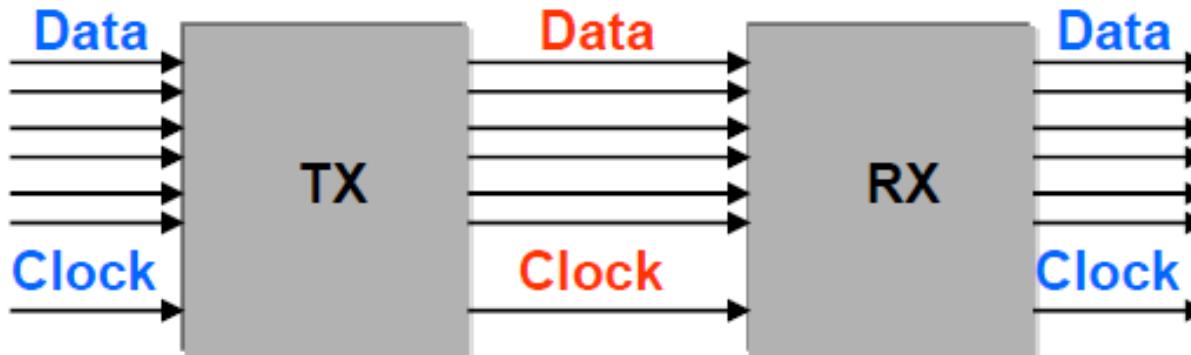
Példa: kijelzők



- 27× sávszélességigény
- A VGA monitortól a 4K-ig



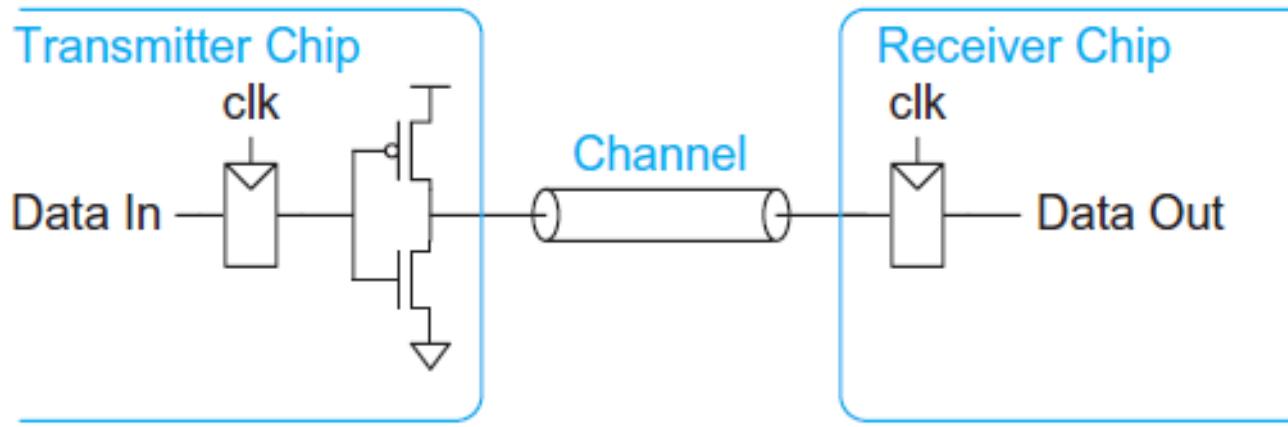
Párhuzamos ill. soros busz.



- Közvetlen összeköttetés (nincs összeköttetési réteg, csomag stb.)
- Egyszerűen implementálható
- Órajelet igényel
- Nagy területet foglal, sok összeköttetést igényel



A logikai jel átvitele



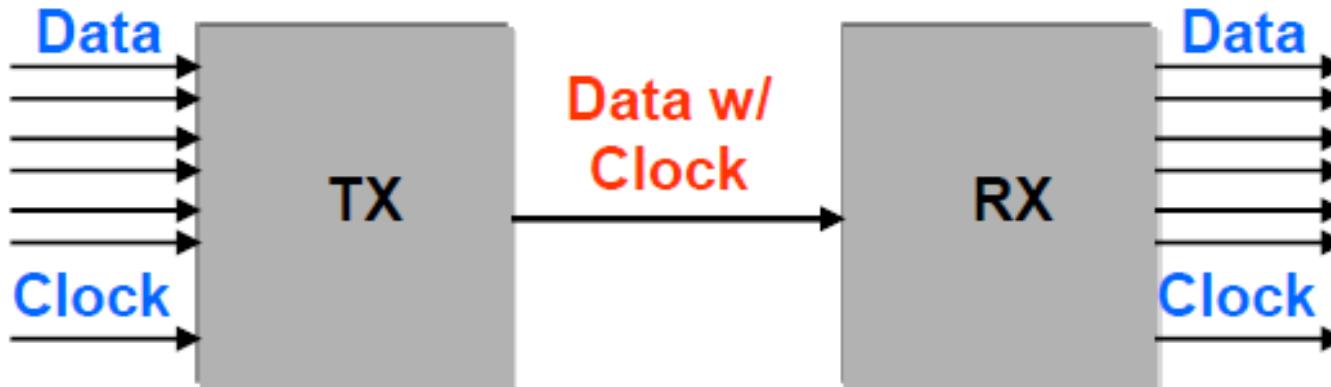
- Kis frekvenciákon nincs gond a szokásos 0- VDD szintű logikai jelek átvitelével, azaz az ún. **single ended** átvitellel
 - Valahogy úgy, ahogy az ábrán látható.
- A problémák ott kezdődnek, amikor az órajel periódusideje és az összeköttetés terjedési ideje összemérhető.
 - A jel az adott közegben érvényes elektromágneses hullám sebességével terjed
 - Azaz $v = c/\sqrt{\epsilon_r \mu_r}$



- Például 10cm huzalozás szokásos nyomtatott huzalozású lap esetén
 - $v = 3 \cdot \frac{10^8}{\sqrt{4,35}} = \frac{14,4\text{cm}}{\text{ns}}$
 - A 10cm-es utat tehát a jel 700ps alatt teszi meg.
 - Ha feltételezzük azt, hogy a fel és lefutás a négyszögjel negyedrésze, akkor a 2,8ns periódusú digitális jel esetén már hullámterjedéses jelenségekkel kell számolni.
 - Ez kb. 350MHz.
- Nagyon pontosan azonos vezetékhosszúságot kell tartani párhuzamos buszok esetén.
- Ellenkező esetben nem egyidőben érnek a vevő oldalra!
- Nagy nehézséget okoz a jelintegritás megőrzése, mert az összeköttetések közötti induktív és kapacitív csatolások miatt áthallások keletkeznek.
- Ez a párhuzamos buszok fő problémája



Soros átvitel



- Egyszerű elektromos összeköttetés
- Az órajel az adatba ágyazott
- Nagyobb vezetéktávolságok is elkövethetők, mert nincs elcsúszás, mint a párhuzamos busz esetében.
- A protokoll jóval bonyolultabb!
 - Pl. USB picit több, mint 500 oldal a specifikáció!



- Az előzőekben felsoroltak miatt a kommunikáció soros kommunikáció irányába tolódott el.
 - Ha ennek sávszélessége nem elegendő, több soros kommunikációs csatornát használnak egyidejűleg.
 - Differenciális a jelátvitel és jóval kisebb jelszintek, mint a tápfeszültség.
 - Az órajelet az átvitt jelből állítják vissza, vagy szinkronizáló csomag kezdeteket használnak (clock recovery)
- PCI Express, SATA, USB, HDMI, DP stb.
- Gyakorlatilag a memória busz kivételével mindenhol soros átvitelt használnak





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

IT eszközök technológiája

Tápellátás



Az energia-elosztás

- Az erőművekben megtermelt villamos energiát a villamos energia elosztó rendszer juttatja el a fogyasztóhoz.
- Az elosztás váltakozó áramon történik
 - Történelmi okokból: a váltakozó áram a feszültség átalakítása egyszerűen, **transzformátorral** megoldható. A szállítás nagyfeszültségen (pl. 750kV) történik, így a vezetéken folyó áram kisebb, ezáltal a szállítás vesztesége, amelyik a vezeték ellenállásából származik $P_V = I^2 R$ kisebb.
- 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 ohmikus fogyasztón a feszültség négyzetével arányos. A konnektor feszültségének időfüggvénye tehát $\sqrt{2} \cdot 230\sin(2\pi 50t)$, azaz kb. 325V amplitúdójú, 50Hz frekvenciájú szinuszos jel
- Ez az ún. kisfeszültségű hálózat.



Átalakítás

- Váltakozó feszültségről váltakozó feszültségre (AC/AC)
 - Transzformátor
 - Pl. csökkentjük vagy növeljük a váltakozó feszültség amplitúdóját
- Váltakozó feszültségről egyenfeszültségre (AC/DC)
 - Egyenirányító
- Egyenfeszültségről egyenfeszültségre (DC/DC)
 - DC/DC konverter
 - Csökkentjük vagy növeljük a feszültséget.
- Egyenfeszültségről váltakozó feszültségre (DC/AC)
 - Inverter
 - Pl. UPS, napelem – hálózati visszatáplálás, vagy akku – háromfázisú elektromos motor
- Az átalakítás hatásfoka: $\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}}$
 - Azaz a kimeneten mért teljesítmény/bemeneti teljesítmény
 - Cél, hogy minél jobban közelítse meg a 100%-ot!



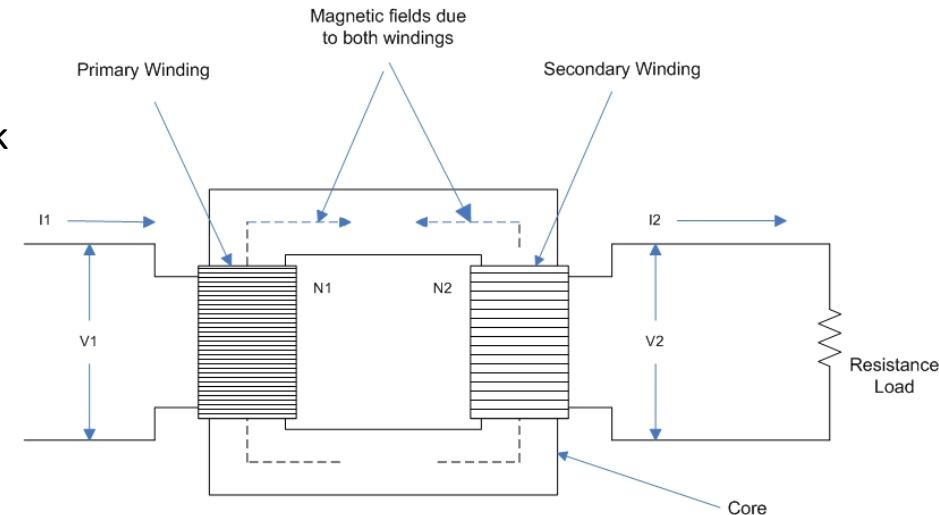
A transzformátor

- Primer oldal: ahol az energia betáplálás történik
- Szekunder oldal: ahová 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:

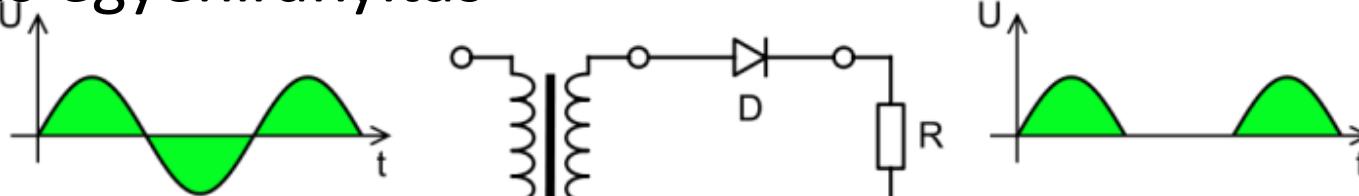
Bláthy Ottó, Déri Miksa, Zipernowsky Károly, 1885, Ganz Művek



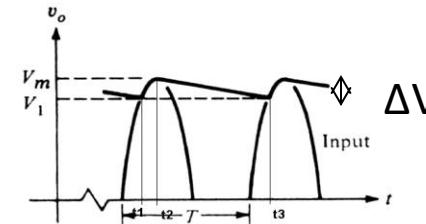
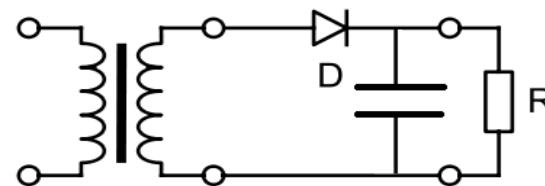
Modern, toroid transzformátor



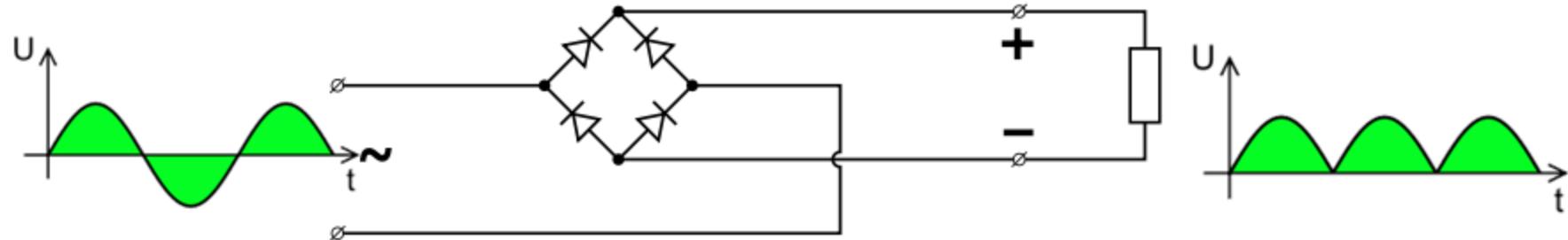
Egyutas egyenirányítás



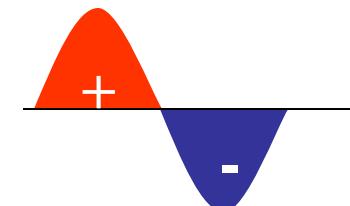
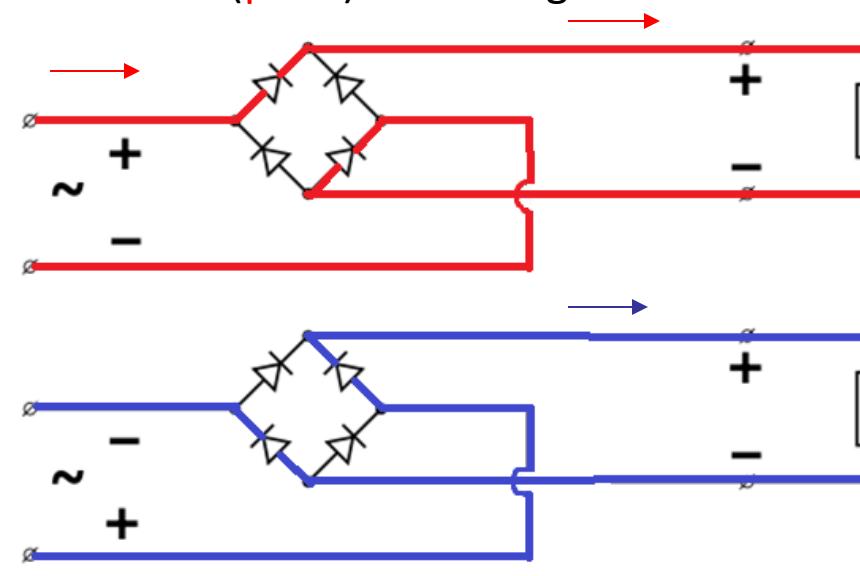
- A dióda csak nyitóirányba vezet, így áram csak a pozitív félperiódusban folyik.
- Problémák:
 - Csak az egyik félperiódusban folyik áram, így a hatásfok nem túl jó.
 - Lüktet – közvetlenül nem alkalmas áramköri felhasználásra, akkutöltésen kívül (ez volt az első felhasználás...) másra nem használható.
- A 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 Graetz / híd kapcsolás/ kétutas egyenirányítás



- Négy diódát tartalmaz.
- Egy tokba szerelve kapható.
- Működése: pozitív félperiódusban (**piros**) illetve negatív félperiódusban (**kék**)
- Mintegy „abszolút értéket” képez



DC/DC konverzió

■ Egyenfeszültség szint változtatása

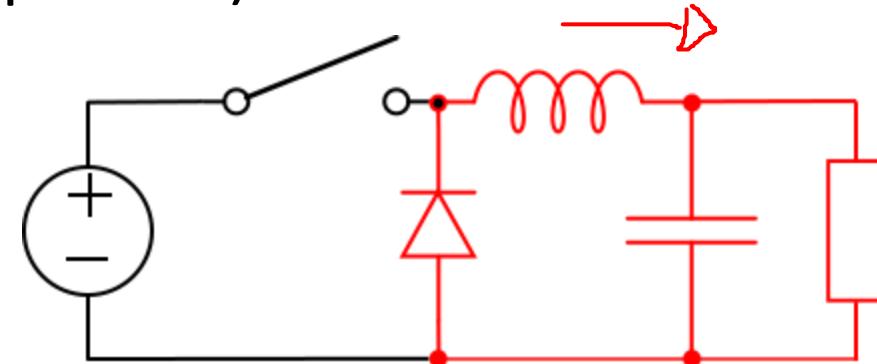
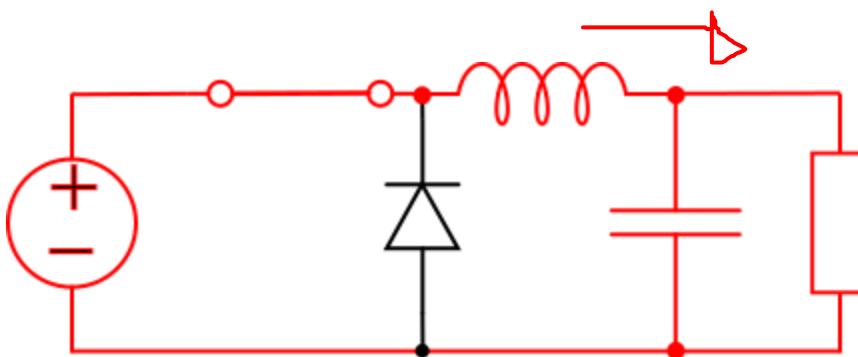
- Transzformátor nem alkalmazható.
- Kis méret, jó hatásfok ($> 90\%$)
- Kevés alkatrésszel megvalósítható
- Jól szabályozható

■ Alapötlet

- Tároljunk energiát valamelyen energiatároló elemben.
- Kapcsolással biztosítsuk azt, hogy a terhelésen folyamatosan áram folyjon, vagy a bemeneti feszültségforrásból, vagy pedig az energiatároló alkatrészből.
- Egyenirányító diódákkal akadályozzuk meg azt, hogy az áram esetlegesen „rossz irányba” azaz ne a terhelés irányába folyjon.
- A kapcsoló egy MOS tranzisztor, amit egy δ kitöltési tényezőjű négyszögjellel kapcsolgatunk. A kapcsolás frekvenciája pár 10kHz – pár 100kHz
 - A T periódusidő esetén a kapcsoló δT ideig zárt, $(1 - \delta)T$ ideig pedig nyitott.



Feszültség csökkentő (Buck, step down) konverter



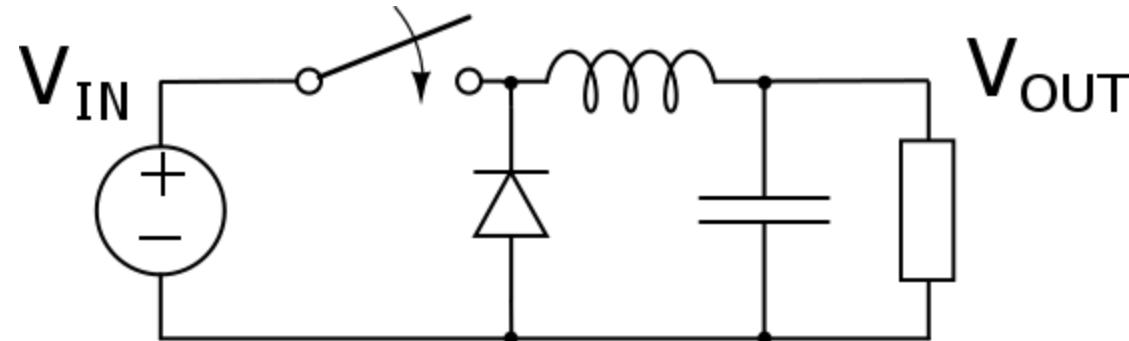
- Egy MOS tranzisztor, mint kapcsoló, egy tekercs, egy dióda és egy kapacitás... Az ellenállás a terhelést jelképezi.
 - A kapcsoló (MOS tranzisztor) zárásakor egyre növekedő áram indul meg a tekercsben, amely a terhelés és a kapacitás irányába folyik, a dióda zárt.
 - Kiépül az energiatároló mágneses tér a tekercsben.
 - A kapcsoló nyitásakor a tekercs táplálása megszűnik. A mágneses tér kényszeríti az áramot, a tekercs baloldali pontjának feszültsége negatívvá válik, így a dióda nyit, és így zárul az áramkör.
 - A terhelésen a tekercs egyre csökkenő árama folyik tovább.



Számítás

- Néhány egyszerűsítéssel élve a számítás **nagyon könnyű**.
 - (ezzel szemben a pontos számítás nem egyszerű...)
- A tranzisztor és a diódát ideális kapcsolónak tekintjük.
- Periódikus egyensúlyban vizsgáljuk az átalakítót.
- Ekkor a tekercs feszültsége és a kondenzátor árama átlagosan 0.
 - Azaz egy periódusban pontosan ugyanannyi energiát veszünk ki az energiatárolókból, mint amennyit beletettünk. (hogy időben ez milyen függvény szerint történik, nem érdekes.)
- A Kirchoff-törvények igazak az átlagos mennyiségekre is!
 - Bizonyítás pl. a huroktörvényre:
 - $\sum \bar{u}_i = \sum \frac{1}{T} \int u_i(t) dt = \frac{1}{T} \int [\sum u_i(t)] dt = 0$

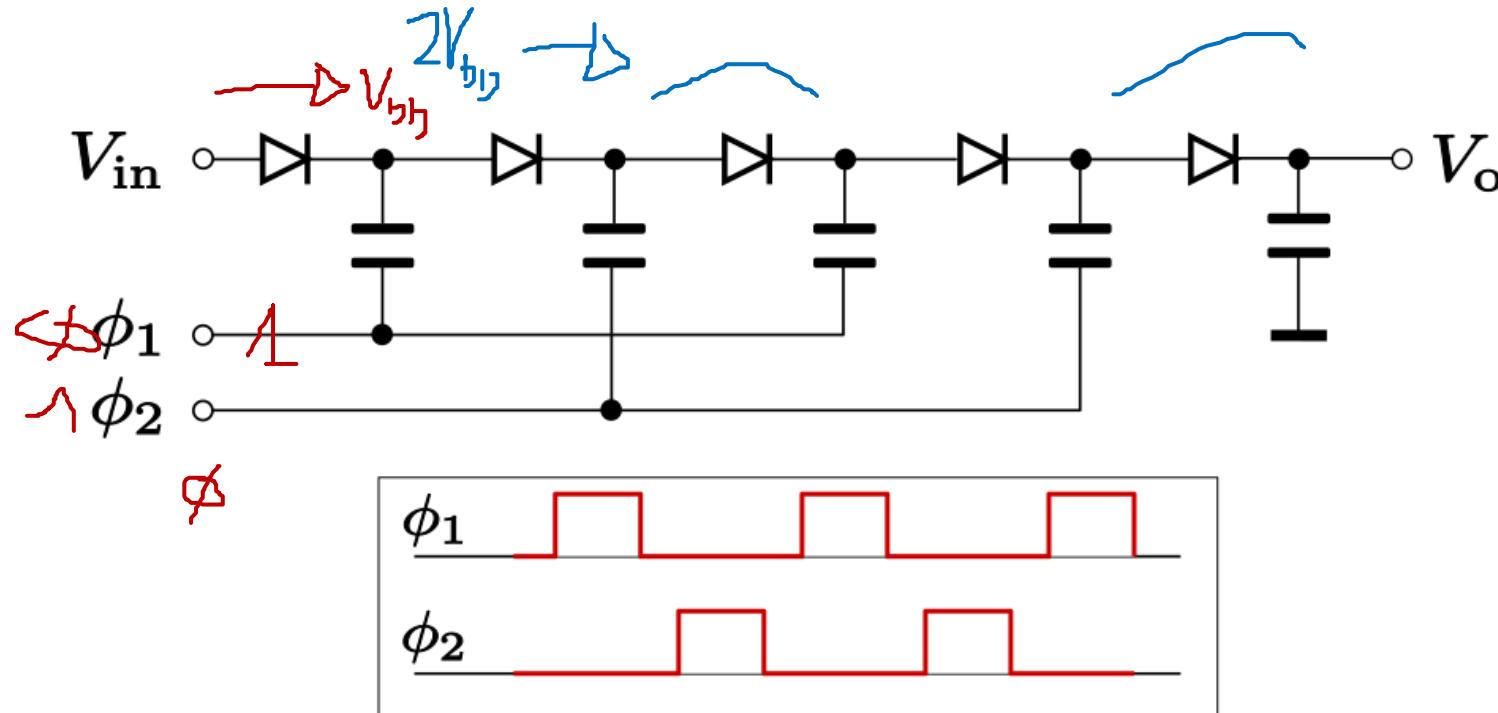




- A továbbiakban **átlagokkal** dolgozva.
- A tekercs átlagos feszültsége, ha a kapcsoló zárt, $V_L = V_{IN} - V_{OUT}$, ha a kapcsoló nyitott, akkor pedig $V_L = -V_{OUT}$
- A teljes periódusidőre a tekercs feszültségének átlaga 0, azaz:
- $V_L = \delta(V_{IN} - V_{OUT}) + (1 - \delta)(-V_{OUT}) = 0$
- Azaz: $V_{OUT} = \delta V_{IN}$
- Tehát a **kitöltési tényezővel** szabályozható a kimeneti feszültség.
 - Folyamatos szabályozást igényel, de ez gond nélkül megoldható.
 - Kész katalógus IC-keket árulnak erre a célra.



Töltéspumpa (charge pump)



- Kizárolag kapacitást használ energiatároló elemként
- Tipikusan nagy frekvenciával kapcsolhat.
- CMOS áramkörökben könnyen megvalósítható.



Töltéspumpa használata

- A diódák helyére megfelelően vezérelt transzfer kapukat rakva teljes mértékben CMOS kompatibilis
 - EEPROM és FLASH memóriákban a törlő, programozó nagy (10-20V) feszültségek előállítására
 - Szinteltoló áramkörökben, pl. MAX232 \pm 7,5V az 5V tápfeszültségből.
 - LCD meghajtók
 - Stb.
- Kevesebb drága alkatrész, egyszerűbb felépítés, mint az induktivitást tartalmazó áramkörök.

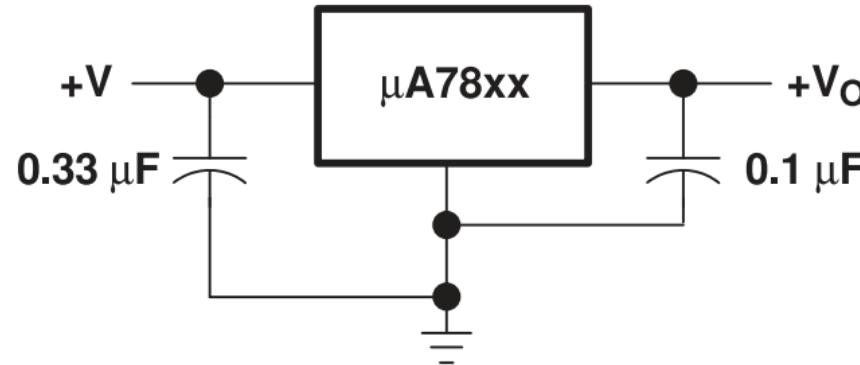


Feszültség stabilizálás

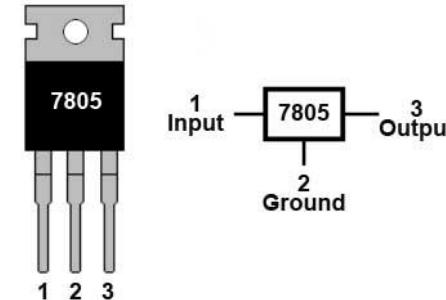
- A felsorolt DC-DC átalakítási módszerek nem szolgáltatnak teljesen egyenfeszültséget.
 - A kimeneti ingadozásokat szűrővel (pufferkondenzátorral) csökkenteni lehet, de teljesen nem lehet eltüntetni.
 - Érzékeny (analóg) alkalmazásokban **stabilizálni** kell.
- A feszültség stabilizátorok olyan áramkörök, amelyek egy referencia-feszültség segítségével stabilizálják a kimeneti feszültséget.
- A kimeneti feszültség mindig kisebb, mint a bemeneti.



Gyakorlatban



7805 Pinout



- Kész, minimális kiegészítő alkatrészt igénylő integrált áramkörök.
- Pl. a 78XX sorozat (negatív párra a 79XX)



Tápegységek

- Általában az eszközeink kapcsolóüzemű tápegységgel rendelkeznek.
- Bizonyos határok között a bemeneti feszültség mindegy
 - Általában 80-250V stb.
- Ezekben a kimeneti egyenfeszültséget a következő lépésekben állítjuk elő:
 - Egyenirányítás – szűrés – DC/DC átalakítás – stabilizálás (ha szükséges)



Források, ajánlott irodalom, érdekességek

- STM32F4XX referencia

- A példaként mutatott mikrokontroller kézikönyve

- USB 4 specifikáció

- Laza 576 oldal.

- USB 3 valódi jelek és szemábra

- Érdemes belenézni, hogy is néz ki a valóságban a „digitális” jel.

- Szimulációk

- Egyutas egyenirányítás
 - Kétutas egyenirányítás
 - Buck konverter



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

IT eszközök technológiája

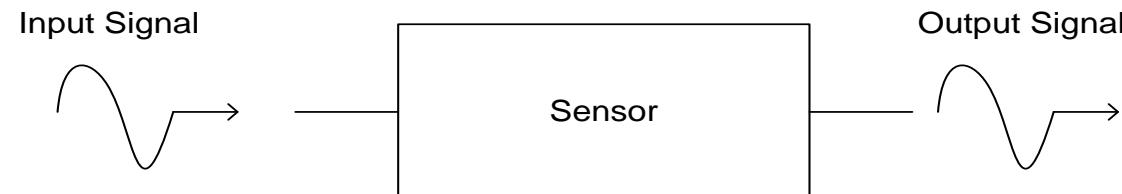
8. előadás
Szenzorok



- Szenzorok alapvető tulajdonságai
 - Szenzorok csoportosítása
 - Szenzor transzfer karakterisztikája, alapvető tulajdonságai
 - A transzfer karakterisztika modellezési lehetőségei
 - Intelligens szenzorok
- A mobil számítástechnika szenzorai
 - Hőmérséklet, nyomás
 - Gyorsulás, szögsebesség
 - Mágneses tér, közelség érzékelés
- Képérzékelők
 - CMOS, CCD



Érzékelő / Szenzor



- A szenzor egy eszköz, amely **információ hordozó** jellé alakítja a méréndő mennyiséget.
- Az esetek nagyon nagy részében **elektromos jel**.
 - (optikai ill. mechanikai jellé átalakítás is elközelhető)
- Elektromos jel:
 - minden, ami elektronikus eszközökkel feldolgozható
 - Feszültség, áram, töltés
 - Feldolgozva: amplitúdó, polaritás, frekvencia, fázis stb.
 - Végül: digitális kód.
- Szenzor: energia átalakító
 - Az érzékeléshez energiatranszfer szükséges



■ Átalakítás módja szerint

- Direkt szenzor
 - a mérendő mennyiséget közvetlenül alakítja át elektromos jellé
- Komplex szenzor
 - Több, egymást követő átalakítás történik, melynek végén egy közvetlen szenzor áll.

■ Energiaellátás módja szerint

- Passzív szenzorok
 - A mérendő mennyiség energiáját közvetlenül alakítják át elektromos jellé
 - Általában direkt szenzorok
- Aktív szenzorok
 - Külső energiát igényel

■ Referencia szerint

- Abszolút: a kimenet arányos a mért mennyiség fizikai értékével
- Relatív: egy adott referenciához képest mér különbséget



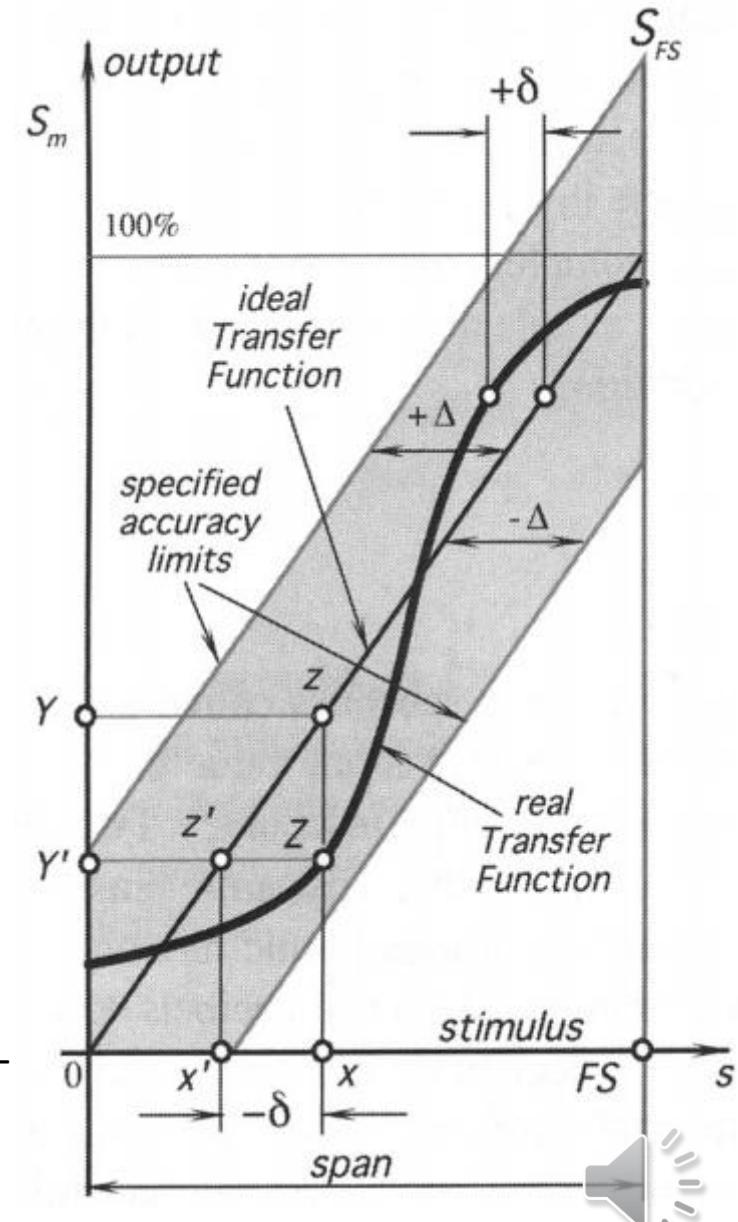
Átlagos mobiltelefon szenzorai



- Érintőképernyő
- Gyorsulásmérő
 - Mindhárom irányban
- Giroszkóp
 - Szög elfordulás mérése, a tér három irányában
- Mágneses tér
- Hőmérséklet
- Fényerősség
- Légnyomás

Transzfer karakterisztika

- Az $S = f(s)$ függvény
 - Azaz az összefüggés a kimeneti jel (S) és a mérőjel (s) között.
- Érzékenység
 - Mennyire érzékeny a szenzor a mérőjel megváltozására?, azaz dS/ds
- Érzékelési határ
 - A legkisebb mérhető mennyiség
- Bemeneti teljes tartomány (span, input full-scale, FS)
 - Amilyen tartományban a szenzor képes mérni a mérő mennyiséget
- Kimeneti teljes tartomány
 - Analóg v. digitális szenzornál is a kimenet maximum-minimum értéke



Főbb tulajdonságok

■ Felbontás

- A legkisebb változás a mérendő jelben, ami detektálható. Digitális szenzornál bitben adjuk meg, pl. 12 bit.

■ Válaszidő

- A szenzor kimenetén mennyi idő múlva jelenik meg a változás. Néha a reciprokát használjuk, maximális mintavételi frekvencia.

■ Offset

- Gerjesztetlen bemenet esetén a kimeneti jel értéke

■ Linearitás

- Mennyire tér el a szenzor kimenete a „kívánatos (?)” lineáris választól

■ Hosszú távú stabilitás (drift)

- Változatlan körülmények között hosszú távon is ugyanazt az értéket kellene szolgáltatnia



Szenzor, példa

Bosch BMP280 nyomásérzékelő



Tulajdonság	
Bemeneti érzékelési tartomány	300 – 1100 hPa (9000m .. -500m), -40..85°C
Pontosság	1hPa
Felbontás	Max. 20 bit; 0,01hPa (<10cm); 0,01°C
Offset	1,5Pa/°C
Zaj	1,3Pa
Hosszútávú stabilitás	±1hPa, 12 hónap alatt
Átlagos mérési idő	5,5ms
Tápfeszültség	1,7..3,6V
Áramfogyasztás 1Hz-en (alvó állapotban)	2,74µA (0,1µA)



A transzfer karakterisztika modellezése

■ Lineáris szenzor

- $S = As + B$
 - Itt A az érzékenység, B az offset

■ Nemlineáris szenzor

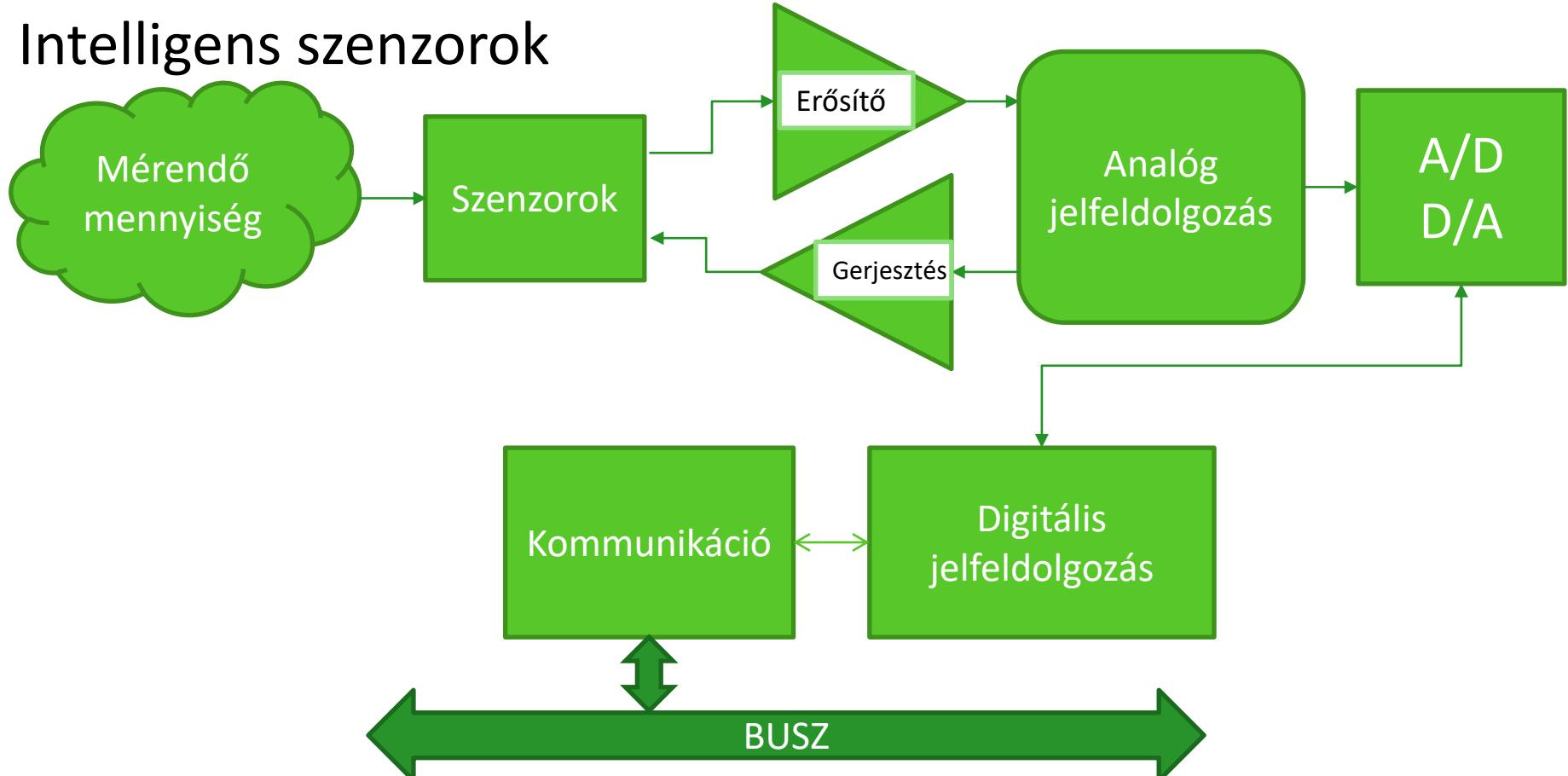
- Ha tudunk valamilyen fizikai modellt alkotni, akkor a fizikai modell alapján
 - Pl. exponenciális, logaritmikus, hatványfüggvény
- Ha ilyet nem tudunk, akkor közelítést alkalmazunk
 - Polinomiális
 - Lineáris vagy köbös interpoláció biz. pontok között.

■ Kalibráció

- A szenzor transzfer karakteristikájának mérése
 - Pontosabb szenzort igényel, mint a mérendő!
- A mért karakterisztika alapján a modell paramétereinek meghatározása



Intelligens szenzorok



- Egy rendszerbe integrálja az érzékeléstől a mért eredmény digitális kommunikációjáig a teljes jelfeldolgozást.
- A gyakorlatban a busz egy egyszerű soros busztól SPI vagy I²C az internetre kapcsolódásig terjed (IoT ☺)



Követelmények

- Egykoron
 - Linearitás, kis offset, hőmérsékletfüggetlenség, hosszú távú stabilitás
- Az intelligens szenzorok esetén azonban ezek nem a legfontosabb tényezők
 - Hiszen a felsoroltak jelfeldolgozással kezelhetők
 - A nemlineáris karakterisztika linearizálható
 - A hőmérséklettel, más hatásokkal a mért érték korrigálható
 - Akár működés közben is a szenzor újrakalibrálható
- Ehelyett a legfontosabb követelmények
 - **CMOS kompatibilitás**, azaz integrált áramköri környezetbe integrálható
 - Tömeggyárthatóság (valójában az előzőből következik)
 - Olcsó ár (szintén az előző kettőből következik.)
 - Lehetőség szerint a legkevesebb külső alkatrész!
- **MEMS – Micro-Electro-Mechanical Systems**
 - A szilícium technológia eszközök készletével épített kisméretű elektromechanikai rendszerek
 - A szilícium jó alapanyag kis méretekben.



Gyakran alkalmazott érzékelők

(még véletlenül sem teljes a felsorolás, nem is lehet az...)

Elsősorban a mobil számítástechnikára koncentrálva



Hőmérséklet érzékelés

- Az egyik legfontosabb paraméter
- Nemcsak önmagában érdekes
 - A szenzorok nagy részének hőmérsékletfüggő a karakterisztikája
 - Azaz ismerni kell a szenzor hőmérsékletét is, hogy a mért értéken a hőmérsékletfüggő korrekciót el tudjuk végezni.
 - Emiatt a legtöbb integrált érzékelő tartalmaz hőmérőt is.
- Mivel minden fizikai jelenség hőmérsékletfüggő, ezért az érzékelés módjai is változatosak
- Példaképpen a legfontosabb módokat bemutatjuk
 - Modern eszközökben azonban nagyrészt az integrált áramkörben használható megoldások találhatók

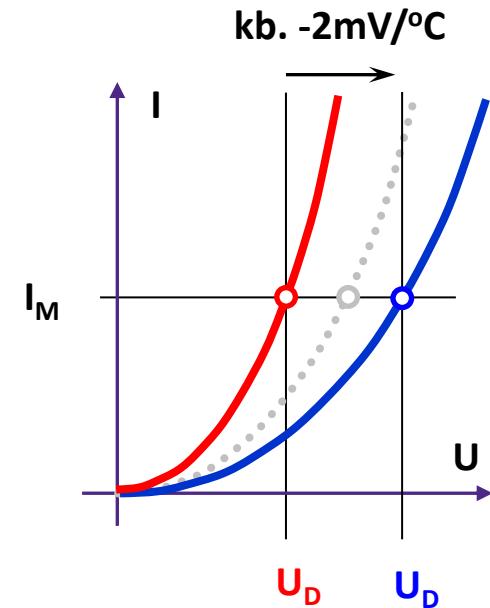


Példaképpen egy áttekintés a hőmérsékletmérés lehetőségeiről

- Hőtágulás
 - Folyadékhőmérő, bimetál stb.
- Termoelem
 - Két különböző fém összehegesztésével. A kontakt potenciálkülönbség miatt kb. $10-50\mu\text{V}/\text{K}$ feszültség mérhető a mérendő és a fix hőmérsékleten tartott pont között.
- Ellenállásmérés
 - NTC – negatív hőmérsékleti együttható, a hőmérséklet növelésével csökken az ellenállás.
 - PTC – pozitív hőmérsékleti együttható
- Infravörös sugárzás mérők
 - 700nm – 1mm hullámhossz
- Folyadékkristályos hőmérők
 - Az LCD állapota megváltozik, pl. fázisváltozás
- Hőérzékeny anyagok, pl. festékek
- Félvezető, pn átmeneten (diódán) alapuló hőmérséklet mérés
- És ami még nem fért fel ide...



A pn átmenet hőmérsékletfüggése



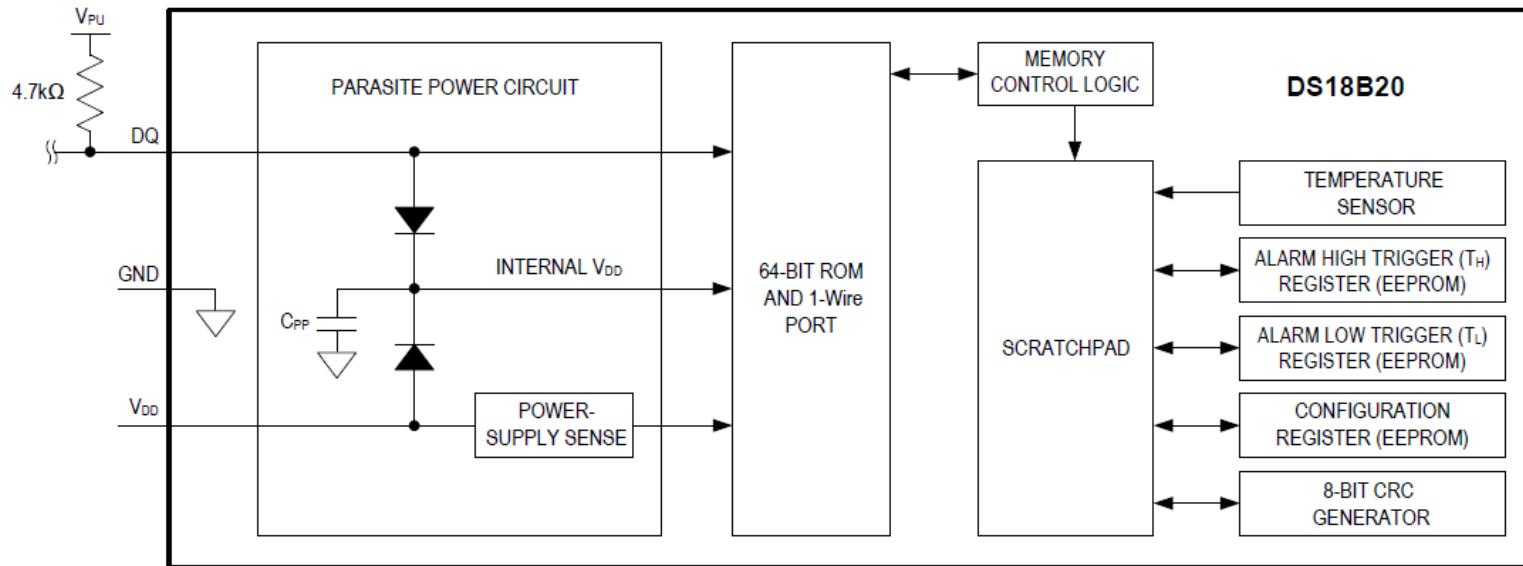
- Adott áram mellett a pn-átmenet feszültsége kb. 2mV-ot csökken $1^\circ C$ hőmérsékletnövekedés hatására.
- Mivel a szilícium jó hővezető, ez lehetőséget teremt arra, hogy a chip hőmérsékletét közvetlenül mérjük.
 - (az ún. **junction temperature**)
- Széles hőmérséklettartományokban lineárisnak tekinthető
 - Nem szükséges általában korrekció



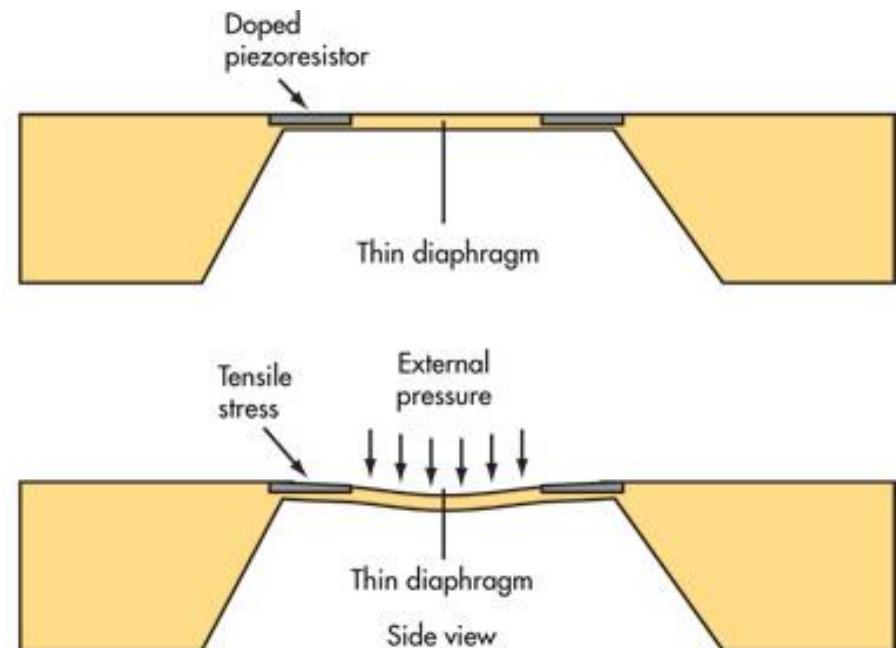
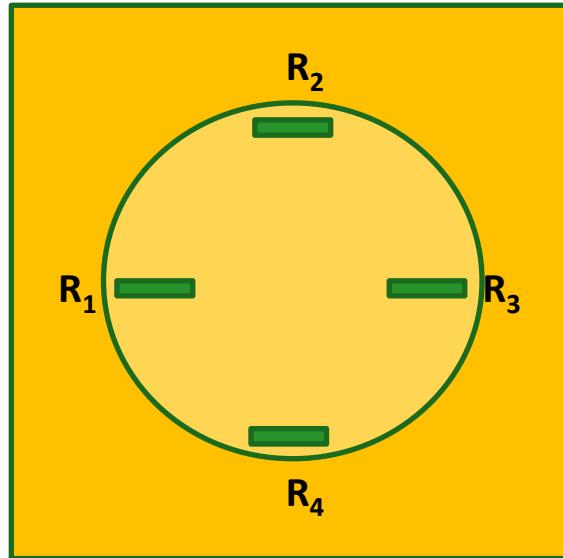
Példa: hőmérséklet szenzor

Dallas DS18B20

- Pontosság: $0,5^{\circ}\text{C}$
 - Felbontás: 9 vagy 12 bit (konverziós idő vs. pontosság)
 - Drift: $0,2^{\circ}\text{C}$ 1000h alatt
- Busz: 1-Wire
 - Egy adat és egy föld összeköttetést igényel
 - Half-duplex soros kommunikáció, lehetséges a szenzor táplálása adatvonalon keresztül.

