

Elektronika alapjai

5. előadás

Memóriák



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

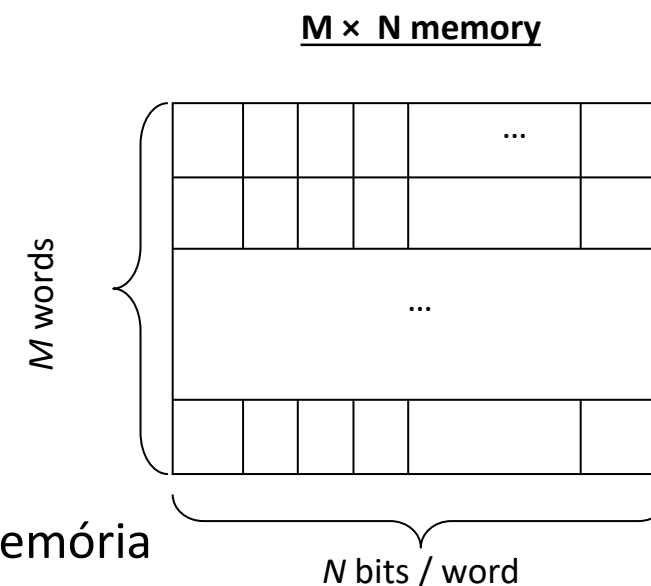
- M db N bit széles memóriaszó.
 M általában kettő hatványa,
 N általában 1, 2, 4, 8, vagy 8 többszöröse.
- Pl. $64k \times 16$, azaz 1Mbit kapacitású memória.

■ Tradicionális felosztás

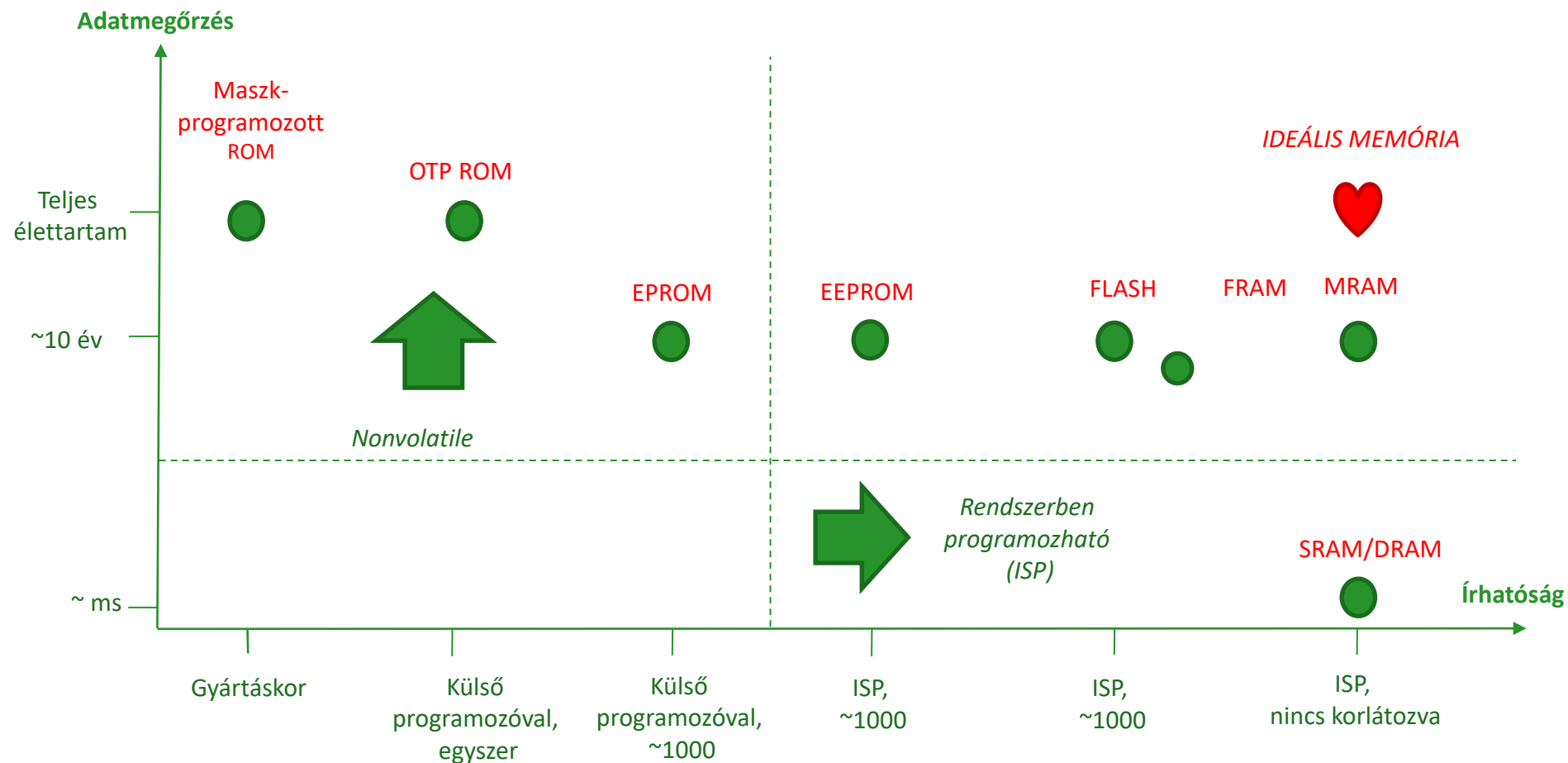
- ROM vs RAM, azaz csak olvasható ill. (nem szószerint) írható-olvasható memória
- Kevésbé használható, a határok elmosódtak
 - Az EEPROM írható, az NVRAM nem veszíti el az információt a tápfeszültség megszűnésekor.

■ Csoportosítás:

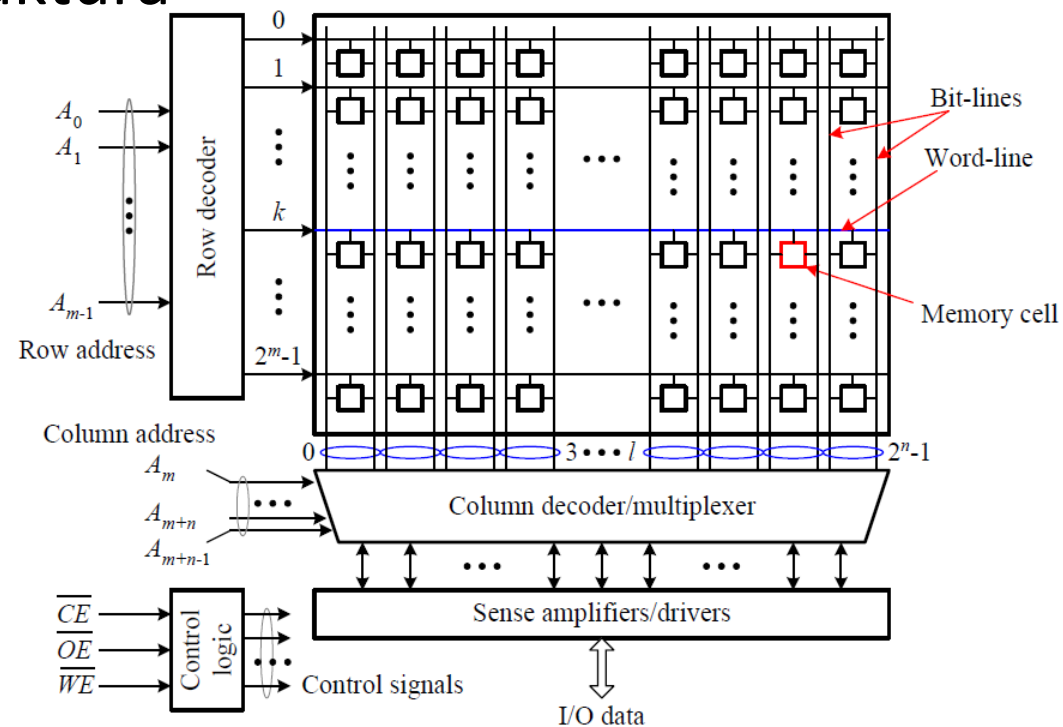
- Írhatóság és adatmegőrzési idő szerinti csoportosítás jobb.



