

IT eszközök technológiája

2. előadás

- A félvezetők
- A MOS tranzisztor
- A digitális logika alapvető tulajdonságai
- A statikus CMOS logika



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

A félvezetők

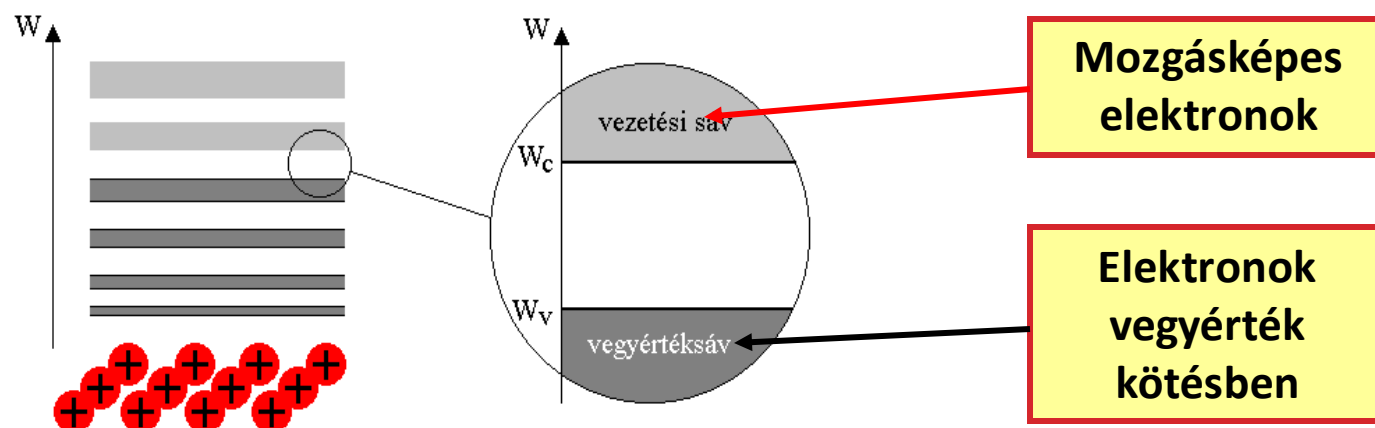
<FIZIKA>

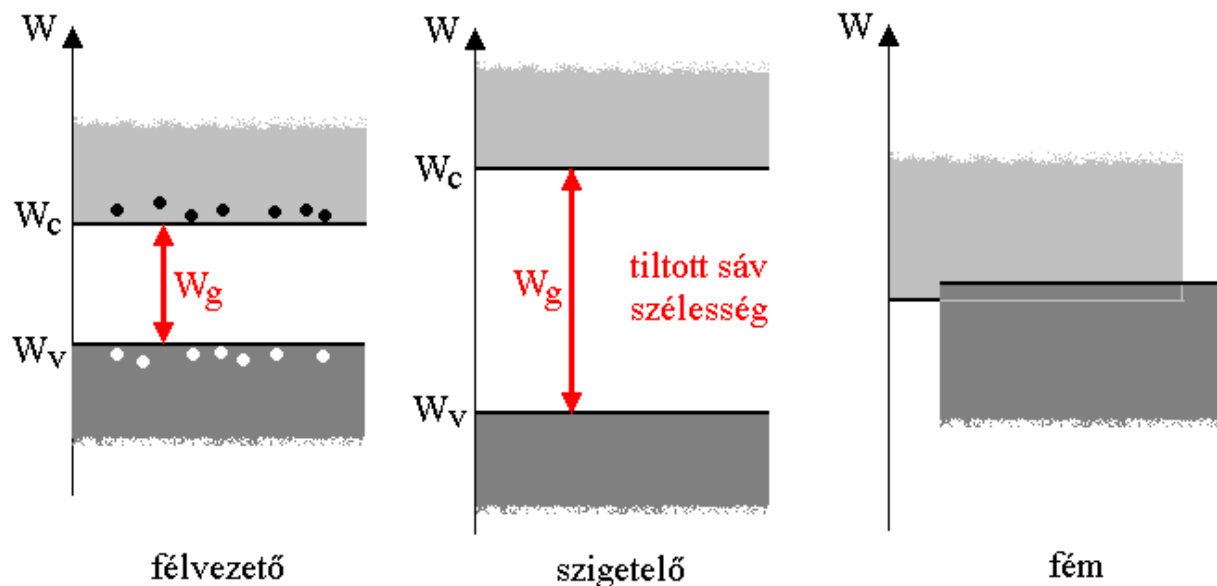
Félvezetők

- 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!)
 - Egykristályos, elemi félvezetők: Si, Ge (periódusos rendszer IV. oszlop)
 - Si: integrált áramkörök, eszközök
- Vegyületfélvezetők: pl. GaAs, GaAsP stb.
 - LED, HEMT (high electron mobility transistor – nagyfrekvenciás analóg feldolgozás)
- amorf (főleg Si)
 - TFT, napelem stb.
- szerves
 - OLED

Mitől lesz egy anyag vezető, félvezető, szigetelő?

