

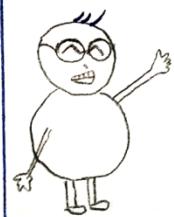
# Calculatoare Numerice (2)

- Cursul 1 -

Sistemul de memorie (1)

Facultatea de Automatică și Calculatoare  
Universitatea Politehnica București

HEY, PAL, I'VE FINALLY UNDERSTOOD HOW MY CPU WORKS AND  
WHY IT CRASHES SOMETIMES WHEN I TRY TO RUN  
SOME NASTY CODE !



OH, YOU THINK SO ?

OH, YEAH, I'VE JUST PAST  
MY "CN 1<sup>st</sup>" COURSE



HMM... AND YOU THINK  
THAT'S ALL ?



WHAT DO YOU MEAN  
....



YOU KNOW SO LITTLE...  
OH, WAIT... THERE'S  
MORE !

MY ULTIMATE IS READY...  
... THERE IT COMES... 'CN 2' !!



TO BE CONTINUED...

# Proiectarea sistemului de memorie

---

Probleme de proiectare – Vrem un circuit de memorie:

- Poate să țină pasul cu viteza de execuție a CPU
- Are destulă capacitate pentru program și date
- Ieftină, fiabilă și eficientă energetic

Tehnologia și organizarea memoriei principale a unui calculator

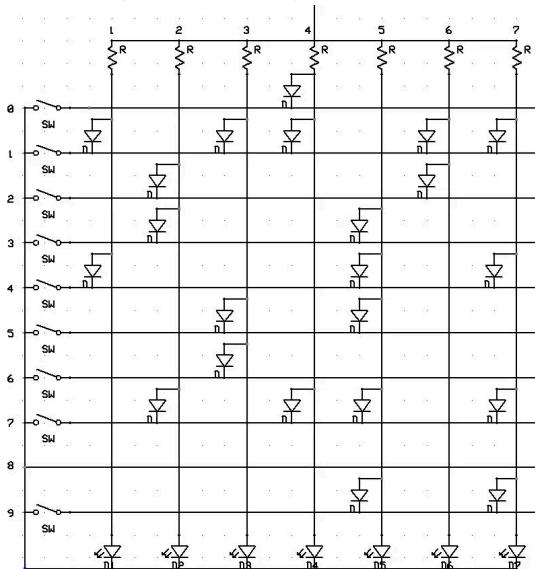
- SRAM (cache), DRAM (main), și flash (nonvolatile)
- Întrețesere & pipelining pentru a combate “memory wall”



# Primele tehnologii de fabricație pentru memoria Read-Only



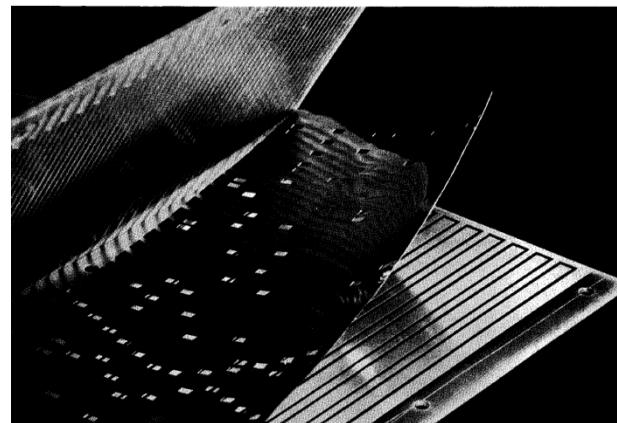
Cartele perforate , din anii  
1700, războaie Jaquard,  
Babbage, IBM până în anii '80



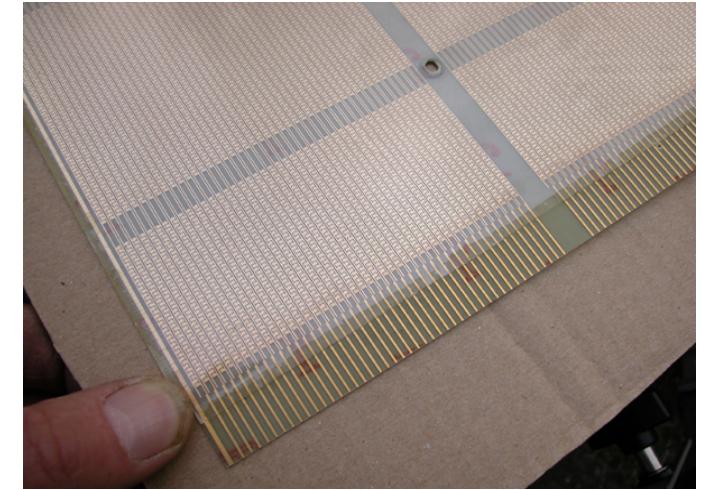
Diode Matrix, EDSAC-2 μcode store



Bandă perforată – programul  
rulat de Harvard Mk 1



IBM Card Capacitor ROS

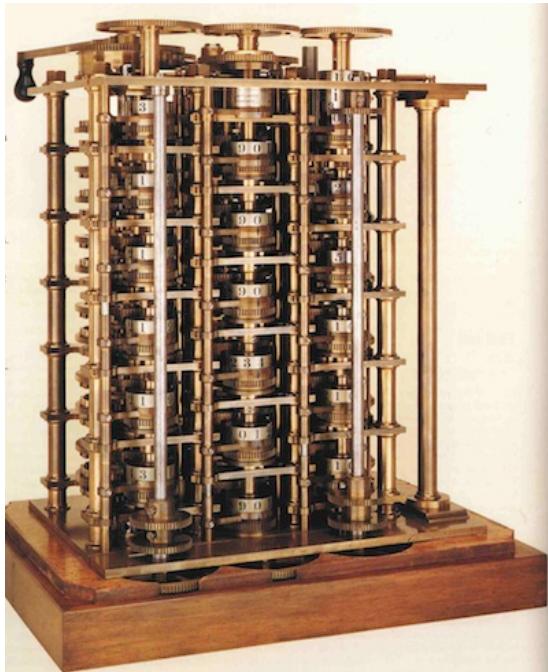


IBM Balanced  
Capacitor ROS



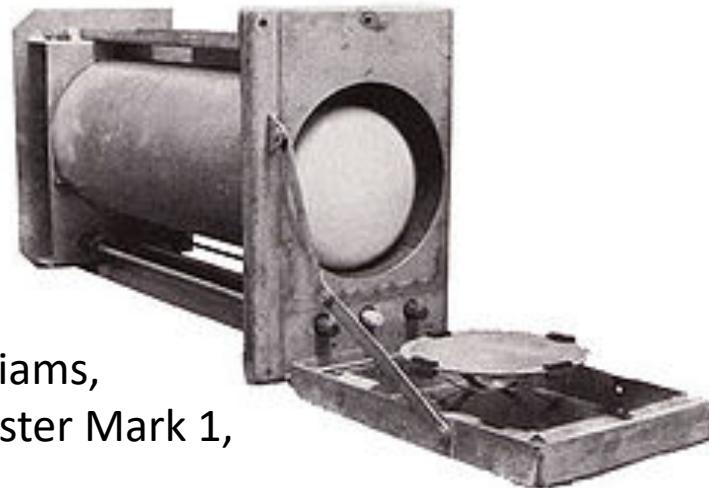
# Primele tehnologii de fabricație pentru memoria Read-Write

Babbage, anii 1800: Cifre stocate pe roți mecanice



Memorie regenerativă cu condensatoare pentru calculatorul Atanasoff-Berry și memorie pe tambur magnetic rotativ pentru IBM 650

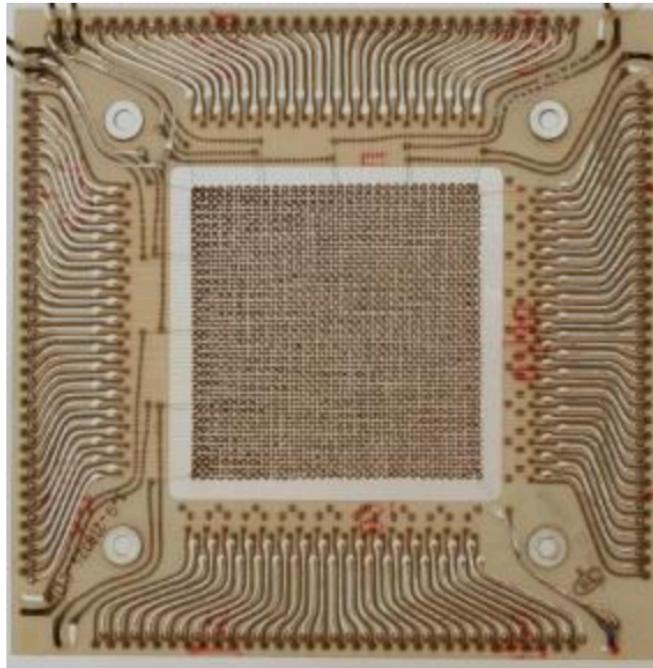
Tub Williams,  
Manchester Mark 1,  
1947



Mercury Delay Line, Univac 1, 1951

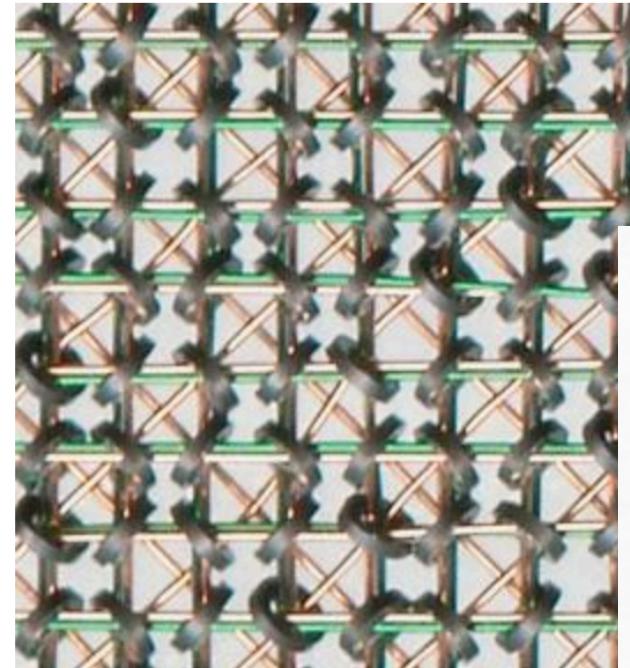


# Memorie pe miez de ferită - MIT Whirlwind

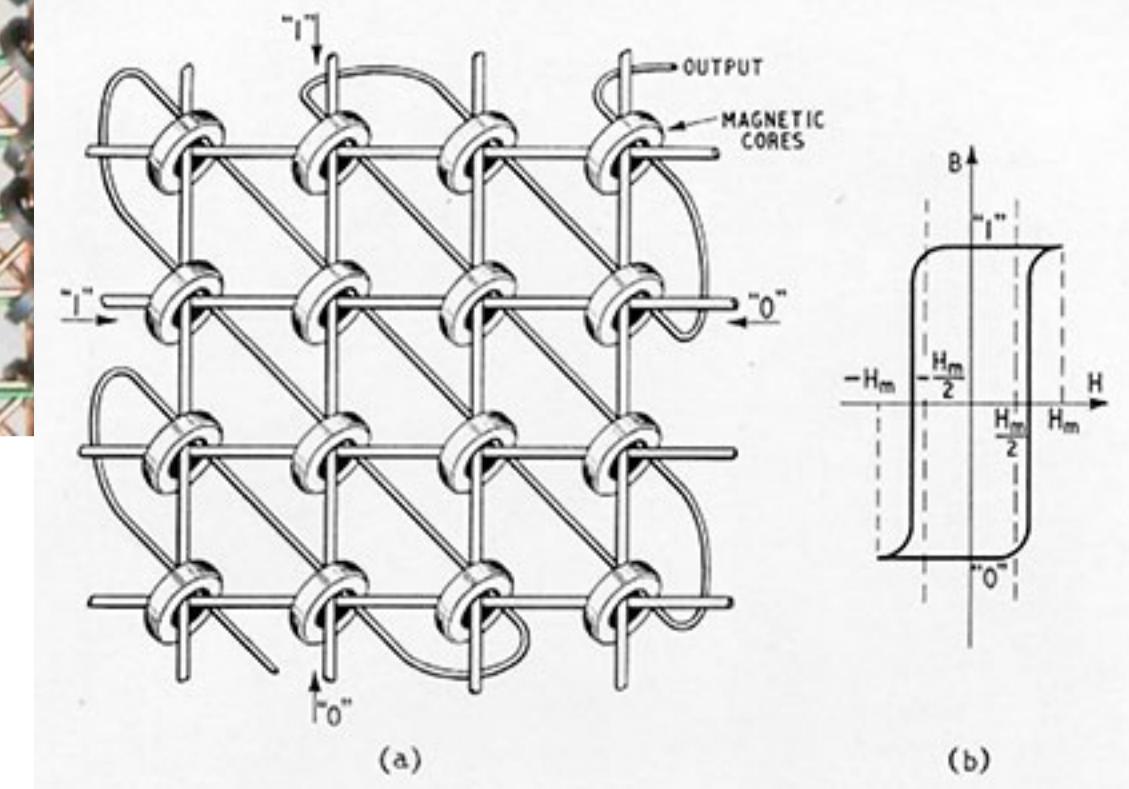


50mm

<http://www.corememoryshield.com/report.html>



2mm



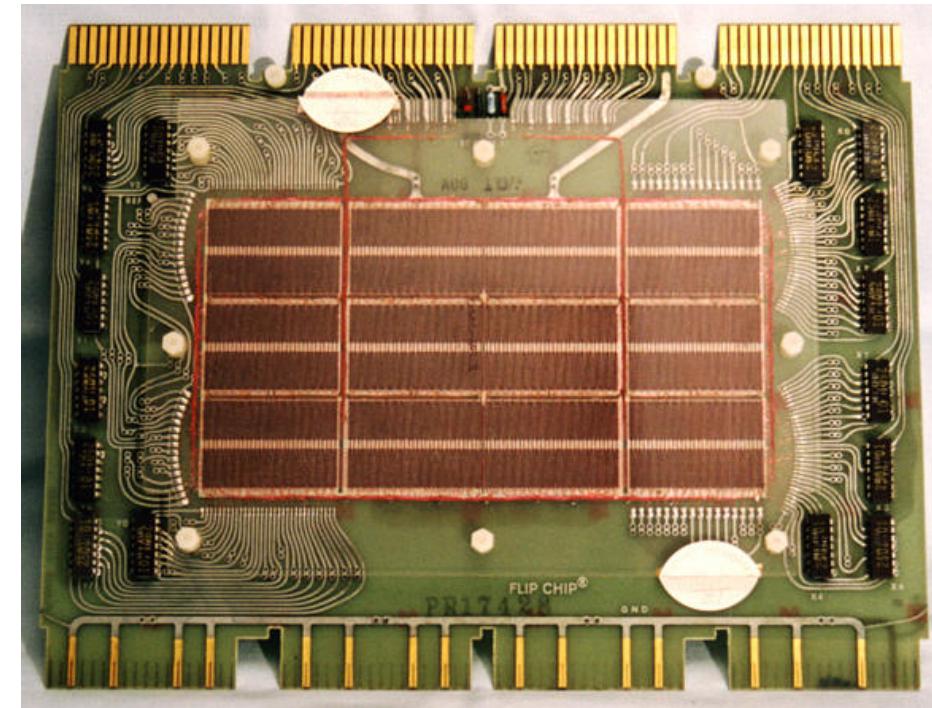
(a)

(b)



# Memoria pe miez de ferită

- A fost prima tehnologie de fabricație fiabilă pentru memoriile principale
  - Inventată de Forrester sfârșitul anilor 40/începutul anilor 50 la MIT pentru proiectul Whirlwind
- Biți stocați prin polarizarea magnetică a unor miezuri foarte mici de ferită țesute într-o matrice bidimensională de fire conductoare
- Pulsurile concomitente de curent pe conductorii X și Y pot scrie starea bitului de memorie și să citească starea originală (destructive read)
- Stocare robustă, non-volatile
- Folosită la primele nave spațiale (de la Apollo la navetele spațiale)
- Inelele de ferită țesute de mână (25 de miliarde/an)
- Timp de acces ~ 1μs



