

Memorii semiconductoare

- Memorii semiconductoare
 - Celula de memorie și unitatea de memorie
 - Organizarea memoriilor
 - Proiectarea memoriilor
 - Exemplu de circuit de memorie comercial
 - Memorii stivuite
 - Memorii DRAM
 - Memorii *flash*

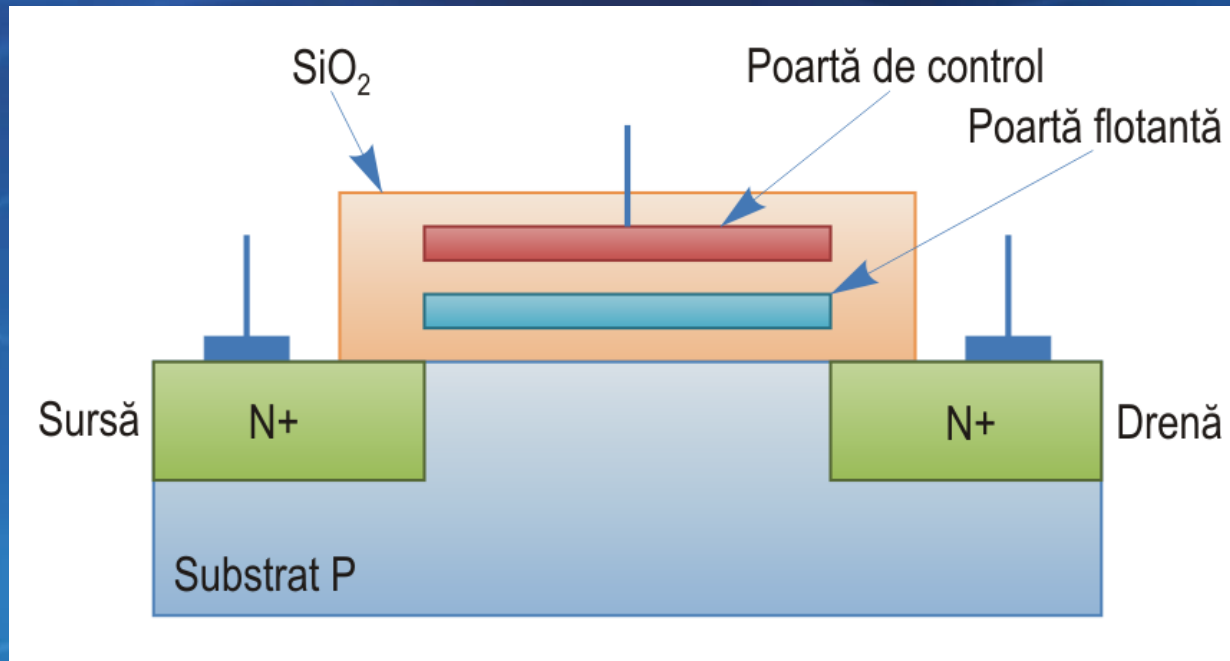
Memorii *flash*

- Memorii *flash*
 - Principiul de funcționare
 - Arhitectura NOR
 - Arhitectura NAND
 - Sisteme de memorie NAND
 - Formatul SSD
 - Formatul SD
 - Formatul e-MMC
 - Formatul UFS

Principiul de funcționare (1)

- Tehnologia: combinație între tehnologiile **EPROM** și **EEPROM**
 - *Flash*: se realizează ștergerea unui bloc întreg
- Celula de memorie *flash* este similară cu celula de memorie EPROM
 - Tranzistor cu efect de câmp FET (*Field-Effect Transistor*) în tehnologia MOS
 - **Poartă de control** (PC) obișnuită
 - **Poartă flotantă** (PF) suplimentară

Principiul de funcționare (2)



Principiul de funcționare (3)

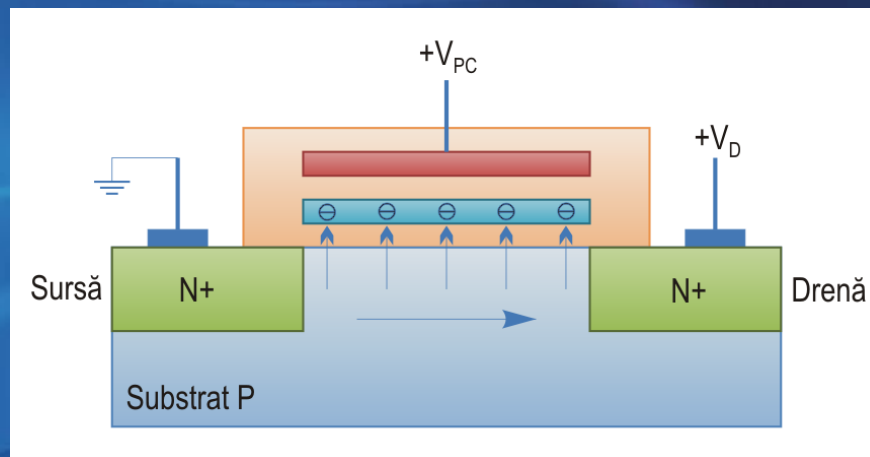
- **Funcționarea:** bazată pe acumularea sau eliminarea sarcinilor electrice pe/de pe PF
 - Prezența sarcinilor: anulează câmpul electric de la PC → crește tensiunea de prag a celulei
 - Valoarea binară memorată depinde de curentul detectat prin canalul tranzistorului
 - **Nu se detectează un curent:** valoarea 0 → PF s-a încărcat cu sarcini electrice
 - **Se detectează un curent:** valoarea 1 → sarcinile electrice au fost eliminate de pe PF