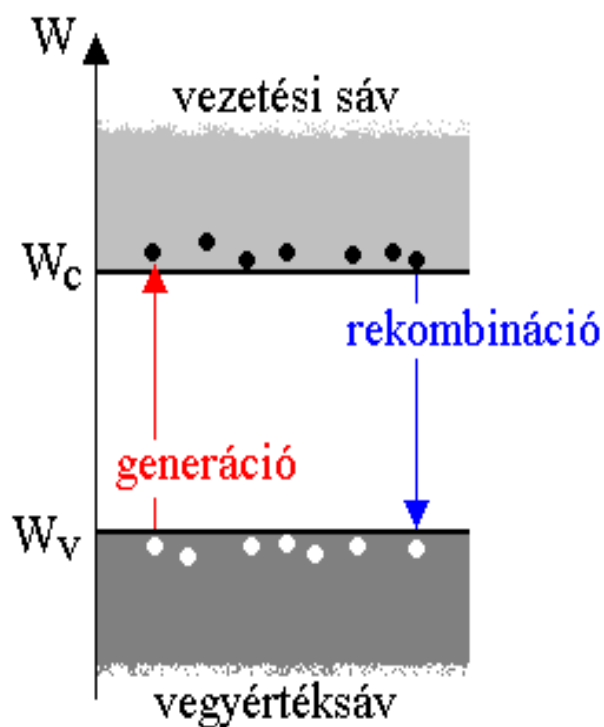
- Ehhez vissza kell nyúlni a kvantummechanikához.
 - Egy atomban az elektronok csak meghatározott diszkrét (kvantált) energiaállapotokat vehetnek fel. Egy energiaállapotban összesen két (!) elektron lehet.
 - Kristály esetén hasonló a helyzet. A megengedett állapotok sávokká szélesednek, amelyek között nem megengedett állapotok, ún. tiltott sávok vannak.





- 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 ($kT=26\text{eV}$) a vegyértéksávból történő felkerülés valószínűsége 0, szigetelők
- Ha a tiltott sáv 1eV környéki, akkor létező valószínűséggel felkerülhet elektron a vezetési sávba, ekkor félvezetőkről beszélünk.

Töltéshordozók

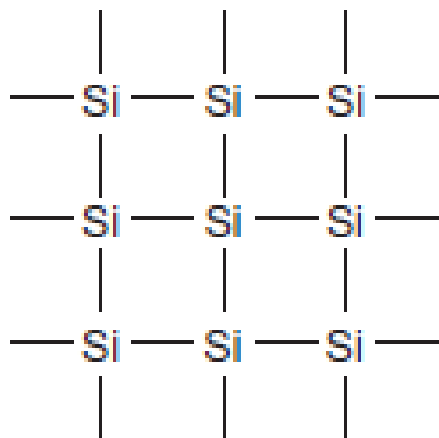


- Elektronok a vezetési sáv alján
- Lyukak (elektron hiányok) a vegyértéksáv tetején
- Mindkettő szolgálja az áramvezetést.
 - nemcsak az elektron, hanem az elektron hiány is el tud mozdulni.
- A „tiszta” (szakszóval intrinsic) félvezetőben viszonylag kevés töltéshordozó van.
 - Szilíciumban pl. $10^{10}/\text{cm}^3$,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

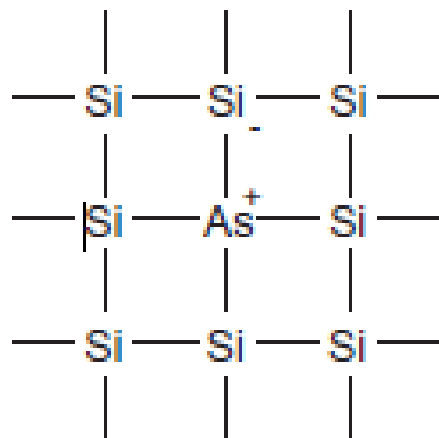
Adalékolás

- 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.

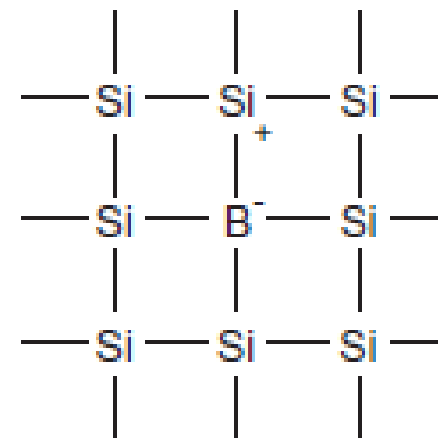
Példa: szilícium adalékolása arzénnel ill. bórral



intrinsic szilícium

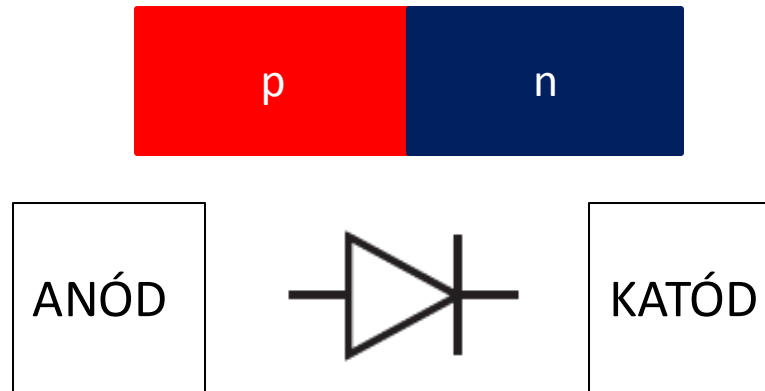


n szilícium



p szilícium

pn átmenet vagy félvezető dióda



- Ahol a kristályban egy n és egy p zóna érintkezik kialakul egy ún. **pn** átmenet.
 - A p vezetékes területet szokásosan anódnak, az n vezetékes 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*.
 - Erre mondjuk azt, hogy **EGYENIRÁNYÍT**. Hogy ez mire lesz jó, megnézzük a tápellátásról szóló előadáson!