# Memoriile semiconductoare

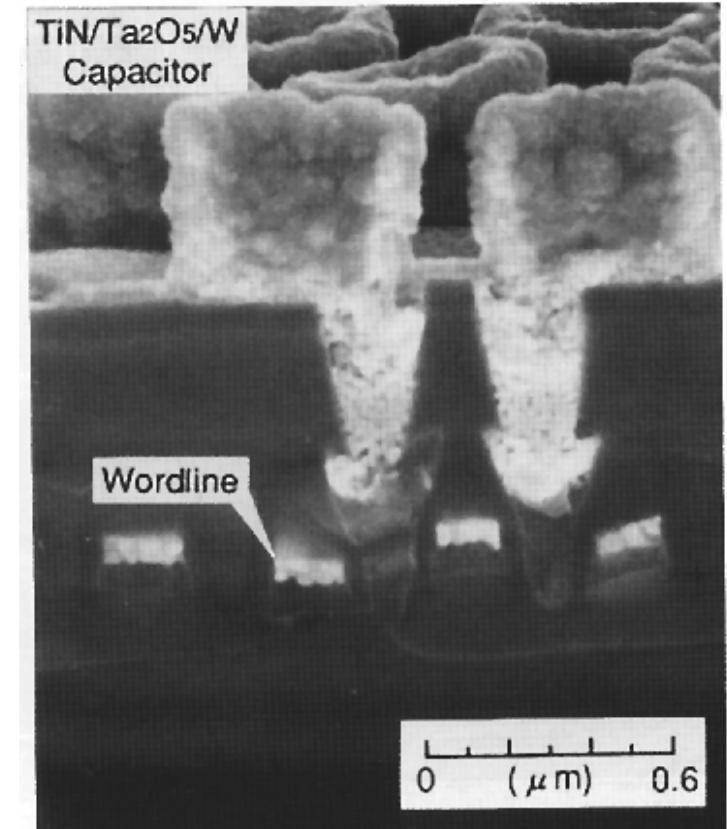
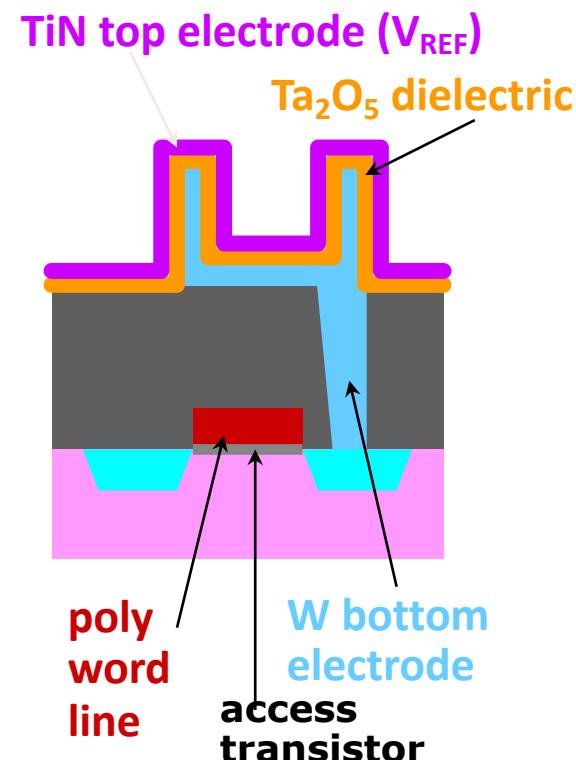
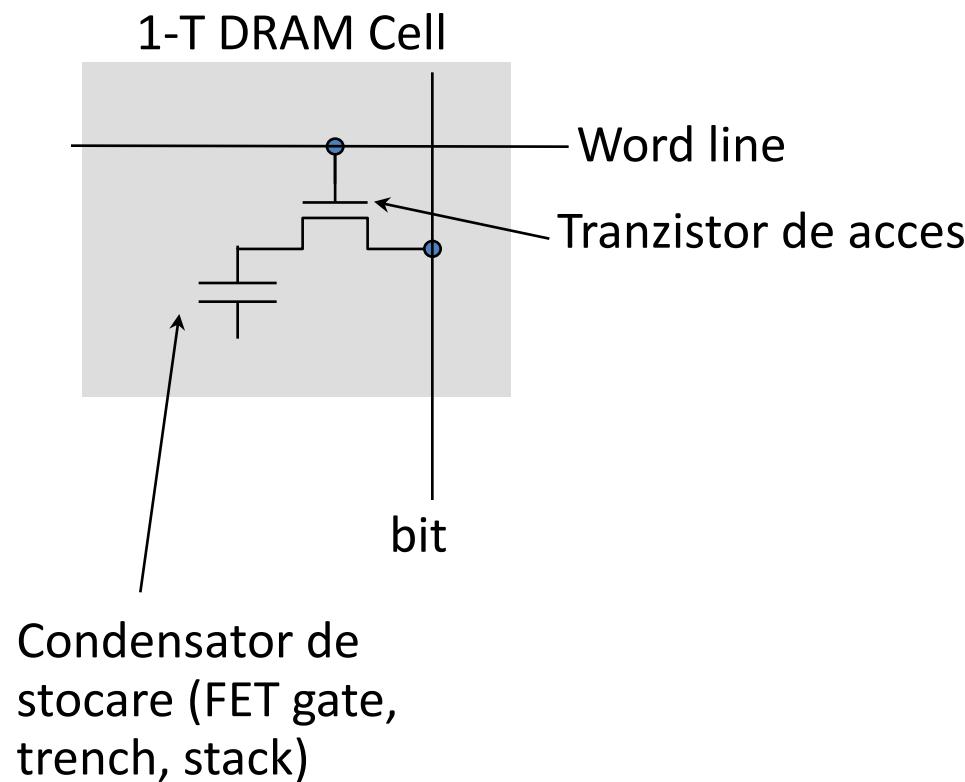
---

- Memoriile semiconductoare au început să fie competitive în anii 70
  - Intel a apărut pentru a exploata piața memoriilor semiconductoare
  - Primele memorii semiconductoare au fost RAM-urile Statice (SRAM). Structura internă a unei celule SRAM este similară cu aceea a unui latch (inversoare în anti-paralel).
- Primul RAM Dinamic (DRAM) comercial a fost chipul Intel 1103
  - 1Kbit de memorie pe un singur chip
  - Sarcina unui condensator este folosită pentru a memora un bit

*Memoria semiconductoare a înlocuit rapid memoria pe miez de ferită în anii 70*

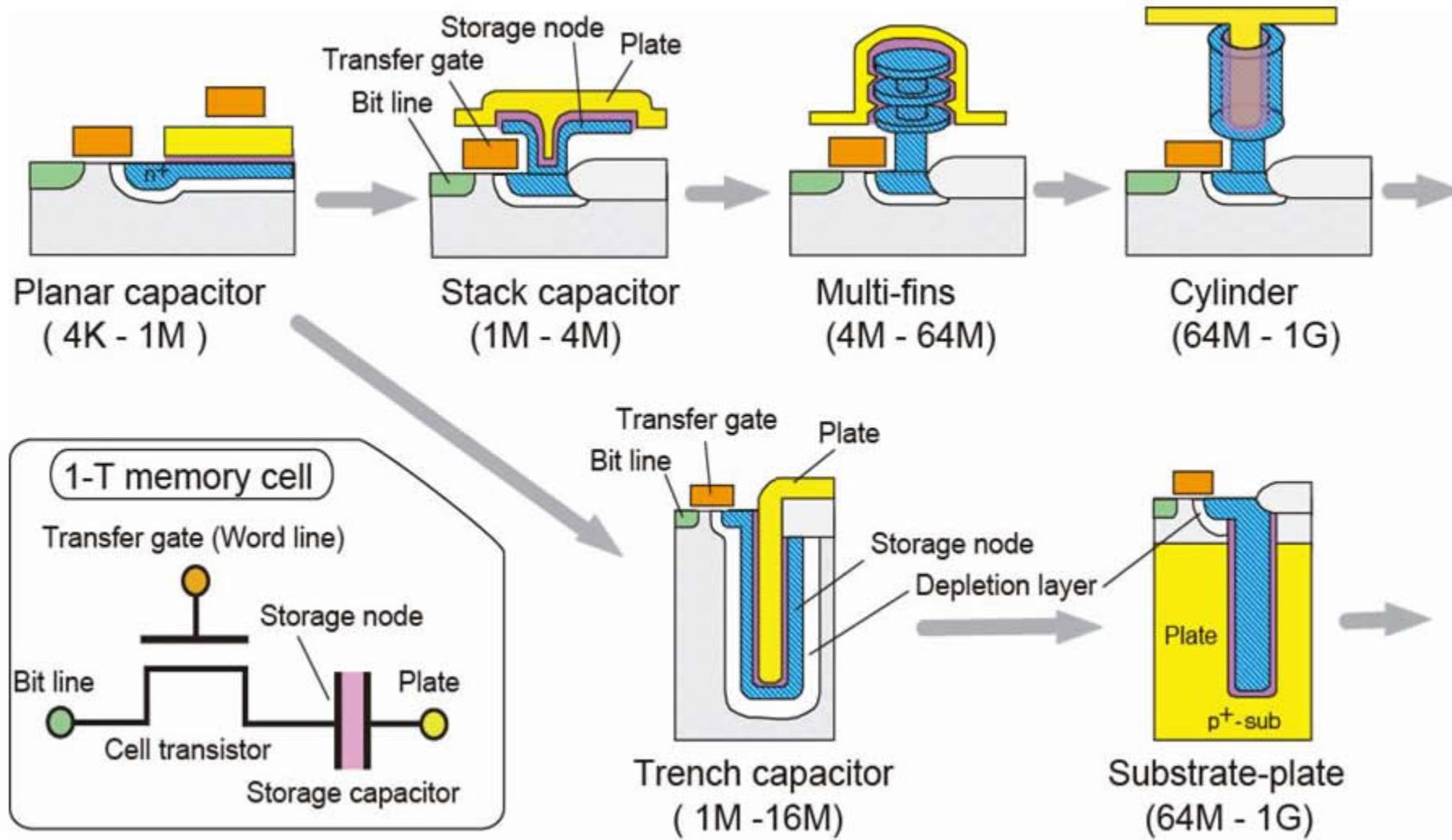


# One-Transistor Dynamic RAM [Dennard, IBM]

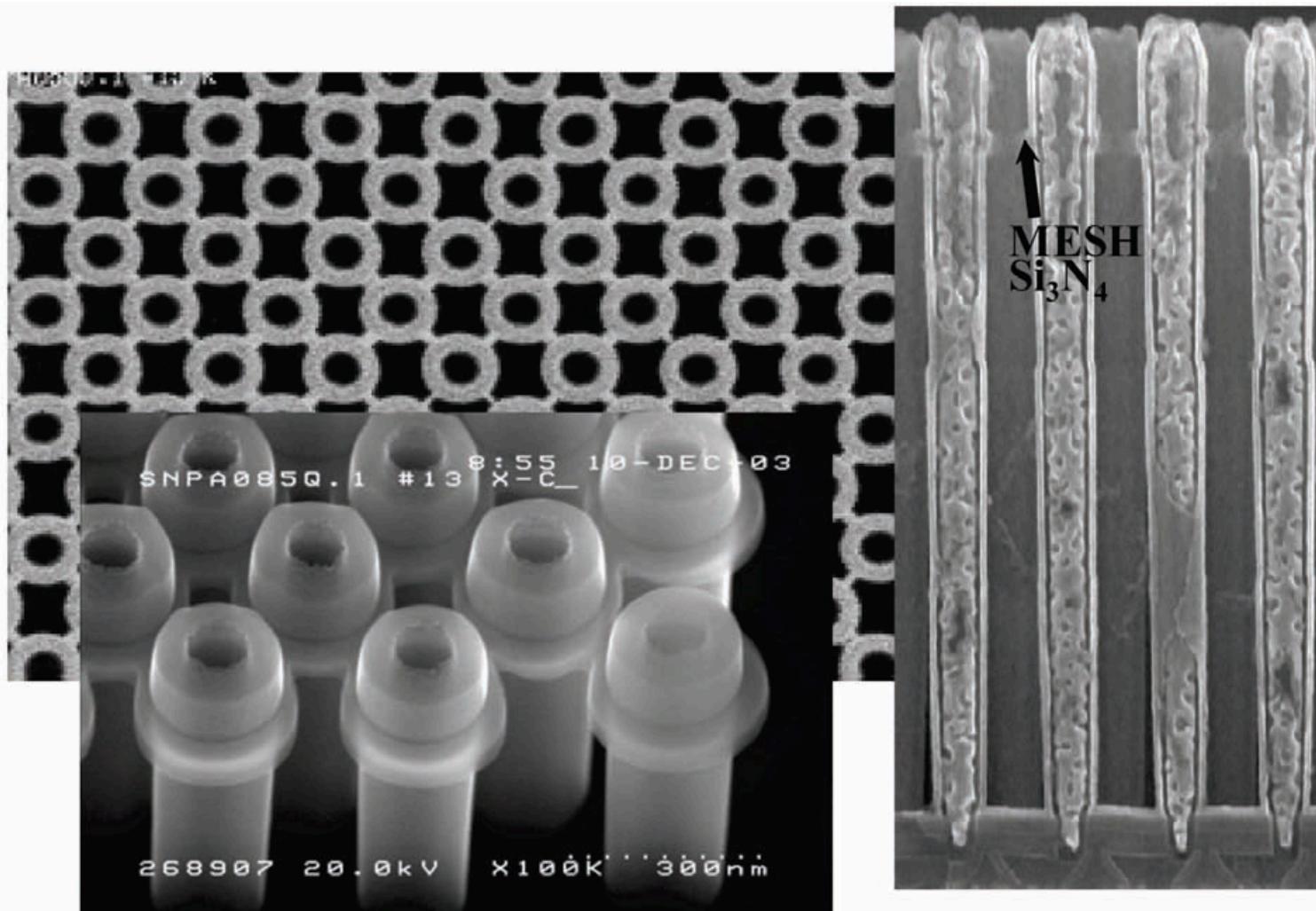


[https://en.wikipedia.org/wiki/Dynamic\\_random-access\\_memory](https://en.wikipedia.org/wiki/Dynamic_random-access_memory)