Principiul de funcționare (4)

- Două tipuri de celule
 - Cu un singur nivel (SLC – *Single-Level Cell*): celula memorează un singur bit
 - Cu nivele multiple (MLC – *Multi-Level Cell*): celula memorează mai mulți biți
- Arhitectura memoriilor *flash*
 - Modul de interconectare al celulelor
 - Compromis între dimensiunea celulei și viteza de funcționare
 - Cele mai utilizate arhitecturi: NOR și NAND

Principiul de funcționare (5)

- Considerăm o celulă de memorie NOR
- Scrierea
 - Starea implicită a unei celule: 1 logic
 - Prin scriere starea se modifică la 0 logic
 - Se aplică o tensiune de $\sim 12\text{ V}$ pe PC



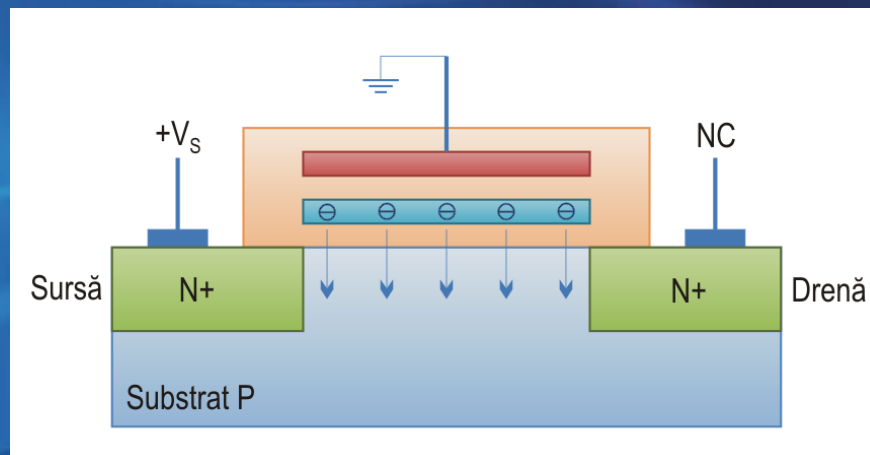
Principiul de funcționare (6)

- Electronii se deplasează de la sursă la drenă prin canalul tranzistorului
- Electronii pot depăși nivelul de energie necesar pentru trecerea peste stratul izolator
- **Injectarea electronilor**: se acumulează pe PF
- Dacă se elimină tensiunea de pe PC: starea celulei se păstrează
- Îndepărtarea electronilor de pe PF: prin ștergerea celulei

Principiul de funcționare (7)

• Ștergerea

- Resetarea la valoarea logică 1
- Se aplică o tensiune de $\sim 12\text{ V}$ pe sursă
- Electronii sunt îndepărtați de pe PF $\rightarrow$ **efectul de barieră Fowler-Nordheim**