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

A MOS tranzisztor

A MOS tranzisztor

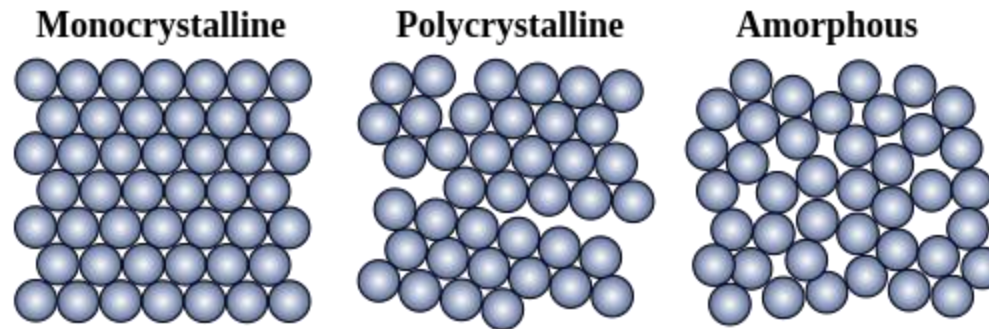
■ MOS: Metal-Oxide-Semiconductor

- 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” ötvözetek – 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

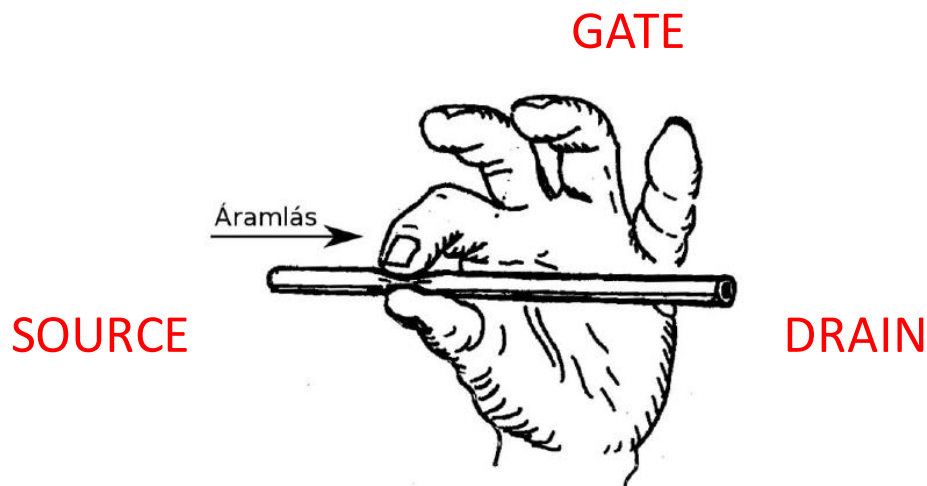


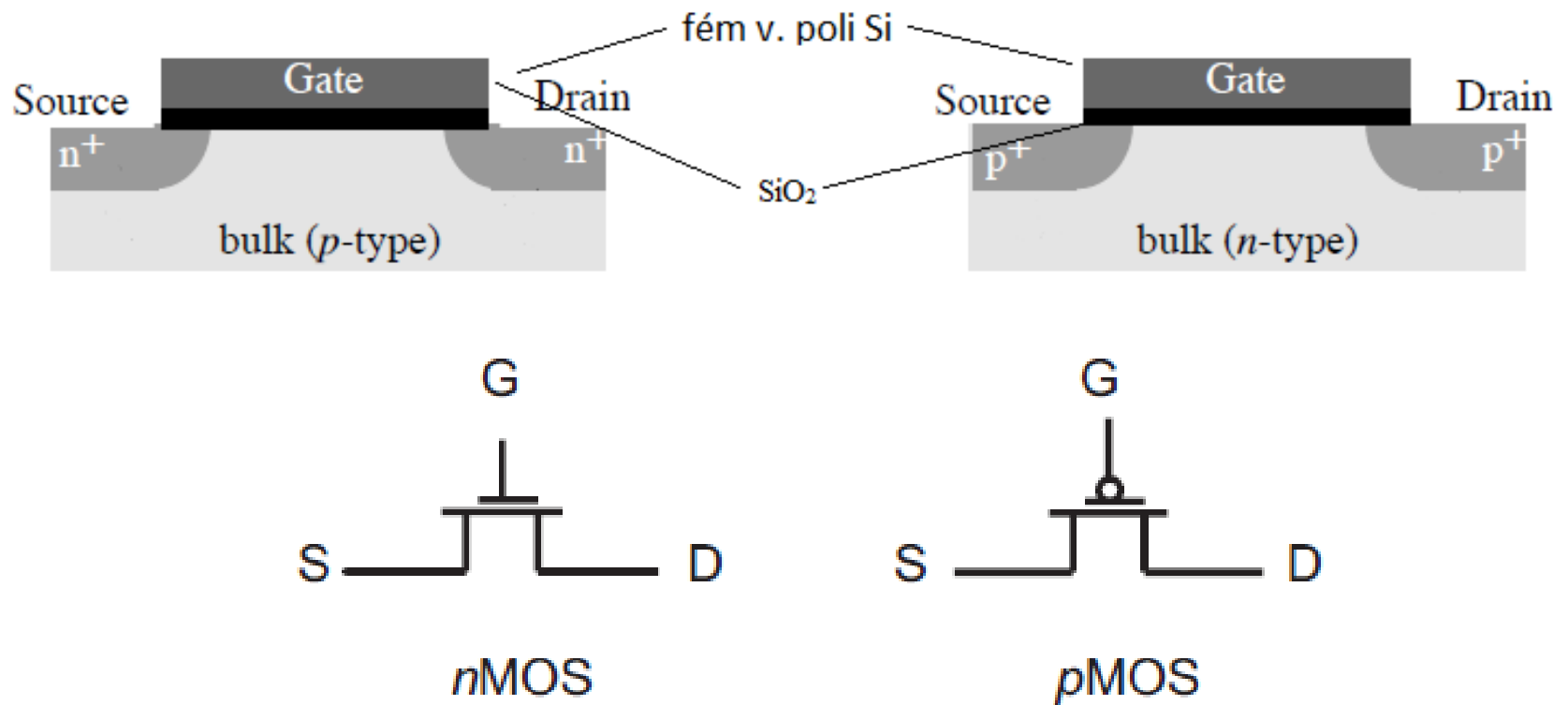
- Egykristály: hosszú távú rendezettség
- Polikristály: egykristály szemcsékből áll
- Amorf anyag: nincs, vagy csak nagyon rövidtávú a rendezettség