Félvezető memóriák csoportosítása



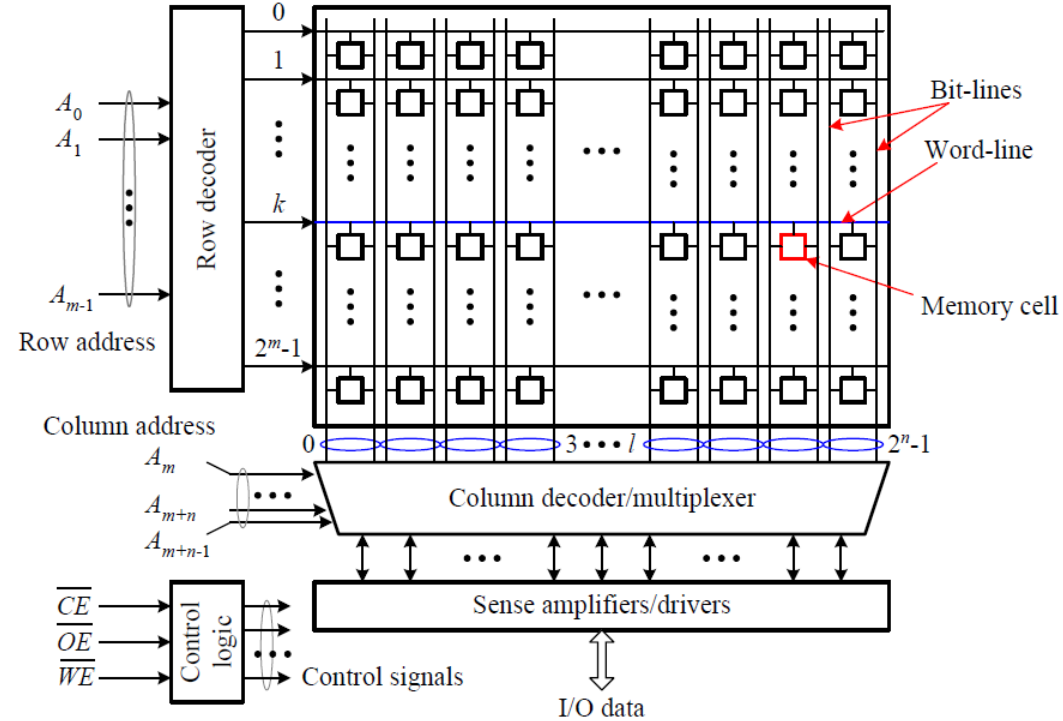
A tipikus memória struktúra



- 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 sordekóder állít elő.
 - Az aktivált cellák a **bitvonalra** (bit line) másolják a tartalmukat.
 - A cím másik részével a bitvonalak közül választunk ki



A tipikus memória struktúra 2.

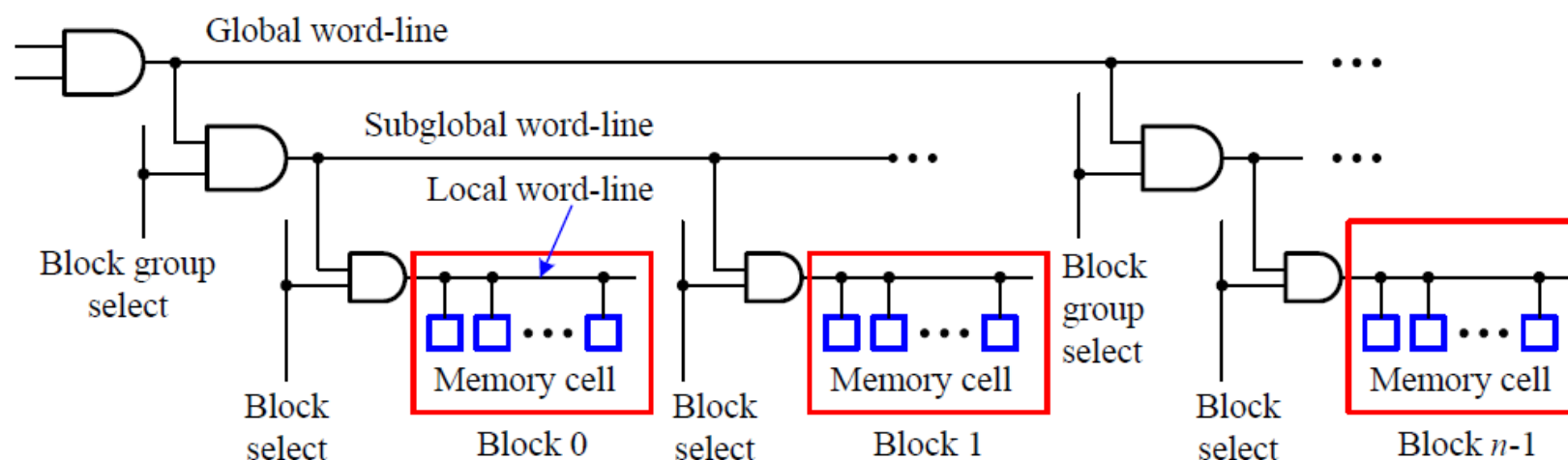


- Az érzékelő erősítő állítja helyre a szokásos CMOS rail-to-rail jelet.

- A cella tranzisztorai KIS MÉRETŰEK. (mivel minél kisebb a cella, annál nagyobb kapacitású memóriát lehet elhelyezni felületegységként.)
- 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**.

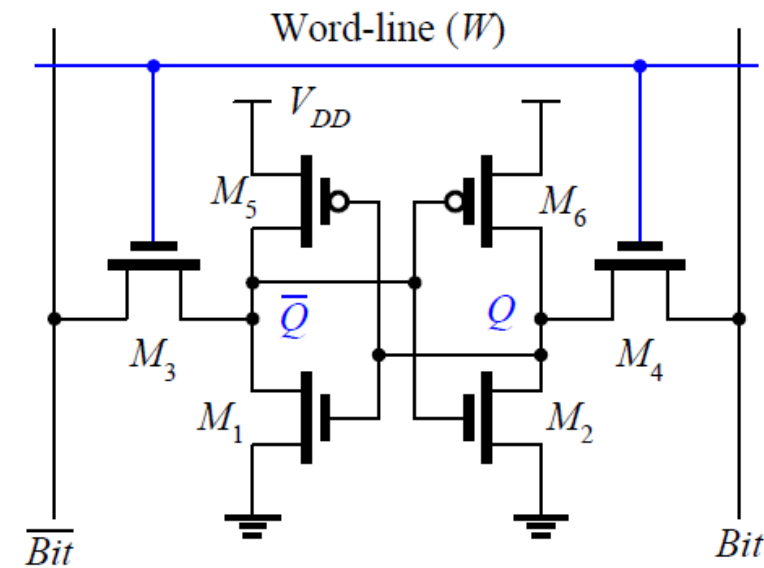


Statikus RAM (SRAM)



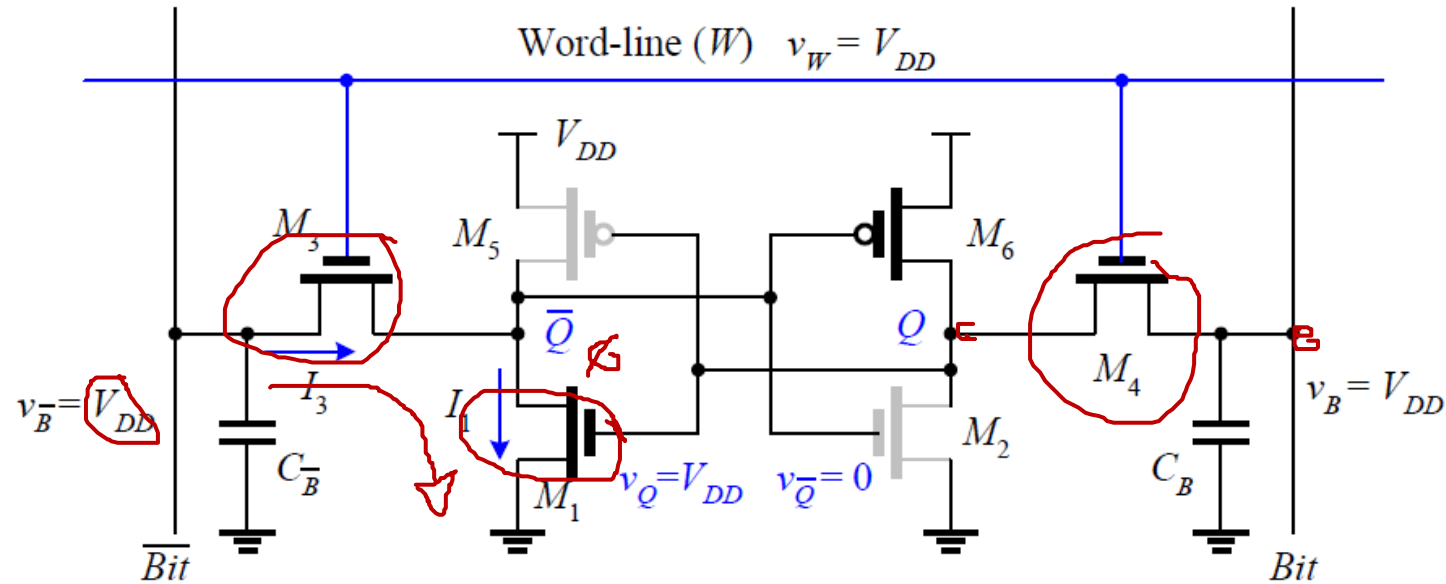
Statikus RAM memória

- A cellát 6 tranzisztor alkotja
- Két bitvonal van, ellentétes logikával.
 - Differenciális logikát fog használni.



- A két keresztbecsatolt 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 M_3 , M_4 tranzisztorokat elérési (access) tranzisztornak hívjuk.
- A működés elvben csak „digitális” szemlélettel követhető, de a valóság nem ilyen egyszerű...

