

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO



Matej Mazij

PRIMERJAVA MAGNETNIH IN POLPREVODNIŠKIH DISKOV

DIPLOMSKO DELO
NA VISOKOŠOLSKEM STROKOVNEM ŠTUDIJU

Mentor: pred. mag. Igor Škraba
Ljubljana, 2010



Št. naloge: 00500/2010

Datum: 15.03.2010

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Kandidat: **MATEJ MAZIJ**

Naslov: **PRIMERJAVA MAGNETNIH IN POLPREVODNIŠKIH DISKOV**
COMPARISON OF MAGNETIC DISK DRIVES AND SOLID STATE
DRIVES

Vrsta naloge: Diplomsko delo visokošolskega strokovnega študija

Tematika naloge:

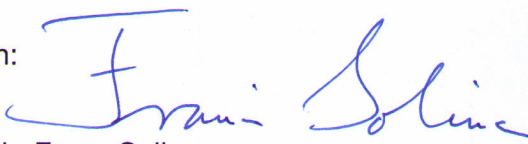
V nalogi opišite zgradbo in delovanje magnetnih in polprevodniških diskov. Na osnovi primerjalnih testov ocenite prednosti in slabosti obeh vrst pogonov.

Mentor:


pred. mag. Igor Škraba



Dekan:


prof. dr. Franc Solina

Rezultati diplomskega dela so intelektualna lastnina Fakultete za računalništvo in informatiko Univerze v Ljubljani. Za objavljanje ali izkoriščanje diplomskega dela je potrebno pisno soglasje Fakultete za računalništvo in informatiko ter mentorja.

IZJAVA O AVTORSTVU

diplomskega dela

Spodaj podpisani/-a Matej Mazij,
z vpisno številko 63010239,

sem avtor/-ica diplomskega dela z naslovom:
Primerjava magnetnih in polprevodniških diskov

S svojim podpisom zagotavljam, da:

- sem diplomsko delo izdelal/-a samostojno pod mentorstvom (naziv, ime in priimek)
pred. mag. Igorja Škrabe
- so elektronska oblika diplomskega dela, naslov (slov., angl.), povzetek (slov., angl.) ter
ključne besede (slov., angl.) identični s tiskano obliko diplomskega dela
- soglašam z javno objavo elektronske oblike diplomskega dela v zbirki »Dela FRI«.

V Ljubljani, dne 17. maj 2010

Podpis avtorja/-ice:

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorju, pred. mag. Igorju Škrabi za pomoč in vodenje pri izdelavi diplomske naloge.

Posebna zahvala gre tudi moji ženi in staršem, ki so me podpirali skozi vsa ta leta študija.

KAZALO

1	UVOD	1
2	POMNILNIK	2
3	LASTNOSTI POMNILNIKA	3
4	POMOŽNI POMNILNIK – MAGNETNI DISK	6
4.1	ZGODOVINA RAZVOJA MAGNETNIH DISKOV	6
4.2	ZGRADBA IN DELOVANJE	8
4.3	BRALO-PISALNA GLAVA	13
4.4	LASTNOSTI MAGNETNEGA DISKA	17
4.5	SLABOSTI MAGNETNIH DISKOV	17
4.6	ZELENI MAGNETNI DISKI	18
4.7	HIBRIDNI MAGNETNI DISKI	18
5	SSD - SOLID STATE DISK (DISKI BREZ GIBLJIVIH DELOV)	19
5.1	TEHNOLOGIJA POLPREVODNIŠKIH POMNILNIKOV	20
5.1.1	Osnovni gradniki	22
5.1.2	Lastnosti silicijevega oksida	25
5.1.3	Velikost tranzistorjev	25
5.1.4	Pomnilniška celica	26
5.1.5	Bralni pomnilnik – ROM	26
5.1.6	Pomnilnik EPROM	27
5.1.7	Pomnilnik EEPROM	28
5.1.8	Flash (bliskovni) pomnilnik	29
5.1.8.1	Digitalna logična vrata NAND	32
5.1.8.2	MLC in SLC celica	33
5.1.8.3	Primer NAND bliskovnega pomnilnika	35
5.1.9	Dinamični bralno/pisalni pomnilniki – DRAM	36
5.1.10	Statični bralno/pisalni pomnilnik – SRAM	42
5.2	PREDNOSTI POGONOV SSD	42
5.3	SLABOSTI POGONOV SSD	43
6	PRIMERJALNI TEST MAGNETNEGA DISKA IN POGONA SSD ...	45
7	VPLIV SSD POGONOV NA MICROSOFT SQL SERVER 2008	46
7.1	SPECIFIKACIJA UPORABLJENE STROJNE OPREME	48
7.2	REZULTATI TESTIRANJ	49
7.3	PORABA ENERGIJE	51

8	KAJ SLEDI PO POGONIH SSD?	52
8.1	NANOTEGNOLOGIJA.....	52
8.2	ARHITEKTURA PREČK.....	53
8.3	GOSTOTA ZA LETO 2018	54
8.4	NA PRAGU NANOČUDES	55
9	ZAKLJUČEK.....	56
10	LITERATURA	57

SEZNAM UPORABLJENIH KRATIC

- **ATA** (ang. Advanced Technology Attachment) je oznaka za standardni paralelni vmesnik, ki omogoča komuniciranje s krmilnikom diska. Imenujemo ga tudi zunanji vmesnik.
- **BER** (angl. Bit Error Rate) število napačno prebranih bitov glede na celotno število prebranih bitov (npr. $10^{-12} = 1$ napačno prebran bit pri 10^{12} prebranih bitov)
- **BIOS** (ang. Basic Input Output System) je programska oprema, ki se nahaja v ROMu in se izvede takoj po vklopu računalnika. Omogoča nastavitve osnovnih parametrov strojne opreme in njeno testiranje ter nalaganje operacijskega sistema ali zagonskega nalagalnika.
- **CDF** (angl. Cumulative Distribution Function) je statistična funkcija, ki se uporablja pri meritvah zanesljivosti trdega diska.
- **CMOS** (angl. Complementary Metal Oxide Semiconductor) je tehnologija za izgradnjo integriranega vezja. Uporablja se pri mikroprocesorjih, mikrokontrolerjih, RAM-ih in drugih digitalnih in analognih vezjih.
- **CPE** (slo. Centralno Procesna Enota, ang. Central Processing Unit) je osrednji del računalnika, ki obdeluje (procesira) podatke ter nadzoruje in upravlja ostale enote in je izveden v enem samem integriranem vezju (čipu).
- **CRC** (angl. Cyclic Redundancy Check) dodatni biti za detekcijo in korekcijo napak pri branju, ki se izračunajo pri vsakem pisanju iz vsebine podatkovnega zapisa.
- **ECC** (angl. Error Correcting Codes) so biti za detekcijo in korekcijo napak, ki se izračunajo pri vsakem pisanju iz vsebine podatkovnega zapisa.
- **EEPROM** (angl. Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) je vrsta bralnega pomnilnika, ki omogoča večkratno vpis podatkov in njihovo obstojnost po odklopu vira energije.
- **N in P MOS** (angl. Metal Oxide Semiconductor) tranzistor, ki se uporablja v digitalnih in analognih vezjih. Poznamo unipolarne in bipolarne MOS tranzistorje. Unipolarni MOS tranzistorji so glede na vrsto prevodnega kanala lahko N ali P tipa..
- **MTBF** (angl. Mean Time Between Failures) Povprečni čas med dvema napakama.

- **MLC** (angl. Multi Level Cell) je več-nivojska celica, ki zmore v eno celico, ob pomoči različnih nivojev električnega naboja, zapisati več kot en bit podatkov. Najpogosteje dva bita na celico.
- **NAND** (negirani IN) je logična funkcija (operacija), ki je funkcionalno polna in s pomočjo katere je možno realizirati katerokoli drugo logično funkcijo.
- **NRRO** (angl. Non-Repeatable Runout) povezujemo z nenatančnostjo ležajev pri magnetnem disku, kar ima za posledico premik osi in s tem plošč pri njihovem vrtenju. Ti premiki so znani kot NRRO.
- **RAID** (angl. Redundant Array of Inexpensive Disks ali Redundant Array of Independent Disks) je tehnologija povezovanja diskov in upravljanja z njimi. Nastala je z namenom, da bi lahko več manjših in počasnejših posameznih fizičnih diskov povezali v večjo in hitrejšo ter bolj zanesljivo logično enoto.
- **RAM** (angl. Random Access Memory) imenujemo bralno-pisalni pomnilnik, pri katerih ob normalni uporabi z enako lahkoto beremo in pišemo. Po odklopu vira energije se vsebina izgubi.
 - **DRAM** (angl. Dynamic Random Access Memory) in
 - **SRAM** (angl. Static Random Access Memory) sta tipa polprevodniškega pomnilnika, kjer je možno večkratno pisanje in brisanje vsebine.
- **ROM** (angl. Read Only Memory) imenujemo bralni pomnilnik, pri katerem pisalno operacijo lahko izvršimo samo enkrat. Ko je informacija vpisna, je ne moremo več spreminjati. Njihova pomembna lastnost je obstojnost shranjene vsebine tudi po odklopu vira energije.
 - **PROM** (angl. Programmable Read Only Memory) omogoča enkratno zapisovanje podatkov (podobno kot CD-R).
 - **EPROM** (angl. Erasable Programmable Read Only Memory) omogoča večkratno zapis podatkov (kot CD-RW). Vsebino brišemo z ultravijolično svetlobo (na vrhu je značilno okence).
 - **EEPROM** (angl. Electrically Erasable Programmable Read Only Memory) je vrsta pomnilnika EPROM. Brišemo z električnim signalom (močen električni sunek) in ponovno vpisujemo. Brisanje je mnogo hitrejšo kot pri EPROM. Možno je izbrisati samo del vsebine EEPROMa.
- **SATA** (ang. Serial ATA) je oznaka standardni vmesnik za serijsko povezavo, ki omogoča komuniciranje s krmilnikom diska. Imenujemo ga tudi zunanji vmesnik.

- **SCSI** (ang. Small Computer System Interface) je eden izmed standardov za paralelno komunikacijo s krmilnikom diska. Imenujemo ga tudi zunanji vmesnik.
- **SLC** (angl. Single Level Cell) je eno-nivojska celica, ki shrani po en bit (0 ali 1) podatkov na celico in s tem zagotovi hitrejšo prenoso, manjšo porabo energije in daljšo življenjsko dobo celice.
- **SSD** (angl. Solid State Disk) je pogon, ki je v celoti sestavljen iz flash (bliskovnega) pomnilnika. Že dalj časa poznamo iz pomnilniških ključev USB ali pomnilniških kartic.
- **TPI** (angl. Tracks Per Inch) je enota, za gostoto sledi pri magnetnem disku.
- **TMR** (angl. Track Miss Registration) v povezavi z NRRO oznaka za napačno pozicioniranje bralo-pisalne glave na sredino sledi pri magnetnem disku.
- **USB** (angl. Universal Serial Bus) je serijsko vodilo, namenjeno priklopu različnih perifernih naprav na računalnik.
- **UV** (ultravijolično valovanje) je elektromagnetno valovanje z valovno dolžino krajšo od valovne dolžine vidne svetlobe, vendar daljšo od valovne dolžine rentgenskih žarkov.

POVZETEK

Osnovna in najvažnejša funkcija računalnika je, da lahko z njim obdelujemo podatke, ter jih vanj tudi shranimo. To je del računalnika, v katerem so informacije shranjene in ga v splošnem imenujemo diskovna enota.

Diskovna enota je lahko magnetni disk, ki je sestavljen iz več okroglih kovinskih plošč, v zadnjem času vse pogostejše steklenih ali keramičnih, z magnetno zapisovalno površino. Vsaka površina ima svojo bralno-pisalno glavo. To je navitje, ki lahko magneti površino diska (pisanje) ali pa ugotavlja namagnetenost - magnetorezistivni senzor (branje). Zapisovanje na magnetni medij poteka tako, da se informacija shrani v obliki področij z različno smerjo namagnetenosti.

Povsem drugačna enota za shranjevanje, ki se vse bolj uveljavila, je pogon s tako imenovano tehnologijo trdnih materialov (solid state technology) oziroma pogon SSD - Solid State Disk (disk brez gibljivih delov). Večina podjetji pogone SSD sestavlja iz flash (bliskovnega) pomnilnika NAND (negirani IN je logična funkcija (operacija)), ki ohrani podatke tudi po odklopu vira energije, in pomnilnika DRAM, ki služi kot predpomnilnik.

Flash tehnologija NAND, shranjuje podatke v vrsto (polje) pomnilnih celic. Glede na to, koliko bitov lahko posamezna celica shrani, ločimo tako imenovane MLC (Multi Level Cell) in SLC (Single Level Cell) pomnilne celice. Več-nivojska celica (MLC) zmore v eno celico ob pomoči različnih nivojev električnega naboja zapisati več kot en bit podatkov. Eno-nivojska celica (SLC) shrani le en bit (0 ali 1) podatkov na celico in s tem zagotovi hitrejši prenos, manjšo porabo energije in daljšo življenjsko dobo celice.

Ključne besede:

Magnetni disk: plošče, bralno-pisalna glava, smer namagnetenosti

Pogon SSD: tehnologija trdnih materialov, pomnilniška celica in gradniki

ABSTRACT

The basic and most important function of a computer is that it can be used to process and storage data. The part of the computer where information is stored is generally known as hard disk unit.

Hard disk unit may be a magnetic disk, which is composed of several round metal plates, and is recently often composed of glass or ceramic, with the magnetic recording surface. Each plate has its own read-write heads. This is the coil magnet that can drive the surface (write) or magnetic sensor (reading). In magnetic media recording the information is stored in the form of areas with different magnetic pole direction.