Memorii *flash*

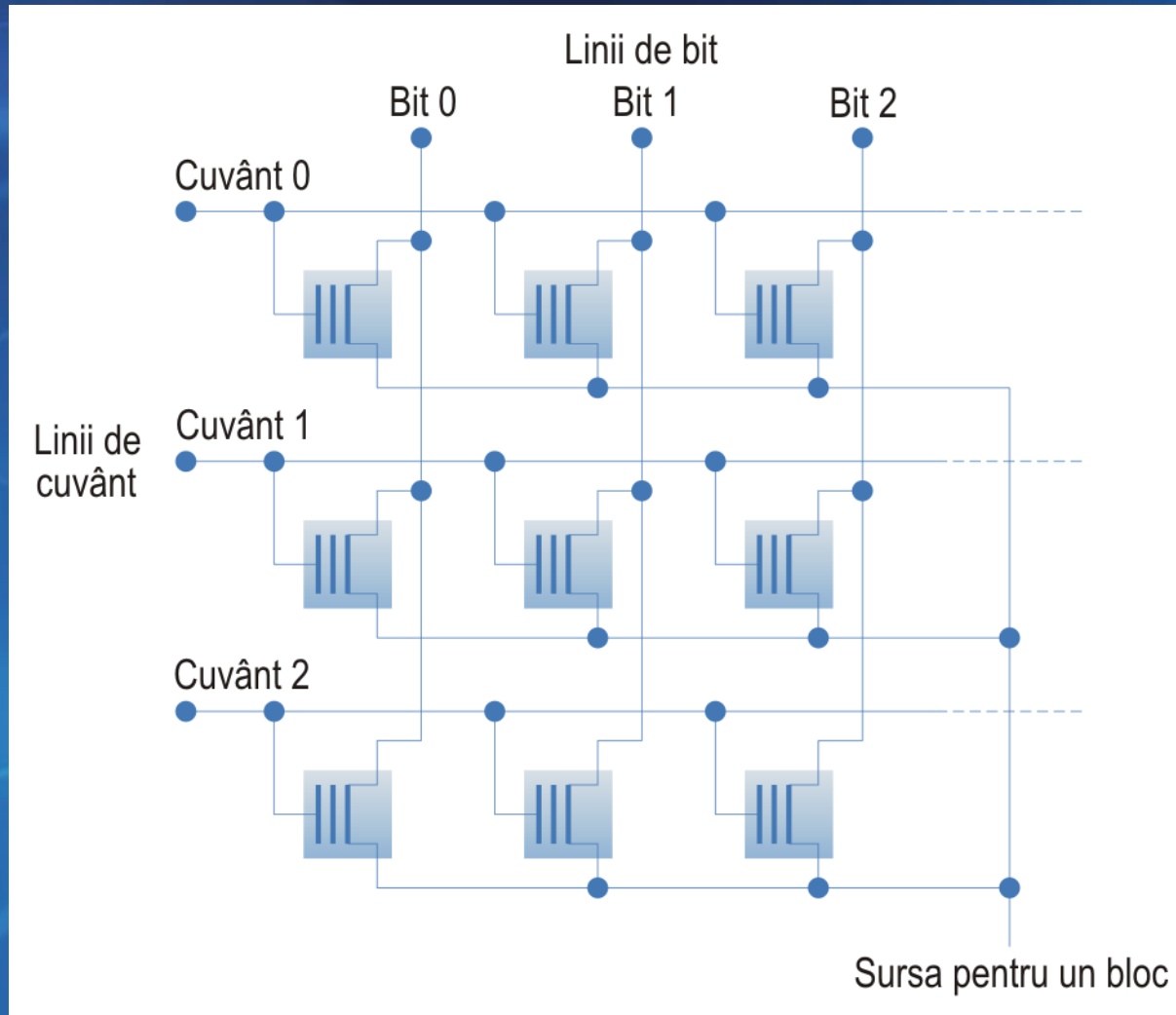
● Memorii *flash*

- Principiul de funcționare
- Arhitectura NOR
- Arhitectura NAND
- Sisteme de memorie NAND
- Formatul SSD
- Formatul SD
- Formatul e-MMC
- Formatul UFS

Arhitectura NOR (1)

- Concepută pentru înlocuirea memoriilor de program EPROM și EEPROM
- Pune la dispoziție magistrale complete de adrese și date → permite accesul aleatoriu
- Permite o densitate mai redusă a celulelor
 - Necesită câte un contact metalic la fiecare două celule
- Matrice de celule: linii de date (bit) → drene; linii de adrese (cuvânt) → PC

Arhitectura NOR (2)



Arhitectura NOR (3)

- **Accesul la citire:** aleatoriu
 - Programele se pot executa direct din memoria *flash*
- **Accesul la scriere:** aleatoriu
- **Accesul la ștergere:** la nivel de bloc
 - Dimensiuni tipice: 128 KB; 256 KB; 512 KB
- Scrierea și ștergerea sunt relativ lente
- Numărul ciclurilor de scriere/ștergere
 - SLC: 100.000 .. 1.000.000; MLC: ~100.000