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

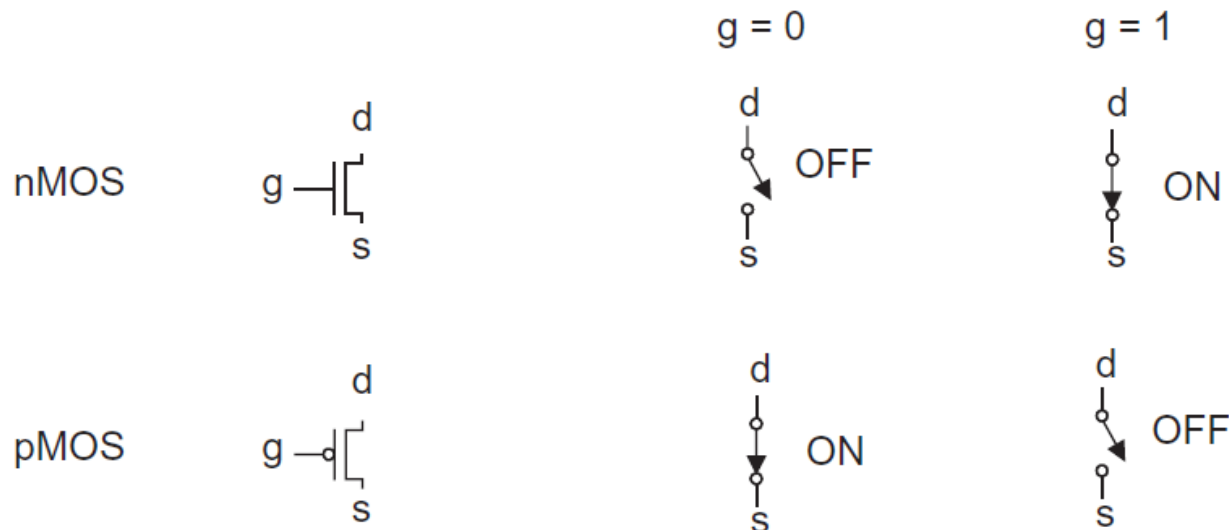


■ Tekintsük az nMOS tranzisztort!

- 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 Boolean 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 – ökölszabály – kb. a négyszerese.
 - Feltételezzük, hogy az nMOS tranzisztor szubsztrátja földre, a pMOS tranzisztor szubsztrátja pedig a tápfeszültségre van kötve
 - Nézzük meg, mi történik a kétfajta tranzisztorral!



- 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!

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
 - Alapkaput
 - Bonyolultabb logikai függvényt is



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

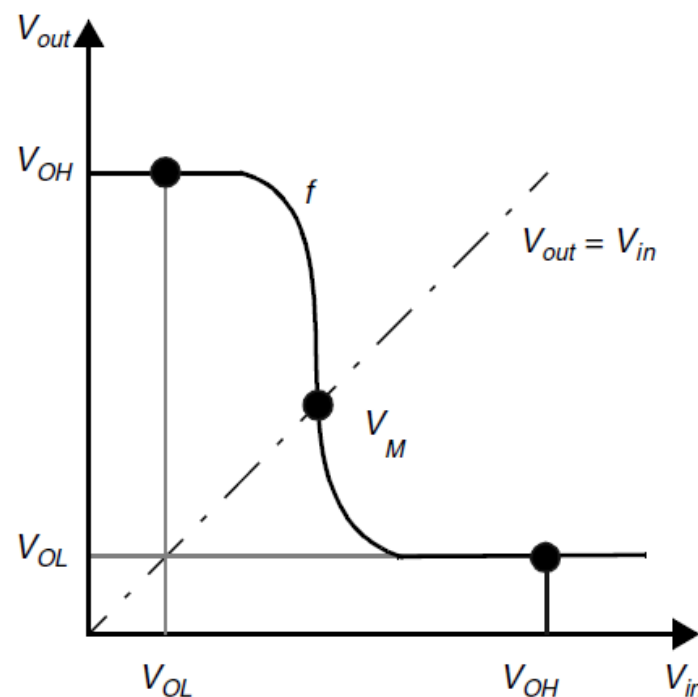
A digitális logika alapfogalmai

A Boole algebra áramköri megvalósítása

- A Boole algebra
 - Matematikai szemszögből egy absztrakció
 - Értékkészlete $x \in \{0,1\}$
 - Műveletei: $\neg \wedge \vee$
- Az értékkészlet elemeihez valamilyen könnyen feldolgozható fizikai mennyiséget rendelünk, ami általában a feszültség.
 - (lehet áram vagy feszültségkülönbség – nagysebességű logikákban)
 - A logikai 1-hez a V_H , a logikai 0-hoz a V_L feszültség szintet 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 (0V) különbséget pedig **RAIL**-nek.
 - (honnan jön a név? – a tápfeszültség és a föld széles vezetékei, mint egy sín pár húzódnak végig – a kapcsolási rajzon is és a fizikai valóságban is...)