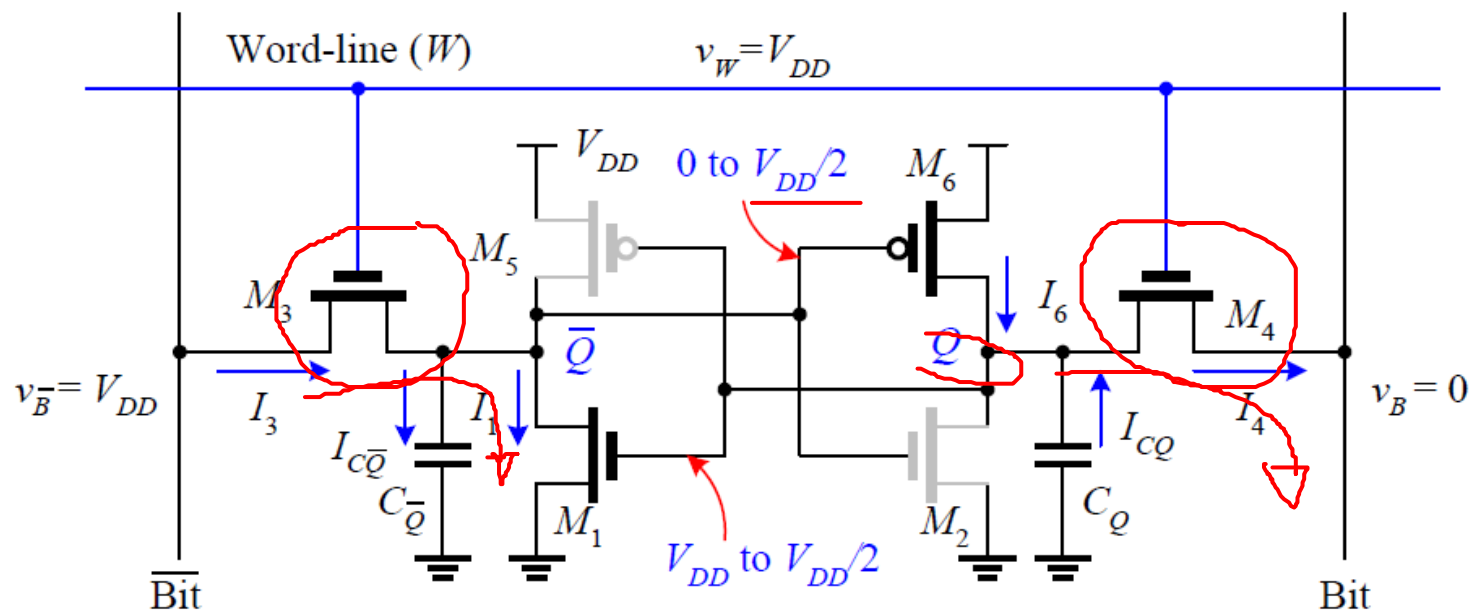




Feltételezzük, hogy a cellában logikai 1 van

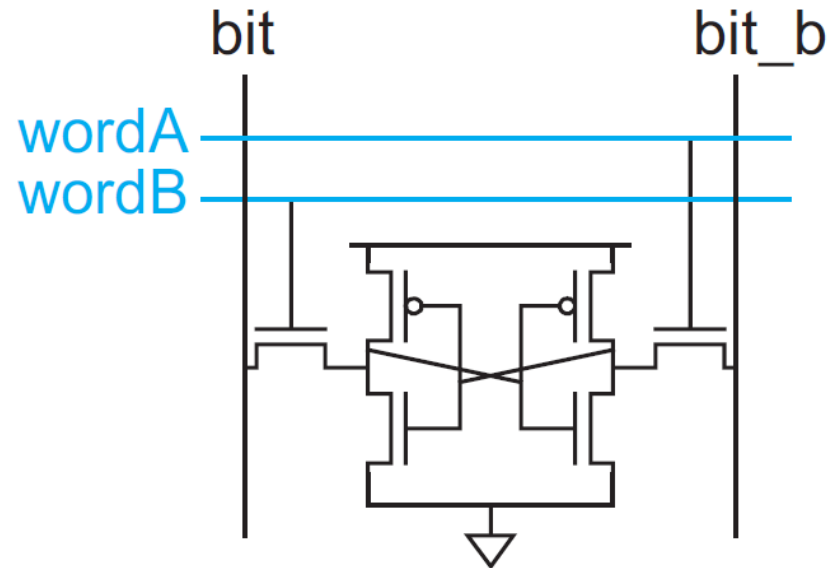
- A bitvonalakat tápfeszültségre töltik elő. (a cella kis tranzisztorain keresztül a feltöltés nagyon sokáig tartana!)
- Az olvasás kezdetekor M3, M1 kinyit, a \overline{Bit} feszültsége lecsökken, miközben a Bit feszültsége változatlan.
- Kb. 100-200mV feszültségkülönbség elég ahhoz, hogy az érzékelő 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 mindkét bitvonal az olvasáshoz.
 - Két szóvonal alkalmazásával egyidőben két cellából lehet olvasni.
 - Az íráshoz mindkét 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.



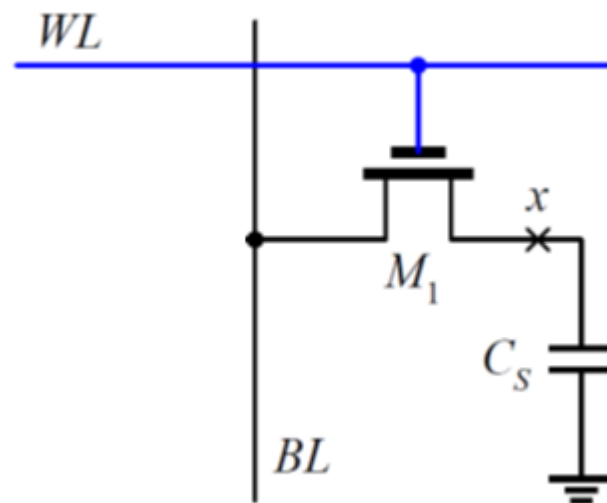
Dinamikus RAM (DRAM)



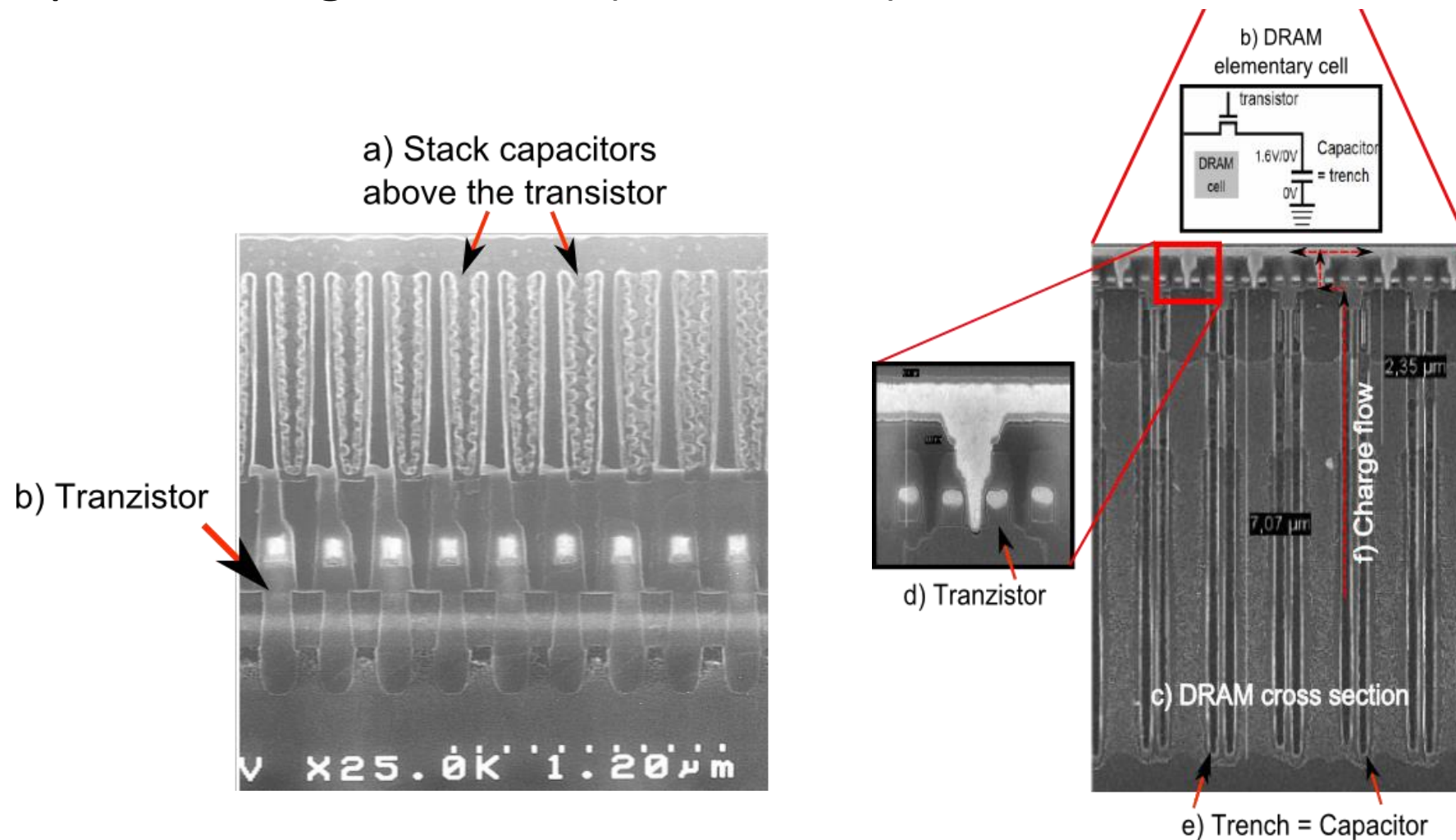
A dinamikus RAM cellája

- 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 M_1 tranzisztor kapcsol a bitvonalra.
- A tároló kapacitás tipikusan 25-40fF