Memorii *flash*

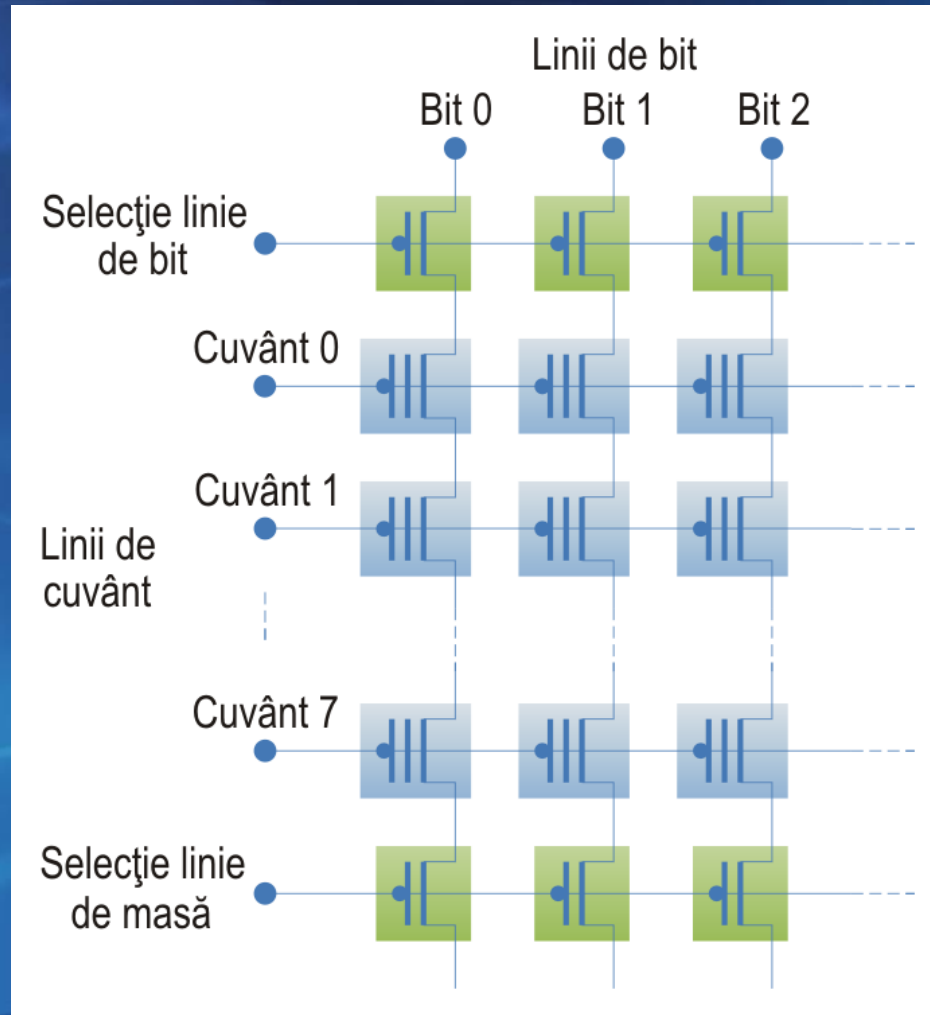
● Memorii *flash*

- Principiul de funcționare
- Arhitectura NOR
- Arhitectura NAND
- Sisteme de memorie NAND
- Formatul SSD
- Formatul SD
- Formatul e-MMC
- Formatul UFS

Arhitectura NAND (1)

- Concepută pentru înlocuirea memoriilor externe (de ex., discuri magnetice)
- Nu pune la dispoziție magistrale externe de adrese și de date
 - Se simplifică interconexiunile interne
 - Nu este posibil accesul aleatoriu
- Matrice de celule: conexiuni în serie
 - Crește densitatea celulelor
 - Accesul la celule este serial

Arhitectura NAND (2)



Arhitectura NAND (3)

- Creșterea suplimentară a densității: prin eliminarea magistralelor externe
 - Accesul la memorie: prin registre de comenzi și de date
- Blocurile sunt împărțite în **pagini**
 - Dimensiuni ale paginilor: 512 B; 2 KB; 4 KB
 - Fiecare pagină conține octeți suplimentari pentru un **cod corector de erori (ECC)**
 - Cod **ECC** tipic de 24 biți: corectează un bit eronat din 4096 de biți (512 B)

Arhitectura NAND (4)

- Accesul la citire, scriere: la nivel de pagină
- Accesul pentru ștergere: la nivel de bloc
- Numărul ciclurilor de scriere/ștergere
 - SLC: ~100.000; MLC: 5.000 .. 10.000
- Avantaje ale arhitecturii NAND:
 - Densitate și capacitate mai ridicată
 - Cost mai redus
 - Viteză mai ridicată a operațiilor de ștergere, citire secvențială și scriere secvențială

Memorii *flash*

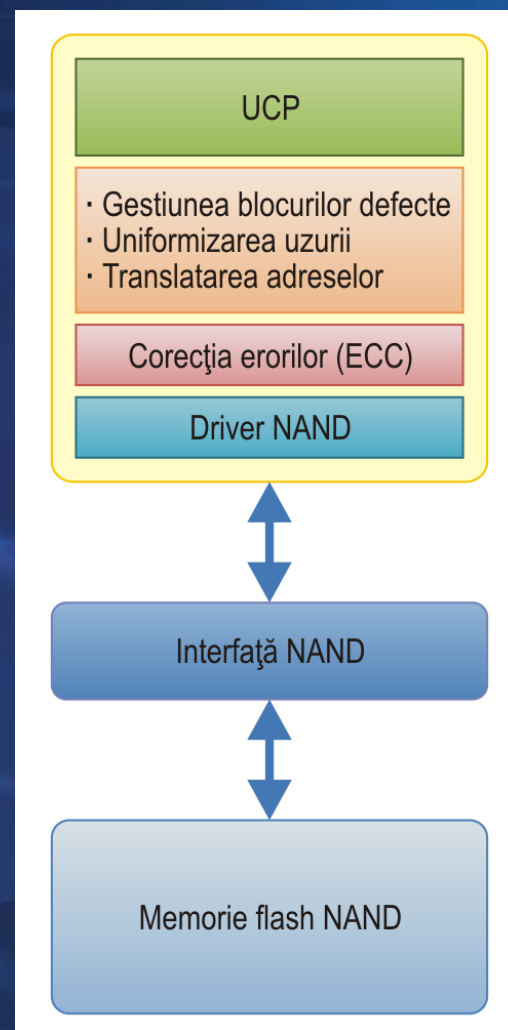
● Memorii *flash*

- Principiul de funcționare
- Arhitectura NOR
- Arhitectura NAND
- Sisteme de memorie NAND
- Formatul SSD
- Formatul SD
- Formatul e-MMC
- Formatul UFS

Sisteme de memorie NAND (1)

● Structura generală

- Circuite de memorie NAND (SLC, MLC)
- Interfață cu circuitele de memorie NAND
- Driver pentru circuite de memorie NAND
- Module software pentru gestiunea memoriei



Sisteme de memorie NAND (2)

- Gestiunea blocurilor defecte
 - Memoriile NAND pot conține blocuri defecte
 - Blocurile defecte sunt marcate
 - La formatarea memoriei (de producător) se rezervă un număr de blocuri
 - Dacă apare o eroare la scriere sau ștergere, blocul este marcat ca fiind defect
 - Datele din blocul defect sunt mutate într-un bloc de rezervă