# DRAM Scaling



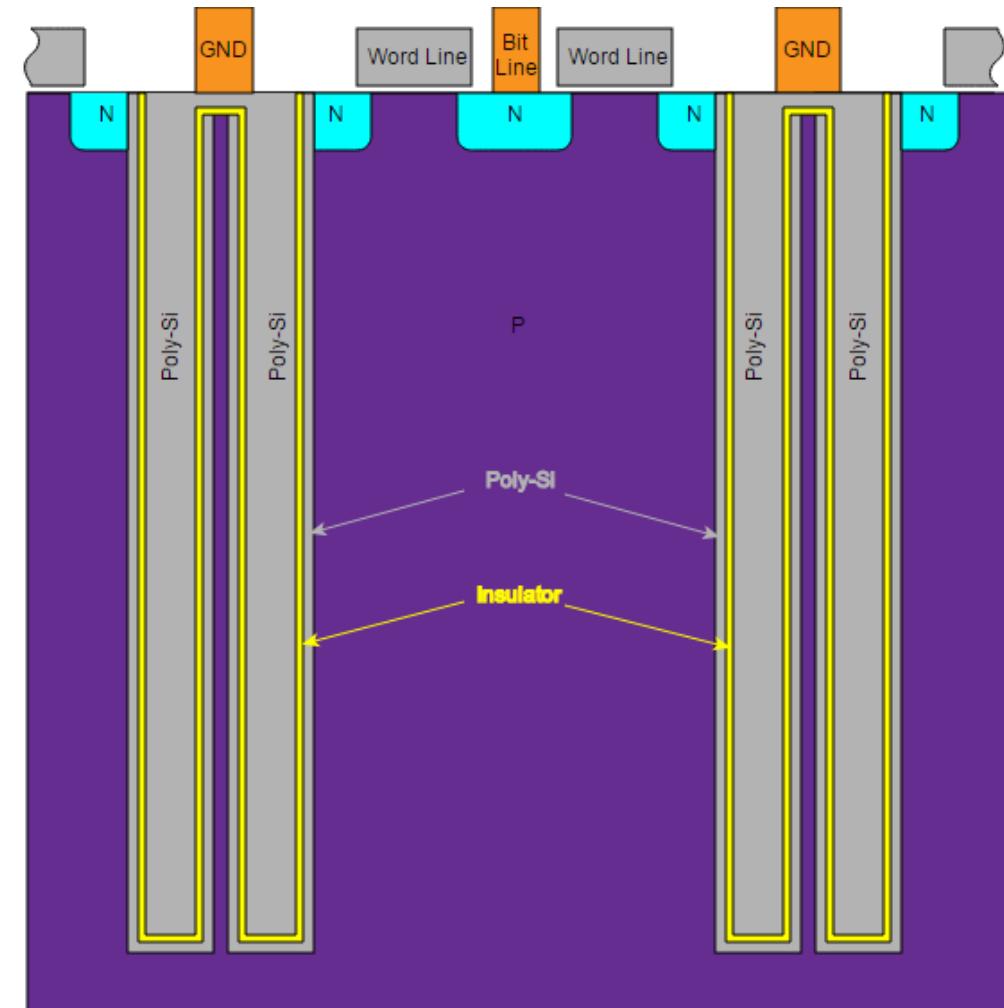
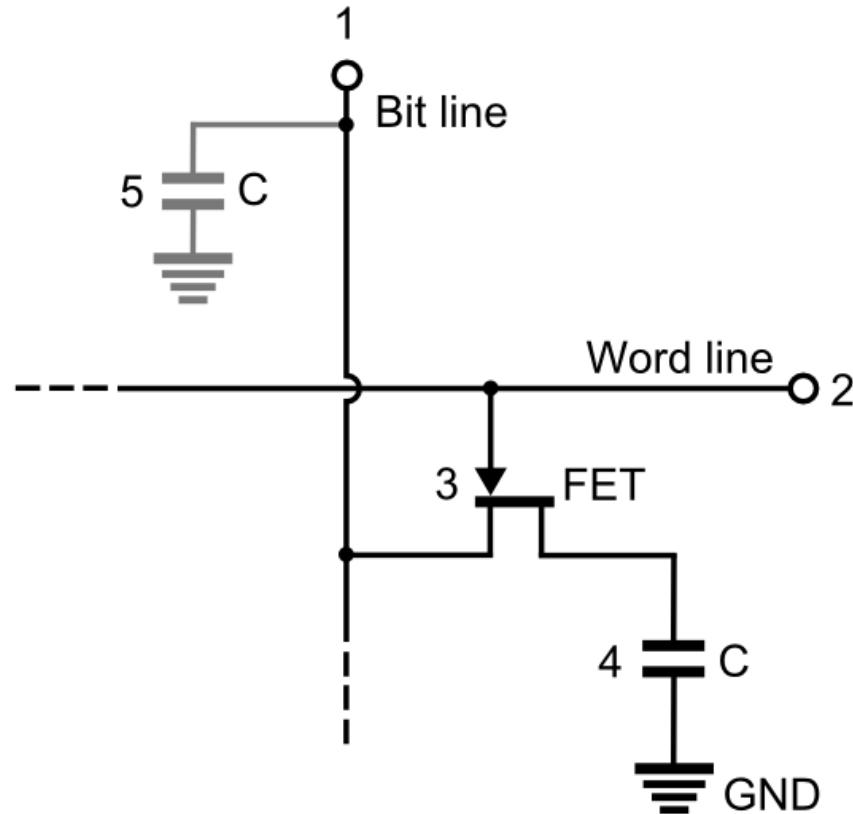
# Structura modernă a unui DRAM



[Samsung, sub-70nm DRAM, 2004]

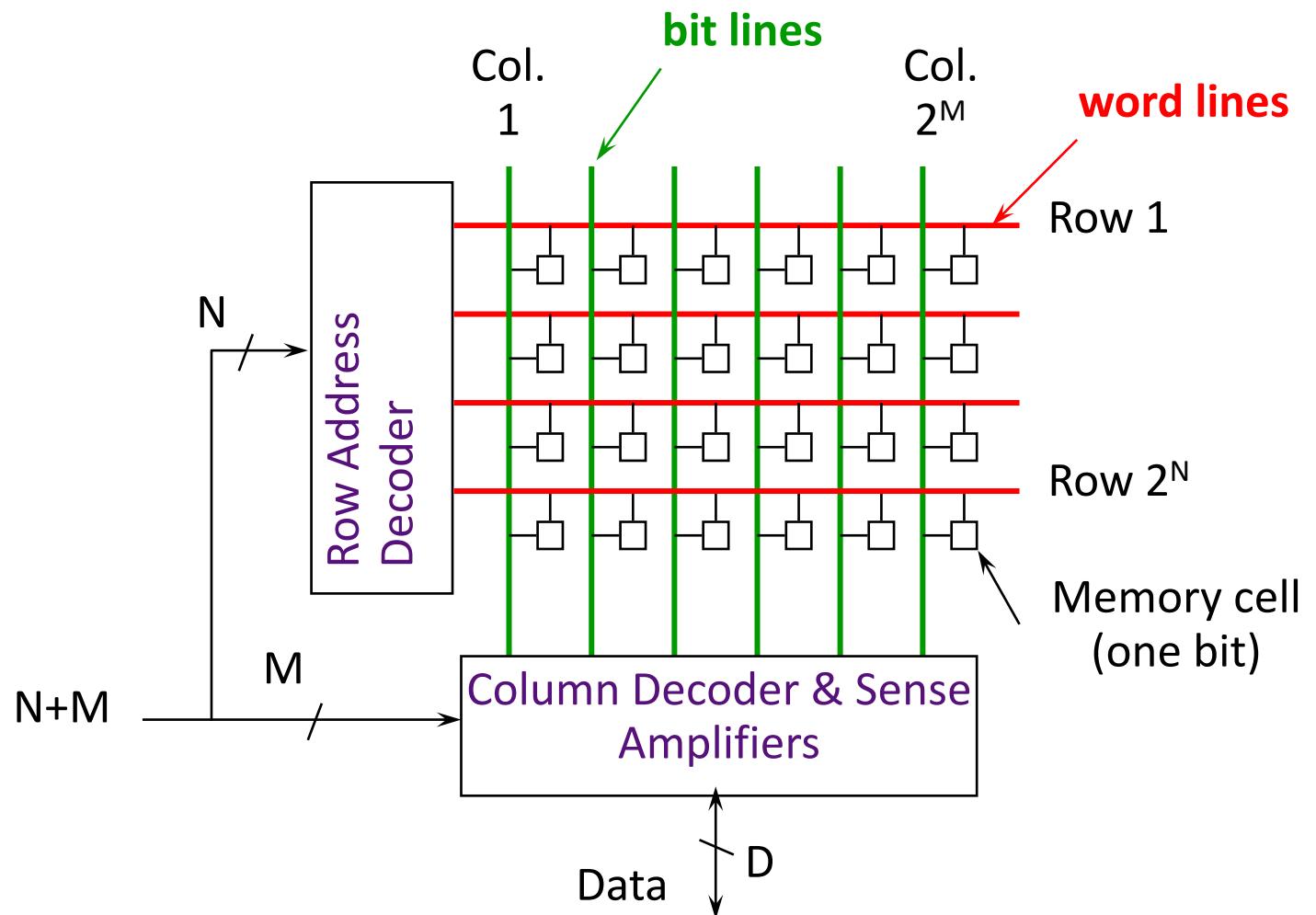


# Structura Internă

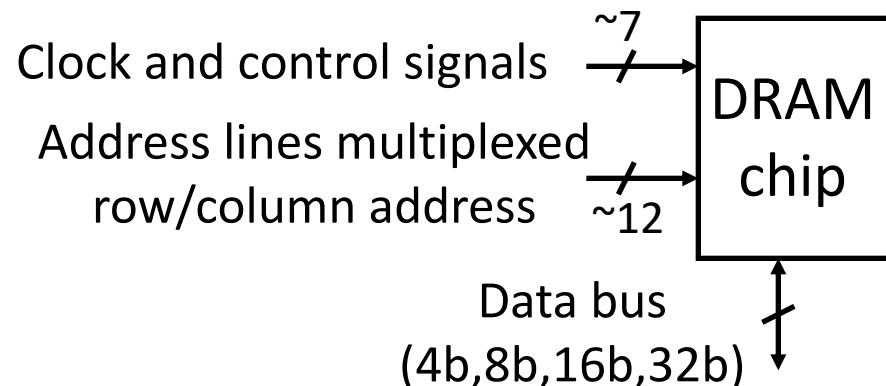


# Arhitectura DRAM

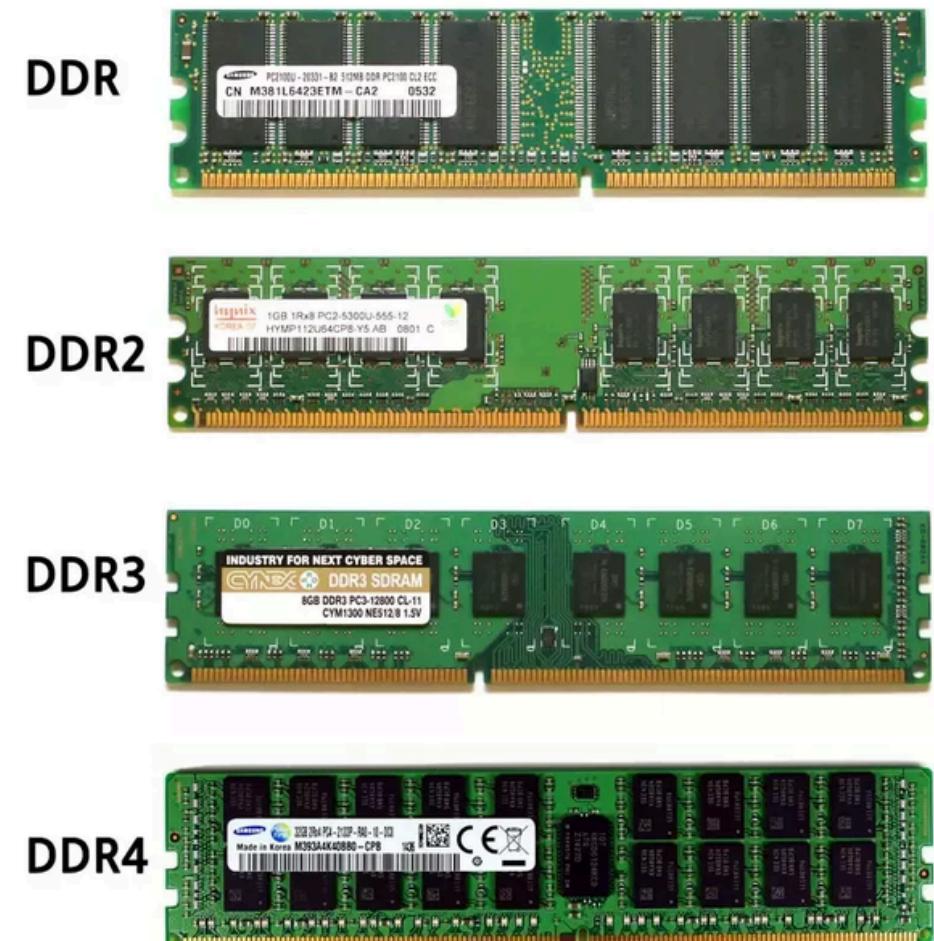
- Biții sunt stocați în matrici bidimensionale pe chip
- Chipurile moderne au în jur de 4-8 bancuri logice
- Fiecare banc logic este implementat fizic ca o matrice de biți



# Încapsularea DRAM (Laptop-uri/Desktop-uri/Serve)re)



- DIMM (Dual Inline Memory Module) conține mai multe chipuri cu semnalele de ceas/control/ adresă conectate în paralel (câteodată este nevoie de buffering pentru a duce semnalele la toate chipurile)
- Pinii de date lucrează împreună pentru a returna un cuvânt întreg (de ex., bus de date de 64 de biți cu patru chipuri de 16 biți)



# Încapsularea DRAM, Dispozitive mobile



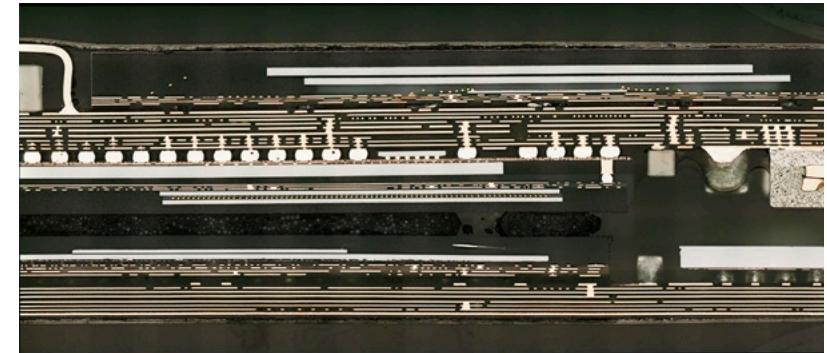
[ Capsulă Apple A4 pe PCB]



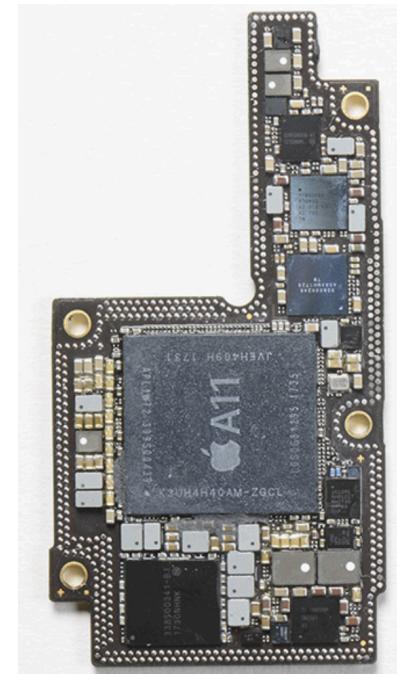
Two  
stacked  
DRAM die

Processor  
plus logic  
die

[ Capsulă Apple A4 în  
secțiune, iFixit 2010 ]



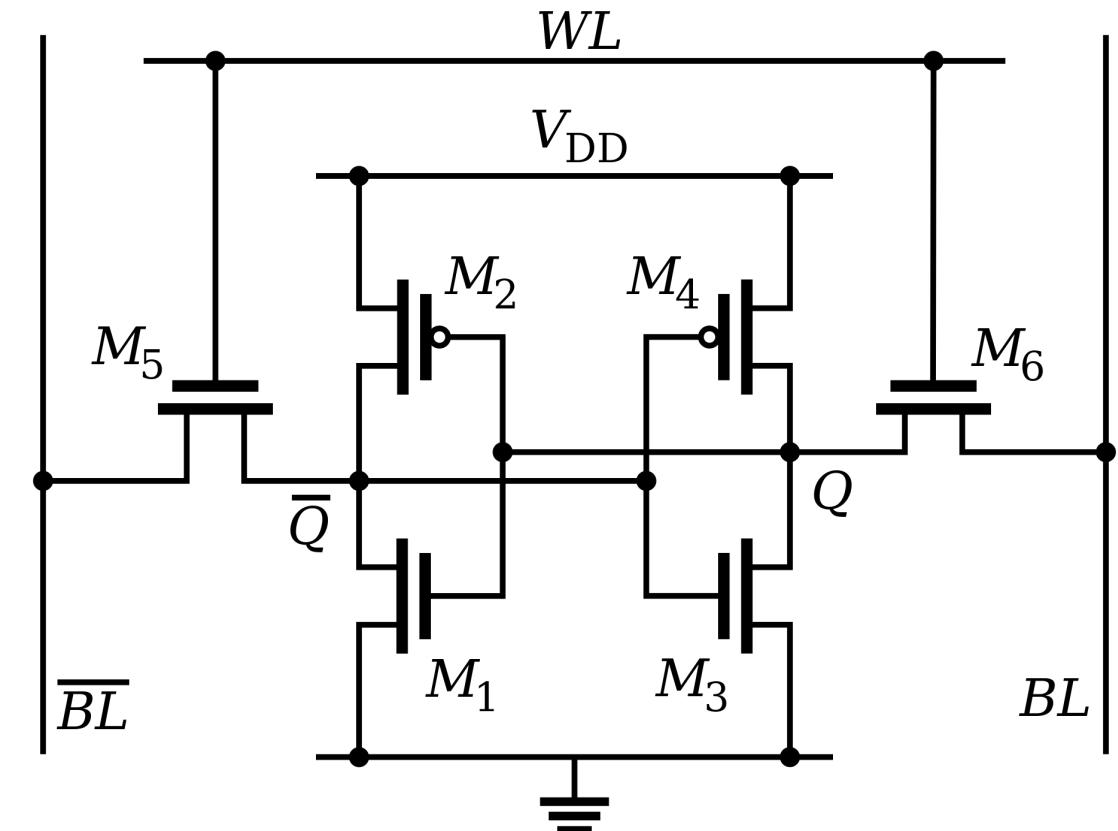
[ Capsulă Apple A11 în secțiune ]



[ iPhone X PCB, 2017 ]