The entirely different storage unit, which is becoming more effective, is the drive with a so-called solid state technology or the SSD drive – Solid State Disk (no moving parts). SSD drives from most companies consist of NAND flash memory which retains data even after turning off the power supply and DRAM, which is used as a cache.

NAND flash technology stores data in the sets (fields) of memory cells. Based on how many bites can be stored in each cell, we divide memory cells into two kinds: MLC (Multi Level Cell) and SLC (Single Level Cell). With the help of different electric change levels, a MLC cell can write more than one bite of information. SLC cell stores only one bit (0 or 1) of data per cell and thus provides faster transmission, lower energy consumption and longer cell lifetime. SLC cell is 10 times more reliable than the MLC cell.

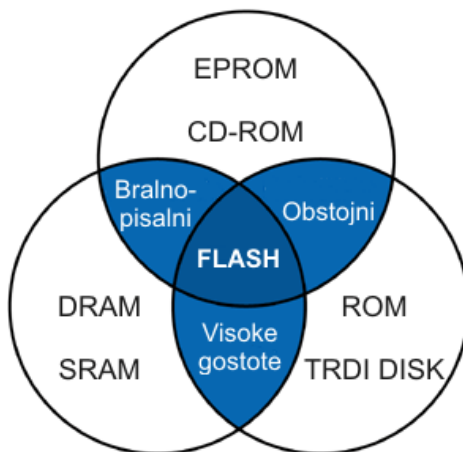
Key words:

Magnetic disk: plates, read-write heads, magnetic pole direction

SSD drive: solid state technology, memory cells and parts

1 UVOD

Računalniški sistemi so sestavljeni iz velikega števila komponent (zaslonov, vhodno izhodnih naprav, programske opreme, najrazličnejših tiskanih vezij, procesorjev in seveda pomnilnikov). Pod pojmom pomnilnik v računalništvu razumemo napravo, ki je sposobna pod določenimi pogoji hraniti ukaze in operande. S pojmom pomnilnik zajemamo širok spekter gradnikov in tehnologij. Razvrstitev pomnilnikov glede na njihove lastnosti in tehnologijo je prikazana na sliki 1.



Slika 1: Razvrstitev pomnilnikov glede na njihove lastnosti

Samo hranjenje podatkov nam ne omogoča pomnjenja. Če želimo neko informacijo pomniti, mora pomnilna naprava omogočati tudi komunikacijo. Da bi omogočili komuniciranje naprav različnih proizvajalcev med seboj, je potrebno definirati formaliziran način komunikacije. Naprave, ki se tega načina držijo, lahko komunicirajo med seboj. Zaradi morebitnega nadgrajevanja standardov komunikacije, je dobrodošla kompatibilnost navzdol. Gre za podpiranje starejših in novejših načinov komunikacije.

2 POMNILNIK

Z izrazom pomnilnik označujemo prostor, iz katerega centralno procesna enota (CPE) bere ukaze in operande in kamor shranjuje operande. Razvijalci se že od samega začetka trudijo, da bi bil ta prostor velik, dostop do njega pa hiter. Osnovna težava pri gradnji pomnilnika je, da si zahtevi po velikosti in hitrosti nasprotujeta (velikost zmanjšuje hitrost in obratno). Pri današnjih računalnikih imamo namesto enega pomnilnika opraviti z več-nivojsko pomnilniško hierarhijo. Ta obsega vse nivoje predpomnilnikov, glavni pomnilnik in navidezni pomnilnik. Gledano iz CPE je pomnilniška hierarhija videti kot en sam pomnilnik v smislu glavnega pomnilnika v Von Neumannovem računalniku.

Razlika med predpomnilnikom, glavnim in navideznim pomnilnikom je, da je celotna vsebina shranjena le v navideznem pomnilniku, ostali pa imajo le podmnožico te vsebine. Glavni pomnilnik je tisti, do katerega ima CPE neposredni dostop tako, da poda naslov pomnilniške besede. Pri navideznem pomnilniku je dostop posreden preko vhodno/izhodnih ukazov, ki prenesejo blok, ki vsebuje naslovljeno besedo v glavni pomnilnik.

Delitev pomnilnikov je znana že od prvih računalnikov dalje. V začetku je bil osnovni razlog za to delitev v tem, da z obstoječo tehnologijo ni bilo mogoče narediti glavnega pomnilnika, ki bi bil večji kot nekaj sto ali tisoč besed. Danes pa je glavni razlog predvsem ekonomski, ker je cena enega bita na navideznem pomnilniku 100-krat nižja kot cena v glavnem pomnilniku.

3 LASTNOSTI POMNILNIKA

Osnovna enota informacije je binarna številka imenovana bit (Binary Digit, kratica b), ki jo je leta 1947 predlagal John Wilder Tukey. Vsak bit lahko vsebuje eno od dveh vrednosti, ki ju običajno označujemo z 0 in 1. Fizično je en bit shranjen v eni pomnilniški celici, ki mora biti zgrajena tako, da je v vsakem trenutku v enem od dveh možnih stanj.

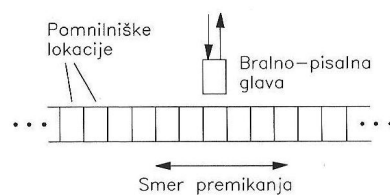
Cena pomnilnika se danes običajno podaja v dolarjih na Gigabajt (\$ / GB), kjer je $1 \text{ GB} = 2^{30}$ bajtov. Dobimo jo tako, da ceno celotnega pomnilnika delimo z njegovo velikostjo, merjeno v GB. K tej ceni moramo vključiti še ceno vse elektronike in mehanike, ki je potrebna za delovanje.

Hitrost dostopa ali zmogljivost nekega pomnilnika je določena s hitrostjo branja in pisanja informacije v pomnilnik. Kot mera za hitrost se uporablja povprečni čas ali čas dostopa (označujemo ga s t_a), ki je potreben za branje določene količine informacij (ene besede). Čas dostopa je odvisen od fizikalnih lastnosti pomnilniškega medija in od uporabljenega načina dostopa. To je čas, ki preteče od trenutka, ko pomnilnik dobi naslov, do trenutka, ko je zahtevana informacija prisotna na izhodu pomnilnika pri branju oziroma do trenutka, ko informacija na vhodu ni več potrebna pri pisanju. Poleg časa dostopa moramo upoštevati tudi čas cikla (označujemo ga s t_c), ki je enak $t_c = t_a + \text{čakanje}$. Gledano s strani naprave, ki bere ali piše v glavni pomnilnik, je k času dostopa in času cikla potrebno prišteti še čas potreben za prenos podatkov po podatkovnih poti (označujemo ga s t_p). Hitrost dostopa pa je enaka $b_a = 1/t_c$ in je definirana kot največje število prenesenih besed na sekundo

Način dostopa je zelo pomembna lastnost vsakega pomnilnika. Gre za način izbire pomnilniške besede, do katere se želi dostopati. Na tej osnovi se današnji pomnilniki delijo v dve skupini. V prvi skupini, ki je največja in se uporablja najbolj pogosto, je beseda podana z naslovom. Imenujemo jih navadni pomnilniki. Vsaka pomnilniška beseda ima svoj naslov, ki je nespremenljiv (ista beseda ima vedno isti naslov). Pri pomnilnikih iz druge skupine pa besede nimajo naslovov, dostop do njih poteka preko vsebine besede. Tem pomnilnikom pravimo asociativni pomnilniki.

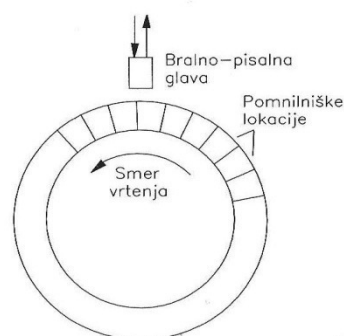
Navadne pomnilnike dalje delimo glede na odvisnost časa dostopa od vrstnega reda naslovov, do katerih se dostopa. Razlikujemo naslednje štiri načine:

1. **Naključni dostop** (random access). Pri tem načinu je čas dostopa do poljubne besede neodvisen od naslova pred tem naslovljenih besed (čas dostopa je konstanten in znan vnaprej). Tipični predstavnik je glavni pomnilnik (RAM – Random Access Memory).
2. **Zaporedni dostop** (serial access, slika 2) ali sekvenčni. Pri tem načinu je čas za dostop do neke besede odvisen od naslova besede, do katere je bil narejen dostop tik pred tem. Čas dostopa je močno odvisen od zaporedja naslovov. Tipična predstavnika sta magnetni trak in pomikalni register.



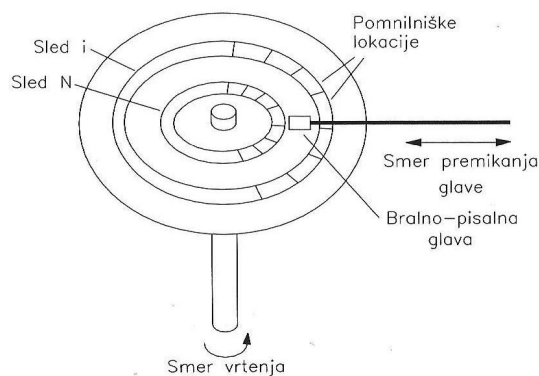
Slika 2: Zaporedni dostop (povzeto po [1])

3. **Krožni dostop** (rotational access, slika 3). To je posebna vrsta zaporednega dostopa. Predstavljamo si ga lahko kot magnetni trak zalepljen v zanko. Srečamo ga tudi pri magnetnih diskih s fiksno glavo. Povprečni čas dostopa je enak $1/2$ časa enega obrata.



Slika 3: Krožni dostop (povzeto po [1])

4. **Direktni dostop** (direct access, slika 4). Pri tem načinu gre za kombinacijo zaporednega in krožnega dostopa. Srečamo ga pri magnetnih in optičnih diskih s premično glavo. Deluje tako, da se bralno-pisalna glava najprej premakne na ustrezno sled (to je zaporedni dostop), nato pa imamo krožni dostop. Ker poteka premik glave preko sledi hitro, je povprečni čas dostopa (pri enaki velikosti pomnilnika) veliko krajši, kot pri zaporednem ali krožnem dostopu.



Slika 4: Direktni dostop (povzeto po [1])

Pri pomožnih pomnilnikih se uporablja skoraj izključno zaporedni ali direktni način dostopa. Vsi ostali pomnilniki v hierarhiji v večini primerov uporabljajo naključni dostop.

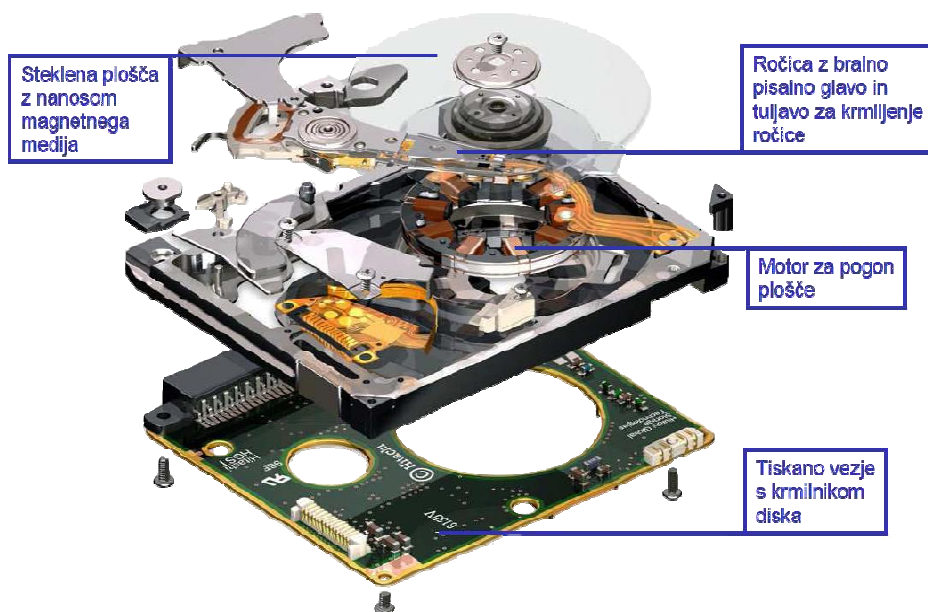
Spremenljivost je lastnost, ki se nanaša na vpis (spreminjanje) vsebine v pomnilnik. Pisalno operacijo lahko pri ROM (Read Only Memory) pomnilnikih izvršimo samo enkrat. Ko je informacija vpisana, je ne moremo več spreminjati. Njihova pomembna lastnost je obstojnost shranjene vsebine tudi po odklopu vira energije. Za RAM (Random Access Memory) pomnilnike to ne velja. Pomnilnike, pri katerih ob normalni uporabi z enako lahkoto beremo in pišemo, imenujemo bralno-pisalni pomnilniki.

Obstojnost lahko opišemo kot fizikalni pojav, ki se izkorišča za hranjenje informacije in je pogosto nestabilen. Shranjena informacija se lahko s časom izgubi, če tega z ustreznimi ukrepi ne preprečimo (z osveževanjem vsebine).

Zanesljivost je pomemben podatek, ki jo merimo z verjetnostjo za pojav napake. V splošnem imajo pomnilniki, ki so brez gibljivih delov, bistveno večjo zanesljivost kot pomnilniki z gibljivimi deli. Zanesljivost vsakega pomnilnika lahko povečamo z uporabo kod za detekcijo in korekcijo napak, ki jih imenujemo metabiti ali paritetni biti.

