



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Elektronikus Eszközök Tanszéke

# 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

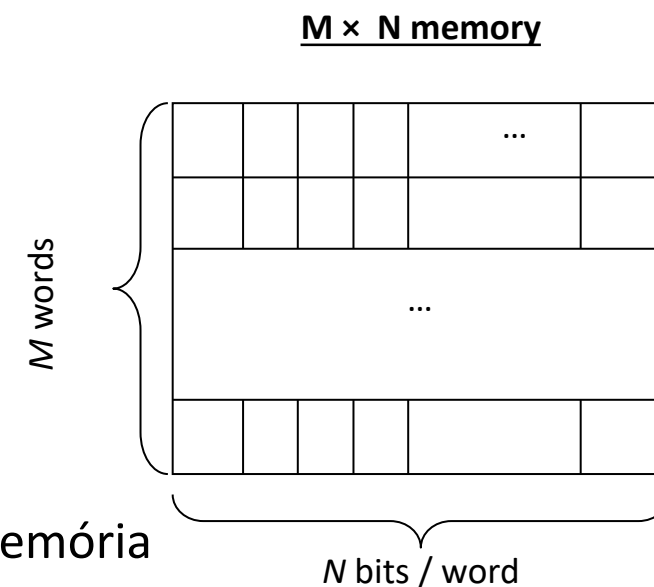
- $M$  db  $N$  bit széles memóriaszó.  
 $M$  általában kettő hatványa,  
 $N$  általában 1, 2, 4, 8, vagy 8 többszöröse.
- Pl.  $64k \times 16$ , azaz 1Mbit kapacitású memória.

### ■ Tradicionális felosztás

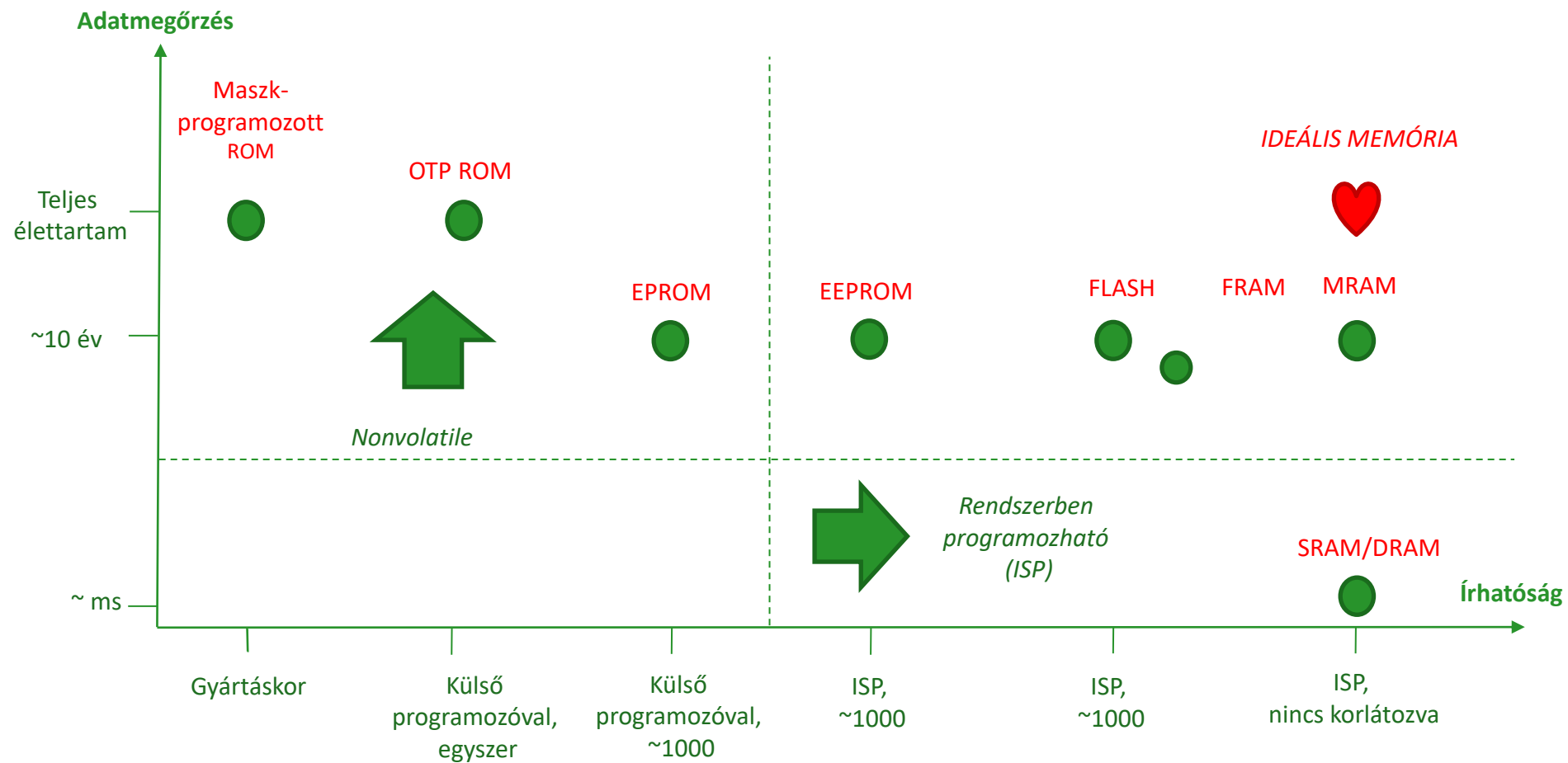
- ROM vs RAM, azaz csak olvasható ill. (nem szó szerint) írható-olvasható memória
- Kevésbé használható, a határok elmosódtak
  - Az EEPROM írható, az NVRAM nem veszíti el az információt a tápfeszültség megszűnésekor.

### ■ Csoportosítás:

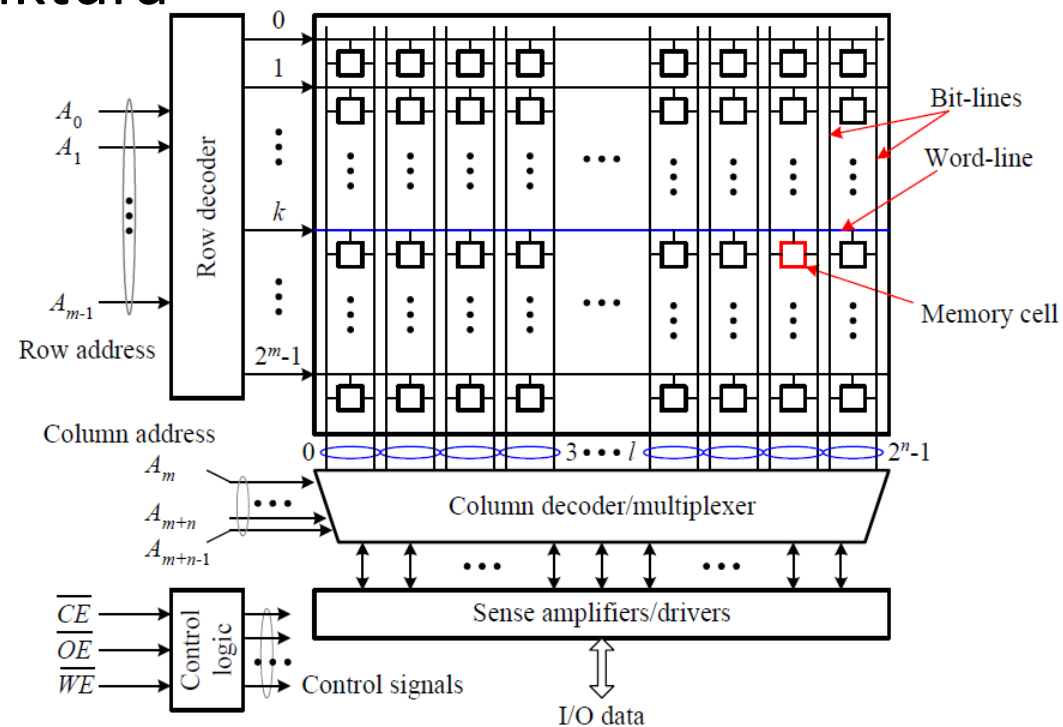
- Írhatóság és adatmegőrzési idő szerinti csoportosítás jobb.