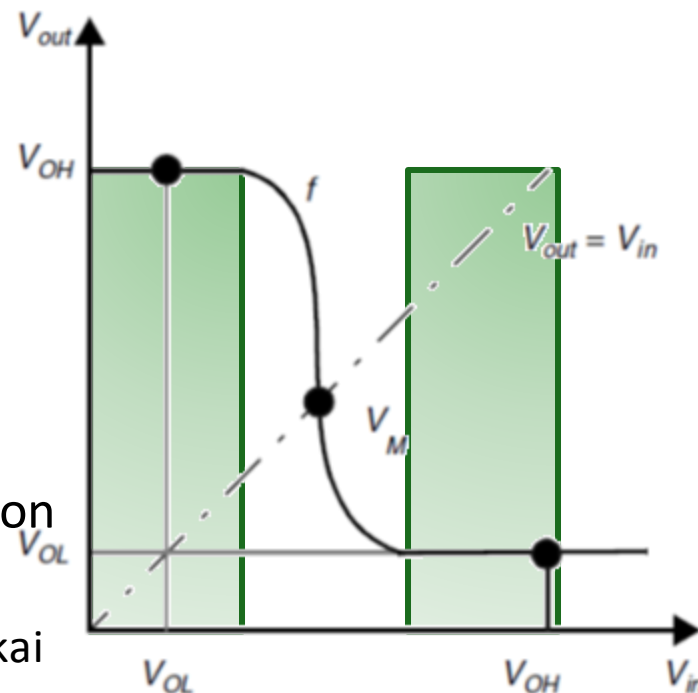
A transzfer karakterisztika

- Az inverter az $V_L=f(V_H)$ ill $V_H=f(V_L)$ függvényt kell, hogy megvalósítsa.
- Ez az ún. transzfer 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 transzfer karakterisztika és a 45° -os egyenes metszéspontja.