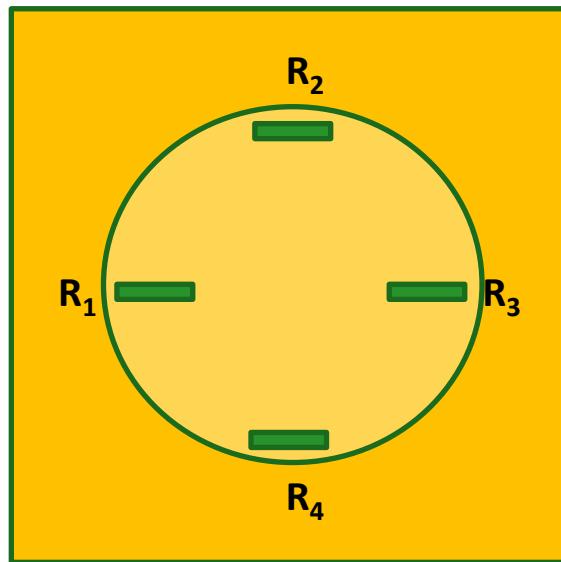


Nyomásérzékelés



- Egyik legrégebbi szenzortípus, 1970-es évek vége óta gyártják
- A szilíciumot elvékonyítják, egy membránt alakítanak ki
 - A Si nagy nyomást elvisel, jól deformálódik, az alakváltozás rugalmas
 - Adalékolással mérőellenállásokat alakítanak ki, p – típusú szilíciumból





$$R_1 = R_0 + \Delta R$$

$$R_2 = R_0 - \Delta R$$

$$R_3 = R_0 + \Delta R$$

$$R_4 = R_0 - \Delta R$$

■ Az ellenállások piezo-rezisztívek

- azaz mechanikai feszültség hatására(nyúlás vagy összenyomódás) az ellenállásuk megváltozik, méghozzá irányfüggően.
- Az ellenállásváltozás függ az orientációtól, a hőmérséklettől és a
- $\Delta R = R_0(1 \pm S(T)p)$
- mindenféleképpen hőmérséklet-kompenzációt igényel.



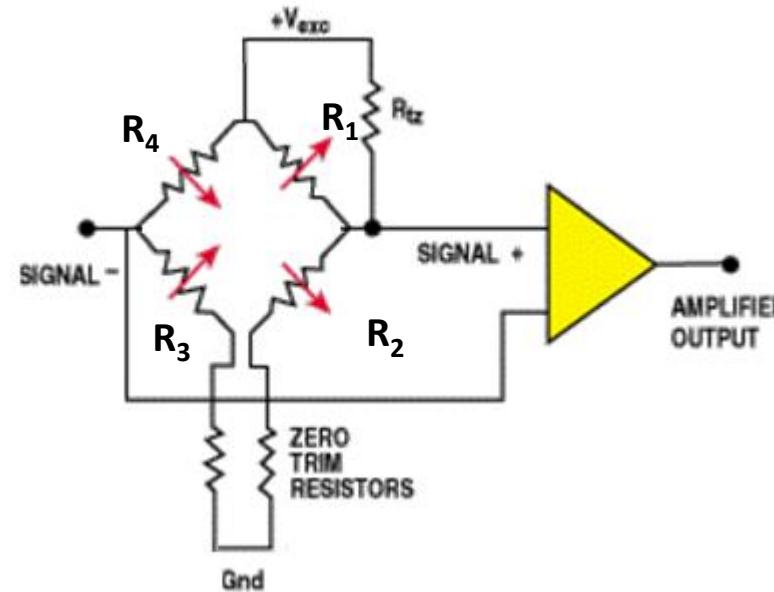
Nyomásérzékelő

$$R_1 = R_0 + \Delta R$$

$$R_2 = R_0 - \Delta R$$

$$R_3 = R_0 + \Delta R$$

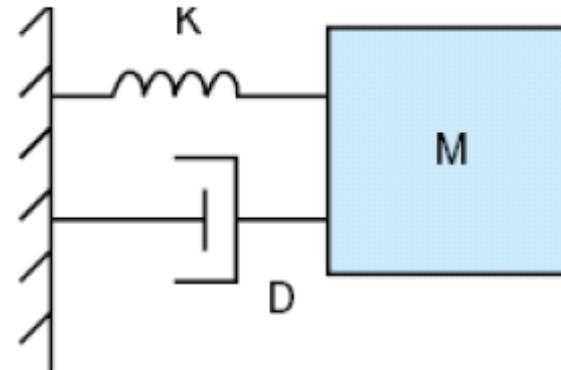
$$R_4 = R_0 - \Delta R$$



- Kiolvasáshoz a négy ellenállást Wheatstone hídba kapcsolják.
- A mért feszültség: $V_{WB} = V_{EX} \left(\frac{R_1}{R_1+R_2} - \frac{R_4}{R_3+R_4} \right) = V_{EX} \Delta R / R_0$



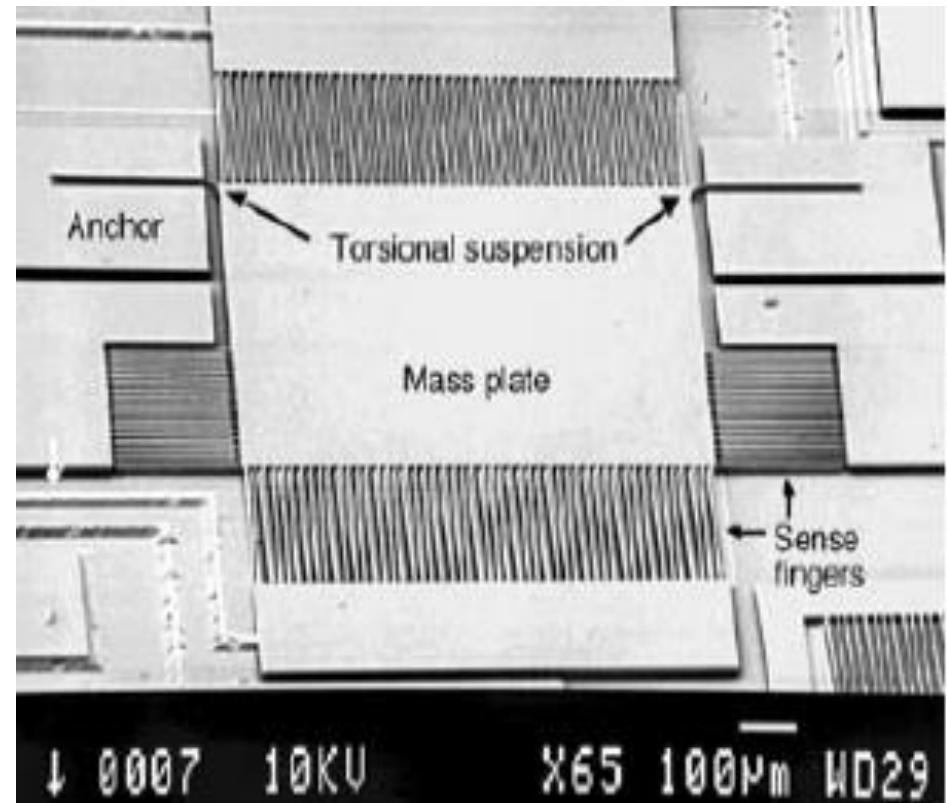
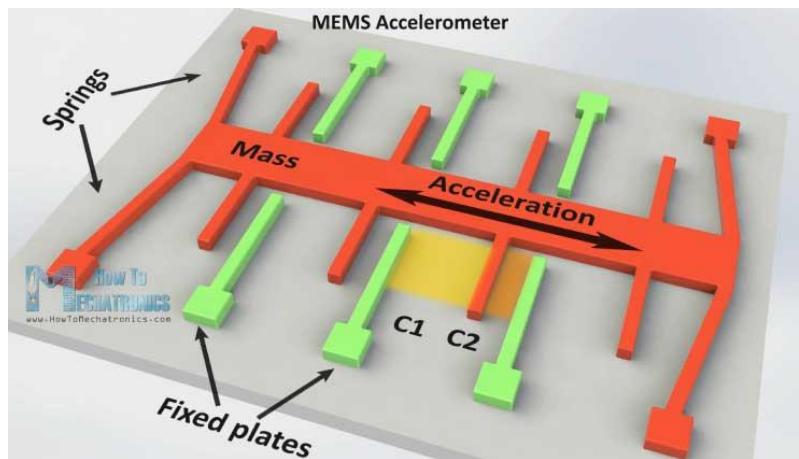
Gyorsulásmérő



- A rendszer modellje: mozgó tömeg, egy csillapított rugós felfüggesztésen.
- Ha a csillapítást elhanyagoljuk:
- $Ma = Kx$
- (x az egyensúlytól vett eltérés)
- x ismeretében a gyorsulás meghatározható



Kiolvasás kapacitív úton

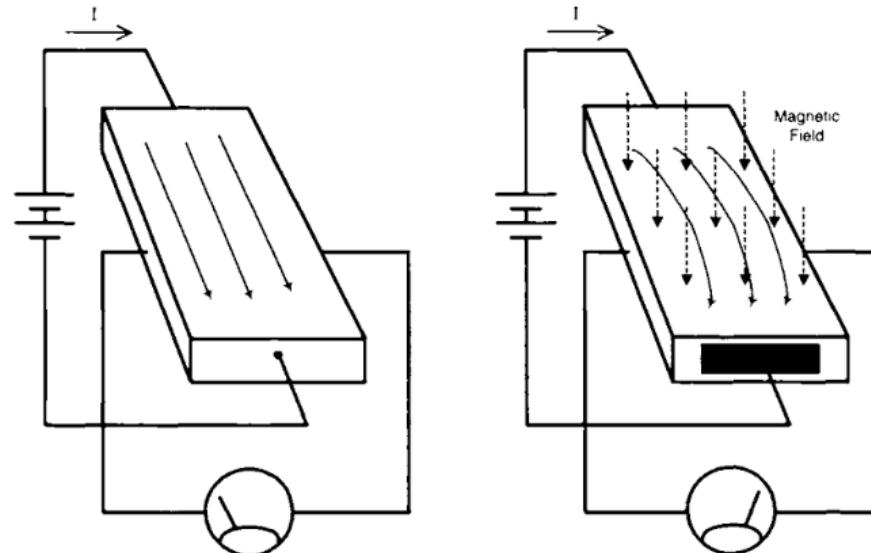


- Az elmozdulást kapacitív úton meg lehet mérni.
- Így a gyorsulás meghatározható.



Mágneses tér érzékelése

- Magnetorezisztivitás vagy Hall-effektus mérése a tér 3 irányában.
- Hall effektus

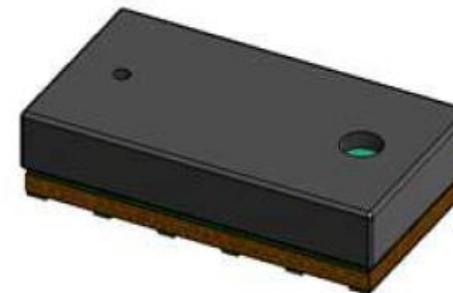


- Általában Wheatstone-híd segítségével.
- Ennek a szenzornak az egyszerűbb - 1 bites változata alkalmas pl. a tablet tok jelenlétének detektálására



Közelség érzékelés (proximity)

- Közeli infravörös fénnnyel (pl. 940nm) történő megvilágítás után méri a legközelebbi tárgy távolságát (a visszavert fény intenzitását) egy fotodiódával.
 - Felhasználó detektálása
 - Mobiltelefonban pl. a képernyő kikapcsolása beszélgetéskor.
 - Kézdetektálás (mosdó, szappanadagoló)
 - Autofókusz fényképezéskor





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Képérzékelők



Képérzékelők

- Képérzékelő:
 - Az elektromágneses sugárzást elektromos információvá alakítja.
 - (látható fény, IR, UV, RTG stb.)
 - Leggyakrabban mátrix elrendezésű
- Alapvetően két típusú képérzékelőt gyártanak:
 1. **CCD (Charge Coupled Device)**
 - A látható fényt feldolgozó kereskedelmi eszközökből kiszorult, nagyrészt csak professzionális és méréstechnikai felhasználásra készül.
 2. **CMOS (más néven APS, Active Pixel Sensing)**
 - gyártástechnológiai előnyösebb, mivel ugyanazzal a technológiával készül, mint az integrált áramkör
- A fő különbség az érzékelő típusában és a kiolvasás módjában van, bár az alapjelenség ugyanaz.



A képérzékelés elve

- Félvezető anyagokban a beeső fény elektron-lyuk párokat kelt
- Azaz a foton energiája segítségével egy elektron a vegyértéksávból a vezetési sávba kerül.
- Ez a folyamat az ún. generáció
 - A fény energiája meg kell, hogy haladja tiltott sáv szélességét
 - Pl. szilícium esetén $E_G = 1,12\text{eV}$
 - Az ehhez tartozó hullámhossz: $\lambda = \frac{hc}{E_G} = 1110\text{nm}$
 - (A látható fény 400-700nm)
 - A tiltott sáv szélességénél kisebb energiájú fotonok nem keltenek elektron-lyuk párokat, tehát távoli infravörös tartományban a szilícium átlátszó. A közeli infravöröst viszont érzékeli – ezért IR szűrővel védekeznek pl. kamerákon.
 - (nagy intenzitás esetén persze nem sokat ér, távirányító vs mobil...)

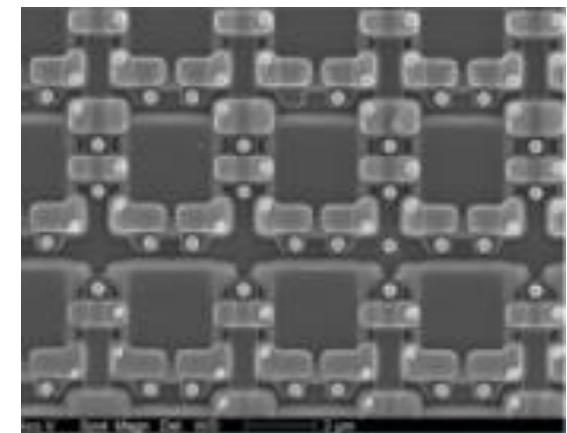


■ Kvantum hatásfok

- η_Q = Elektromos teljesítmény/elnyelt fényteljesítmény
- Ez fogja meghatározni a fény (sugárzás) intenzitás érzékenységet
- Emberi szem: 20%, hagyományos film 10%, képerzékelők: 80%-ot is elérheti. (hullámhosszfüggő)

■ Fill factor

- FF= Aktív pixel terület/Teljes pixel terület
- Minél nagyobb, annál kedvezőbb.
- Mikrolencsékkel javítható ez a tényező



■ Felbontás

- Általában Mpixel-ben adják meg. A képarány szokásosan 2:3, vagy számítógép/mobil eszköz képernyőjéhez igazodik

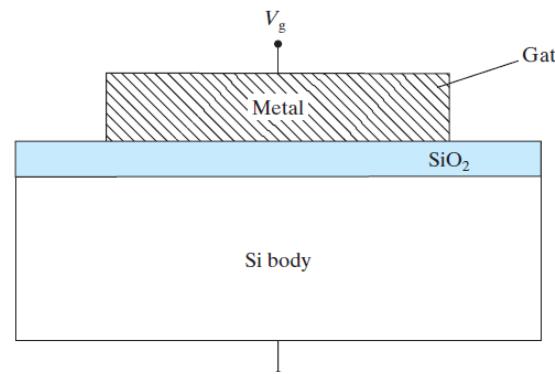
■ Méret:

- 1/3", 1/2" 2/3" 1" stb. Full frame (35mm-es film, 36x24mm)

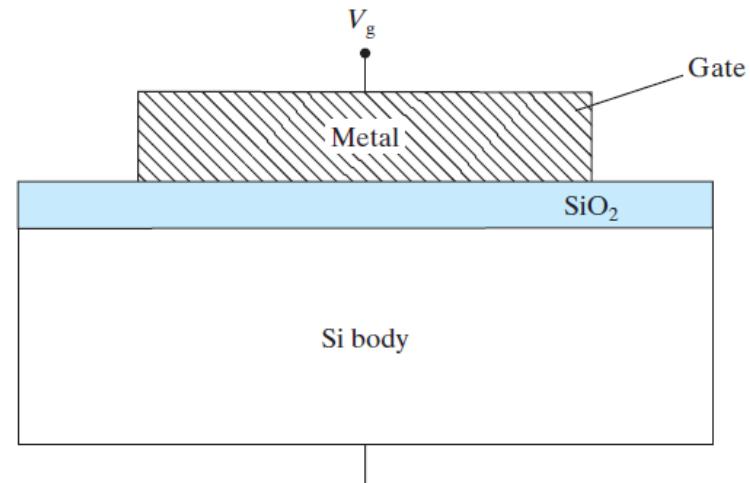


A CCD

- AT&T Bell Labs, 1969
- Eredetileg nem képérzékelésre szánták, hanem memóriának fejlesztették
- Kodak, 1975 100px × 100px digitális fényképezőgép
- 1976 – 800px × 800px, az első alkalmazása, katonai kémműholdban
- Működése az ún. MOS kapacitáson alapul.



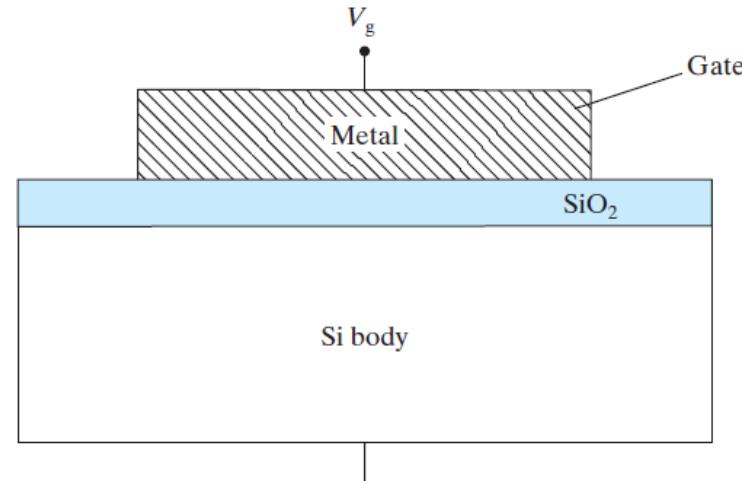
A MOS kapacitás



- Látjuk, hogy hasonlít a MOS tranzisztorhoz, de a source és drain elektróda hiányzik.
- Emlékeztető: MOS tranzisztor.
 - Ha a gate-re a küszöbfeszültségnél nagyobb feszültséget kapcsolunk, akkor létrejön egy ún. inverziós réteg, egy csatorna a source és a drain között, és a tranzisztor vezet
 - Az inverziós réteg töltéshordozói tehát a source-ból származnak.



A MOS kapacitás



- MOS kapacitás esetén nincs forrás elektróda!

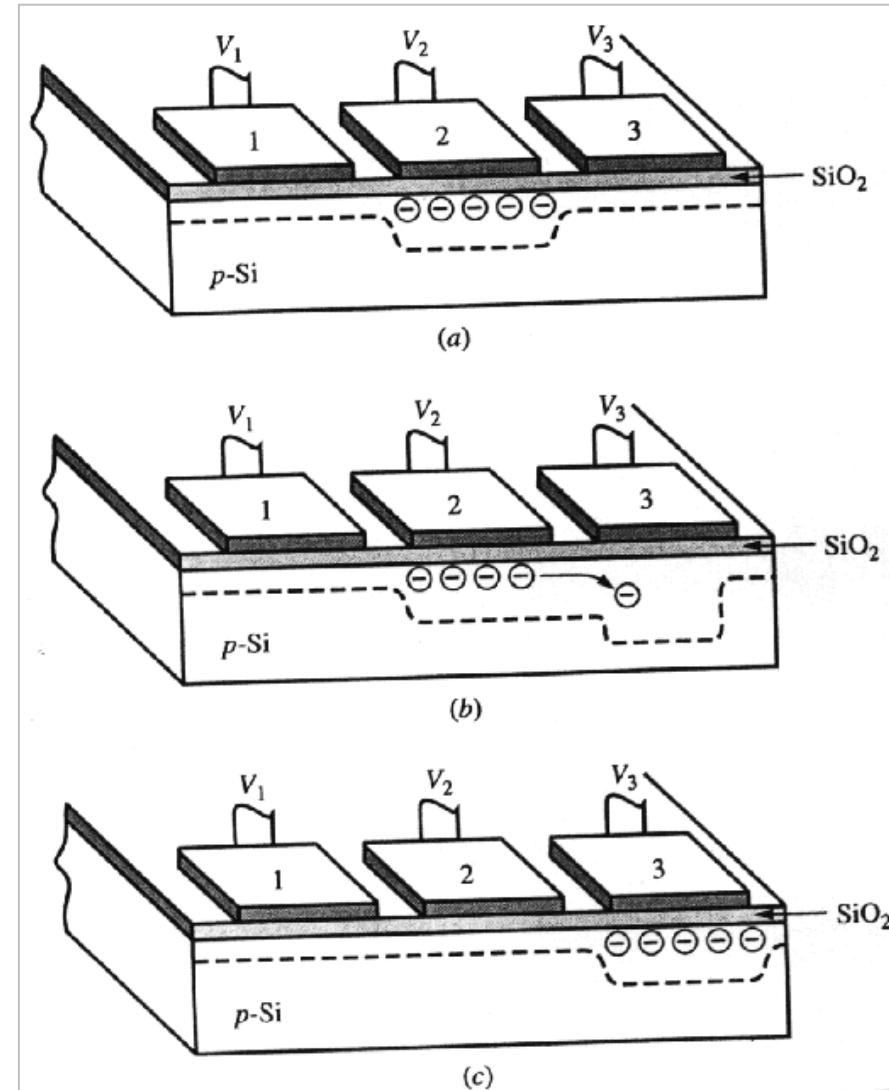
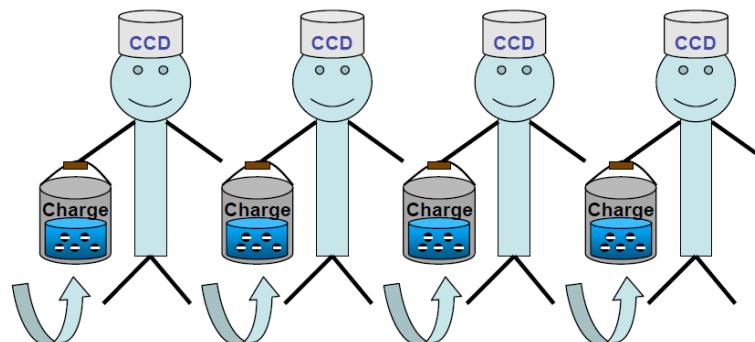
- A töltéshordozók vagy termikusan generálódnak (ami lassú folyamat, szélsőséges esetben hűtött kristály esetén napok!)
 - Az így keletkezett töltések adják a zajt, az ún. sötétáramot.
- Vagy a **beeső fény** generálja őket.
- A keletkezett töltéshordozók a gate alól nem tudnak „megszökni”
 - (ún. potenciál lyukban vannak)
- Ha több elektróda található egymás mellett, akkor ezek vezérlésével a töltés mozgatható (shiftelhető)



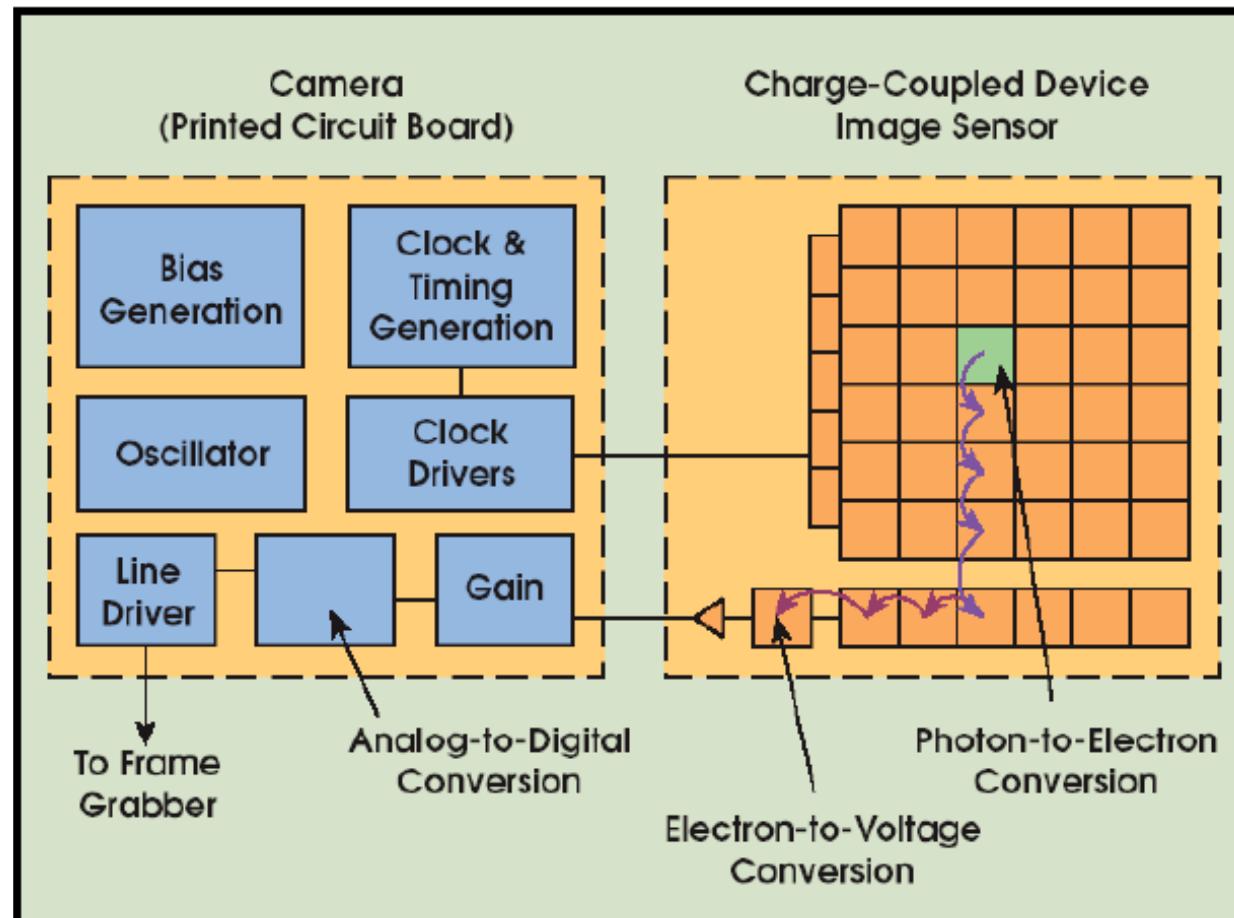
A töltés mozgatása

- Megfelelő feszültségek alkalmazásával a töltés mozgatható.

- $V_2 > V_T$, $V_1 = V_3 = 0$: a töltés a kettes jelű kapacitás alatt marad.
- $V_3 > V_2 > V_T$, $V_1 = 0V$: a töltés a hármas jelű kapacitás alá mozdul.
- $V_3 > V_T$, $V_1 = V_2 = 0V$: a töltés a hármas jelű kapacitás alatt marad.



CCD rendszer felépítése



- A CCD alapvetően analóg kimenetet szolgáltat.
- Egy különálló CMOS áramkör végzi el a vezérlést, az A/D átalakítást stb.



Összefoglalva

■ Előnyök

- Kis zaj
- Az érzékelő terület aránya nagy, így a jel/zaj viszony jobb.
- Régóta ismert, bevált technológia

■ Hátrányok

- Lassú kiolvasás (kétszeres shiftelés)
- Analóg kimenet, amit egy másik áramkörnek kell feldolgozna
- Speciális gyártás
- Túltelítődés (pixel saturation, pixel blooming)
 - Nagy fényerősség esetén a keletkezett töltéshordozó elvándorolnak, így hamis pixel információt kapunk.



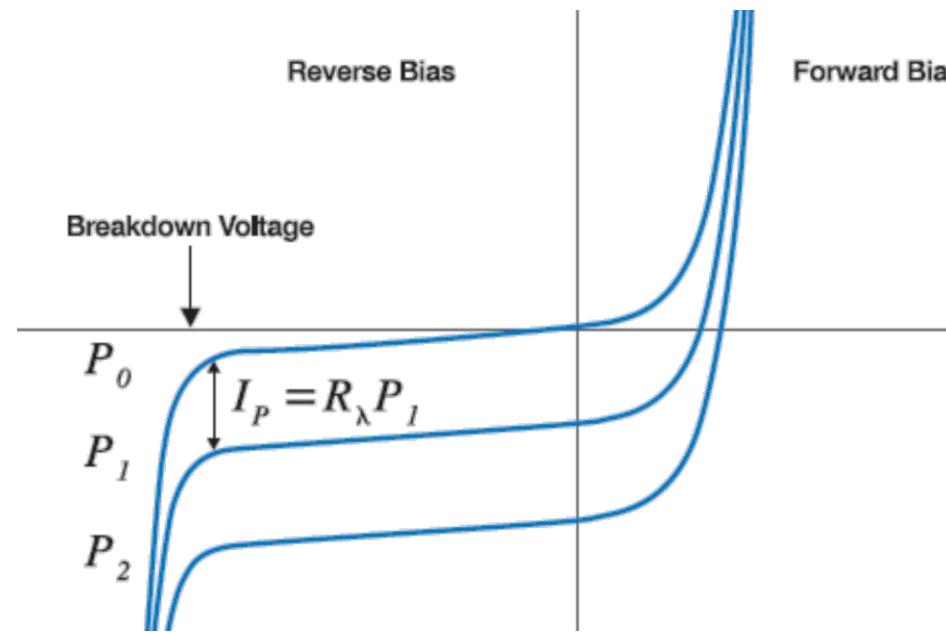


Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

CMOS (APS) képérzékelő



Érzékelés



- Záróirányú pn átmenet (fotodióda)

- Emlékeztető: ideális dióda árama $I = I_0 \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right)$

- Megvilágítás hatása

- A generálódó töltéshordozókat az elektromos tér elválasztja egymástól, így a megvilágítással egyenesen arányos áram keletkezik, ez az ún. fotoáram

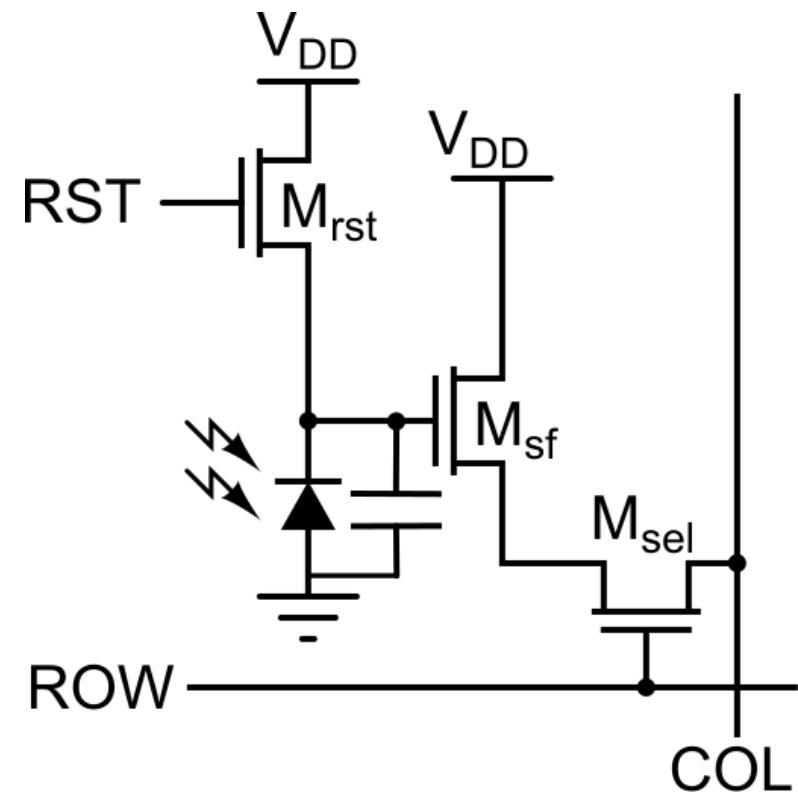


A fotoáram

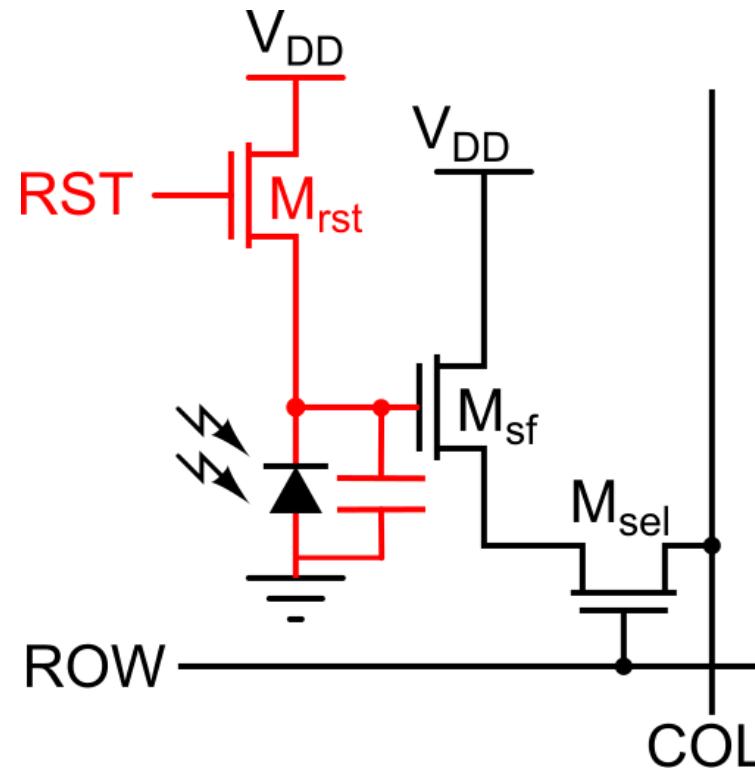
- A pn átmenet árama tehát:
 - $|I| \approx I_0 + I_P$
 - Azaz a **sötétáram** és a generált fotoáram összege.
 - A sötétáram nem részletezett jelenségek miatt több, mint az elméletileg számítható, de a fotoáramnál nagyságrendekkel kisebb az érzékelőben.
- A fotoáram függ
 - A fény (sugárzás) spektrális eloszlásától
 - A félvezető anyagtól
 - (meglehetősen bonyolultan...)



- A fotoérzékelő dióda fotoáramának kiolvasásához néhány tranzisztor szükséges
- Az érzékelőket a memóriákhoz hasonlóan mátrixba szervezik
 - Van szóvonal (ROW), ami egy sor érzékelőt aktivál, amelyek a bitvonalra kényszerítik a (megvilágításfüggő) áramot
 - A kapacitás szort kapacitás (az érzékelő dióda és a tranzisztor kapacitása)
 - Hasonlóan a dinamikus CMOS logikához!



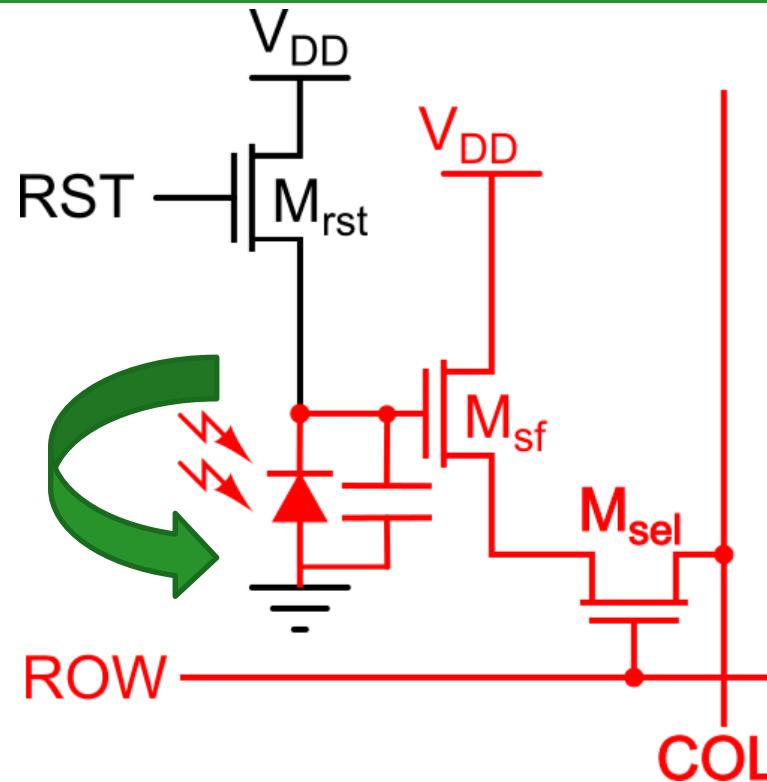
Kiolvasás – 1. sötét állapot (nem zárthelyi anyag)



- RST=1 esetén (ez megfelel a zárt blendének...) a szórt kapacitás tápfeszültségre töltődik fel.
 - Függetlenül attól, hogy meg van-e világítva a szenzor, vagy sem. Tehát az M_{rst} tranzisztor valójában a blende szerepét tölti be.
 - (feltételezzük, hogy a tranzisztor árama jóval nagyobb, mint a fotoáram)



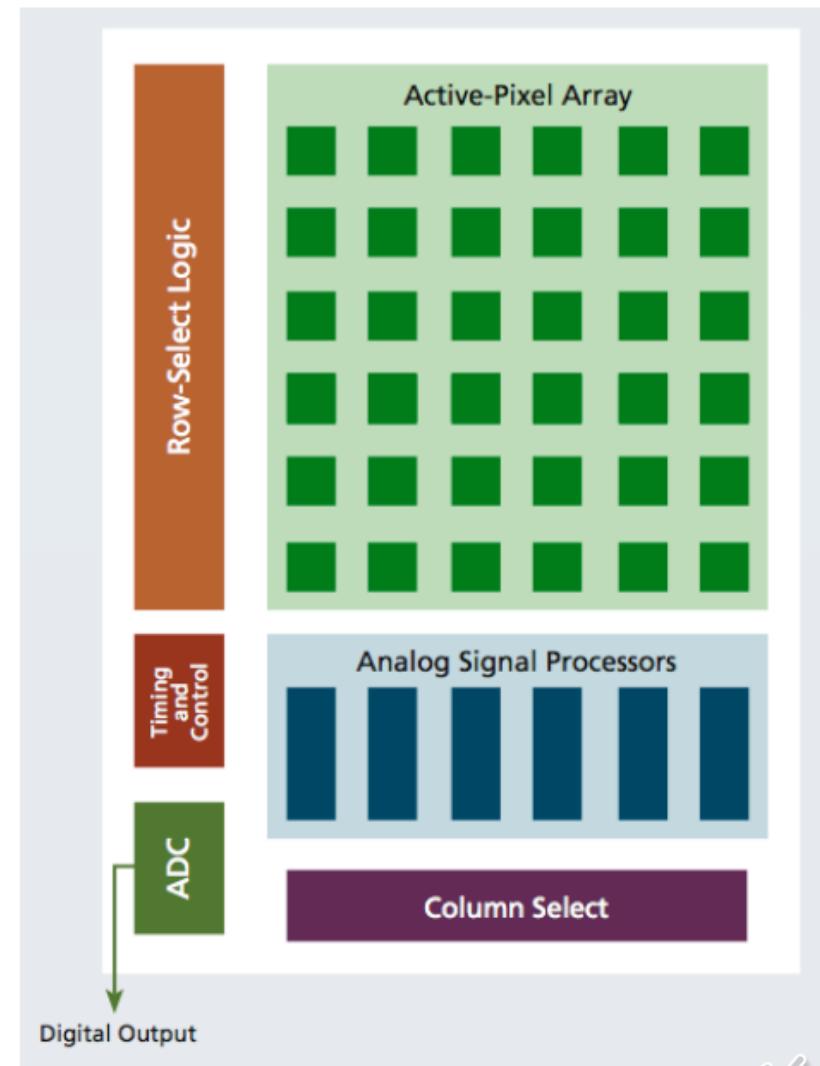
Kiolvasás 2. (nem zárthelyi anyag)



- Aktiváljuk a sort, $ROW=1$, $RST=0$
- A szórt kapacitást a fény által generált fotoáram süti ki, a feszültsége annál jobban csökken, minél nagyobb intenzitású a megvilágítás
- Az M_{sel} tranzisztor az oszlop vonalra kapcsolja az M_{sf} tranzisztort
- Az M_{sf} tranzisztor erősítő!
 - Mivel a gate-source feszültsége a szórt kapacitás feszültsége, az árama pedig négyzetesen függ!

Kiolvasás

- A kiolvasás sorrol sorra történik
 - (ezt könnyű észrevenni gyorsan mozgó objektumok esetén)
- A „feldolgozó” elektronika csökkenti a kitöltést (fill factor)
- A méretcsökkentés lehetővé tette a pixel méretének további csökkentését és a FF növelését



Képérzékelők összehasonlítása

■ CCD

- Speciális gyártást igények, nehezen integrálható össze a feldolgozó elektronikával
- Nagy kvantumhatásfok, fill factor és kis zaj
- A kiolvasás nem véletlen elérésű és lassú
- Több, viszonylag nagy feszültségre van szükség.

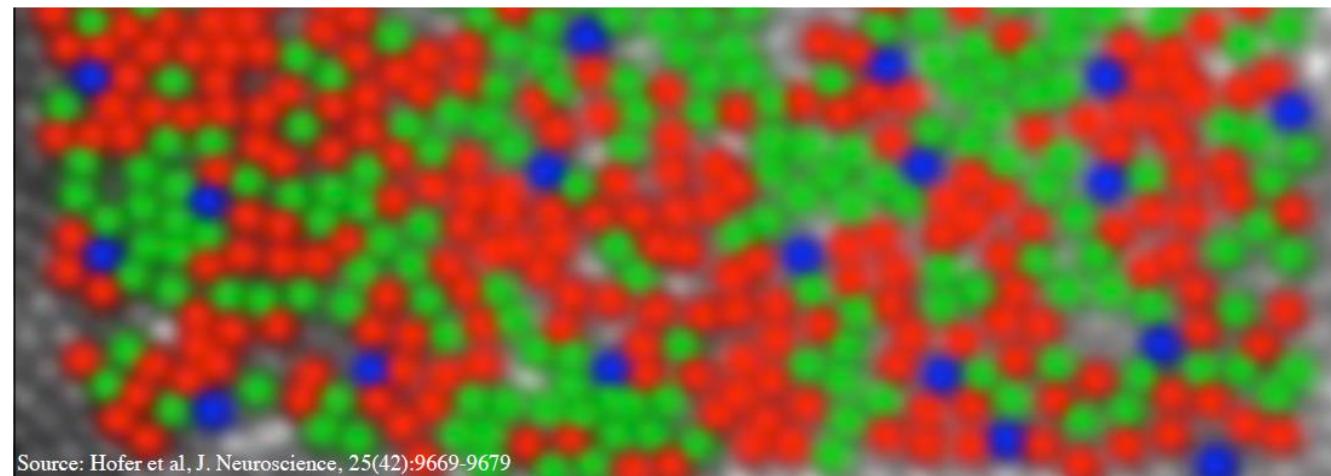
■ CMOS

- Alacsonyfeszültségű és kisteljesítményű (hordozható eszközökben ez nagyon fontos szempont!)
- A kiolvasás gyors, az elérés véletlen
 - Azaz az egyes pixelek címezhetőek
- CMOS kompatibilis, azaz egybeintegrálható a feldolgozó elektronikával
 - (bemenet: fény kimenet: JPEG formátumú kép...)



Színérzékelés

- Alapvetően intenzitást érzékel a félvezető
 - Azaz „fekete-fehér” képet!
- Szokásosan színszűrőkkel oldják meg a színekre bontást
 - Professzionális eszközökben színbontás és 3 vagy több érzékelő
 - Általános fogyasztási célú eszközökben színmaszkot használnak az érzékelő terület felett.
 - Az emberi szem is hasonlóan lát!

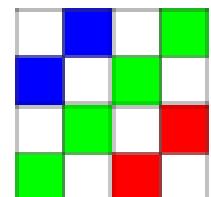
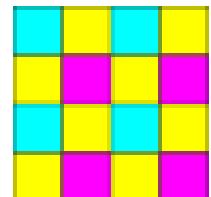
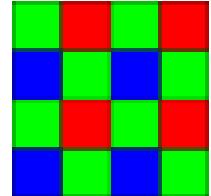


Source: Hofer et al, J. Neuroscience, 25(42):9669-9679



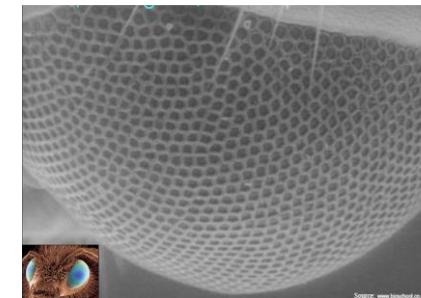
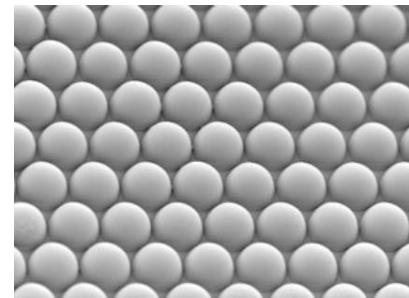
Színmaszkok

- Különböző elrendezések léteznek.
- RGB szűrő
 - Bayer szűrő 2x2
 - A zöld színre a legérzékenyebb az emberi szem.
 - Egy pixel intenzitása a beeső fény és a szűrőkarakterisztikától függ.
 - A „hiányzó” adott színű pixeleket interpolációval állítják elő.
- CMY szűrő
 - A komplementer szín intenzitását méri.
 - Elméletileg jobb jel/zaj arány érhető el
- RGBW szűrő
 - A szem felbontóképessége intenzitásra sokkal jobb, mint színekre
 - 4x4-es szűrő
 - A szűrő a képpontok felén átereszt, ezek a pontok fényintenzitást mérnek

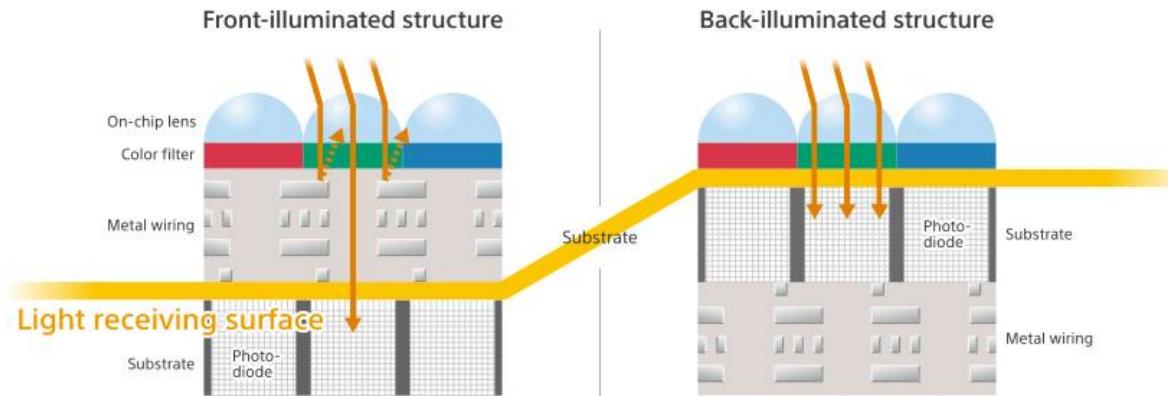


Az érzékenység javítása

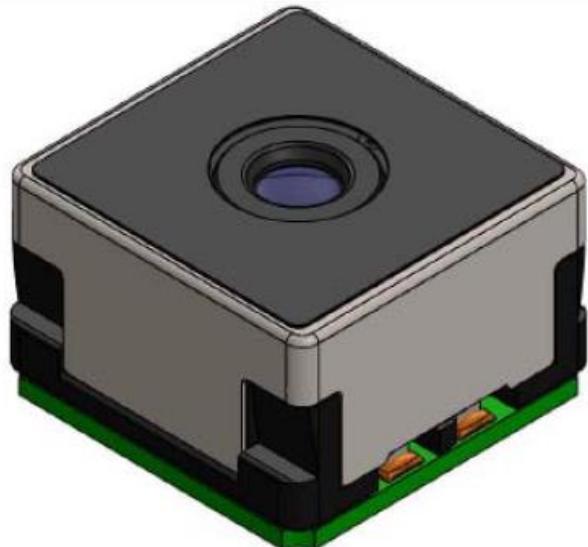
- Mikrolencsék: ötlet: a rovarok összetett szeme
- A fotoérzékelő felett egy mikrolencse megnöveli a hatásfokot.



- Hátsó megvilágítás (back illumination)



Példa: VB6955CM / ST Microelectronics



Feature	Detail
Pixel resolution	2600x 1952 with border pixels
Sensor technology	ST IMX140 FSI Gen2 based CMOS imaging process
Pixel size	1.4 µm x 1.4 µm
Analog gain	+ 24 dB
Digital gain	+ 6 dB
Dynamic range	60 dB
Signal to noise	36 dB (@ 100 lux)
Supply voltages	Analog: 2.6 to 2.9V Digital: 1.7 to 1.9 V VBAT: 2.5 to 4.8V
Typical power consumption 30 fps	130 mA (typical)

- Integrált autofókusz
- CSI-2 interfész(2×840Mbit/s) – képadatok soros továbbítására
- CCI (I²C) parancsinterfész



Források, ajánlott irodalom, érdekességek

- [BMP 280 szenzor adatlapja](#)
- [SensEDU – az Elektronikai Technológia Tanszék oktatóanyaga szenzorok témakörben](#)
- [DS18B20 adatlap](#)
- [VB6955CM adatlap](#)
- [Sony Semiconductor Solutions](#) érdemes átnézni a technológiáról szóló részt.





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

IT eszközök technológiája

9. előadás

Fényemittáló diódák

Kijelzők

Érintőképernyők



- Fényemittáló diódák
 - LED félvezető anyagok
 - Lézerdióda
 - Elektromos karakterisztika
 - Tokozás
 - Meghajtás
- Kijelzők
 - Passzív és aktív folyadékkristályos kijelző.
 - AMOLED
- Érintőképernyők technológiája



Fényemittáló dióda

■ Light Emitting Diode, LED

- (Félvezető) pn átmenet, amely nyitóirányú áram hatására fényt bocsát ki.
- Elektromos szempontból pontosan olyan, mint egy félvezető dióda.
 - Egyenirányító jellegű karakterisztika

■ Felhasználása

- Szilárdtest-fényforrás
 - Visszajelző fénytől a stadionvilágításig
- Kommunikáció
 - IR kommunikáció
 - Optikai szál
- Lézer
 - távolság/sebesség mérés
 - Optikai tárolók
 - Lézernyomtatás
 - HAMR



LED-ek fejlődése

■ Régi találmány

- 1907 H.J. Round, UK észlelte a jelenséget szilícium-karbid detektoron
- 1927 Oleg Loszev, az első publikáció
- 1955 Rubin Braunstein, RCA: az első IR LED és az első kommunikációs alkalmazás
- 1962 Nick Holonyak, GE az első vörös LED
- 1972 Herbert Paul Maruska, RCA: az első kék LED
- 1994 Az első nagyfényerejű kék LED, Shuji Nakamure, Nichia Corporation

■ A fejlődés folyamatos

- A fényáram 10 évente 20-szorosára, az egységnyi fényáramra jutó költség 10 év alatt a tizedére csökken.
 - **Fényáram:** [lm] Lumen
 - Az emberi szem által érzékelt fény teljesítménye (a spektrum súlyozva az emberi szem hullámhossz szerinti érzékenységével) (kisebb mint a kisugárzott energia)
 - **A fényhasznosítás** (luminous efficacy) a lm/W, azaz egységnyi elektromos teljesítményre jutó fényáram.
 - **Megvilágítás:** [lx] Lux: felületegységre jutó fényáram, lm/m²



Fényhasznosítás

2018-as cikk, 2016-17-es adatokkal!