# Félvezető memóriák csoportosítása

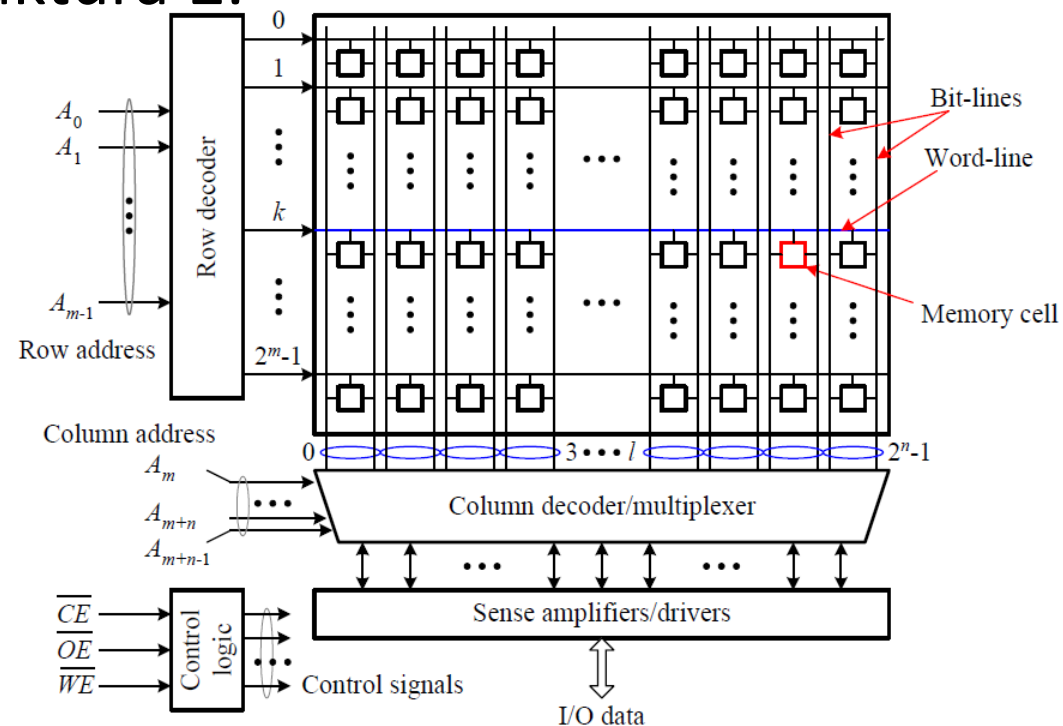


## A tipikus memória struktúra



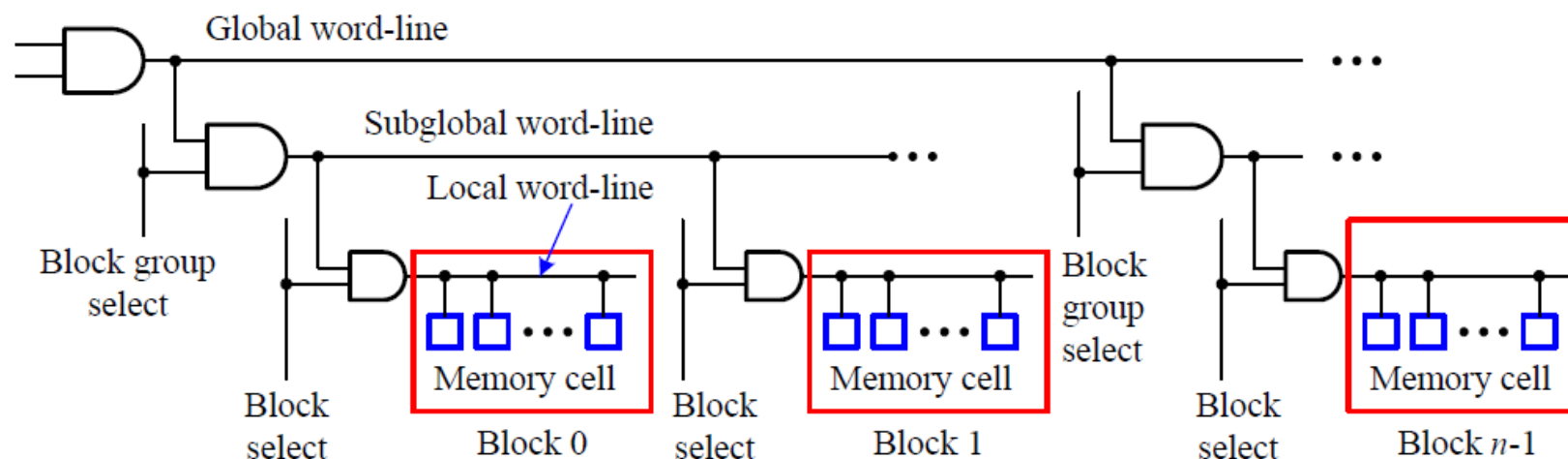
- A tárolás egy memória mátrixban történik.
  - A mátrix egy eleme, az elemi cella felel 1 vagy több bit információ tárolásáért.
  - Egy sorban lévő cellát az ún. **szóvonallal** (word line) aktiválunk, amelyet a cím egy részéből a sordekóder állít elő.
  - Az aktivált cellák a **bitvonalra** (bit line)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



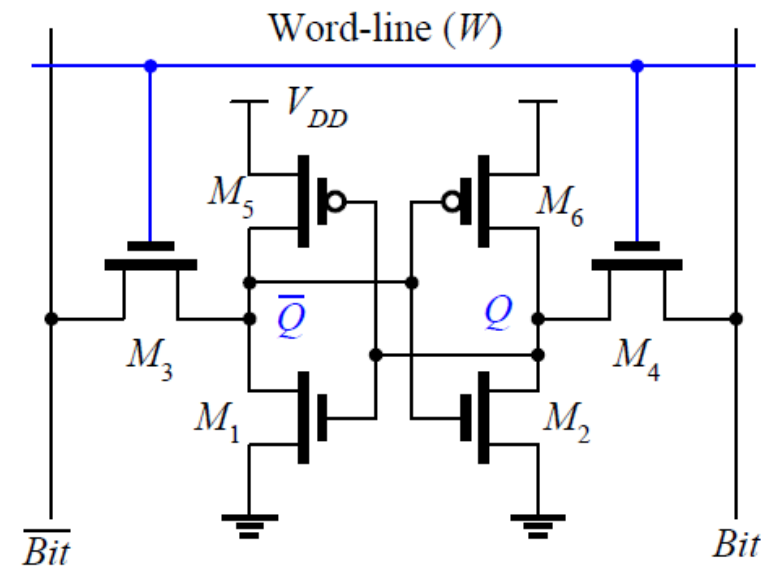
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Elektronikus Eszközök Tanszéke