Sisteme de memorie NAND (3)

- Uniformizarea uzurii (*wear leveling*)
 - Uzura memoriilor *flash*: apare din cauza degradării stratului de oxid dintre PF și PC
 - O parte din electroni rămân blocați în stratul de oxid → reduc câmpul electric la ștergere
 - Este necesară distribuirea uniformă a operațiilor de scriere/ștergere
 - Unul din blocuri este realizat cu o durată de viață extinsă → utilizat pentru evidența utilizării blocurilor

Sisteme de memorie NAND (4)

- Uniformizarea dinamică a uzurii
 - Utilizează **tabela de translatare a adreselor** logice în adresele fizice ale memoriei
 - La o nouă scriere, blocul fizic original este marcat invalid → se va utiliza un alt bloc
 - Sunt reutilizate doar blocurile cu conținut dinamic
- Uniformizarea statică a uzurii
 - Blocurile cu date statice sunt mutate periodic

Sisteme de memorie NAND (5)

- Factorul de amplificare a scrierii
 - Raportul dintre volumul datelor scrise efectiv în memoria *flash* și cel al datelor transmise pentru scriere
 - Scrierea într-un bloc care conține deja date: datele existente sunt copiate în memoria RAM și sunt combinate cu noile date
 - În unele cazuri, factorul de amplificare a scrierii poate avea valori ridicate (20 .. 30)

Sisteme de memorie NAND (6)

- Executarea programelor dintr-o memorie cu arhitectură NAND
 - Se utilizează tehnici ale memoriei virtuale
 - Se copiază pagini din memoria NAND în memoria RAM
 - Codul se execută în memoria RAM
 - Circuitul de memorie NAND poate conține o memorie RAM cu dimensiuni limitate

Sisteme de memorie NAND (7)

- Memorii NAND cu controler integrat
 - Controlerul implementează unele funcții executate de UCP (de ex., corecția erorilor)
 - Exemplu: **SmartNAND** (Toshiba)
 - Avantaj: memoriile NAND **MLC** pot fi utilizate cu procesoare de uz general, care nu dispun de module hardware **ECC**
- Interfața cu circuitele de memorie
 - Este standardizată de grupul de lucru **ONFI** (*Open NAND Flash Interface*)



Sisteme de memorie NAND (8)

- Specifică **interfața fizică** pentru circuite de memorie NAND în diferite capsule
- Definește **interfețele electrice**: asincronă (**SDR**) și sincrone (**NV-DDR, NV-DDR2/DDR3**)
- Definește un **set standard de comenzi** pentru citire, scriere și ștergere
- Definește un mecanism pentru citirea caracteristicilor memoriei
- Versiunea curentă: 4.2 (febr. 2020)
- Rate de transfer de până la 1600 MT/s

Memorii *flash*

● Memorii *flash*

- Principiul de funcționare
- Arhitectura NOR
- Arhitectura NAND
- Sisteme de memorie NAND
- Formatul SSD
- Formatul SD
- Formatul e-MMC
- Formatul UFS

Formatul SSD (1)

- **SSD** – *Solid-State Drive*
- Poate utiliza interfețe compatibile cu unitățile de discuri magnetice
- De obicei, conține memorii *flash* **NAND**
 - Mai multe circuite de memorie → funcționează în paralel
 - Rata de transfer este mărită
 - Întârzierile relativ mari la execuția operațiilor sunt ascunse

Formatul SSD (2)

● Buffer

- Realizat cu o memorie DRAM
- Utilizat ca o memorie *cache* rapidă

● Baterie sau condensator

- Permite salvarea datelor din buffer la întreruperea tensiunii de alimentare

● Controler

- Corecția erorilor (cod **ECC**), uniformizarea uzurii, gestiunea blocurilor defecte

● Interfața

- **SATA** (*Serial ATA*), **USB**, **PCI Express**

Formatul SSD (3)

- **NVMe** (*Non-Volatile Memory Express*) 
- Protocol de interfață bazat pe standarde deschise elaborate de NVM Express, Inc. (nvmexpress.org)
- Versiunea curentă: 1.4b (sept. 2020)
- Dedicat pentru accesul la memoriile nevolatile semiconductoare prin magistrala **PCI Express**
- Adaptat la caracteristicile memoriilor NVM: latența redusă și paralelismul intern
- Utilizează 65.535 de cozi pentru comenzi
- Unități SSD: plăci de extensie PCI Express sau unități de 2,5" atașate printr-un conector (U.2)

Formatul SSD (4)

- **Avantaje** față de unitățile de discuri magnetice
 - **Timp de acces** mult mai redus: 0,1 ms (unități de discuri HDD: 3..12 ms)
 - **Rata de transfer** ridicată: 100..600 MB/s (PC), 6..7 GB/s (servere) (HDD: ~140 MB/s)
 - Rezistență la șocuri și vibrații
- **Dezavantaj**
 - Cost mai ridicat

Formatul SSD (5)