E27, E14 stb..



CFL = compact fluorescent lamp -kompakt fénycső

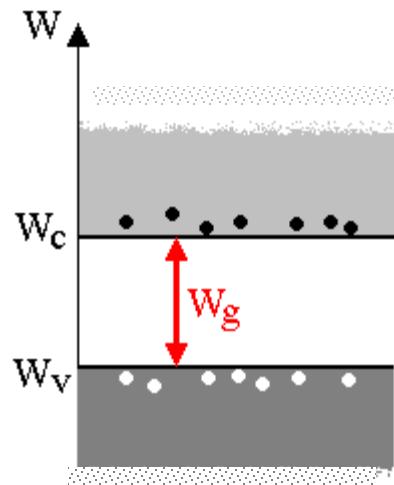
HID = high intensity discharge – gázkisüléses lámpa

2016 Top Performing LED Products*	Luminous Efficacy (lm/W)	Usable Life (L70)† (hours)
LED A19 Lamp (Dimmable, 2700 K)	100	25,000
LED PAR38 Lamp (3000 K)	88	25,000
LED T8 Tube (4000 K)	149	50,000
LED 6" Downlight (3000 K)	86	50,000
LED Troffer 2' x 4' (3500 K)	129	50,000
LED High/Low-Bay Fixture (4000 K)	136	60,000
LED Street Light (5000 K)	118	60,000
Conventional Lighting Products	Luminous Efficacy (lm/W)	Usable Life (hours)
Incandescent A19	15	1,000
Halogen A19	20	8,400
CFL A19 Replacement	70	12,000
CFL (Dimmable) A19 Replacement	70	12,000
Linear Fluorescent System⁺	108	25,000
HID (High-Watt) System⁺	115	15,000
HID (Low-Watt) System⁺	104	15,000

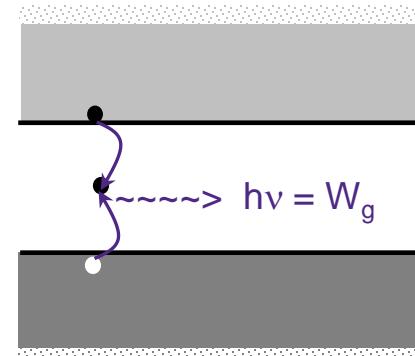
Forrás: <https://doi.org/10.1016/j.crhy.2017.10.013>



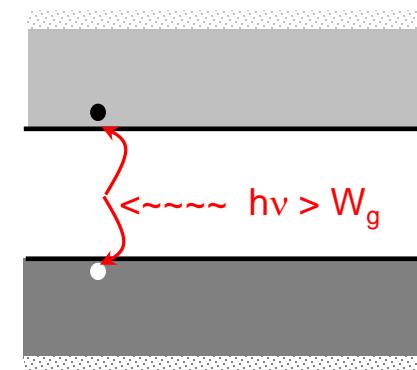
Félvezetők sávmodellje (ismétlés...)



Direkt **rekombináció**
fényemisszióval jár(hat),



Fényelnyelés generációt
okozhat



- Bizonyos típusú félvezető anyagokban a rekombináció
 - Azaz egy elektron visszatérése a vezetési sávból a vegyértéksávba
- Foton kibocsátásával járhat
 - (Az elektronnak el kell veszíteni az energiáját. Ez vagy fotonnak (direkt) vagy a kristályrácsnak (indirekt) adódik át.)
- A kibocsátott foton hullámhossza a tiltott sáv szélességétől függ.



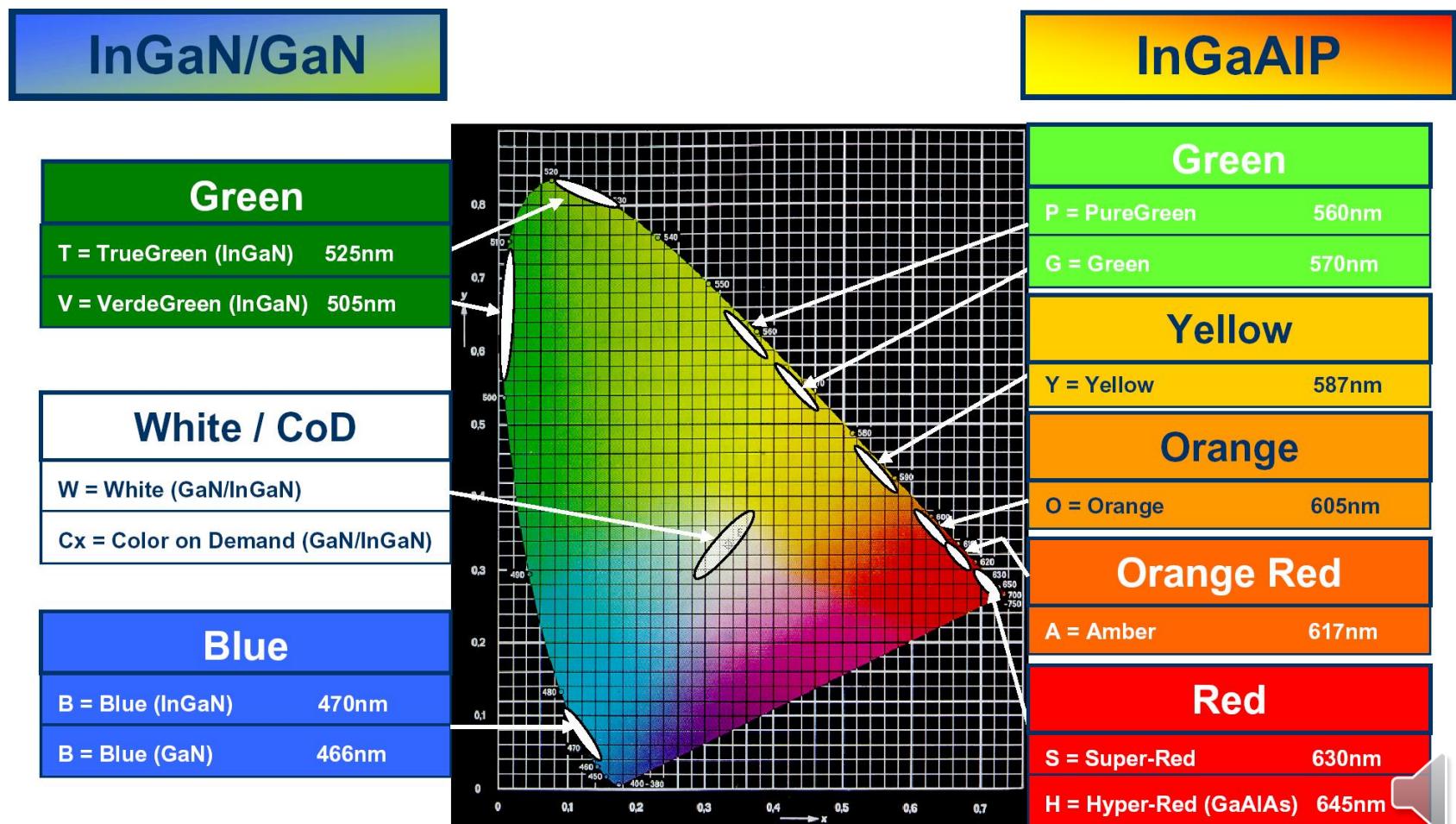
- A szilíciumban indirekt rekombináció zajlik
- Direkt (sugárzásos) rekombináció van az ún. vegyületfélvezetőkben
 - A periódusos rendszer III. és V. oszlopában lévő elemek vegyületei
 - Al, Ga, In
 - N, P, As
- A tiltott sáv szélessége az összetételtől függ
- $\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{W_g}$
- Szélesebb tiltott sáv -> kisebb hullámhossz
- Keskenyebb tiltott sáv -> nagyobb hullámhossz

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



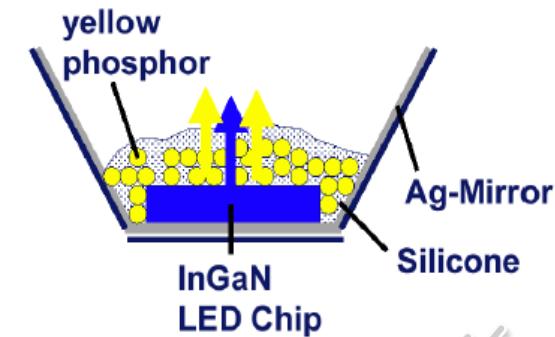
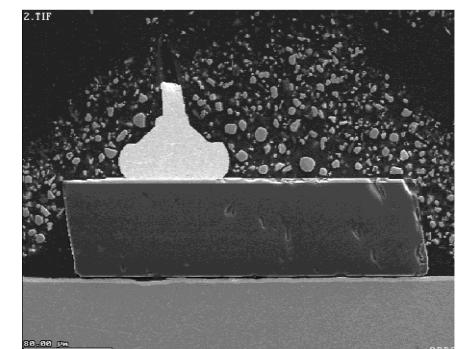
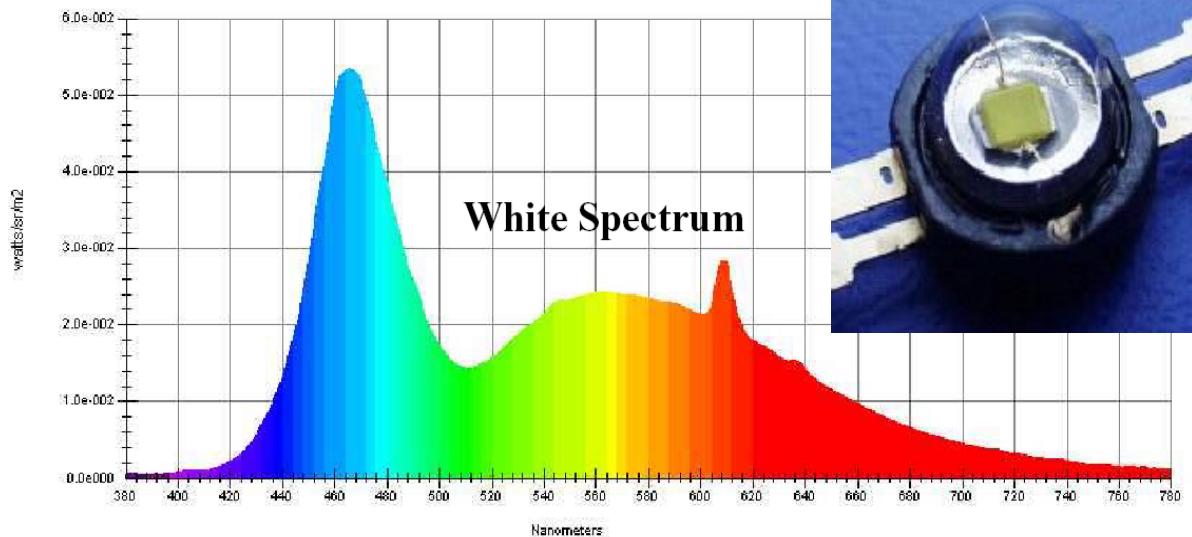
- Két anyagrendszeret használnak. Az elérhető színek

- InGaAlP rendszer: (infra vörös) – vörös – sárgászöld
- InGaN/GaN rendszer: (ultraibolya) – kék - kékeszöld



Fehér fény előállítása

- RGB LED
 - A három alapszínt tartalmazza
 - A színek aránya könnyen beállítható.
 - Azaz a R, G, B intenzitása külön szabályozható
- Kék LED + sárga fénypor
- UV LED + vörös, zöld és kék fénypor



Fényporok

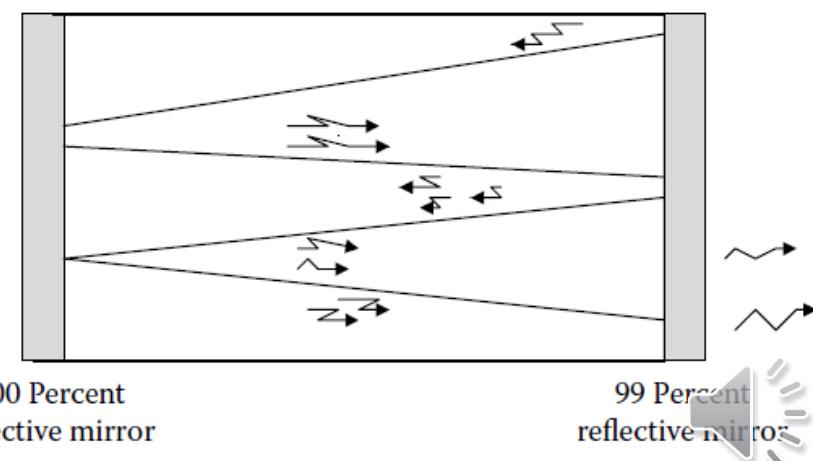
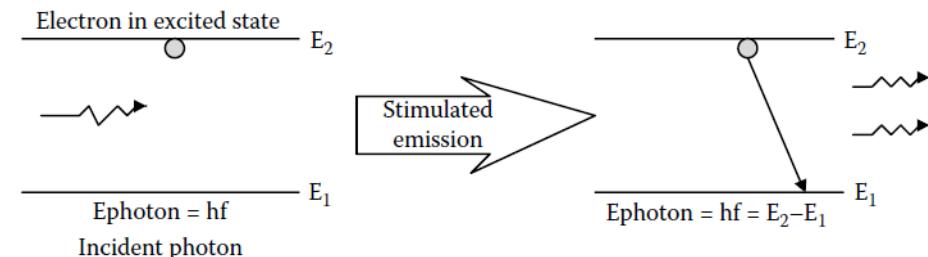
- Más néven „foszfor”
 - (foszforeszkál szóból ered, nem a foszforra (mint kémiai elem) utal)
- Sugárzás (foton, vagy elektron) hatására látható fényt kelt.
 - Elnyeli a nagyobb energiájú (kisebb hullámhosszú) fotont és kisebb energián (nagyobb hullámhosszon) sugározza ki.
 - Az energiakonverziós hatásfok tehát kisebb, mint 1
 - A gerjesztő sugárzás megszűnése után még sugároz
 - Ez az ún. utánvilágítási idő, néhány ms (CRT) – több másodperc (radar)
 - Fénycsövekben (az UV fény átalakítására)
 - Katódsugárcsövekben (elektronsugár kelt fényt)
 - Fehér LED-ekben
 - Utánvilágító táblák (több órán is) – biztonságtechnika, munkavédelem



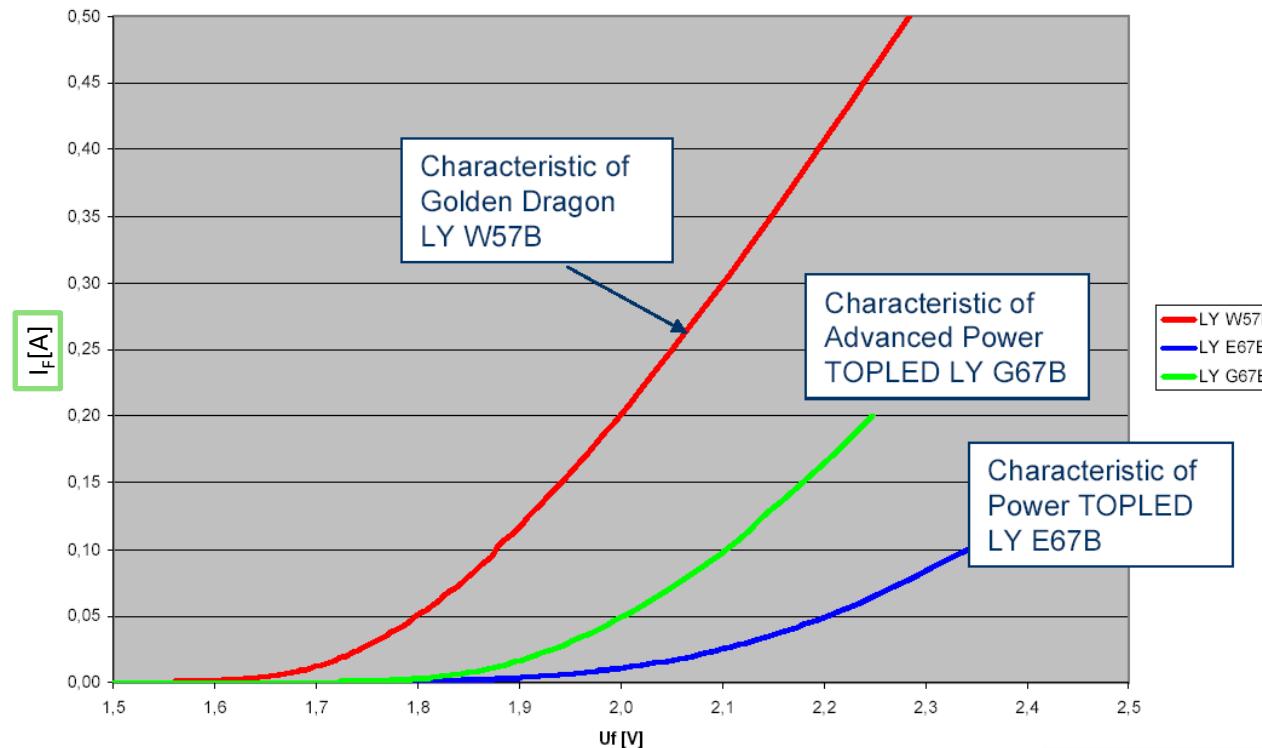
Lézerdióda

■ LASER

- Light amplification by stimulated emission of radiation
- Egy speciális kvantumjelenség, az ún. indukált emisszió
 - Egy beeső foton hatására egy gerjesztett elektron visszatér a vegyértéksávba
 - Az energiáját egy fotonnak adja át, ami pontosan fázisban van a beeső fotonnal
- A lézerműködés feltétele
 - Nagy gerjesztett elektronsűrűség (egy diódán, ez az ún. küszöbáram. Ez alatt a lézerdióda LED-ként viselkedik)
 - Nagy fotonsűrűség
 - Optikai rezonártort alakítanak ki



Elektromos karakterisztika



■ Elektromos szempontból egy dióda

- Kisebb hullámhossz: ugyanakkora áramhoz nagyobb feszültség tartozik.
- **Nyitó áram:**
 - kisteljesítményű, hagyományos LED-ek: ~20 mA
 - nagyteljesítményű LED-ek: 300 mA ... 800 mA ... 1500 mA



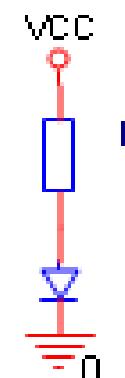
LED-ek meghajtása

- A karakterisztika meredek, kis feszültségváltozáshoz nagy áramváltozás tartozik, ezért árammal történik a meghajtás
 - Feszültséggenerátor és előtét ellenállás
 - Az előtét ellenálláson teljesítmény esik, ami rontja a hatásfokot, mivel hővé alakul.
 - A feszültség megváltozása nagy áramváltozással jár, ami a kibocsátott fény intenzitásában is látható lesz.
- Áramgenerátoros meghajtás
 - A LED áramára szabályozunk, a feszültsége pedig a karakterisztika alapján „kialakul”
 - Sokkal jobb megoldás, mert nem veszítünk teljesítményt.
 - DC/DC konverter IC áramgenerátor üzemmódban.
 - A DC/DC hatásfoka 90% feletti

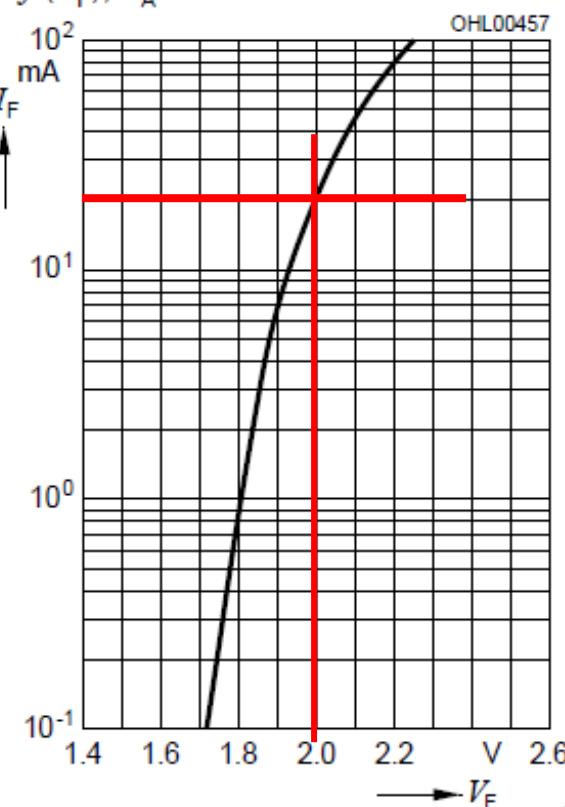


Példa: előtét ellenállás méretezése

- 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 ponthoz $U_L=2\text{V}$ feszültség tartozik a karakterisztika alapján.
- A szükséges ellenállás tehát:
 - $R = \frac{V_{CC}-U_L}{I_L} = \frac{3,3-2}{20} = 65\Omega$
- Látható, hogy az előtét ellenálláson hővé alakuló energia a teljes rendszer hatásfokát rontja.
 - Éppen ezért nagyáramú, világítástechnikai célokra szánt LED-ek esetén nem előtéttellenállást, hanem LED meghajtó áramköröket alkalmaznak.

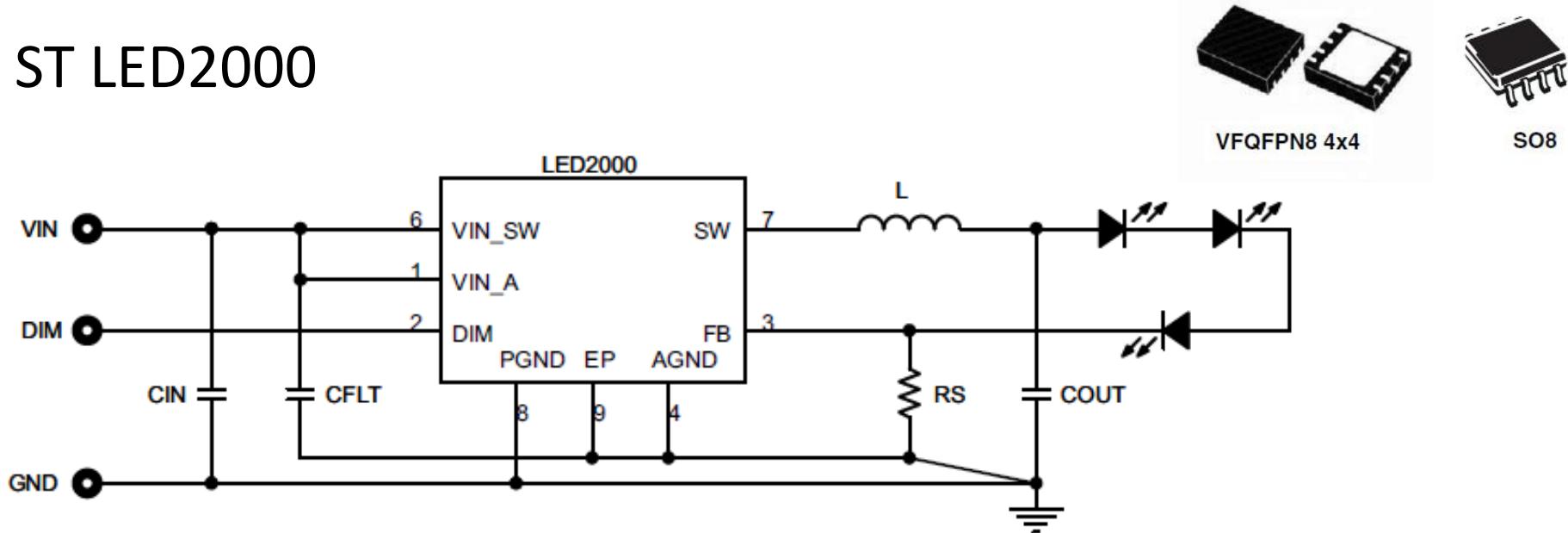


Durchlassstrom²⁾ Seite 15
 Forward Current²⁾ page 15
 $I_F = f(V_F); T_A = 25^\circ\text{C}$



Példa: LED meghajtó

ST LED2000

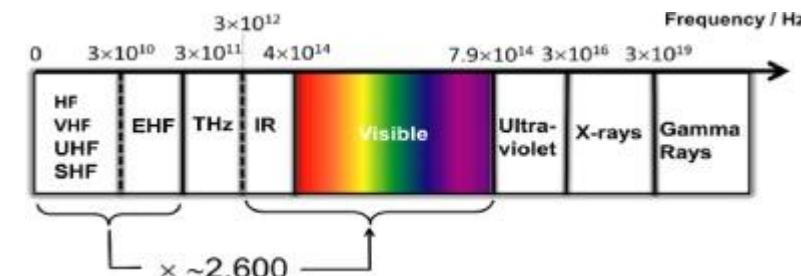


■ Halogénizzó helyettesítésére

- 3-18V bemenő feszültség, max. 3A kimeneti áram
- 850kHz-es kapcsolóüzemű működés.
- PWM dimmelhető
- 4mm×4mm a tokozás
- 3 kapacitás, egy energiatároló tekercs és egy ellenállás a külső alkatrész szükséglet. (a nagy frekvencia miatt kisebb méretű alkatrészek elegendőek.)

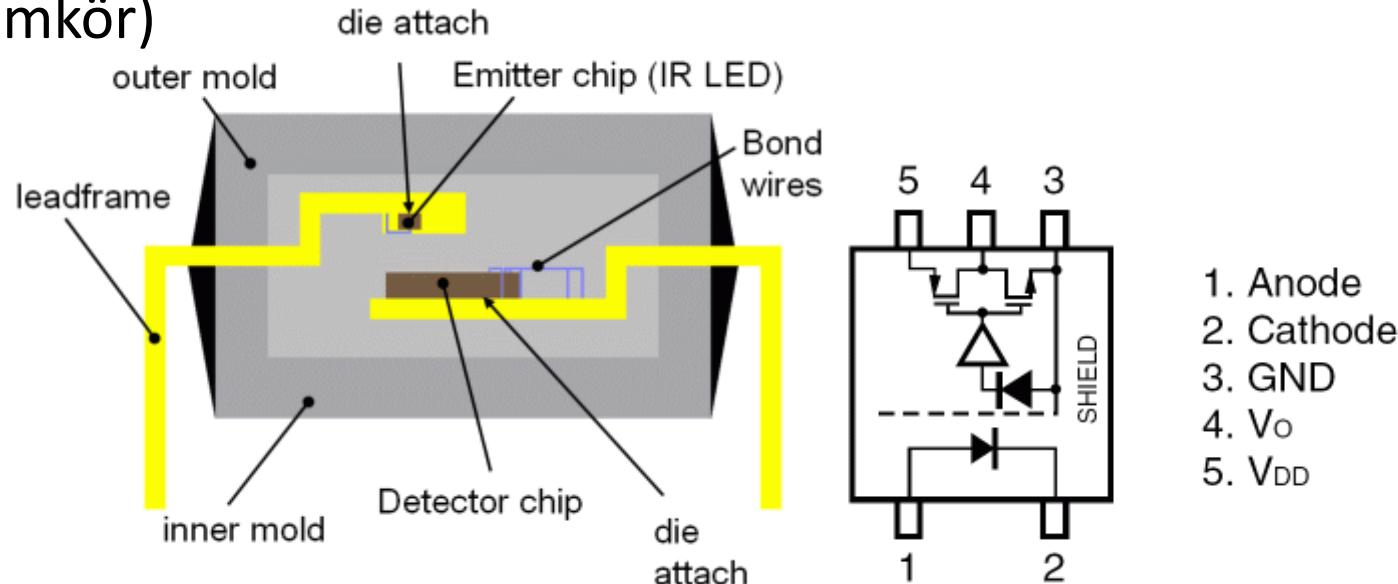
Kommunikáció

- Vezeték nélküli kommunikáció (IR)
 - Egyszerű felépítés, „veszélytelen” hullámhossz.
 - Többé kevésbé optikai rálátás szükséges.
- Üvegszálas kommunikáció
 - LED helyett általában lézerdióda az adó
 - Akár Tbites sávszélesség, sok ezer km hosszan is.
 - Elektromos zajtól, zavartól védett
- LiFi: a látható fény modulációja
 - A spektrum 780THz.
- Optikai adattárolás
 - A megvilágítás kisenergiájú lézerrel történik.
 - Írható tárolók esetén az íráshoz nagyenergiájú lézerfényt használnak



Optocsatolás

- Galvanikusan szeparált adatátviteli út kialakításához használt.
 - Galvanikusan szeparált: nincs elektromos összeköttetés a két rendszer között.
 - Átütési szilárdság tipikusan több kV.
 - Ez sok előnyvel és nagy biztonsággal jár.
- Bemenet: pl. GaAs LED
- Kimenet: szilícium fotodióda + kimeneti interfész (pl. CMOS logikai áramkör)





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Folyadékkristályos (LCD) kijelzők



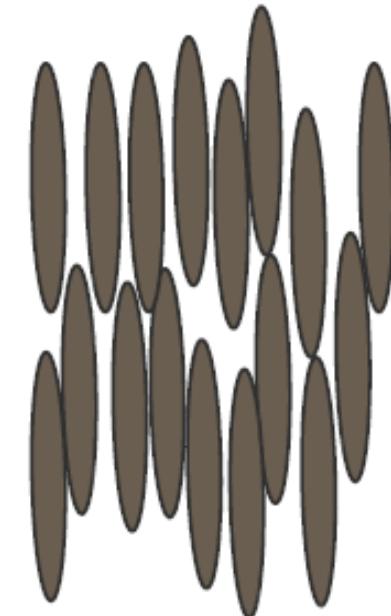
Folyadékkristály

- Friedrich Reinitzer osztrák botanikus, 1888 koleszteril-benzoát kísérlete
 - A kristály 145°C-on megolvadt, zavaros folyadékká alakult, majd 179°C-on tiszta folyadékká alakult át.
 - Tehát van egy olvadáspont és egy ún. tisztulási pont.
 - Az alkalmazásra 1968-ig várni kellett.
- Speciális, szerves anyagok
 - Átmeneti állapot a szilárd test és a folyadék halmazállapot között
 - Mechanikai tulajdonságaik a folyadékokra emlékeztetnek
 - Optikai, dielektromos és egyéb tulajdonságaik viszont kristályokra jellemző anizotrópiát mutatnak.
 - Átlátszóak, de képesek a beeső fény polarizációját elforgatni.
 - A folyadékkristályos állapot viszonylag széles hőmérséklettartományban fennáll
 - A folyadékkristály molekulái úgy rendeződnek, hogy egy irányba álljanak, de külső hatással könnyen megváltoztatható.



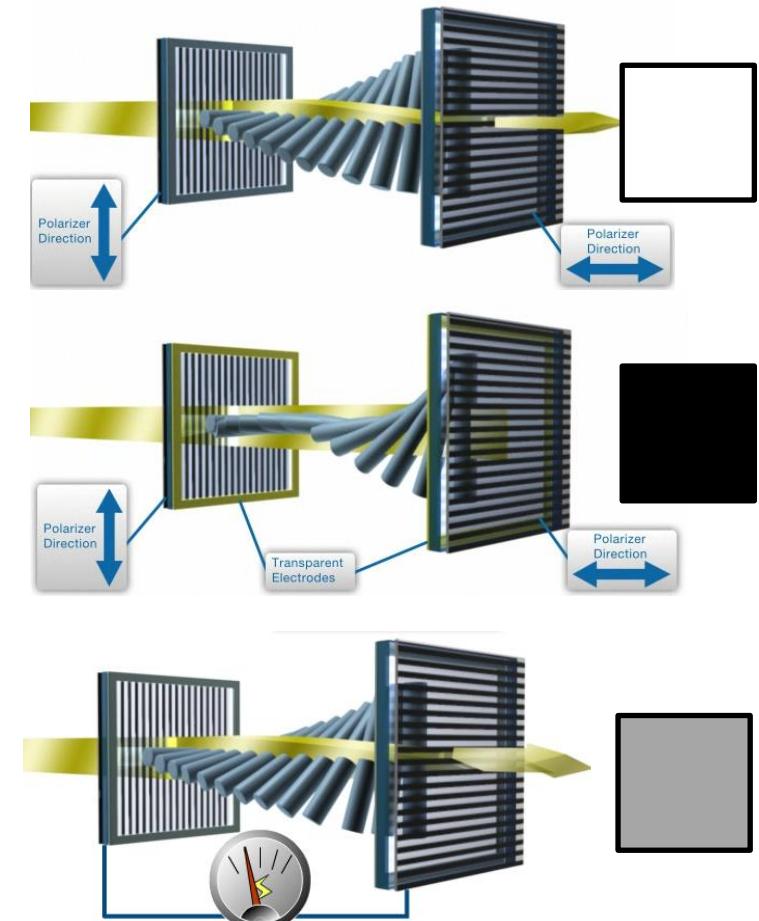
Folyadékkristályok

- Elég sok típusuk van.
- Kijelzésre az ún. nematikus folyadékkristályokat használják.
- Hosszú, pálcikaszerű molekulák, amelyek külső hatás hiányában párhuzamosan rendeződnek.
 - (kristályra jellemző)
- A tömegközéppontok azonban nem szabályosak
 - (folyadékra jellemző)

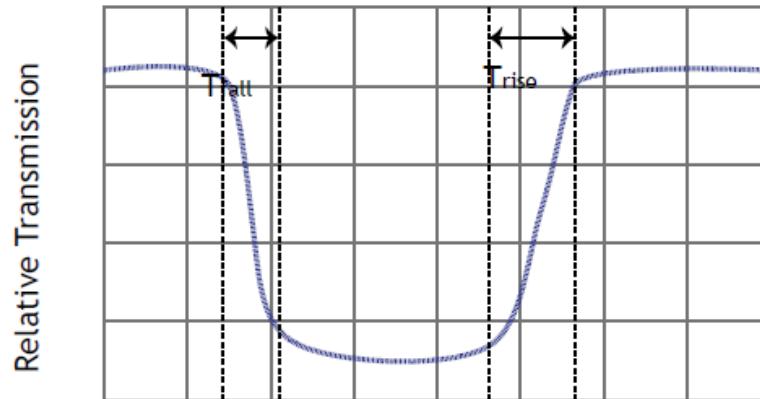
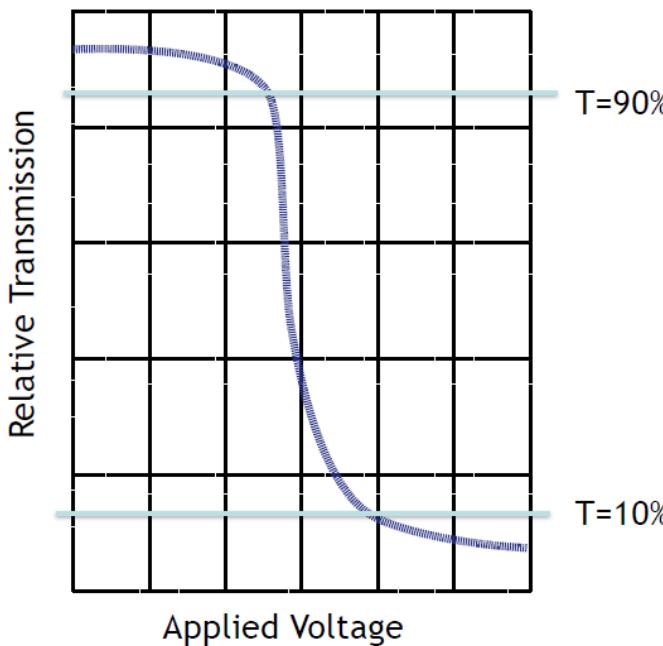


A működés elve

- A folyadékkristályt két üveglap közé helyezik.
 - Az üveglap belső oldalán szabályos kisméretű orientáló réteget helyeznek el.
 - „direktor” réteg
 - A legegyszerűbb esetben a folyadékkristály molekulák 90° -ban fordulnak el.
 - Azaz a beeső fény polarizációját szintén 90° -ban fordítják el.
 - A minden üveglapon kívülről polarizáló réteget helyeznek el, szintén egymásra merőleges irányban.
 - Így a fény keresztüljut a cellán.
- Ha térerősséggel megváltoztatjuk a folyadékkristály orientációját
 - A fény nem jut keresztül a cellán, elsötétedik.
 - Megfelelő vezérléssel szabályozható a fény intenzitása



Térerősség hatására bekövetkező átlátszóságváltozás



- A folyadékkristályos cella kb. $5-10\mu\text{m}$
- Az optikai hatás eléréséhez kb. 3V szükséges
 - Az elsötétítés gyorsabb, hiszen a molekulák a térerő irányába próbálnak fordulni.
 - A vezérlés megszüntetésekor idő szükséges (ms nagyságrendű), hogy spontán visszarendeződjön az eredeti csavart állapotba.



Megvilágítás

- Reflektív
 - Nincs külön megvilágítás, a beeső fény kelti a hatást, amely a hátoldali tükről verődik vissza

- Transzmisszív
 - Van háttérmegvilágítás, általában LED vagy hidegkatódos fénycső (CCFL)

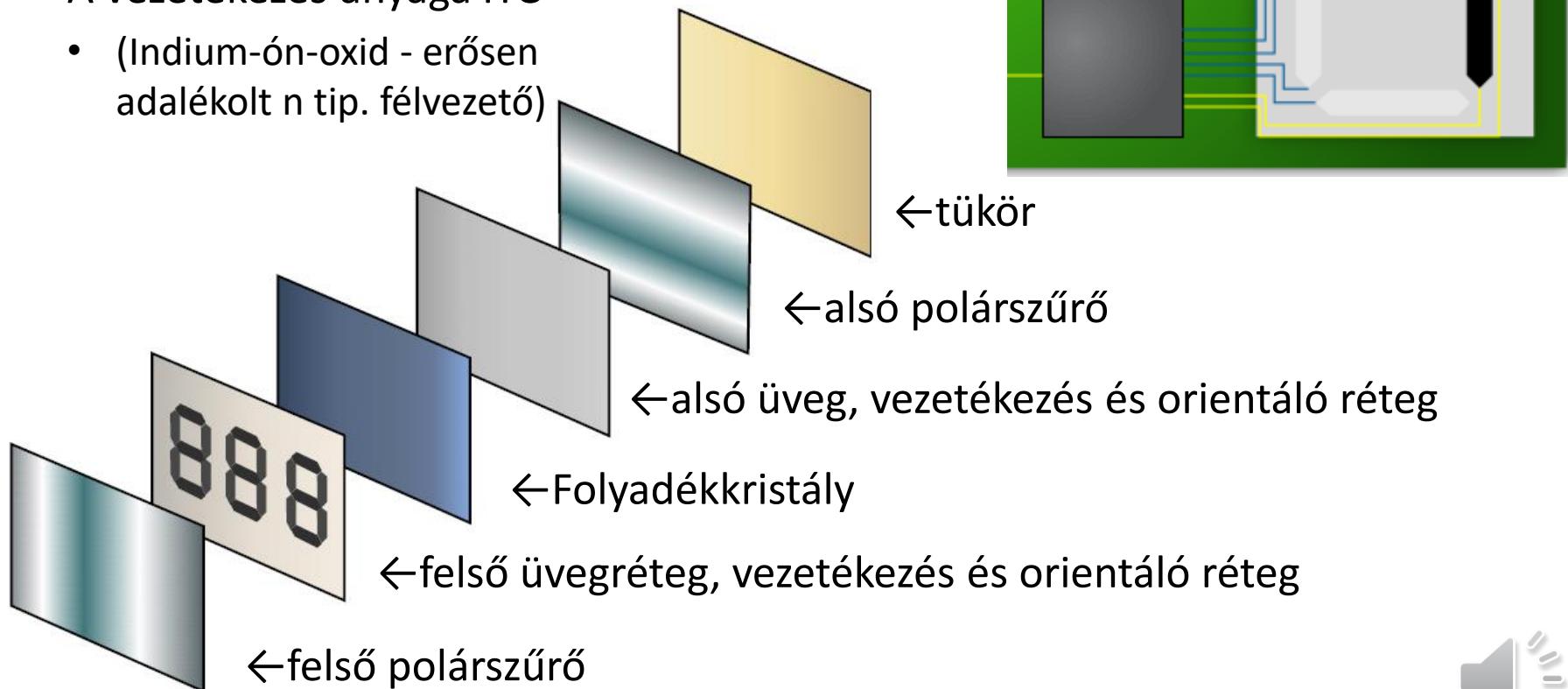
- Transzreflektív
 - Erős fényben, pl. napsugárzás esetén reflexióval, egyébként pedig saját háttérmegvilágítással működik.



Direkt címzésű kijelző

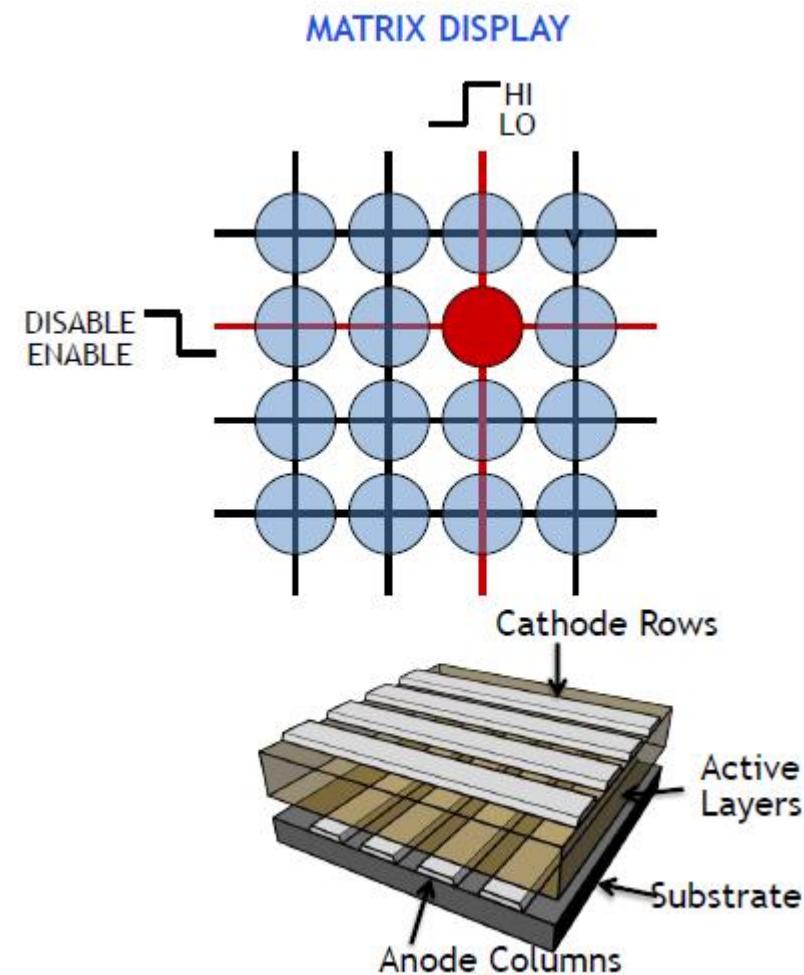
- A legegyszerűbb kijelzők

- Órák, számológépek stb.
- Az egyes pixelek egyesével címezhetők.
- A vezetékezés anyaga ITO
 - (Indium-ón-oxid - erősen adalékoltnak tip. félvezető)

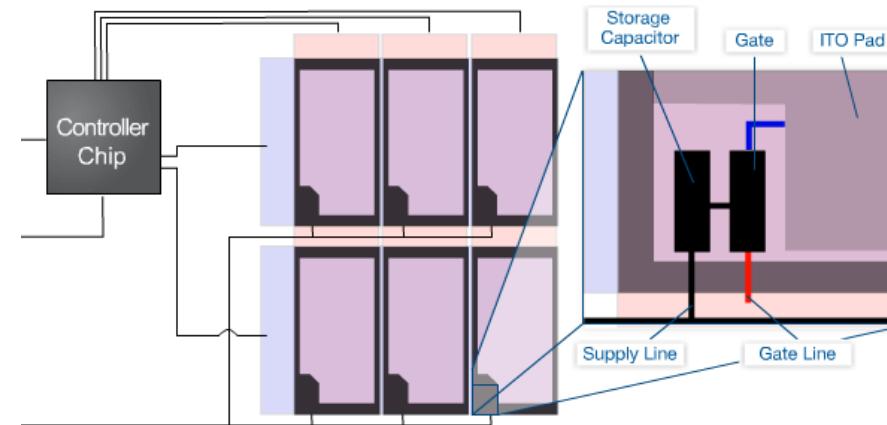


Passzív mátrix

- A felső elektródán függőlegesen, az alsó elektródán pedig vízszintesen fut a fémezés.
- A kereszteződés lesz a pixel
- A vezérlés nem egyszerű
 - Nem közvetlenül egyenfeszültséget kapcsolnak rá, hanem négyzetjeleket.
 - A kijelzés soronként történik, pástázással
 - A nem aktivált sorban is zavart kelt
 - A kontrasztarány romlik a sorok számának növekedésével.
 - STN – szuper csavart nematikus folyadékkristály. Nem 90° , hanem 270° -ban csavarodik, így a kontraszt jobb lesz.
 - DSTN – két réteg, amely ellenkező irányban csavarodik.



Aktív mátrix (TFT) kijelzők

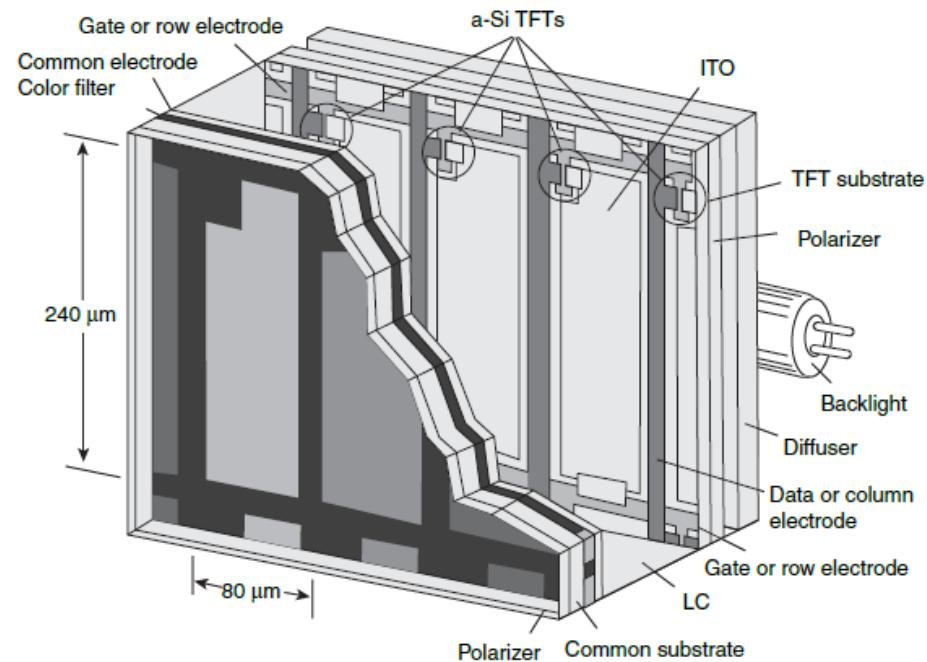
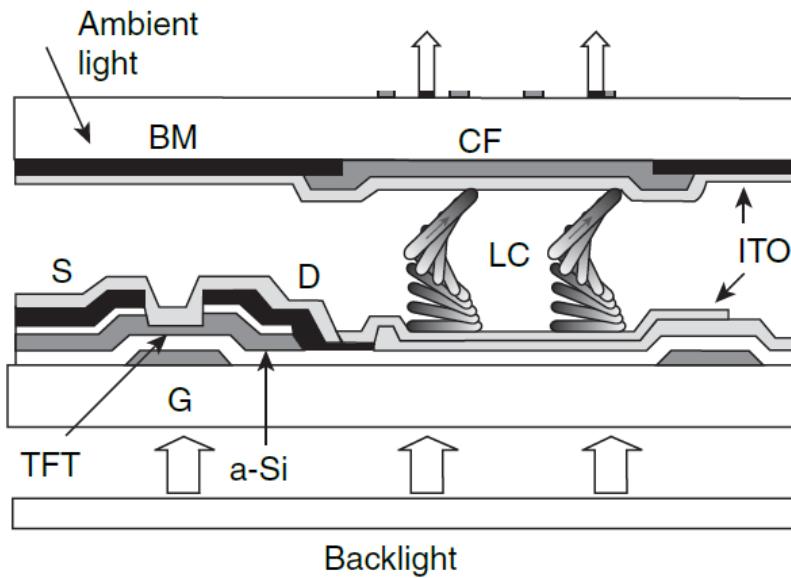


- Tranzisztort használnak minden egyes pixel (színenként) ki/be kapcsolásához.
 - A tranzisztorokat az üvegre integrálják.
 - A képpontok egyesével címezhetők
 - Pl. egy 1920×1080 kijelző esetén több, mint 6 millió képpont van.
 - Pl. 6 hibás képpont 1 ppm hibaarányt jelent...

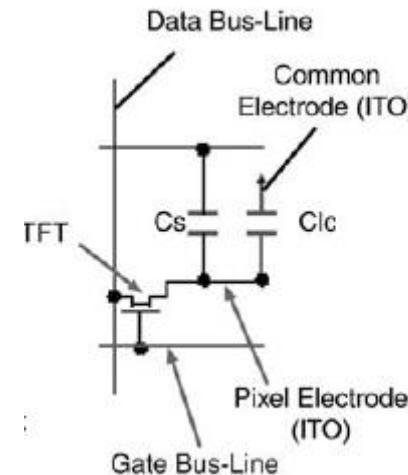


TFT

- TFT: thin film tranzistor, vékonyréteg tranzisztor
 - Amorf szilíciumból készül.
 - MOS tranzisztor, de sokkal rosszabb paraméterekkel.



- A TFT bekapcsolásához kb. 20V, kikapcsolásához kb. -5V szükséges.
 - Ebben az esetben a be és kikapcsolt tranzisztor áramának aránya kb. 10^6
 - A folyadékkristály károsodik, ha sokáig nagy egyirányú téterősségek teszik ki
 - Ezért képenként átkapcsolják a polaritást
- A cella hasonlít a DRAM-hoz

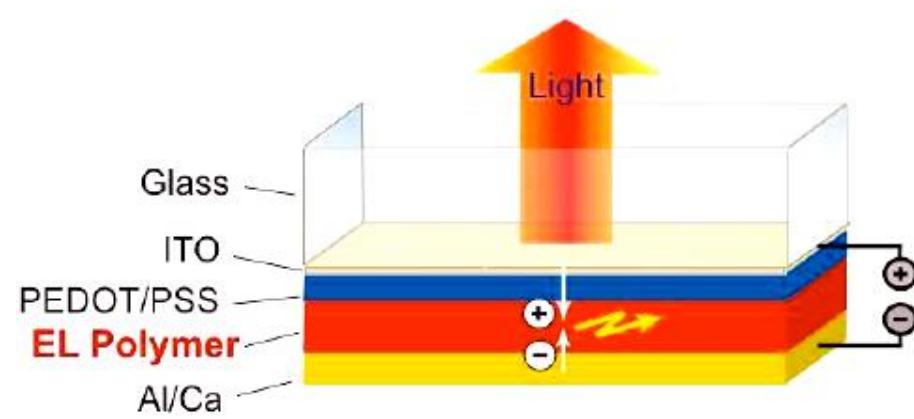


OLED – szerves világító dióda



OLED – organic LED

- Szerves vegyületek, amelyen, ha áram halad keresztül, fényt bocsátanak ki.
- (a középső polimer rétegen zajlik a rekombináció, fénykibocsátással)
- A fénykibocsátó anyag kémiai összetételétől függ a szín.