## Statikus RAM (SRAM)

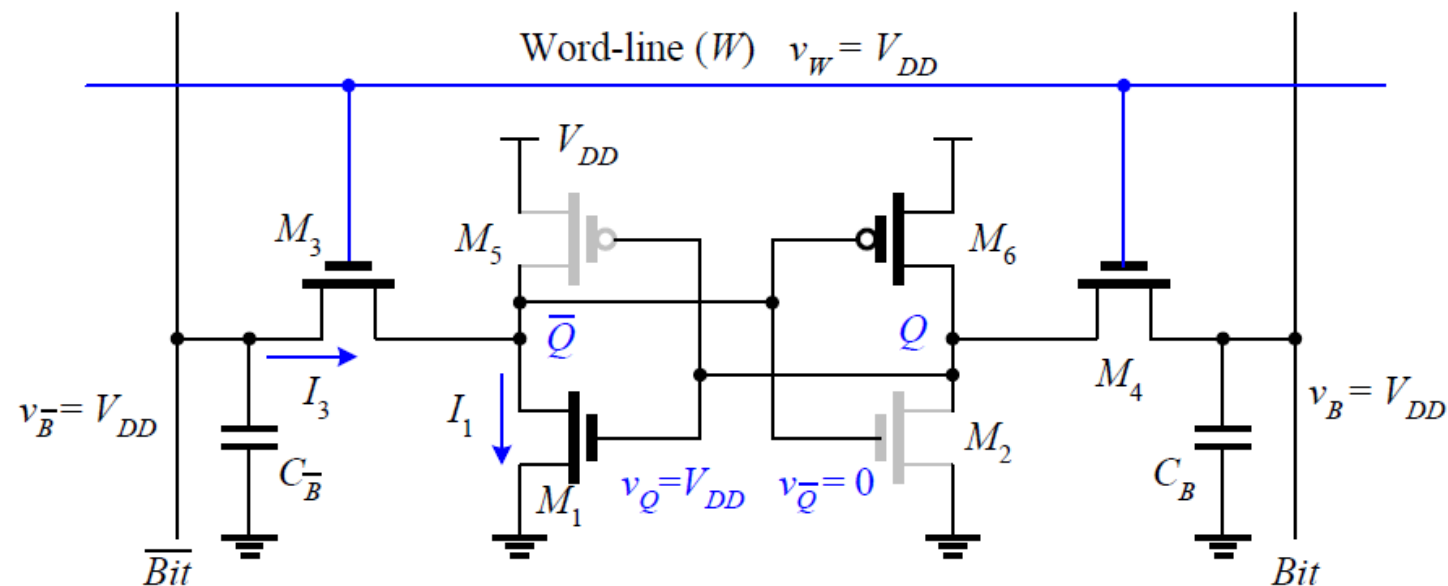


## Statikus RAM memória

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

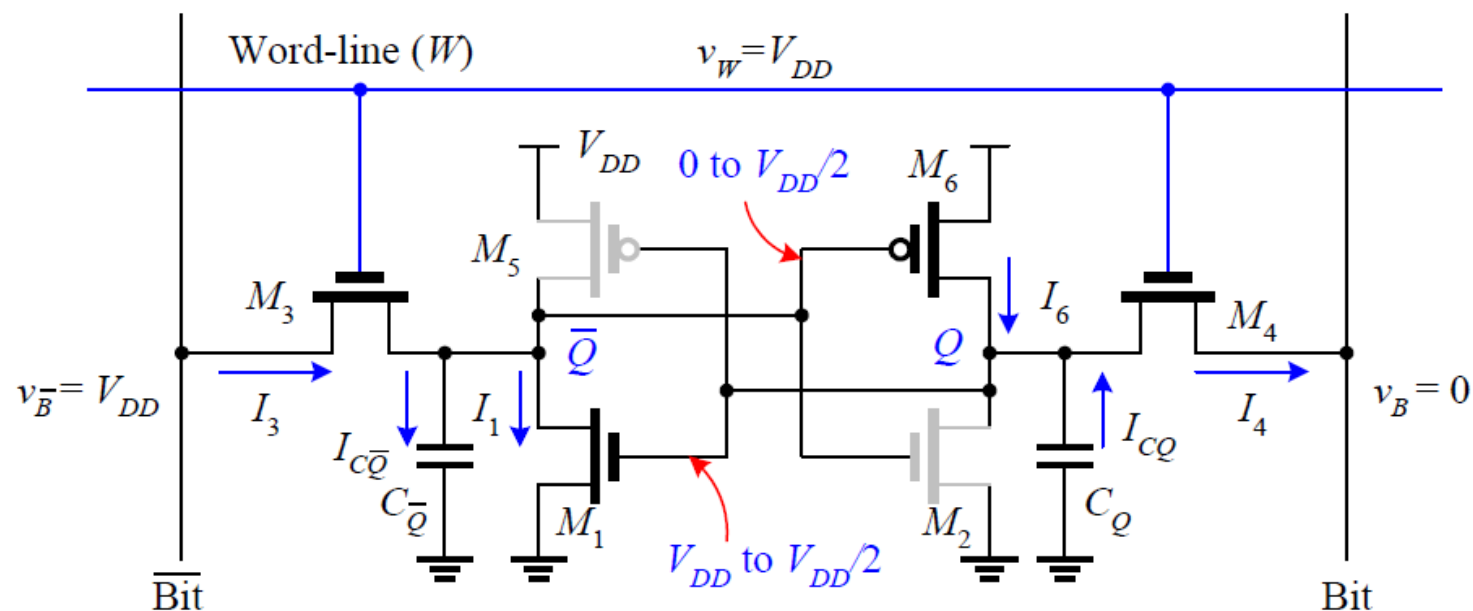


- A két keresztbecsatolt inverter felel a szokásos tárolási funkcióért.
- Hasonlít az SR latch-hez, de a beírás/olvasás 1-1 tranzisztoron keresztül történik, nem teljes a kapu.
  - (nyilván a kisebb helyfoglalás érdekében!)
- Az M3, M4 tranzisztorokat elérési (access) tranzisztornak hívjuk.
- A működés elvben csak „digitális” szemlélettel követhető, de a valóság nem ilyen egyszerű...

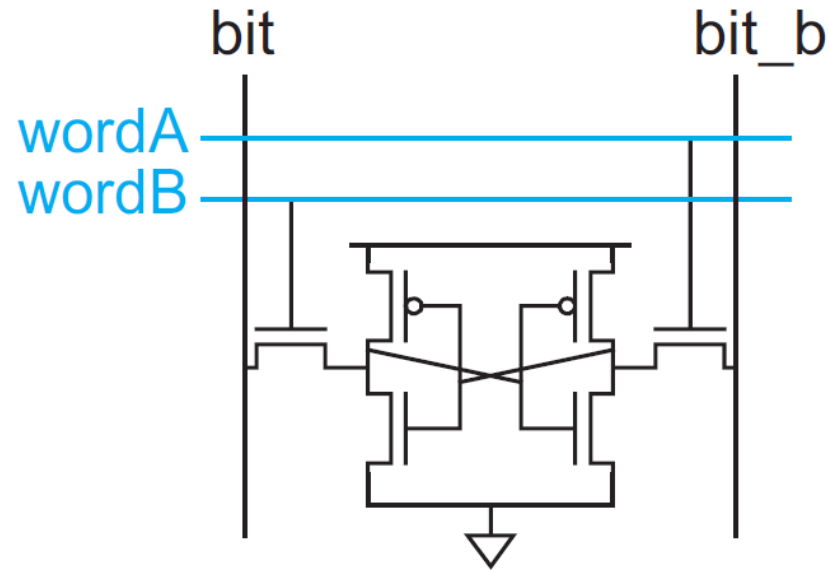


Feltételezzük, hogy a cellában logikai 1 van

- A bitvonalakat tápfeszültségre töltik elő. (a cella kis tranzisztorain keresztül a feltöltés nagyon sokáig tartana!)
- Az olvasás kezdetekor  $M_3$ ,  $M_1$  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 M3, M1 ugyanúgy működik, mint olvasás esetén.
  - M4 viszont Q szintjét a komparálási feszültség alá húzza
  - Ekkor M1 árama csökken, M5 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.

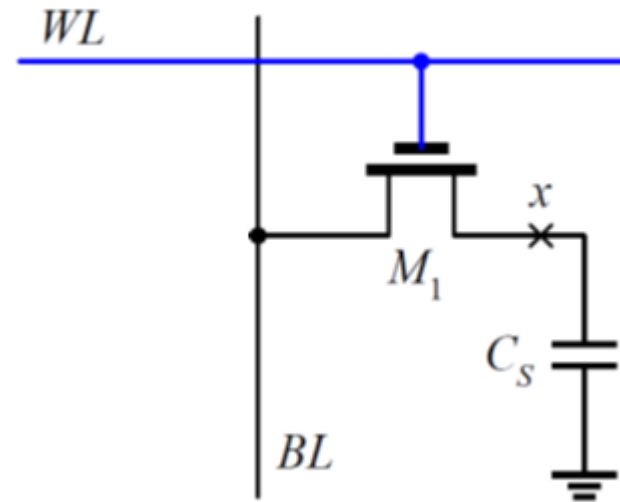


Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Elektronikus Eszközök Tanszéke

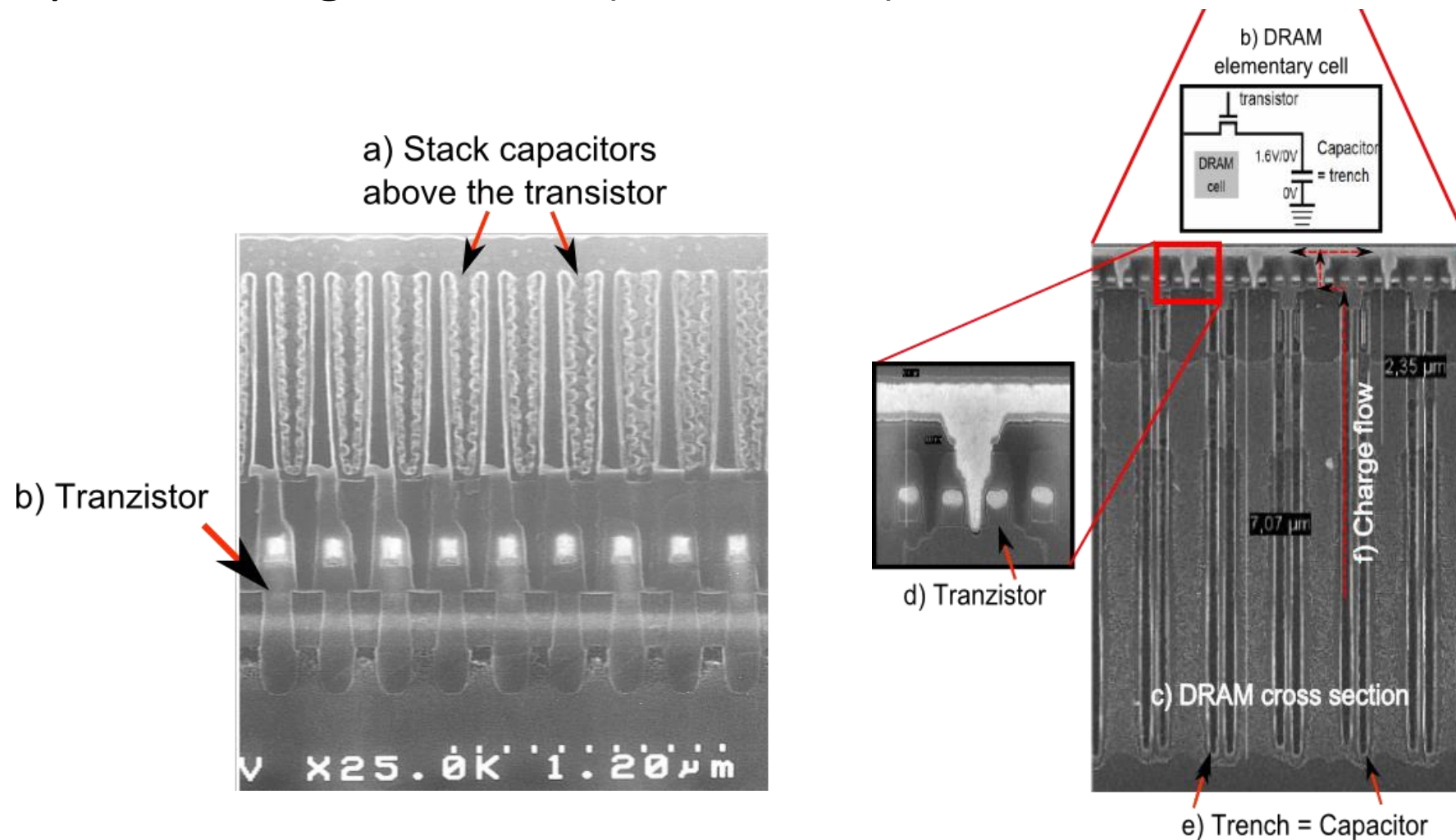
## Dinamikus RAM (DRAM)