# Memoria SRAM – celula de memorie

- Memorie cu stocare volatilă
- Structura internă de bistabil (flip-flop)
- Nu necesită cicli de refresh
- Viteză mai mare citire/scriere comparativ cu DRAM
- Costuri mai mari de fabricație

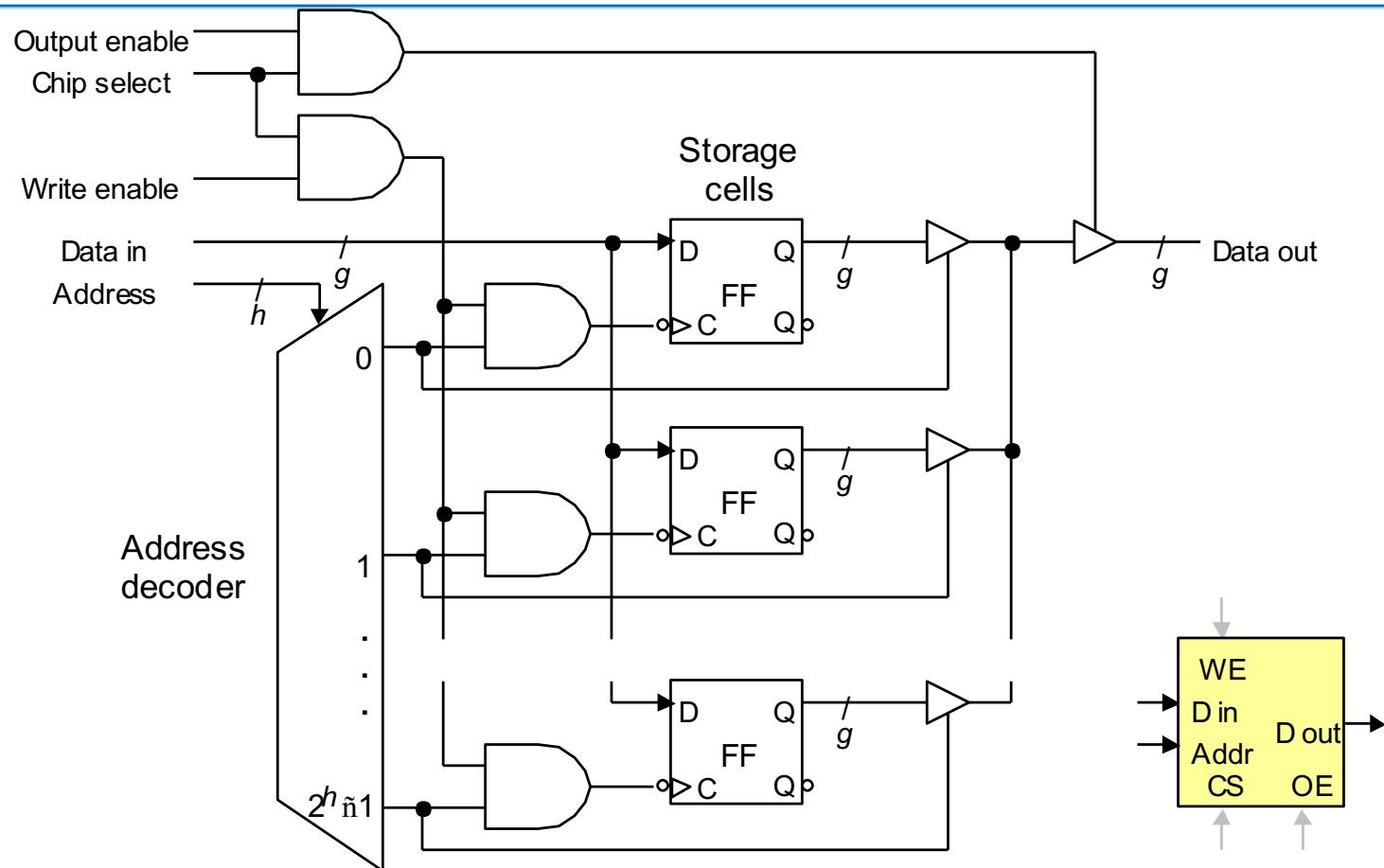


[Celulă (1 bit) de memorie SRAM]

[https://en.wikipedia.org/wiki/Static\\_random-access\\_memory](https://en.wikipedia.org/wiki/Static_random-access_memory)



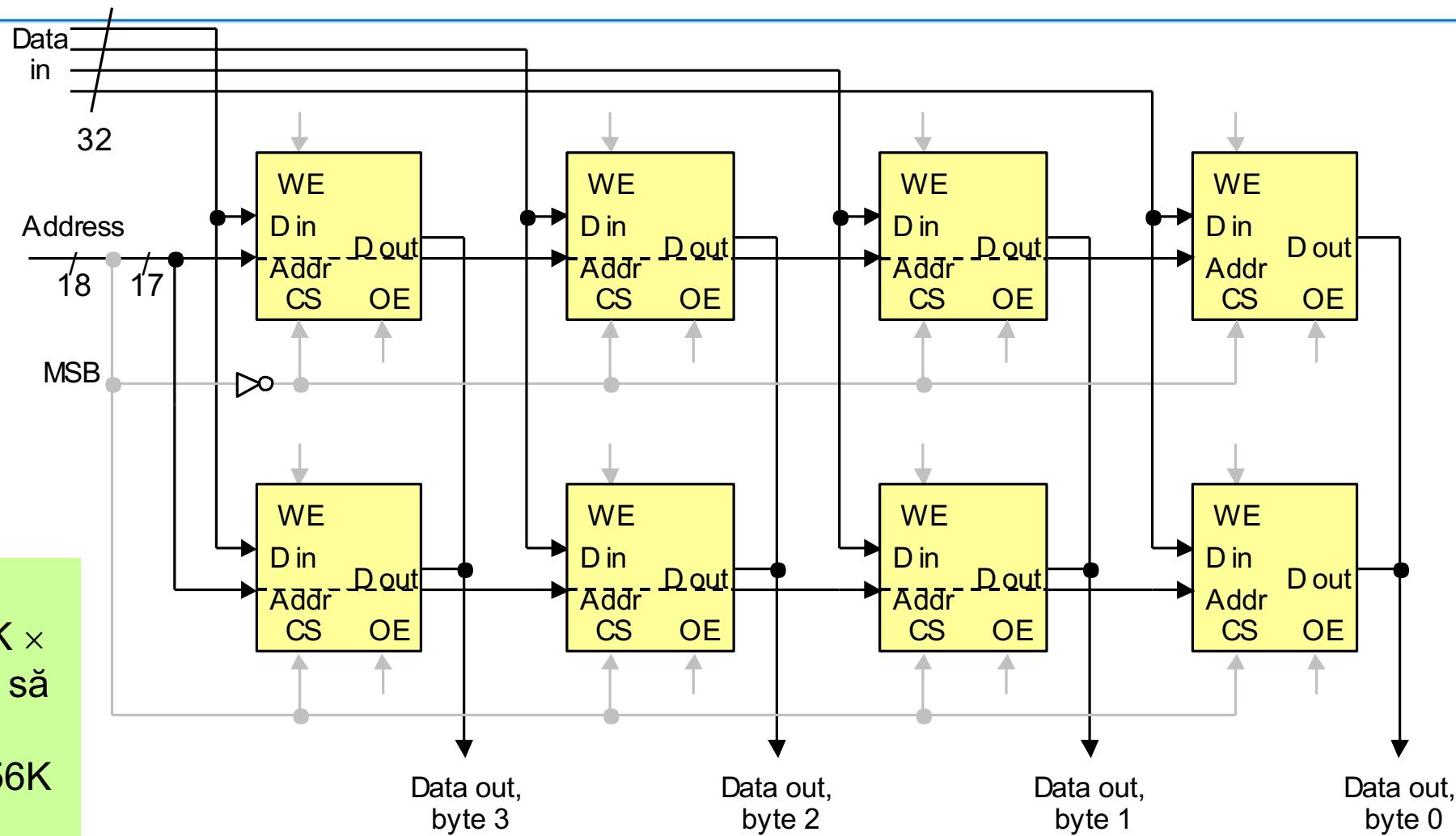
# Structura memoriei SRAM



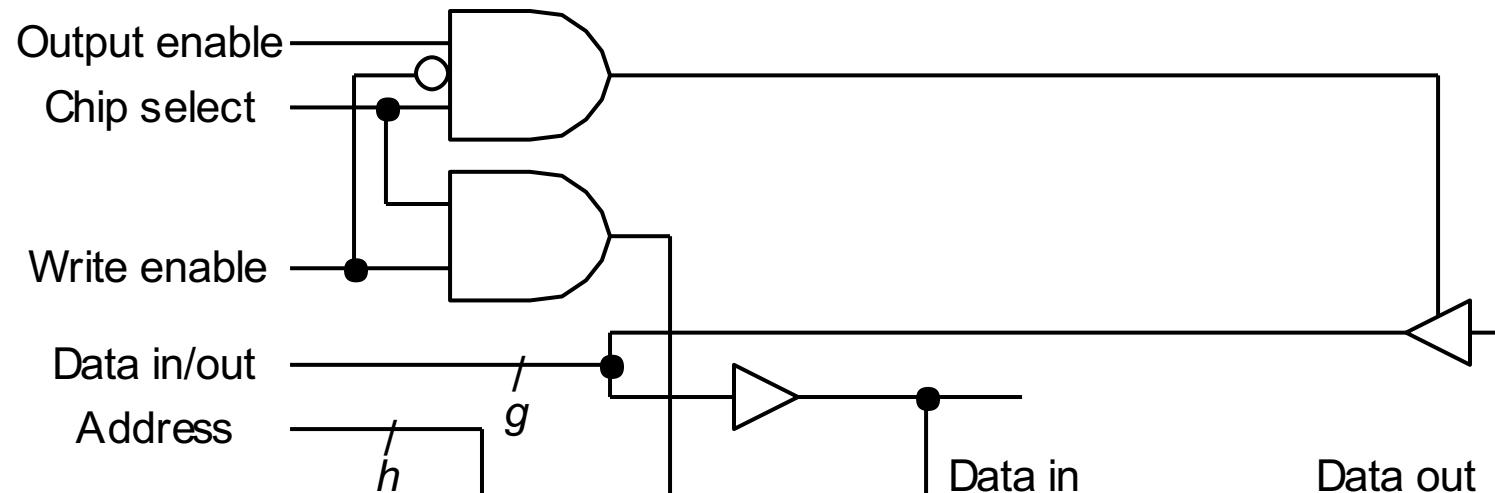
Structura internă a unui chip SRAM  $2^h \times g$  biți și simbolul lui echivalent în schema electrică.



# Multiple-Chip SRAM



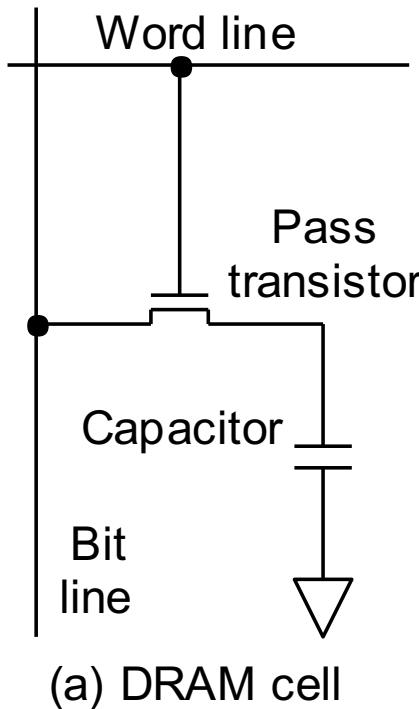
# SRAM cu bus de date bidirecțional



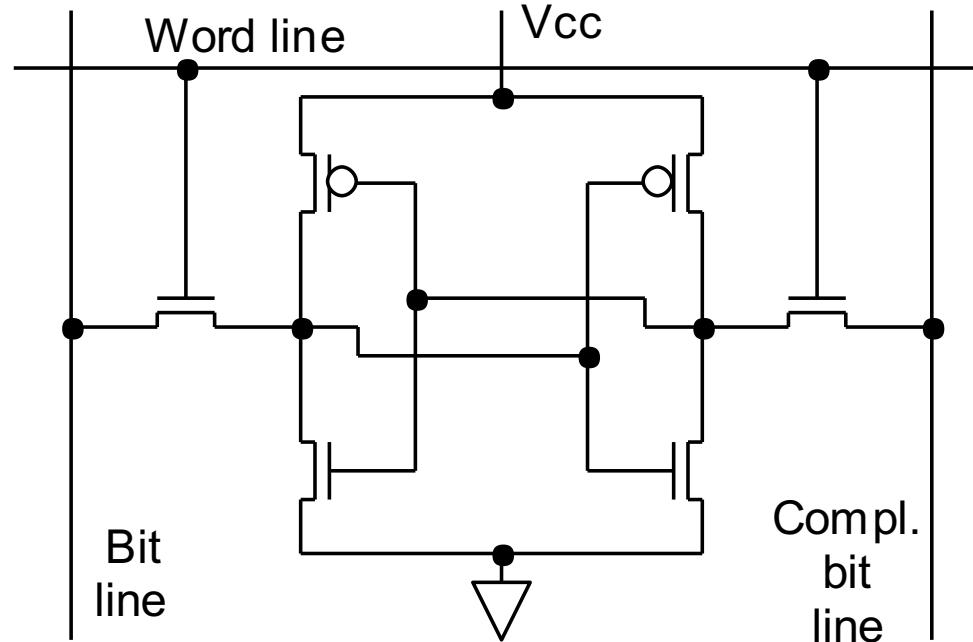
Atunci când intrarea și ieșirea de date a unui chip SRAM sunt partajate sau conectate la un bus bidirecțional, ieșirea trebuie dezactivată în timpul operațiilor de scriere.

# Memoria DRAM și ciclii de refresh

DRAM vs. SRAM – complexitatea unei celule de memorie



(a) DRAM cell

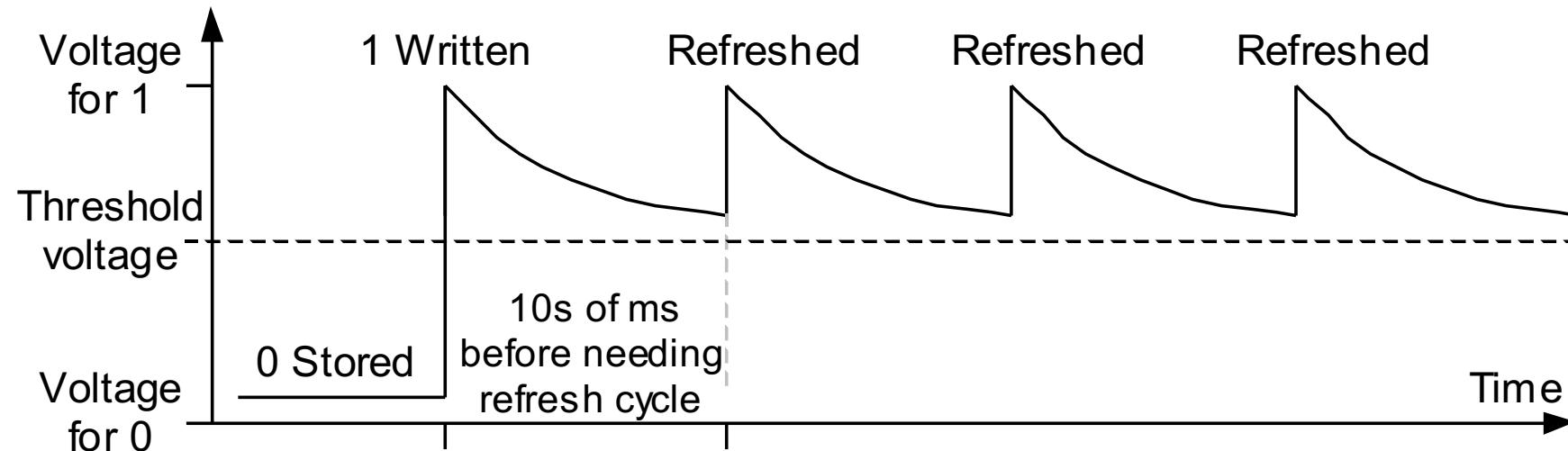


(b) Typical SRAM cell

Celula de memorie DRAM conține un singur tranzistor și e mult mai simplu de fabricat decât analogul ei SRAM => memorii DRAM de capacitate mai mare și mai dense.