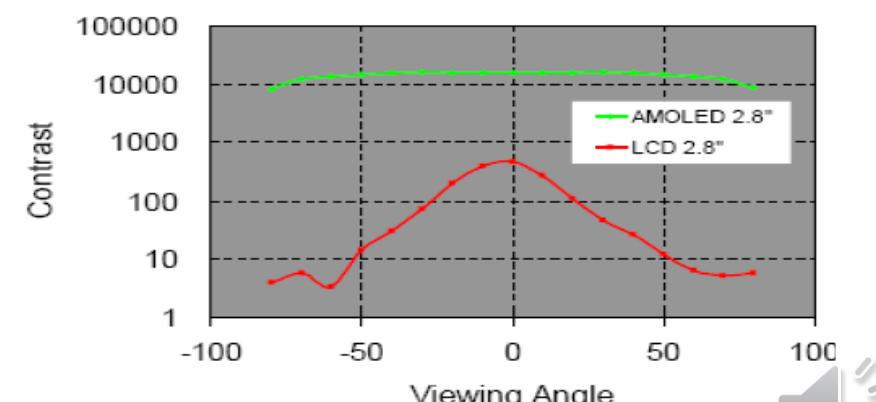
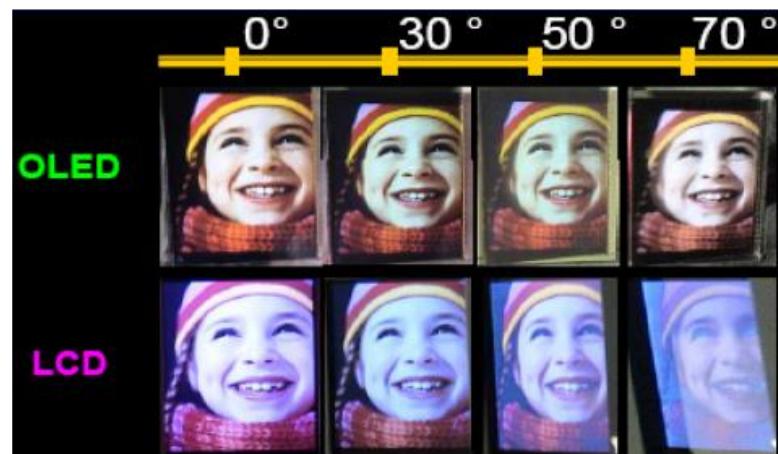
OLED

- Két irányba fejlődik
 - Kijelzők területe – az LCD kijelzők vetélytársa
 - Világítás
 - Itt vélhetően nagy jövő előtt áll
 - Nagy felszínű, extrém vékony, hajlékony, energiatakarékos világítás
 - Környezetbarát, hiszen nagyon minimális anyagot tartalmaz



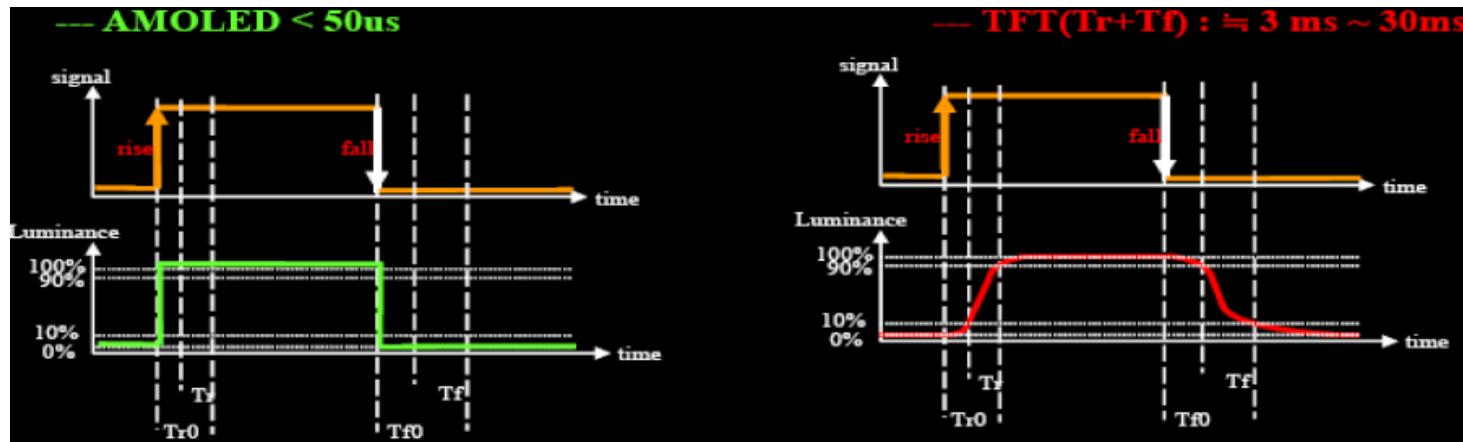
AMOLED – aktív mátrix OLED

- minden egyes pixel hasonlóan vezérelt, mint az aktív TFT esetén.
 - Nincs azonban háttérvilágítás! Itt maga a pixel világít, amit a tranzisztorral lehet ki és be kapcsolatba hozni.
 - Emiatt sokkal vékonyabb a kijelző és flexibilis.
- Előnyök
 - A TFT-hez képest a kontrasztarány jobb
 - Kevésbé változik a kontraszt a betekintési szögtől



■ Gyors

- ~10 μ s a válaszidő, a néhány ms-os az aktív LCD-vel szemben.
- (a fényforrást AMOLED esetén a TFT tranzisztor kikapcsolja.)



- Az elektromos fogyasztás függ a képtartalomtól
 - (LCD esetén a fogyasztás állandó – a háttérvilágítás fogyasztása)
- A panel élettartam ~100 000 óra, de kezdetben ~20 000 óra volt
 - Élettartam: az az idő, ami alatt a fényintenzitás a felére csökken





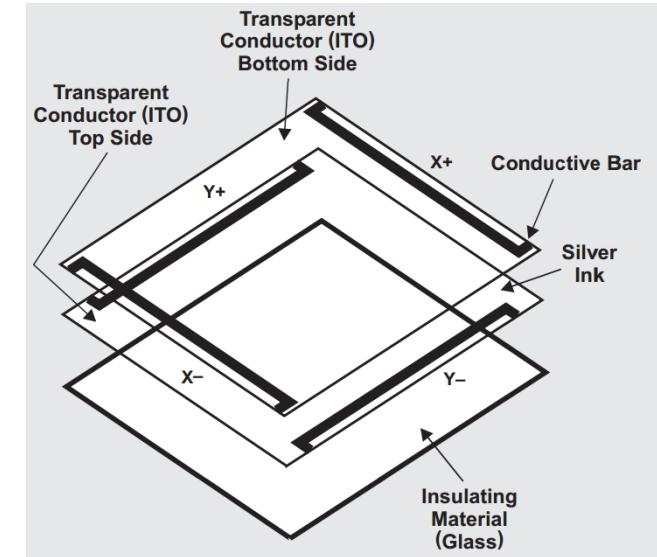
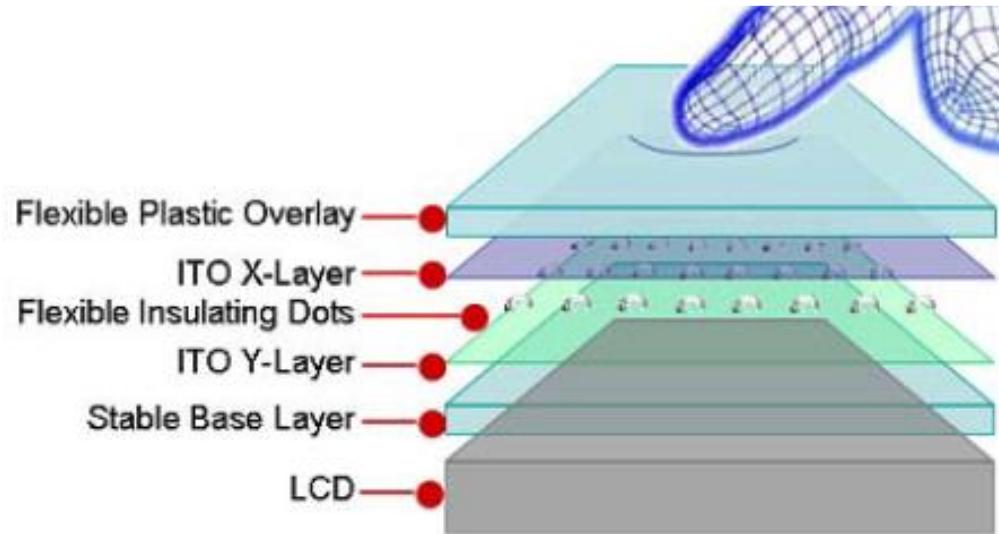
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Érintésérzékelés

Ellenállásváltozáson alapuló
Kapacitásváltozáson alapuló

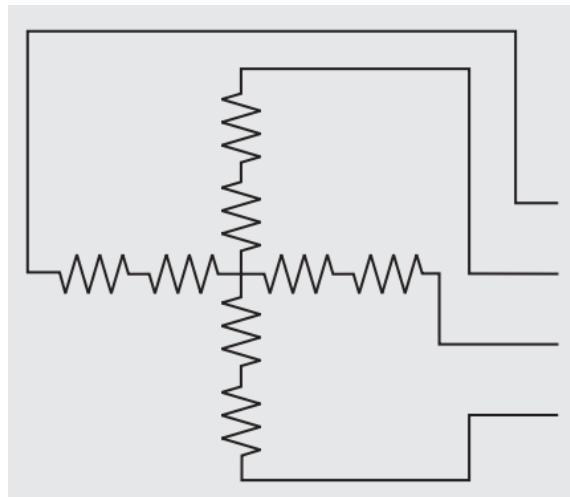


Rezisztív érintőképernyő

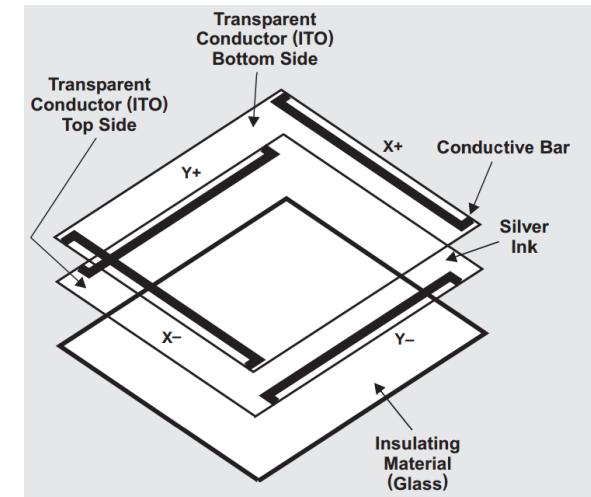


- ITO = indium-ón-oxid. Átlátszó vezető anyag.
 - Megnyomáskor a két vezető réteg összeér, az X és az Y között.
 - Két lépcsőben történik a kiolvasás, irányonként
 - (valójában egy ellenállásmérés történik...)





X+
Y+
X-
Y-



- Először az X rétegre feszültséget kapcsolva az Y vezetéken a X koordináta leolvasható (feszültségosztás)
- Utána ugyanezt megismételve az Y rétegre, most az Y koordináta határozható meg feszültségméréssel.
- Ezt gyorsan egymásután végezve a megnyomás (X,Y) koordinátája könnyen előállítható.



Rezisztív érintőképernyő

■ Előnyök

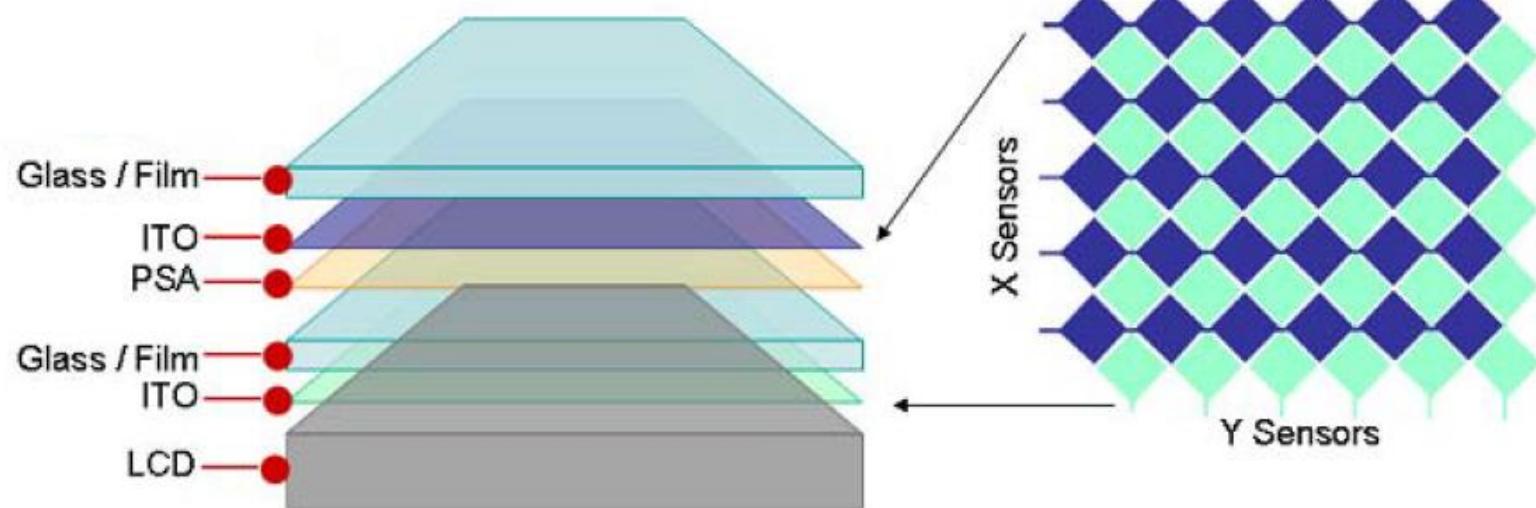
- Nagyon egyszerű felépítés.
- Kesztyűvel, más tárggyal nyomva is működik
- Szennyeződés nem befolyásolja a működést
- (ipari környezet, közforgalmú berendezések stb...)

■ Hátrányok

- Bár az ITO réteg vékony, az átlátszóság 75-80%.
- Ha az ITO réteg nem teljesen egyenletes vagy sérül, nem lesz lineáris a feszültségesés, így a kiolvasás hibás lehet.
- Nagypontosságú feszültségmérés szükséges, min. 10-12 bit
- Felépítésből adódóan nincs lehetőség többszörös érintésre (multitouch...)

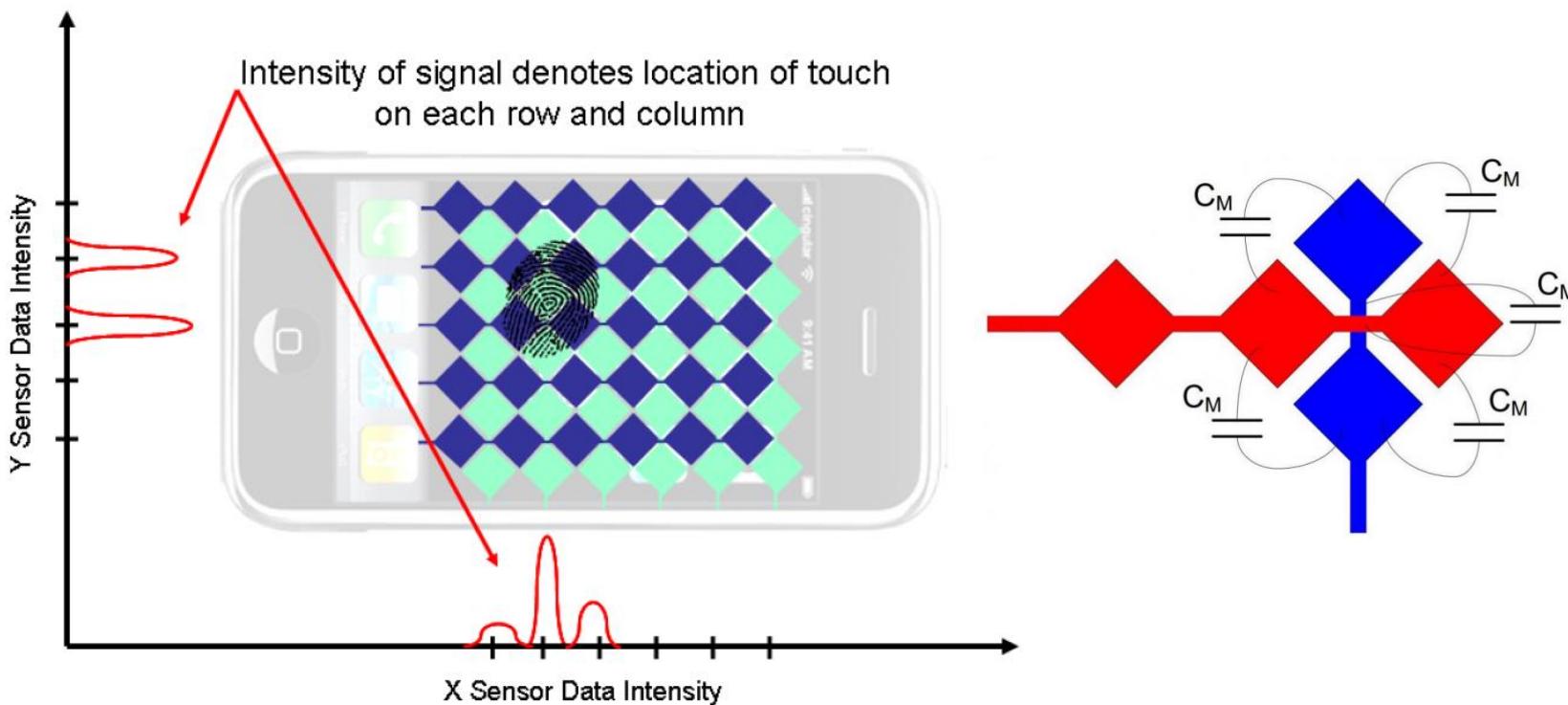


Kapacitív érintőképernyő



- (ún. projected capacitance)
- Az x és y vezetékek közötti kapacitás kb. 10-20pF.
 - Egy ilyen gyémánt alakzat tipikusan 4,5mm
 - Az emberi ujj érintésére a kapacitás kb. 0.5pF-ot megváltozik, mert az ujj jelenléte megváltoztatja az erővonalakat.
- A vezérlő folyamatosan letapogatja és méri az egyes pixelek kapacitását





- Vezérlő: általában valami komolyabb ARM mag.
 - fps – minimum 100 a teljes képernyőre, minél gyorsabb, annál jobb a UX
 - Multitouch – min. 10.
 - Gesztusok felismerése.



Kapacitív érintőképernyő

■ Előnyök

- Jó átlátszóság > 90%
- Többszörös érintés kezelhető (multitouch)
- Vékony kesztyű használható
 - (orvosi alkalmazások, gumikesztyűt pl. nagyon fontos, hogy lehessen használni.)

■ Hátrányok

- Víz, szennyeződés (víz relatív dielektromos állandója 80,4)



Források, ajánlott irodalom, érdekességek

- [LED lighting efficacy: Status and directions](#)
- [ST LED 2000 adatlap](#)
- [Rövid bevezetés a pCap érintőképernyő technológiába](#)





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

IT eszközök technológiája

10. előadás
AD/DA konverzió

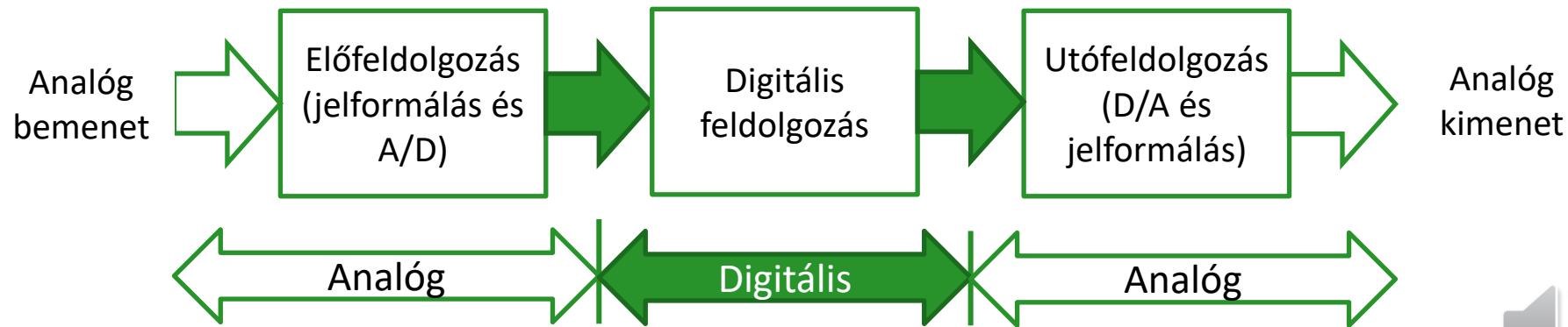


- Alapfogalmak
- A/D konverterek
 - Flash
 - szukcesszív approximációs,
 - szigma-delta
- D/A konverterek
 - Direkt
 - Létrahálózatos
 - Töltésmegosztáson alapuló
 - Kapcsolt áramok
 - PWM
- Az egyes architektúrák részletei (kapcsolási rajz, pontos működés stb. illusztráció, nem része a zárthelyi anyagnak!)



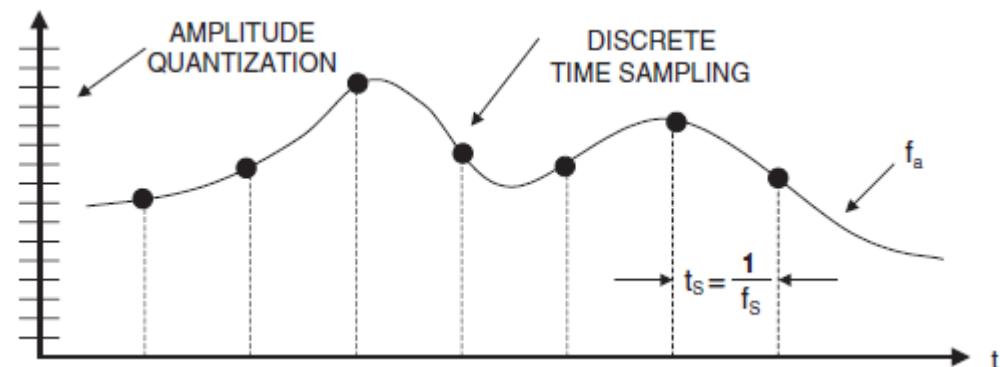
A/D és D/A átalakítók

- minden szenzor és aktuátor analóg, a jelfeldolgozás viszont digitális.
 - (a legtöbb esetben a digitális jelfeldolgozás egyszerűbb és minden tekintetben /energia, költség stb./ hatékonyabb, más esetekben csak digitális módon oldható meg.)
- Az analóg és a digitális „világ” közötti kapcsolattartáshoz A/D illetve 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, szabályozást készítünk stb.
 - Majd a kimeneten újra analóg jellé alakítjuk, ez a **D/A konverzió**.



Mintavételezés

EMLÉKEZTETŐ



- Egy folytonos jel diszkrét jelek sorozatává alakítható
 - ha $t_i = k T_s$ egyenlő időközönként mintát veszünk a bemenetről.
 - A kapott lépcsős függvény annál jobban közelíti az eredeti jelet, minél nagyobb az $f_s = 1/T_s$ mintavételi frekvencia.
- Nyquist – Shannon téTEL
 - Ha a bemeneti jel spektruma egy adott f_{MAX} frekvencia felett nem tartalmaz érdemleges összetevőket, akkor
 - $f_s \geq 2 f_{MAX}$ esetén a mintavételezett jelből az eredeti jel regenerálható.
 - (a gyakorlatban a maximális frekvencia kétszeresénél nagyobb mintavételezést használunk)

Az analóg jel

■ Limitált

- Maximális és minimális feszültség (a továbbiakban feszültségre szorítkozunk, de áramra is ugyanezek vonatkoznak)
- Sávkorlátos (azaz az időbeli meg változási sebessége korlátos)

■ Folytonos

- Elméletileg végtelen felbontású, de felbontás korlátja a
- Jel/Zaj viszony (Signal-to-noise ratio)

$$\bullet \quad SNR = \frac{P_{SIGNAL}}{P_{NOISE}} = V_{SIGNAL}^2 / V_{NOISE}^2$$

- Logaritmikus skálán, dB-ben szokás megadni.

$$\bullet \quad SNR(dB) = 10 \lg \frac{P_{SIGNAL}}{P_{NOISE}} = 20 \lg \frac{V_{SIGNAL}}{V_{NOISE}}$$

■ Ezzel szemben a digitális jel **kvantált**

- Példa: telefonbeszélgetés: 300-3400Hz.
- Mintavételezés: 8kHz, 8 bit (logaritmikus kvantálás)



Az A/D konverter

- Vegyes jelű eszköz
 - Bemenete analóg, kimenete digitális
- Tulajdonképpen egy mérést végez
 - A bemeneti feszültség hányad része a referencia feszültségnek?
$$\text{Output(bit)} = 2^N G V_{IN}/V_{REF}$$
 - N – az átalakító felbontása
 - G – az átalakító erősítése (általában 1)
 - V_{IN} – a bemeneti feszültség
 - V_{REF} – a referencia feszültség
- A digitális output lehet előjel nélküli, ebben az esetben az átalakító **unipoláris**.
 - $[0 \dots \frac{2^N-1}{2^N} V_{REF}]$
- Vagy előjeles, ebben az esetben az átalakító **bipoláris**.
 - $[-V_{REF} \dots \frac{2^{N-1}-1}{2^{N-1}} V_{REF}]$

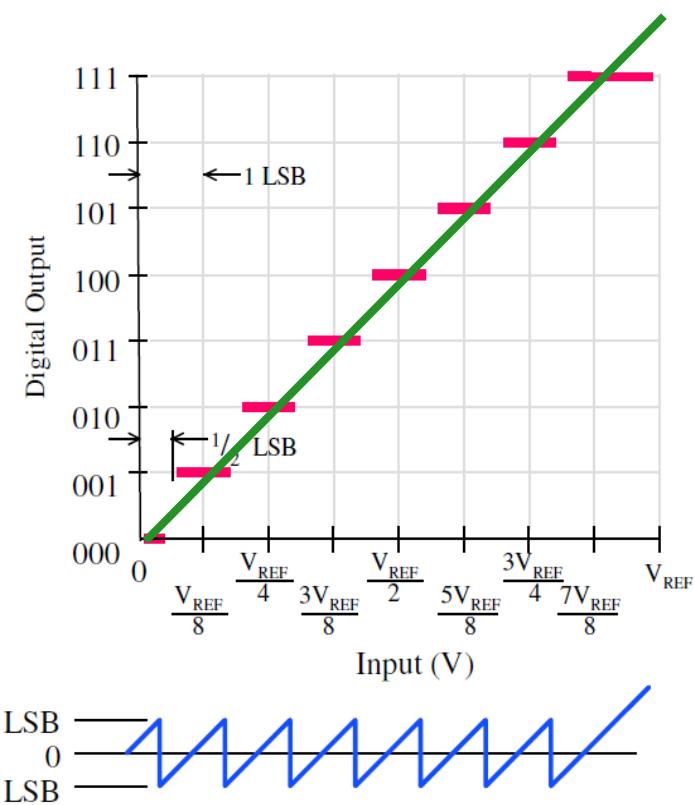


A referencia feszültség

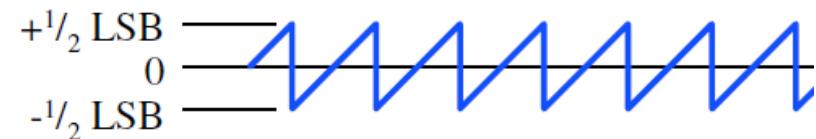
- A mérés pontosságát ez fogja meghatározni!
- Pontosnak és mindenfajta külső körülménytől függetlennek kell lennie
 - Hőmérsékletfüggetlen
 - Tápfeszültség változására érzéketlen
 - Hosszú távon stabil
 - Nagyon kis zajú
 - Az abszolút pontosság kalibrációval kezelhető
- Általában szokott lenni belső (A/D, uC-en belüli referencia) vagy külső, külön IC
 - A külső pontosabb, mivel független az AD/mikrokontroller működési körülményeitől (hőmérséklet, zaj, tápfeszültség változás)
- Sokfajta feszültségre, különböző tulajdonságokkal kapható
 - Pl. egy nagy disztribútorral 3000 fajta ilyen integrált áramkör rendelhető
- Szokásosan pl. 5V, 3V stb.
- Gyakran kettőhatványra értékbeállított, pl. 4,096V.



- Egy lépcsőfüggvény
- **LSB** – a legkisebb helyiértékű bitnek megfelelő feszültségváltozás
- **FS** – (full scale)
 - A legnagyobb és a legkisebb feszültség különbsége
 - (azaz a legnagyobb és a legkisebb digitális kódhoz tartozó feszültségek különbsége)
- Példa:
 - 3 bites A/D átalakító, referencia feszültsége legyen 1V
 - $LSB = 1/2^3 = 125\text{mV}$
 - $FS = 7/8 - 0 = 875\text{mV}$



A kvantálási zaj

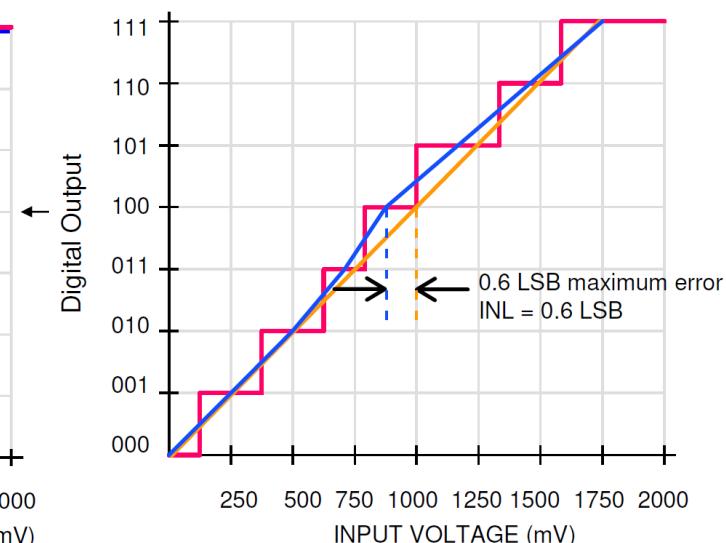
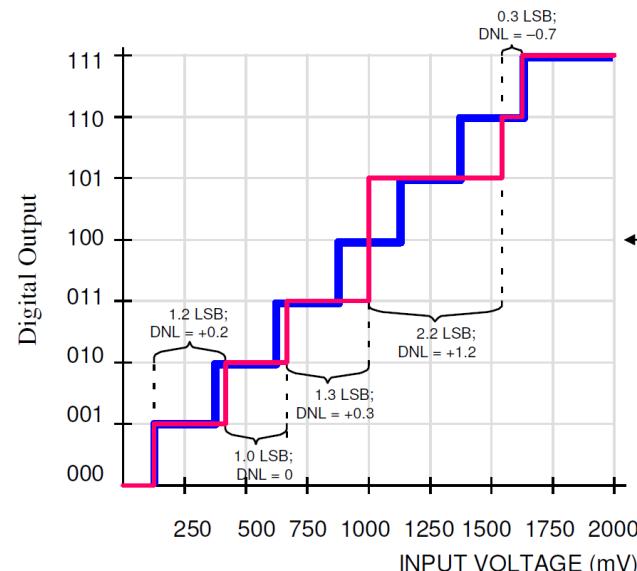
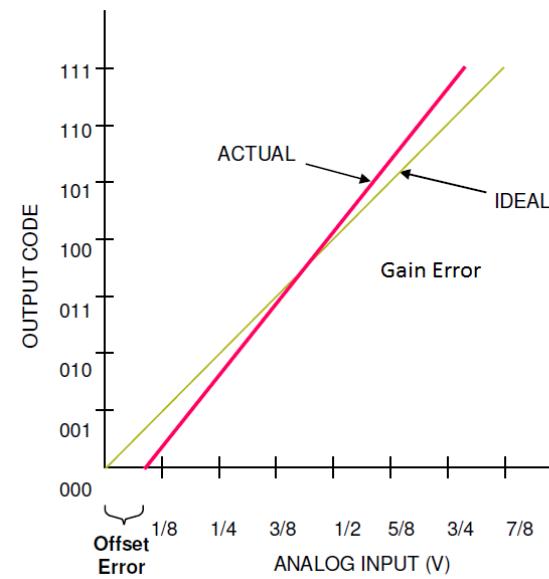


- A bemenet folytonos, a digitális kimenet viszont kvantált.
- Egyenletes kvantálásnál, ideális A/D konvertert tekintve:
- $SNR|_{dB} = 1,76 + 6,02N \cong 6N$
 - hogyan jön ki? Határozzuk meg a kvantálási hiba effektív értékét!

- $V_Q = \sqrt{1/V_{LSB} \int_{-\frac{V_{LSB}}{2}}^{\frac{V_{LSB}}{2}} V^2 dV} = V_{LSB}/\sqrt{12}$
- A maximális szinuszos kivezérlés amplitúdója pedig: $2^{N-1}V_{LSB}$, az effektív értéke tehát $\frac{2^{N-1}}{\sqrt{2}}V_{LSB}$
- $SNR = 20 \lg(2^{N-1}\sqrt{6})$
- Példa: mekkora a 16 bites „CD minőség” elméleti jel zaj viszonya?
- $SNR > 6 \cdot 16 = 96 \text{ dB}$



Valós A/D konverterek



- Offsethiba – a lépcsőfüggvény eltolódik az ideálistól
- Erősítéshiba – a lépcsőfüggvény meredeksége eltér
 - Kezelése: kalibráció, majd egyenesillesztés!
- Differenciális nemlinearitás: a lépcsők szélessége eltér az ideálistól
 - Szélsőséges esete: hiányzik egy kód
- Integrális nemlinearitás: eltérés az illesztett egyenestől



- A nemideális kvantálás miatti torzítást is be kell számolni a jel-zaj arányba.
- Ez az ún. SINAD (Signal-to-Noise and Distortion Ratio)
 - $SINAD = \frac{P_{signal} + P_{noise} + P_{distortion}}{P_{noise} + P_{distortion}}$ (ez kisebb lesz, mint az ideális)
- Ezzel ekvivalens fogalom az **effektív bitszám** (ENOB – Effective Number of Bits)
- A SINAD értékből számolható bit felbontás, ami megmutatja, hogy az átalakító hány bites ideális átalakítónak felel meg.
 - $SINAD = 6,02 ENOB + 1,76$
 - Frekvenciától és kivezérléstől függ



- 12 bites unipoláris A/D konverter, referencia feszültsége 4,096V, SINAD=66dB(@10MHz)
 - LSB= $4,096V / 2^{12} = 1mV$, FS=4,095V
 - Bemeneti feszültségtartomány: 0..4,095V.
 - Effektív bitszám: $\frac{(66 - 1,76)}{6.02} = 10,67\text{bit}$
 - Azaz hiába 12 bites az átalakító, a pontossága egy **kicsit jobb csak, mint egy 10 bites** ideális átalakítójé!
- *Bipoláris esetben ugyanezekkel a paraméterekkel*
 - Bemeneti feszültségtartomány: -4,096..4,094V
 - $LSB=2mV$



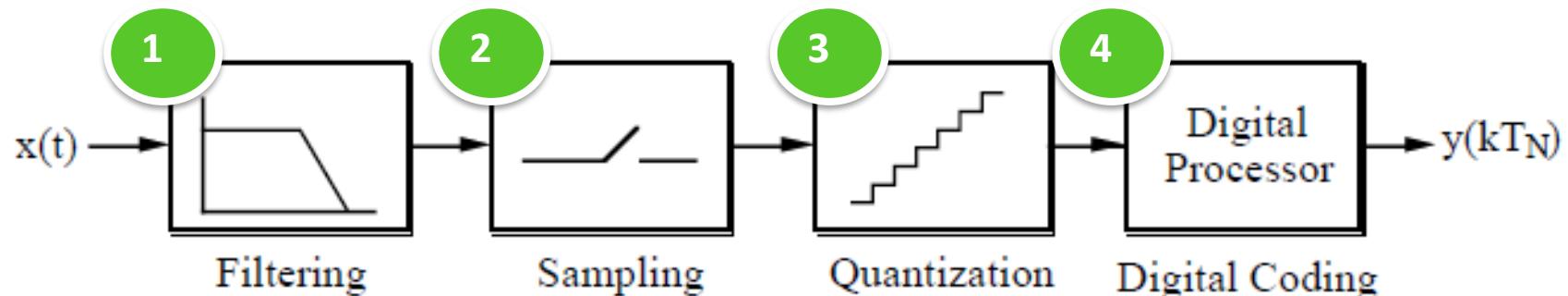


Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

A/D konverzió



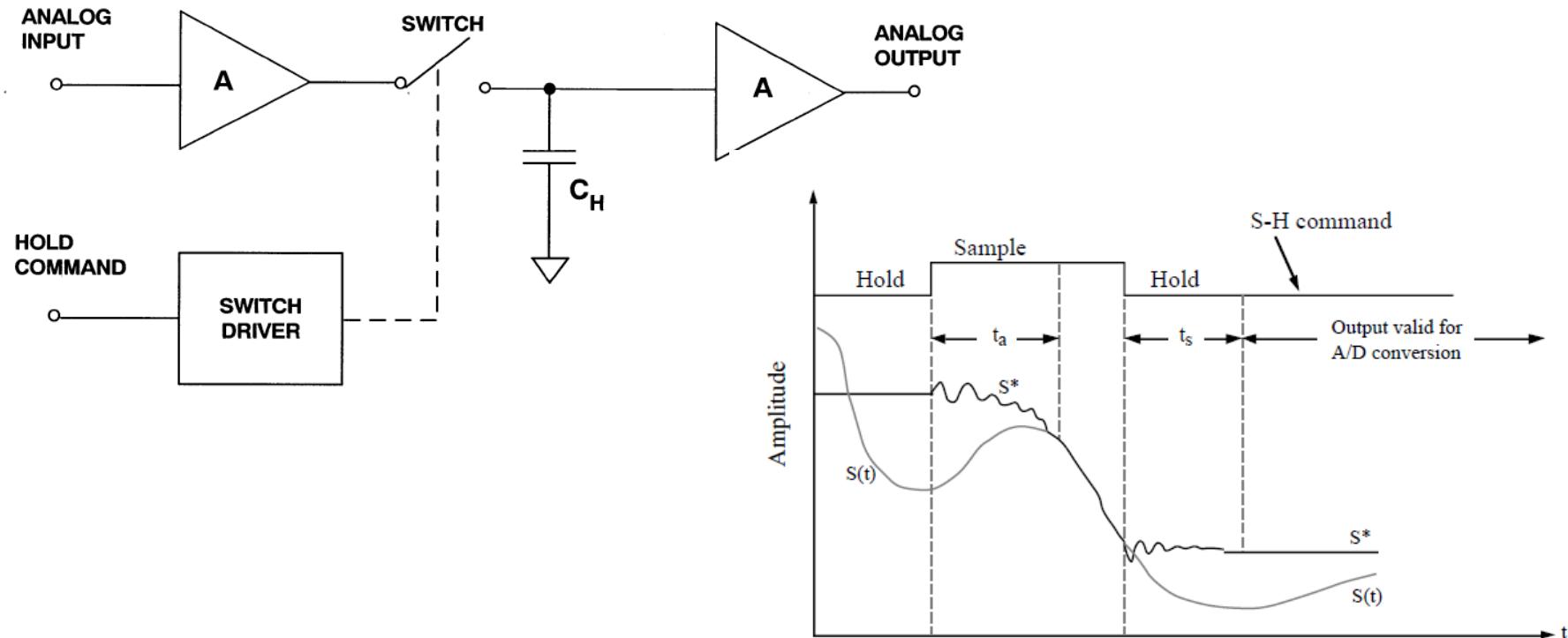
Az A/D átalakítás folyamata



1. **Anti aliasing szűrő:** aluláteresztő szűrő. Feladata a jelből eltávolítani az esetlegesen jelenlévő nagyfrekvenciás komponenseket.
2. **Mintavételező és tartó:** (sample & hold) egy adott pillanatban mintát kell venni a bemenő jelből és ezt tartani az átalakítás befejezéséig. Ez tehát egy **analóg memória**
3. **Kvantáló:** az analóg jel értékkészletét diszkrét értékekkel alakítja. A kvantáló lehet lineáris vagy nemlineáris (pl. logaritmikus)
4. **Digitális kódolás**



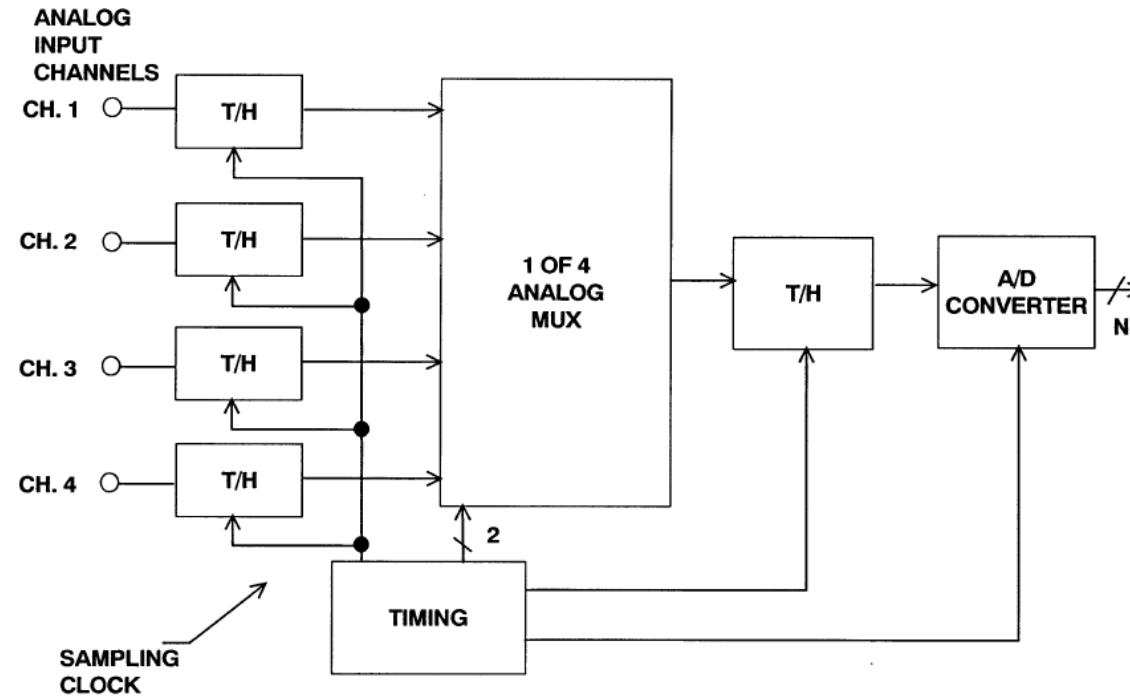
Mintavező és tartó erősítő



- A kapcsoló elem zárásakor (SAMPLE) a kimenet egy átmeneti idő után követni fogja a bemenetet.
- A kapcsoló elem nyitása után (HOLD) az utolsó feszültséget tartja, ameddig az átalakítás folyik.



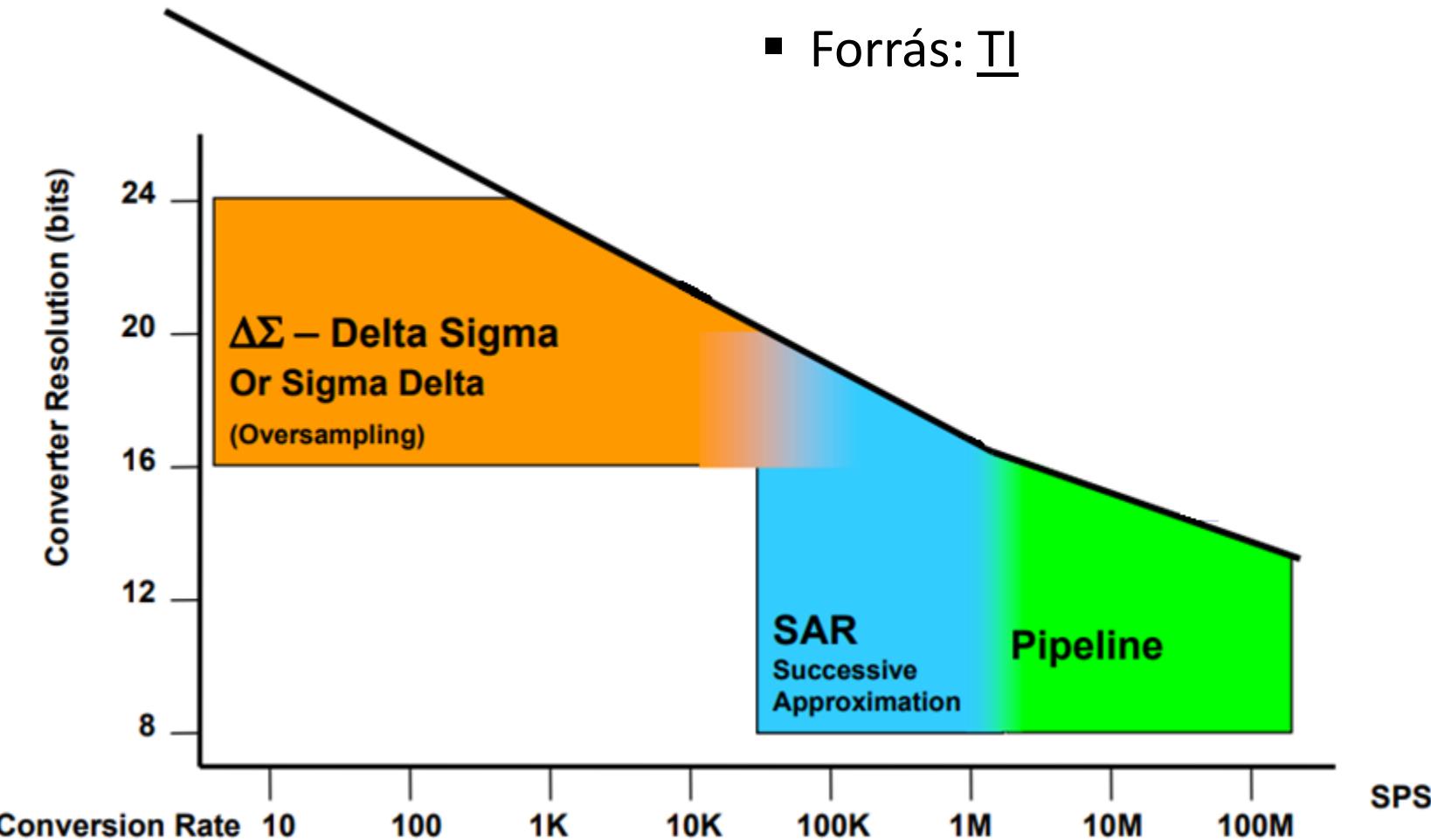
Több csatorna egyidejű mintavételezése



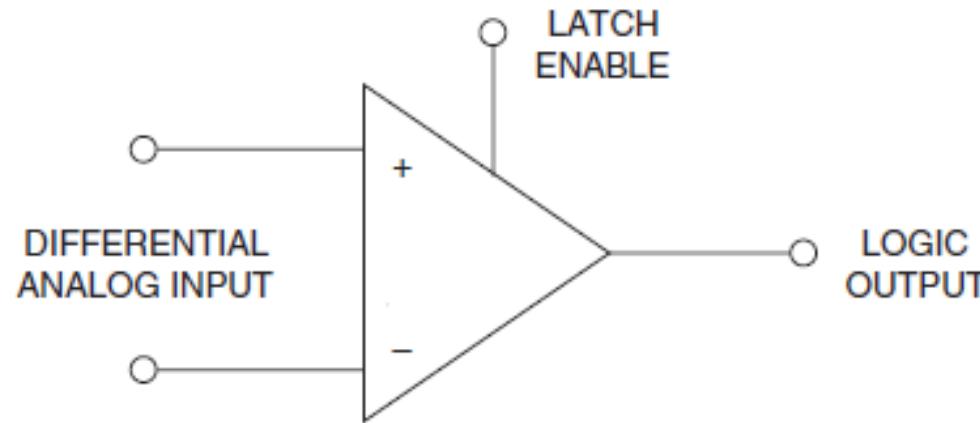
- A mintavevő és tartó áramkört többszörözik meg.
 - Így a mintavétel egyidejűleg történik meg, majd egy analóg multiplexerrel választják ki az A/D konverter bemenetére kerülő jelet, egymás után.
 - Tipikusan: akár X MHz SPS, n csatornán – ez úgy értendő, hogy ha több csatornát használunk, a mintavételezési sebességünk osztódik.



ADC Technologies



A komparátor

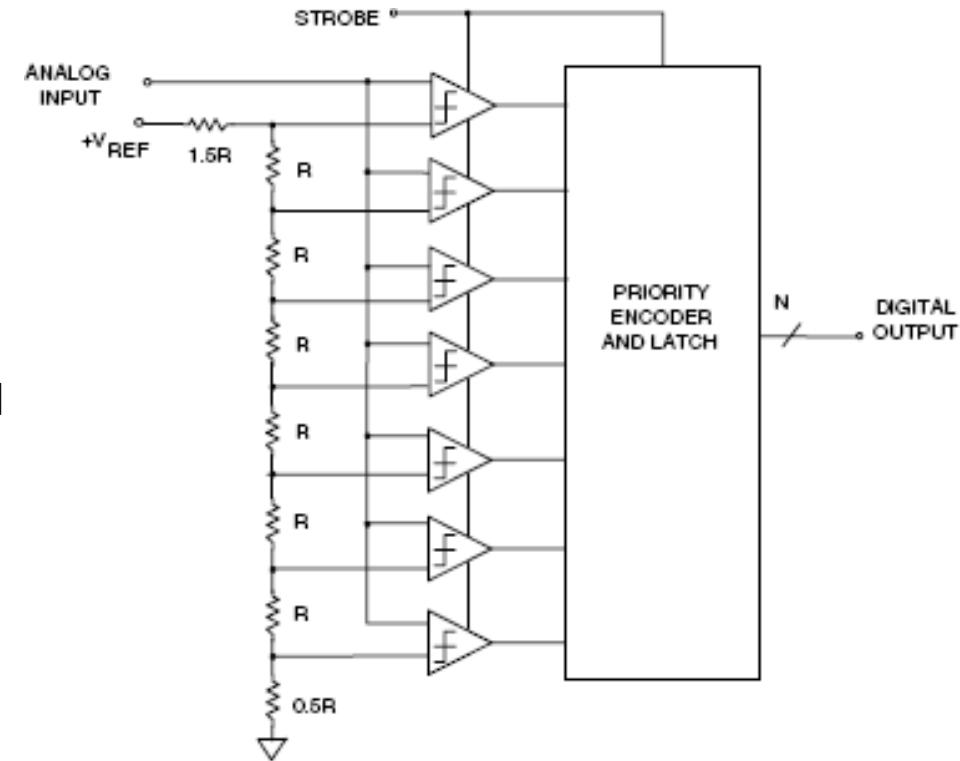


- Speciális analóg áramkör.
- A két bemenete között lévő feszültséggel különbség előjelétől függően logikai 1 vagy 0-t ad.
 - A komparátor segítségével lehet egy adott feszültséget egy másikhoz hasonlítani.
 - Tehát egy nagyobb-e (kisebb-e) kérdés eldöntésére való.