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



# A tároló kapacitás megvalósítása (illusztráció)



- [Forrás](#)

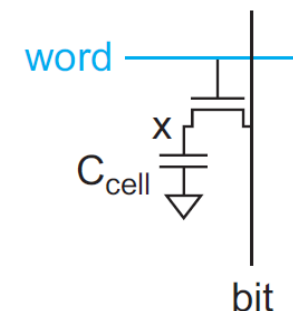
## DRAM írás és olvasás

### ■ Írás

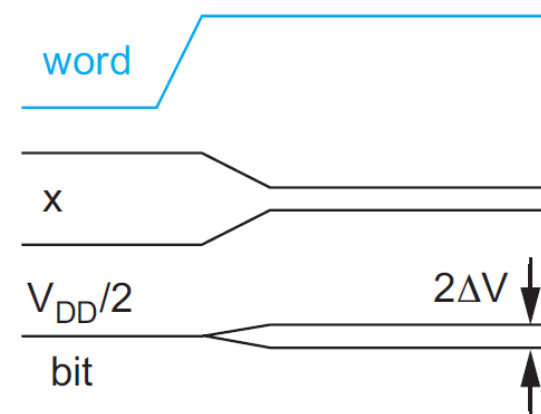
- A bitvonalat a logikai értékre állítva a szóvonal aktiválásakor a tároló kapacitás kisül, vagy feltöltődik.

### ■ 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)

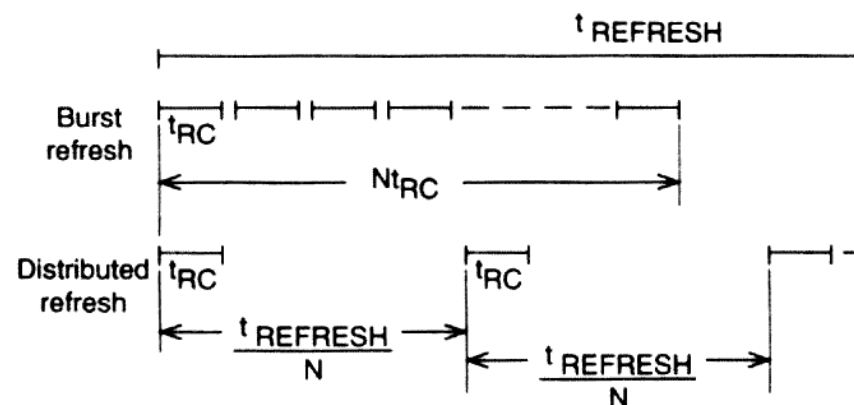
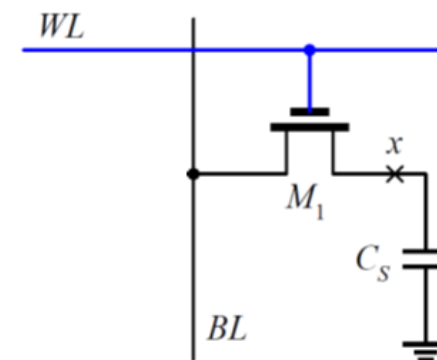


(b)



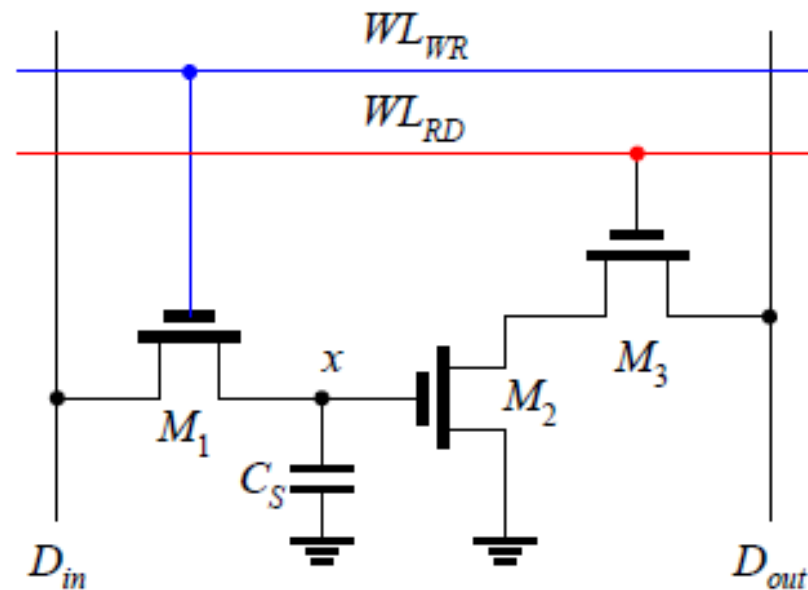
## Frissítés

- 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)



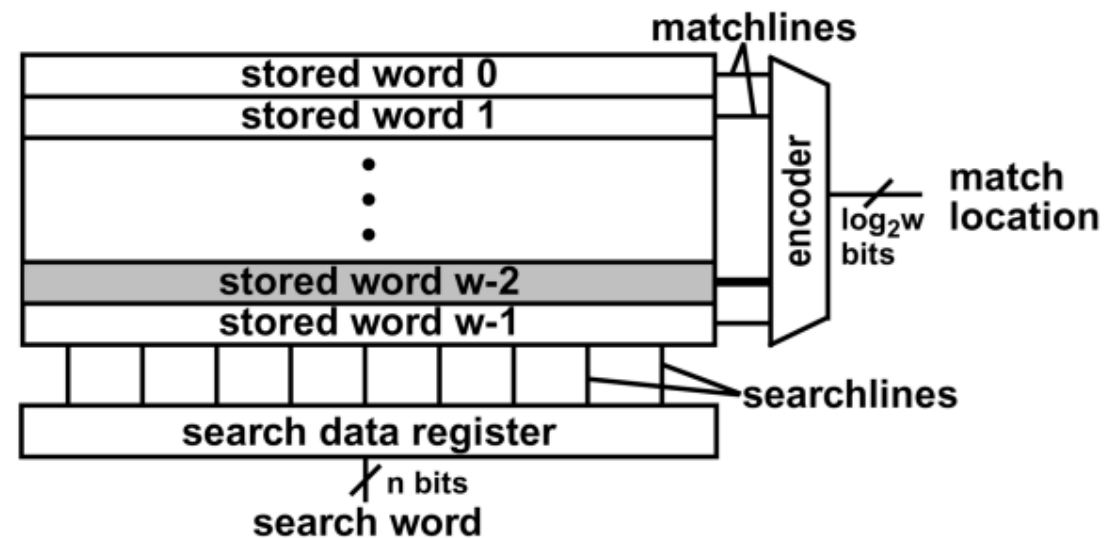
# CAM

## Content Addressable Memory

Azaz tartalommal címezhető memória  
(Asszociatív memória)