4 POMOŽNI POMNILNIK – MAGNETNI DISK

Magnetni disk je od leta 1950 naprej najpomembnejša vrsta pomožnega pomnilnika. Razlikujemo dve osnovni vrsti: Gibki disk (Floppy Disk), ki se vedno manj uporablja in trdi disk (Hard Disk, slika 5). Pri obeh imamo vrtečo ploščo, prevlečeno z magnetno snovjo. Za dostop do informacij se uporablja premična bralno-pisalna glava. Na disku shranjena informacija je obstojna tudi po odklopu vira energije.



Slika 5: Magnetni disk (povzeto po [2])

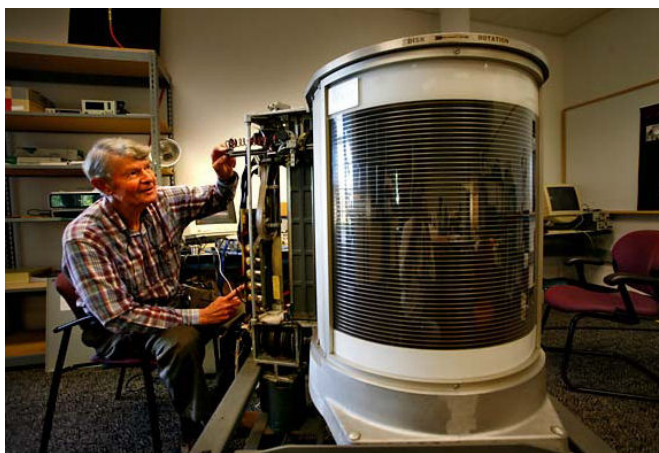
4.1 Zgodovina razvoja magnetnih diskov

Začetki magnetnega zapisovanja segajo v leto 1829, ko Hans Christian Orsted odkrije elektromagnetizem. Gre za odklanjanje magnetne igle v bližini tokovodnika oziroma zvezo med električnim tokom in magnetnimi pojavi.

Leta 1831 Michael Faraday zapiše indukcijski zakon, ki pravi: Če se sklenjena prevodna zanka nahaja v tujem elektromagnetnem polju in se magnetni pretok polja spremeni, se v tej zanki inducira električna napetost, ki je sorazmerna hitrosti spreminjanja pretoka.

Leta 1956 IBM predstavi prvi pomnilniški medij z vrtečimi magnetnimi ploščami, ki so ga kasneje poimenovali trdi disk. Prvi disk je tehtal skoraj tona, za tedanje čase pa je lahko hranil ogromno podatkov, 5 MB. V disku je bilo 50 plošč s premerom 24 palcev (1 palec je enak 0,0254 m), plošče prevlečene z magnetno snovjo pa so se vrtele s hitrostjo 1.200 vrtljajev na minuto.

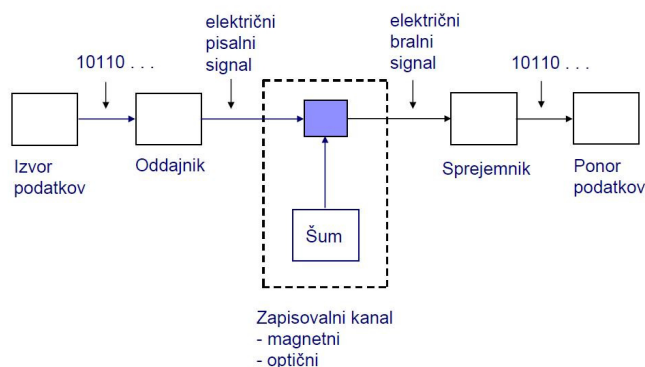
IBM-ova tedanja naprava je nosila ime RAMAC (Random Access Method of Accounting and Control, slika 6). V primerjavi s tedanjimi pomnilniškimi napravami je nudila pomembno novost. Vsak podatek je bil dosegljiv naključno, medtem ko so drugi nudili pretežno sekvenčni dostop.



Slika 6: Prvi magnetni disk imenovan RAMAC (povzeto po [4])

Leta 1980 je bil prav tako IBM prvi, ki je diske prinesel v svet osebnih računalnikov. Prvi diski za osebni računalnik je bil prav tako velik 5 MB, le da je bil v precej manjšem ohišju. Imel je premer 5,25 palcev.

Potek shranjevanja podatkov se vse do danes ni spremenil in je prikazan na sliki 7.



Slika 7: Teoretični model shranjevanja podatkov (povzeto po [2])

4.2 Zgradba in delovanje

Pri magnetnih diskih so plošče kovinske, v zadnjem času vse pogostejše steklene ali keramične, lahko jih je od 1 do 10. Vsaka od plošč ima dve površini (zgornja in spodnja), ki sta namenjeni shranjevanju podatkov in sta prevlečeni z magnetno snovjo.

Plošče z magnetno zapisovalno plastjo sestavlja več plasti:

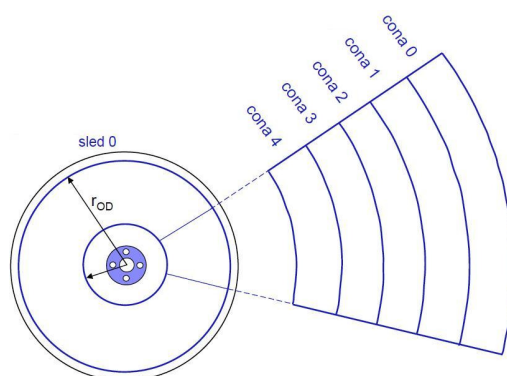
1. Mazivo (1 nm)
2. Ogljikova zaščita (od 5 do 10 nm)
3. Magnetna zapisovalna plast CoXY (9 nm): Co = kobalt, X = Pt – platina in Ta – tantal, Y = Cr – krom in Ni – nikelj
4. Rutenij (0,6 nm)
5. Mehko magnetna plast (4 nm)
6. Krom podloga (od 50 do 150 nm)
7. Steklo ali keramika (od 0,8 do 1 mm)

Plošče so nameščene na os diskovnega pogona, ki se med delovanjem vrti. Vrti se s konstantnim številom obratov, ki se pri današnjih diskih giblje med 5400 in 15000 obrati na minuto. Kotna hitrost je zato konstantna, obodna je večja na zunanjem robu plošče, na notranjem pa manjša. Za pogon se uporablja enosmerni motor brez krtačk. Os, na kateri so fiksno pritrjene plošče, je uležajena na obeh straneh.

Uporabljajo se lahko kroglični in tekočinski ležaji, v zadnjem času pa predvsem zračni ležaji, ki so tišji in omogočajo višje hitrosti in večje gostote zapisa. Nenatančnost ležajev povzroča pri vrtenju premike osi in s tem plošč. Ti premiki so znani kot NRRO (Non-Repeatable Runout), ki so tudi glavni vzrok napačnega pozicioniranja bralo-pisalne glave na sredino sledi (TMR – Track Miss Registration).

Vsaka površina je razdeljena na koncentrične krožnice, ki jim pravimo sledi. Število sledi na površini je med 5000 do 20000. Pri disku s premerom plošče 3,5 palca je dolžina zunanje sledi približno 11 palcev, dolžina notranje sledi pa samo 4,75 palcev. Če na vseh sledeh pišemo z enako hitrostjo (frekvenco ure), je dolžina posameznega zapisanega bita krajša na notranjih sledeh in daljša na zunanjih. Med sledmi imamo tudi tako imenovan zaščitni pas, ki je približno od 5 do 10 % razdalje med sledmi.

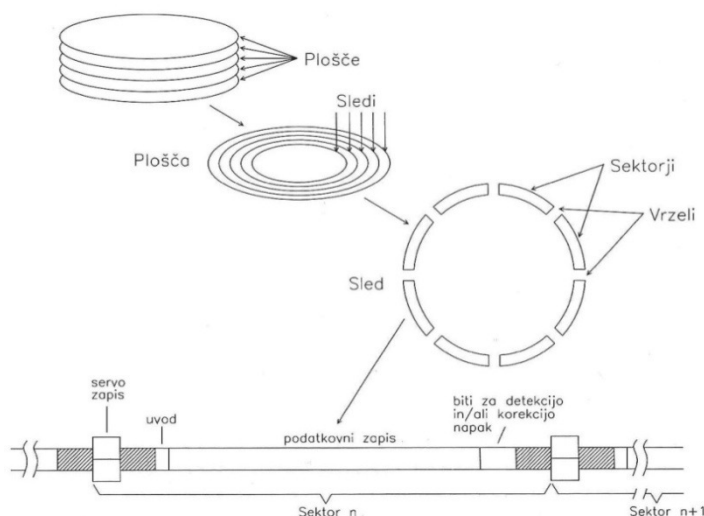
Da bi izkoristili daljše zunanje sledi so sledi na disku razporejene v več con. Hitrost zapisa je v vsaki coni drugačna, na isti pa enaka, zato je tudi število sektorjev na vseh sledeh v eni coni enako. Conski zapis (ZBR – Zone Bit Recording, slika 8) je način, ki se uporablja za povečanje gostote zapisa.



Slika 8: Conski zapis (povzeto po [2])

Vsaka sled je razdeljena na sektorje. Sektor je najmanjša enota, ki jo lahko beremo ali pišemo. Sektorjev na sledi je med 50 do 200. Ker so notranje sledi krajše od zunanjih, je število sektorjev v notranjih conah manjše. Najpogostejša velikost podatkovnega dela sektorja je 512 bajtov. Med sektorji so tako imenovane vrzeli, ki ločujejo sosednje zapise in vsebujejo servozapis. Potrebne so zato, ker zaradi nenatančnosti vrtenja ni mogoče zagotoviti, da se bo nek sektor vedno zapisal na isto mesto. Vsebina vrzeli ni definirana, ker so v njih ostanki prejšnjih pisanj.

Na sliki 9 je prikazana zgradba magnetnega diska (plošče, sledi, sektorji in vrzeli, servo zapis, uvod, podatkovni zapis in biti za detekcijo in korekcijo napak).



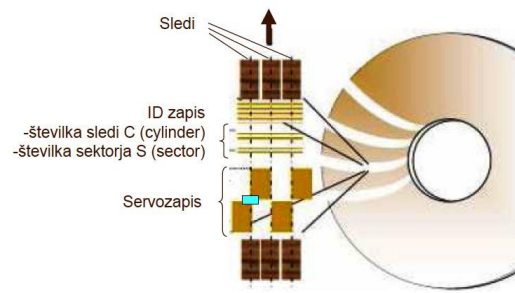
Slika 9: Zgradba magnetnega diska (povzeto po [1])

Da lahko shranjene podatke z diska zopet preberemo, morajo biti izpolnjeni naslednji pogoji:

- Možnost izbire poljubne sledi na disku s premikom bralno-pisane glave,
- preverjanje položaja bralno-pisalne glave,
- dobro definirana referenčna točka,
- možnost večkratnega pisanja vzdolž sledi,
- lociranje predhodno zapisanih zapisov in
- določanje začetka zapisa.

Število sektorjev in druge podrobnosti o zgradbi zapisov na sledi imenujemo format zapisa (slika 11). Sestavljajo ga štirje deli, ki se ponovijo pri vsakem sektorju:

1. **Servozapis** (slika 10) je zapis, iz katerega elektronika v disku dobi informacijo, s pomočjo katere postavi bralno-pisalno glavo točno na sredino sledi. Brez te informacije bi bilo zaradi zelo majhne razdalje med sledmi, ki pri današnjih diskih znaša manj kot 20 nm, nemogoče dovolj natančno pozicionirati glavo. Servozapis se nahaja na sledi in v prostoru med sledema in se v obliki loka razteza od notranje do zunanje sledi. Na zunanji sledi je daljši kot na notranji, ker je pisan z enako frekvenco.

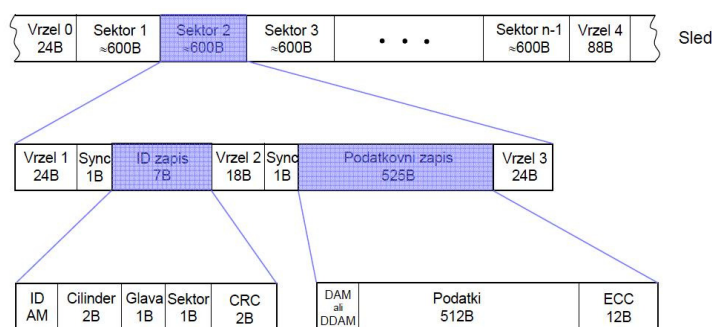


Slika 10: Servozapis (povzeto po [2])

Naredi se v tovarni pri izdelavi diska in ga kasneje ni mogoče spreminjati. Del servozapisa je tudi podatek o številki sledi in o številki sektorja. Slabost teh zapisov je, da zasedejo od 5 do 10% sledi in s tem zmanjšujejo prostor za shranjevanje podatkov.

Pozicioniranje bralno-pisalne glave na sled, pri kateri se uporablja servozapis, imenujemo tudi pozicioniranje s povratno zanko in zvočniško tuljavo. Pozicioniranje bralno-pisalne glave na sled je mogoča tudi brez povratne zanke (servozapisa) s koračnim motorjem, ki pa se uporablja samo do gostote sledi 500 tpi (tracks per inch), na primer pri disketah.