Flash A/D konverter

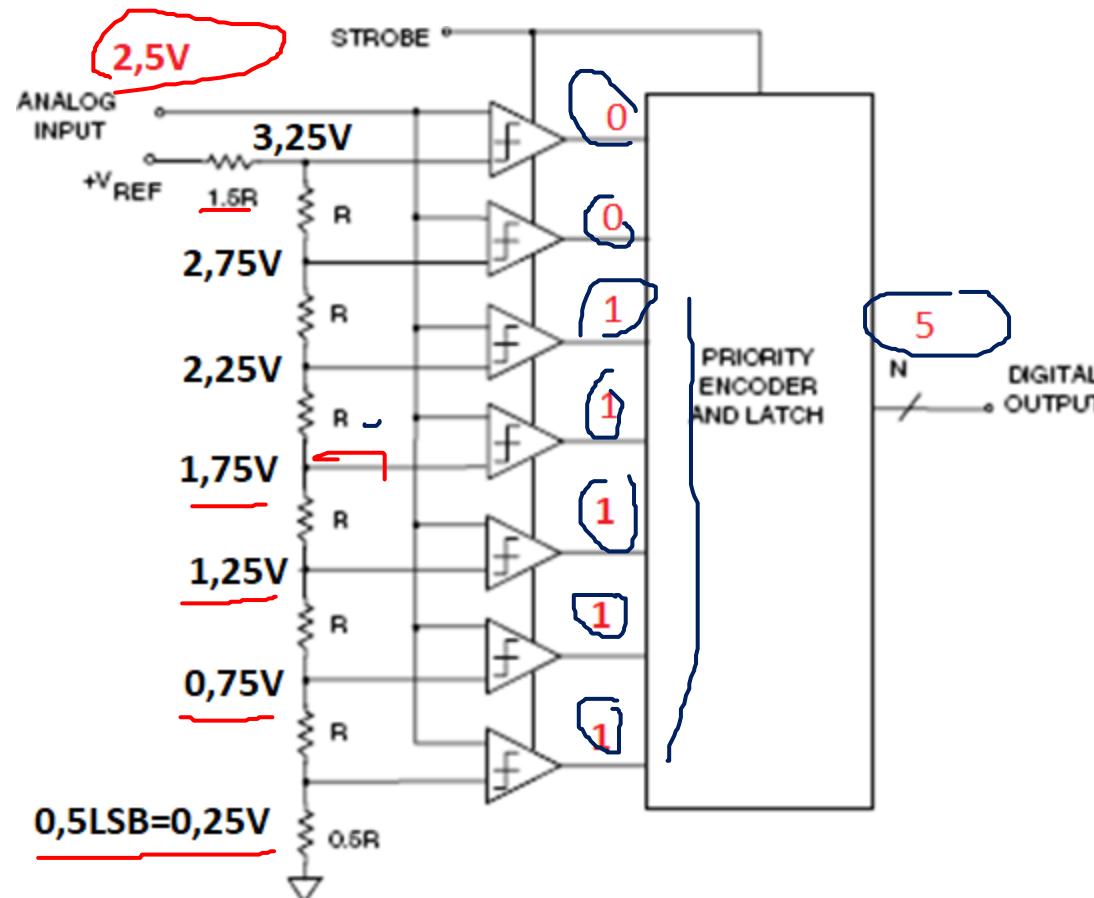
- Az átalakítás egy lépésben történik
- Gyors, több GSPS sebességű is lehet.
- A referencia feszültséget egy feszültségesztő **ellenállás lánc**kal egyenlő közökre osztjuk.
 - A bemenő feszültséget **komparátorokkal** (kimenete logikai szint, attól függően, hogy $V_{REF} > V_{in}$) hasonlítjuk össze 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.



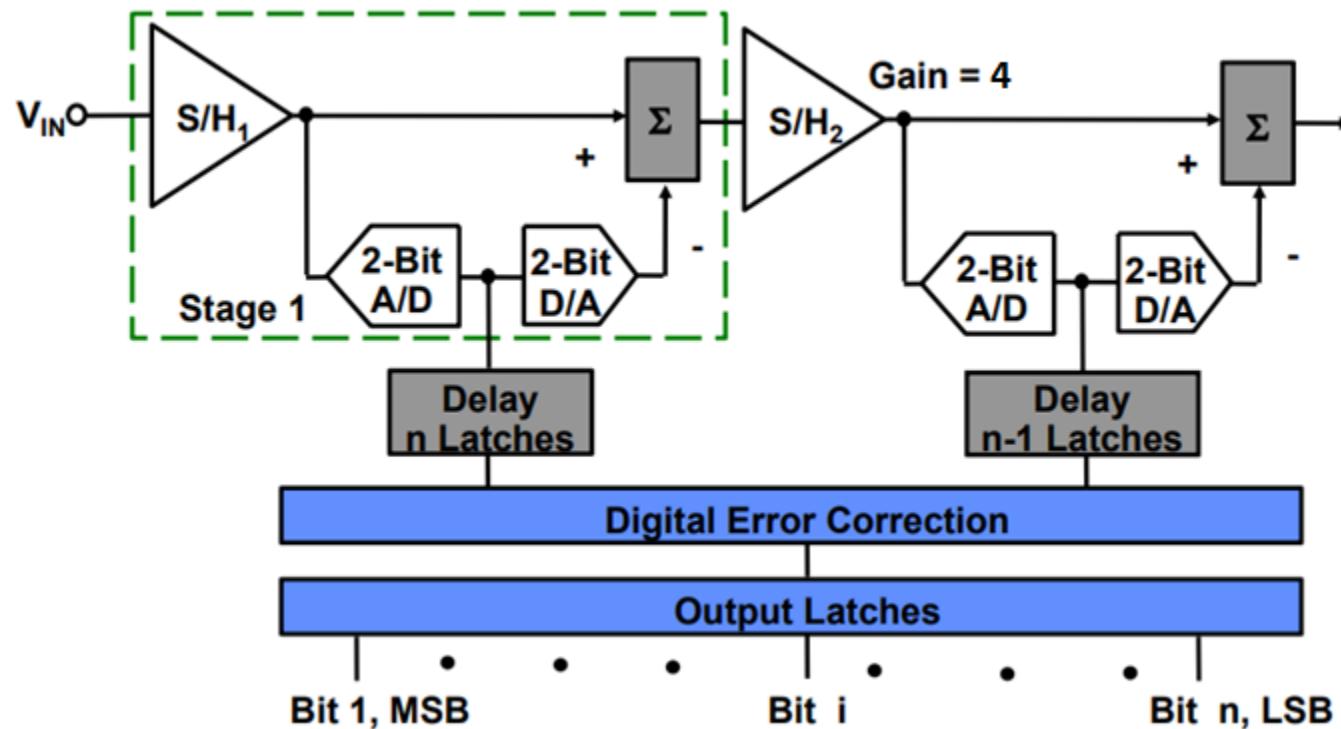
Flash A/D példa



- Legyen a referencia feszültség 4V, a bemeneti feszültség 2,5V, az A/D pedig 3 bites ($LSB = 0,5V$)
 - Az eredő ellenállás $8R$, így R ellenálláson $4/8 = 0,5V$ (LSB) esik.



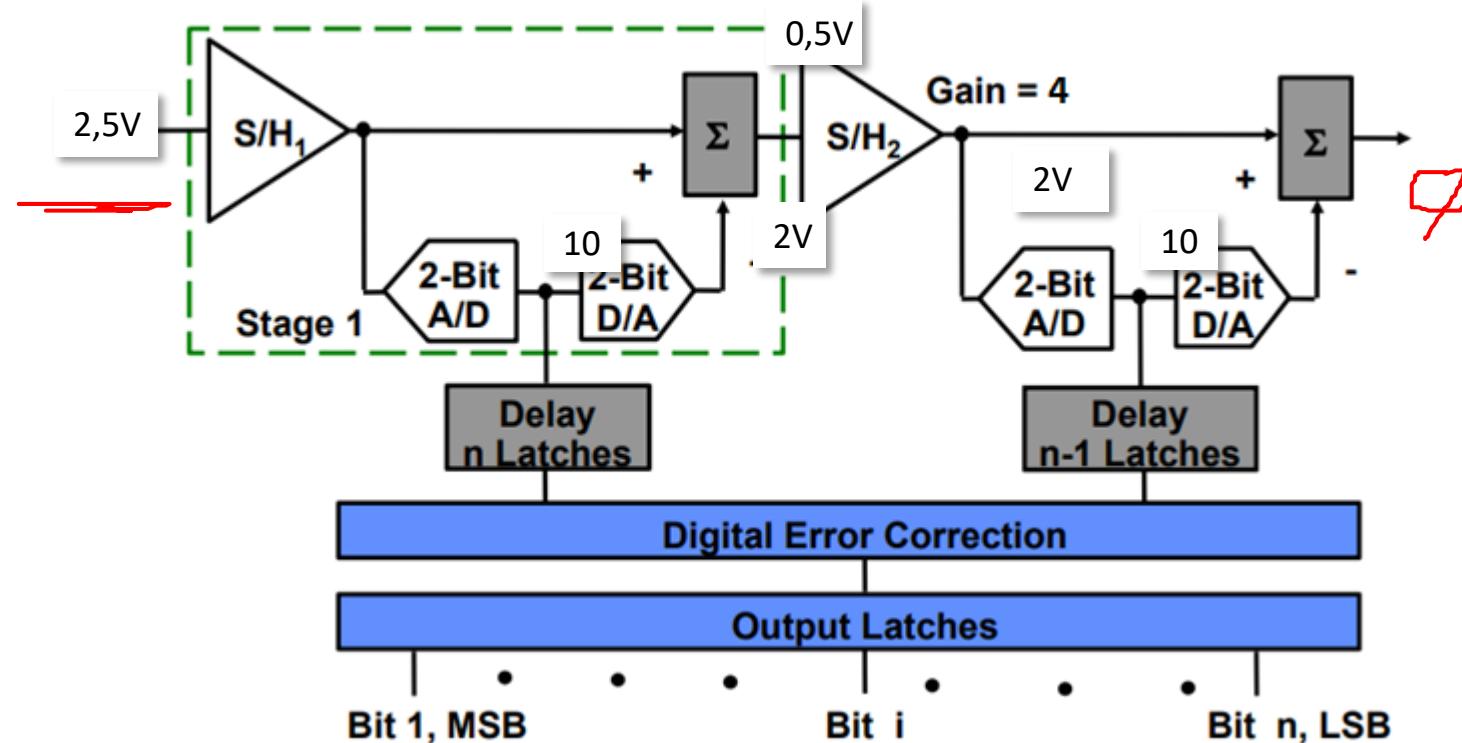
Pipeline A/D (kaszkád flash)



- Minden egyes fokozat 2-3-4 bitet alakít át. Ehhez viszonylag kisméretű flash A/D szükséges, ez könnyen kezelhető, a komparátorok száma kézbentartható.
- A maradék feszültséget erősítik, majd a következő fokozattal alakítják át.
- Pipeline-ban működik, tehát van késleltetése (latency), de az átbocsátóképesség (throughput) nagy!
 - A megelőző fokozat már el tudja kezdeni a következő minta feldolgozását.



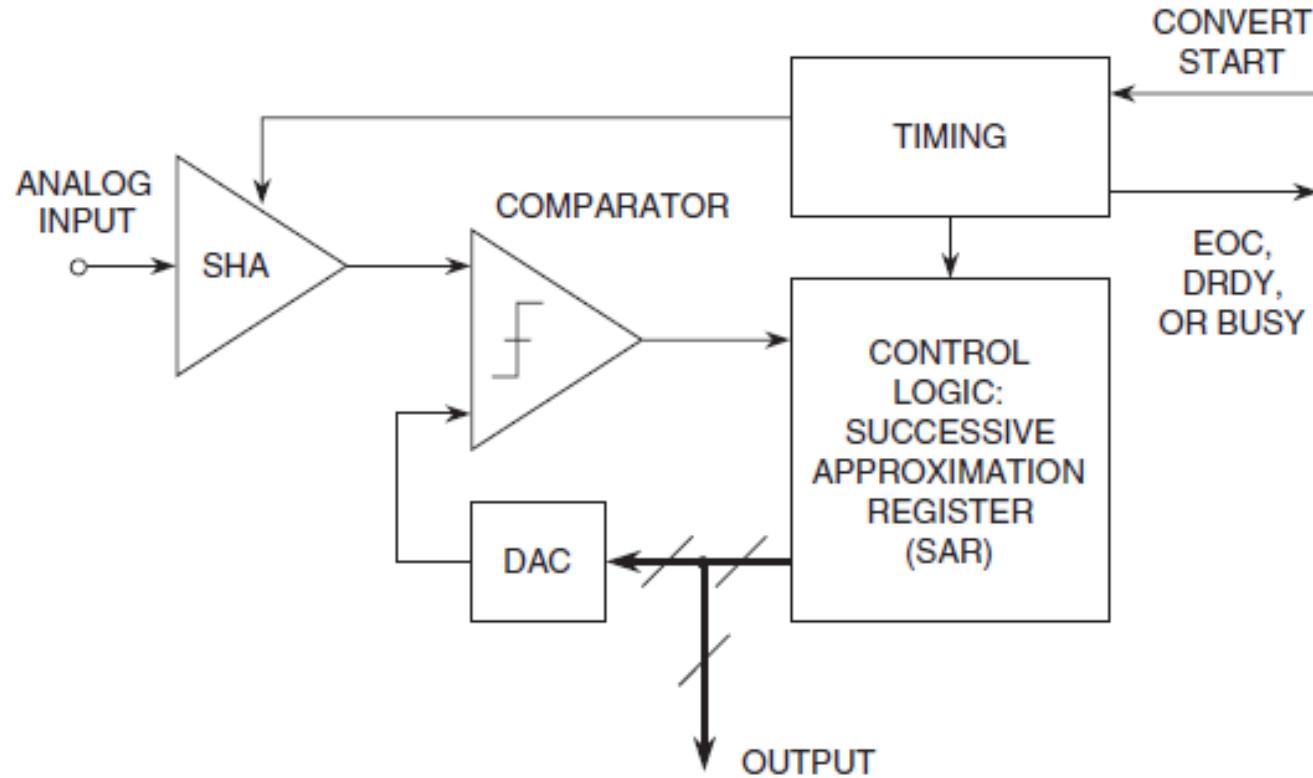
Pipeline A/D (példa)



- Legyen a referencia feszültség 4V, a bemeneti feszültség 2,5V, az A/D pedig 4 bites (két fokozatú)
 - Az első fokozat digitális kimenete 10b, mivel az LSB 1V.
 - A maradék $2,5V - 2V = 0,5V$
 - A 2. fokozatnak 2V-ot kell átalakítania, ez szintén 10b
 - Az eredmény tehát 1010b, azaz 10d.



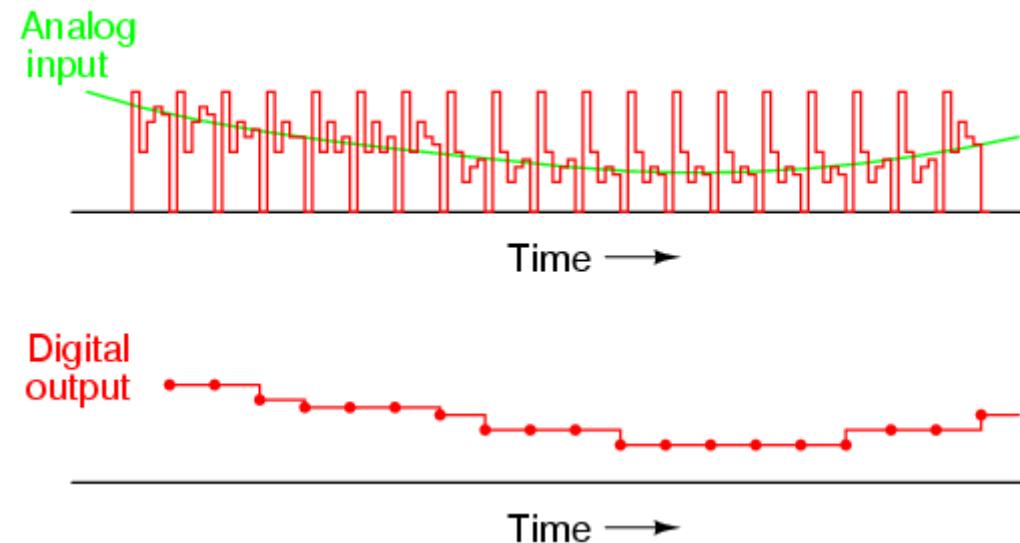
Szukcesszív approximációs A/D



- Egy n bites konverter n lépésekben végzi az átalakítást, szukcesszív approximációval

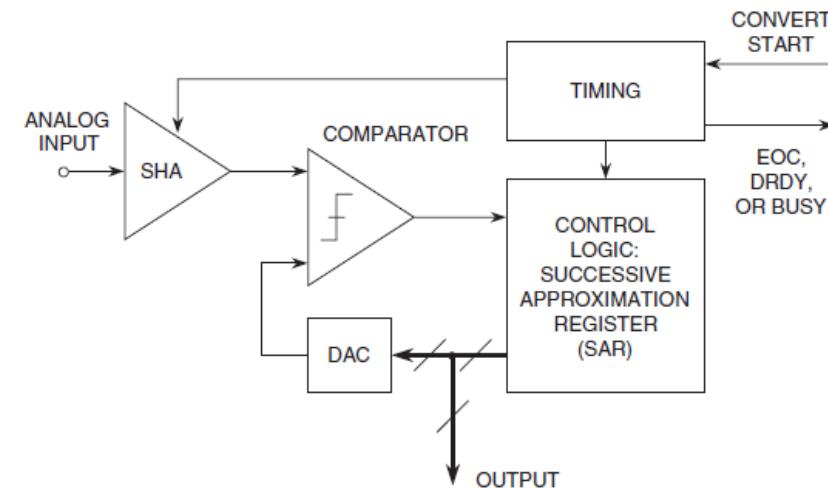


- Az átalakítás kezdetekor a legfelső bit 1, a többi 0.
- A D/A átalakítóval visszaalakított feszültséget összehasonlítjuk a bemenő jelkel, ha nagyobb, a bitet töröljük.
- Ezt **minden bitre** sorban elvégezzük.
 - Így egyre pontosabban közelítjük a mintavételezett feszültséget.
 - átalakítási idő: $N \cdot T_{\text{step}}$
 - Közepes sebességű.



Szukcesszív approximációs A/D

SAR	DAC	KOMP.
100	2V	1
110	3V	0
101	2,5	1



- Legyen a referencia feszültség 4V, a bemeneti feszültség 2,55V, az A/D pedig 3 bites
- 2,5V-ot mértünk így



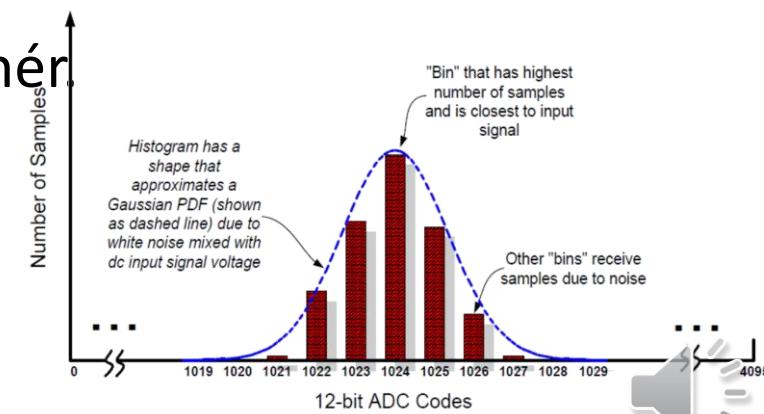
Szigma-delta átalakítók

- A név magyarázata
 - Szigma – minden lépésben integrálást végez.
 - Delta – minden lépésben különbséget képez.
- A működés alapja a túlmintavételezés (oversampling)
 - $OSR = f_S/f_N$
 - Ahol f_N a Nyquist frekvencia, azaz a maximális jelfrekvencia kétszerese. Tehát az OSR azt adja meg, hogy az elméleti minimumnál hányszor nagyobb frekvenciával mintavételezünk.
 - A túlmintavételezés hatására nő a jel-zaj viszony:
 - $SNR = 6,02N + 1,76 + 10 \lg(OSR)$
 - Miért is? Egyenletek helyett csak annyit mondunk: most ugyanaz a kvantálási zaj nagyobb frekvenciatartományon oszlik el.
 - Ez önmagában is hasznos. Túlmintavételezéssel és átlagolással csökkenteni lehet a zajt. (más szóval növelni a felbontást)



Túlmintavételezés

- Egy bit effektív felbontás javításhoz négyeszeres túlmintavételezés tartozik. ($10 \lg 4 = 6,02$)
- Ezt nyilván a végtelenségig nem lehet csinálni, de „lassú” jelek mintavételezésekor hasznos.
- Ha lehetséges, mindenkor átlagolni.
 - N mintát átlagolva a zaj \sqrt{N} -ed részére csökken
 - A leggyakoribb elektromos zavar, a hálózati 50/60Hz kiszűrhető, ha a periódus egész számszorosát mintavételezzük.
- Csak akkor működik, ha a jel lévő zaj fehér.
 - Fehérzaj: spektruma egyenletes.
 - Ekkor a mért értékek GAUSS eloszlásúak

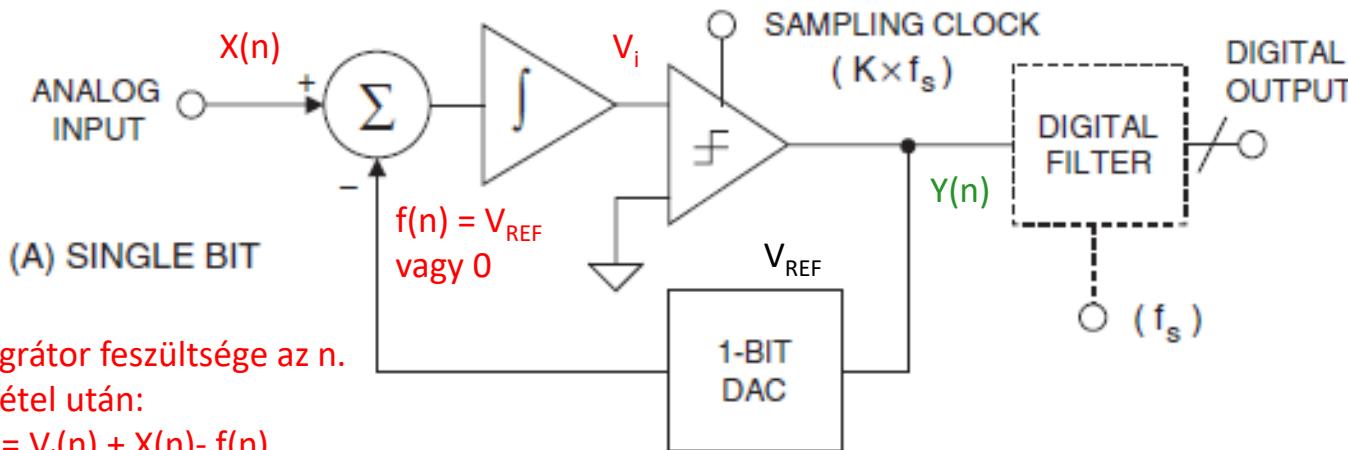


Σ–Δ (Sigma-Delta) A/D konverterek

- Túlmintavételezett A/D konverter
 - Valójában egy impulzus sorozatot állít elő.
 - A digitális impulzus-sorozat kitöltési tényezője (azaz egy adott időben a logikai 1 és logika 0 aránya) arányos a bemeneti mintavételezett jellel
 - Így a kvantálást tulajdonképpen kitöltési tényező méréssé egyszerűsíti
 - Ez digitális integrált áramkörökkel könnyen megvalósítható
 - Alkatrészek tűrésére meglehetősen érzéketlen
 - Pl. egy 12 bites flash konverterben az ellenállások relatív pontossága jobb kellene, hogy legyen 0,2‰ –nél, amit egyedi értékbeállítás nélkül nehéz megvalósítani
 - Mivel az architektúra egyszerű, digitális áramkörön alapú, ezért a túlmintavételezés nagy lehet
 - Nagy effektív bitszám érhető el.



Elsőrendű ΣΔ konverter



■ Bonyolultnak tűnik, de nem az!

- Egészen addig, amíg a stabilitást és a jel-zaj viszonyt nem vizsgáljuk a matematika eszköztárával ☺
- Az analóg feldolgozó rész különbséget képez a bemenő jel és a D/A kimenete között, majd ezt a különbséget integrálja.
- A komparátor az integráló kimenetétől függően vagy ad logikai 1-et vagy 0-t.
- Az 1 bites D/A konverter a referencia feszültséget vagy a földet kapcsolhatja a kimenetére
 - Ez CMOS-ban igen egyszerű és ismerjük a kapcsolási rajzot is – a buffer...
- A decimátor szűrő állítja elő a több bites kimenet egy adott intervallum alapján.



- Legyen a referencia feszültség 5V és a bemenet feszültsége pedig 3,3V.

órajel	$V_i(n)$	F(n)	Bit
0	0	0	0
1	3.3	5	1
2	1.6	5	1
3	-0.1	0	0
4	3.2	5	1
5	1.5	5	1
6	-0.2	0	0
7	3.1	5	1
8	1.4	5	1

Az integrátor feszültsége az n.

mintavétel után:

$$V_i(n+1) = V_i(n) + X(n) - f(n)$$

- Legyen a decimátor 3 bites.

- Ekkor a mért érték bit-> az egyesek száma egy 8 hosszú sorozatban.
- Azaz 5.
- A mért feszültség pedig
- $V_X = V_{REF} \cdot \frac{5}{8} = 3,125V$

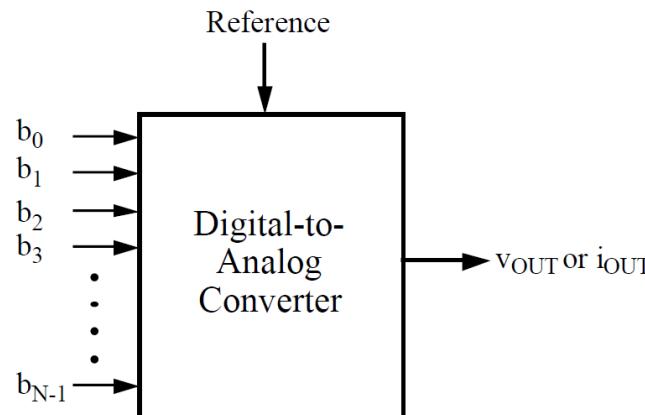


Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

D/A konverzió



D/A konverzió

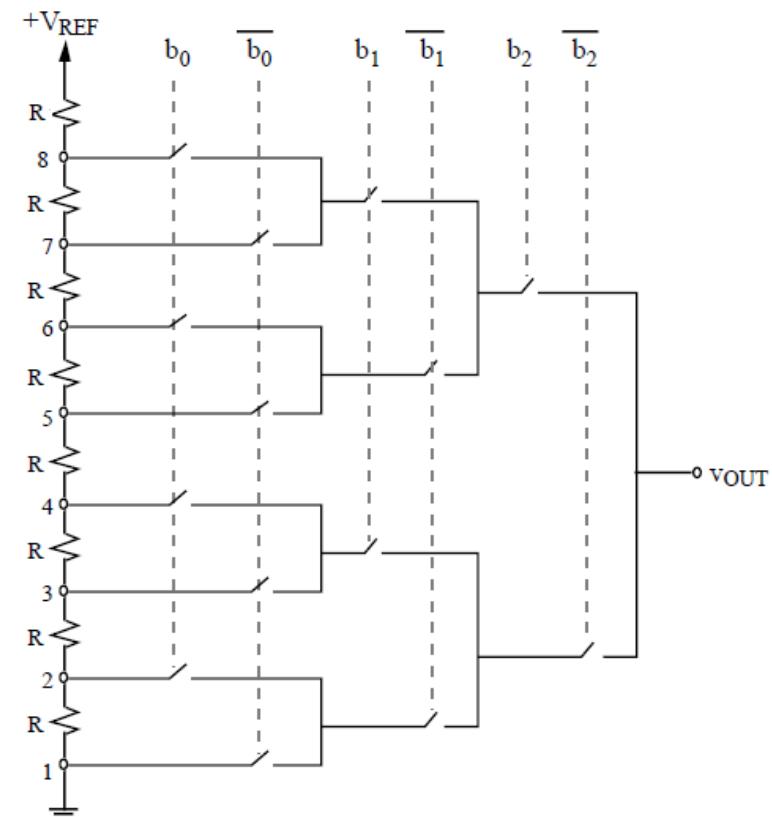


- A bináris értékkal egyenesen arányos mennyiséget (feszültség vagy áram) állít elő.
- $V_{OUT} = \frac{V_{REF}}{2^n} B = V_{LSB} B$
- Az A/D konverternél megismert alapfogalmak
 - Full scale
 - Offszet és erősítéshiba
 - INL, DNL
 - jel/zaj viszony
- Ugyanúgy értelmezettek

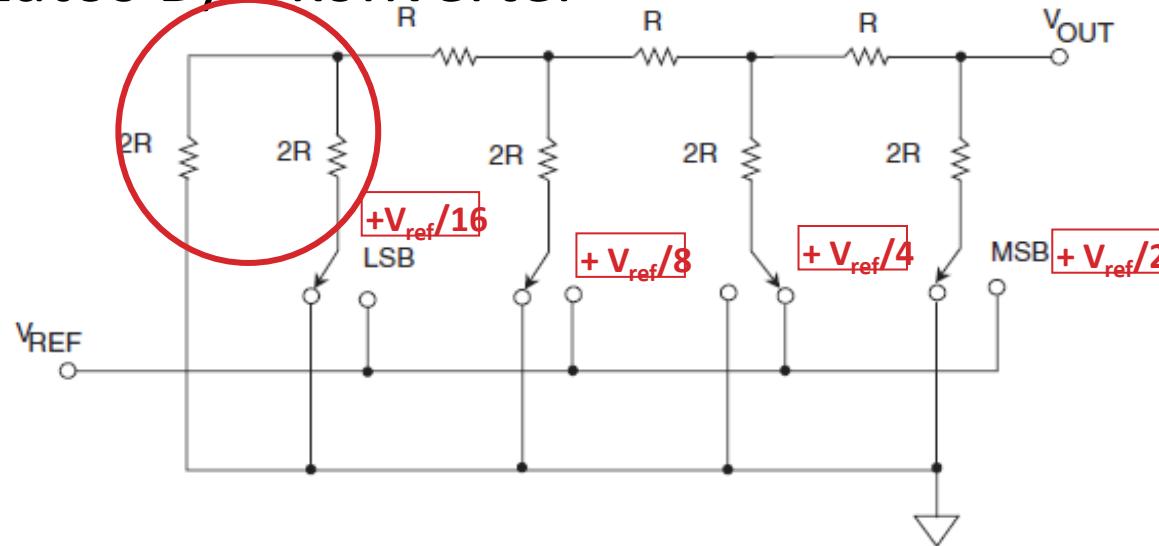


Párhuzamos (direkt) átalakítás

- A referencia feszültséget egy ellenállás láncjalosztóval osztjuk.
 - Az analóg kapcsolókon keresztül az átalakítandó számnak megfelelő érték kerül a kimenetre.
 - (analóg multiplexer – a kapcsoló CMOS transzfer kapu)
 - Egyforma ellenállásokat igényel, N bithez 2^N db. ellenállást.
 - A felépítésből eredően szigorúan monoton



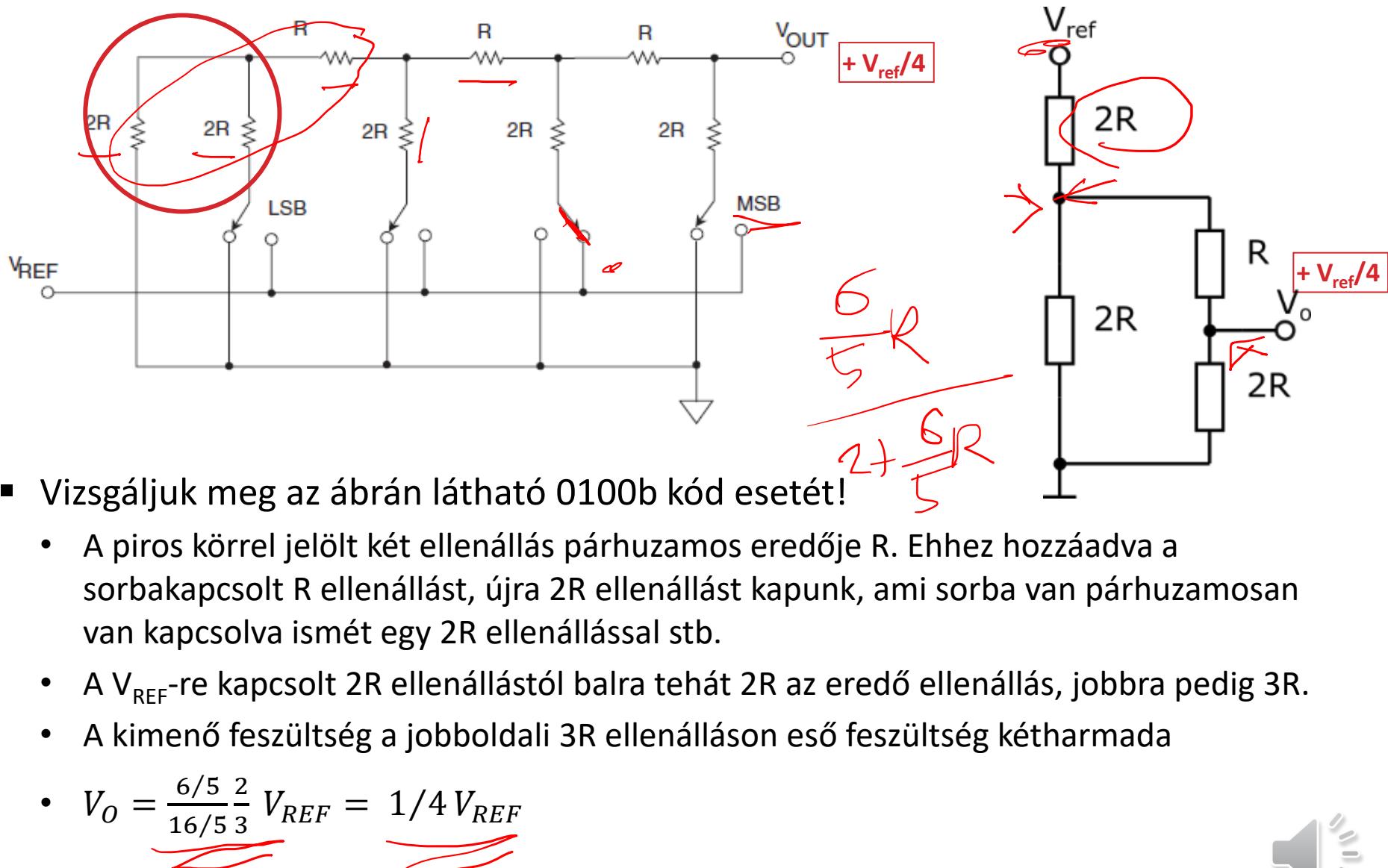
Létrahálózatos D/A konverter



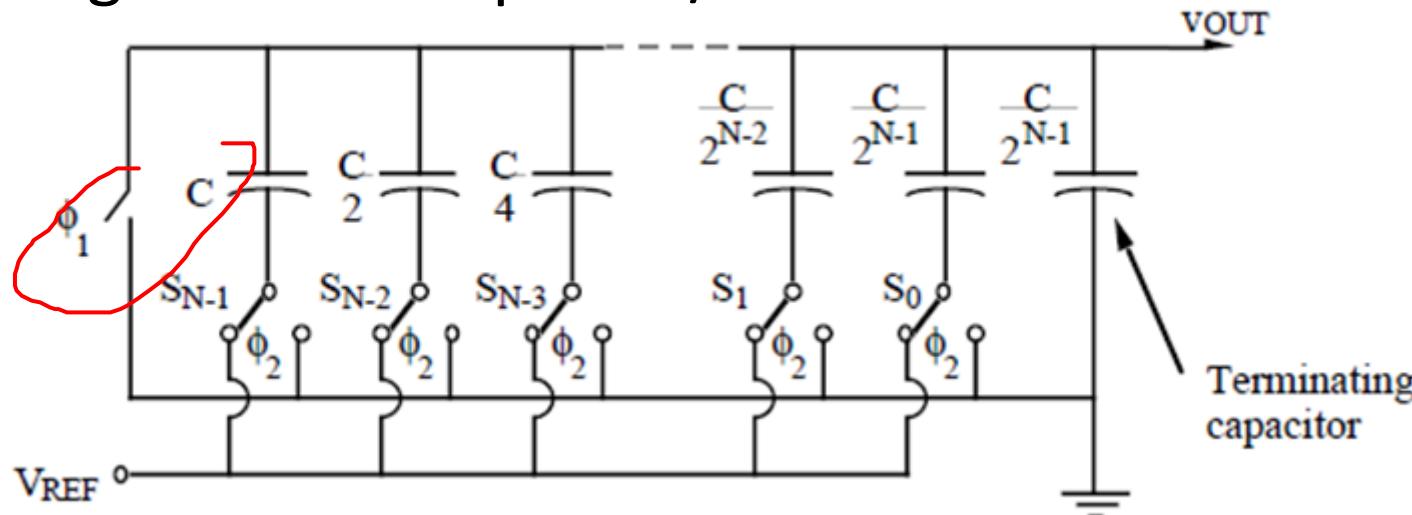
- A szuperpozíció tételekkel könnyen belátható, hogy egy adott kapcsoló zárásakor a bináris súlynak megfelelő feszültség kerül a **kimenetre**.
- Előnye: IC-kben pontos ellenállások nehezen valósíthatóak meg, viszont megfelelő relatív pontosság érhető el.
- Csak R ellenállásokat tartalmaz (a 2R ellenállás helyettesíthető 2 db. Sorbakapcsolt R ellenállással) N bithez $3N+1$ ellenállás szükséges.
- Sehol nem használtuk ki, hogy a referencia feszültség állandó lenne, változhat időben. Ez az ún. szorzó típusú (multiplying DAC)



Példa



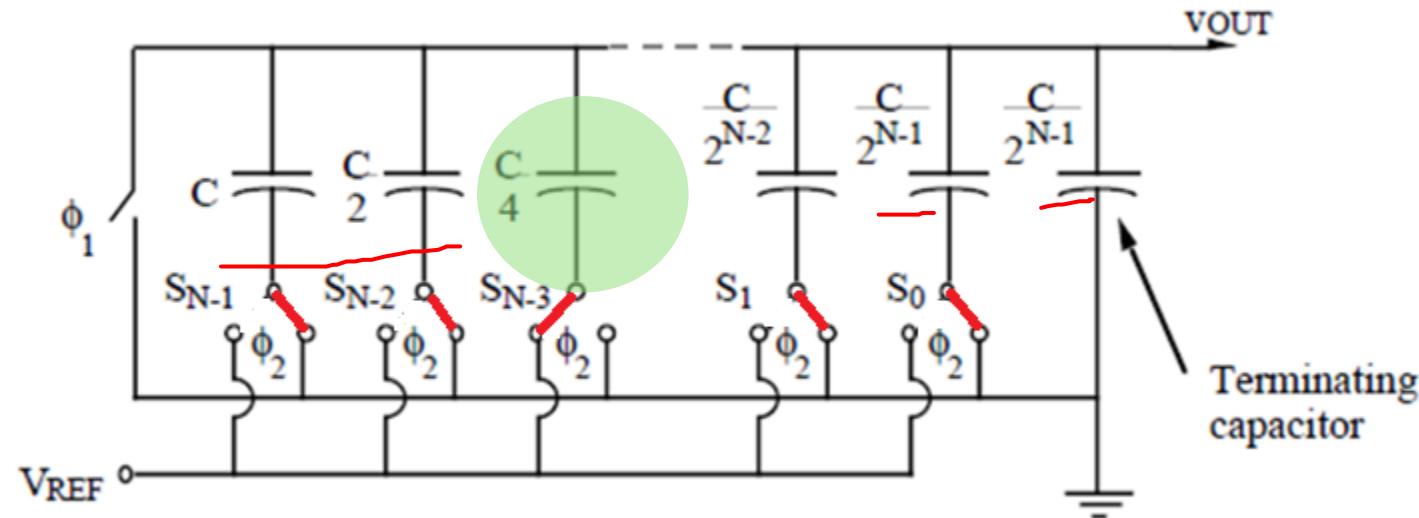
Töltésmegosztáson alapuló D/A



- 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.
- Egyforma kapacitásokat könnyű készíteni.
 - (a nagyobb kapacitásokat párhuzamosan kapcsolt egységek kapacitásokból állítják elő)



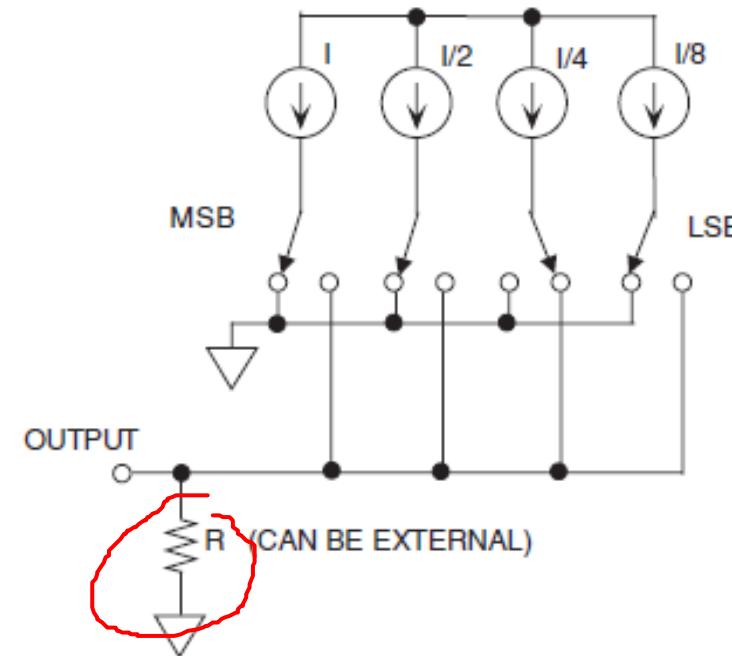
Példa



- Számítsuk ki a kimenet feszültségét, ha $C/4$ kapacitást aktiváltuk.
 - Balra $3/2 C$, jobbra pedig $1/4 C$ kapacitás van, a földre kapcsolva. (az LSB kapacitásból kettő van!) Ennek eredője – mivel párhuzamosan vannak kapcsolva $7/4C$
 - Tehát a referencia feszültség az $1/4C$, $7/4C$ kapacitáson oszlik meg
 - Azaz $V_{OUT} = \frac{4/7}{4+4/7} V_{REF} = \frac{1}{8} V_{REF}$



Kapcsolt áramok

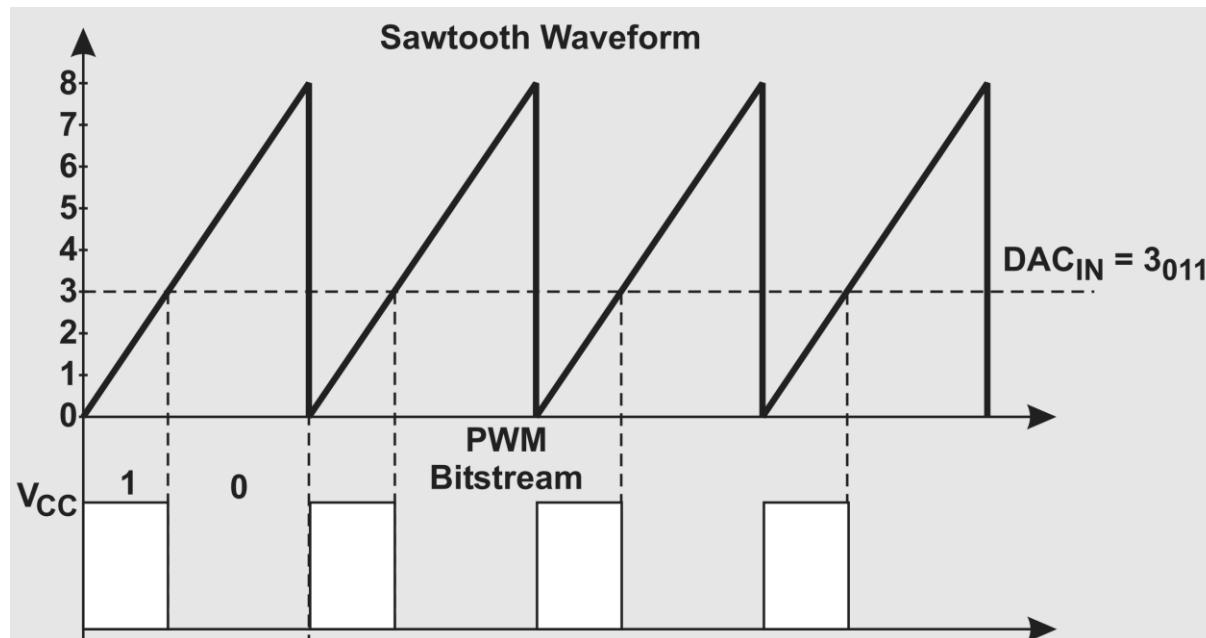


- A bináris súlynak megfelelő áramgenerátorokat kapcsolnak be/ki.
- A legnagyobb sebesség így érhető el.
- A kimenet áram
 - (könnyen feszültséggé alakítható)
- IC-ben könnyű egyforma áramgenerátorokat készíteni.



Számláló típusú D/A (PWM)

- Pulzusszélesség moduláció
 - Nagyon gyakori periféria mikrokontrollerekben.
 - A pulzus kitöltési tényezője megfelel a D/A értéknek.
 - Egy aluláteresztő szűrő eltávolítja a magasabb frekvenciájú komponenseket.



Példa

- Olcsó mikrokontrollerünkben (gyerekjáték) 2MHz-es órajellel hány bites felbontású D/A-t tudunk készíteni, ha a mintavételezési frekvencia 8kHz? (telefon minőség)
 - A periódusidő $125\mu s$, azaz az $0,5\mu s$ órajellel a számlálón 250-es érték.
 - Ez azt jelenti, hogy 250 különböző kitöltési tényezőt tudunk előállítani,
 - Azaz a felbontásunk majdnem 8 bit.



Források, ajánlott irodalom, érdekességek

- [Choose the right A/D converter for your application \(TI\)](#)
- Szimulációk
 - [Flash A/D konverter](#)
 - [Direkt D/A átalakító](#)
 - [Létrahálózatos D/A átalakító](#)





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

IT eszközök technológiája

11. előadás

Teljesítmény és hőmérsékleti problémák

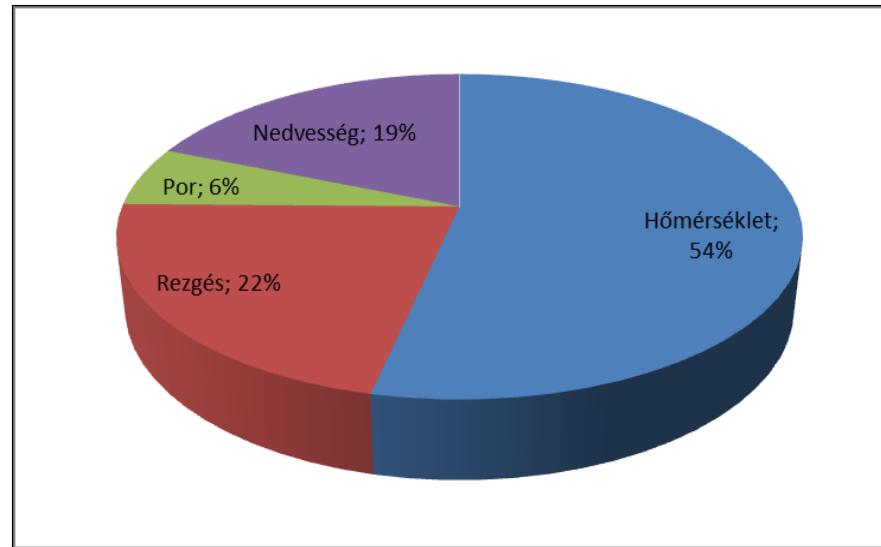


- A teljesítmény és a hőmérséklet összefüggései
 - Meghibásodás okai
 - Teljesítmény plafon
 - Energiatakarékkossági módok
- IT eszközök hűtése
 - Hővezetés, hőáramlás, hősugárzás
 - Egyszerű közelítés, a hőellenállás
 - Integrált áramkörök maghőmérsékletének számítása
 - Passzív hűtés
 - Kényszerített léghűtés
 - Folyadékhűtés
 - Heat-pipe



Miért fontos a hőmérséklet?

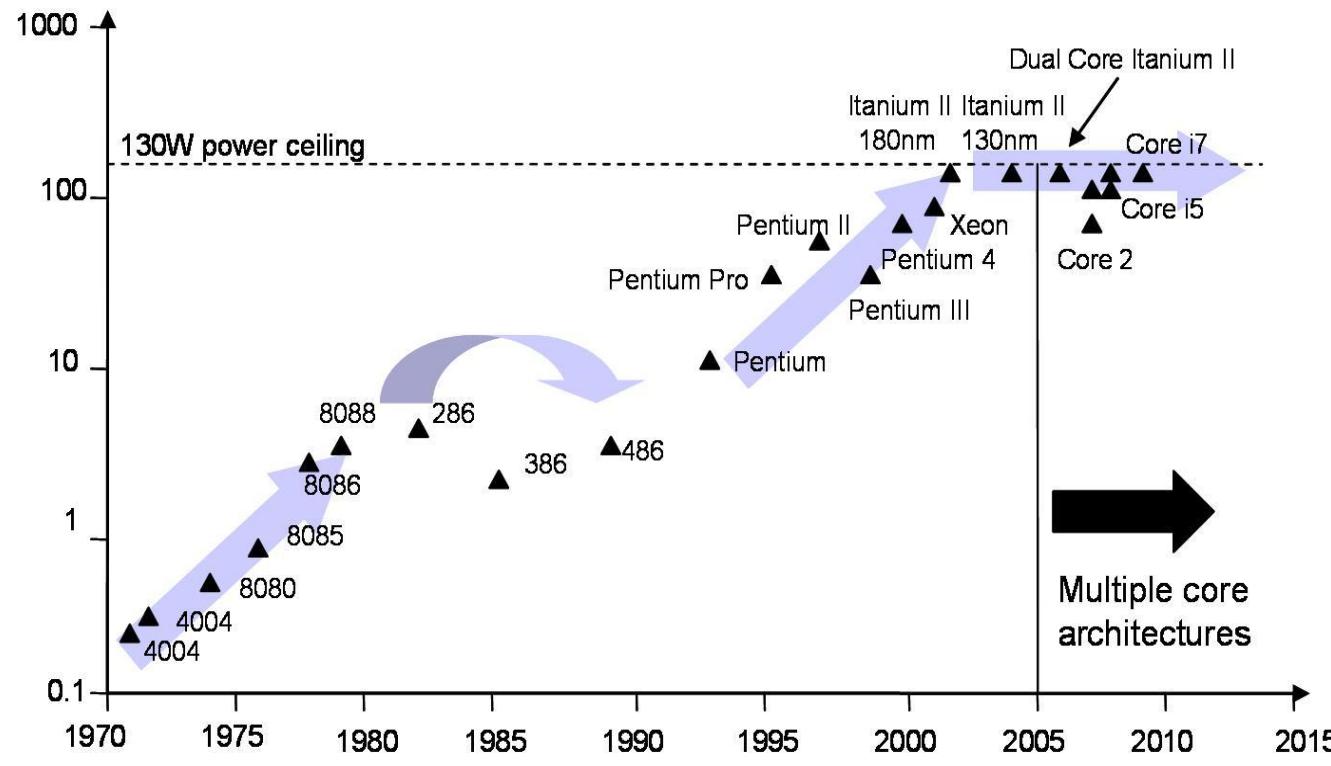
Miért fontos ez a kérdés?