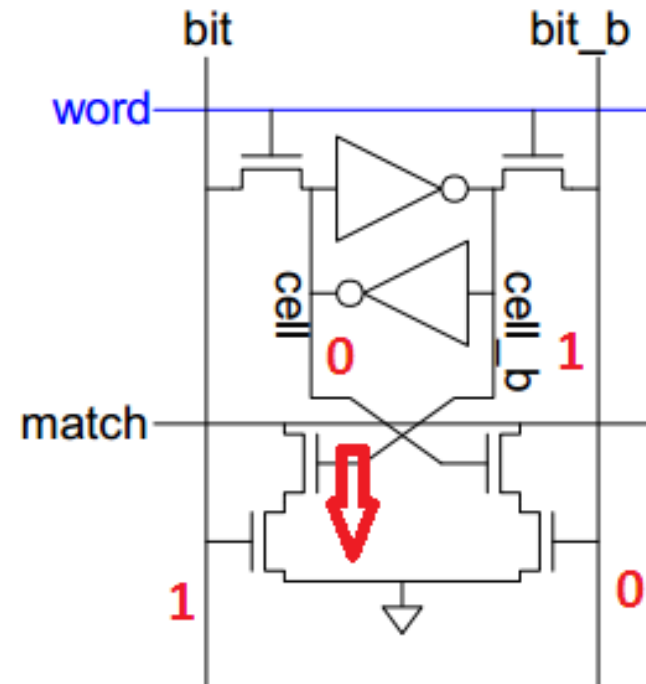
## Tartalommal címezhető memória

- 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



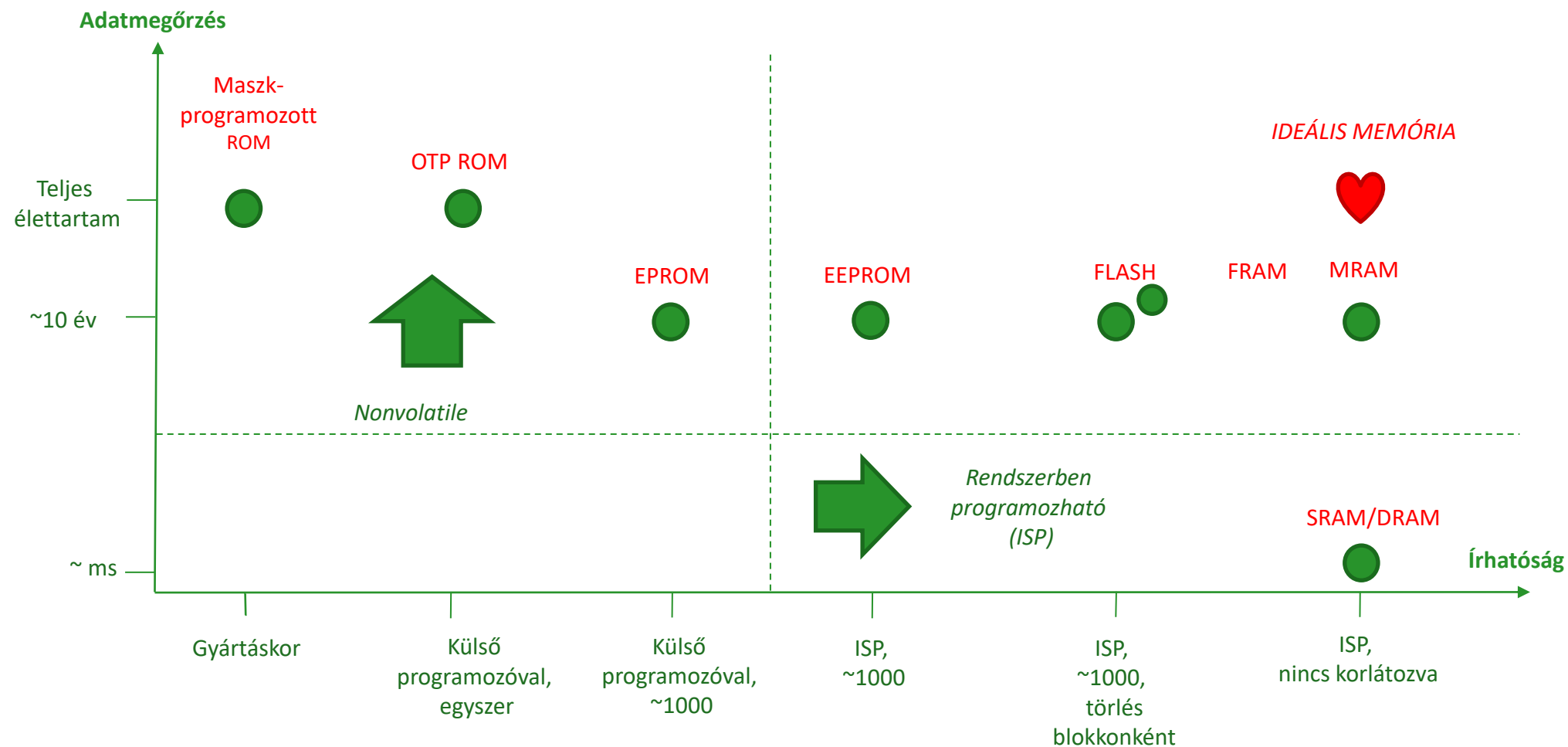


Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Elektronikus Eszközök Tanszéke

# IT eszközök technológiája

ROM

## Emlékeztető

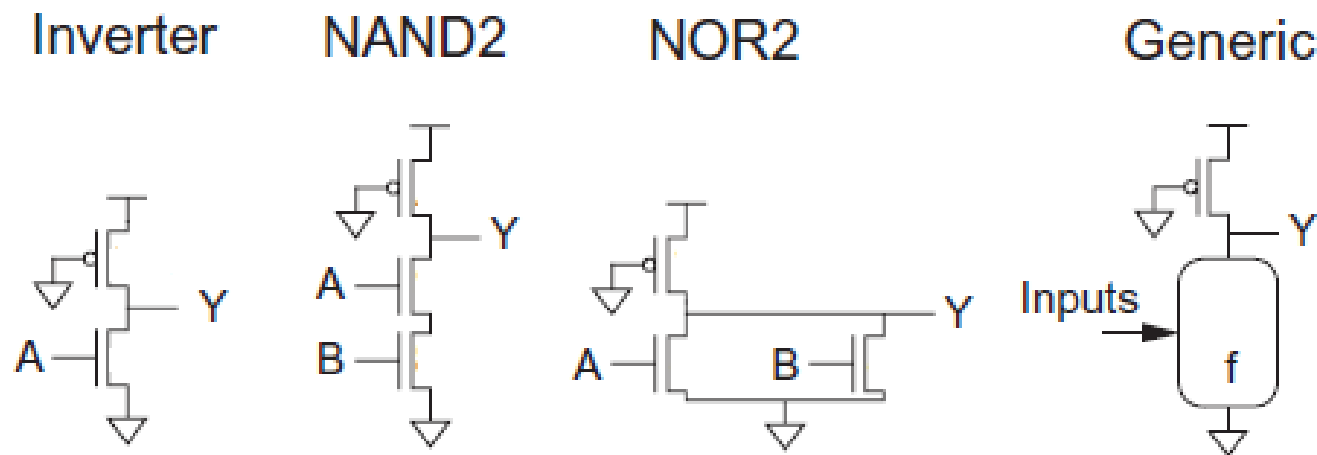


## Maszk programozott ROM (MROM)

- 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.
  - 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.

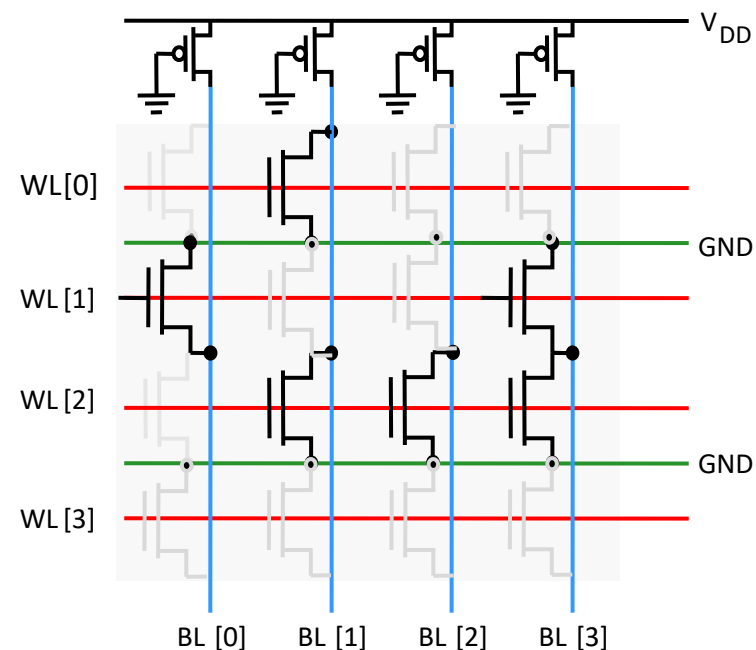


## Pszeudo NMOS kapu



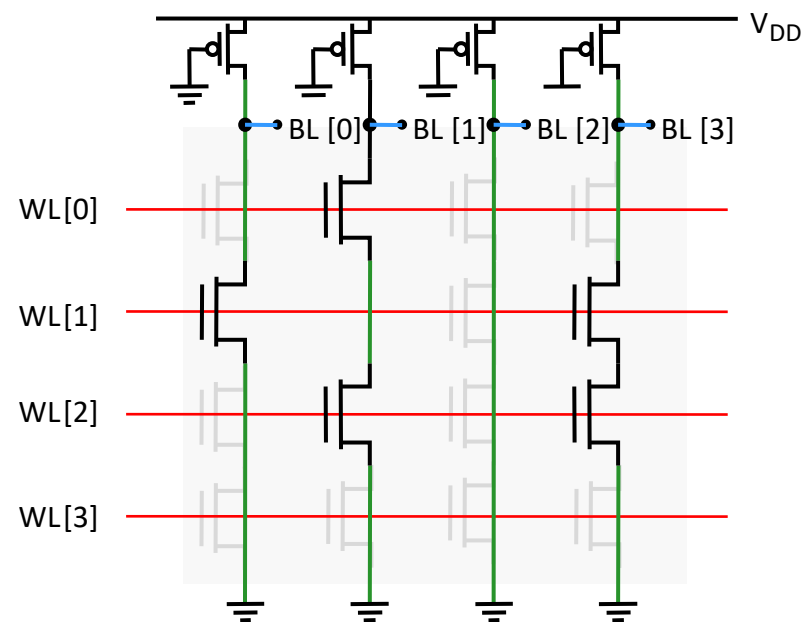
- A pMOS tranzisztort nem vezéreljük, hanem mindig nyitott.
  - Egy ellenállással modellezhető ilyenkor.
    - inverter esetén, ha A=0, Y=1, hiszen az nMOS zárt. Ha A=1, akkor áram folyik, a kimenet feszültsége:  $V_Y = \frac{R_{NMOS}}{R_{NMOS} + R_{PMOS}} V_{DD}$
    - Tehát az alacsony szint nem 0V, 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