A tároló kapacitás megvalósítása (illusztráció)



- [Forrás](#)

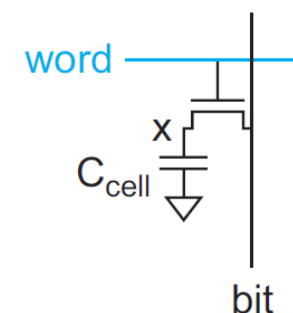
DRAM írás és olvasás

■ Írás

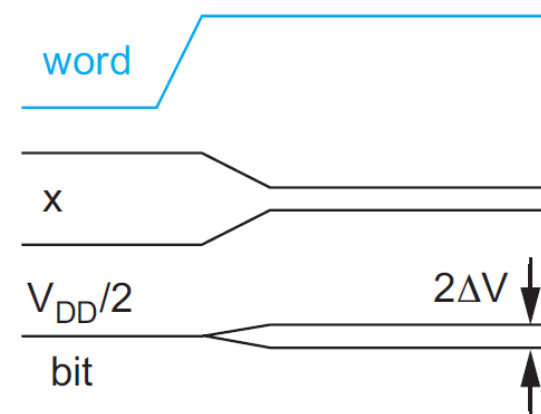
- A bitvonalat a logikai értékre állítva a szóvonal aktiválásakor a tároló kapacitás kisül, vagy feltöltődik.

■ 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

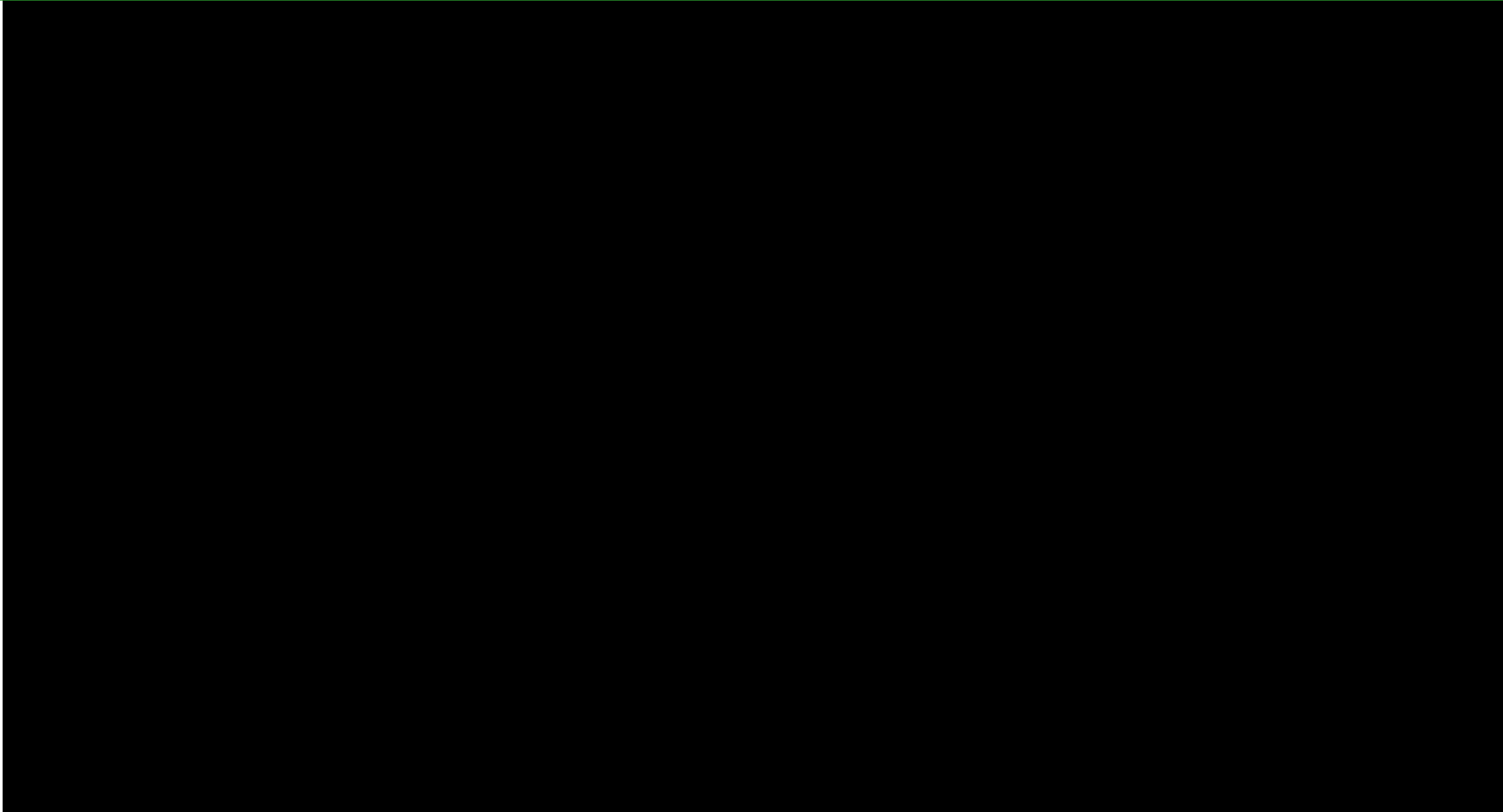


(a)



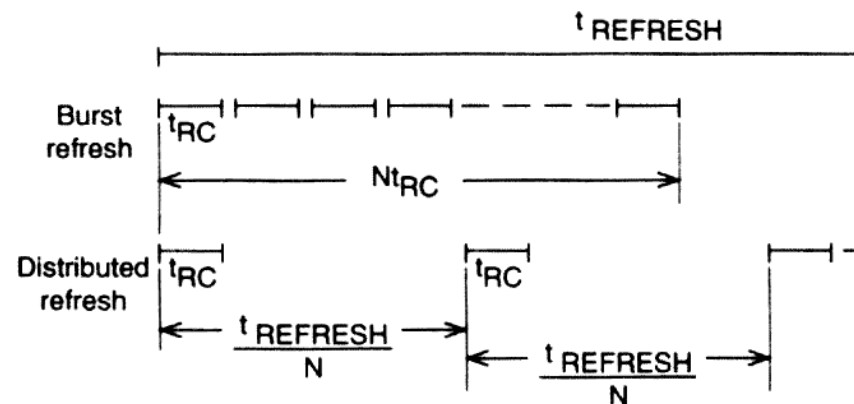
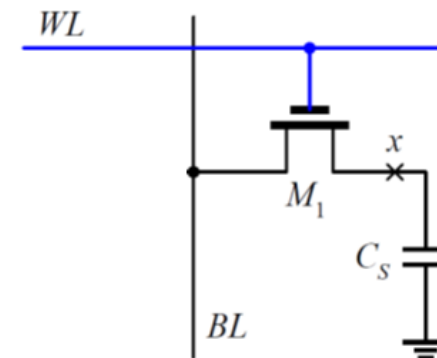
(b)