2. **Uvod** se pogosto imenuje tudi adresna marka in je enolična kombinacija bitov, ki določajo začetek zapisov v sektorju. Brez uvoda ne bi bilo mogoče ugotoviti, kje je prvi bit v podatkovnem zapisu shranjene informacije.
3. **Podatkovni zapis** je del sektorja, namenjen shranjevanju podatkov in je pri večini diskov dolg 512 bajtov. Vsak podatkovni zapis ima svoj naslov, ki je določen s številko sledi in številko sektorja. To je najmanjša enota, ki ima na disku svoj naslov.
4. **Biti za detekcijo in korekcijo napak** (CRC – Cyclic Redundancy Check in ECC – Error Correcting Codes) se izračunajo pri vsakem pisanju iz vsebine podatkovnega zapisa. Tipično jih je 64 ali 128. Ti biti se uporabljajo za detekcijo napak pri branju in po možnosti za njihovo popravljanje.



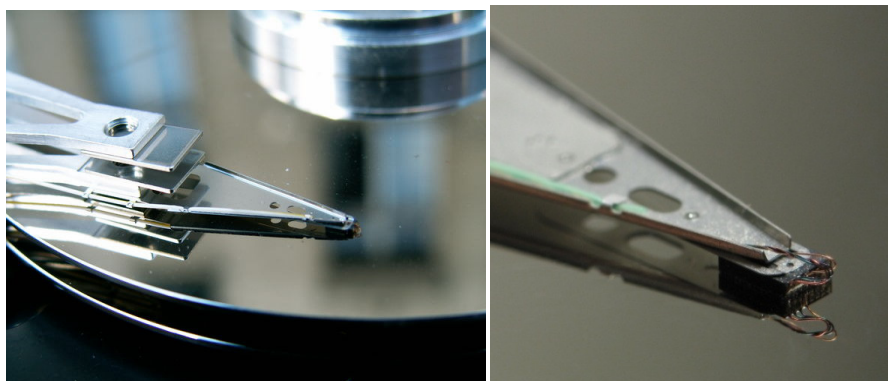
Slika 11: Primer formata zapisa (povzeto po [2])

Servozapis, uvod in biti za detekcijo in korekcijo napak so za uporabnika nevidni. Proizvajalci sploh ne navajajo podrobnosti o njihovi zgradbi. Za uporabnika je pomemben samo podatkovni zapis. Skupno število bajtov, ki se lahko shranijo v vse sektorje diska skupaj, imenujemo formatirana velikost diska. Neformatirana velikost je večja, saj vsebuje tudi ostale zgoraj omenjene podrobnosti diska.

Pri današnjih diskih se za dostop do nekega sektorja ne uporablja več naslov v obliki številke sledi in številke sektorja. Namesto tega se uporabljajo logični sektorji, ki so označeni s številko med 0 in številom sektorjev na disku. Vsaka številka logičnega sektorja se s pomočjo tabele, ki je del elektronike na disku, enolično preslika v številko površine, sledi in sektorja.

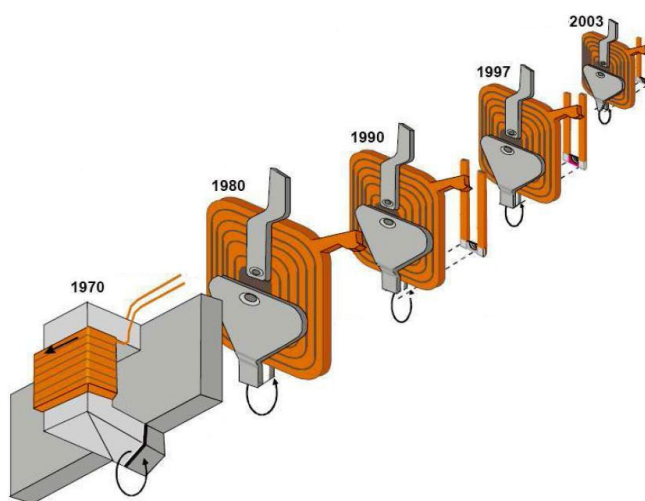
4.3 Bralno-pisalna glava

Vsaka površina ima svojo bralno-pisalno glavo z drsnikom (slika 12, 13 in 14), preko katere se bere ali piše. To je navitje, ki lahko magneti površino diska (pisanje) ali pa ugotavlja namagnetetenost - magnetorezistivni senzor (branje).

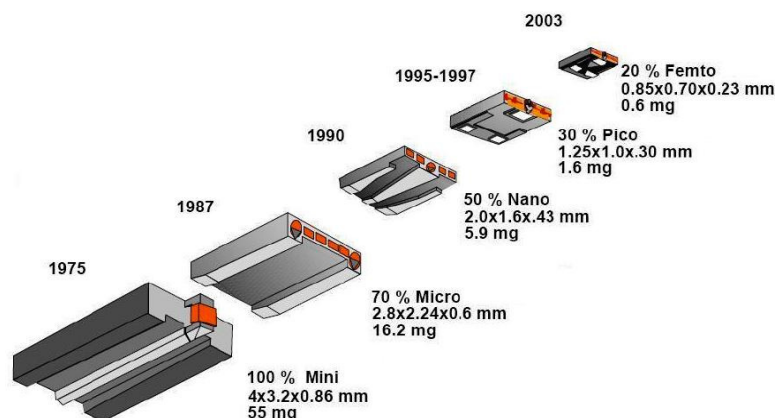


Slika 12: Bralno-pisalna glava in drsnik (povzeto po [4])

Glave so oblikovane aerodinamično in lebdijo nad zračno blazino, ki jo ustvarja vrtenje plošč. Pri današnjih diskih je pri vrtenju razdalja med glavo in površino plošče približno 20 nm (20×10^{-9} m). Relativna hitrost med glavo in površino je 20 m/s ali več. Čeprav so trki med glavo in površino pri tako majhni razdalji videti neizogibni (trk običajno uniči glavo in s tem tudi disk), so magnetni diski zelo zanesljivi. To je rezultat 50-letnih raziskav na področju zračnih ležajev.



Slika 13: Razvoj bralno-pisalnih glav (povzeto po [2])



Slika 14: Razvoj drsnikov (povzeto po [2])

Poseben problem je tako imenovano vzletanje in pristajanje glav. V mirovanju se bralno pisalne glave dotikajo površine plošč in se dvignejo nad površino plošče šele, ko je hitrost dovolj visoka. Čeprav so glave in površine narejene tako, da prenesejo vzletanja in pristajanja, kljub temu prihaja do mikroskopske obrabe. Večina proizvajalcev zagotavlja 50000 vzletanj in pristajanj preden se pričnejo kazati znaki obrabe.

To dosežejo tako, da se za vzletanje in pristajanje uporablja najbolj notranji del površine, ki ne služi za shranjevanje informacij in kamor se glave ob izklopu avtomatsko premaknejo. Ta del površine je obdelan na poseben način, ki močno zmanjša trenje.

Pri današnjih trdih diskih se bralno-pisalne glave ob zaustavitvi plošč pomaknejo izven plošč na posebno rampo, kar omogoča veliko več start-stop operacij. To je pomembno predvsem pri diskih, ki se uporabljajo v prenosnih napravah, kjer je zahtevana nizka poraba energije.

Vse glave so pritrjene na isti premikalni mehanizem in se premikajo skupaj. Ravno zaradi tega so na vseh površinah pod glavami sledi z isto zaporedno številko. Izraz cilindri pomeni istoležne sledi vseh površin. Pri branju je vedno aktivna natanko ena glava, ostale so elektronsko izključene. Ker je aktivna samo ena glava, poteka pisanje in branje zaporedno, bit za bitom. Pretvorba zaporedja bitov v 8, 16 ali 32-bitne besede opravlja vgrajena elektronika.

Dostop do podatkov na disku je tri-stopenjski proces, ki ga sestavljajo naslednji trije koraki:

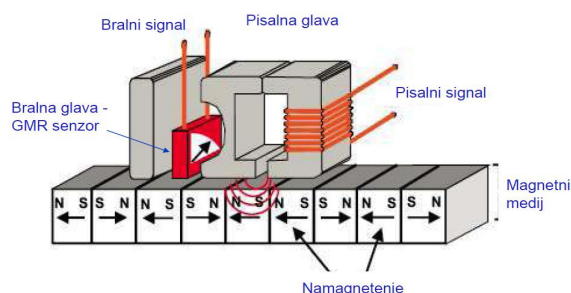
1. **Iskanje** (seek) imenujemo pomik glave na želeno sled, čas potreben za iskanje pa iskalni čas (seek time). Proizvajalci podajajo povprečni iskalni čas, ki je tipično od 3 do 10 ms.
2. **Vrtilna zakasnitev** (rotational latency) je čas, ki preteče, ko je glava na pravilni sledi in je potrebno počakati, da se željeni sektor zavrti pod glavo. Povprečna vrtilna zakasnitev je enaka polovici časa za en obrat diska. Pri disku, ki se vrti s 7200 obrati na minuto, znaša vrtilna zakasnitev 4,2 ms.
3. **Prenos podatkov** (transfer time) je čas za prenos bitov, ki mu pravimo tudi notranji prenosni čas. Ta čas je odvisen od premera plošč, hitrosti vrtenja in od gostote zapisa. Tipična hitrost prenosa je med 500 do 2000 Mbit/s. Ker imajo današnji diski vgrajen predpomnilnik, v katerem so shranjeni sektorji, ki so se nazadnje brali ali pisali, je zunanja hitrost prenašanja podatkov med glavnim pomnilnikom in diskom običajno večja, 100 MB/s in več. Prenosni čas je skoraj vedno veliko krajši od iskalnega časa in od vrtilne zakasnitve. Zato so prenosi v in iz diska pogosto opravljajo v enotah, ki obsegajo več sosednjih sektorjev (8 ali 16).

Magnetni diski so zapletene naprave in vsebujejo veliko elektronike, ki vedno vključuje enega ali več mikroprocesorjev. Ti skrbijo za vrsto podrobnosti pri delovanju diska, kot je pravilen položaj glave nad sledjo, razpoznavanje sektorjevega uvoda, računanje in preverjanje bitov za detekcijo in korekcijo bitov, komuniciranje s krmilnikom diska, ki je z diskom povezan preko kabla.

To povezavo označujemo kot zunanji vmesnik, ki ima več standardiziranih izvedb: ATA (Advanced Technology Attachment), SATA (Serial ATA) in SCSI (Small Computer System Interface). Krmilnik diska skrbi za podrobnosti pri prenosu podatkov med diskom in glavnim pomnilnikom. Delovanje krmilnika vodi poseben program, ki je običajno del operacijskega sistema. Na en krmilnik se lahko priključi več diskov.

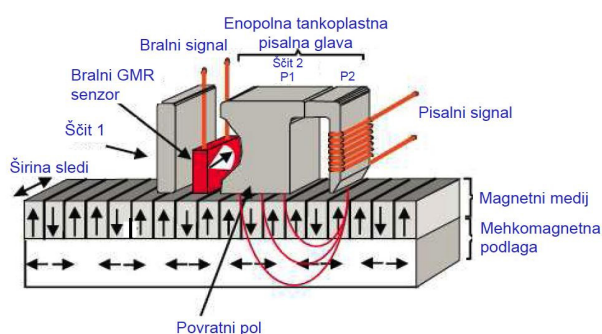
Princip zapisovanja na magnetni medij se od leta 1898, ko ga je prvič uporabil danski inženir V. Poulsen, dolgo ni spremenil. Informacija je shranjena v obliki področij z različno smerjo namagnetnosti. Ta področja, ki se označujejo kot magnetki ali magnetne domene, ležijo vzdolž magnetne plasti in predstavljajo vzdolžni ali longitudinalni zapis (slika 15). Ta zapis je bil dolgo edini način za shranjevanje informacij na magnetnih diskih. Gostota zapisa se že 50 let stalno povečuje. S povečevanjem gostote zapisovanja postajajo magnetki vse krajši.

Po letu 2000 se je gostota zapisovanja približala tako imenovani superparamagnetni meji, pri kateri postanejo magnetki tako majhni, da so toplotno nestabilni. Pri zelo majhnih magnetkih je namreč energija, ki je potrebna za spremembo smeri namagnetnosti, enaka toplotni energiji molekule magnetnega medija. To ima za posledico naključno spreminjanje stanja magnetkov. Ocenjuje se, da je ta meja pri longitudinalnem zapisu med 200 in 300 Gb/palec². Večje gostote so dosegljive samo z drugačnim načinom zapisa.



Slika 15: Vzdolžni (longitudinalni) zapis (povzeto po [2])

Ta način je bil prvič uporabljen že leta 1970 in se imenuje vertikalni ali pravokotni zapis (perpendicular, slika 16). Tehnični problemi pri njegovi uporabi so bili veliki, ker zahteva bistveno drugačno zgradbo bralno-pisalne glave in tudi magnetnih plasti na površini diska. Po letu 2005 so se proizvajalci diskov skoraj v celoti preusmerili na vertikalni zapis. Ocenjuje se, da ta način omogoča več kot 10-krat večjo gostoto zapisa (do 1000 Gb/palec²). V letu 2007 so že bili na trgu diski, pri katerih je gostota zapisa presegla 300 Gb/palec² (46Gb/cm²). Največja gostota sledi pa je že presegla 80000 sledi/cm.



Slika 16: Vertikalni (perpendicular) zapis (povzeto po [2])

Gostoto zapisa se podaja kot:

- Gostota sledi – število sledi na enoto dolžine (tpi)
- Linearna gostota – število bitov vzdolž sledi na enoto dolžine (bpi)
- Površinska gostota – število bitov na enoto površine (površinska gostota = gostota sledi x linearna gostota)

4.4 Lastnosti magnetnega diska

Kapaciteta magnetnega diska se podaja v Giga Bajtih (GB), vse bolj v Tera Bajtih (TB), hitrost prenosa podatkov v Giga bitih na sekundo (3 Gb/s) in hitrost vrtenja v obratih na minuto (5.400 in več). Pomembna lastnost je tudi kapaciteta predpomnilnika v Mega Bajtih (do 64 MB).