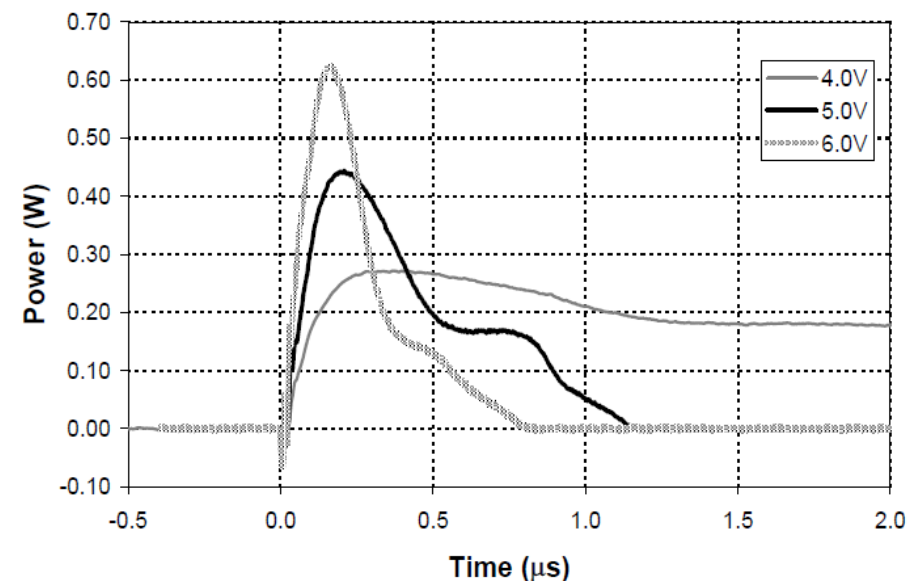
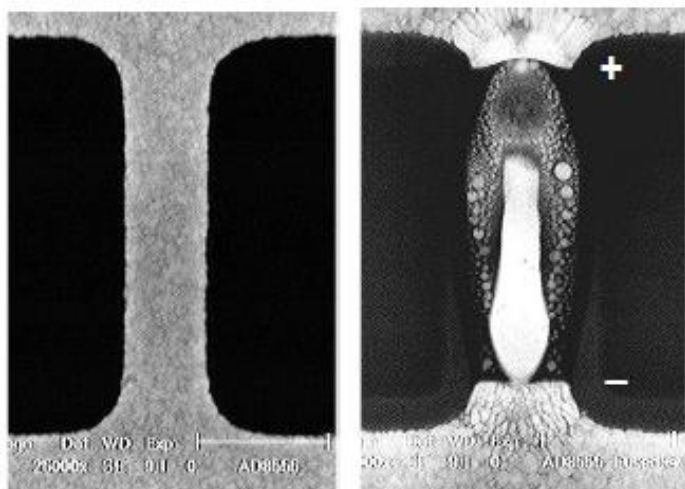


- A tranzisztorokat most sorba kapcsoljuk, így egy pszeudo nMOS NAND kaput kapunk.
  - Az információt az fogja tárolni, hogy egy adott helyen a tranzisztort rövidrezártuk-e fémezéssel, vagy sem.
- Kiolvasáskor minden szóvonalat aktíválunk (logikai 1-re), kivéve a kérdéses sort. Ha az adott helyen nincs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

# Egyszer programozható ROM

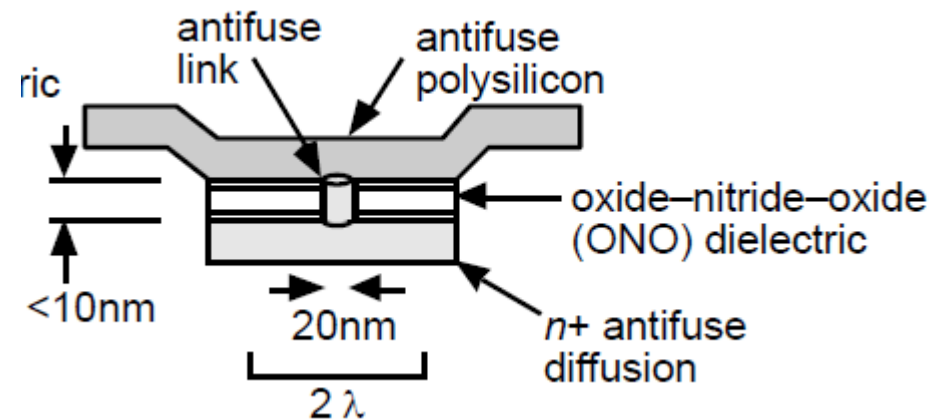
- Firmware
- On-chip konfiguráció kialakítása, akár működés közben is
  - Kalibrálási konstansok
  - Titkosítási kulcsok
  - Chip azonosító
  - Pl. nem működő részek megjelölése, összeköttetések kialakítása
- Programozható logikai eszközök (ld. később)
- Egyéb, pl. jogszabályban előírt, később nem módosítható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

# Fuse



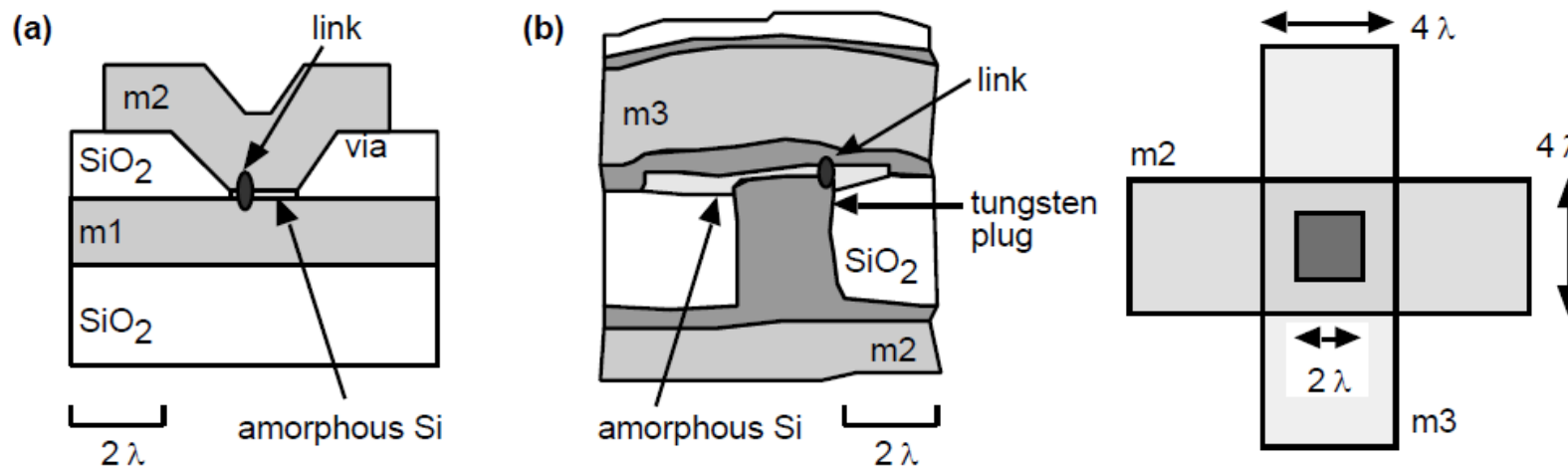
- Poliszilícium vagy szilicid pl. NiSi (nikkel-szilícium ötvözet)
- A keskeny rész ellenállása a legnagyobb.
  - Helyi melegedés jön létre.
  - Ahol a folyamat megindul, ott a visszacsatolás pozitív, hiszen a melegedés miatt az ellenállás is nagyobb.
  - Nagyobb teljesítmény esetén az anyag elpárolog,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

# PLICE



- PLICE – programmable low impedance circuit element
  - Vékony  $\text{Si}_3\text{N}_4$  –  $\text{SiO}_2$  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.  $80 \Omega$  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 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.