- Exemplu de unitate SSD
 - Samsung 980 PRO
 - Citire/scriere secvențială: 7.000 / 5.000 MB/s
 - Citire/scriere aleatorie (4 KB): 1.000.000 / 1.000.000 **IOPS** (*Inputs/Outputs Per Second*)



Memorii *flash*

● Memorii *flash*

- Principiul de funcționare
- Arhitectura NOR
- Arhitectura NAND
- Sisteme de memorie NAND
- Formatul SSD
- Formatul SD
- Formatul e-MMC
- Formatul UFS

Formatul SD (1)

- **SD** – *Secure Digital*
- Format creat de firmele Matsushita, SanDisk și Toshiba
- Standarde actualizate de asociația SDA (SD Card Association, www.sdcard.org)
- **Familii:** SDSC, SDHC, SDXC, SDUC, SDIO
- **Dimensiuni:** standard, mini, micro
- Facilitate de protecție a conținutului
 - Zonă protejată: ~10% din capacitate



Formatul SD (2)

- **SD** sau **SDSC** (SD Standard Capacity)
 - Capacitate: până la 2 GB
 - Sistem de fișiere **FAT16**
- **SDHC** (SD High Capacity)
 - Capacitate: între 2 GB și 32 GB
 - Sistem de fișiere **FAT32**
- **SDXC** (SD eXtended Capacity)
 - Capacitate: între 32 GB și 2 TB
 - Sistem de fișiere **exFAT** (Microsoft)



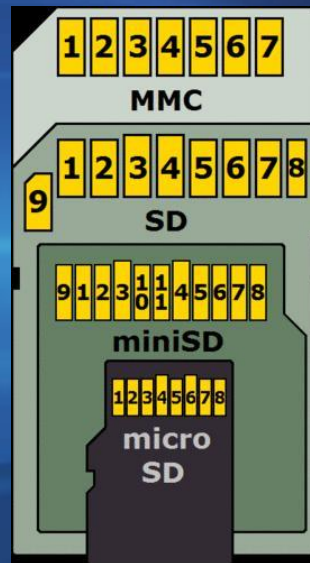
Formatul SD (3)



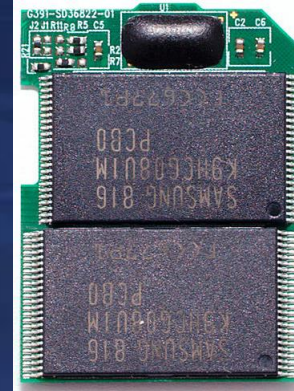
- **SDUC** (SD Ultra Capacity)
 - Capacitate: între 2 TB și 128 TB
 - Sistem de fișiere **exFAT** (Microsoft)
- **SDIO** (SD Input Output)
 - Extensie **SD** cu funcții de I/E
 - Se utilizează conectorul **SD** pentru interfețe (Wi-Fi, Bluetooth), receptoare GPS, aparate de fotografiat digitale, tunere TV etc.

Formatul SD (4)

- Dimensiuni
 - **Standard**: 32 x 24 x 2,1 mm
 - **Mini**: 20 x 21,5 x 1,4 mm
 - **Micro**: 11 x 15 x 1 mm
 - **SDXC, SDUC**: doar standard și micro



Formatul SD (5)



- Moduri de transfer
 - Magistrala SPI (*Serial Peripheral Interface*)
 - Magistrala SD, 1 bit: o linie pentru comenzi, o linie pentru date
 - Magistrala SD, 4 biți: o linie pentru comenzi, patru linii pentru date

Formatul SD (6)

● Interfața

- Interfață serială sincronă: calculatorul sau dispozitivul gazdă furnizează un semnal de ceas
- Comenzi de 48 de biți
 - Determinarea tipului, a capacității și a posibilităților cartelei SD
 - Utilizarea tensiunii de 1,8 V (SDHC, SDXC, SDUC)
 - Utilizarea unei frecvențe de ceas mai ridicate
 - Citirea sau scrierea unui bloc

Formatul SD (7)

- Viteza interfeței

- Viteza implicită: 12,5 MB/s (toate familiile)
- HS (*High Speed*): 25 MB/s (toate familiile)
- UHS-I (*Ultra High Speed-I*): 50 sau 104 MB/s (SDHC, SDXC, SDUC) 
- UHS-II: 156 sau 312 MB/s (SDHC, SDXC, SDUC) 
- UHS-III: 312 sau 624 MB/s (SDHC, SDXC, SDUC) 
- SD Express: 985, 1969 sau 3938 MB/s 

- Viteza operațiilor de citire/scriere

- Depinde de: frecvența erorilor; factorul de amplificare a scrierii; necesitatea ștergerii

Formatul SD (8)

- **Clasa de viteză:** indică viteza minimă (MB/s) la operațiile secvențiale de scriere
- Clase standard: **C2; C4; C6; C10**    
- Clase UHS: **U1** (10 MB/s); **U3** (30 MB/s)  
- Clase video:
 - **V6; V10** (definiție standard – SD)  
 - **V30** (HD; 24, 25, 30, 50, sau 60 cadre/s) 
 - **V60** (UHD 4K; 60 sau 120 cadre/s) 
 - **V90** (UHD 8K; 60 sau 120 cadre/s) 

Formatul SD (9)