Premer trdega diska je največkrat 3,5 palca, za prenosne računalnike 2,5 palca. Zanesljivost trdega diska predstavlja podatek MTBF (Mean Time Between Failures), ki nam pove, koliko časa povprečno preteče med dvema napakama. Današnji diski (predvsem SCSI) se ponašajo z vrednostmi, kot je npr. 1,2 milijona ur (kar je 137 let), MTBF povprečnih diskov ATA pa 500.000 ur (57 let). To bi pomenilo, da se disk pravzaprav nikoli ne bo pokvaril, vendar to ni res. MTBF je izračunan kot skupno število ur obratovanja neke množice diskov deljeno s številom vseh napak, ki so se pojavile v tem času. Za uporabnika je bolj zanimiva vrednost CDF (Cumulative Distribution Function), ki jo navajajo nekateri izdelovalci. Gre za statistično meritev, ki je podana kot na primer: 4% v petih letih. Tak disk ima torej 4 % možnosti, da bo v naslednjih petih letih odpovedal.

4.5 Slabosti magnetnih diskov

Klasični trdi diski so poleg visoke energijske porabe žal najpogostejši krivci za relativno počasno delo računalnikov in tudi razlog za izgubo podatkov. Zavedati se moramo, da so to v osnovi še vedno mehansko-magnetne naprave. Največja nevšečnost mehanskih diskov pa je njihova občutljivost na tresljaje, udarce in padce, kar je pri uporabi v prenosnih računalnikih in navsezadnje tudi v prenosnih zunanjih diskih lahko ključnega pomena.

4.6 Zeleni magnetni diski

V zadnjem času je napredek tudi na področju energijske varčnosti v trdih diskih, saj so proizvajalci na trg poslali tako imenovane zelene diske. Ti vsebujejo posebno logiko, ki odvisno od obremenitve (ali uporabnik dostopa do podatkov ali so samo občasne zahteve) prilagaja hitrost vrtenja plošč ter s tem uravnava optimalno porabo energije. Ni odveč poudariti, da je rešitev uspešna, saj zniža tudi segrevanje in šum delovanja takega diska.

4.7 Hibridni magnetni diski

Koncept hibridnih diskov se je pojavil z Intelovo tehnologijo Robson, ki uporablja povezavo bliskovnega pomnilnika z matično ploščo. Hibridni trdi disk (podjetje Microsoft jih imenuje "ReadyDrive") je običajni trdi disk, ki ima na tiskanem vezju poleg 8 ali 16 MB hitrega predpomnilnika še od 128 do 1024 MB flash (bliskovnega) pomnilnika. V ta pomnilnik beleži najpogostejše zapise oziroma ob zaporednih sekvenčnih branjih podatke, za katere predvideva da jih bo sistem zahteval v bližnji prihodnosti. Če je ta sistem predvidevanja uspešen, se lahko disk ustavi in s tem varčuje z energijo, medtem ko uporabnik uporablja podatke iz flash pomnilnika.

5 SSD - SOLID STATE DISK (DISKI BREZ GIBLJIVIH DELOV)

Zamisel o pogonih s tako imenovano tehnologijo trdnih materialov (solid state technology) sega že v 40. leta prejšnjega stoletja. Poskuse s pomnilniki SSD, ki so temeljili na železu ali njegovih spojinah, so dokaj hitro opustili ob popularizaciji magnetno-bobnastega pomnilnika, ki je predhodnik modernega magnetnega diska. Za prvi pravi pogon SSD štejemo napravo, ki jo je leta 1978 razvilo podjetje IBM pod imenom StorageTek. Leta 1995 pa je podjetje M-System razvilo prvi SSD na osnovi tehnologije polprevodniških flash pomnilnikov. Trenutno smo v dobi vnovičnega razcveta tehnologije SSD (slika 17), saj so magnetni diski, kot vse kaže, dosegli skrajni rob zmogljivosti in miniaturizacije.



Slika 17: Pogoni SSD (povzeto po [5])

Nobeno naključje ni, da med proizvajalci pogonov SSD prevladujejo podjetja, ki izdelujejo polprevodniške pomnilnike flash in RAM. Večina podjetij pogone SSD sestavlja iz flash pomnilnika NAND, ki ohrani podatke tudi po odklopu vira energije in pomnilnika DRAM (Dynamic Random Access Memory), ki služi kot predpomnilnik. Flash tehnologija NAND, ki jo je pred dvajsetimi leti razvilo podjetje Toshiba, shranjuje podatke v vrsto (polje) pomnilnih celic. Glede na to, koliko bitov lahko posamezna pomnilna celica shrani, ločimo tako imenovane SLC (Single Level Cell) in MLC (Multi Level Cell) pomnilne celice.

Hitrostne zmogljivosti pogona SSD lahko povečamo z vzporedno vezavo pomnilnih celic tipa NAND, ki delujejo bistveno hitreje od ene same. Z vključevanjem RAID-u podobne tehnologije v strukturo pogona SSD pa se dosega hitrosti branja in pisanja na samem robu zmogljivosti vmesnika SATA (okrog 750 MB/s).

5.1 Tehnologija polprevodniških pomnilnikov

Z izrazom pomnilnik v računalniških sistemih zajamemo zelo širok spekter gradnikov in tehnologij. V obdobju pomnilnikov skromnih kapacitet na osnovi elektromagnetnih (releji) in zatem elektronskih (elektronke) gradnikov, sledil prodor prvih pomnilnikov večjih kapacitet na osnovi feritne tehnologije. Nobena od novih zamisli ni zmogla po kapaciteti, ceni, hitrosti in zanesljivosti konkurirati feritni tehnologiji, ki je doživela številne izboljšave, predvsem na treh področjih: Feritni materiali, zmanjševanje toroidov in izboljšave v vezjih za zapis in predvsem detekcijo odziva.

Zato je tudi ob uvajanju prvih pomnilnikov na osnovi polprevodnikov ostajal dvom, ali bodo lahko nadomestili feritne pomnilnike. Ti so imeli eno samo bistveno prednost pred polprevodniškimi pomnilniki. Vsebina se je ohranila tudi po odklopu vira energije.

Raziskave na področju pomnjenja podajajo tri možne načine shranjevanja:

1. Sprememba v snovnih lastnostih,
2. Sprememba v stanju (stabilnem) nekega elementa in
3. Sprememba v stanju vezja.

Feritni pomnilniki spadajo v prvo kategorijo, vsebina se ohranja, zato pa se ob branju vsebina briše (destruktivno branje). Polprevodniški pomnilniki spadajo v zadnjo kategorijo. Druga kategorija se do sedaj ni izkazala kot perspektivna.

Polprevodniške pomnilnike lahko razdelimo v različne kategorije po naslednjih kriterijih:

1. Pisanje:

- Vpis vsebine je možen samo enkrat, beremo jo lahko neomejeno krat. Kratica ROM (Read Only Memory) korektno povzema to značilnost. Vpis in branje vsebine nista postopka, ki bi bila izenačena po času in zahtevnosti. Uporabljene kratice za take vrste pomnilnikov segajo do XXROM. Pri tem XX pove, kakšne so omejitve postopka brisanja vsebine.
- Pisanje in branje se po potrebnem času in zahtevnosti ne ločita. Večinoma se za tak tip pomnilnika uporablja kratica RAM (Random Access Memory), kar pa ne ustreza njeni uporabi, saj imata oba pomnilnika (ROM in RAM) naključni način dostopa. Kratica je nastala še pred uvedbo polprevodniških pomnilnikov in temelji na osnovi drugega kriterija.

2. Obstočnost vsebine po branju:

- Vsebina med branjem ostane nespremenjena, pomnilnik je ne-destruktivnega tipa. Vsebino lahko preberemo poljubno krat, pa bo še vedno ostala nespremenjena.
- Drugače je pri pomnilnikih destruktivnega tipa, kjer se ob branju vsebina izbriše (izgubi se vsebina lokacije ali več lokacij). Prvotno vsebino je potrebno ponovno vpisati.

3. Organizacija:

- Poznamo interno in eksterno organizacijo pomnilnika. Pomnilnik je lahko interno organiziran kot polje pomnilnih celic (matrika), navzven pa kaže različno organizacijo. Za klasifikacijo je pomembna predvsem organizacija navzven.

4. Čas dostopa:

- Register je po času dostopa najhitrejši, sledita mu predpomnilnik in nato glavni (primarni) pomnilniki, pomožni (sekundarni) pomnilnik, ki je običajno kar disk ter arhivski (masovni) pomnilnik, ki za dostop do vsebine potrebujejo ročno ali robotsko manipulacijo.

5. Način dostopa do vsebine (opisano na strani 3).

- Pri vseh polprevodniških pomnilnikih je dostop naključen.

5.1.1 Osnovni gradniki

V gradnji pomnilnikov so se in se še uporabljajo unipolarni in bipolarni tranzistorji. Število procesnih korakov in zahtevnost posameznih korakov je zelo različna. V splošnem velja ugotovitev, da je njihovo število pri unipolarnem MOS tranzistorju manjše kot pri bipolarnem. Zaporedje korakov v procesu proizvodnje MOS tranzistorja je naslednje:

1. Prvi korak je rast silicijevega dioksida (SiO_2) na silicijevi rezini.
2. V drugem koraku sledi nanos fotoobčutljive snovi. Na ta nanos nanese masko, ki ni transparentna za ultravijolično (UV) svetlobo.
3. V tretjem koraku osvetlimo silicijevo rezino. Na z masko nezaščitenih mestih se spremeni struktura fotoobčutljive snovi, ki jo lahko po predhodnem postopku fiksiranja izlužimo. Na površini ostanejo "okna" nezaščitenega silicijevega dioksida. S kemičnim postopkom jedkanja silicijev dioksid v teh "oknih" odstranimo.
4. Sledi še zadnji korak, v katerem odprto površino silicija dopiramo z izbranimi ioni.

Odvisno od izbire atomov (ionov v postopku ionskega dopiranja) ob visoki temperaturi v plinski okolici dobimo na površini silicija bolj ali manj močno dopirana področja. Če prevladuje prevajanje elektronov govorimo o N dopiranju, za prevladujoče prevajanje lukenj pa P dopiranje. Opisane korake lahko ponovimo večkrat z različnimi geometrijami. Dopirana področja segajo le malo v globino, zato imenujemo tak proces tudi planaren. Strukturo tranzistorja zgradimo v ravnini in ne vertikalno.

Prvi tranzistorji so bili realizirani v PMOS, ker je njihov proces izdelave možno lažje in bolje nadzorovati (dopiranje). NMOS tranzistorje lahko nezaželeno dopiramo s snovmi iz okolja, kar je vodilo v ostre zahteve za čistost proizvodnih prostorov.

MOS tranzistor je element, ki prevaja tok skozi kanal med izvorom (Source) in ponorom (Drain) v odvisnosti od napetosti na vratih (Gate). Vsak tranzistor ima tri normalna področja delovanja:

1. **Zaporno področje:**
 - Napetost na elektrodi vrat je dovolj nizka, da med izvorom in ponorom teče le zaporni tok.
2. **Linearno področje:**
 - Tok med izvorom in ponorom narašča linearno odvisno od napetosti na vratih.

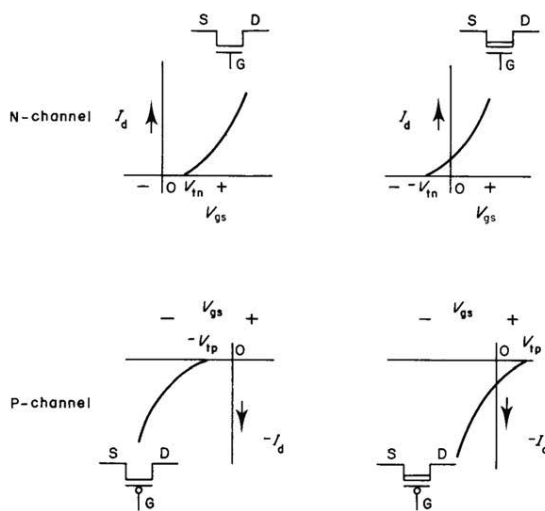
3. Področje zasičenja:

- Področje kanala med izvorom in ponorom je popolnoma invertirano. Tok med izvorom in ponorom postane neodvisen od naraščanja napetosti na vratih.

Obstaja tudi nenormalno področje delovanja, do katerega pride, če je napetost med izvorom in ponorom previsoka. Pojavi se plazovit preboj.

Kanal med izvorom in ponorom je lahko tudi dopiran. Tedaj z napetostjo na elektrodi vrat izrivamo proste nosilce elektrine iz kanala tako dolgo, da ta neha prevajati.

Na tej podlagi poznamo dva osnovna tipa prevajanja s stopnjevanjem (induciranim kanalom) in izrivanjem (vgrajenim kanalom), kar skupaj s tipom dopiranja, tvori štiri tipe tranzistorjev (slika 18).



Slika 18: Simboli in karakteristike štirih MOS tranzistorjev tipa N in P (povzeto po [3])

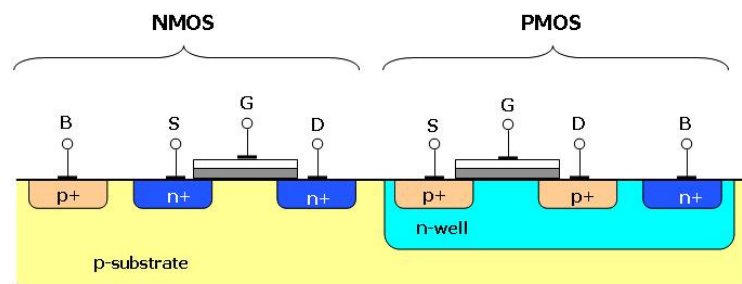
Tranzistor s stopnjevanjem v normalnih pogojih ne prevaja in potrebuje le minimalno napetost na vratih (pragu), da prične prevajati. Obratno pa tranzistor z izrivanjem v normalnih pogojih prevaja, napetost na elektrodi vrat potrebuje le, da preneha prevajati.