- Az elektronikus eszközök meghibásodásának főbb okai:
 - Túl magas hőmérséklet (**több mint 50%!**)
 - Rezgés
 - Nedvesség
 - Por



A teljesítmény plafon



Adapted from ARC 2010 presentation by Dr. Ram Krishnamurthy, Intel Research

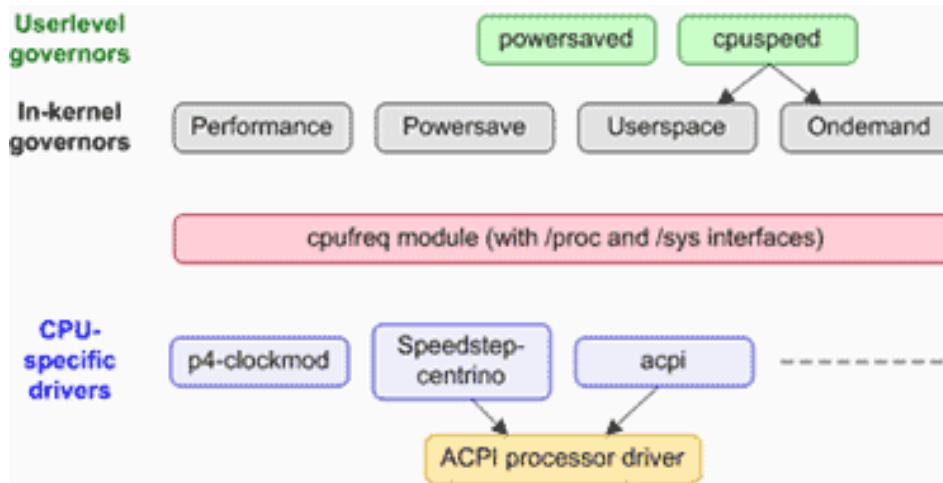
- A méretcsökkentéssel szinte minden – számunkra fontos – paraméter javul
 - Kivéve a felületegységenkénti teljesítmény!



- Kb. 100-130W az a teljesítmény, ami egy integrált áramkörből hagyományos eszközökkel eltávolítható
 - Hagyományos eszközök
 - Hűtőborda
 - Kényszerített léghűtés
 - Mobil alkalmazásokban további problémák lépnek fel
 - Kis területről kell elszállítani a hőt egy nagyobb felszín irányába
 - Hőcső (heatpipe)
- Mivel CMOS áramkörökben $P \sim fV_{DD}^2$
 - A frekvencia egy bizonyos határon nem növelhető
 - A tervezők rá vannak kényszerítve a tápfeszültség csökkentésére
- Az áramkörnek meg kell védeni magát
 - Modern integrált áramkörökben teljesítmény menedzsment található
 - Nemcsak az OS igényeitől, hanem a hőmérséklettől függően is szabályoz a különböző állapotok között.



Dynamic frequency voltage scaling



- Normál üzemmódban az OS rendszer kapcsolat a rendelkezésre álló frekvencia- feszültség párosok között
 - A teljesítményprofilnak megfelelően
 - A két szélső állapot
 - maximális CPU sebesség
 - minimális energiahasználat



Energiatakarékkossági módok, példa (i7)

	Active state			
	C0	C1	C3	C6
Core clock	Hz	off	off	off
PLL	Hz	Hz	off	off
Core caches	bars	bars	flushed	flushed
Shared cache	bars	bars	bars	bars
Wakeup time*	active	⌚	⌚	⌚
Core Idle power*	bar	bar	bar	~ 0

- C1 – a mag órajelét kikapcsolja (halt)
 - A mag órajelét előállító PLL aktív. Utasítást a processzor nem hajt végre, de az első interrupt felébreszti és rögtön végrehajtásra kész.
- C3 – a PLL-t is kikapcsolja, mag cache-t kiüríti és lekapcsolja
 - A feléledés hosszabb időt vesz igénybe, az órajelet lokálisan előállító PLL-nek stabilizálódnia kell.
- C6 – a mag állapotát elmenti az ún. LLC (Last level cache)-be
 - A tápfeszültséget lekapcsolja. Így a mag nem fogyaszt.



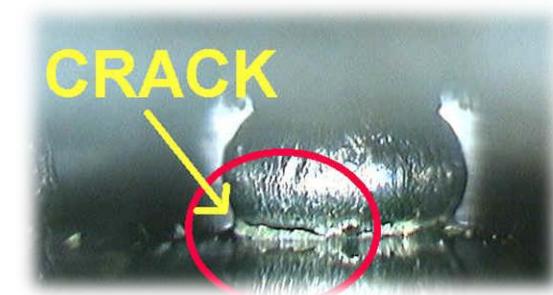
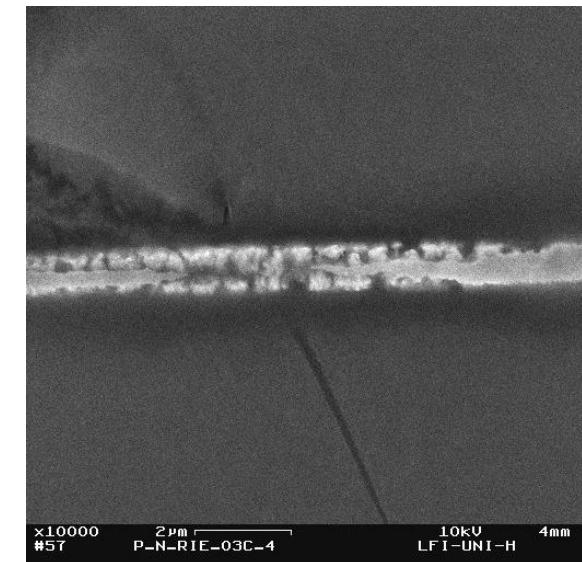
A sötét szilícium

- Jól hangzó, marketing elnevezés 😊
- A lényeg:
 - A technológia alkalmas arra, hogy még több tranzisztorot integráljon adott felületegységre.
 - Ezeket azonban nem kapcsolhatjuk be! Túllépjük a teljesítményplafont.
 - Tehát pl. a magok számát vagy a cache méretét nem növelhetik meg tetszőlegesen (vagyis megnövelhetik, de egyszerre nem használhatók – ettől „sötét” a szilícium)
- Mit lehet kezdeni a „maradék” tranzisztorokkal?
 - Energiahatékony gyorsító áramkörök
 - Application specific instruction set processors
 - Pl. ARM big.LITTLE
 - Nagy számítási teljesítményű mag + energiahatékony mag.
 - A kettő között az átjárást az op. rendszer felügyeli.



A megnövekedett hőmérséklet okozta problémák

- Integrált áramkörök funkcionális működését meghiúsítja
 - A kapu késleltetések megnövekednek.
 - Ha ez egy kritikus útvonalon következik be, a logikai rendszer hibázik
 - „lefagy” ☺
- Az alkatrészek meghibásodhatnak
 - 150°C felett a hozzávezetések, forrasztások, vezető ragasztások elengedhetnek
 - A nagy áramsűrűség okozta vezetékmeghibásodások (az ún. elektronmigráció) valószínűségét növeli
 - 90°C felett hosszú távú degradációs folyamatok indulnak be
 - Különösen ciklusos terhelés hatására, az eltérő hőtágulási együtthatók miatt
 - Rétegek elválhatnak egymástól, eltörhetnek, stb.
- A hiba valószínűsége exponenciálisan nő a hőmérséklettel.



Arrhenius - összefüggés

- Eredeti változatában kémia reakciók sebességének hőmérsékletfüggését modellezí
- De alkalmazható a meghibásodás hőmérsékletfüggésének modellezésére
 - Mivel a meghibásodások nagy része kémiai reakción, diffúzión vagy migráción alapul
 - Egyik legrégebben használt modell.
- $t_f = Ae^{\frac{E_a}{kT}}$
 - t_f – meghibásodás várható ideje (MTTF – mean time to failure)
 - E_a – aktivációs energia, mechanizmusfüggő, általában 0,3..1,5eV
 - k – Boltzmann konstans, $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K ill. $8.617 \text{e-}5$ eV/K
 - T – abszolút hőmérséklet
 - A – konstans.



■ Magasabb hőmérsékleten tehát csökken az élettartam

- Ezért magasabb hőmérsékleten tesztelik az alkatrészeket, és ez alapján határozzák meg a modell konstansait.
- A gyorsítási faktor T_2 nagyobb és T_1 kisebb hőmérséklet között:
 - $AF = e^{\frac{Ea}{k}(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2})}$
 - Pl. 0,4eV aktivációs energia, 25°C ill 100°C esetén ez kb. 23
 - Azaz ha pl. azt mértük (mérte a gyártó) nagymennyiségű minta alapján, hogy egy adott alkatrész várható élettartama 5000h 100°C-on, akkor ebben az esetben, ha szobahőmérsékletre sikerül hútni 115 ezer óra lesz!
 - 5 ezer óra az kb. 7 hónap, 115 ezer óra viszont több mint 13év!
 - A mérnöki gyakorlatban néha még egyszerűbb összefüggést használunk:
 - Pl. aluminium elektrolit kondenzátor esetén 10°C hőmérséklet csökkentés megkétszerezi a várható élettartamot. (ez nem jelenti azt, hogy teljesen tönkremegy, pl. a kapacitás 30%-os csökkenése jelenti az elromlást!)





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Elméleti alapok

Röviden...



- A hőáramot a p hőáram sűrűséggel jellemezhetjük.
 - A hőáramsűrűség vektor iránya mutatja a hő áramlási irányát, abszolút értéke pedig megadja az egységnyi keresztmetszeten, egységnyi idő alatt átátáramló energia mennyiségét. [J/m²s, W/m²]
 - Egy adott V térfogatú anyag hőmérsékletének ΔT -vel történő megemeléshez szükséges energia
 - $\Delta E = c_v V \Delta T$, ahol c_v a térfogatra vonatkoztatott hőkapacitás
- Végtelenül kis térfogatot vizsgálva, amely g [W/m³] teljesítménysűrűségű hőforrást tartalmaz, az energia folytonossági egyenletéhez jutunk
 - $\operatorname{div} p = g - \frac{c \partial T}{\partial t}$
- Azaz a hőforrás által keltett hőmennyiség egy része a felületen távozik, más része pedig a térfogatot melegíti.



- A hőmérsékletkülönbség hatására energiakiegyenlítődési folyamatok indulnak meg.
 - **Hővezetés**
 - A hő részecskéről részecskére adódik át, de nincs anyagáramlás
 - $p = -\lambda(T) \operatorname{grad} T$, ahol λ [W/mK] pedig a (hőmérséklet függő) hővezetési együttható (Fourier – egyenlet)
 - **Hőátadás** (konvekció)
 - a termikus energia átadása a különböző energiájú részek helyváltoztató mozgásával történik. Egy T hőmérsékletű felületen a T_0 hőmérsékletű áramló hőáram sűrűsége:
 - $p = h(T - T_0)$, ahol h a hőátadási tényező.
 - **Hősugárzás**
 - környezeténél magasabb hőmérsékletű test energiájának egy részét elektromágneses sugárzás formájában adja le környezetének. A T hőmérsékletű test által a T_0 hőmérsékletű környezete felé kibocsátott energia:
 - $p = \epsilon\sigma(T^4 - T_0^4)$ ahol ϵ a felület emisszivitása, $\sigma=5.67 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2\text{K}^4$ pedig STEFAN-BOLTZMANN állandó.
 - (Vigyázat! Itt T az abszolút hőmérséklet!)



- Ha a hővezetés összefüggését behelyettesítenénk a folytonossági egyenletbe, egy differenciálegyenletet kapnánk.
- Kézenfekvő azonban az analógia az elektromos áramerősség és a hőáram, valamint a feszültség és a hőmérséklet között
 - az elektromos hálózatok mintájára absztrakt, koncentrált elemeket definiálunk, hogy a gyakorlati számításokat egyszerűbbé tegyük.
- Az analógia a következő
 - Hőmérséklet \leftrightarrow feszültség
 - Hőáram (teljesítmény) \leftrightarrow áram
 - Egy anyag két felülete között, ha hőmérsékletkülönbség van, akkor hőáram fog folyni, méghozzá a hőmérsékletkülönbséggel arányosan \rightarrow hőellenás



Hőellenállás

- Egy homogén L hosszúságú, A felületű anyagra a Fourier egyenletet felírva:

$$\bullet \quad p = \lambda \frac{T_2 - T_1}{L}$$

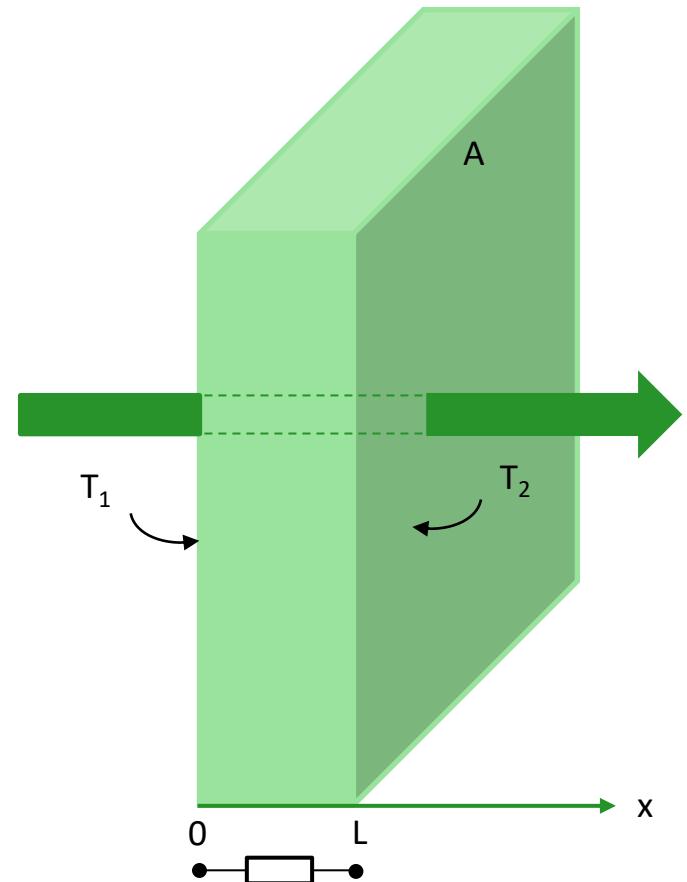
- A teljes A felszínre

$$\bullet \quad P = \lambda A \frac{T_2 - T_1}{L} = \frac{T_2 - T_1}{\frac{1}{\lambda} A} = \frac{T_2 - T_1}{R_{TH}}$$

- Ahol R_{TH} [K/W] a hőellenállás

- Ez természetesen csak egy **közelítés!**

- A hőáramlás 3D probléma
- Az elektromosságtanban min. 10^{10} arány van a vezető és szigetelő anyagok vezetőképessége között
- Itt kb. 10^3 pl. réz kb. $400\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$, üveggyapot $0,4\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$

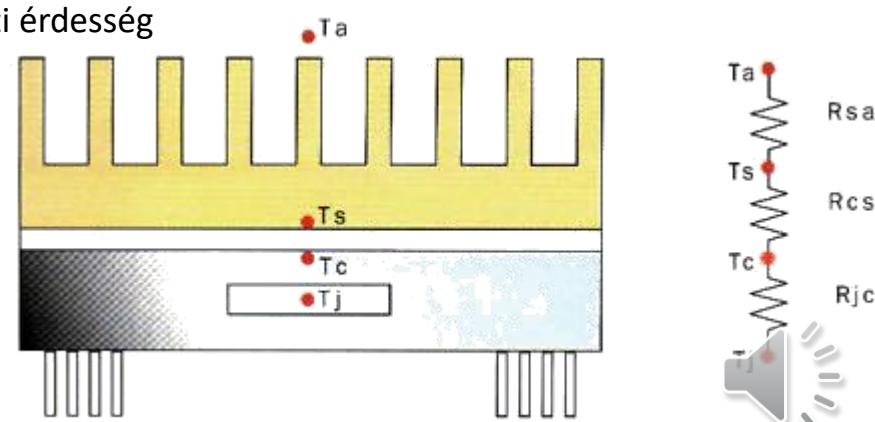
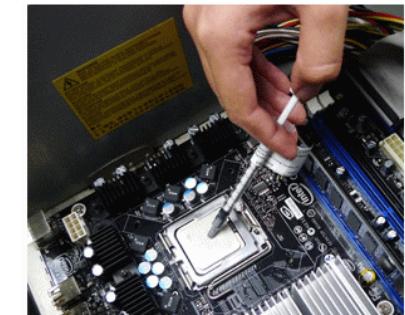


$$R_{TH} = \frac{L}{\lambda A}$$



Az egyszerű modell

- Leggyakrabban arra vagyunk kíváncsiak, hogy egy adott külső hőmérséklet és teljesítmény esetén az integrált áramkör belső hőmérséklete (a továbbiakban junction) a kritikus határ alatt marad-e, vagy sem. (adatlap megadja, pl. 125°C)
- Nagy biztonsági tartalékkal dolgozunk, így a hőellenálláson alapuló egyszerű közelítések jogosak.
- Az integrált áramkört két vagy három hőellenállással modellezük:
 - A szilícium chiptől a tok felszínéig: R_{THJC}
 - A tok és hűtőborda közötti kitöltő anyag** (hővezető zsír, TIM, thermal interface material)
 - Feladata a jó hővezetés biztosítása – a felületek közötti érdesség kitöltése, hogy a rossz hővezető levegő ne maradjon meg.
 - A hűtőborda hőellenállása
 - (ha kényszerített légárammal hűtött, pl. függ a ventilátor fordulatszámától, stb.)



Példa

- Adott egy szerver CPU, átlagos teljesítménye TDP = 80W
 - $R_{THjc} = \underline{0,4 \text{ K/W}}$ (1W teljesítményre 0,4°C hőmérséklet növekedés)
 - a hűtésre a katalógus adat: $R_{THca} = \underline{0,09 \text{ K/W}}$ (Spire Gemini Rev. 3.)
- Mekkora lesz a CPU belső hőmérséklete, ha a külső hőmérséklet 25°C?
 - $T_J = P(R_{THjc} + R_{THca}) + T_A = \boxed{64,2^\circ\text{C}}$
- 100W-os csúcsteljesítményen járatva, egy rosszabb minőségű hűtővel, egy forró nyári napon, elromlott légkondicionáló esetén?
 - Ha $R_{THca} = \underline{0,315 \text{ K/W}}$ (Spire Rotor Rev.4.)
 - $T_J = P(R_{THjc} + R_{THca}) + 35 = \boxed{106,5^\circ\text{C}}$



Termikus tervezési teljesítmény

■ (TDP – thermal design power)

- Egy átlagos hőteljesítmény, amire a hűtési rendszert méretezni kell.
- A csúcs ezt meghaladhatja, általában 50%-al.
 - Intel mikroprocesszorokban 3 TDP profil is van
 - Nominális
 - cTDP Down – „csendes” működés, kisebb fordulatszámon jár a ventillátor
 - cTDP UP – nagyobb hűtőteljesítményt igényel – nagy fordulatszám (hangos)
 - A belső szabályozás (órajel, tápfeszültség) nem engedi ezen teljesítmények meghaladását



Példa, Intel processzorok 2020 őszén

Product Collection	11th Generation Intel® Core™ i7 Processors	10th Generation Intel® Core™ i7 Processors
Processor Number <small>i</small>	i7-1185G7	i7-10700T
Status	Launched	Launched
Launch Date <small>i</small>	Q3'20	Q2'20
Lithography <small>i</small>	10 nm SuperFin	14 nm
Use Conditions <small>i</small>		PC/Client/Tablet
Performance		
# of Cores <small>i</small>	4	8
# of Threads <small>i</small>	8	16
Max Turbo Frequency <small>i</small>	4.80 GHz	4.50 GHz
Cache <small>i</small>	12 MB Intel® Smart Cache	16 MB Intel® Smart Cache
Bus Speed <small>i</small>	4 GT/s	8 GT/s
Configurable TDP-up Frequency <small>i</small>	3.00 GHz	
Configurable TDP-up <small>i</small>	28 W	35 W
Configurable TDP-down Frequency <small>i</small>	1.20 GHz	1.30 GHz
Configurable TDP-down <small>i</small>	12 W	25 W
Sockets Supported <small>i</small>	FCBGA1449	FCLGA1200
Max CPU Configuration	1	1
T _{JUNCTION} <small>i</small>	100°C	100°C
Package Size	46.5x25	37.5mm x 37.5mm



Természetes hőátadás

■ Közegáramlás

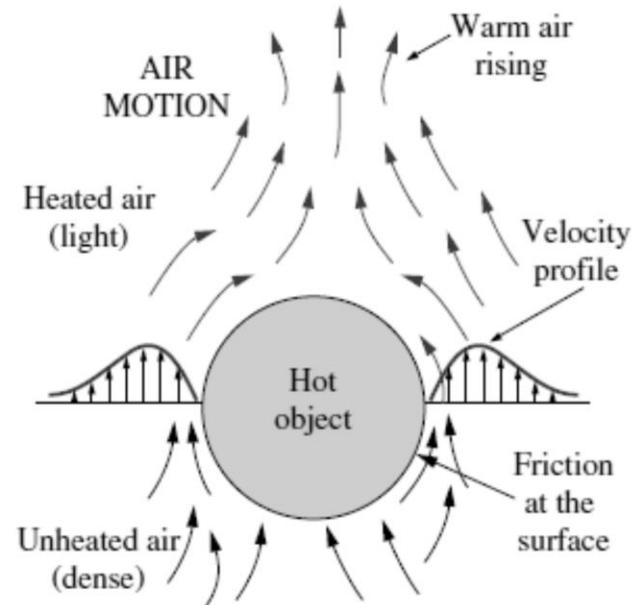
- A melegebb hűtőközeg sűrűsége csökken, így felfele száll (ha van gravitációs tér...)
- $P_{conv} = h_{conv}A_s(T_s - T_f)$
- Ahol h a hőátadási tényező

■ IT eszközökben az áramlás lamináris (örvénymentes)

- A hőmérsékleti különbségek általában 100°C -nál kisebb, a jellegzetes méretek pedig a cm-m nagyságrendjében vannak.

■ A hőátadási tényező levegőre, atmoszférikus nyomáson:

- $$h_{conv} = K \left(\frac{\Delta T}{L_c} \right)^{0,25} [\text{W/m}^2\text{K}]$$
- Ahol K egy konstans, geometriától és orientációtól függ, L_c a karakterisztikus méret



Hőátadási együtthatók közelítő számítása

Geometria	Karakterisztikus hossz	Hőátadási tényező
	magasság	$h_{conv} = 1,42 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{0,25}$
Felülről 	$\frac{4A}{p}$ (p – kerület)	$h_{conv} = 1,32 \left(\frac{\Delta T}{L_C} \right)^{0,25}$
alulról 	$\frac{4A}{p}$ (p – kerület)	$h_{conv} = 0,59 \left(\frac{\Delta T}{L_C} \right)^{0,25}$
Egy alkatrészre a PCB-n	alkatrész mérete	$h_{conv} = 2,44 \left(\frac{\Delta T}{L_C} \right)^{0,25}$

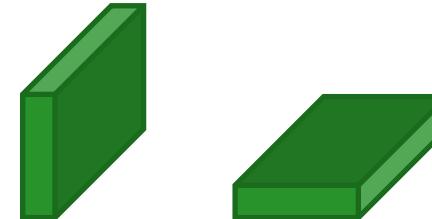
■ Közelítő, de jó összefüggések – mérések alapján.

- Minél nagyobb a hőmérséklet különbség, annál nagyobb a hőátadási együttható
- Erőteljesen függ a geometriától
 - Tehát nem mindegy, hogyan helyezkedik el a disszipáló alkatrész



Példa: mekkora a hőátadás egy 2,5" HDD-n?

- Legyen 10°C-al magasabb hőmérsékletű
 - 2,5" form factor: 100mm × 69,85mm × 9,5mm
 - Kiszámolva és behelyettesítve, az eltávozott hő, mW



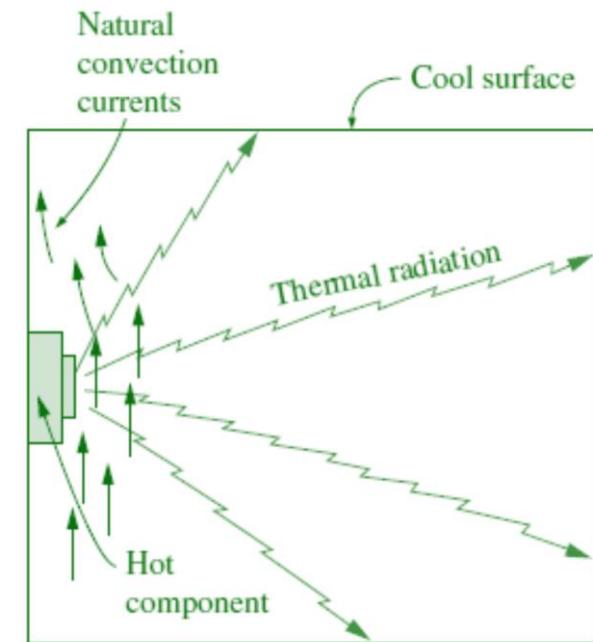
	Függőlegesen	Vízszintesen
Oldal	894	110
Felül	18	129
Alul	8	58
Összesen	920	298

- Tehát a függőlegesen szerelt HDD sokkal jobban hűl természetes konvekcióval.

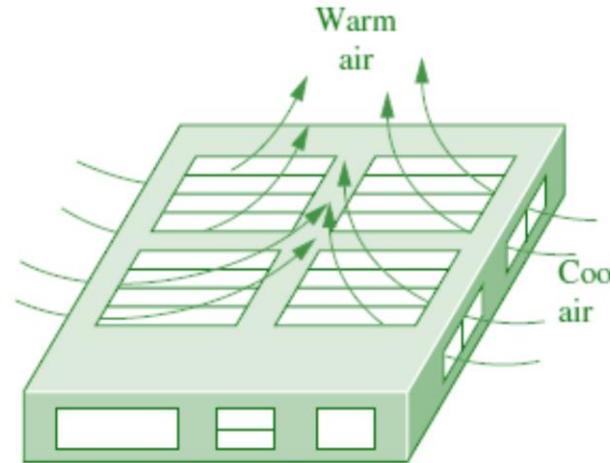


Hősugárzás

- Ha meleg felszín teljesen körül van véve hidegebb környezettel
 - Hősugárzással történik a hőleadás
 - Fontos a felület emisszivitási tényezője
 - Műanyag, festett felületek esetén nagy
 - Pl. hűtőbordákat feketére festenek...
 - (Itt a "fekete" azt jelenti, hogy az emisszivitás nagy IR tartományban. De általában a fekete színű festéknek nagy az emisszivitása)
 - $P_{rad} = \epsilon A_s \sigma (T_S^4 - T_A^4)$
 - (ökol szabály – kb. megegyezik a természetes konvekcióval)
 - Ha viszont a környezet hőmérséklete kb. megegyezik, akkor a nettó hősugárzás kb. 0.



Passzív hűtés megvalósítása



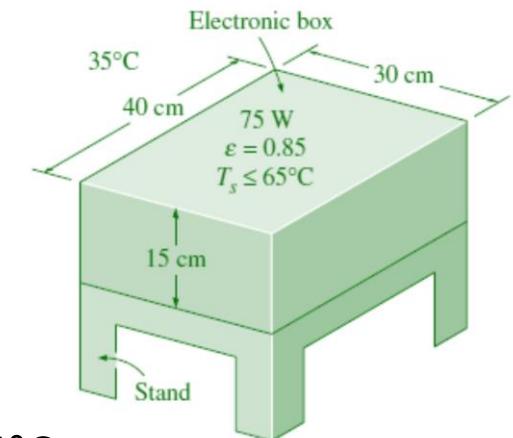
- Az eszköz oldalán és tetején elhelyezkedő nyílásokkal.
 - Az oldalán elhelyezett nyílásokon áramlik be a hideg levegő, ami felmelegedve az eszköz tetején távozik.
 - Tipikusan a SOHO eszközök
 - Nem szerelhetők rack-be.



Egy zárt doboz hűtése

- Vizsgáljuk meg az ábrán látható zárt dobozt!

- Mérete: 15cm×30cm×40cm
- 75W teljesítményt disszipál az elektronika.
- Egy állványon áll, ennek hővezetését elhanyagoljuk.
- 35°C szobában nem lépheti át a külső hőmérséklet a 65°C-t
- Kell-e ventillátor?



- MEGOLDÁS

- Nézzük meg mi történik, ha 65°C a felszín!

- Számítsuk ki a kisugárzott teljesítményt!
 - $$P_{rad} = \epsilon A_s \sigma (T_s^4 - T_A^4) = 0,85 \cdot 0,33 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} (338^4 - 308^4) = 64,5 \text{ W}$$
 - (jó lesz ez... ☺)



■ Számítsuk ki a konvekciós hőátadási tényezőket

- Oldalfalakra:

$$\bullet \quad h_{side} = 1,42 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{0,25} = 1,42 \left(\frac{30}{0,15} \right)^{0,25} = 5,34 \text{ W/m}^2 \text{K}$$

- A tetejére:

$$\bullet \quad L_C = \frac{4A}{p} = \frac{4 \cdot 0,12}{2 \cdot 0,7} = 0,34 \text{ m}$$

$$\bullet \quad h_{top} = 1,32 \left(\frac{\Delta T}{L_C} \right)^{0,25} = 1,32 \left(\frac{30}{0,34} \right)^{0,25} = 4,05 \text{ W/m}^2 \text{K}$$

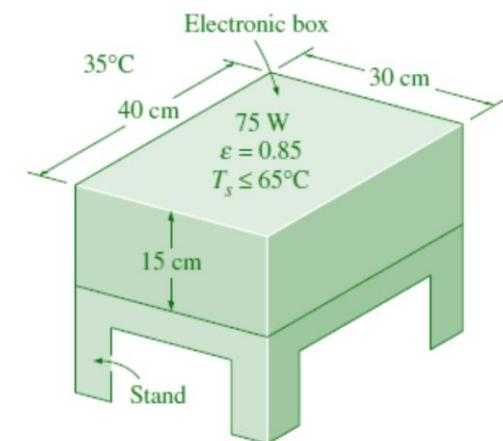
■ Számítsuk ki a hőátadást!

$$\bullet \quad P_{conv,side} = h_{side} A_{side} \Delta T = 5,34 \cdot 0,21 \cdot 30 = 33,6 \text{ W}$$

$$\bullet \quad P_{conv,top} = h_{top} A_{top} \Delta T = 4,05 \cdot 0,12 \cdot 30 = 14,6 \text{ W}$$

$$\bullet \quad \text{Összesen } P = 64,5 + 33,6 + 14,6 = 112,7 \text{ W}$$

- Tehát nem kell aktív hűtés



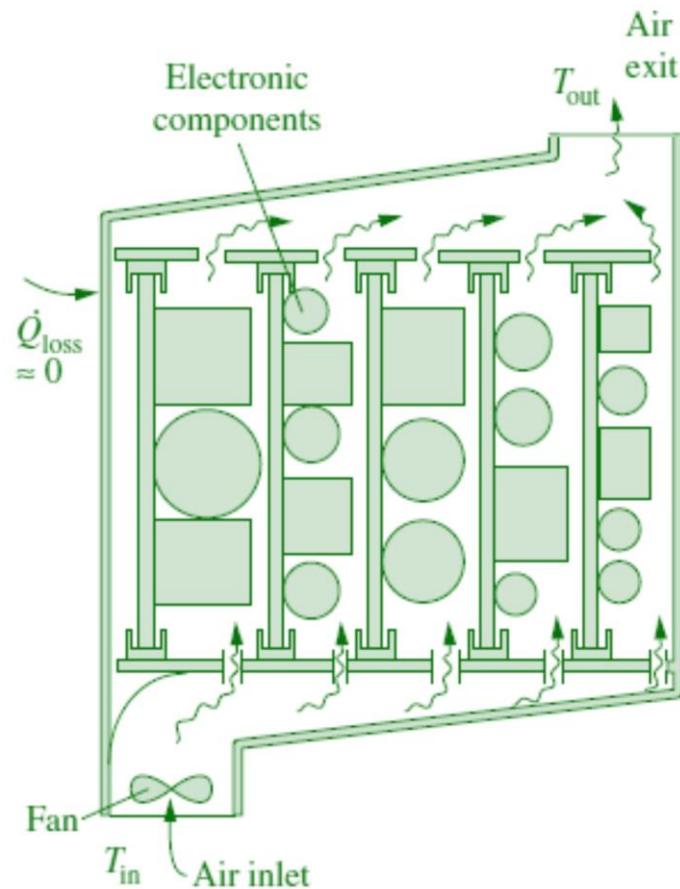
Kényszerített hűtés

- Az anyagtranszportot energia befektetésével hozzuk létre.
 - (hűtőventillátor, szivattyú stb.)
- A hűtőközeg felveszi az elszállítandó hőt
 - Hőátadással: ebben az esetben a hűtőközeg hőmérséklete megmelegszik
 - Halmazállapot változással: ebben az esetben a hűtőközeg halmazállapota megváltozik
 - A halmazállapotváltozáshoz szükséges energia nagy lehet, így a hűtés hatékony.

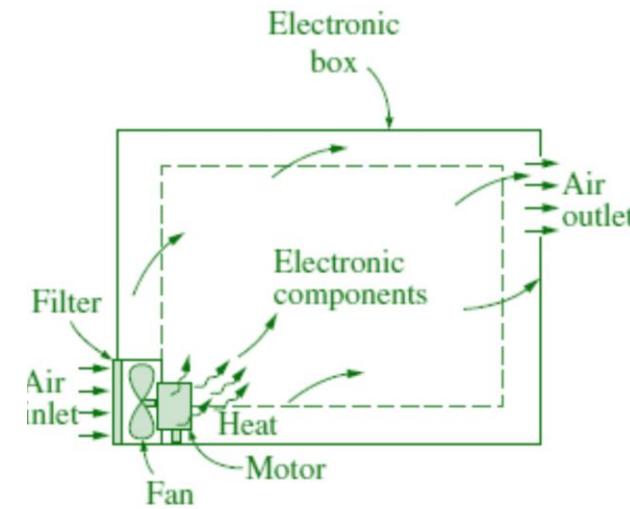
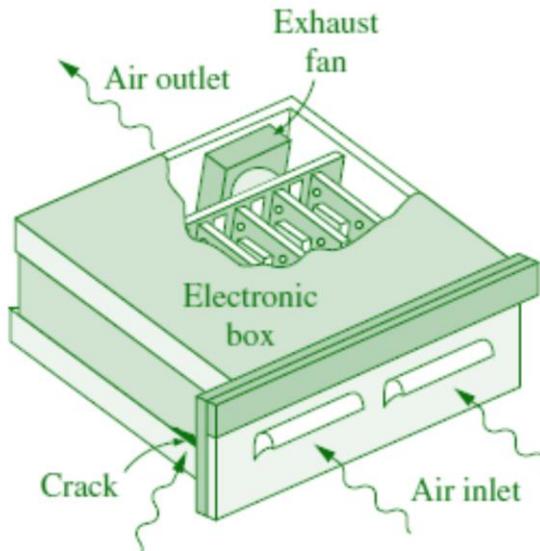


Kényszerített léghűtés

- Feltételezzük, hogy a hő nagy részét a légáram veszi fel.
- Ebben az esetben
 - $P = mc_p(T_{out} - T_{in})$
 - c_p a levegő fajhője, m pedig a levegő tömeg árama, kg/s
 - A ki és belépő levegőhőmérsékletének mérésével a hűtőventillátor fordulatszáma szabályozható
- Jól méretezett léghűtés esetén
 - A hőmérséklet emelkedés kb. 10°C ,
 - A kilépő levegő hőmérséklete max. 70°C
 - Ez biztosítja azt, hogy semelyik alkatrész sem melegszik fel kb. 100°C fölé



Kényszerített hűtés, elrendezések

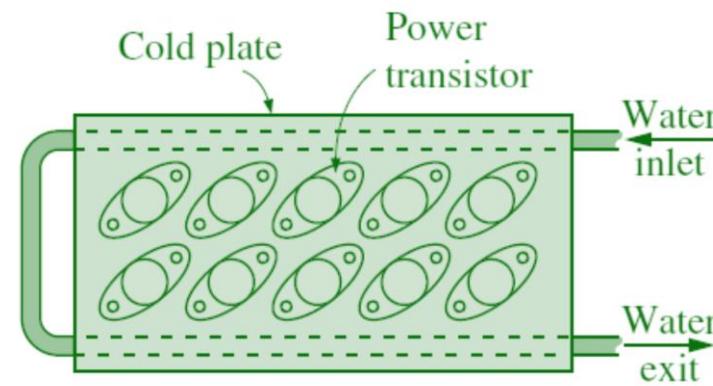


- Tipikusan rack-be szerelhető berendezések
 - Előlapon belépő nyílások, hátoldali szívóventillátor
 - Hátrány: por, szennyeződés bejut a berendezésbe
 - Vagy előlapi ventillátor
 - Van lehetőség szűrésre
 - Itt a ventillátor motorjának hője előmelegíti a levegőt



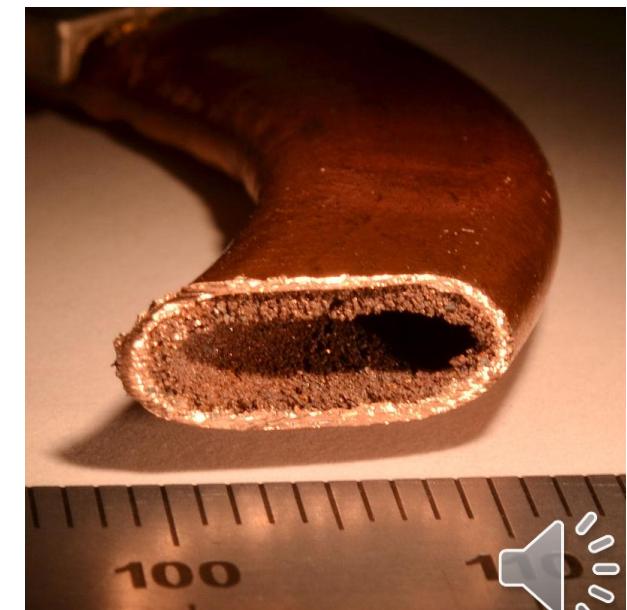
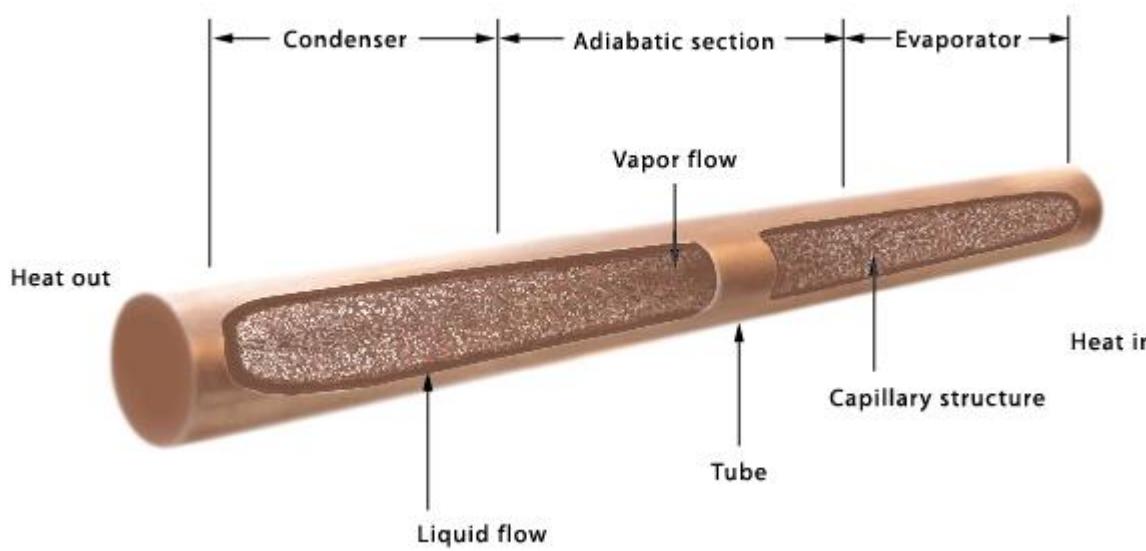
Folyadékhűtés

- Mivel a folyadékok fajhője sokkal nagyobb, nagyon jó hűtés érhető el, de a technológia bonyolult (levegő kb. 1kJ/kgK , víz $4,2\text{kJ/kgK}$)
 - Szivárgás
 - Korrózió
 - a levegő páratartalmának lecsapódása a hűtőn
- Direkt vagy indirekt
 - Direkt esetben a hűtőfolyadék közvetlenül érintkezik a hűtendő felszínnel
 - Indirekt esetben egy jó hővezető anyagban (pl. rézben) keringetik a folyadékot.
 - Ez az ún. hideglemez (cold-plate)



Hő cső (heatpipe)

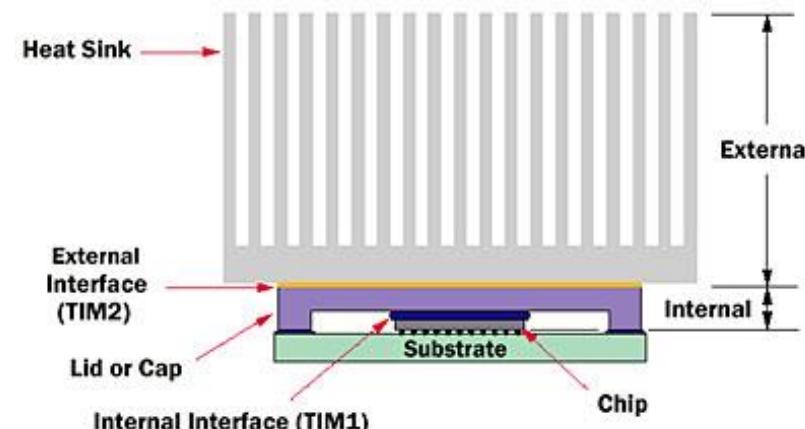
- Folyadékok esetében a párolgáshő nagy. (víz: $L_f=2256\text{ kJ/kg}$)
 - A cső meleg végén a folyadék elpárolog, ezáltal hűti a hűtendő eszközt
 - A gáz a cső másik végén, ahol aktív hűtés van általában lecsapódik
 - A lecsapódott folyadék, a cső falának speciális hajszálcsöves kiképzése miatt visszaszivárog.
 - IT eszközökben általában réz hőcső, a folyadék pedig víz (alacsony nyomáson)



Hűtőeszköz kiválasztása

- Legfontosabb szempontok és tényezők:

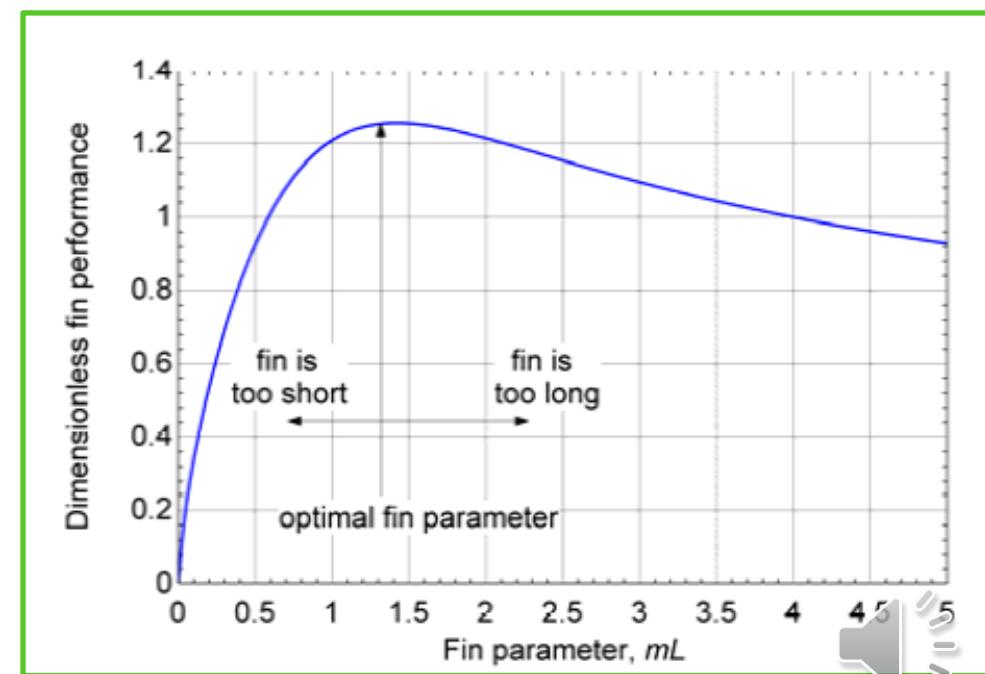
- ÁR ~ anyag / kidolgozottság (*pl.: leggyakrabban alumínium vagy réz, de egzotikus eszközök – heat pipe – különféle drága megmunkálási lépések*)
- Méret / geometriailag befér e a megadott helyre (*pl.: rack fiók*)
- Tömeg / orientáció (*pl.: Ha rázkódás éri kibírja e? Rajta marad a hűtendő eszközön?*)
- Működési határfeltételek (*pl.: heat pipe adott hőmérséklettartományban tud csak hatékonyan működni*)
- Ergonómia (*pl.: zajártalom kérdése, rezgés, stb.*)



Hűtőeszköz kiválasztása

■ Hűtőbordák esetén

- Hűtőborda szárnyainak (fin) hossza
 - Passzív / aktív hűtés esetén is fontos
 - Hűtőborda szárnyainak sűrűsége / elrendezése
 - Főleg aktív hűtés esetén fontos
- Hűtőborda szárnyain a hőmérséklet a vége felé folyamatosan csökken, így fokozatosan csökken a hőcsere
- Túl hosszú szárnyak esetén szárnyak végén a hőmérséklet azonos lehet a környezet hőmérsékletével
- így felesleges részei lesznek a hűtőbordának (*ár, tömeg vonzat*)
- **Van optimum!**
- **És szimulátorral megtalálható!**



Források, ajánlott irodalom, érdekességek

- [Dark silicon and the end of multicore scaling](#)
- [Intel Xeon Thermal Design Guide](#)
- [Spire CPU hűtők](#)
- [Intel Core processzorok, összehasonlíthatóan](#)





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

IT eszközök technológiája

12. előadás

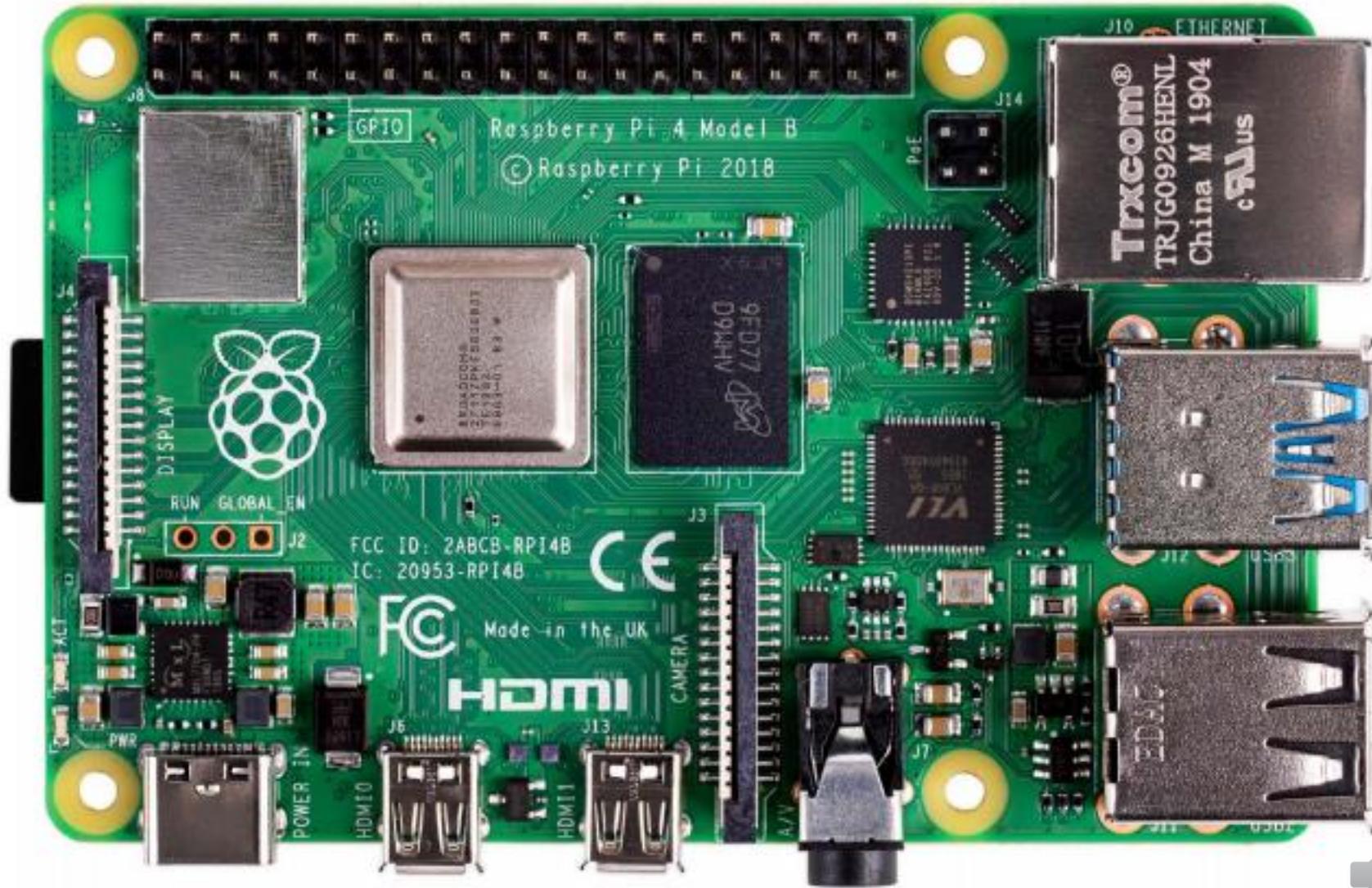
Az elektronikai technológia alapjai



- A nyomtatott huzalozású lemez (PCB)
- Alkatrészek szerelése
 - Felületszerelés (SMD)
 - Furatszerelés (TH)
- Alkatrészek
 - Passzív alkatrészek
 - Félvezetők
- Forrasztás



Raspberry PI 4



Nyomtatott huzalozású lemez (PCB)

■ Feladata

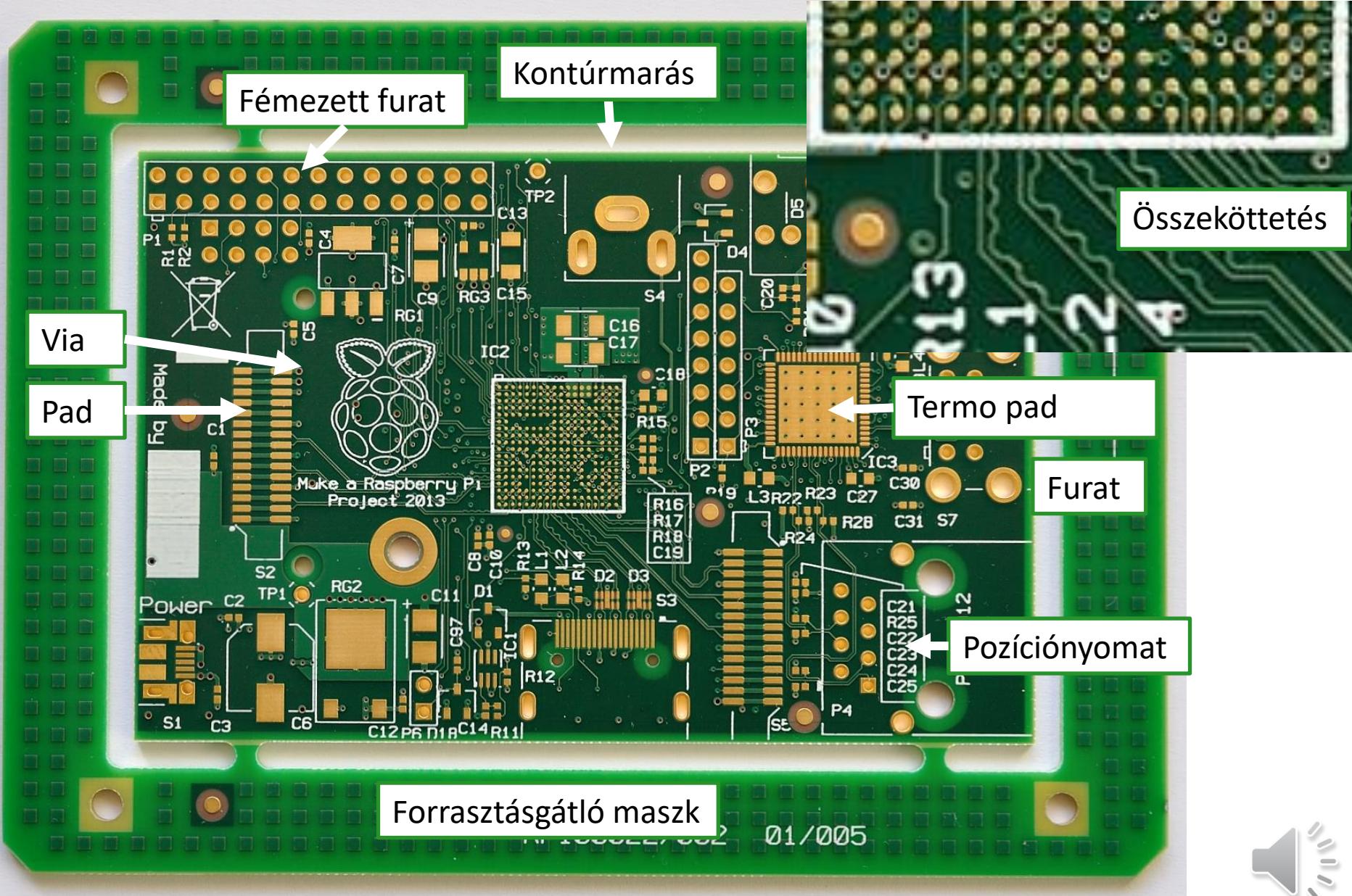
- Alkatrészek közötti elektromos összeköttetés megvalósítása
- Az alkatrészek mechanikai rögzítése
- Hőelvezetés

■ Elektromos összeköttetés

- Egy ill. kétrétegű (ez utóbbi általában alap)
- Többrétegű (lassan kezd alapkötetelménnyé válni a min. négy réteg)
 - Tápfeszültség
 - Föld
 - Két jel réteg
- Nagyobb bonyolultságú eszközök
 - Pl. alaplap 6-8-12-16 réteg, RPi4 – 6 rétegű (?)
 - Rétegszám növekedésével az ár növekszik, viszont kisebb helyen huzalozhatók össze ugyanazok az alkatrészek, sűrűbb lesz a panel.