- Clasa de performanță pentru rularea aplicațiilor indică:
 - Viteza minimă la operațiile aleatorii de citire și scriere în operații de I/E pe secundă (IOPS)
 - Viteza minimă la operațiile secvențiale de scriere (MB/s)
- Clasa **A1**: 1500 IOPS (R, aleatorie); 500 IOPS (W, aleatorie); 10 MB/s (W, secvențială) **A1**
- Clasa **A2**: 4000 IOPS (R, aleatorie); 2000 IOPS (W, aleatorie); 10 MB/s (W, secvențială) **A2**

Memorii *flash*

● Memorii *flash*

- Principiul de funcționare
- Arhitectura NOR
- Arhitectura NAND
- Sisteme de memorie NAND
- Formatul SD
- Formatul SSD
- Formatul e-MMC
- Formatul UFS

Formatul e·MMC (1)

- e·MMC – *Embedded MultiMediaCard*
- Format dezvoltat inițial de firmele Siemens și SanDisk
- Standard actualizat de organizația JEDEC
 - Versiunea curentă: 5.1A (ian. 2019)
- Memorii *flash* MLC NAND și un controler într-o capsulă BGA (*Ball Grid Array*)
- Utilizare: tablete, telefoane inteligente, dispozitive ale electronicii de consum

Formatul e-MMC (2)

- Interfața și protocolul de comenzi **HS-MMC** (*High Speed MultiMediaCard*)
 - Comenzi de nivel înalt
- Este disponibil un mod de transfer **DDR** (*Double Data Rate*), începând cu vers. 4.4
- Rate de transfer: 52; 104; 200; 400 (MB/s)
- Toate operațiile specifice memoriei *flash* sunt executate de controlerul integrat
 - Corecția erorilor, uniformizarea uzurii etc.

Formatul e-MMC (3)

● Avantaje

- Procesorul gazdă nu trebuie să gestioneze operațiile primitive ale memoriei *flash*
- Se reduce costul sistemelor



Memorii *flash*

● Memorii *flash*

- Principiul de funcționare
- Arhitectura NOR
- Arhitectura NAND
- Sisteme de memorie NAND
- Formatul SD
- Formatul SSD
- Formatul e-MMC
- Formatul UFS

Formatul UFS (1)

- **UFS** – *Universal Flash Storage*
- Destinat înlocuirii formatelor **SD** și **e-MMC**
- Standard elaborat de comitetul JEDEC
 - Versiunea curentă: 3.1 (ian. 2020)
 - Include specificațiile **e-MMC** ca un subset
- Scopul: creșterea ratelor de transfer și a fiabilității memoriilor *flash*
- Utilizare: memorii înglobate în dispozitive mobile sau ca și cartele de extensie

Formatul UFS (2)

- Interfața electrică: tehnologia M-PHY
 - Dezvoltată de **MIPI Alliance** (*Mobile Industry Processor Interface Alliance*) 
 - Interfață serială duplex, diferențială
 - Informația de sincronizare este înglobată în semnalele de date → codificarea 8b/10b
 - Rate de transfer de peste 1000 Mbiți/s: 2,9 Gbiți/s; 5,8 Gbiți/s; 11,6 Gbiți/s pe canal
 - Moduri de comunicație cu consum redus de energie: 3 Mbiți/s .. 500 Mbiți/s

Formatul UFS (3)

● Cartele de extensie UFS

- Standard separat elaborat de comitetul JEDEC (*UFS Card Extension*)
- Versiunea curentă: 1.1 (ian. 2018)
- Primele cartele **UFS** au fost produse de Samsung Electronics (2016)
 - Capacități de până la 256 GB
 - Citire secvențială: 500 MB/s
 - Scriere secvențială: 200 MB/s
 - Citire aleatorie: 40.000 IOPS; scriere aleatorie: 35.000 IOPS