Način delovanja z izrivanjem je idealen nadomestek bremenskega upora v CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) izvedbi, ker povečuje hitrost in zmanjšuje potrebno napajalno napetost. Na napetost praga vpliva dopiranje silicija pod elektrodo vrat, uporaba različnih materialov, kakor tudi različna napetost substrata.

CMOS tranzistor (slika 19) je kombinacija NMOS in PMOS tranzistorja. Modernejši proces z ionsko implantacijo oblikuje pozitivno in negativno dopirana področja za tranzistorje in uporablja krmilne elektrode z dopiranim polisilicijem. Za pomnilnike je zelo pomembna lastnost CMOS tranzistorja, da je poraba moči v mirovnem stanju (statična poraba) zanemarljiva v primeri s preklopi. CMOS vezja odlikuje tudi to, da delujejo v mnogo večjem napetostnem (predvsem nizke napetosti) in temperaturnem področju.

Danes so na voljo trije osnovni procesi za proizvodnjo CMOS vezji:

1. P-kanal
2. N-kanal (odlikuje se po visoki hitrosti, nastane z ionsko implantacijo in kontrolo nečistoč)
3. Kanal obojega tipa v celicah dvojčicah



Slika 19: NMOS in PMOS, ki skupaj tvorita tako imenovan CMOS tranzistor (povzeto po [3])

Že od leta 1980 se bralno-pisalni pomnilniki gradijo s CMOS tranzistorji. Poleg dinamičnih pomnilniških celic DRAM (Dinamični RAM) se uporabljajo tudi statična vezja, ki so znana pod oznako SRAM (Statični RAM). SRAM celice so hitrejšje od DRAM celic, vendar tudi večje in dražje. Razlog za to je v zgradbi pomnilniške celice.

5.1.2 Lastnosti silicijevega oksida

Silicijev oksid je dober izolator in ga zato lahko uporabljamo za horizontalno plast, ki ločuje prevodne plasti, kot tudi za vertikalno izolacijo sosednjih tranzistorjev. Vendar debela oksidna plast, ki nastane na površini silicija, potem ko vanj izjedkamo odprtine, predstavlja potencialno nevarnost za lom predvsem tankih prevodnih kovinskih plasti, ki jih nanesemo preko praga, ki nastane.

Silicijev oksid nastaja z oksidacijo silicija v atmosferi bogati z kisikom pri povišani temperaturi. Ta postopek daje kvaliteten oksid, ki tudi pri zelo tanki plasti ne kaže defektov.

Pogosto potrebujemo oksid na mestu, ki je bilo pred tem dopirano. Če ne želimo porušiti zaželenih lastnosti dopiranja, je potrebno oksid nanesti v kemičnem procesu pri dovolj nizki temperaturi. Vendar se v tem postopku lahko v oksid vgradijo nečistoče, prisotne v plinski mešanici, ki je primerna zgolj za izolacijo.

Kadar je lahko oksidna plast debela, kot je v primeru vertikalne ločitve tranzistorjev, taki defekti niso kritični. Bistveno drugačne pa so razmere v primeru izredno tankih oksidnih plasti.

Poseben postopek je izolacija z jarkom. Ta zahteva, da se relativno globoko v površino silicija z reaktivnim ionskim jedkanjem izkoplje jarek in vanj kemično nanese oksid. Ta tehnika omogoča tudi tvorbo kondenzatorjev visoke kapacitivnosti na majhni površini.

Za povezave se je v začetku uporabljala izključno kovina (Al - aluminij, redko Mo - molibden). Bistven napredek je prineslo močno dopiranje silicija (polisilicij), ki je omogočilo najprej eno dodatno plast povezav, zatem pa še drugo in tretjo. Predvsem uvedba tretje plasti je omogočila izvedbo pomnilniškega kondenzatorja nad tranzistorjem, kar je ena izmed tehnologij, ki je v 90. letih zagotovila rast kapacitete DRAM pomnilnikov.

5.1.3 Velikost tranzistorjev

Izboljšave procesov omogočajo doseganje vedno manjših mer (geometrije) delov osnovnih gradnikov. Začetki so bili blizu 10 μm (mikrometer, 1 $\mu\text{m} = 10^{-6}$ m), na prelomu 80. in 90. let so svoj prihod napovedale "submikronske" tehnologije. Danes že govorimo o 0,032 μm . Glede na to kar vemo o tehnologiji danes, naj bi se ta trend nadaljeval še vsaj 10 let. Zavedati pa se moramo, da zmanjšanje dimenzij zahteva tudi zmanjšanje napetosti, pri kateri deluje vezje. Miniaturizacijo je možno izvršiti le do določene meje, potem pa je potrebno na novo določiti celotna snovalna pravila.

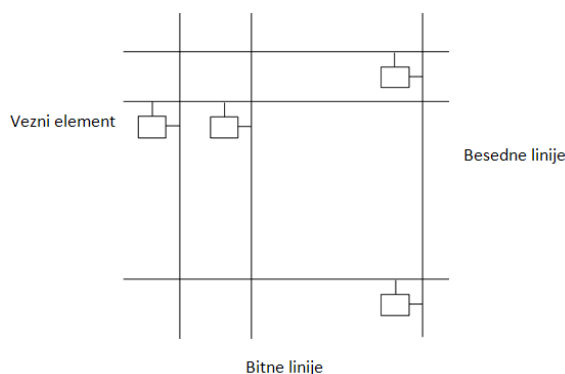
5.1.4 Pomnilniška celica

Dejanska izvedba pomnilnika je močno odvisna od uporabljene tehnologije (unipolarna, bipolarna). Polprevodniški pomnilniki pomnijo na osnovi spremembe v vezju. Pomnilnik lahko predstavimo kot strukturo treh sklopov oziroma matriko. V njem ločimo besedne linije, bitne linije in pomnilne celice. Pomnilne celice v matriki so lahko zelo različne in določajo tip pomnilnika. Poznamo tri tipe pomnilniških celic:

1. Vezni element (v ROM-ih)
2. Kondenzator in tranzistor (v DRAM-ih)
3. Zapah (v SRAM-ih)

5.1.5 Bralni pomnilnik – ROM

Pri bralnih pomnilnikih se podatki ne hranijo v obliki naboja, temveč so zapisani kot povezave med besednimi in bitnimi linijami. Vezni element predstavlja pomnilniško celico bralnega pomnilnika, ki je lahko v matriki (slika 20) zelo različen in določa tip pomnilnika. Idealno bi bilo, da bi vezni elementi izkazovali različno upornost, odvisno od smeri prevajanja toka. Če so vezni elementi prisotni v vseh sečiščih besednih in bitnih linij, naj neaktivni vezni elementi izkazujejo zelo visoko upornost, aktivni pa čim manjšo.



Slika 20: Matrika bralnega pomnilnika (povzeto po [3])

Vezni element ne more biti kar upor, saj mora prevajati samo v eno smer, kar pa pomeni, da je lahko dioda ali tranzistor. Začetnim poskusom z diodo so hitro sledile realizacije s tranzistorji.

Za pomnjenje enega bita potrebujemo en tranzistor in element, ki ga aktivira. V primeru standardnih ROM vezij ne potrebujemo niti tega elementa, saj z masko zagotovimo povezavo besedne linije z veznimi elementi (mask ROM). Bralne pomnilnike delimo v več podskupin. Najbolj enostavna je izvedba bralnih pomnilnikov, kjer vsebino (podatke) določimo že z masko v procesu proizvodnje. Pri mask ROM-u proizvajalec naredi masko glede na kupčevo specifikacijo vsebine.

Prvi bralni pomnilnik, pri katerih je bilo možno spreminjati vsebino ob prvi uporabi, imenujemo PROM (Programmable ROM). Prazen PROM ima vse povezave med besednimi in bitnimi linijami sklenjene. Vsebino zapišemo s pomočjo programatorja, ki zažge izbrane povezave med linijami. Taka izvedba bralnega pomnilnika je danes zelo redka.

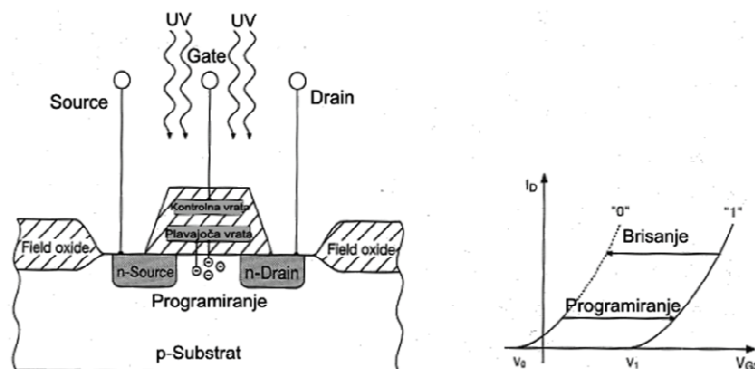
5.1.6 Pomnilnik EPROM

Danes prevladuje uporaba pomnilnikov, pri katerih je možen ponoven vpis vsebine s pomočjo elektronskega signala, potem, ko vsem tranzistorjem zbrišemo vsebino. Označujemo jih s kratico EPROM (Erasable Programmable ROM, tudi UVRom, slika 21). EPROM ima plavajočo plast (plavajoča vrata, ki jim pravimo tudi krmilna elektroda) iz polisilicija, ki je na vse strani izolirana z dielektrikom (oksidom, debelim med 50 in 100 nm).

Pri brisanju vsebine je potrebno EPROM vzeti iz vezja in ga s posebno napravo osvetljevati z UV svetlobo določene valovne dolžine (253.7 nm – nanometer, $1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$) od 10 do 30 minut, da se vsebina izbriše. Ujeti elektroni dobijo dovolj energije (3.2 eV (electron volts) = $5.12696468 \times 10^{-19}\text{ Joule}$), da preskočijo iz plavajoče plasti proti vratom in substratu. Ob obsevanju z UV svetlobo naboj, ujet v tej plasti, izgine. Izbriše se celotna vsebina. Izbris EPROM-a je možen do te mere, da postane plavajoča plast tako nabita, da sploh ne more več sprejeti elektronov.

Vpis vsebine (programiranje) poteka tako, da se na krmilno elektrodo in ponor dovede dovolj visoka pozitivna napetost (navadno 12.5 V ali 21 V) proti substratu in izvoru, kar povzroči preboj dielektrika (plazovit ali vroč preboj elektronov) iz substrata proti ponoru in vratom. Elektroni morajo dobiti dovolj energije, da preskočijo energijsko bariero 3.2 eV med substratom in SiO_2 . Majhen negativni naboj (10^6 elektronov) pa ostane v plavajoči plasti tudi, ko ni več napetosti in onemogoča, da bi tranzistor prevajal, ko je izbran. Elektroni v plavajoči plasti, ki jih je vse več, vedno bolj omejujejo prihod novih elektronov iz substrata. Nov vpis je možen šele, ko vsem stikalom zbrišemo vsebino.

Hibe EPROM celice so potreba po višji napetosti pri vpisu, možno je brisanje le celotne vsebine ter dejstvo, da je treba čip vzeti iz vezja.



Slika 21: EPROM celica (povzeto po [3])

5.1.7 Pomnilnik EEPROM

Hibe EPROM-a odpravlja pomnilna celica z oznako EEPROM (Electrically Erasable Programmable ROM). Med plavajočo elektrodo in vrati je področje zelo tankega oksida (5 do 10 nm). Z uporabo pravilne polaritete napetosti (brišemo z napetostjo nasprotne polaritete kot pri vpisu) med ponorom in vrati, je možno v in iz plavajoče plasti premakniti elektrone na osnovi tunelskega efekta (hladen preboj elektronov).

Pri brisanju je napetost nasprotne polaritete in elektroni tunelirajo iz ponora v plavajočo plast. Pragovna napetost se poveča, tranzistor ne prevaja (logična 1). Pri pozitivni napetosti med ponorom in vrati tunelirajo elektroni skozi tanko plast oksida iz plavajoče plasti v ponor, kar omogoča vpis vsebine. S tem se zmanjša pragovna napetost in tranzistor prevaja (logična 0). Potrebna napetost za vpis je manjša, vpis vsebine je možen v eno samo celico tako, da jo najprej električno zberemo (odstranimo naboj) in potem po potrebi ponovno vpišemo (dovedemo naboj). Hiba te rešitve je, da se po določenem številu brisanj in vpisov ujame vedno več elektronov v plasti oksida, kar začne zmanjševati razliko med stanji in s časoma prepreči nadaljnjo uporabo celice.

Zaradi možnosti brisanja in vpisa po bajtih potrebuje vsaka celica poleg pomnilnega še tako imenovani izbiralni tranzistor. EEPROM celico sestavljata 2 tranzistorja, izbiralni in pomnilni, zato je površina celice ustrezno večja v primerjavi z EPROM celico.

EEPROM-a ni potrebno jemati iz vezja, da bi vpisali vsebino. Briše se z lokalizirano uporabo električnega polja za vsako celico. Slabost EEPROM-a je počasno pisanje ($\sim 30 \mu\text{s/B}$) in omejeno število vpisov (~ 10000), ker je plast dielektrika zelo tanka in se obrabi.