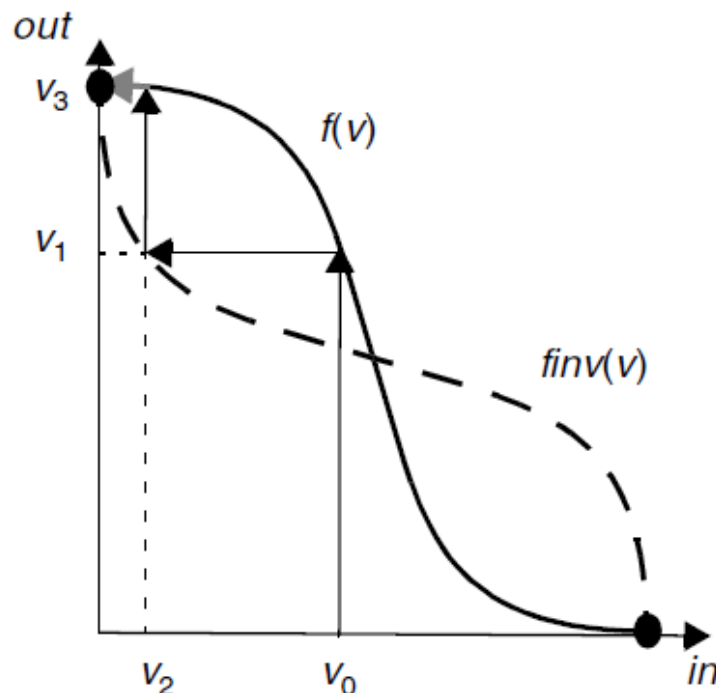
Zaj/zavar védettség

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



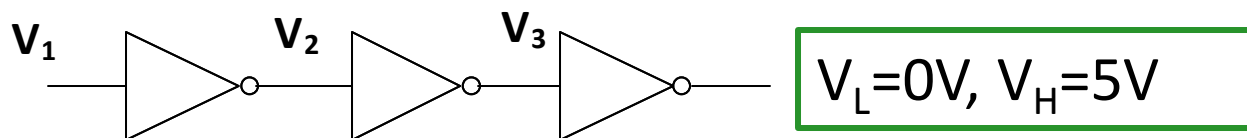
Jel-regeneráció

- A digitális feldolgozás során a logikai jel szintje regenerálódik

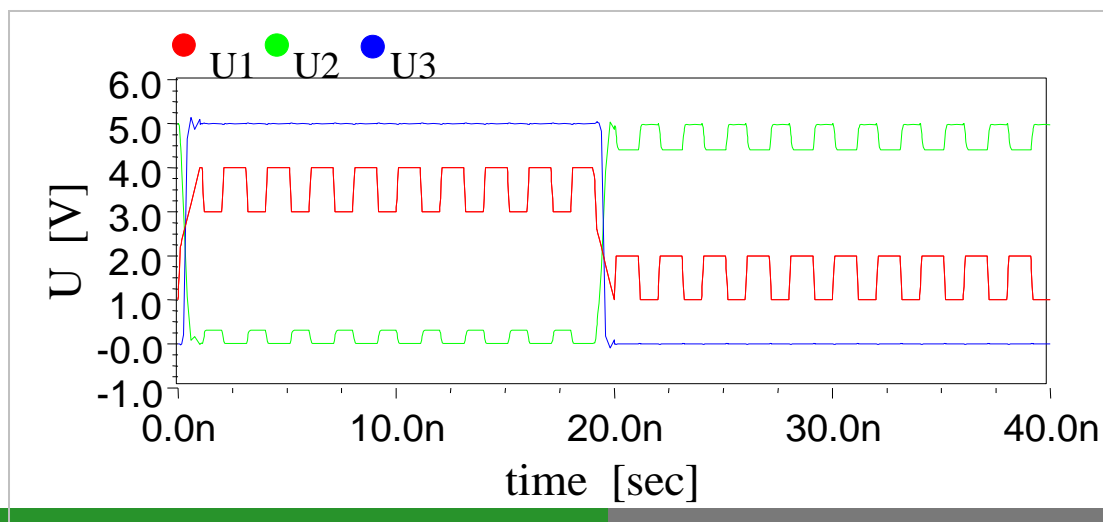


- Ha egy ábrán ábrázoljuk a $f(V)$ transzfer karakterisztikát és $\text{finv}(V)$ inverzét, nagyon szemléletesen belátható.
- Így lesz egy „rossz” V_0 jelből egyre jobb V_1, V_2, V_3 feszültség.
- Így a digitális logikai kapunak két egyensúlyi helyzete van

Példa: jelregeneráció (áramköri szimuláció)



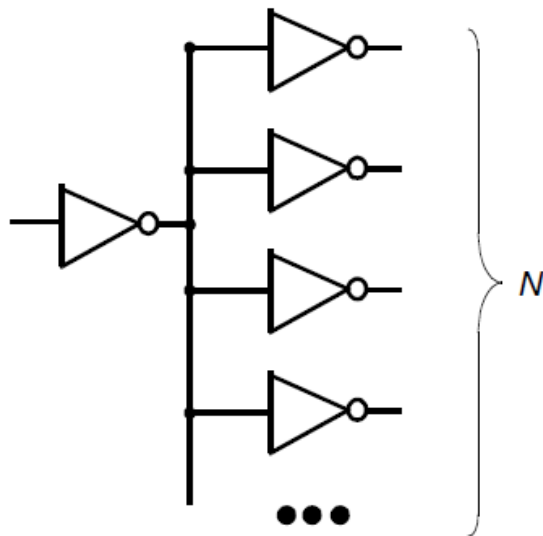
- Oktatási célú áramköri szimuláció, a valóság jobb!
 - Az első inverter bemenetére egy rossz, a névleges értéktől 1,5V-al eltérő logikai jel érkezik, amelyre $1V_{pp}$ zavar szuperponálódik.
 - A kapu kimenetén a jelszint középérték már csak 0,5V-al tér el a névlegestől és a zavar amplitúdója is felére-harmadára 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 kevésbé érzékeny (természetesen a megadott abszolút határok között) többek között
 - A tápfeszültségre
 - A környezeti hőmérsékletre
 - Az egyes alkatrészek paramétereinek véletlenszerű megváltozásának
 - Stb.

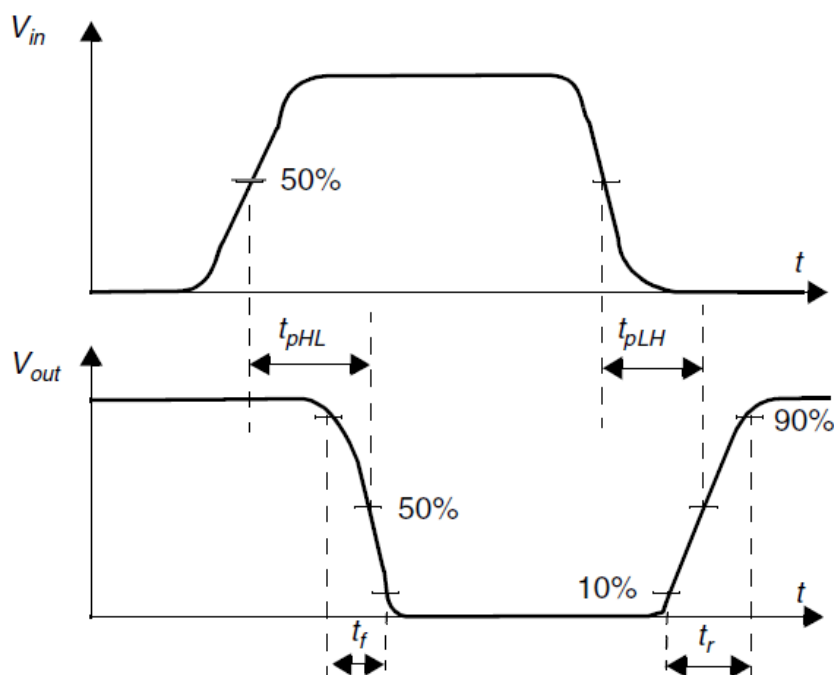
Meghajtóképesség (Fan-out)



- Egy adott kapu hány ugyanolyan típusú kaput tud meghajtani a statikus és dinamikus paramétereinek számottevő romlása nélkül.
- (manapság ez inkább egységnyi terhelésre vonatkozik- ld. CMOS)
 - Jelölése pl. FO4 - 4x meghajtóképességű kapu.