Frissítés

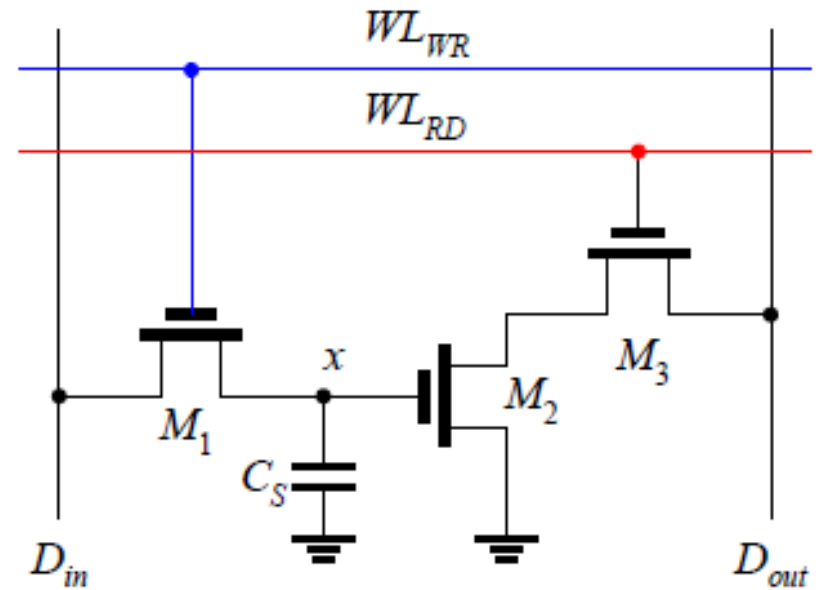
- A tároló kapacitásból a töltés szivárog. Leginkább a drain lezárt pn átmenetén. A szivárgási áram ráadásul hőmérsékletfüggő. Kb. 30°C hőmérséklet növekedés megtízszerezi a szivárgási áramot.
- A DRAM-ot frissíteni kell.
- egyszerre 1 sort frissítenek, ennek t_{RC} ideje kb. 100-200ns
 - **Burst refresh:**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

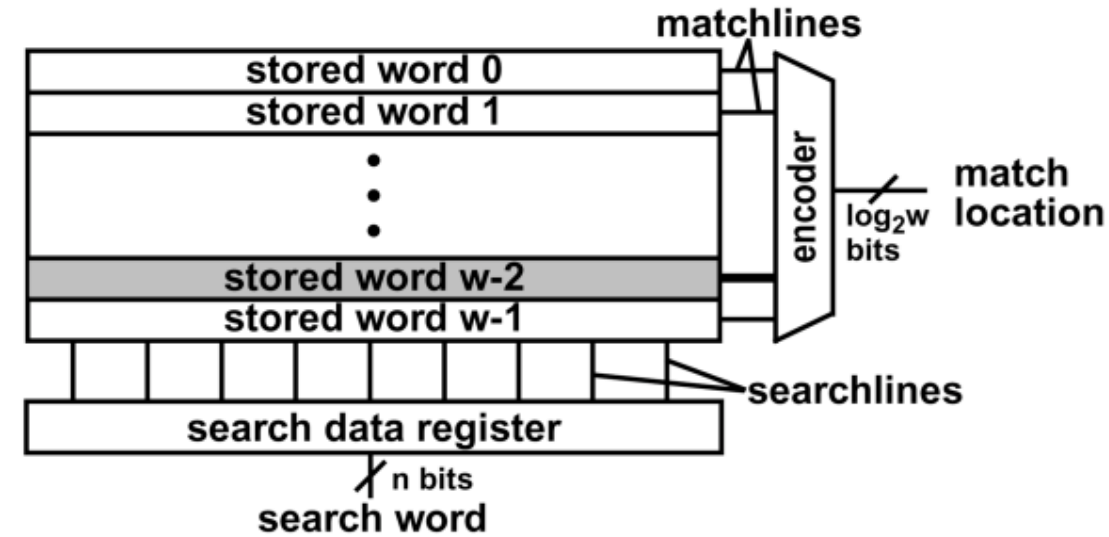
Azaz tartalommal címezhető memória
(Asszociatív memória)



Tartalommal címezhető memória

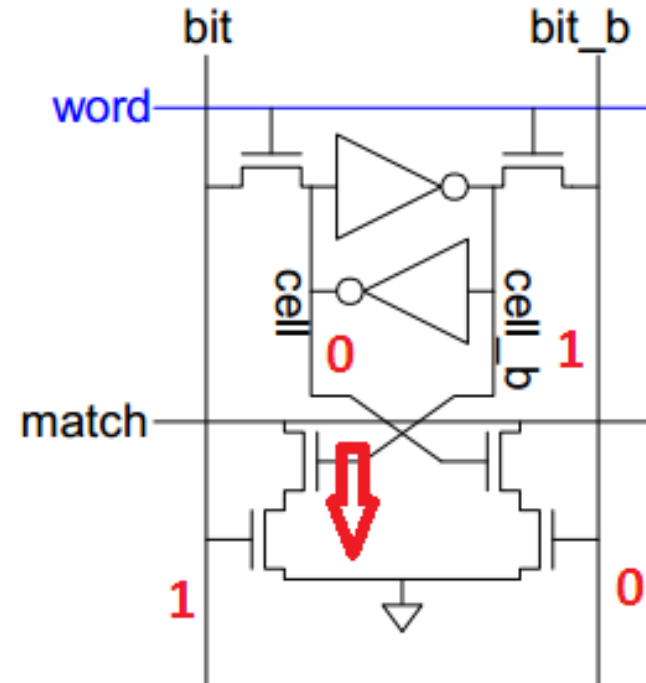
- A feladat most **fordított!**
- A tárolt adat címét keressük...

- 1 órajel alatt állítja elő a keresett információ címét
 - Azaz $O(1)$ a keresés, nem pedig pl. $O(\log_2 n)$ és ráadásul mindig 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