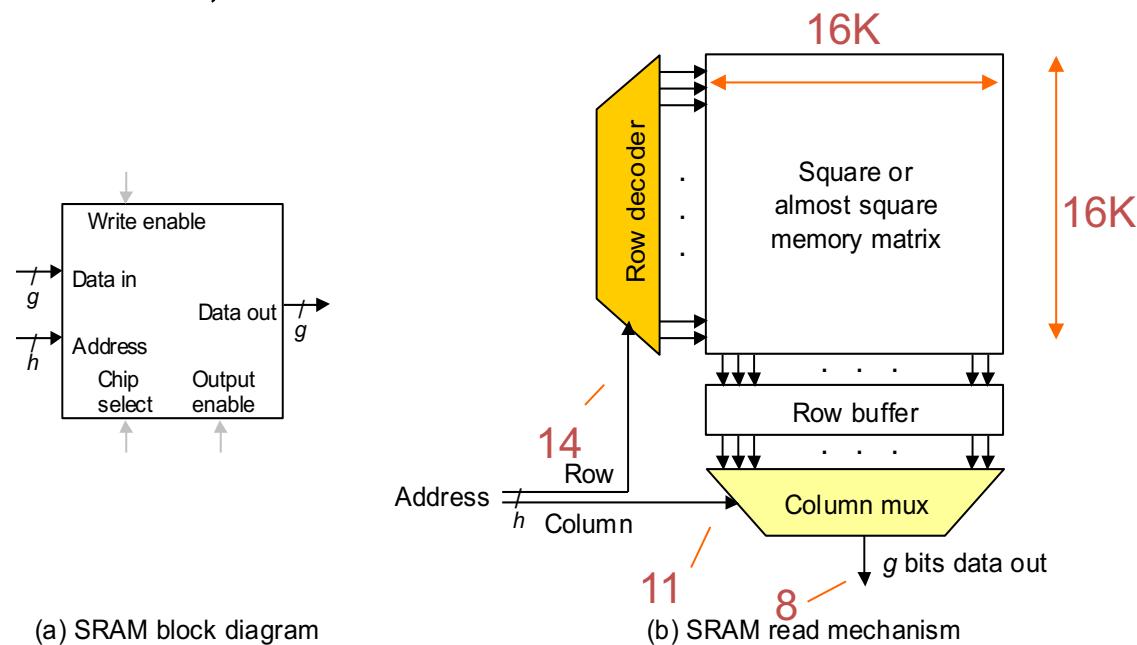
# Ciclii și rata de refresh pentru memoria DRAM



Variatia căderii de tensiune pe condensatorul unei celule DRAM după scrierea unui 1 logic și a mai multor operații de refresh.

# Pierderea lățimii de bandă cu ciclii de refresh

O memorie DRAM de 256 Mb e organizată ca  $32M \times 8$  intern și  $16K \times 16K$  intern. Rândurile trebuie reîmprospătate cel puțin la fiecare 50ms pentru a nu pierde datele; refresh-ul pentru o coloană durează 100ns. Cât % din lățimea totală de bandă este pierdută cu ciclii de refresh?



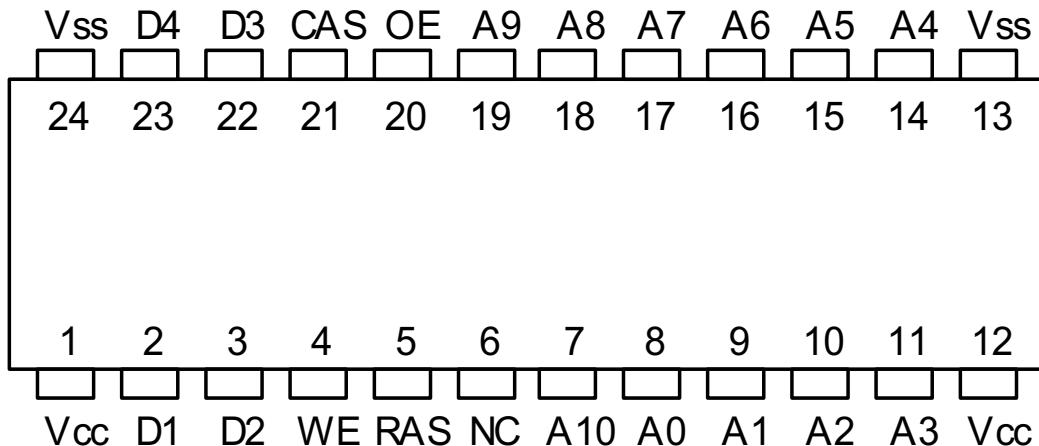
## Soluție

Refresh-ul pt toate 16K rânduri durează  $16 \times 1024 \times 100$  ns = 1.64 ms. Pierderea a 1.64 ms la fiecare 50 ms duce la  $1.64/50 = 3.3\%$  pierdere din lățimea totală de bandă.



# Încapsularea DRAM

24-pin dual in-line package (DIP)



Legend:

- $A_i$  Address bit  $i$
- CAS Column address strobe
- $D_j$  Data bit  $j$
- NC No connection
- OE Output enable
- RAS Row address strobe
- WE Write enable

556-pin FBGA package



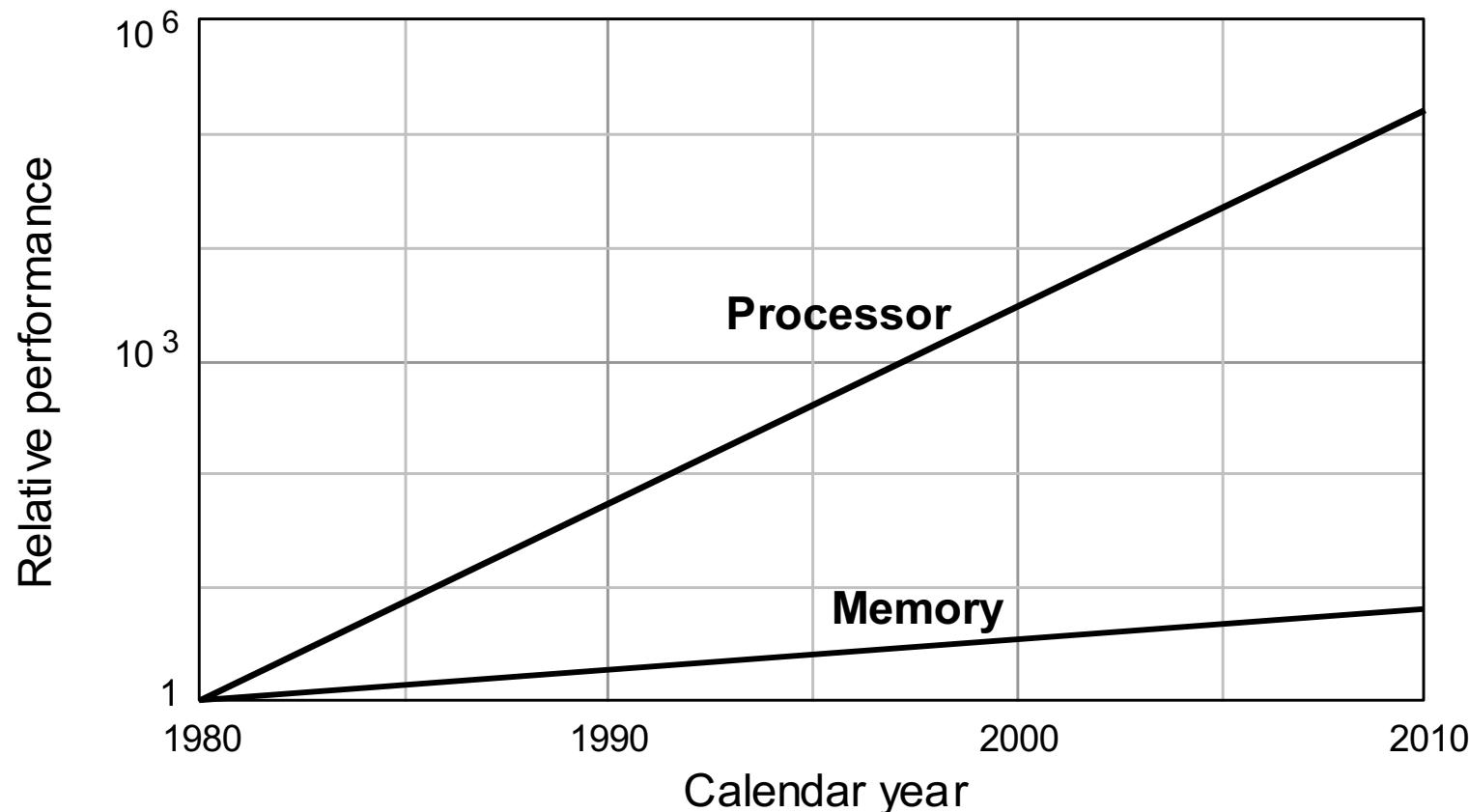
Samsung 12GB DRAM [2019]



<https://www.samsung.com/semiconductor/dram/lpddr4x/>



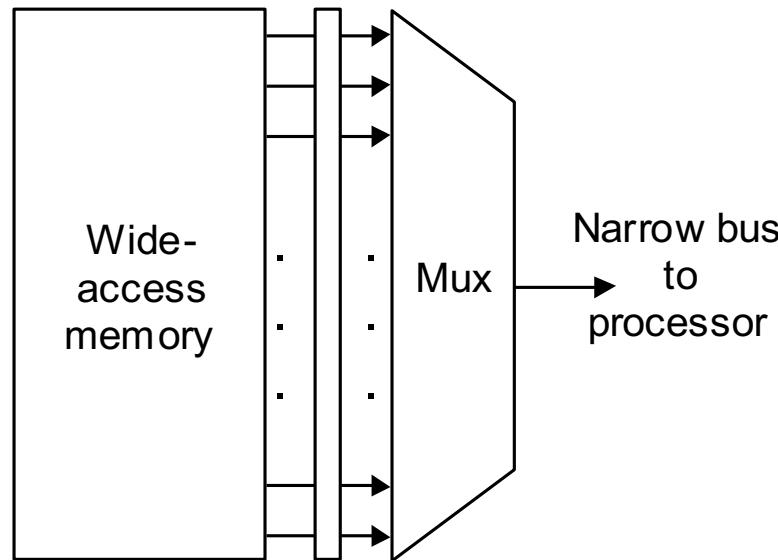
# Atingerea zidului memoriei



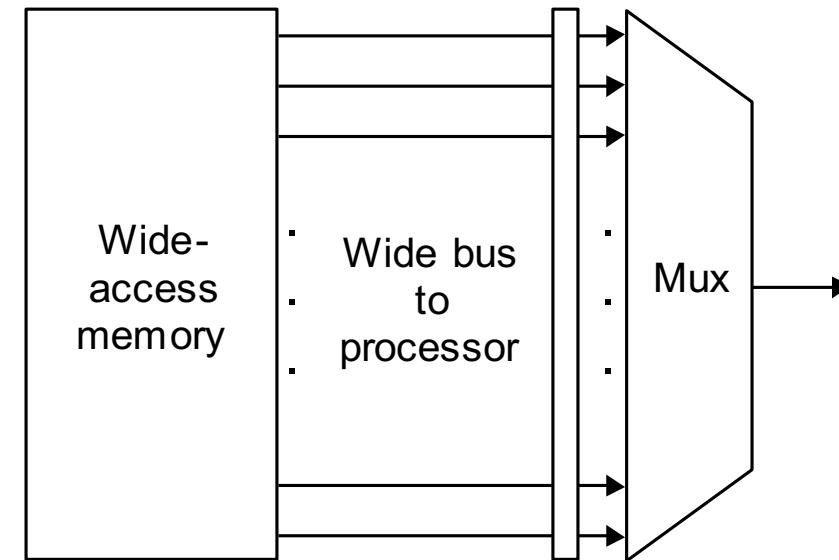
Densitatea și capacitatea memoriei au crescut odată cu puterea și complexitatea CPU, dar viteza memoriei nu a ținut pasul.

# Trecerea prăpastiei de viteză CPU-Memorie

Idee: Citim mai multe date din memorie la fiecare acces



(a) Buffer and multiplexer  
at the memory side



(a) Buffer and multiplexer  
at the processor side

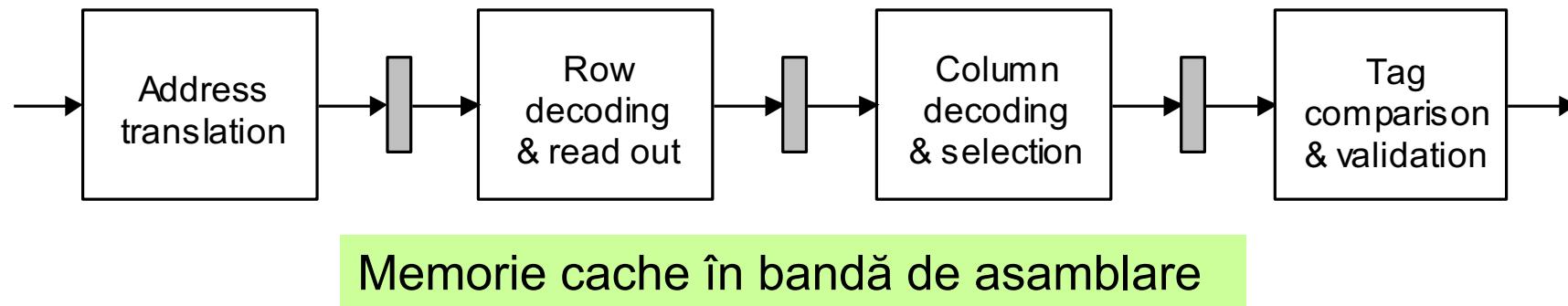
Două căi de a folosi o memorie cu lățime mare de bandă pentru a reduce diferența de viteză dintre procesor și memorie.

# Memorie și b.a.

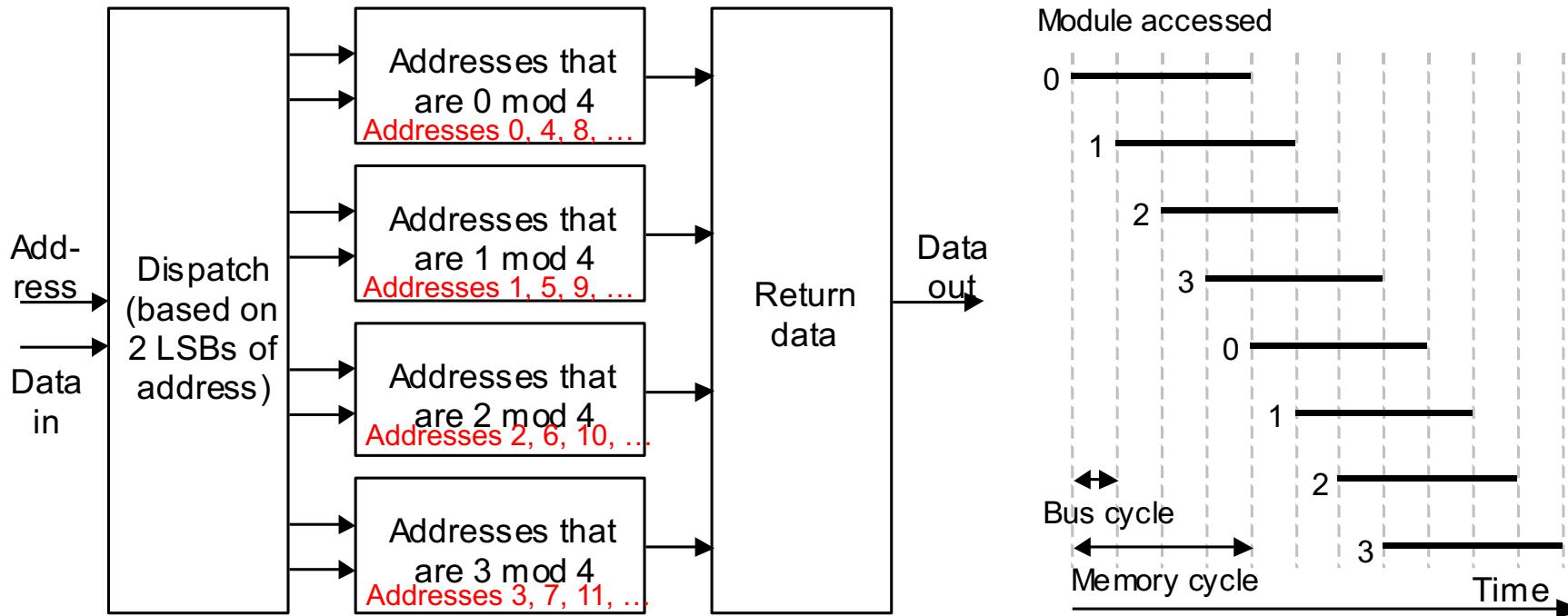
---

Latența memoriei poate fi dată și de alți factori, în afară de timpul de acces fizic.