Proces izdelave takega pomnilnika zahteva, da se v verigo povežejo tranzistorji v zgodnjih procesih proizvodnje integriranega vezja, ne zahteva pa povezave na bitno linijo, kar pripomore k bistveno manj kontaktov na tranzistor. Daljša kot je veriga, večji je prihranek na prostoru, toda tudi zakasnitev branja, ki eksponentno narašča s številom tranzistorjev v verigi. Naraščajoč čas branja in manjšanje števila bitov na enoto površine dajeta optimum pri določenem številu zaporedno vezanih tranzistorjev. Ta številka je zavidljivo visoka (približno 64 tranzistorjev).

Pri pomnilnikih je zelo pomemben čas med določitvijo vsebine in izvedbo v vezju. Nanj najbolj vpliva dejstvo v katerem procesnem koraku se izvrši programiranje. Poznamo tri načine programiranja: Z debelino oksida, modifikacijo napetosti praga z implantacijo in programiranje s kontaktom skozi odprtino.

Posebno vejo bralnih pomnilnikov predstavljajo pomnilniki, ki v celici hranijo več bitov. Da lahko hranijo dva bita potrebujejo štiri stanja. To je lahko izvedeno na dva načina. Prvi je uporaba elektrode vrat s spremenljivim razmerjem širina/dolžina. S tem dosežemo štiri nivoje toka skozi MOS tranzistor (odvisno od tega katera elektroda vrat je maskirana). Če je vpisana "1" programiramo PMOS, za "0" pa NMOS. Oba tranzistorja NMOS in PMOS sta vezana na isto bitna linijo, potrebujemo pa dve besedni liniji.

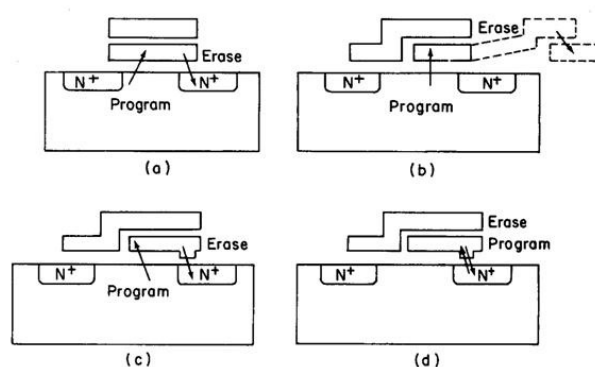
5.1.8 Flash (bliskovni) pomnilnik

Flash pomnilniki so leta 1980, kot nov izum, ponujali revolucionarne lastnosti pomnilniškega integriranega vezja. Razvoj se je začel z uporabo RAM pomnilnika, nato EPROM-a in EEPROM-a. Za EEPROM pomnilnike je značilno, da lahko poleg branja vanje tudi pišemo, shranjena informacija pa je obstojna tudi po odklopu vira energije. Kljub tej sposobnosti pa ima EEPROM omejitve. Pisanje/brisanje traja od nekaj sekund do nekaj minut.

Sprva se je EEPROM-e uporabljalo predvsem za shranjevanje programov v najrazličnejših integriranih vezjih (BIOS - Basic Input Output System). Potreba po spreminjanju vsebine je bila redka in ravno zaradi tega so bili idealni za te namene. Naslednja omejitev je tudi število pisanj/brisanj, ki je od nekaj sto do tisoč. Vendar je tehnologija napredovala in pomnilniki so doživeli dramatičen razvoj.

Današnji SSD pogoni so v celoti sestavljeni iz flash pomnilnika, ki ga sicer že dlje časa poznamo iz pomnilniških ključev USB ali pomnilniških kartic (v digitalnih fotoaparatih, kamerah...). Flash pomnilnik omogoča večkratno brisanje in zapisovanje med obratovanjem brez dodatnega vezja. Samo poimenovanje izvira iz dejstva, da je možno hitro (bliskovito) električno zbrisati vsebino pomnilnika in jo potem ponovno selektivno vpisati. Če so prve naprave uporabljale pomnilnik tipa NOR, pa se danes zaradi nižje cene ter višje kapacitete in hitrosti uporabljajo pomnilniki tipa NAND. Edina slabost slednjih je, da ne omogočajo neposrednega dostopa do katerekoli pomnilniške lokacije, temveč je dostop možen do blokov, ki so veliki več tisoč ali milijonov bitov.

Flash pomnilniki, ki omogočajo pisanje posameznih blokov (izvedeno je programiranje sektorja ali bloka), so se razvijali skozi več faz. Prikazane so na sliki 22. Najbolj preprosta je prva rešitev na sliki 22 a, pri kateri uporabimo tanjši oksid pod plavajočo elektrodo (tanjši kot je uporabljen pri EEPROM-u). Programiranje poteka z vročim injektiranjem elektronov iz področja kanala blizu ponora in brisanje s tuneliranjem elektronov iz plavajoče elektrode skozi tanek oksid med to elektrodo in izvorno elektrodo. Prednost te rešitve je majhna velikost celice, slabost pa sorazmerno velik tok, potreben za programiranje.



Slika 22: Faze razvoja in delovanje flash celice (povzeto po [3])

Številni pomnilniki uporabljajo koncept prikazan na sliki 22 b, c in d. Površino nad kanalom si delita dve elektrodi, plavajoča in krmilna (split gate). Za razliko od vročega injektiranja elektronov, pri tuneliranju tega efekta ni. Lahko pa pride do pozitivnega naboja plavajoče elektrode (pobegne preveč elektronov). Preprečiti moramo brisanje že zbrisanih celic, kar dosežemo s krmilno elektrodo. Ta blokira tranzistor vedno, razen v času branja.

Druga rešitev (slika 22 b) zahteva sorazmerno visoko napetost za brisanje, ki jo moramo uporabiti med dvema polisilicijevima plastema, ločenima s sorazmerno debelim oksidom. Tretja rešitev (slika 22 c) zahteva za brisanje manjšo napetost (tanek oksid), uporablja pa za obe operaciji isti spoj, kar obremeni oksid in zmanjša število ponovitev.

Četrta rešitev (slika 22 d) uporablja za brisanje in vpis hladno injektiranje (tuneliranje). Potreben nizek tok lahko zagotovimo že s 5 V napajalno napetostjo. Hladno injektiranje zahteva daljši čas, kar pri več ponovitvah tudi kvarno vpliva na oksid.

Flash pomnilniki so pri vpisu počasnejši od SRAM pomnilnikov, imajo pa pred njimi bistveno prednost, da se vsebina po izklopu napajanja ne izgubi. Flash pomnilniki potrebujejo interno večje število različnih napetosti, zato se pojavlja potreba po generatorjih dodatne napetosti. To so napetost substrata proti masi, napetosti za programiranje in pri submikronskih tehnologijah tudi napetosti, ki so nižje od 5 V napajalne napetosti.

V težnji doseči čim večjo gostoto celic v flash pomnilnikih so izkoristili tudi možnost, da je elektroda za brisanje skupna dvema celicama. Izvorno področje deluje kot tranzistor, v ponornem področju pa imamo preko tunelskega efekta realizirano programiranje in brisanje posamične celice v polju brez kontaktov.

Matriko celic lahko pri flash pomnilniku realiziramo v NAND ali NOR izvedbi. Predvsem v NAND izvedbi predstavlja problem optimalno število tranzistorjev v verigi. Pri NOR pa se zaradi velike kapacitivnosti bitnih linij uporablja rešitev z diferencialnim izhodnim ojačevalnikom. Eno vejo napaja tok izbrane pomnilniške celice, drugo pa tok referenčne celice.

Bistvena prednost realizacije NAND flash pomnilnika pred NOR izvedbo je manjša cena na GB. Lastnosti obeh izvedb so podane v tabeli 1.

	NAND flash pomnilnik	NOR flash pomnilnik
Uporaba	USB ključ	BIOS
Minimalna velikost bloka (bitov)	2048	150
Čas branja enega bloka (μ s)	25	0,08
Čas pisanja enega bloka (μ s)	1500 za brisanje + 250 za pisanje	10
Hitrost branja (MB/s)	40	10
Hitrost pisanja (MB/s)	8	0,4
Trajnost celice (vpisov na celico)	od 10000 do 100000	100000
Cena/GB	3 €	50 €

Tabela 1: Primerjava lastnosti NAND in NOR flash pomnilnikov (povzeto po [15])

Flash pomnilnik ima nekatere pomanjkljivosti, vendar pa nudi tudi številne pomembne prednosti:

- Vsebina se po izklopu napajanja ohranja,
- Omogoča hitro naključno branje in
- Dokaj hitro sekvenčno pisanje,
- Ima nizko porabo energije,
- Je robusten,
- Omogoča višjo gostoto zapisa kot RAM pomnilnik in
- Ima nižjo ceno glede na zmogljivost kot RAM pomnilnik.

5.1.8.1 Digitalna logična vrata NAND

Vrata NAND (negirani IN, slika 23) so digitalna logična vrata, ki delujejo tako (tabela 2), da je le v primeru, ko sta oba vhoda v stanju 1, tudi rezultat na izhod enak 1.

Vhod		Izhod
A	B	A AND B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Vhod		Izhod
A	B	A NAND B
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Tabela 2: Pravilnostni tabeli za logični funkciji AND in NAND



Slika 23: Logični simbol za NAND vrata

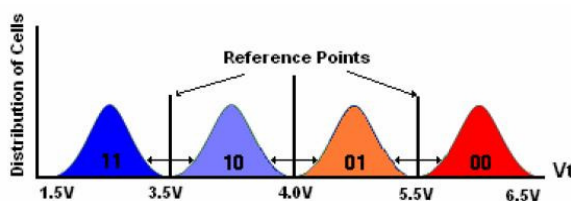
Vrata NAND so funkcionalno polna, kar pomeni, da lahko katero koli drugo logično funkcijo (AND, OR, ...) izvedemo le z uporabo NAND vrat. Za izdelavo vrat NAND potrebujemo tudi manj tranzistorjev kot za katerakoli druga vrata.

5.1.8.2 MLC in SLC celica

Več-nivojska celica (Multi Level Cell) zmore v eno celico ob pomoči različnih nivojev električnega naboja (tabela 3 in slika 24) zapisati več kot en bit podatkov, najpogosteje dva bita na celico. Pogoni SSD, ki uporabljajo več-nivojske celice, so zaradi gostejšega zapisa podatkov cenejši, a pogosteje podvrženi napakam pri branju (BER – Bit Error Rate), ki ji proizvajalci rešujejo z različnimi algoritmi za detekcijo in korekcijo napak. Uporabljajo se predvsem tam (mobilne naprave, USB pogoni, prenosni predvajalniki in kartice), kjer zanesljivost ni na prvem mestu, potrebujemo pa visoko gostoto po sprejemljivi ceni.

Vrednost	Stanje
00	v celoti napolnjena
01	delno napolnjena
10	delno izpraznjena
11	v celoti izpraznjena

Tabela 3: Nivoji pri MLC celici (povzeto po [8])

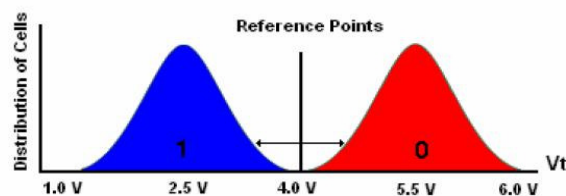


Slika 24: Napetostni nivoji pri MLC celici (povzeto po [8])

Eno-nivojska celica (Single Level Cell) shrani po en bit (0 ali 1, tabela 4 in slika 25) podatkov na celico in s tem zagotovi hitrejše prenose, manjšo porabo energije in daljšo življenjsko dobo celice. Zaradi višje cene se je tehnologija SLC uveljavila predvsem v visoko zmogljivih pogonih, namenjenih predvsem zahtevni strežniški rabi. Pojavljajo pa se tudi že prvi pogoni, ki gredo v večjo varnost in višjo ceno s tem, da en bit podatkov vpisujejo v dve celici.

Vrednost	Stanje
0	napolnjena
1	izpraznjena

Tabela 4: Nivoja pri SLC celici (povzeto po [8])



Slika 25: Napetostna nivoja pri SLC celici (povzeto po [8])

Izdelava in delovanje obeh celic je zelo podobna. Razlika je v napetostnih nivojih (V_t), ki se uporabljajo za manipulacijo stanja v celici. Nekatere razlike so podane v tabeli 5.

	SLC	MLC
Kapaciteta	16 MB	64 MB
Hitrost branja	100 ns	150 ns
Velikost bloka	64 Kb	128 Kb
Organizacija	x8	x16
Trajnost celice	100000 ciklov	10000 ciklov

Tabela 5: Primerjava specifikacij MLC in SLC celic (povzeto po [8])

Zanesljivost SLC celice je 10-krat večja od MLC celice. Ravno zaradi večje gostote zapisa pri MLC celici je obraba le te večja, kar tudi pripomore k manjši zanesljivosti.

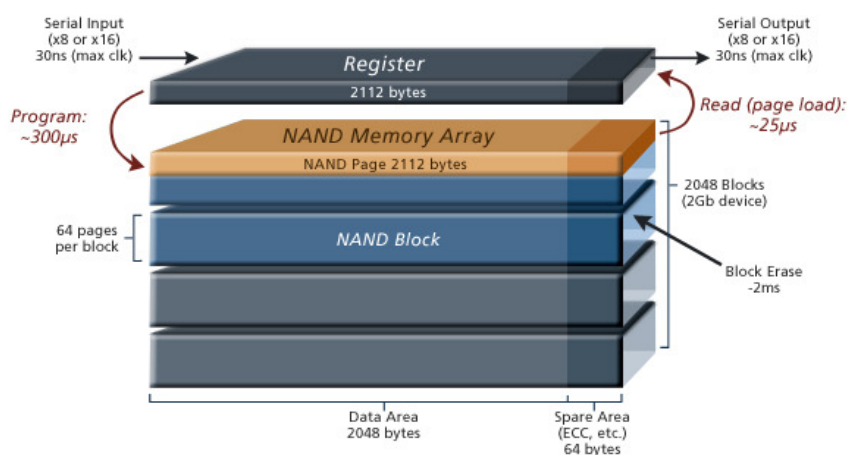
Lastnosti MLC in SLC celic so razvidne iz tabele 6.