Késleltetés

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



Késleltetés (propagation delay)

- 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
- A késleltetést a kettő számtani közepeként definiálhatjuk
 - $$t_{pd} = \frac{t_{pLH} + t_{pHL}}{2}$$
 - (Ez persze csak egy mérőszám. Valójában a szimulátor tudja kezelni azt, hogy a késleltetés hogyan függ a bemeneti jel változásától)
- 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 mindkettő szinonimájaként használjuk a „fogyasztás” szót (helytelenül)!**
- **Teljesítmény = egységnyi idő felvett energia. (Power)**
 - Mértékegysége a Watt (J/s)
 - Két dologra vagyunk kíváncsiak:
 - átlagos teljesítmény: $P_{av} = \frac{V_{DD}}{T} \int_0^T I(t) dt$
 - csúcsteljesítmény: $P_{peak} = V_{DD} I_{peak} = V_{DD} \max(I(t))$
 - ahol V_{DD} a kapu tápfeszültsége, I pedig az árama.
- **Két részre bontható**
 - Statikus fogyasztás – folyamatosan jelen van a kapu bekapcsolásától
 - Dinamikus fogyasztás – a kapcsolási események okozta fogyasztás. Függs a frekvenciától és a kapcsolat valószínűségétől.
- **Energia**
 - $E = \int P(t) dt$
 - Mértékegysége a Joule (kWh)

A teljesítmény-késleltetés szorzat (PDP)

- A késleltetés és a 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 a 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**