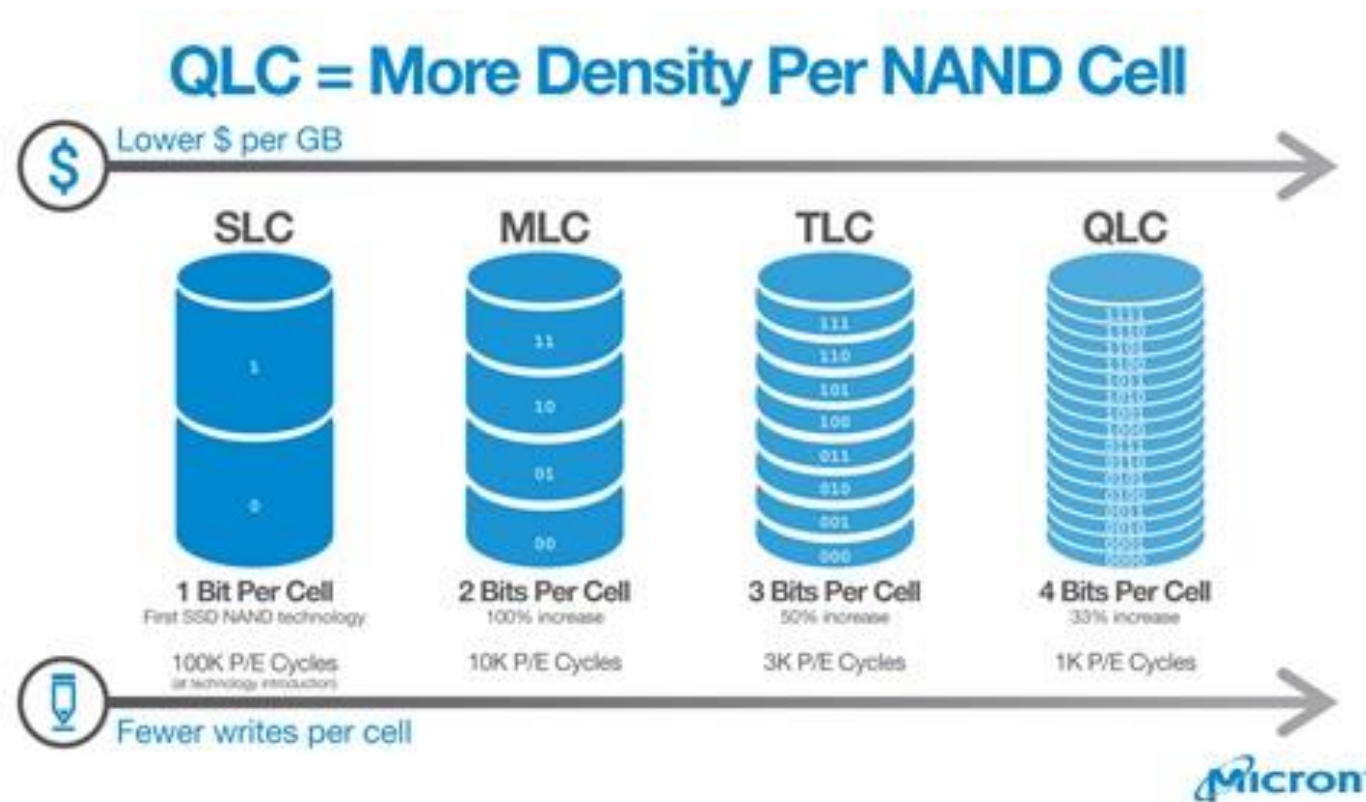
Tehát ha ki lehet alakítani töltés tárolására alkalmas konstrukciót, akkor a küszöb feszültséget tetszőleges irányba változtathatjuk

- 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 küszöb feszültség változtatása egyre nehezebb, a tranzisztor „elhasználódik”

# Programozás/törlési ciklusok száma és a kapacitás



- A wear-levelling Hardver alapokból/Operációs rendszerekből ismert (?)

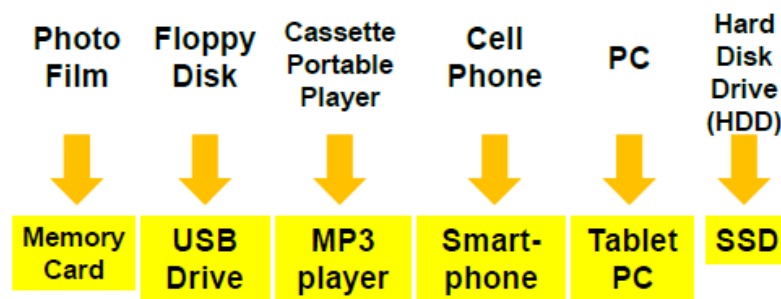
## (E)EEPROM

### ▪ Régi technológiák

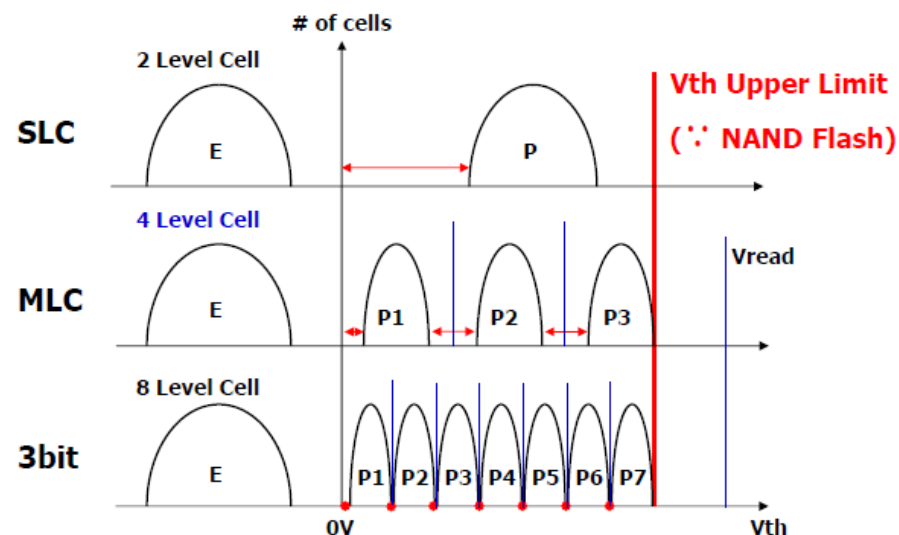
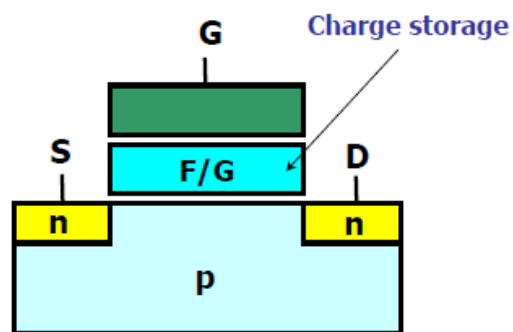
- **EPROM:** programozás lavinaletöréssel, törlés UV fény segítségével
- **EEPROM:** programozás-törlés alagútjelenséggel.

### ▪ 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
<b>Capacity</b>	8MB – 256MB	256MB	256MB – 2GB	256MB
<b>Cost per bit</b>	Higher	$6.57 \times 10^{-9}$ USD/bit for 1ku	Lower	$2.533 \times 10^{-9}$ USD/bit for 1ku
<b>Random Read speed</b>	Faster	120ns	Slower	30 $\mu$ S
<b>Write speed</b>	Slower		Faster	
<b>Erase speed</b>	Slower	520ms	Faster	3.5ms
<b>Power on current</b>	Higher	160mA (max)	Lower	50mA (max)
<b>Standby current</b>	Lower	200 $\mu$ A (max)	Higher	1mA (max)
<b>Bit-flipping</b>	Less common		More common	
<b>Bad blocks while shipping</b>	0%		Up to 2%	
<b>Bad block development</b>	Less frequent		More frequent	
<b>Bad block handling</b>	Not mandatory		Mandatory	
<b>Data Retention</b>	Very high	20 years for 1K program-erase cycles	Lower	10 years (typ)
<b>Program-erase cycles</b>	Lower	100,000	Higher	100,000
<b>Preferred Application</b>	Code storage & execution		Data storage	

## Újabb technológiák

VNAND

Ferroelektromos RAM (FRAM)

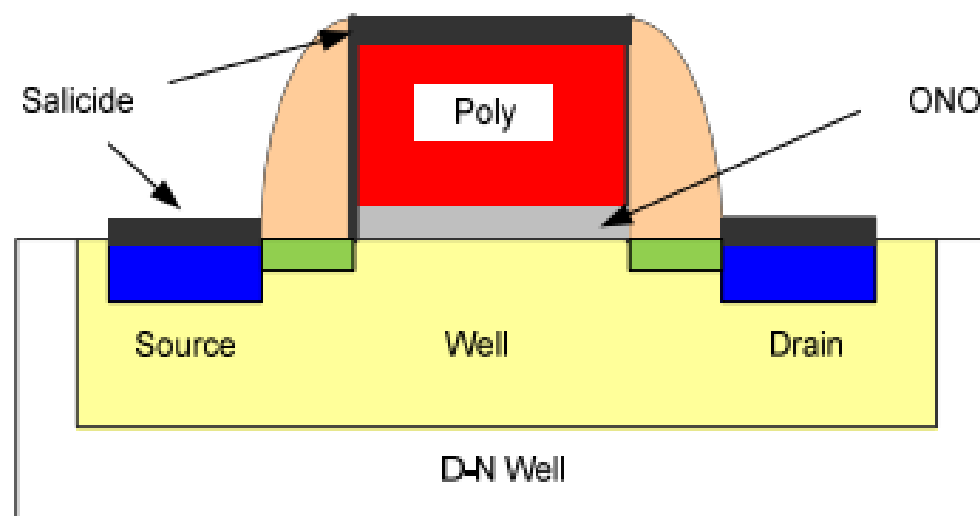
Magnetorezisztív RAM (MRAM)

Ezek mindegyike kereskedelmi forgalomban kapható!