- Translatarea adresei virtuale
- Compararea etichetelor pentru a determina rata hit/miss pentru cache

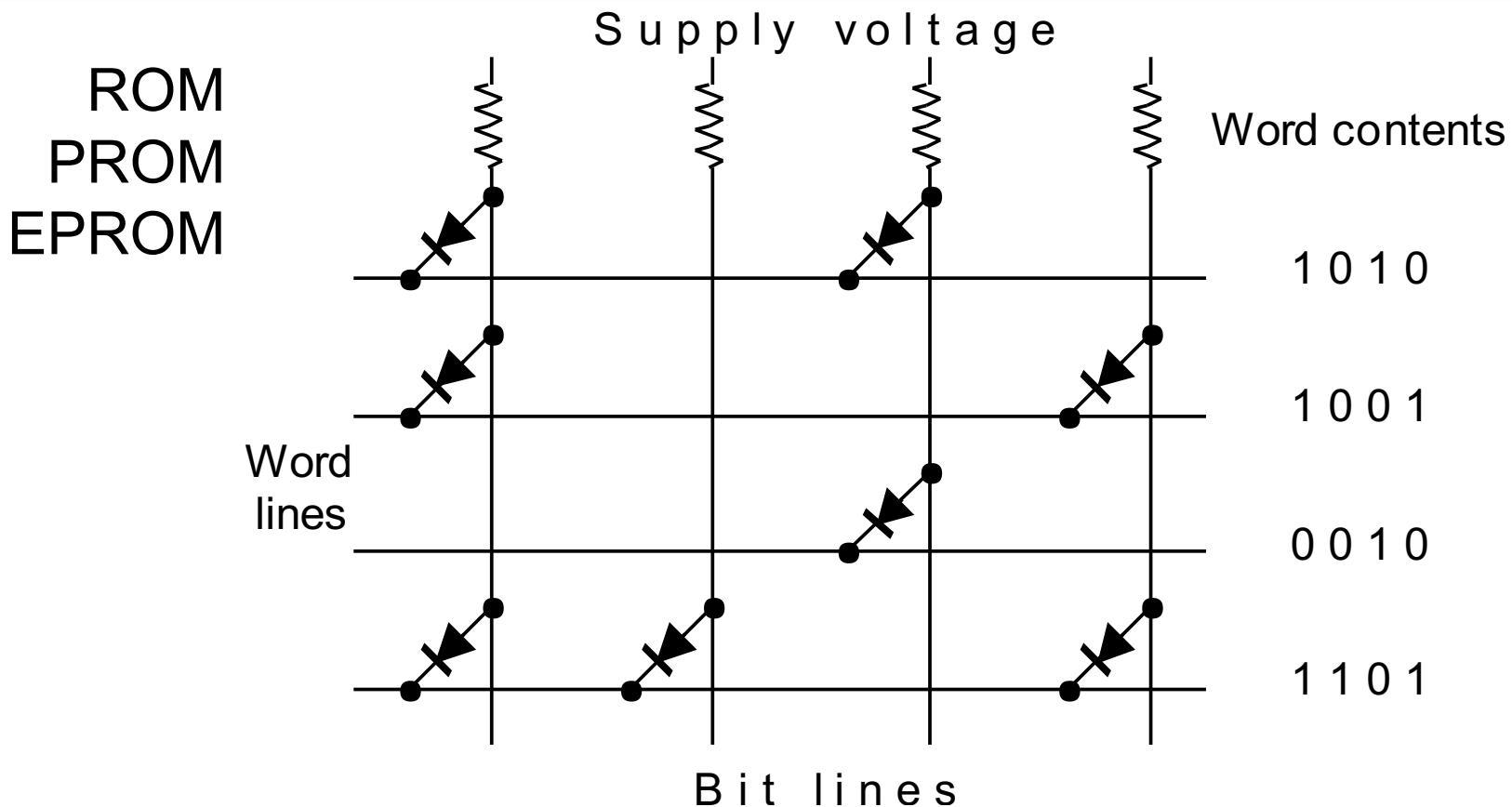


# Întrețeserea memoriei



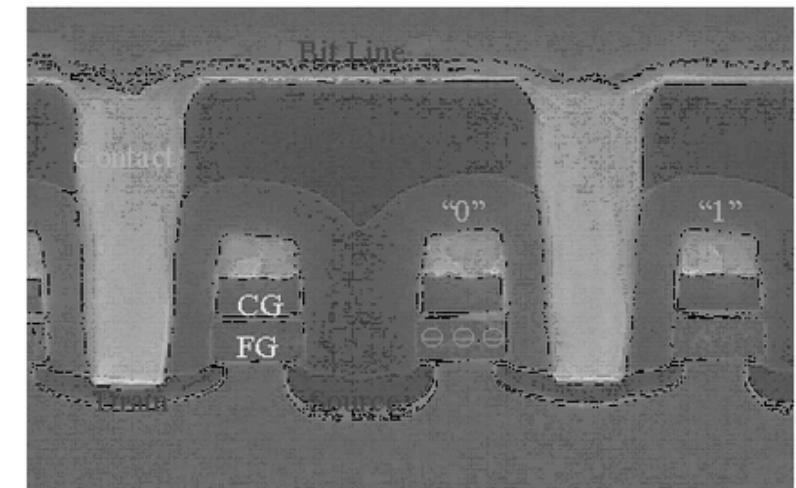
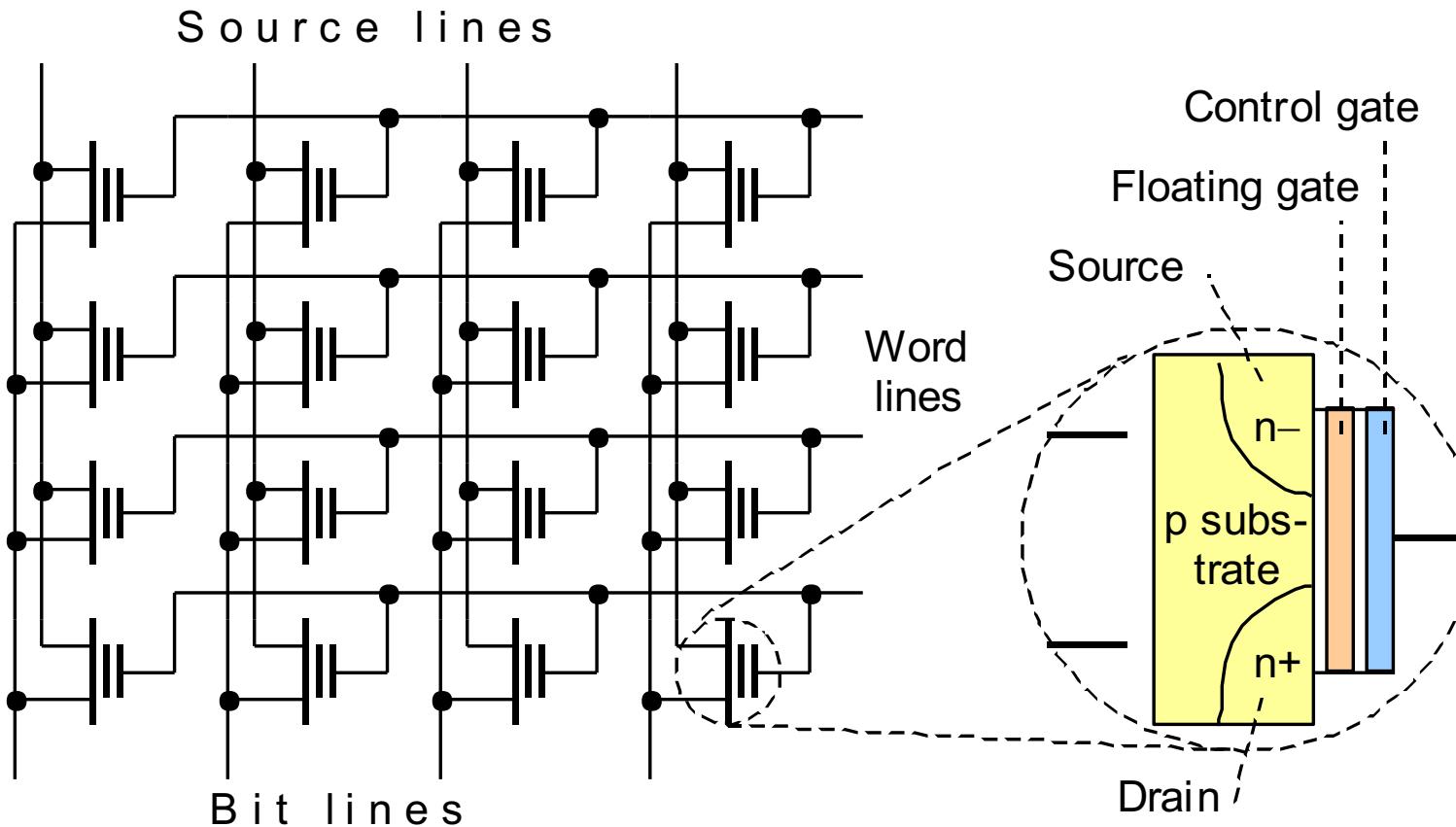
Memoria întrețesută e mai flexibilă decât memoria cu lățime de bandă mare, pentru că poate susține accese multiple independente în același timp.

# Memoria ne-volatile



Organizarea Read-Only Memory. Conținutul memoriei este afișat în dreapta.

# Memoria Flash



180 nm Flash technology

Organizarea memoriei EEPROM sau Flash. Fiecare celulă conține un tranzistor MOS cu poartă flotantă.

[https://en.wikipedia.org/wiki/Flash\\_memory](https://en.wikipedia.org/wiki/Flash_memory)



# Nevoia unei ierarhii de memorie

---

## Discrepanța în latență dintre CPU și memoria principală

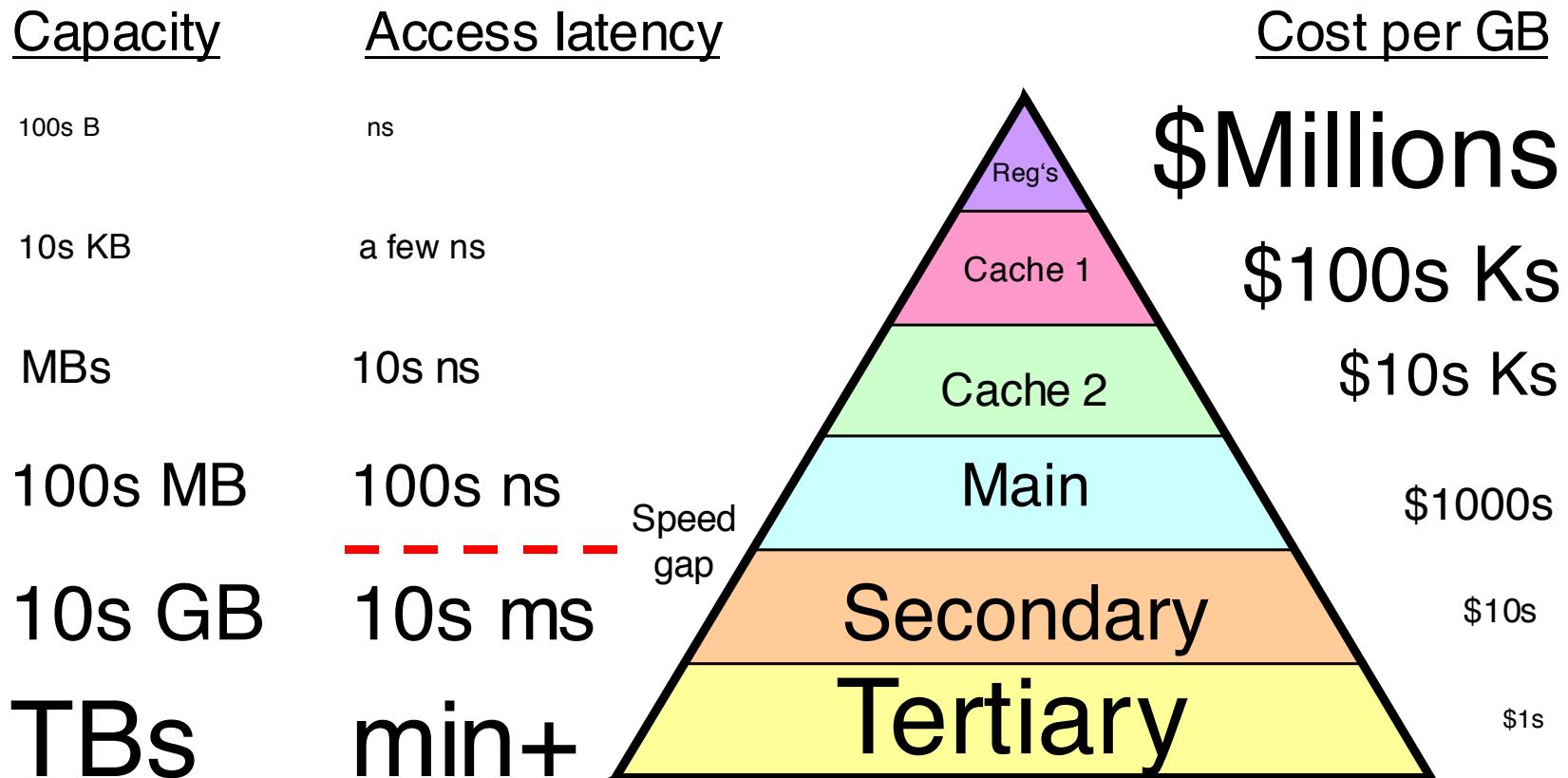
- Operațiile unui procesor sunt de ordinul nanosecundelor
- Accesele la memorie necesită timpi de ordinul zecilor sau sutelor de ns

## Limitările lățimii de bandă pentru memorii reduc rata de execuție a instrucțiunilor

- Fiecare instrucțiune executată necesită cel puțin un acces la memorie
- Rezultă că performanța procesorului este redusă la câteva sute de MIPS
- O memorie rapidă poate reduce timpii de acces la date
- Cele mai rapide memorii sunt costisitoare și nu au capacitate mare.
- Două (sau trei) niveluri de cache sunt folosite, din această cauză

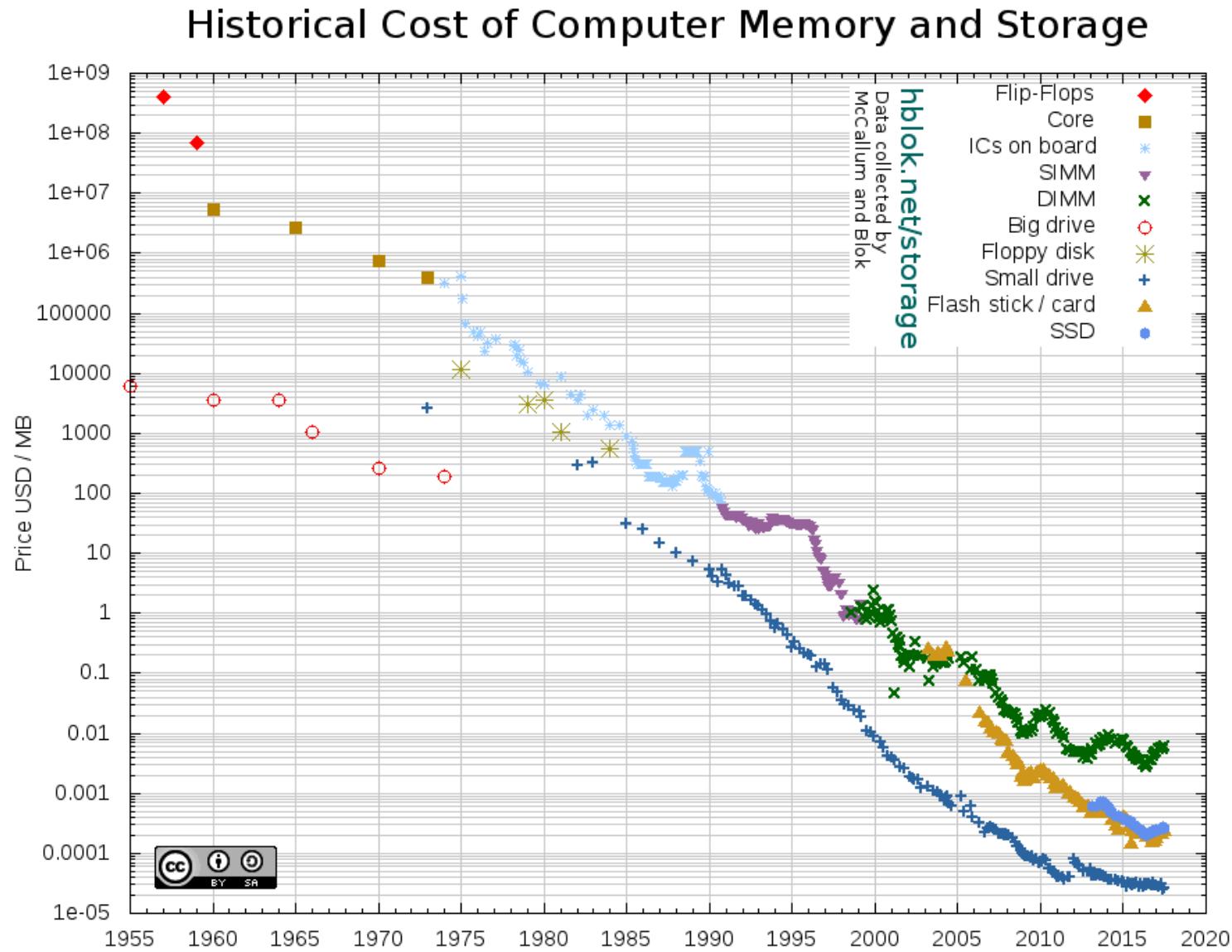


# Ierarhia tipică a circuitelor de memorie



Numele și caracteristicile tipice pentru memorii în organizarea ierarhică

# Tendințele prețurilor memoriilor



<https://hblok.net/blog/posts/2017/12/17/historical-cost-of-computer-memory-and-storage-4/>