Egy PCB (Raspberry Pi)



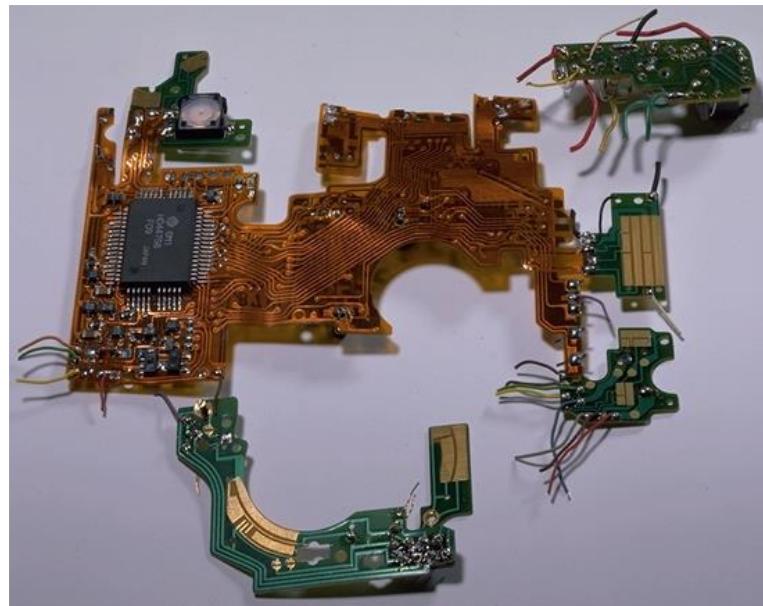
■ FR4 (FR == flame retardant)

- Epoxi-üvegszövet, amelyre rézfóliát préselnek.
- Különböző vastagságban, pl. 1,5mm, 2,4mm
- A rézfólia vastagsága általában 18 – 35 – 70 μm
 - (35 μm – 1 uncia réz / négyzetláb ☺)
- A mintázatot fotolitografiával, maratással és galvanizálással készítik el.
- A vezetékrétegeket fémezett furatok (ebbe alkatrész kerül), vagy viák segítségével lehet összekötni
- Többrétegű lemezeket egy vagy kétréteges lemezek összeragasztásával, vagy a rétegek ráépítésével lehet készíteni.
- Ahol nem lesz forrasztás, oda forrasztásgátló lakk kerül (lötstopp)
 - Általában zöld, de van más színben is
- A forrasztandó felületet passziválják, mivel a réz oxidálódik.
- Az alkatrészek azonosítását, beültetését segítő ill. egyéb feliratokat (pl. revíziószám) helyeznek el.



■ Flexibilis hordozók

- leginkább szalagkábel kiváltásra, de hordozható, kisméretű eszközökben sok ilyen található
- Mozgó komponensek, pl. nyomtatófej stb.
- Műanyag fólia, réz huzalozással
 - Többrétegű is van, így a teljes rendszer „behajtoghatható”
 - Kevesebb helyett foglal 3D-ben.



- A hordozó alumíniumból készül
 - Jó hővezető, közvetlenül felszerelhető hűtőbordára, hideglemezre stb.
 - Az alumínium felső részét eloxálják (az Al_2O_3) szigetelő, kb. 100 μm szélességben.
 - A szigetelőre kerül a réz vezetékhálózat.
- Teljesítmény eszközök, nagy fényerejű LED-ek hordozója



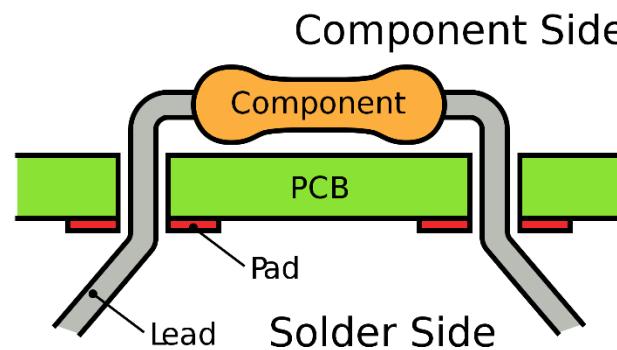
Alkatrészek

- Passzív elektronikai elemek
 - Ellenállás, kondenzátor, induktivitás, transzformátor
- Félvezetők
 - Diszkrét (1 funkció)
 - Diódák
 - Tranzisztorok
 - Stb.
 - Integrált áramkörök
- Mechanikai elemek
 - Kapcsolók, nyomógombok
 - Csatlakozók
- Egyéb



Furatba szerelhető (through hole) alkatrészek

- Manapság leginkább a mechanikai tartás miatt alkalmazzák
 - Nagyméretű alkatrészek, csatlakozók esetén
- Az alkatrész lábait méretre vágják és hajlítják, majd a furatba behelyezik és forrasztják
 - Szokásosan egy oldalon vannak az alkatrészek, ez az ún. alkatrész oldal, a másik oldal pedig a forrasztási oldal.
 - Kisebb alkatrészsűrűség és nehezebb szerelhetőség



Felületre szerelhető (SMD) alkatrészek

- A furatba való ültetésnél egyszerűbb, olcsóbb és helytakarékosabb technológia a felületszerelés.
 - Nem kell fúrni!
 - Mindkét oldal használható alkatrész céljaira
- Ebben a technológiában az alkatrész tokján lévő forraszfelületek vagy kis tappancsok szolgálnak az elektrомos bekötésre és az alkatrész mechanikai rögzítésére is.
- A hordozón (PCB) furat nélküli pad-ekre ültetjük az alkatrészt.
- Diszkrét alkatrész esetén a méretet egy kóddal adják
 - Pl. 0402 - hossz (L) és szélesség (W) az inch századrészében
 - (vagy 10 mil-ben ☺)
 - A 0402 méretkód kb. 1,0mm × 0,5mm



Pontosság

- Névleges érték
- Pontosság – névleges értéktől megengedett eltérés
- Szabványosították, ezek az ún. értéksorok.
 - (úgy van felosztva a tartomány, hogy egy adott eltéréshez ne legyen átfedés a névleges értékek között)
 - E6($\pm 20\%$), E12($\pm 10\%$).. E96 ($\pm 1\%$) stb.
 - Az E után következő szám jelzi azt, hogy hány érték van egy dekádban. (egy tízszeres intervallumban, pl. 10 és 100 között)
 - Az E6 sor: 10, 15, 22, 33, 47, 68
 - (Pl. az első elem max értéke 12, a második min. értéke szintén 12)
 - A szorzó $\sqrt[6]{10} = 1,4678$
 - (értelemszerűen kerekítve az értékeket)





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Ellenállások



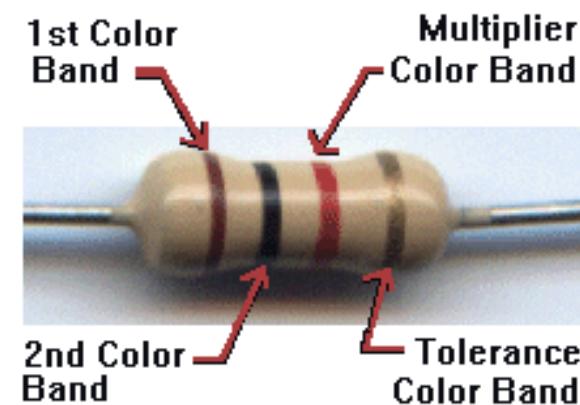
Ellenállások

■ Furatszerelt

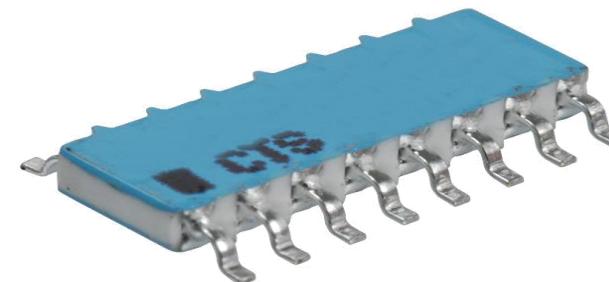
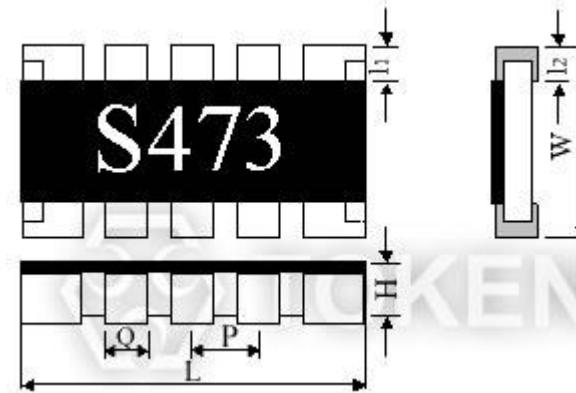
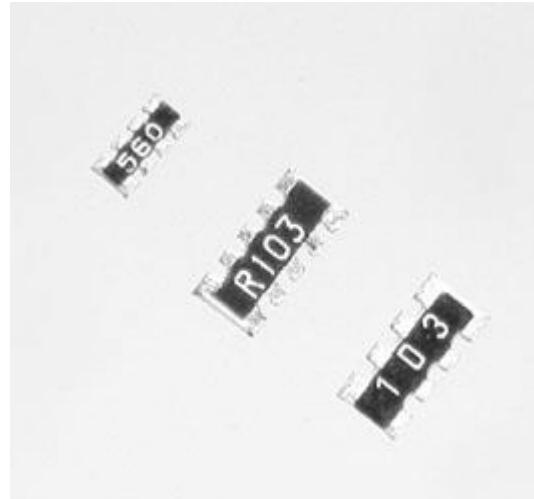
- Az ellenállások értékét színkóddal jelölik
 - [\(Google: resistor color chart\)](#)
- A felirattal ellentétben a színkód bármilyen pozícióban beültetve látszik

■ SMD

- Az ellenállás értékét vagy ráírják
 - Ekkor R ill. k kerül a tizedespont helyére, pl. 4k7
4,7kΩ
- Vagy egy 3 vagy 4 jegyű szám
 - Ahol az utolsó számjegy az 10-es hatvány
 - Pl. 2512 → $251 \cdot 10^2 = 25,1\text{k}\Omega$
- Vagy egy kód, pl. 01A = 100Ω

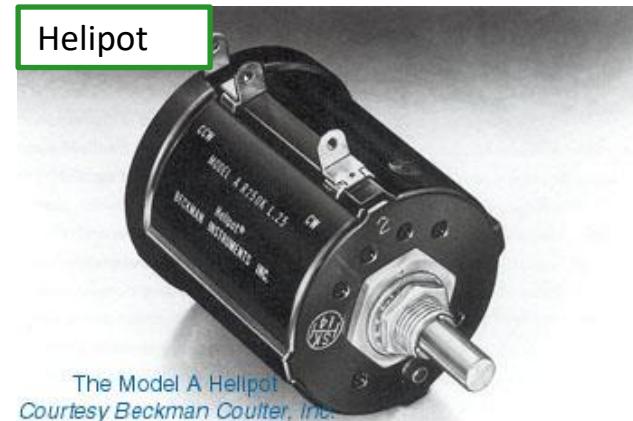
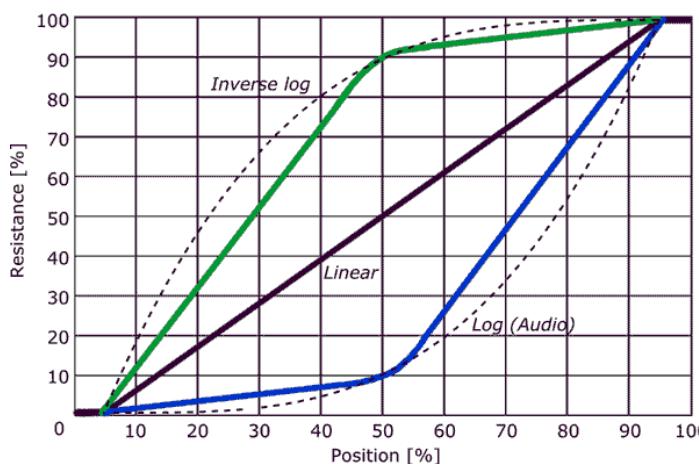


- Több ellenállás, egy tokban
 - Kisebb helyet foglal, könnyebben szerelhető



Potencióméterek

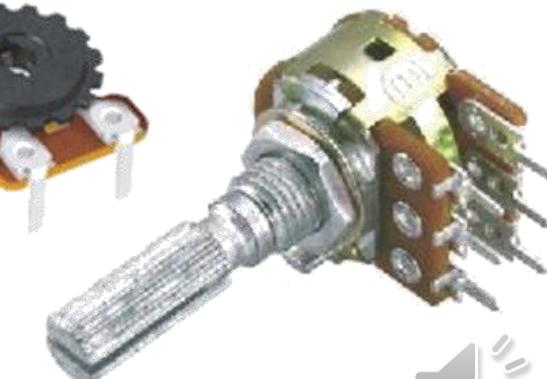
- Változtatható ellenállások (változtatható osztó)
- Lineáris
 - Általános célra
- Logaritmikus
 - Hangerőszabályozáshoz
- Kiviteli forma
 - Csúszó
 - Csavarógombos
 - Trimmer (beállító)



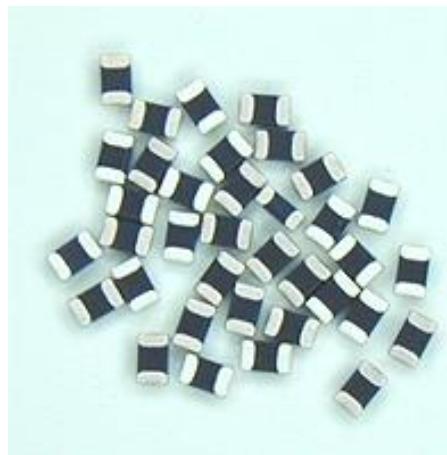
Trimmer



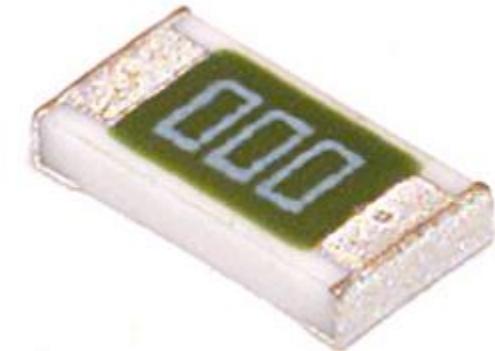
Sztereó



- Pozitív (PTC), vagy negatív (NTC) hőmérsékleti együtthatójú ellenállások...
- Egyszerű, olcsó alkatrészek
- Hőmérsékletmérés (mindenütt)
 - PTC
 - Áramkör védelem túláram ellen.
 - Nagy áram esetén melegszik, megnő az ellenállása, ami korlátozza az áramot
 - NTC
 - Soft start áramkörök (kisebb árammal indul, majd később megnövekszik az áram)



- Jumper ellenállás
- 0 Ohmos, rövidzár.
 - Beültetéskor tudjuk konfigurálni az áramkört.
- Fuse ellenállás
 - Túláram-védelem
 - Ha az átfolyó áram túl nagy, megszakad.
 - (nem tüzesedik át, mint egy hagyományos ellenállás)





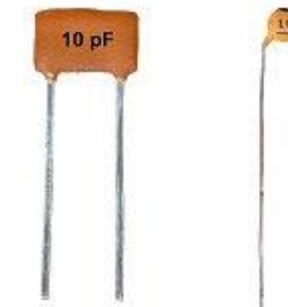
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Kondenzátorok

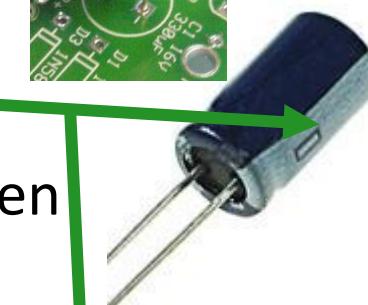


■ Kerámiakondenzátorok

- Nagyfrekvencián alkalmazhatók
- Viszonylag kis kapacitásúak (pF-nF)
- Nem polarizáltak
- Kis soros ellenállásúak
- Kis parazita induktivitásuk van (SMD!)
- Furat- és felületszerelt kivitelben is kaphatók
- Alkalmazási terület:
 - Tápfeszültség nagyfrekvenciás szűrése
- Értéke:
 - $C = \text{számérték} \cdot 10^{\text{utolsó számjegy}} \text{ pF}$,
 - azaz pl. 223 -> $22 \cdot 10^3 \text{ pF}$, azaz 22 nF

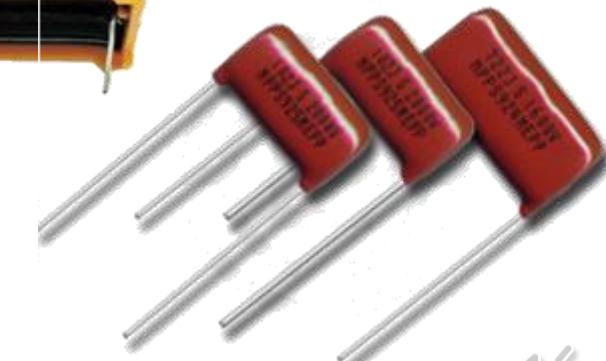
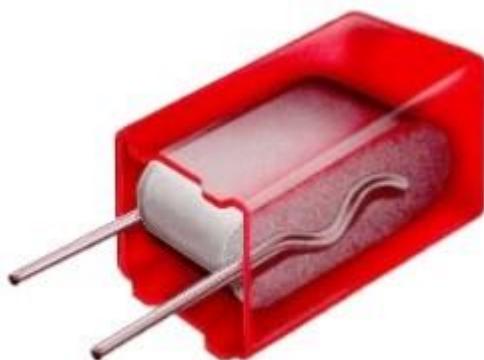


- Nagy kapacitásérték (tip. nF - 10000 μ F...)
- Kisfrekvenciásak (tipikusan hangfrekvencia)
- Polarizáltak
 - Ellentétes polaritással nem szabad bekötni!
- A hőmérséklet csökkenésével a kapacitás csökken
- Általában nagy a soros parazita ellenállásuk
- Alkalmazási terület:
 - Energiatárolás (tápok pufferei, Low ESR!)
 - Kisfrekvenciás szűrés



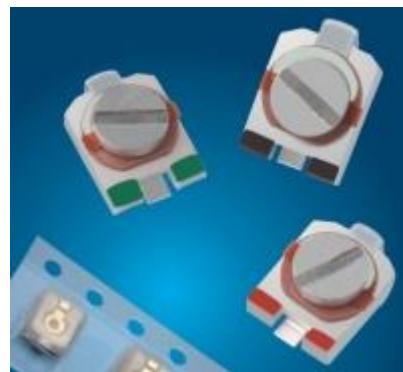
Fóliakondenzátorok

- Értékük a pF – μ F tartományban van
- Nem polarizáltak
- Közepes-nagyfrekvenciásak
- Kis veszteségűek!
- Viszonylag nagy méretűek
- Nagy feszültségre is készülnek
- Alkalmazási területek:
 - Jelfeldolgozás!
 - Nagyfesz. szűrők, leválasztók, stb.



Trimmer kondenzátorok

- Dielektrikumuk levegő, kerámia vagy műanyag
- Hangolásra használatosak, pl. rádiótechnikában
- Értékük néhány pF

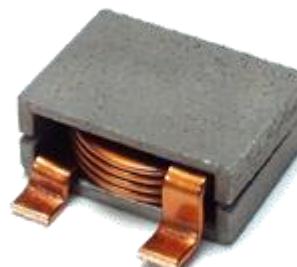
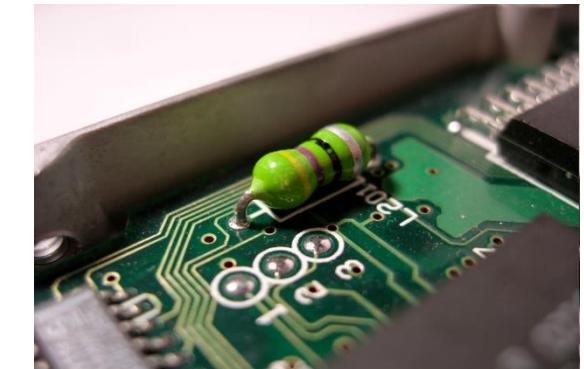


■ Kisméretű furatszerelhető induktivitások

- Festékkel passzivált axiális vagy radiális (régebbi) kivitelű szolenoidok
- Régebben színkódot használtak

■ Kis méretű felületszerelhető induktivitások

- A nagyobbak értékkódosak és ferrit magjuk van.
- A kód hasonló, mint az eddigiek, az utolsó számjegy a helyiérték, általában μH -ben.



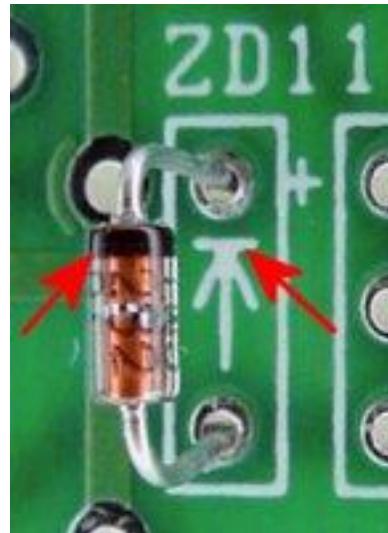


Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Félvezetők



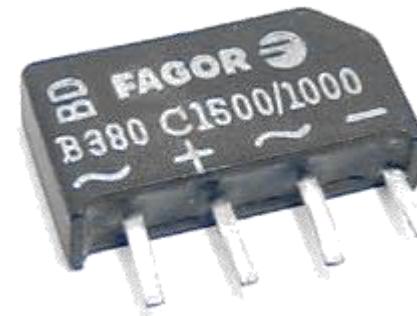
- A katódot jelzi a vonal



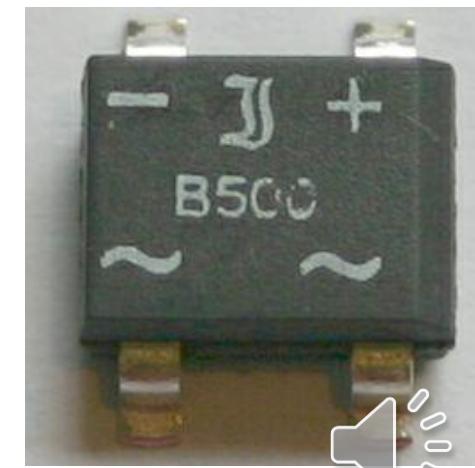
Graetz-hidak



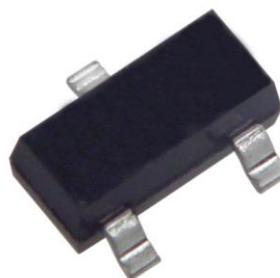
Mini MELF tok



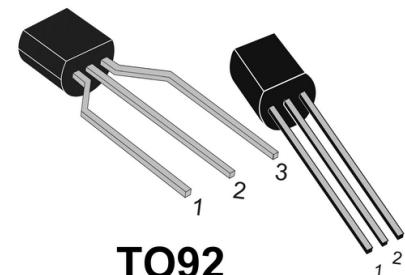
Metal electrode leadless face



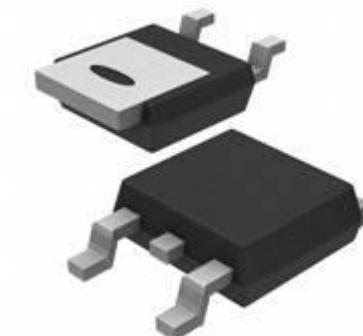
- Teljesítménytől függően különböző méretű tokok.



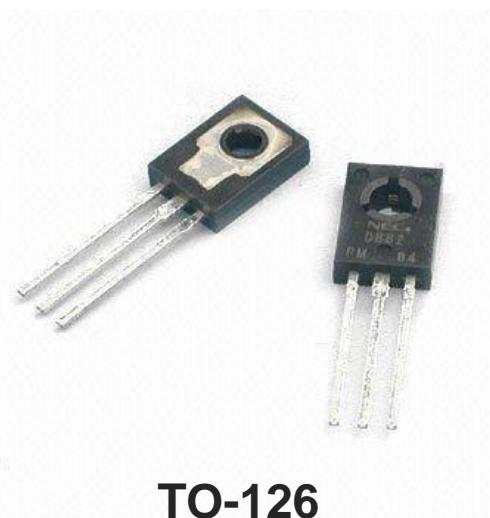
SOT23 (felületszerelt)



TO92



TO-263 (D2PAK)



TO-126



TO-220



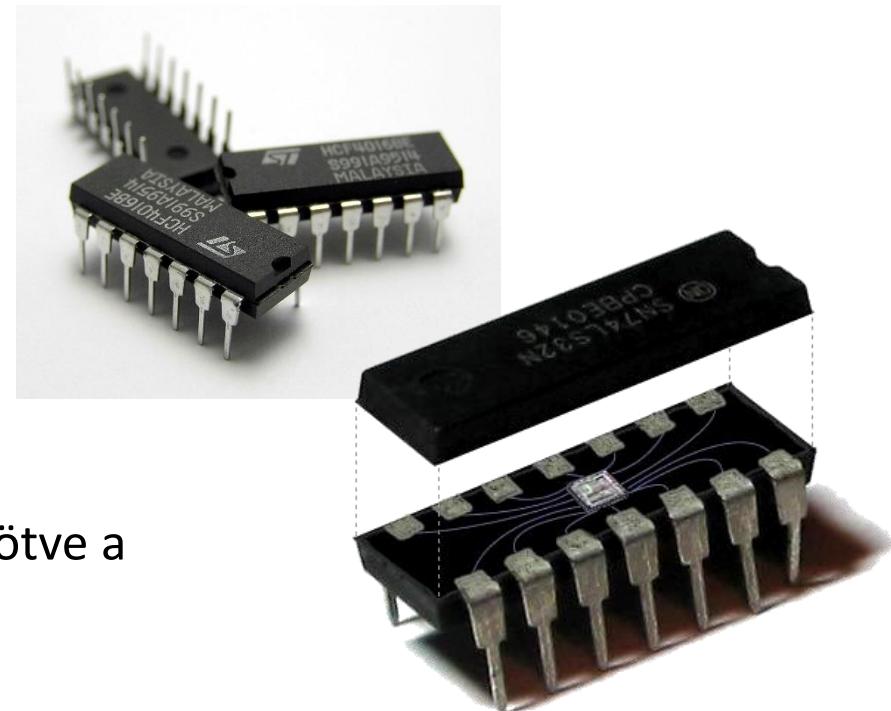
- Furatszerelt integrált áramkörök

- DIP (Dual-inline package)

- A szabványos lábtávolság 2,54mm (0,1" vagy 100mil)
- A sortávolság 0,3" vagy 0,5"
- Könnyen forrasztható kézzel, vagy foglalatba helyezhető
- Belsejében a chip aranyhuzallal van kikötve a hordozó megfelelő kivezetéséhez
- Egy biz. lábszám felett nehéz használni
 - (drága: multiplexált funkciókkal csökkentették a kivezetések számát)
 - Nagyfrekvenciás tulajdonságai rosszak

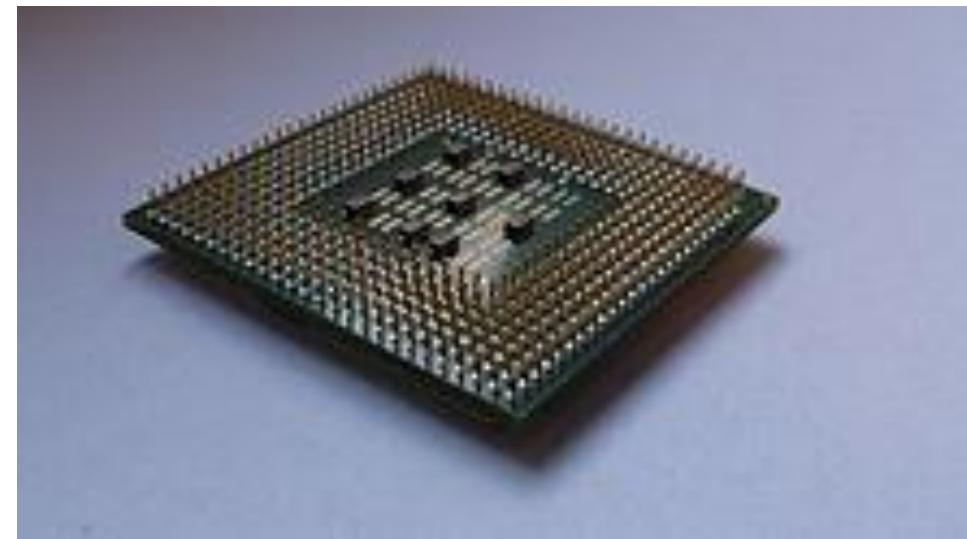
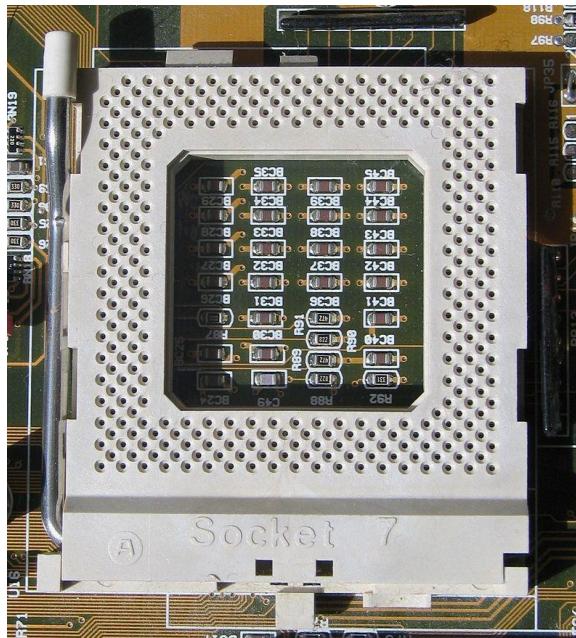
- SIP (Single inline package)

- Egy sorban vannak a lábak
- Elsősorba a hűtőbordára szerelhetőség miatt



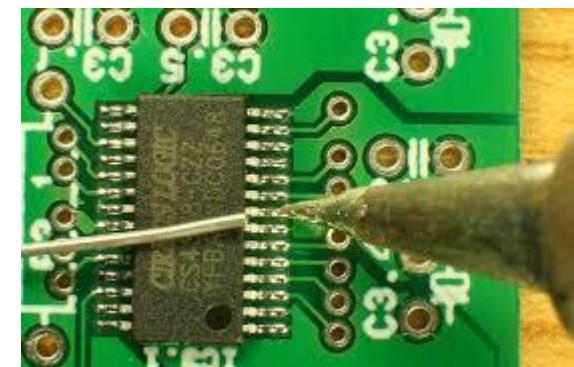
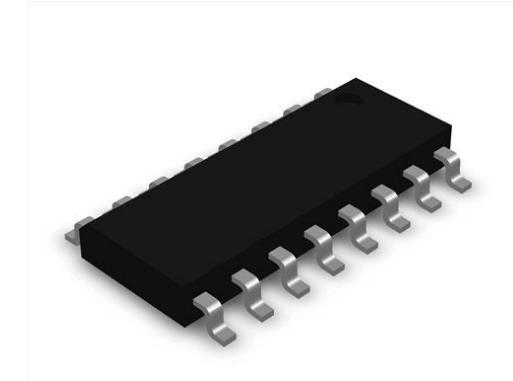
■ PGA

- Az IC foglalatba helyezhető vagy furatba forrasztható
- Tipikusan régebbi processzorok



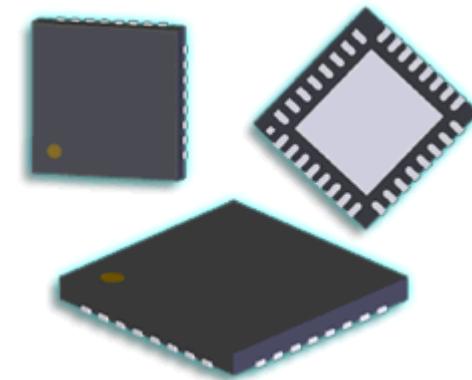
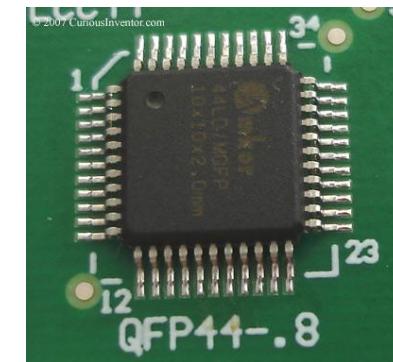
■ SOIC

- Small Outline Integrated Circuit
- A DIP felületre szerelhető verziója
- Kétoldalt vannak a kivezetések
- A lábak közötti távolság 0,05" (1,27mm) volt kezdetben, de csökkentették 0,5mm-ig
- Nagyon sok változata van
- SOP (small outline package)
- TSOP (thin small outline package)



Kerület mentén elhelyezkedő tokozások

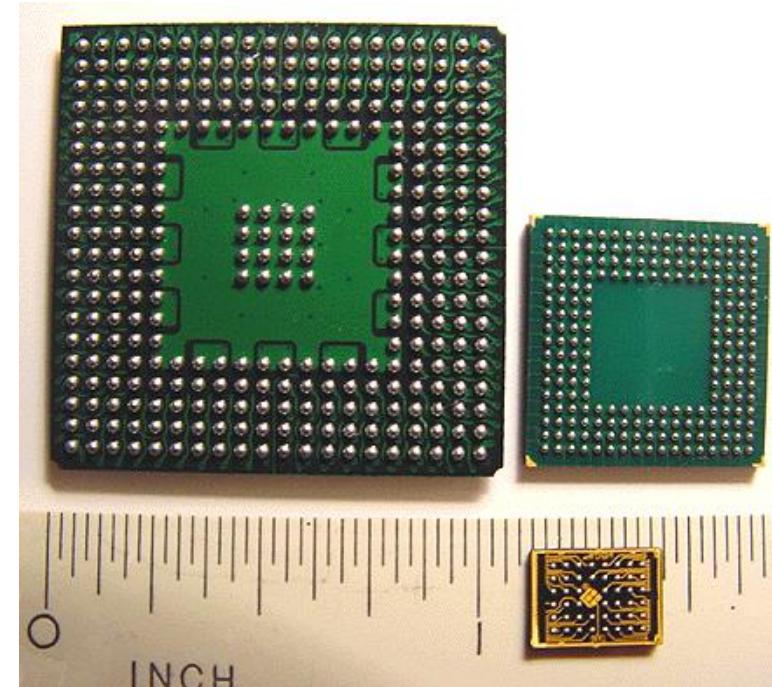
- A teljes kerület mentén elhelyezkednek a kivezetések
- QFP - Quad flat pack
 - Nagyobb a kivezetéssűrűség
- QFN – Quad flat no lead
 - A legkisebb tokok
 - Nagyon kedvező termikus szempontból
 - Nagyon kicsi a távolság a chip és a huzalozás között, kicsi az impedancia
 - Kézzel nehezen forrasztható
- PLCC – Plastic Leaded Chip Carrier
 - Felületszerelhető
 - Foglalatba is helyezhető



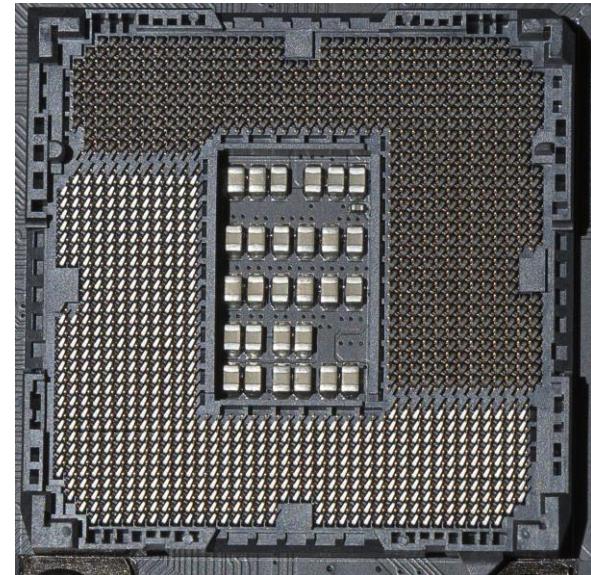
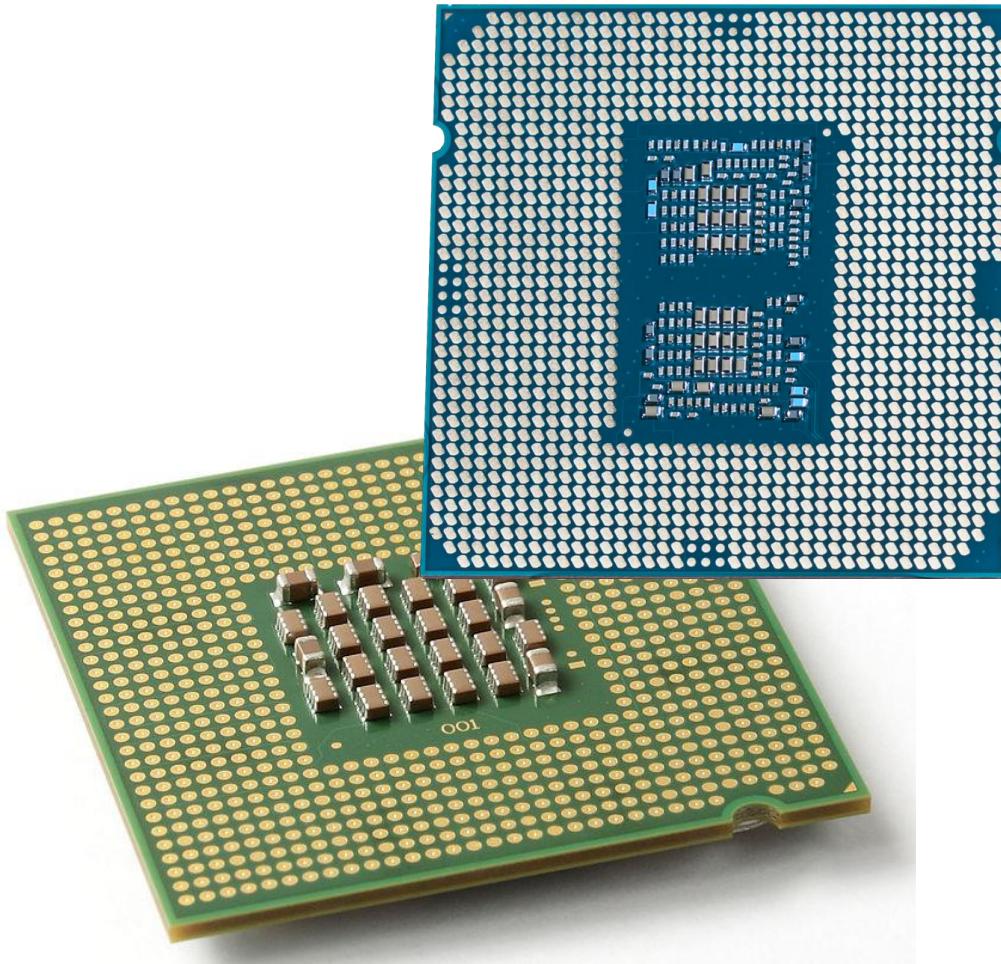
Ball grid array

■ BGA – Ball grid array

- A kivezetésekre forraszgolyókat helyeznek el
- Ezeket megolvasztva történik meg az elektromos és mechanikus kapcsolat létrehozása.
- Nagyon sűrű rászter érhető el.
- ~2000 kivezetés
- Egyedi beültetés, javítás drága berendezést igényel – (reball station)

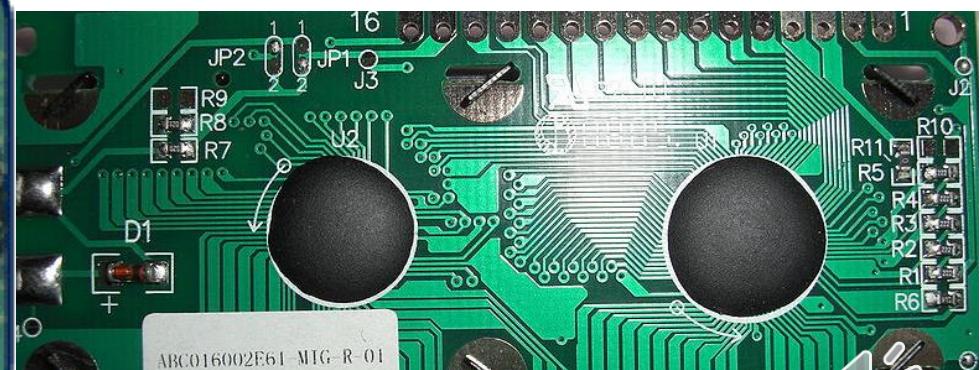
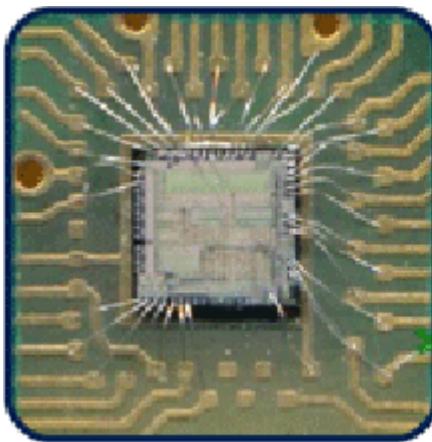


- Land grid array
 - PGA „inverz” ☺ Itt a foglalatnak vannak rugós érintkezői



■ Chip on board

- Az integrált áramkört nem tokozzák be, hanem közvetlenül rögzítik ragasztással vagy forrasztással, majd a kikötik aranyhuzalos kötéssel (bonding)
 - A másik megvalósítás, hogy forraszgolyókkal hozzák létre az elektromos és mechanikus kapcsolatot, ilyenkor a chip megfordított (flip chip)
 - A tetejére védő epoxy réteg kerül (Glob – Top)
- ## ■ A tokozatlan chip sokkal olcsóbb!
- Így, ha rendelkezésre áll a COB technológia, a termék olcsóbb lesz.



■ Forrasztás

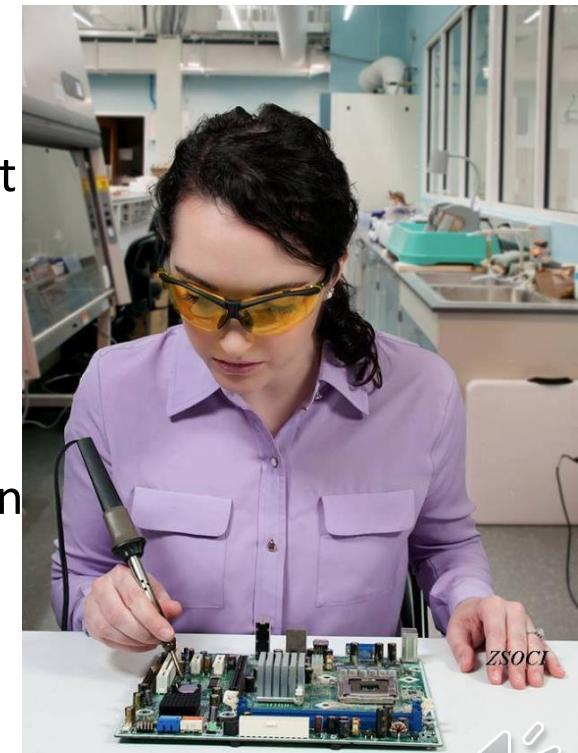
- Az összekötendő felületek olvadáspontjánál alacsonyabb olvadáspontú forrasz hozza létre
- A forrasz megömlik, nedvesíti az összekötendő felületeket, ami lehűléskor megdermed, és kötés létrejön

■ Forraszötvözetek

- Ón-ólom ötvözet, pl. Sn60-Pb40 188°C
- Ólomtartalmú forrasz az EU-ban 2006.-tól korlátozott
- Ólommentes forraszanyagok
- Ón – ezüst –réz (SAC) ötvözetek ~220°C

■ Folyasztószer (flux)

- Tisztítja és oxidmentesíti a felületet forrasztás közben
- fenyőgyanta/szintetikus gyanta

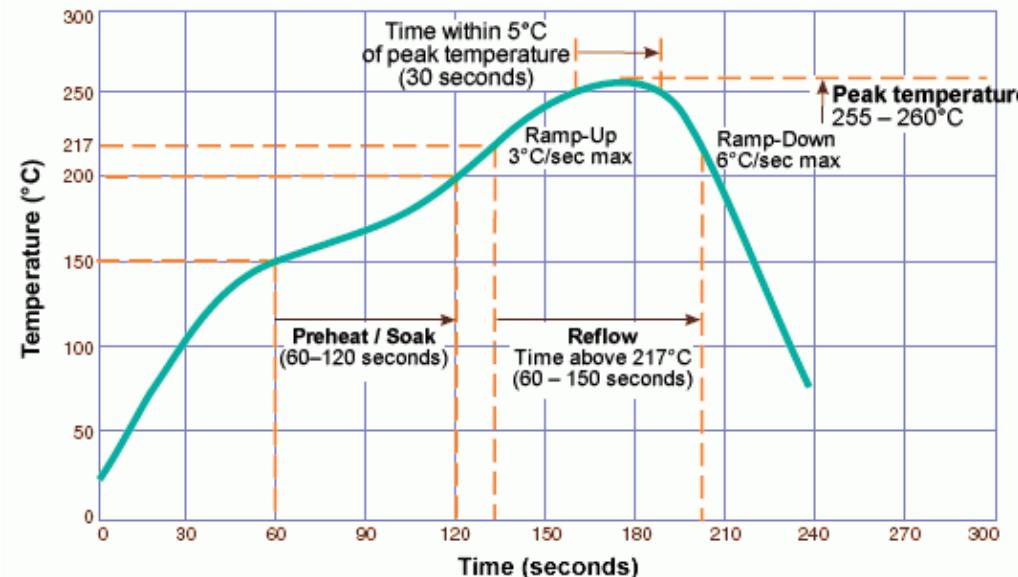


■ Kézi forrasztás

- forrasztópáka
- Forraszhuzal (gyanta van a közepén, átmérője 0,5 .. 1,5mm)

■ Újraömlesztéses forrasztás (reflow)

- Forraszpaszta felvitele (cseppadalékolás vagy stencilnyomtatás)
 - Forraszpaszta: forrasz szemcsék folyasztószerben
- Alkatrészek beültetése (pick and place)
- A forrasz újraömlesztése reflow kemencében.



Források, ajánlott irodalom, érdekességek

- Intel LGA Socket guide
- Alkatrészek felhelyezése
- SMD reflow forrasztás





Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Elektronika alapjai

13. előadás

A modern CMOS

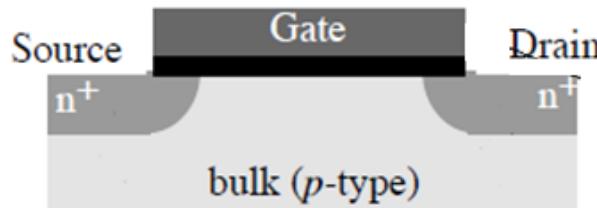
Mit, és miért?