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

CMOS áramkörök

CMOS áramkörök

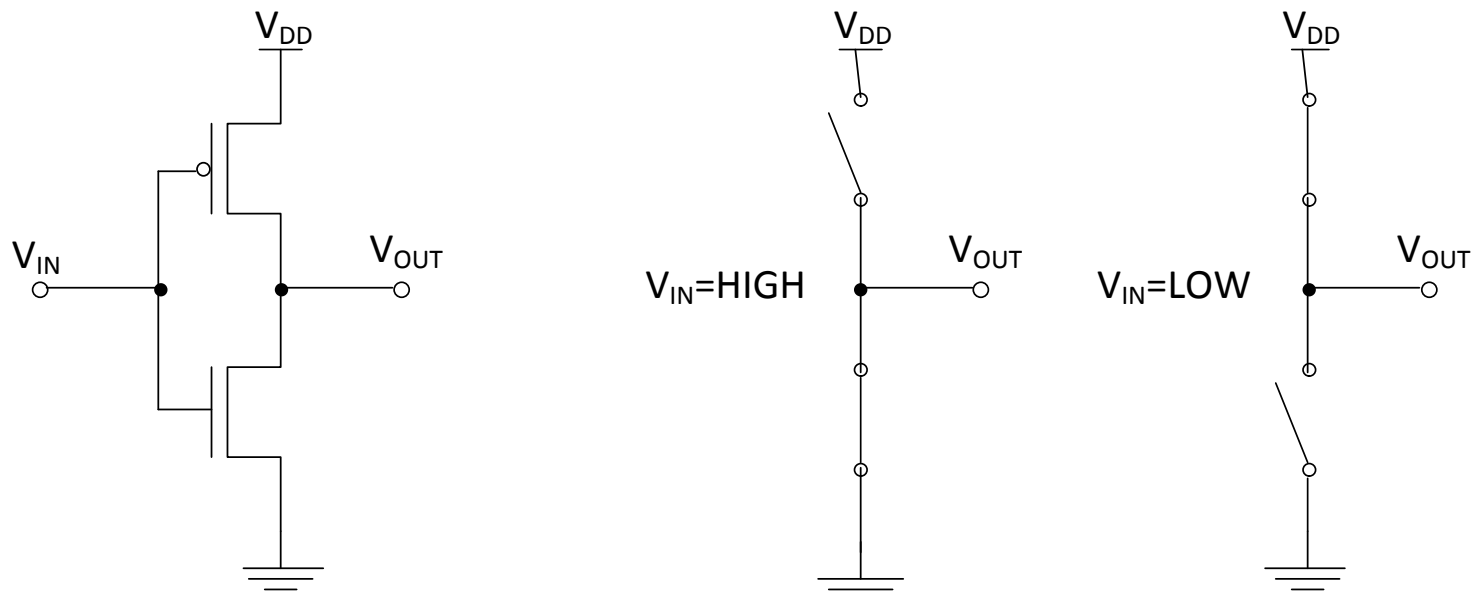
■ Complementary MOS

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

■ Manapság egyeduralkodó logikai áramkörökben

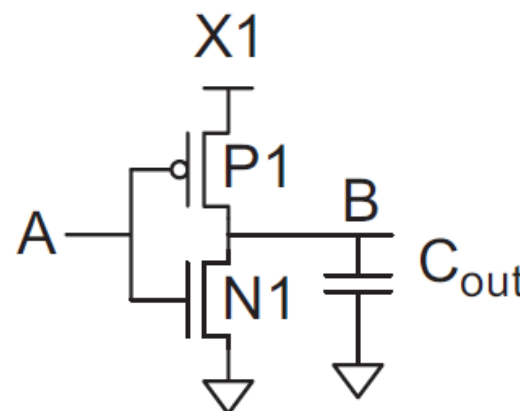
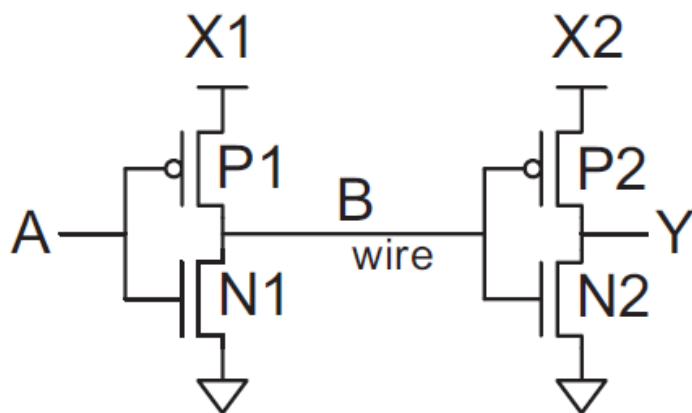
- A logikai szintek „tiszták”: $V_H = V_{DD}$, $V_L = 0V$ (azaz **rail-to-rail**, 0-tól tápfeszültségig történik a működés)
- A statikus (állandósult állapotbeli) áramfelvétel alacsony.
- A jelváltozás esetén a fel és lekapcsolási késleltetések (nagyjából) megegyeznek. (szimmetrikus működésre méretezett kapuk esetén.)
- Tápfeszültség-érzékeny, 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 kapcsolási rajza



- Egy n és egy p csatornás MOS tranzisztorból áll.
 - Állandósult állapotban a két tranzisztor közül csak az egyik vezet, a másik mindig lezár.
- 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

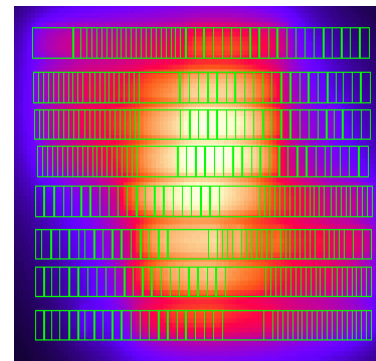
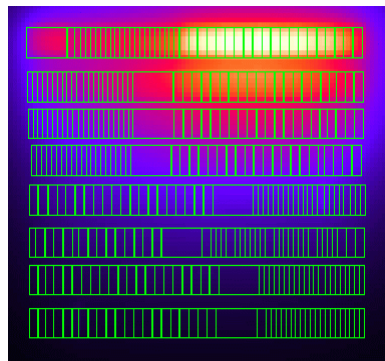
- A tranzisztorok belső kapacitásai (intrinsic kapacitás)
 - Ezekről nem beszéltünk...
- A következő kapu bemenetének kapacitása
 - Ez látható a keresztmetszeti ábrán: a MOS tranzisztor gate-je mint egy síkkondenzátor
- **Az összekötő vezeték kapacitása – egy modern technológiában ez határozza meg a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

A késleltetés

- Láttuk, hogy a késleltetést tulajdonképpen egy kapacitás töltése-kisütése határozza meg.
- Minél nagyobb a kapacitás, annál nagyobb a késleltetés (kb. arányosan)
- **A tápfeszültség növelésével a késleltetés csökken**, mivel nagyobb árammal töltjük a kapacitásokat.
- $t_{pd} \sim \frac{CV}{I}$
 - (a pontosság kedvéért: $Q = CV_{DD}$ de $I \sim V_{DD}^2$)
 - Pontosán így működik (működött) a „tuningolás”
 - A magfeszültség növelésével a mikroprocesszort a névlegesnél magasabb órajelfrekvencián lehet járatni.

Teljesítmény

- A statikus fogyasztás alacsony, oka a szivárgási áram.
 - Modern áramkörökben már nem hanyagolható el...
- A dinamikus fogyasztás minden kapcsolási eseménynél fellép
 - Arányos az eseményűrűséggel, amit
 - az órajelfrekvencia és az áramkör aktivitása határoz meg.



A dinamikus fogyasztás

- Két komponense van
 - Átkapcsolás: a bemeneti jel felfutó szakaszában mindkét tranzisztor egyszerre nyitott.
 - 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:

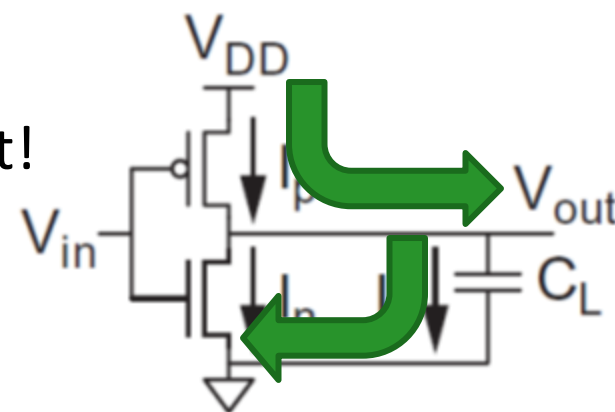
$$E_C = \frac{1}{2} C_L V_{DD}^2$$

- 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 $T f_{sw}$ alkalommal töltjük fel és sűtjük ki.
- Így a szükséges teljesítmény:

$$P = \frac{E}{T} = f C V_{DD}^2$$

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

$$P \sim f V_{DD}^2$$

Dynamic Voltage Frequency Scaling/Enhanced SpeedStep stb.

- Az OS az igényeknek megfelelően változtatja a mikroprocesszor órajelfrekvenciáját és tápfeszültségét.
- Miért is?
 - Nagyobb órajelhez nagyobb tápfeszültség szükséges!
 - Csökkentett órajel esetén kevesebb 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.