# Memorii de mare capacitate

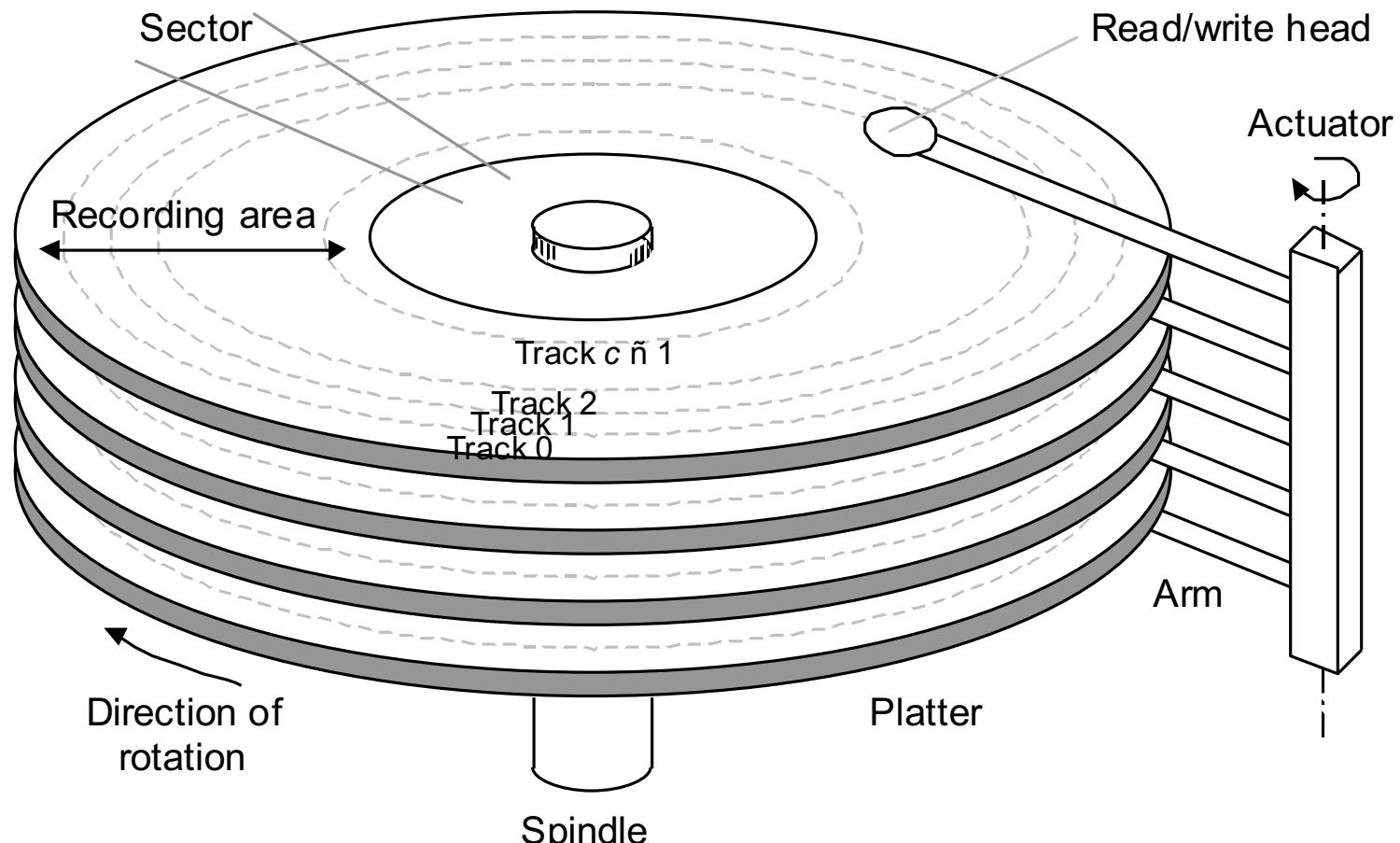
---

În zilele noastre, memoria principală este imensă, totuși inadecvată pentru toate necesitățile

- Discurile magnetice furnizează capacitați extinse pentru stocare și back-up
- Discurile optice și memoriile solid-state sunt alte opțiuni de stocare a datelor

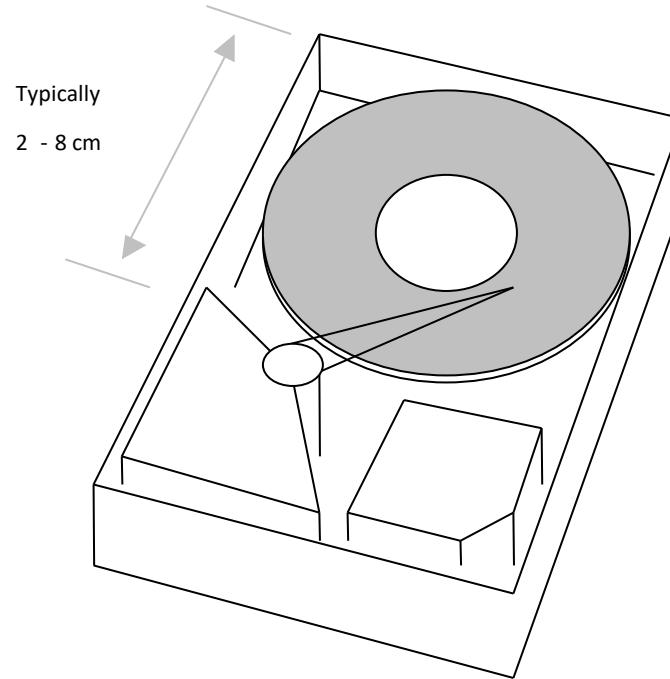


# Disk Memory 101



Elementele unui hard-disc și termenii principali.

# Unități de disc



From Computer Desktop Encyclopedia  
Reproduced with permission.  
© 2006 Toshiba Corporation

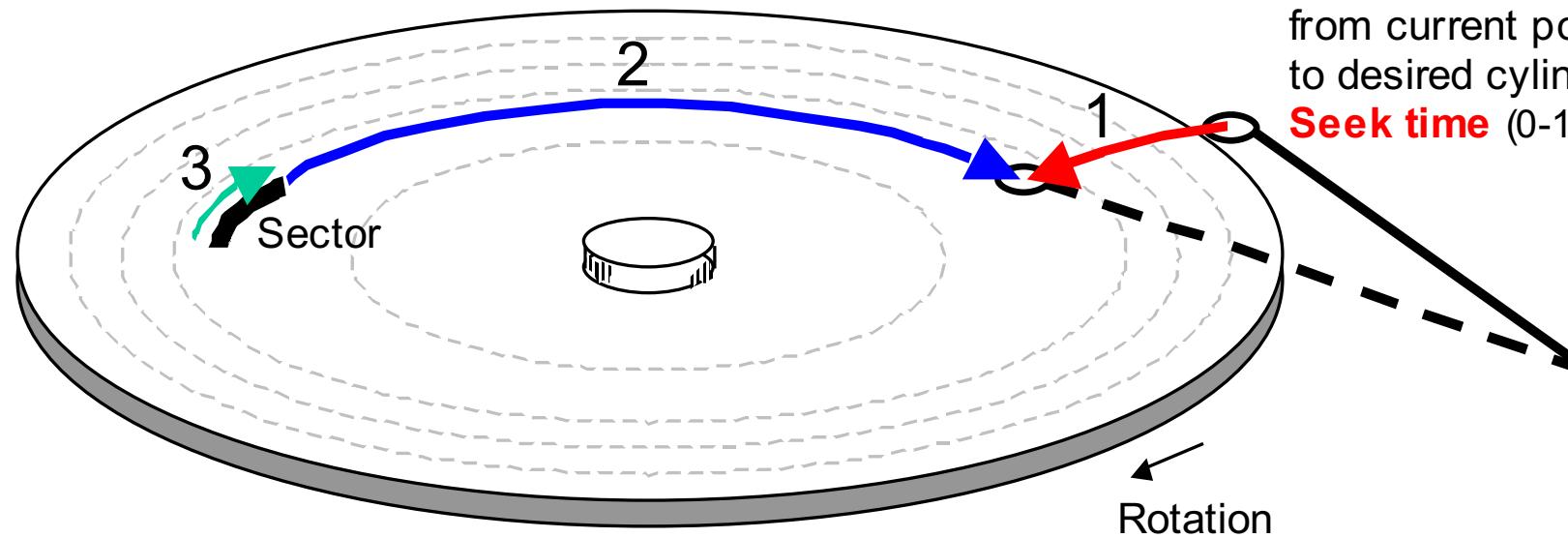


# Timpul de acces pentru un disc

3. Disk rotation until sector has passed under the head:  
**Data transfer time** (< 1 ms)

2. Disk rotation until the desired sector arrives under the head:  
**Rotational latency** (0-10s ms)

1. Head movement from current position to desired cylinder:  
**Seek time** (0-10s ms)



Cele trei componente ale timpului de acces la un disc. Discurile cu o viteză de rotație mai mare au timpi de acces mai buni, atât în medie cât și în cel mai rău caz.

# Discuri magnetice

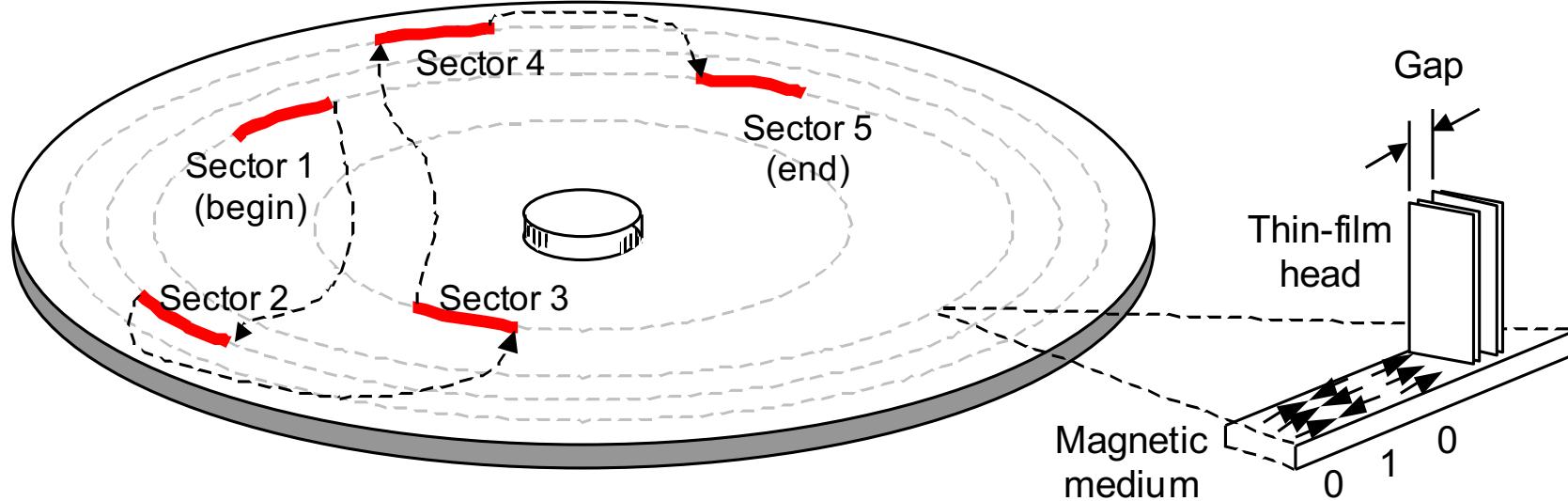
---

Caracteristicile a trei tipuri diferite de discuri magnetice (cca. 2003)

Manufacturer and Model Name	Seagate Barracuda 180	Hitachi DK23DA	IBM Microdrive
Application domain	Server	Laptop	Pocket device
Capacity	180 GB	40 GB	1 GB
Platters / Surfaces	12 / 24	2 / 4	1 / 2
Cylinders	24 247	33 067	7 167
Sectors per track, avg	604	591	140
Buffer size	16 MB	2 MB	1/8 MB
Seek time, min,avg,max	1, 8, 17 ms	3, 13, 25 ms	1, 12, 19 ms
Diameter	3.5"	2.5"	1.0"
Rotation speed, rpm	7 200	4 200	3 600
Typical power	14.1 W	2.3 W	0.8 W



# Organizarea datelor pe disc



Înregistrarea magnetică a datelor pe piste și capul de citire/scriere.

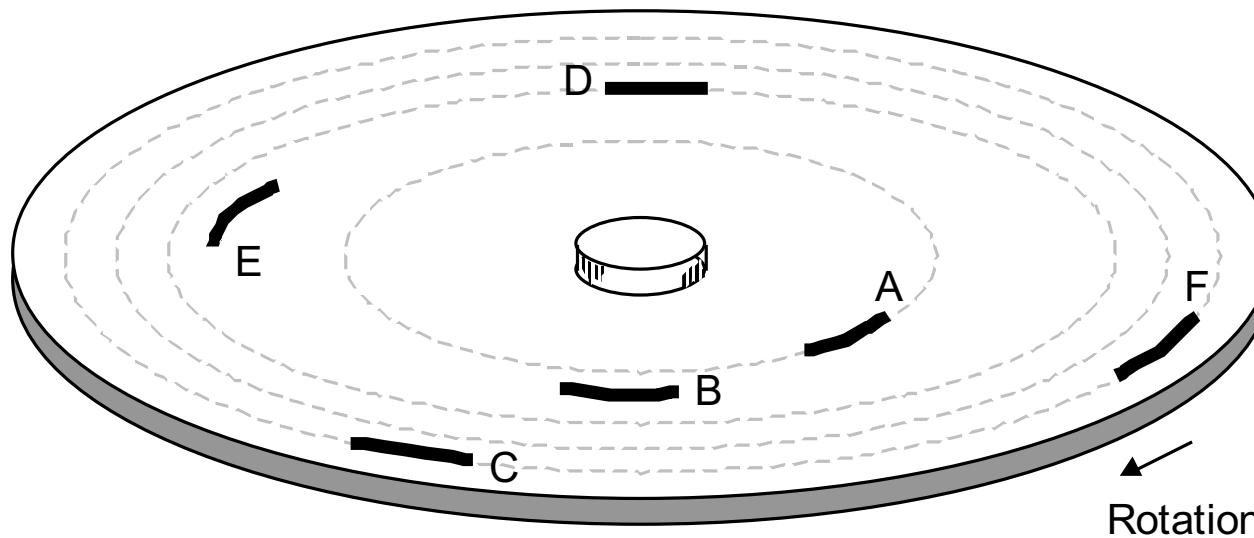
0	16	32	48	1	17	33	49	2		Track <i>i</i>
30	46	62	15	31	47	0	16	32		Track <i>i</i> + 1
60	13	29	45	61	14	30	46	62		Track <i>i</i> + 2
27	43	59	12	28	44	60	13	29		Track <i>i</i> + 3

Numerotarea logică a sectoarelor pe mai multe piste adiacente.