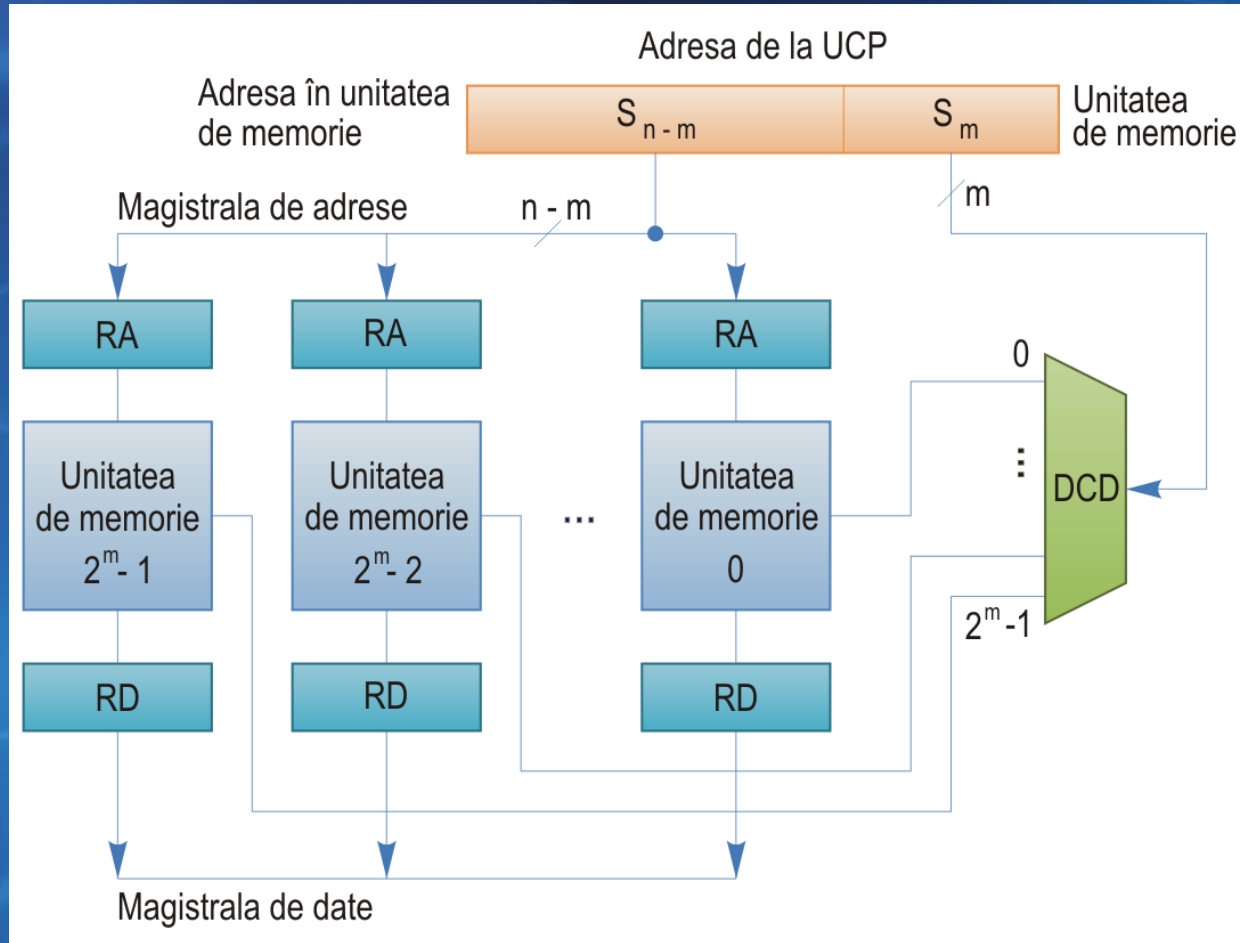
Sisteme de memorie

- Ierarhia memoriilor
- Tipuri de memorii
- Memorii semiconductoare
- Memoria cu unități multiple
- Memoria asociativă
- Memoria *cache*
- Memoria virtuală

Memoria cu unități multiple (1)

- Permite suprapunerea acceselor de citire sau de scriere a mai multor date
- O secvență de adrese consecutive este asignată unor unități consecutive de memorie
- **Exemplu:** Arhitectură pentru conectarea în paralel a 2^m unități de memorie
 - Cuvântul cu adresa i este asignat unității de memorie M_j , $j = i \bmod 2^m$

Memoria cu unități multiple (2)



Memoria cu unități multiple (3)

- Tehnica de distribuire a adreselor între mai multe unități: *intercalare a adreselor* de memorie (“*interleaving*”)
 - Intercalarea adreselor între 2^m unități de memorie → *intercalare cu 2^m căi*
- Eficiența unui sistem de memorie cu unități multiple: dependentă de ordinea în care sunt generate adresele de memorie

Rezumat (1)

- Funcționarea unei celule de memorie *flash* se bazează pe acumularea unor sarcini electrice pe o poartă flotantă și eliminarea acestora
- Cele mai utilizate arhitecturi de memorii *flash* sunt arhitectura **NOR** și arhitectura **NAND**
- Componentele unui sistem de memorie **NAND** sunt: circuitele de memorie, interfața cu circuitele, driverul și modulele software
 - Gestiunea blocurilor defecte și uniformizarea uzurii sunt operații importante

Rezumat (2)

- Memoria *flash* se utilizează în cartele de memorie și unități de discuri semiconductoare
 - Formatul **SSD**: alternativă la unitățile de discuri
 - Formatul **SD**: permite capacități ridicate (**SDXC**, **SDUC**) și operații cu viteze ridicate (**SD Express**)
 - Formatul **eMMC**: conține memorii *flash* **MLC** și un controler în aceeași capsulă
 - Formatul **UFS**: permite creșterea ratelor de transfer și a fiabilității memoriilor *flash*
- Memoria cu unități multiple permite suprapunerea acceselor de citire și scriere

Noțiuni, cunoștințe (1)

- Principiul de funcționare al unei celule de memorie *flash*
- Operațiile de scriere și ștergere ale unei celule de memorie NOR
- Arhitectura NOR a memoriilor *flash*
- Arhitectura NAND a memoriilor *flash*
- Structura generală a unui sistem de memorie NAND
- Metode pentru uniformizarea uzurii

Noțiuni, cunoștințe (2)

- Interfața cu circuitele de memorie
- Caracteristici ale formatului SSD
- Familii de cartele de memorie SD
- Interfața cartelelor de memorie SD
- Caracteristici ale formatului eMMC
- Caracteristici ale formatului UFS
- Principiul și structura unei memorii cu unități multiple