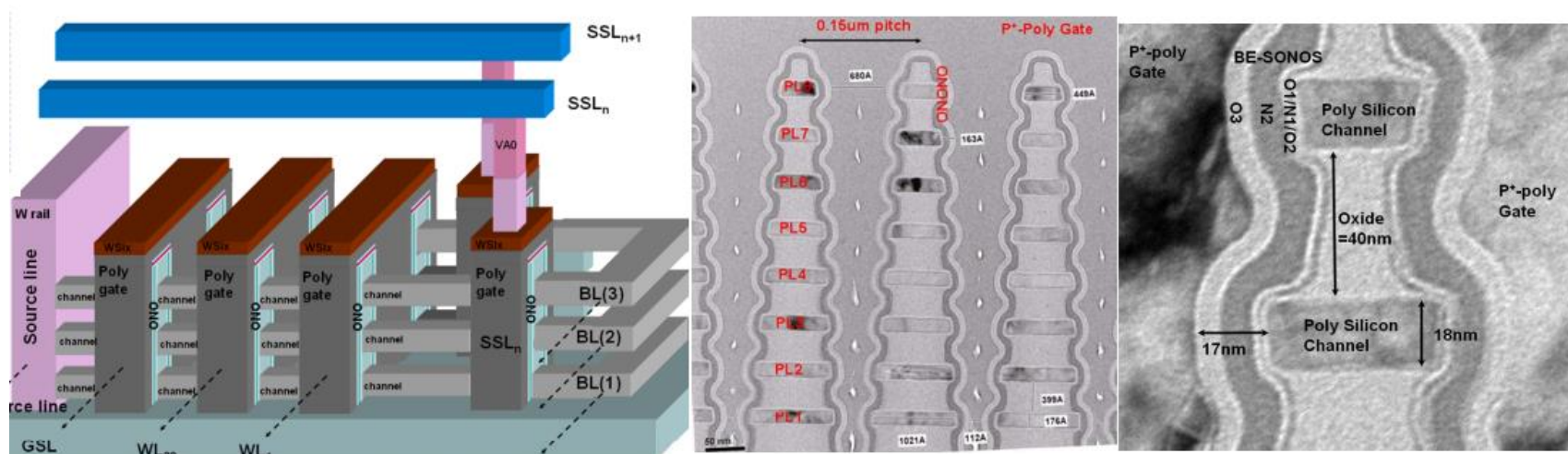


## Modern FLASH – SONOS tranzisztor

- 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 200 réteg építhető jelenleg. 2030-ra 1000 réteg a cél.

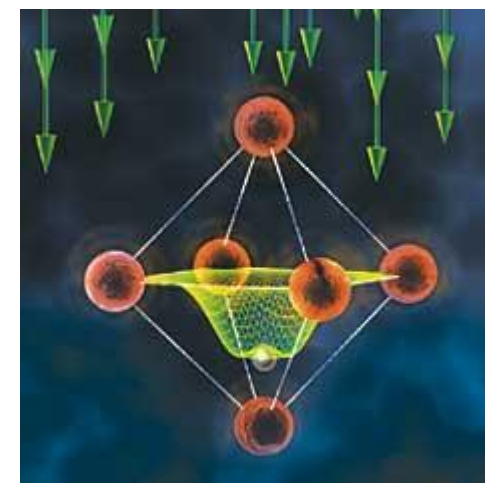
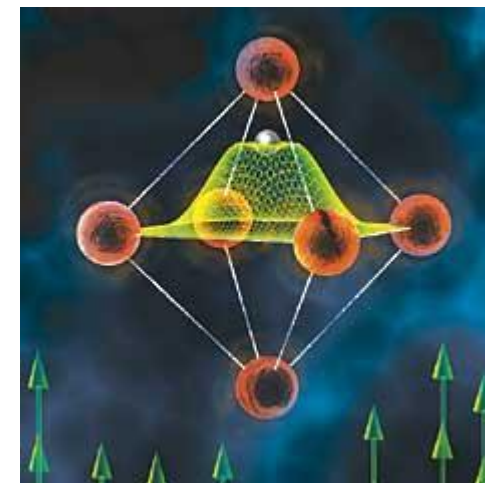
## NVRAM megvalósítása

- 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

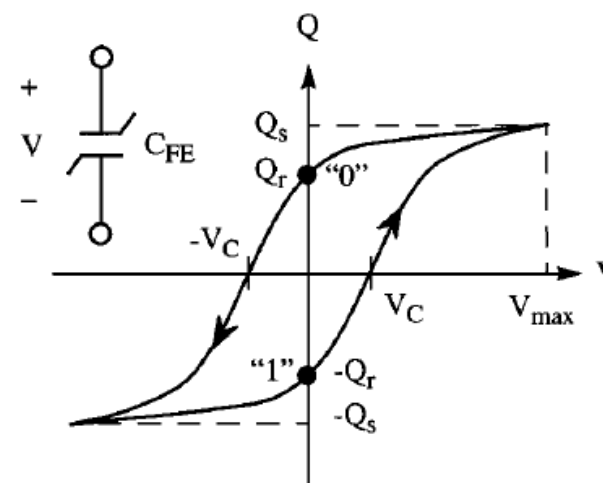
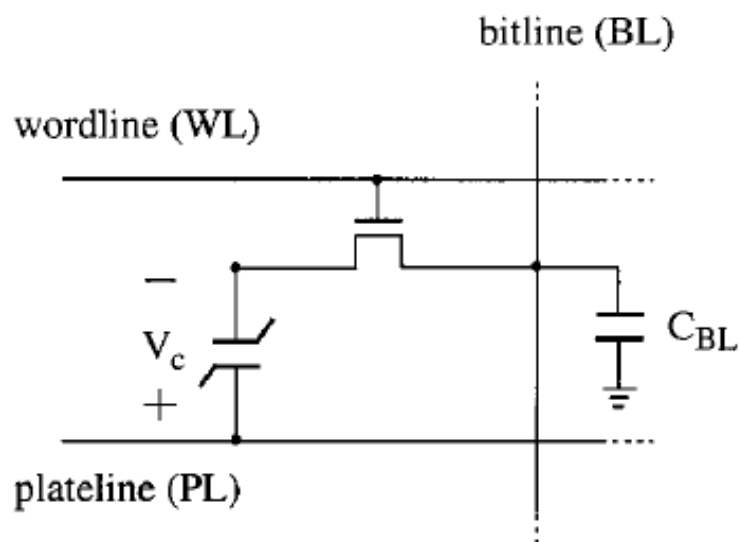
### ■ Ferroelektromos anyag

- 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...



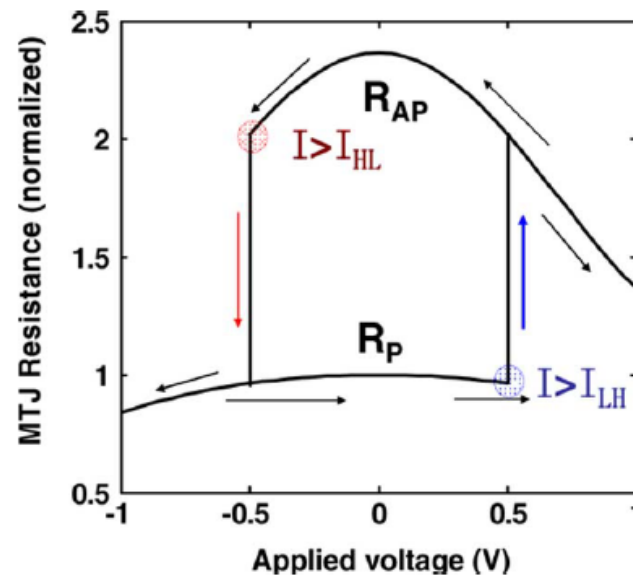
## FERAM elemi cella

- 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](#)
- [Micron UFS 4](#)