# Performanța discurilor

$$\text{Timpul de căutare} = a + b(c - 1) + \beta(c - 1)^{1/2}$$

$$\text{Latentă medie dată de rotire} = (30 / \text{rpm}) \text{ s} = (30\,000 / \text{rpm}) \text{ ms}$$



Arrival order of access requests:

A, B, C, D, E, F

Possible out-of-order reading:

C, F, D, E, B, A

Reducerea timpului de căutare și a latenței de rotire prin accesarea datelor în altă ordine.

# Disk Caching

---

**Aceeași idee ca și la caching-ul pentru procesoare: micșorarea latenței dintre memoria principală și disc**

Discurile au memorii tampon în funcție de capacitate (de ordinul 10-100 MB)

Latența datorată rotației este eliminată; pot să încep de la orice sector

Am nevoie de energie pentru back-up pentru a nu pierde schimbările din memoria tampon

(ne trebuie oricum o rezervă de energie pentru retragerea capului de citire la căderea sursei de energie electrică)

## **Opțiuni de plasare a memoriei cache pentru discuri**

În controllerul de disc:

Suntem afectați de latența magistralei de date și a controllerului în sine, chiar și pentru un cache hit

Mai aproape de CPU:

Reduce latența și permite o utilizare mai bună a spațiului

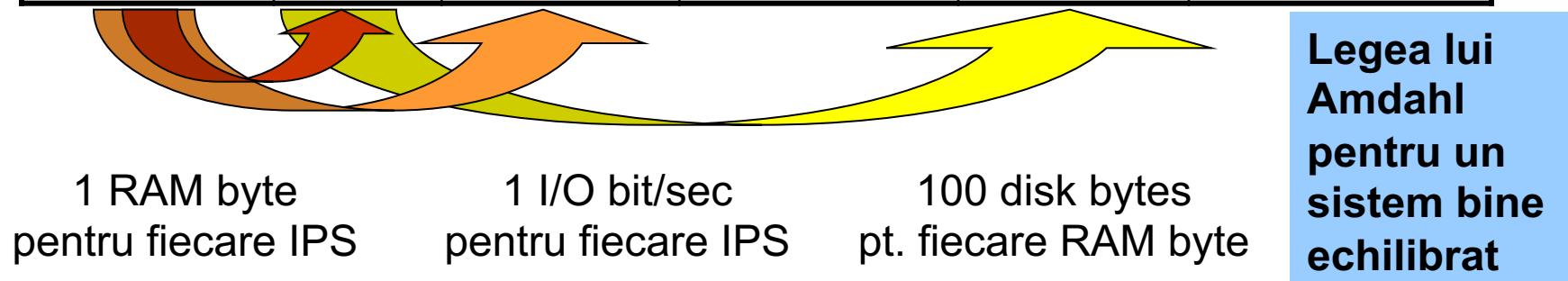
Soluții intermediare sau mixte



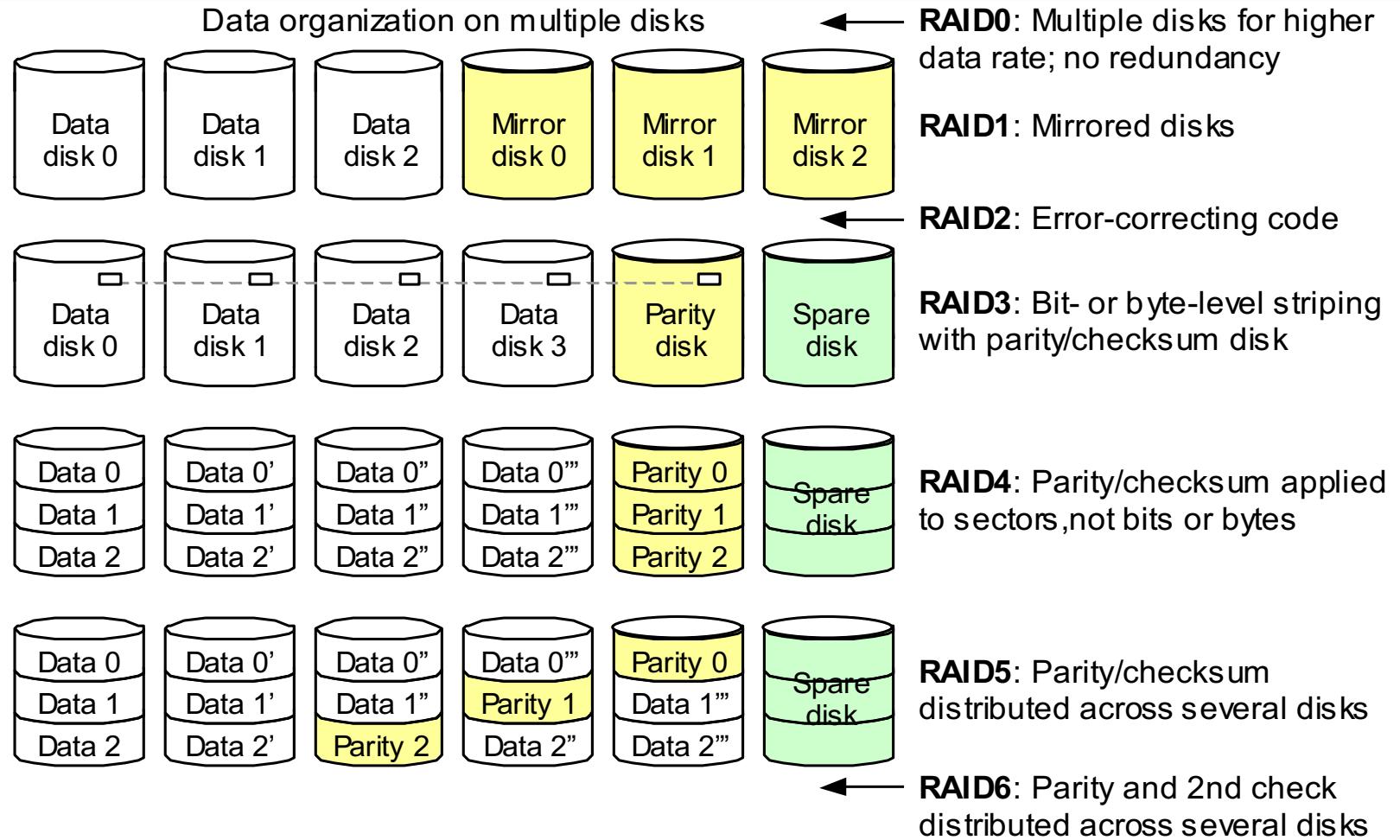
# Disk Arrays & RAID

Necesitatea de memorii secundare (disc) de capacitate și productivitate mărită

Processor speed	RAM size	Disk I/O rate	Number of disks	Disk capacity	Number of disks
1 GIPS	1 GB	100 MB/s	1	100 GB	1
1 TIPS	1 TB	100 GB/s	1000	100 TB	100
1 PIPS	1 PB	100 TB/s	1 Million	100 PB	100 000
1 EIPS	1 EB	100 PB/s	1 Billion	100 EB	100 Million



# Redundant Array of Independent Disks (RAID)



Nivelurile 0-6 RAID, cu o vedere simplificată a organizării datelor.



# Exemple de produse RAID

---



[HighPoint RocketStor 6618 Thunderbolt 3 DAS: 8-Bays, Up to 96 TB, 2.7 GB/s](#)



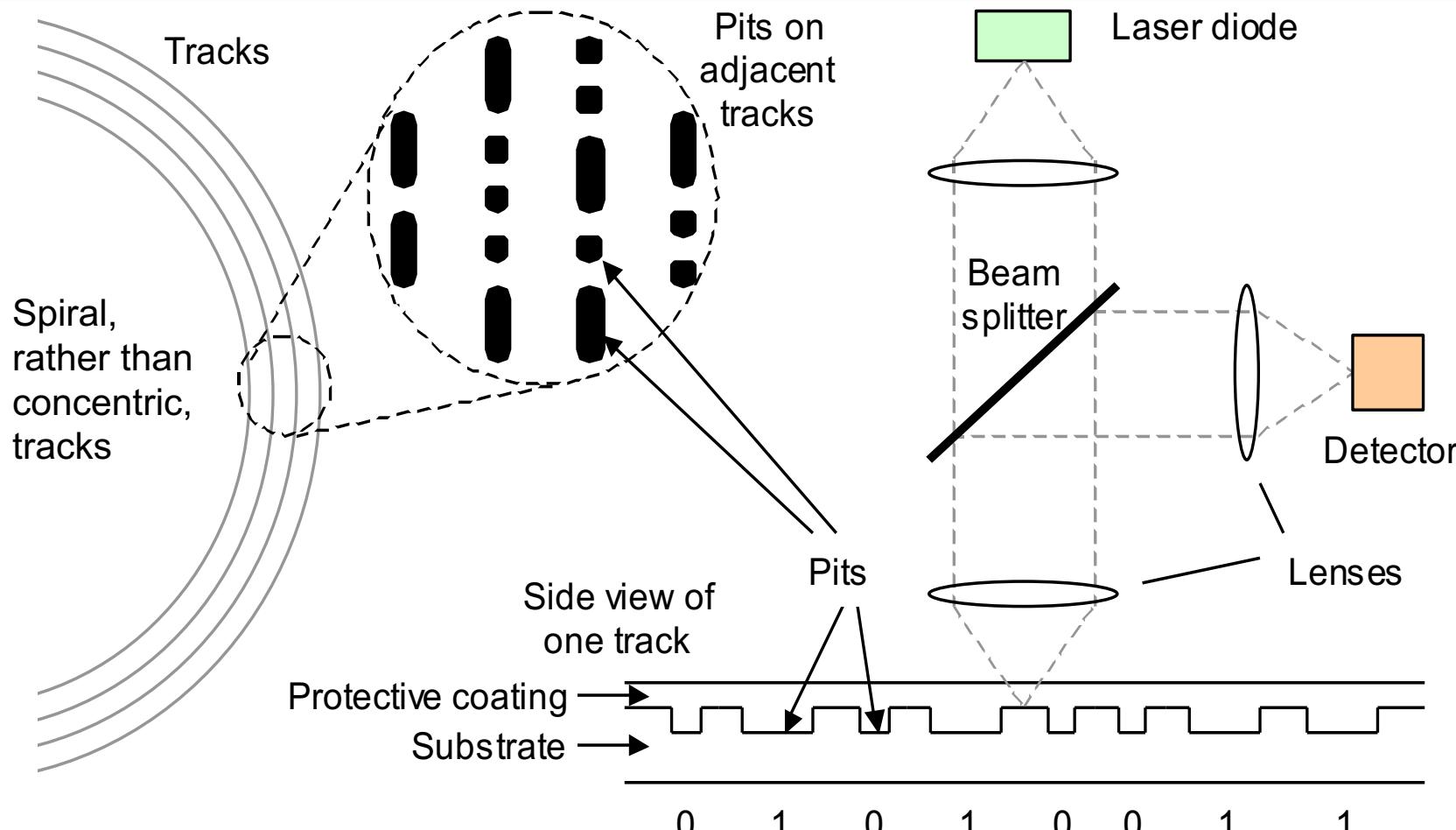
HADOOP.Big Data Rx8500/8600 250TB-Enterprise Cloud Storage Solution



# Alte tipuri de medii de stocare



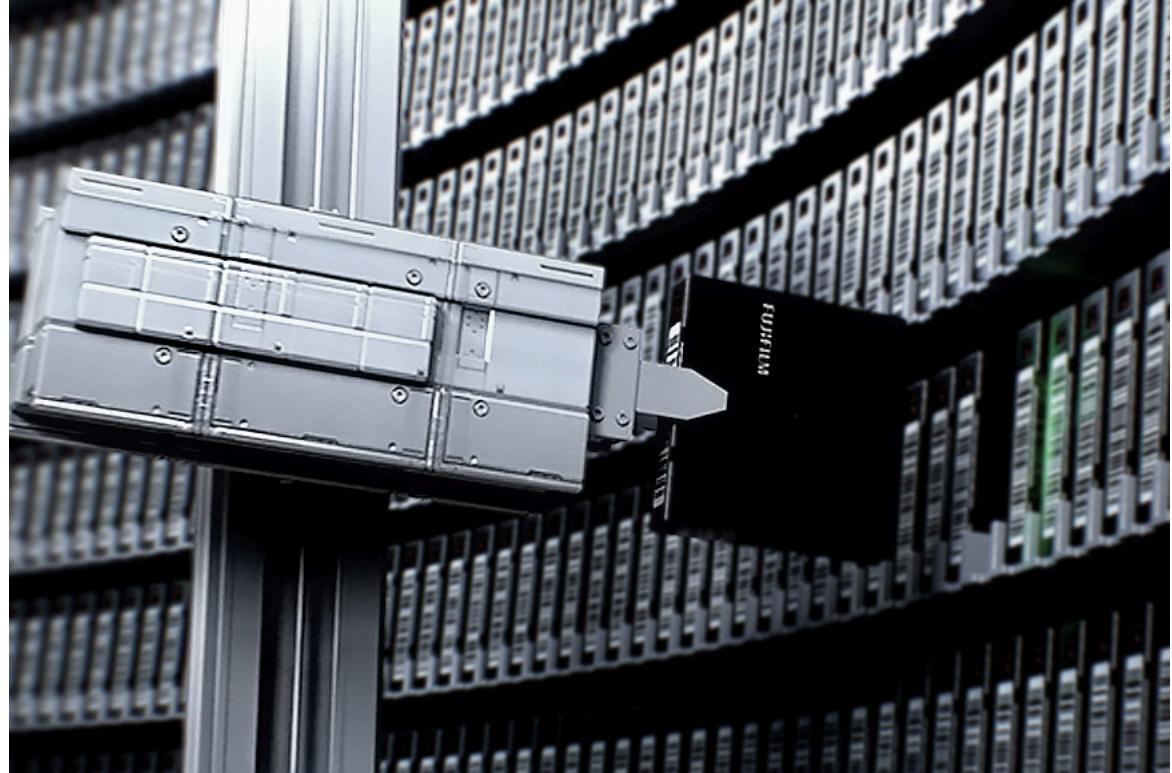
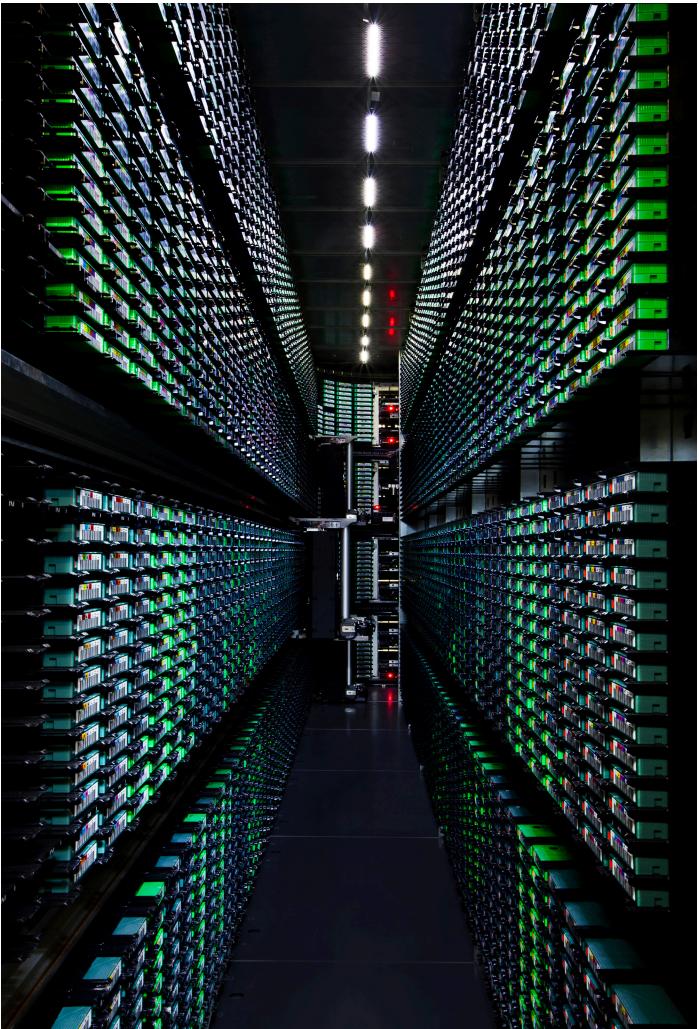
# Discuri optice



Vedere simplificată a înregistrărilor și mecanismul de acces la date pentru un CD-ROM sau DVD-ROM.



# Biblioteci automate de benzi pentru arhivare



[https://en.wikipedia.org/wiki/Tape\\_library](https://en.wikipedia.org/wiki/Tape_library)