GYORS, KEVESET FOGYASZTÓ, OLCSÓN GYÁRTHATÓ

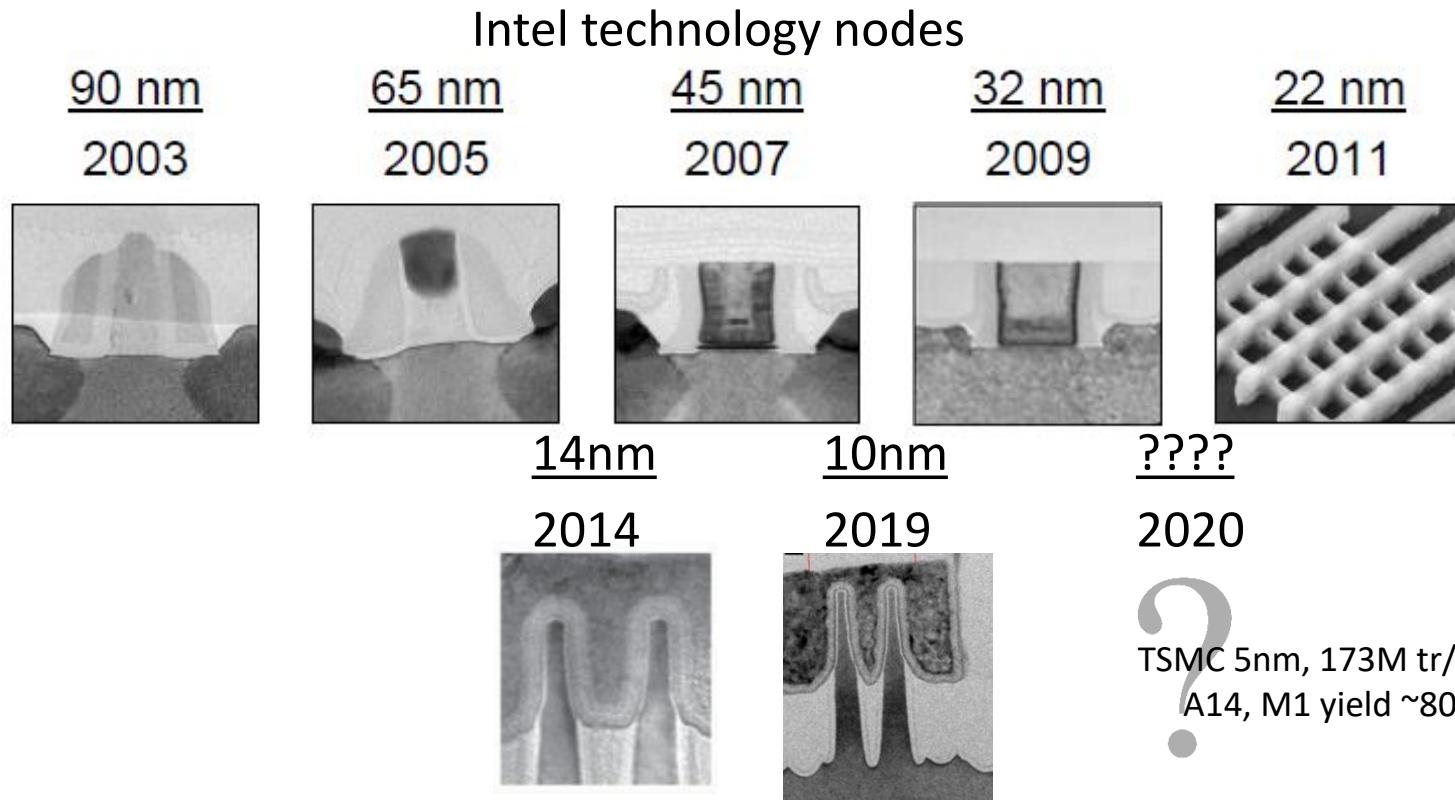
- Kapukésleltetés: $t_{pd} \sim \frac{CV}{I}$
 - Növelni kell az áramot és csökkenteni a parazita kapacitást.
- Teljesítmény: $P \sim fCV^2$
 - Csökkenteni kell a tápfeszültséget és a parazita kapacitást.
- Nem volt róla szó: szivárgás (leakage)
 - Folyamatosan. Telepes üzemnél nem megengedhető. Csökkenteni kell!
- Összeköttetés késleltetése: $\tau = RC$
- Kihozatal növelése
 - Hiba valószínűsége: $p \sim A$

A MOS tranzisztor

A MOS tranzisztor

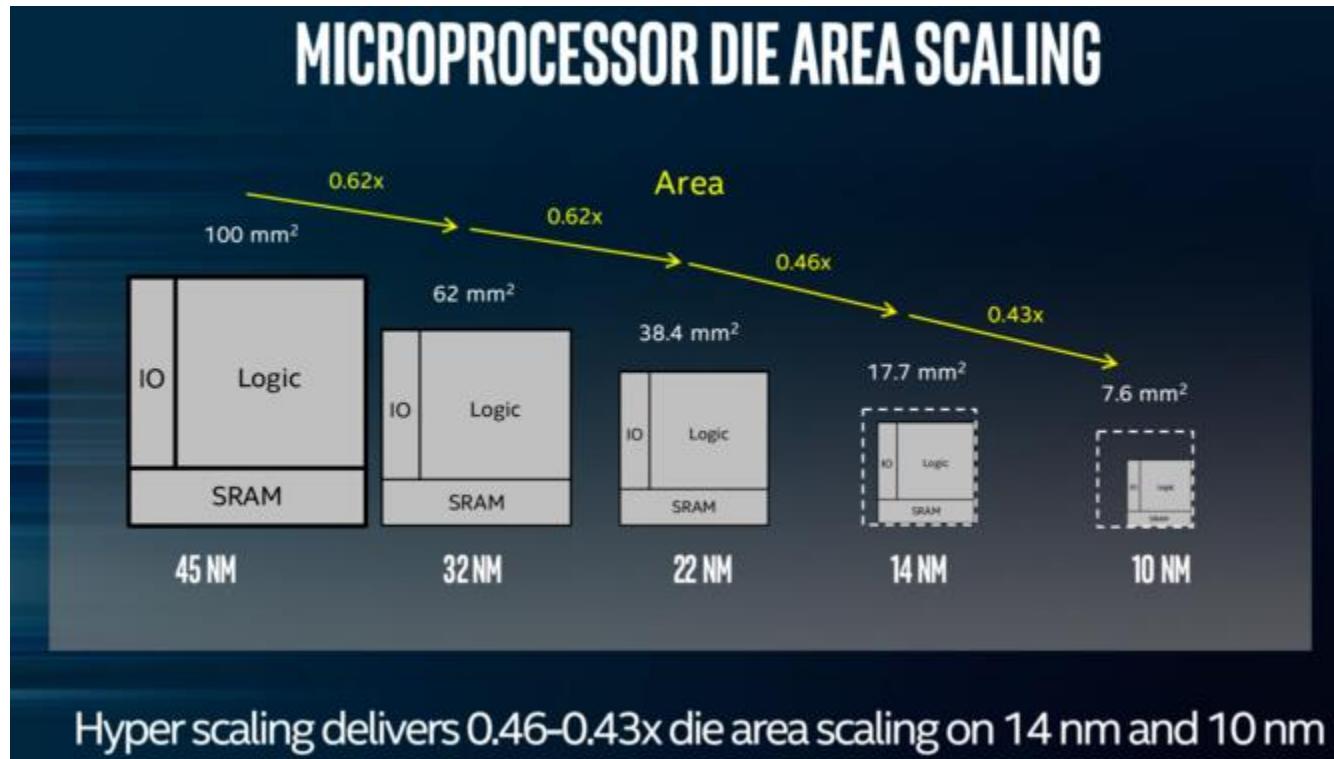


- Ezt tanultuk...
- 10 éve még volt hasonlóság
 - 2011-ben változott a geometria is
 - A fejlődés lassult...



A MOS tranzisztor skálázása

- ugyanazt, „kicsiben”
 - Mert így több logika fér el ugyanakkora helyen
 - A tranzisztorok gyorsabbak lesznek, így az órajel nagyobb lesz.



- Dennard, 1974
 - minden geometriai méretet K-ad részére kell csökkenteni.
 - A tápfeszültséget K-ad részére kell csökkenteni.
- Ebben az esetben
 - Az órajel K-szorosára növelhető, mert 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 : $C V^2 / \text{delay}$	$1/K^2$

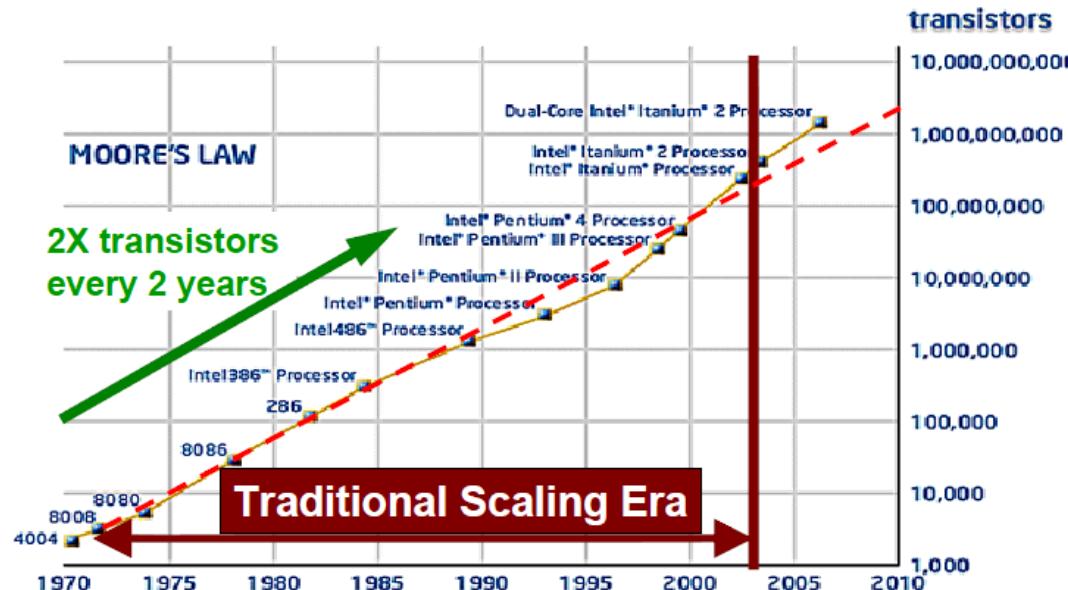
A valóság egy picit máshogy alakult

- 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. (250W TDP szerverek esetén – de az gépteremben van...)
- 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

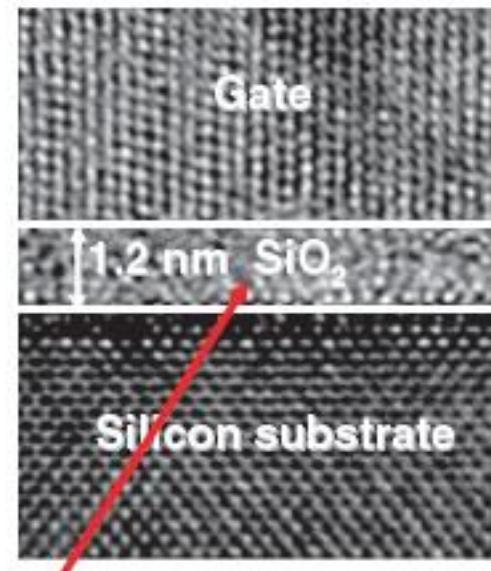
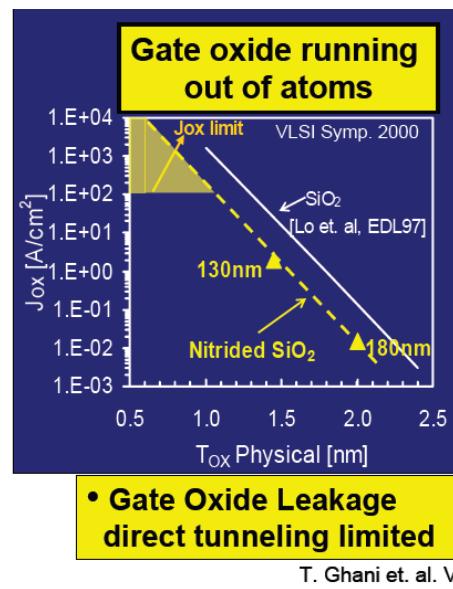
A geometriai skálázás véget ért 2003-ban.

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



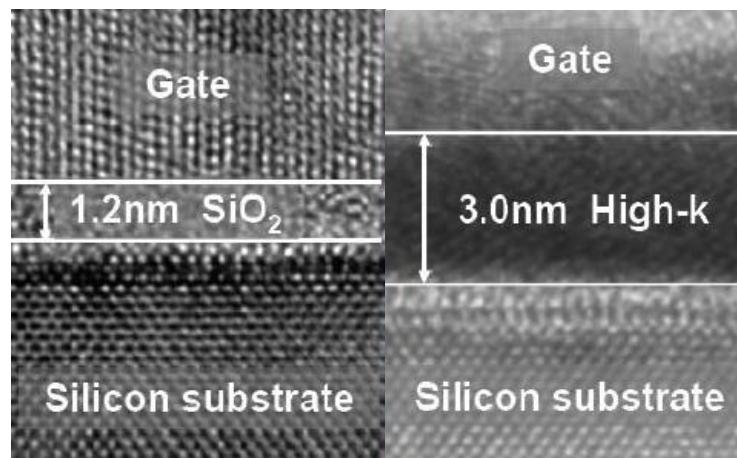
Probléma

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



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 növelhető, vagy azonos áram mellett az szigetelő szélessége nagyobb lehet, ezáltal a tunneláram töredékére csökken.



	SiO_2	High - K
$C = \varepsilon/t$	1×	1,6×
tunneláram	1×	< 0,01

High – K gate anyagok

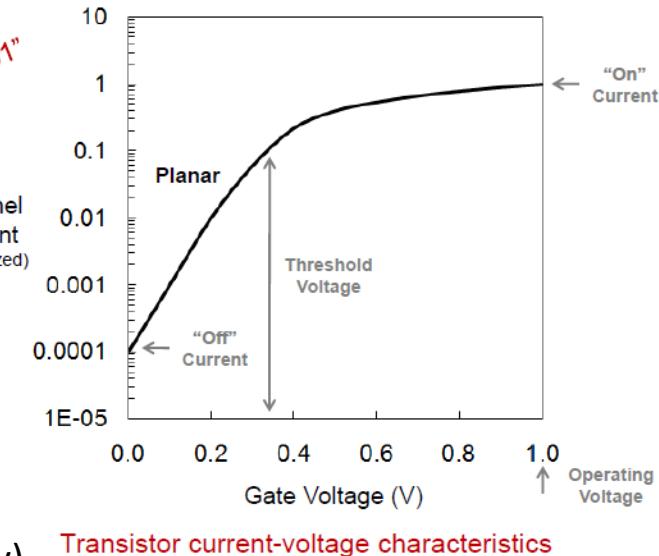
Anyag	ϵ_r
SiO_2	3,9
Si_3N_4	7,5
ZrO_2	23
HfO_2	20

- A SiO_2 -nál nagyobb dielektrikus állandóval rendelkező anyag
- (Si_3N_4 már régóta kutatták -> charge trap flash...)
- 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 négyszerese.

Küszöb alatti áram

Probléma: Küszöb alatti áram (subthreshold current)

- A tranzisztor vezet 0V vezérlő feszültség esetén *is! "for 10¹"*
- Folytonos átmenet az „ON” és az „OFF” állapot között
 - A küszöb alatti áram nemkívánatos: erős eltérés a **“kapcsoló”** modelltől
- A küszöbfeszültség alatt az áram közel exponenciálisan csökken.
 - $I_D \sim e^{(U_{GS} - V_T)/nU_T}$
 - Küszöbfeszültség kb. a tápfeszültség negyedrésze (ökölszabály)
 - 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...
- SS : subthreshold slope.
 - Tipikusan 60..100mV/dekád. (pl. 60mV feszültség csökkenés tizedrészére csökkenti a szivárgást.
 - SS csökkentése -> tovább csökkenthető a tápfeszültség!



SOI – Silicon on Insulator



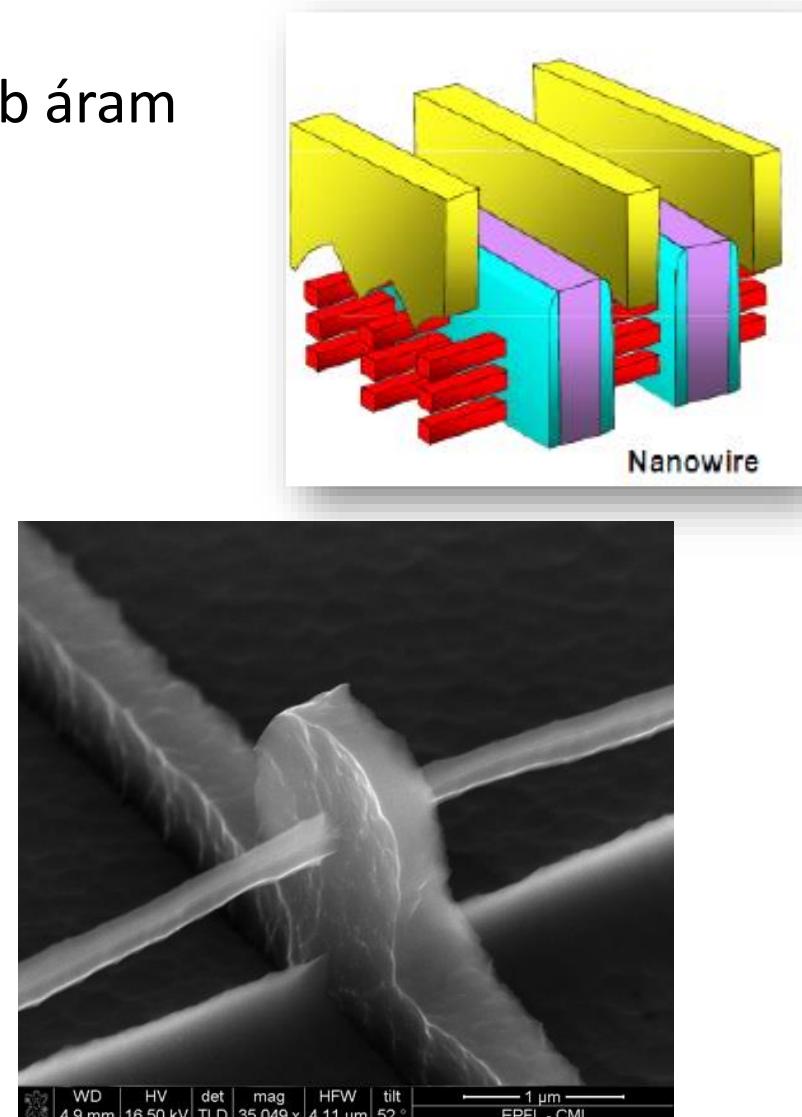
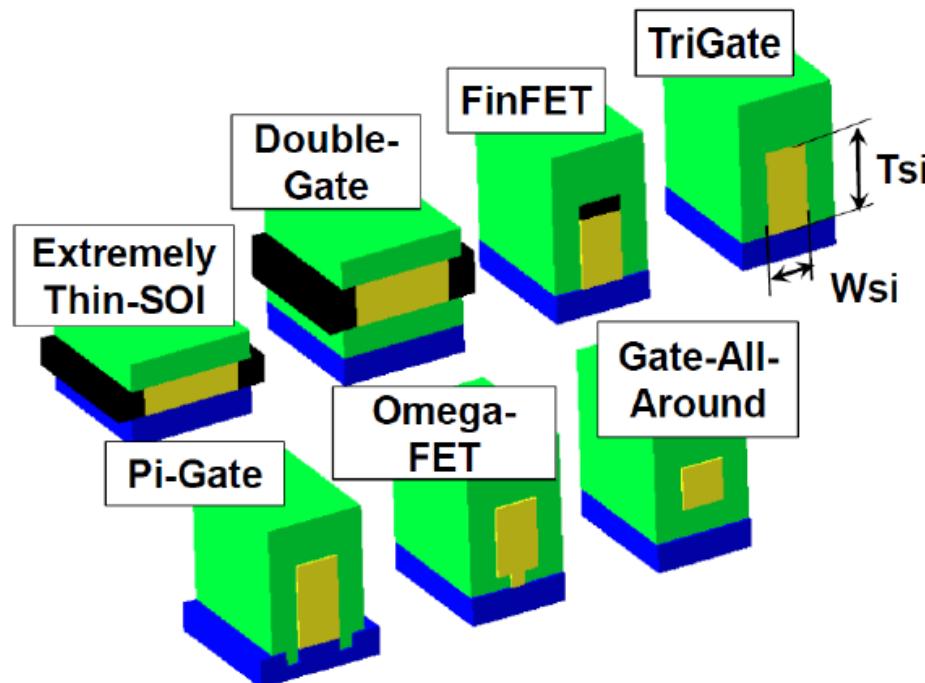
- A fő előny
 - Kisebb szubsztrát kapacitás
 - Nincs szivárgás a szubsztrát felé
 - Küszöbalatti áram is csökken!
- Hátrány azonban, hogy megnövekszik a R_{th_jc} hőellenállás
 - 1µm vastagságú SiO_2 réteg kb. 200µm vastag szilícium rétegnek felel meg

Anyag	$\lambda = W/m \cdot K$
Szilícium	156
SiO_2	0.75

További méretcsökkentés

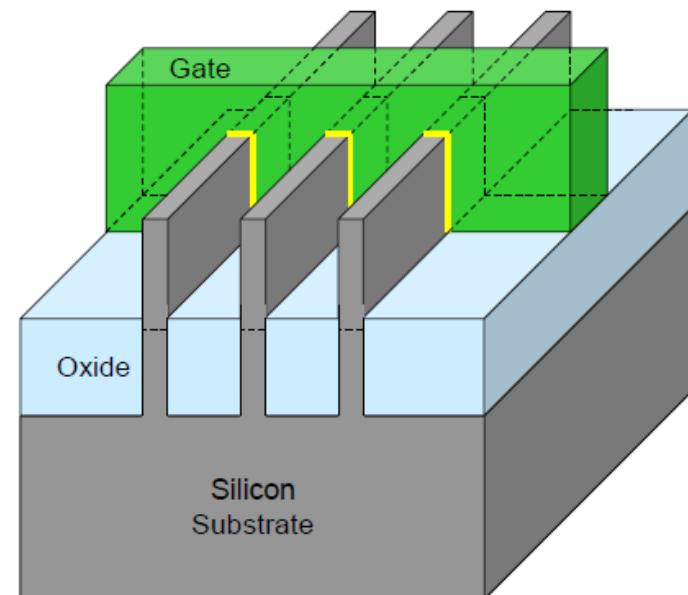
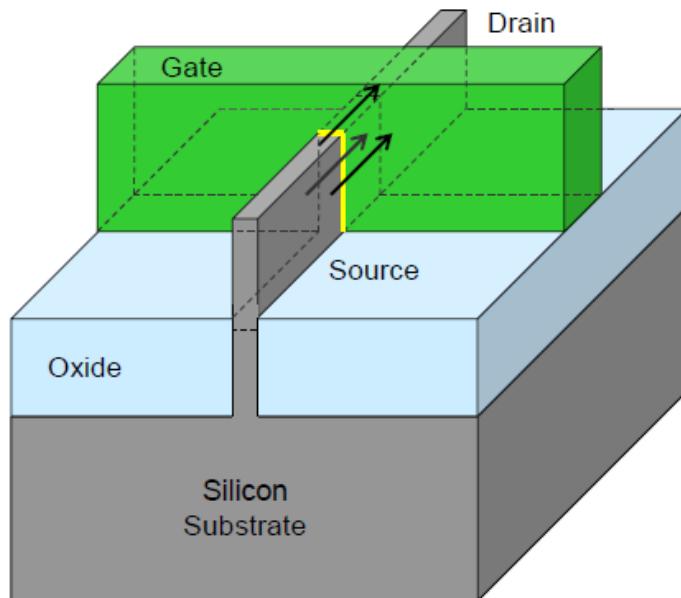
3D felépítés

- Azonos geometriai méretben nagyobb áram



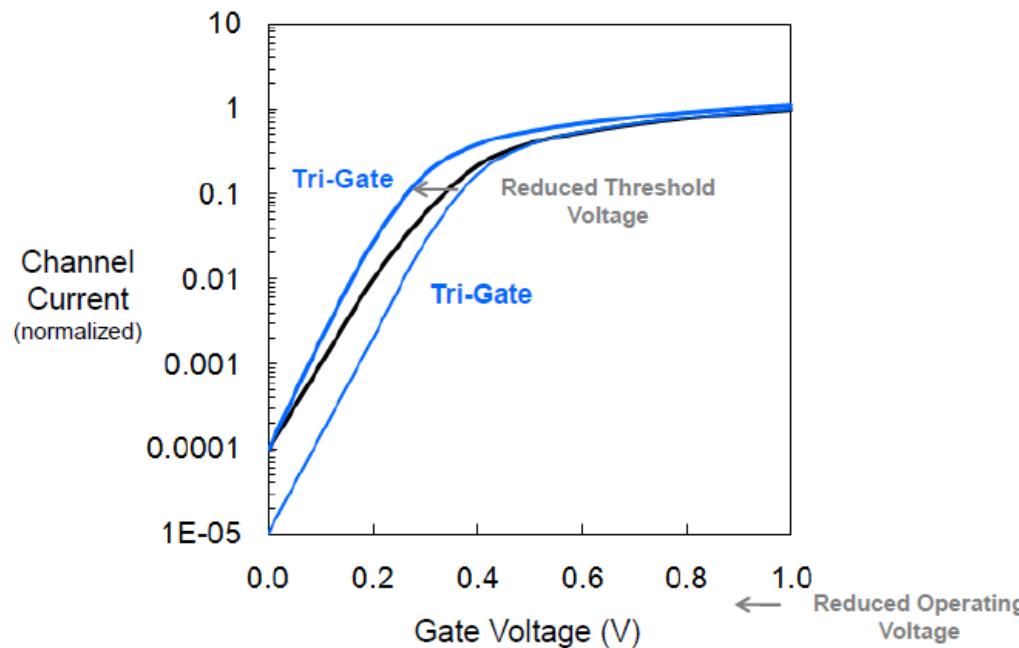
FinFET tranzisztor

- Valódi háromdimenziós felépítés.
 - A csatorna 3 dimenziós, így a terület (layout, tranzisztor helyfoglalása) csökkenése ellenére az áram növelhető!
 - A vezetés a kiemelkedő vékony rétegen történik, amelyet a gate elektróda körülölel.
 - Az inverziós réteg is három oldalon van jelen, innen az elnevezés.



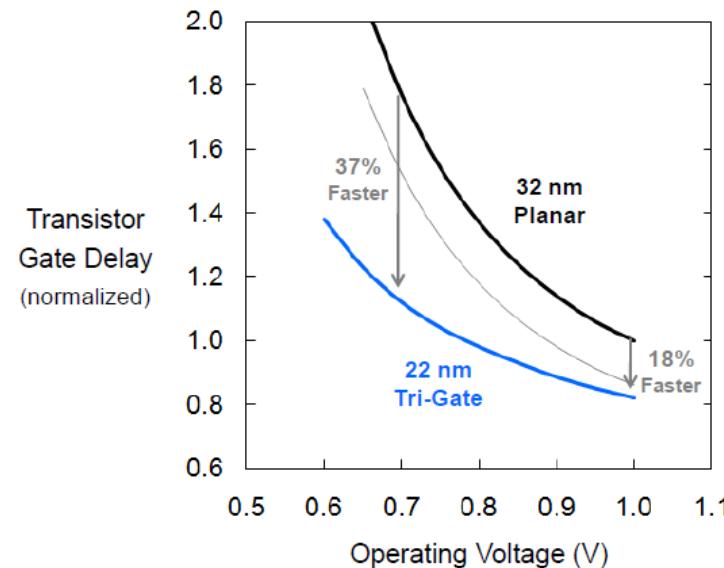
Tri-gate tranzisztorok előnyei

- Nő a küszöbfeszültség alatti áram meredeksége (SS)
 - 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.

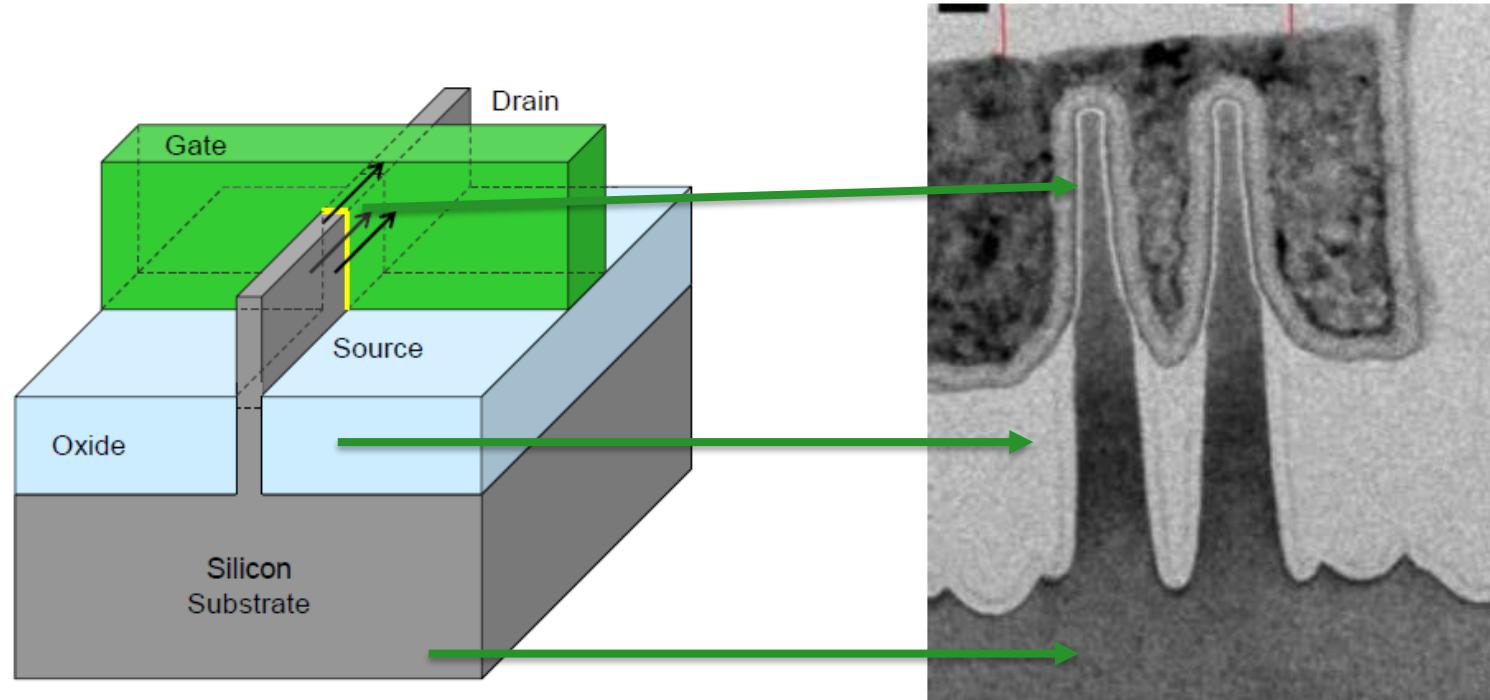


Tri-gate tranzisztorok előnyei

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

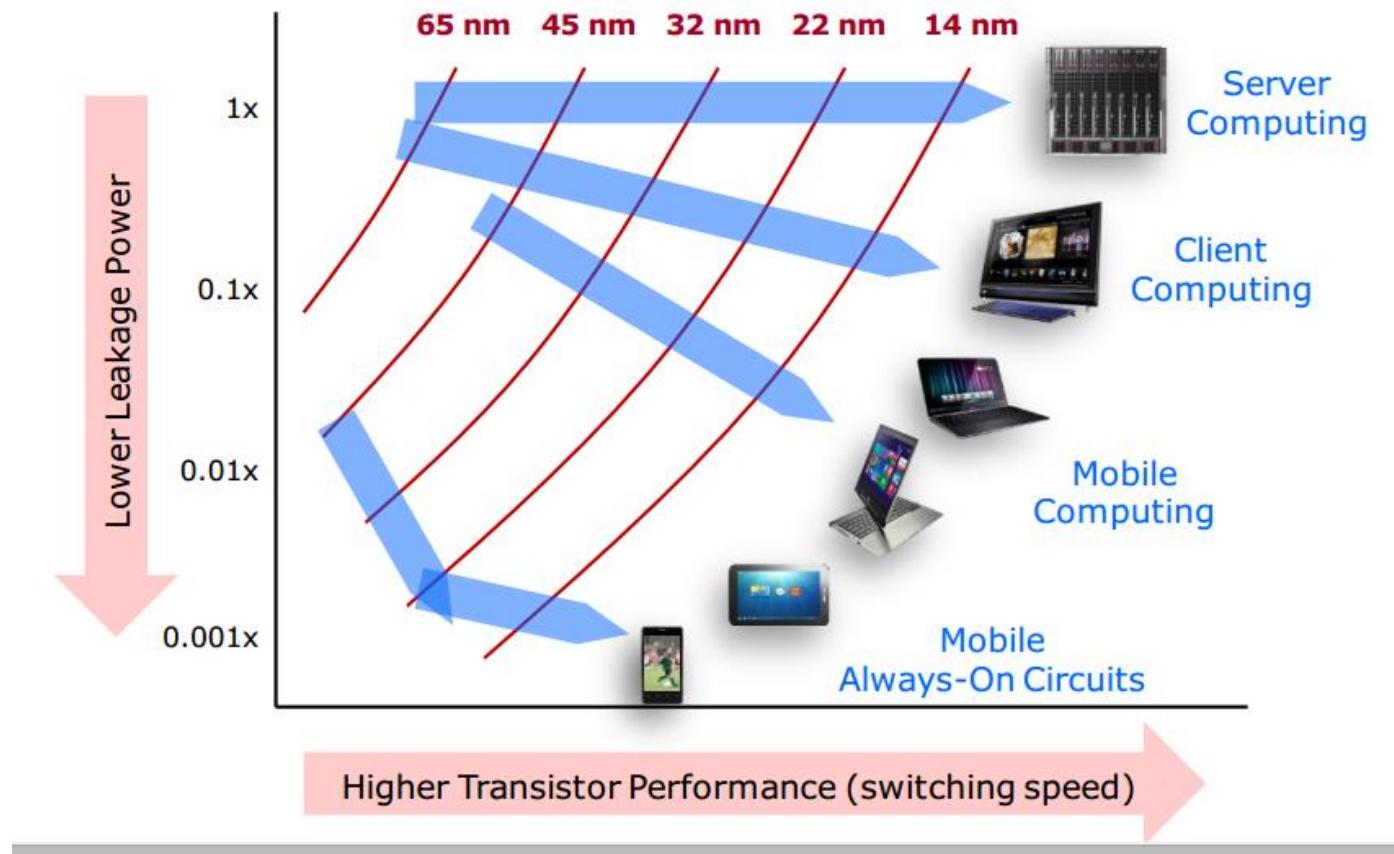


Tranzisztor keresztmetszet



A 10nm-ről sajnos nem találtam ilyen jó ábrát.

A technológia fejlődése

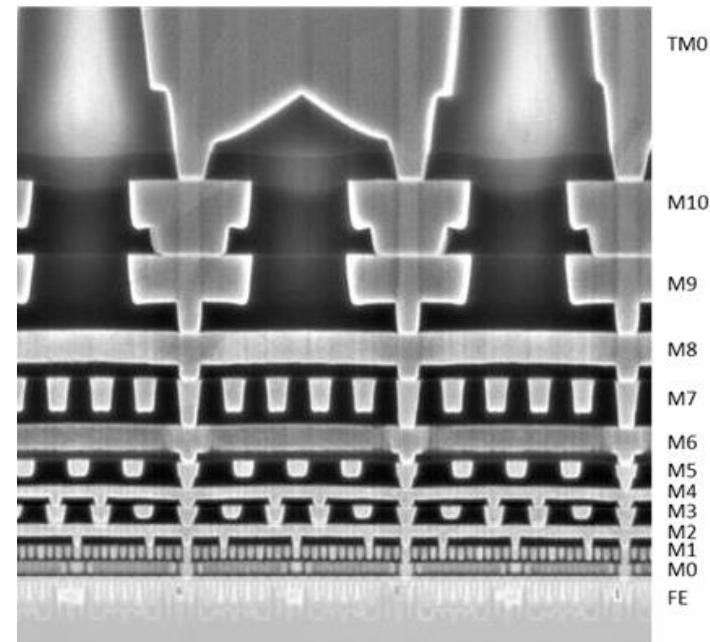


Vezetékezés

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

Vezetékezés

- Global routing (M6-M10)
 - VDD, GND, CLK
- Intermediate (M2-M5)
- Local routing (M0-M1)



Low-K szigetelő

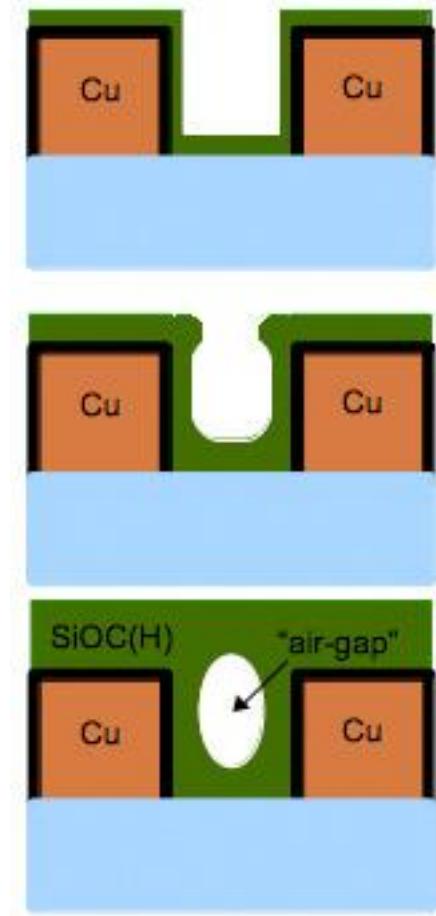
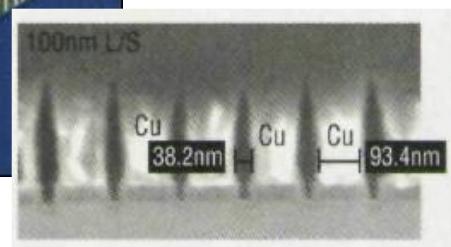
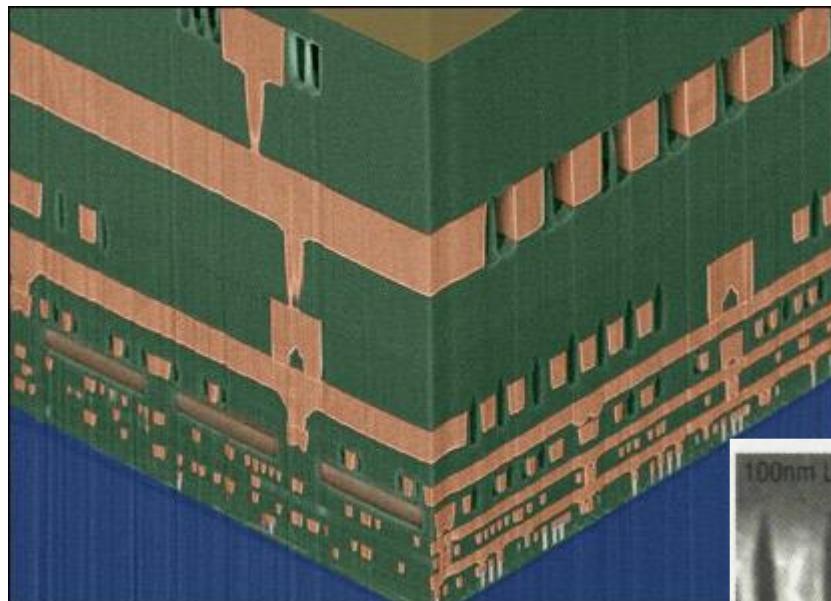
- SiO₂-t dielektrikumot pl. CDO-ra cserélve 25%-al lehetett csökkenteni a késleltetést.

Anyag	ϵ_r
SiO ₂	3,9
FDO – fluórral adalékolt oxid	3,5
CDO – szénnel adalékolt oxid	2,7...3,0
SiOC:H (silicon oxycarbide) - CDO	2,8
Pórusos SiO ₂ (mechanikailag instabil)	2,4
Pórusos CDO	2,7
Polimerek	2,2..2,7
CDO & Levegő	2,2...2,4
Pórusos Polimer	2

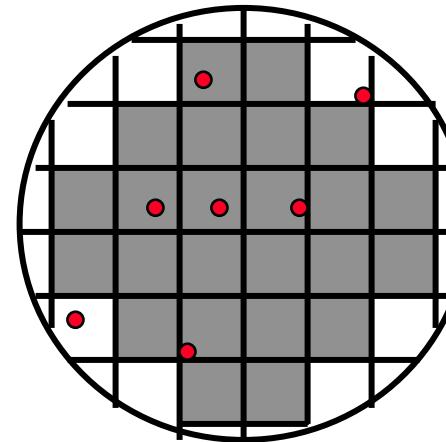
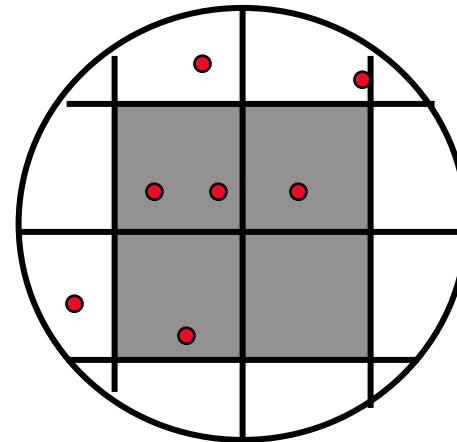
Air gap

Air-gap

- Levegő relatív dielektrikus állandója kb. 1



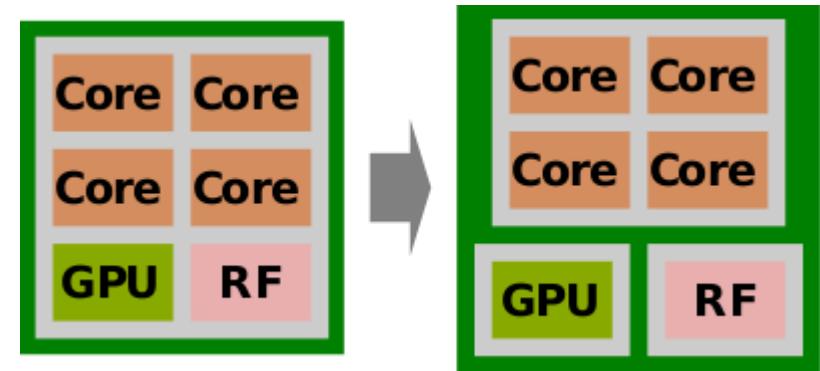
A kihozatal és a chip méretének összefüggése



- Ugyanakkora hibavalószínűség esetén kisebb chip esetén jobb a kihozatal

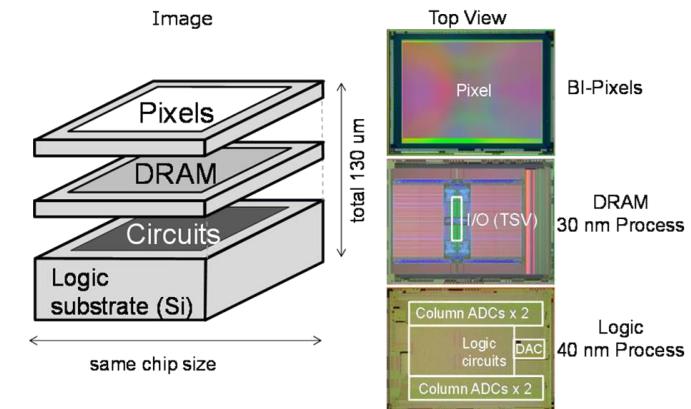
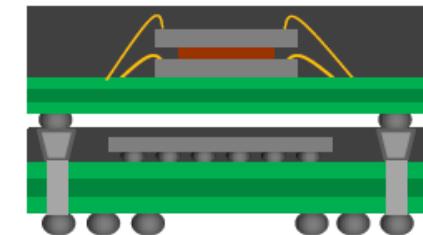
Chiplet

- **Chiplet**
- Alapötlet bontsuk fel a rendszerchipet több részre, ezek lesznek a chipletek
- Kisebb méret – jobb kihozatal
- Csökkenő költségek - Lehetővé válik csak a legfontosabb részek (leggyorsabb, legnagyobb számítási teljesítményű, stb.) gyártása a legújabb technológián



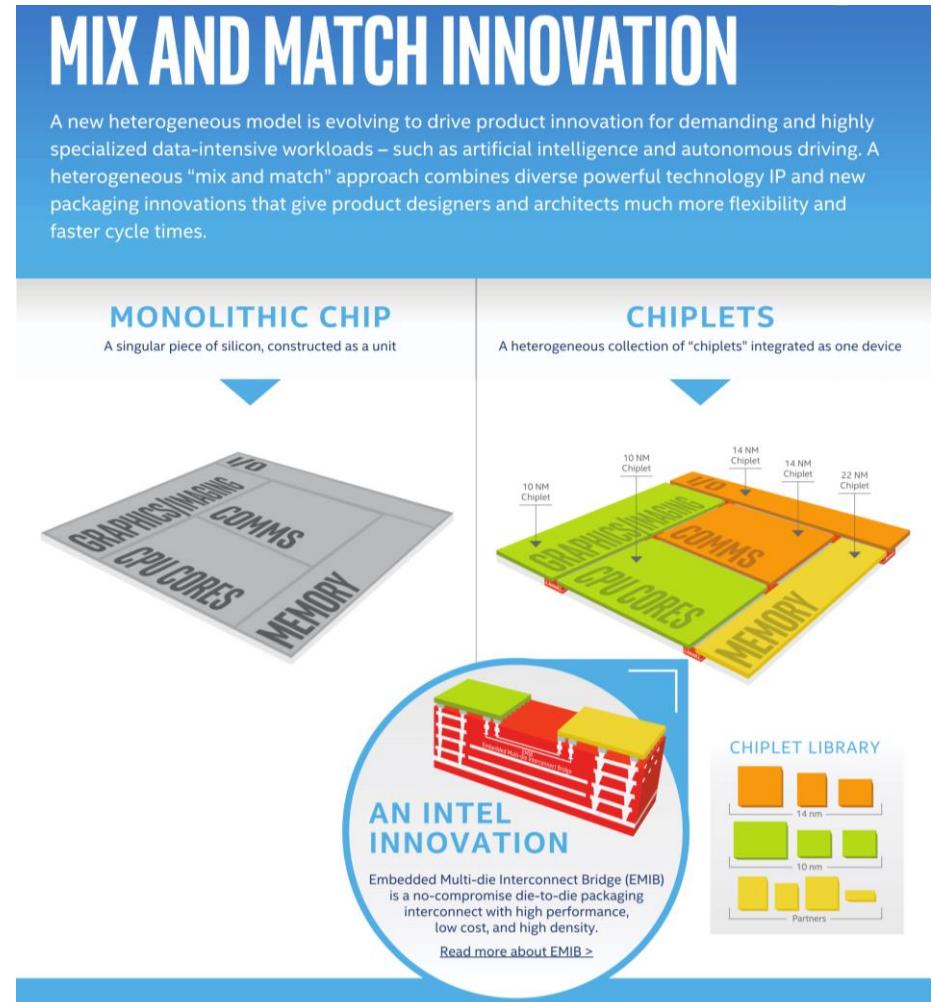
Kis technológiai kanyar

- Processzor – mikroprocesszor
 - Egy chipre minden, ez lett a mikroprocesszor, a processzor kártya helyett, 1970-es évek
- SIP – System in a package
 - Különböző technológiájú chipek egy tokba szerelése
 - (ez kényszer volt inkább)
- PoP – Package on package
 - μP, GPU, DRAM egymás tetején
 - Képérzékelő, DRAM, feldolgozó
- SOC – System on a chip
 - Mindent egy chipen
 - Nehézkes az optimalizálás – más technológia optimális pl. DRAM-nak mint a processzornak.

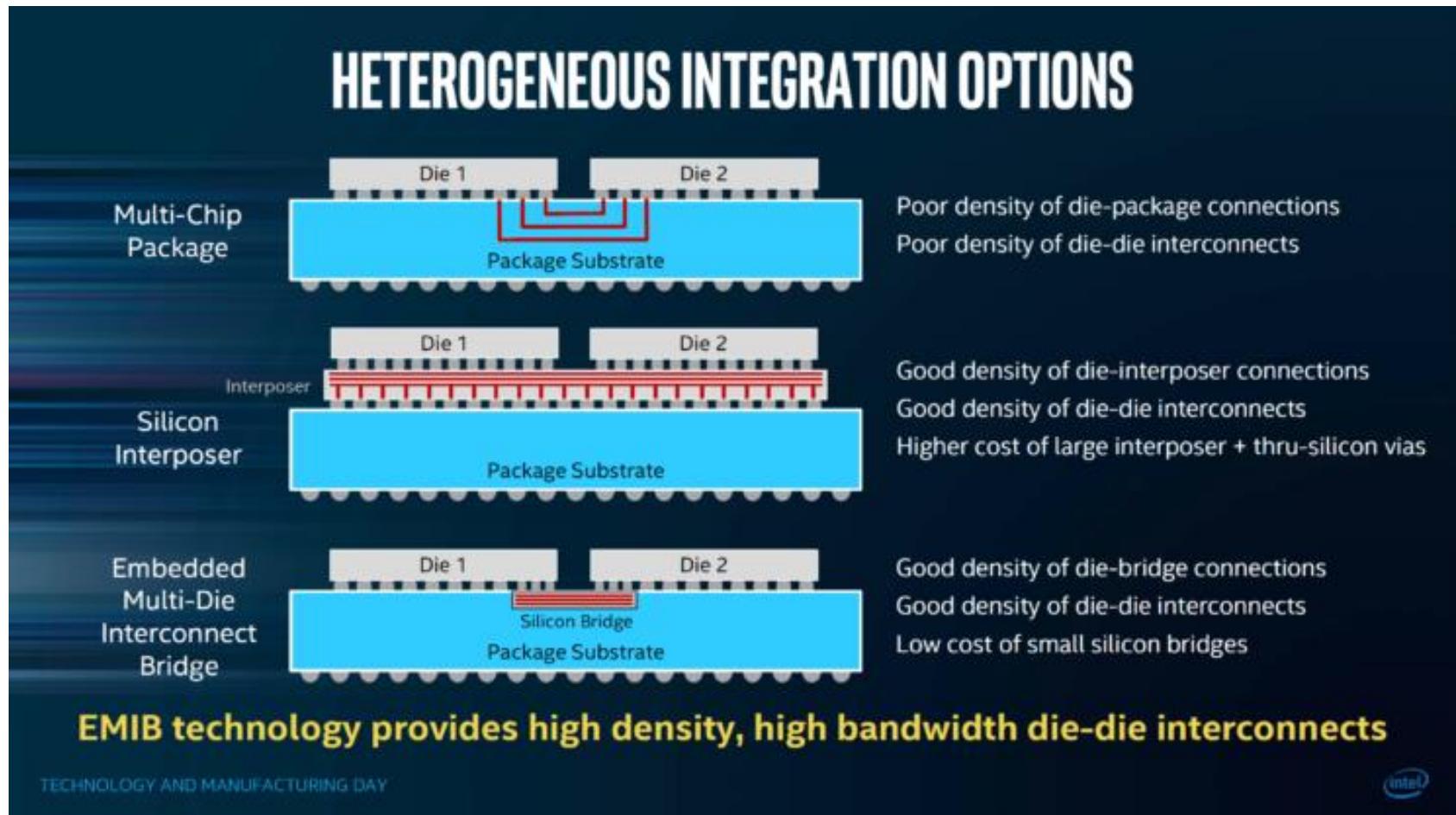


Heterogén integráció

- Alapötlet: LEGO mintájára építkezzünk
- Legnagyobb nehézség az összeköttetések kialakítása
- „The chiplet library is a repository of pre-designed chip elements (or IP blocks), such as I/O, memory subsystem, communications, CPU and GPU silicon, which have been designed to use a common interface which interconnects them on a single package”



Intel EMIB – Embedded Multi-Die Interconnection Bridge



Hibrid x86