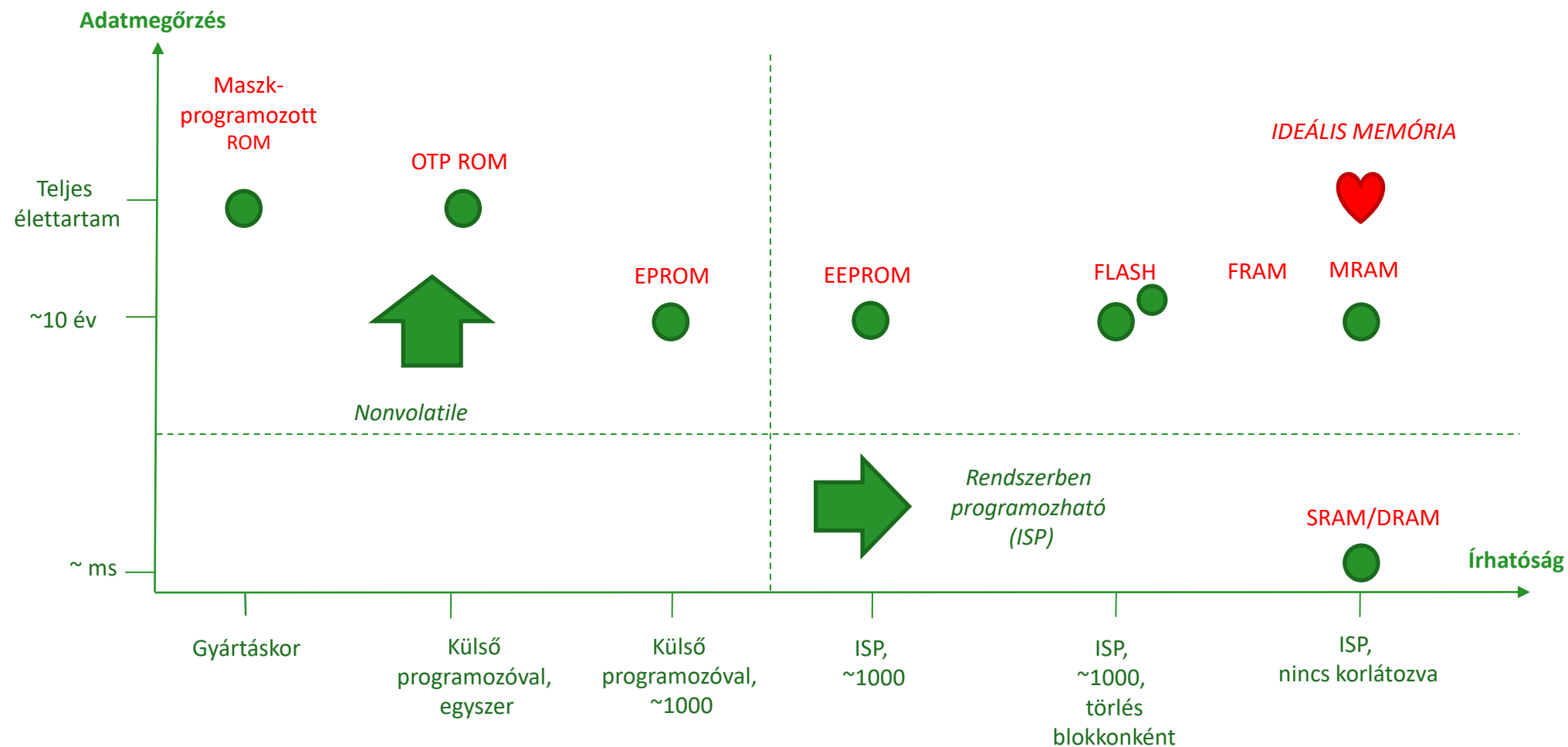


IT eszközök technológiája

ROM



Emlékeztető

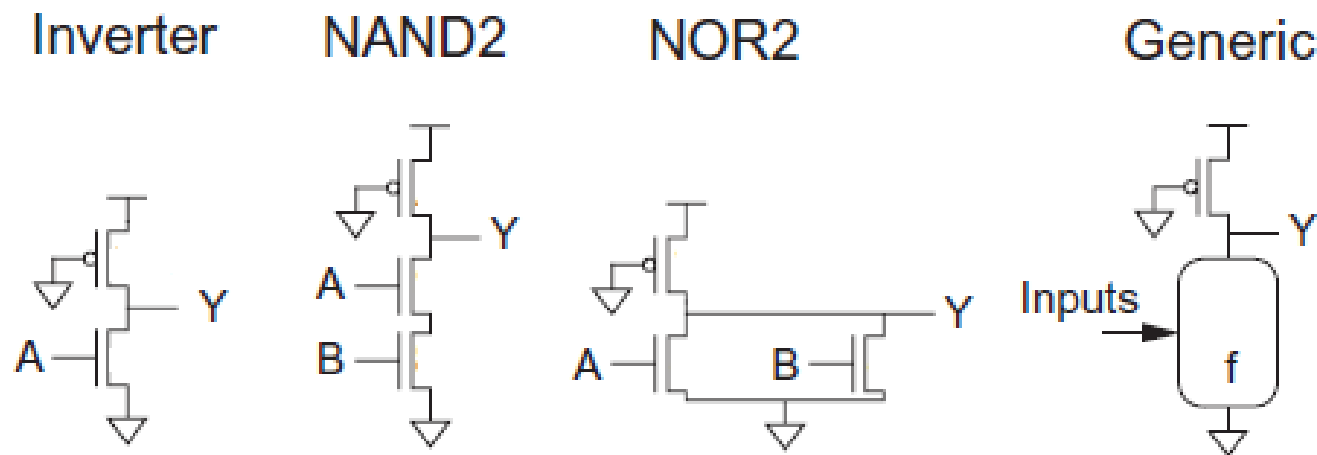


Maszk programozott ROM (MROM)

- 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.



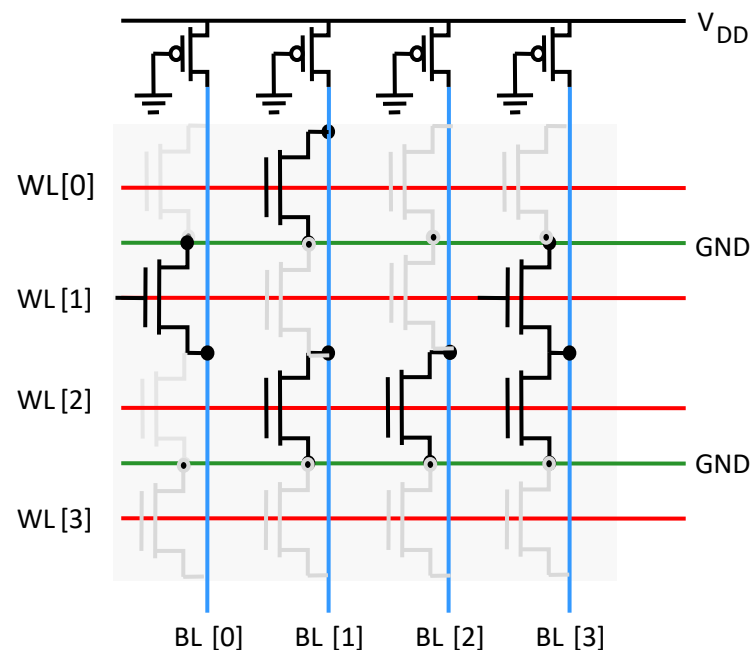
Pszeudo NMOS kapu



- 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



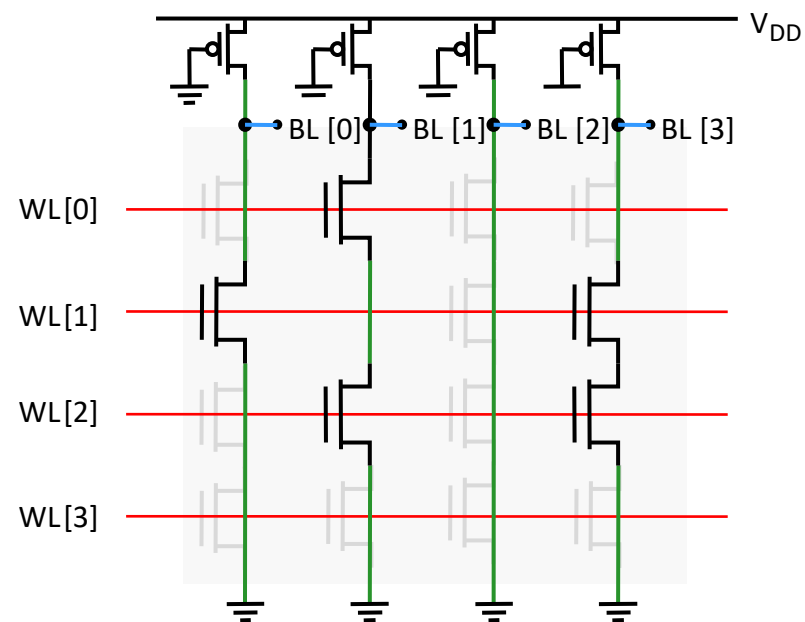
Maszk programozott NOR ROM



- 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 tranzisztora vagy vezet, vagy rövidrezárt. Ha van tranzisztor, a kimenet 1.

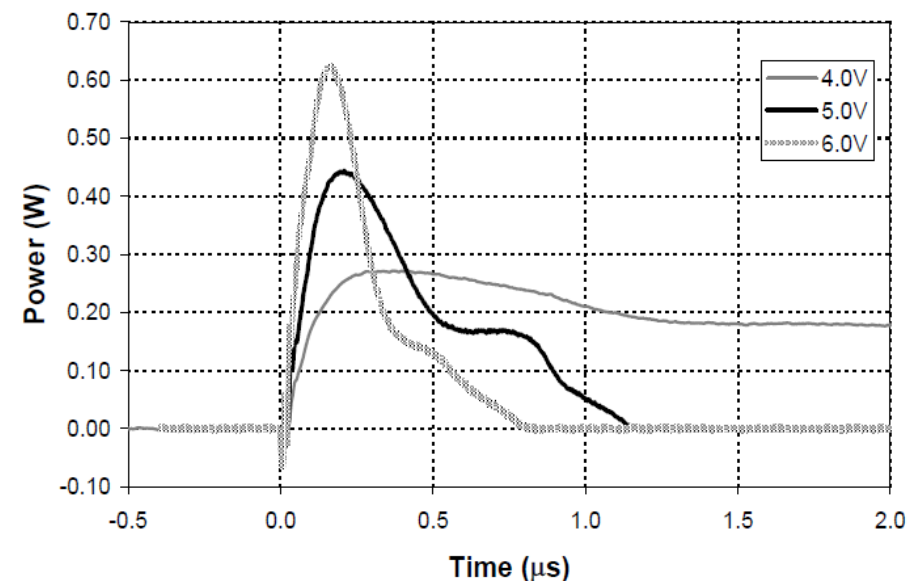
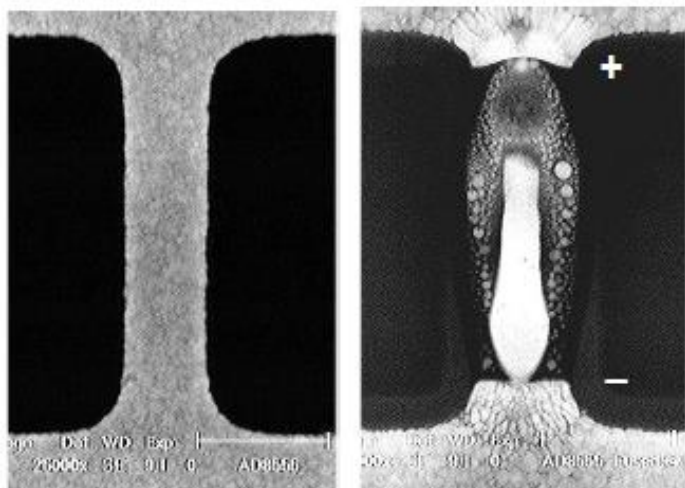


Egyszer programozható ROM

- 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. polyszilícium
 - Antifuse: kiégetés után vezet, égetés nélkül szakadás. Minél kisebb az ellenállása, annál kevesebb lesz a késleltetés.



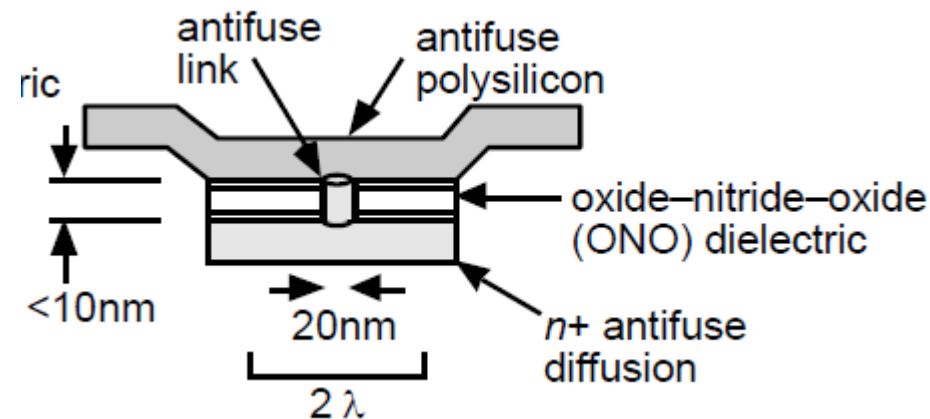
Fuse



- Poliszilícium vagy szilicid pl. NiSi (nikkel-szilícium ötvözet)
- 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.



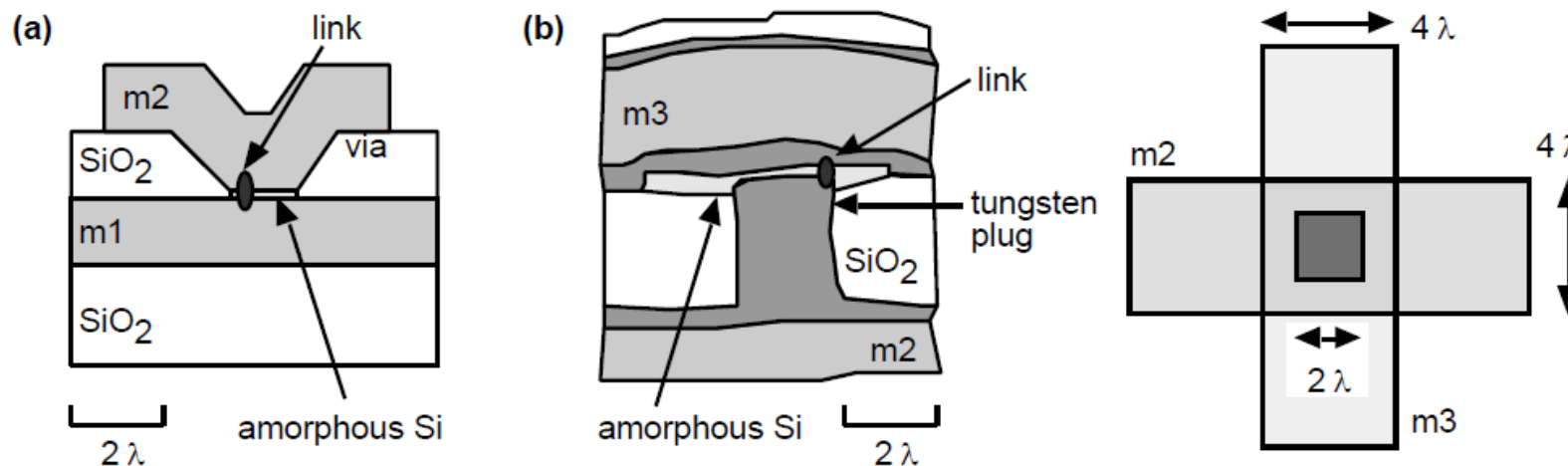
PLICE



- PLICE – programmable low impedance circuit element
 - Vékony Si_3N_4 – 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. 80 Ω 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 vezetőképesség inverziós csatorna létrejön
- A küszöbfeszültség függ a szigetelőben lévő töltésektől
 - 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

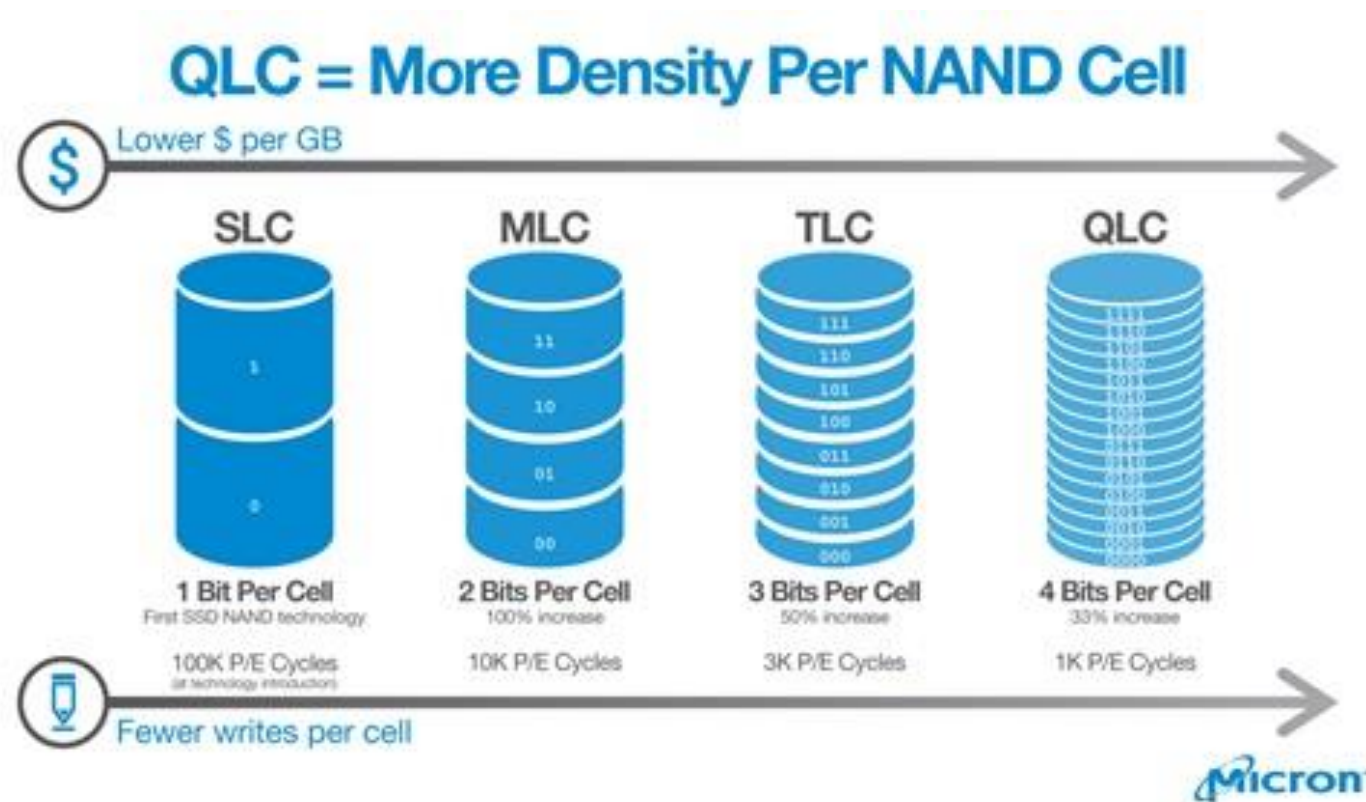
- Azaz **programozhatóvá** tesszük a MOS tranzisztort!
- Többfajta konstrukció:
 - Lebegő (sehova nem kötött poli-Si) gate, az ún. floating gate
 - Többrétegű szigetelő anyagok határfelülete, amely töltéscsapdákat tartalmaz – charge trap flash

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 Hardver alapokból/Operációs rendszerekből ismert (?)



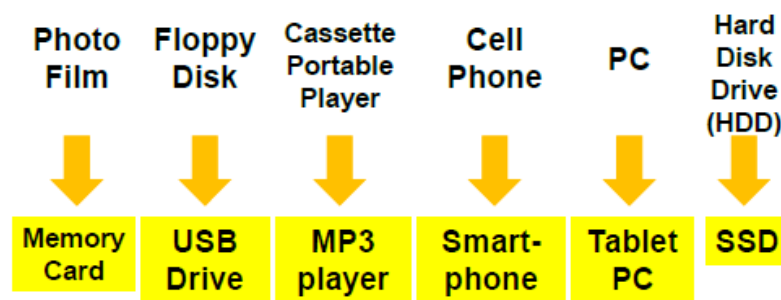
(E)EEPROM

▪ Régi technológiák

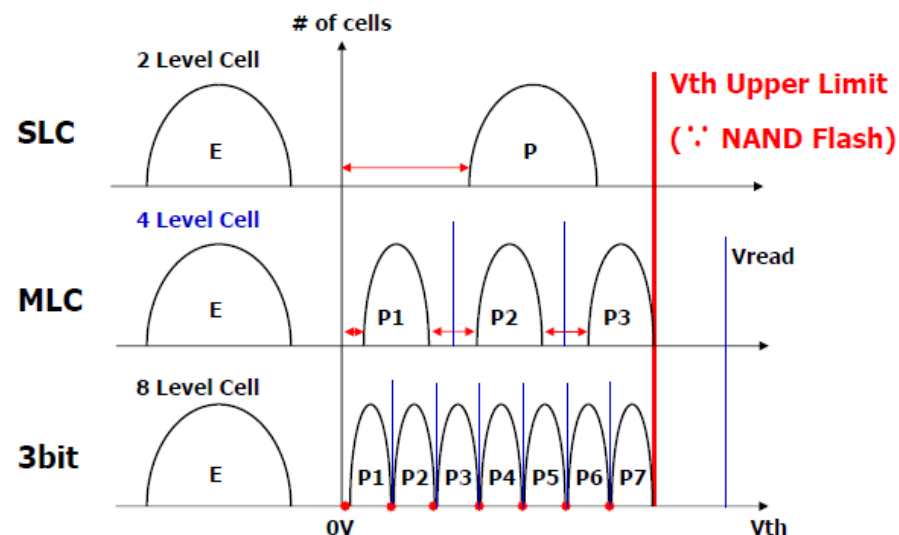
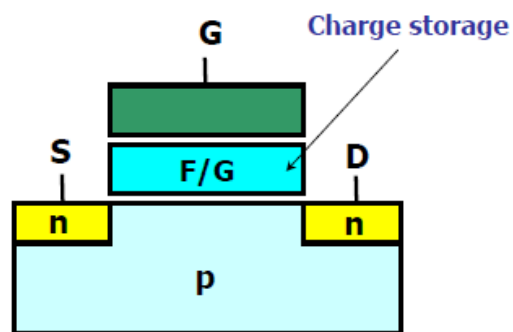
- **EPROM:** programozás lavinaletöréssel, törlés UV fény segítségével
- **EEPROM:** programozás-törlés alagútjelenséggel.

▪ FLASH EEPROM

- Programozás: lavinaletöréssel 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!**



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	30 μ S
Write speed	Slower		Faster	
Erase speed	Slower	520ms	Faster	3.5ms
Power on current	Higher	160mA (max)	Lower	50mA (max)
Standby current	Lower	200 μ A (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)

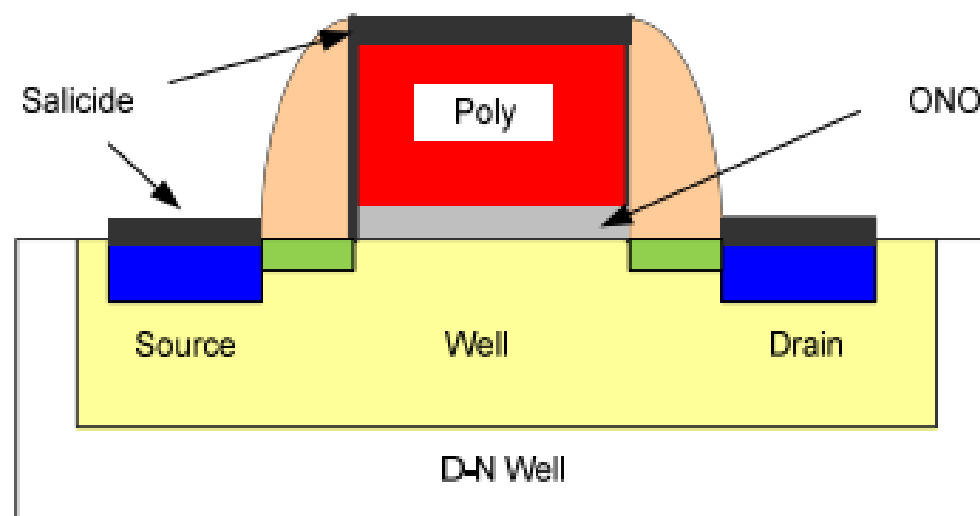
Magnetorezisztív RAM (MRAM)

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.



NVRAM megvalósítása

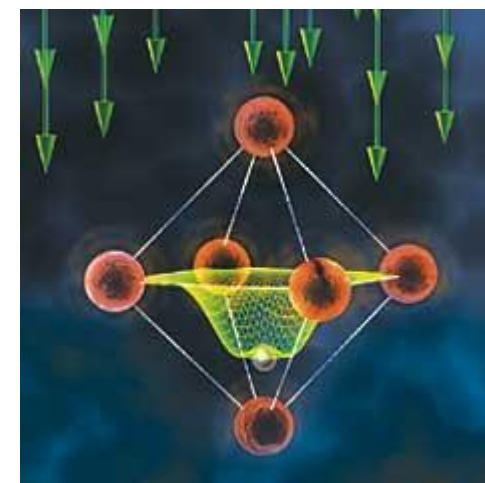
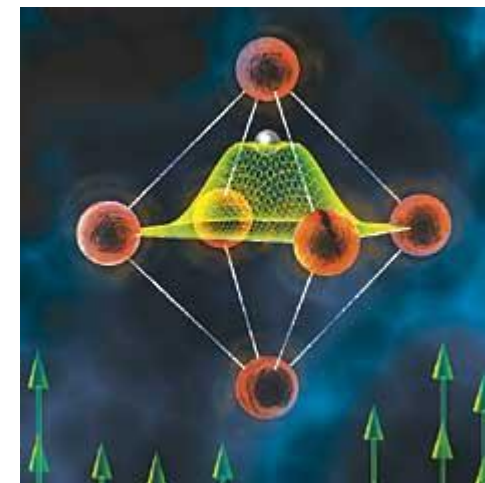
- Miért? Flash lassú, a programozás/törlés ciklusok száma korlátozott
- Statikus RAM + elem
 - Nagyon alacsony standby fogyasztású
- Statikus RAM + flash tároló
 - Reset után a flash tartalma a RAM-ba íródik
 - A tápfeszültség eltűnésekor (egy kapacitás energiáját használva) a RAM tartalma a flash-be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



Ferroelektromos RAM

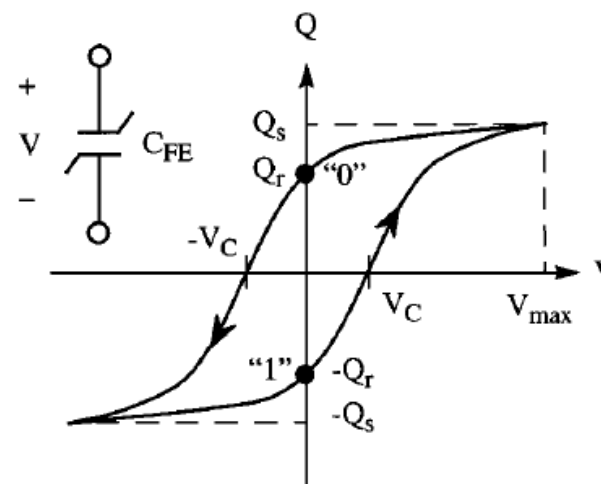
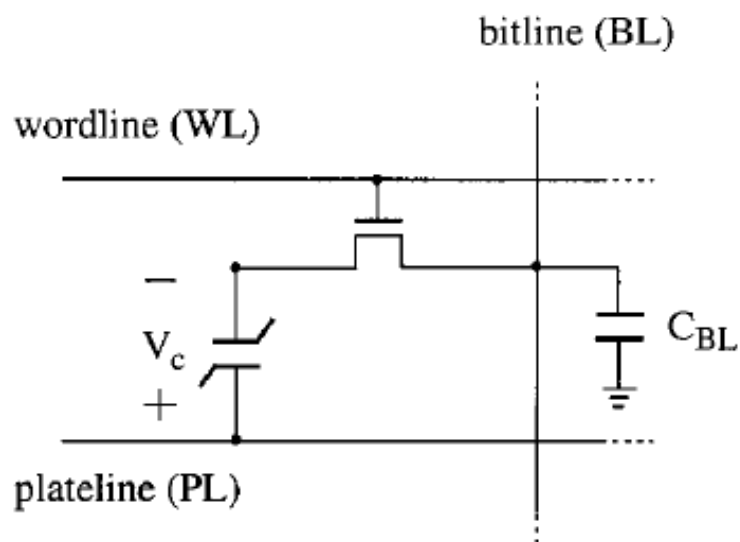
■ Ferroelektromos anyag

- Semmi köze a vashoz 😊, az elnevezés a ferromágnesesség mintájára született.
- A polarizáció (atomok, molekulák a térerősség irányába fordulnak) egyes kristályokban megmarad a térerősség megszűntetése 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...



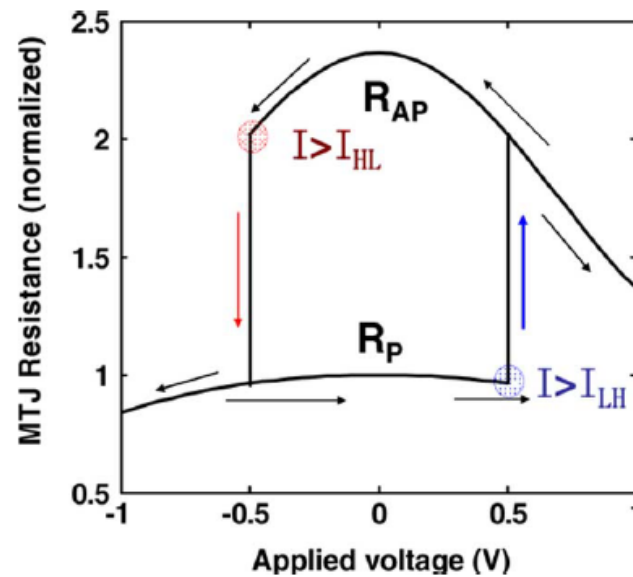
FERAM elemi cella

- 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](#)