	SLC	MLC
Večja gostota zapisa		•
Nižji stroški na bit		•
Vzdržljivost	•	
Večje temperaturno območje delovanja	•	
Nižja poraba energije	•	
Hitrost pisanja/brisanja	•	
Trajnost pisanje/brisanje	•	

Tabela 6: Lastnosti MLC in SLC celice (povzeto po [8])

5.1.8.3 Primer NAND bliskovnega pomnilnika

Za primer NAND bliskovnega pomnilnika sem izbral SLC NAND flash pomnilnik velikosti 2 GB (slika 26), ki shranjuje podatke v polje celic, kjer vsaka celica hrani en bit. Vsak bajt v katerem koli od teh blokov se lahko individualno piše, najmanjši izbrisljivi del v tem polju pa je en blok. V izbrisanim bloku se vsi bit postavijo na "1". Bloki so veliki 128 KB, polje je sestavljeno iz 2048 blokov s 64 stranmi na blok. Vsaka stran ima skupaj 2112 bajtov, od tega je 2048 bajtov rezervirano za podatke, 64 bajtov pa se uporablja za detekcijo in korekcijo napak (ECC Error Correcting Code). Omenjeni pomnilnik je na voljo bodisi z 8 ali 16 bitnim vmesnikom. Podatki se prenašajo prek dvosmernega podatkovnega vodila, ki je lahko široko 8 ali 16 bitov. Pri 16 bitnem načinu se za ukaze in naslove uporabi spodnjih 8 bitov, zgornjih 8 bitov pa se uporablja le za prenos podatkov v ciklih.

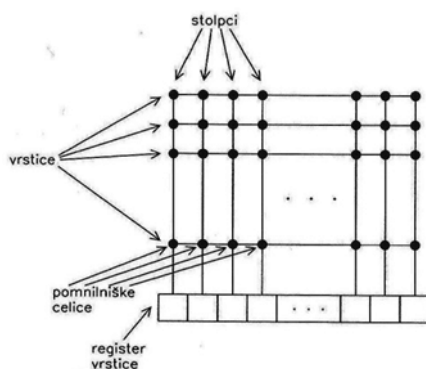


Slika 26: SLC NAND flash pomnilnik velikosti 2 GB (povzeto po [13])

5.1.9 Dinamični bralno/pisalni pomnilniki – DRAM

Pri vseh pomnilniških elementih je informacija shranjena v tako imenovani pomnilniški celici. Statična pomnilniška celica je narejena tako, se v njej shranjena informacija, če je prisotna napajalna napetost, ohrani poljubno dolgo. Pri dinamični pomnilniški celici pa je informacija shranjena kot električni naboj na kondenzatorju. Dinamično celico je mogoče narediti z enim samim tranzistorjem, medtem ko jih je za statično potrebujemo šest.

Pomnilniške celice so pri vseh pomnilnikih urejene v obliki pravokotnega polja, ki mu pravimo bitna ravnina (slika 27). Vsak bit v bitni ravnini ima svoj naslov, ki je sestavljen iz naslova vrstice in naslova stolpca. Če želimo naenkrat dostopati do več bitov, potem potrebujemo več bitnih ravnin. Pri branju se vsebina izbranega bita iz vsake bitne ravnine prenese na enega od podatkovnih signalov. Pri pisanju se vsebina bitov z vsakega od podatkovnih signalov zapiše v izbrani bit vsake od bitnih ravnin. Pri čipu z organizacijo x8, potrebujemo osem bitnih ravnin, kar tudi pomeni, da hkrati dostopamo do osmih bitov. Število podatkovnih signalov je enako številu bitnih ravnin. Število vrstic je pri DRAM pomnilnikih običajno 16-krat ali celo 32-krat več kot stolpcev. Število bitov v vrstici se s tem skrajša, poveča pa se hitrost dostopa.



Slika 27: Bitna ravnina (povzeto po [1])

Prav pri dinamičnih bralno pisalnih pomnilnikih se je pojavila delitev naslova na dva dela, na naslov vrstice in naslov stolpca. Taka delitev je ustrezala bolj enostavni zgradbi dekodirnika. Potrebno število vhodno/izhodnih vezij je pri delitvi naslova na dve polovici najmanjše. Po drugi strani pa je takšno delitev podpirala tudi želja po čim bolj ekonomični realizaciji pomnilnika. Ker je potreben najprej naslov vrstice, naslov stolpca pa potrebujemo šele ob izločanju iskanega bita iz vrstice, se je uveljavil princip naslovnega multipleksiranja.

Dostop do neke celice se naredi tako, da najprej podamo naslov vrstice, v kateri se nahaja celica. Takrat se vsi biti vrstice iz bitne ravnine preberejo v register vrstice. Nato podamo še naslov stolpca in takrat se naredi dostop (branje ali pisanje) do naslovljenega bita v registru vrstice. Ker je branje destruktivno, se mora vsebina registra vrstice pred začetkom dostopa do nove vrstice shraniti nazaj v pomnilniške celice vrstice.

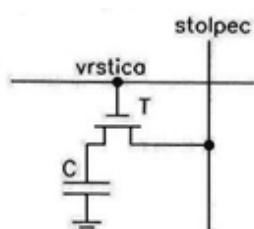
Poleg standardnega načina delovanja, pri katerem moramo za branje določiti vrstico in stolpec ter nato preberemo ali vpišemo samo en bit, poznamo tudi načine dostopa, ki izkoriščajo register vrstice za tako imenovan page mode način dostopa. Ta sloni na preprostem dejstvu, da lahko samo s spreminjanjem naslova stolpca dobimo nov bit. Zahteva torej le spreminjanje signala in ustrezno spreminjanje naslova stolpca. Izboljšava tega načina je fast page mode. Popolnoma poseben je način četverke (nibble mode). V tem načinu se iz matrike ne prebere en sam bit ampak štirje v pomikalni register. Te bite lahko zaporedoma zelo hitro beremo tako, da jih pomikamo v registru. Skupaj s tehniko prepletanja lahko tako dobimo pomnilnike z izredno kratkim časom dostopa. Sprememba na vhodu je tista, ki povzroči generiranje potrebnih signalov za branje ali vpis vsebine v pomnilno celico ko je naslov stolpca določen.

Posebno izvedbo pomnilnikov predstavljajo pomnilniki, pri katerih imamo znotraj vrstice statičen način delovanja. To pomeni, da so vsi potrebni signali za tipalne ojačevalnike, dekodirnike in izhodna vezja generirani na osnovi spremembe naslova stolpca. Izhodne vrednosti se pojavijo v določenem času po spremembi naslova. Operacije vpisa in branja lahko opravljamo tako dolgo kot dopušča maksimalni čas na nizkem nivoju. Na ta način dosežemo znotraj strani maksimalno možno hitrost delovanja.

Tranzistor v pomnilniški celici deluje kot stikalo. Ob aktiviranju signala vrstice se vsa stikala sklenejo in vsi kondenzatorji v izbrani vrstici se povežejo s stolpci. Pri pisanju se na vse signale stolpcev postavi visoko (polnjenje kondenzatorjev, stanje 1) ali nizko stanje (praznjenje kondenzatorjev, stanje 0). Branje je bolj zapleteno, ker je potrebno izmeriti zelo majhen naboj, ki je shranjen v kondenzatorjih. Pred aktiviranjem signala vrstice se na stolpcih najprej vzpostavi napetostni nivo, ki je enak polovici visokega nivoja. Ko se aktivira signal vrstice, se naboj iz kondenzatorjev prenese na stolpce, kar povzroči, da se pri napolnjenih kondenzatorjih napetost nekoliko poveča, pri izpraznjenih pa nekoliko zmanjša.

Na vsak stolpec je priključen občutljiv ojačevalnik, ki zazna razliko in na izhodu stolpca izpiše stanja (0 ali 1), le ta pa se zapišejo v register vrstice. Pri branju se naboj v kondenzatorjih izgubi (destruktivno branje), zato je potrebno izvesti osveževanje (periodično obnavljanje). Osveževanje se izvede vsakič, ko se vsebina registra vrstice zapiše nazaj v bitno ravnino, kar pomeni, da se naenkrat osveži celotna vrstica.

Osnova pomnilne celice DRAM pomnilnika je kondenzator in izbiralni tranzistor. Izbiralni tranzistor je vezan med besedno linijo in bitno linijo. Kapacitivnost elektrode vrat naj bo čim manjša, da dosežemo hiter vzpon signala. Padec napetosti na izvoru in ponoru naj bo majhen, da še dodatno ne zmanjša napetosti, ki jo doseže bitna linija. Kapacitivnost bitne linije naj bo čim manjša, ker to prispeva k višji napetosti na bitni liniji in manjši občutljivosti na motnje. Vse te zahteve si vsaj deloma tudi nasprotujejo.



Slika 28: Pomnilna celica DRAM pomnilnika
(C = kondenzator, T = izbiralni tranzistor)

Kondenzator, ki je s prostim priključkom vezan na substrat celice, se kljub zaprtem tranzistorju počasi prazni. Čas je odvisen od njegove kapacitivnosti. Vzrok za izgubo vsebine je, da ima vsak realni kondenzator izgubni tok (to modeliramo kot vzporedno vezan upor) in da tudi zaprt tranzistor prevaja nek minimalni tok (zaporni tok). Vsebino je zato potrebno periodično osveževati. Opisana celica pa ima v primeri s pomnilno celico SRAM-a na osnovi zapaha še eno pomanjkljivost. Tudi ob branju se vsebina izgubi (pomnilnik destruktivnega tipa). Zato je potrebno vsebino po branju osvežiti. Vendar ima DRAM bistveno prednost, da potrebuje manjše število tranzistorjev.

Ker se kondenzatorji počasi praznijo, je vsako DRAM celico potrebno periodično osveževati, da se podatki ne izgubijo, kar upočasni delovanje. Osveževalni krmilnik določi čas med dvema osveževalnima cikloma. Osveževalni števec pa skrbi, da se osveži celotna matrika (vse vrstice). V vsakem osveževalnem ciklu se morajo osvežiti vse vrstice. Osveževanje je lahko zaporedno ali porazdeljeno. Pri zaporednem se osvežijo vse vrstice, ena za drugo, medtem ko ostale operacije čakajo. Pri porazdeljenem pa je osveževanje vrstic enakomerno porazdeljeno preko celotnega osveževalnega intervala.

Kondenzator v DRAM pomnilniški celici je lahko narejen na dva načina. Prvi je tako imenovani kondenzator v jarku, ki se nahaja pod tranzistorjem in drugi pa kondenzator na skladu, ki je nad tranzistorjem. Kapacitivnost (C - Capacity) je v letu 2007 med 20 in 30 fF (fF - femto Farad, ki je 10^{-15} F). Pri tako majhni kapacitivnosti je naboj v kondenzatorju majhen in je pri polnem kondenzatorju približno 100000 elektronov. Če kondenzator zadenejo kozmični žarki, ki so prisotni povsod, se naboj v kondenzatorju izgubi, z njim pa tudi bit, ki je shranjen v celici. Verjetnost za to je dovolj velika, zato se pri DRAM-ih v strežnikih skoraj vedno uporabljajo dodatni biti za detekcijo in korekcijo napak.

Pri snovanju DRAM-ov se od vsega začetka pojavljata dva problema. Prvi je dovolj velika kapacitivnost kondenzatorja v pomnilni celici in drugi je dovolj občutljiv in na motnje neobčutljiv ojačevalnik, ki mora biti dovolj majhen, da ga lahko umestimo med bitni liniji. Število pomnilnih celic na bitni liniji določa:

- Potreben signal, ki ga pogojuje velikost kapacitivnosti pomnilne celice,
- Število aktiviranih tipalnih ojačevalnikov in od tega odvisna poraba moči,
- Število ciklov ure, ki se zvrstijo med dvema osveževanjema in
- Čas razširjanja signala na bitni liniji.

Vse večja rast kapacitete pomnilnikov pa ima za posledico tudi vse večji vpliv motenj na brezhibno delovanje. Kot prvega omenimo sevanje alfa (α). Izvira iz materialov, ki se uporabljajo pri pakiranju (predvsem ohišje). Alfa žarki lahko povzročijo nastanek milijonov parov elektronov in lukenj v substratu, ki lahko izpraznijo naboj kondenzatorjev pomnilnih celic, tudi bitnih linij iz polisilicija. V začetku so domnevali, da je vzrok alfa sevanja tudi v kozmičnem sevanju, toda eksperimentalni testi so to predpostavko ovrgli. Proti temu sevanju se borijo na dva načina: Prvi je bil v prekrivanju celotne površine integriranega vezja z poliamidom, ki preprečuje prehod alfa žarkov, drugi pa je v tem, da so dvignili kapacitivnost celice v področje 40 do 50 fF.

Ta kapacitivnost je zato ostala praktično nespremenjena skozi vse naslednje generacije DRAM vezij in to kljub temu, da so razvili ojačevalnike z dovolj majhnim številom gradnikov in bistveno večjo občutljivostjo. Ta se je posredno kazalo v daljšanju intervala med dvema zaporednima osveževanjema.

Podrobnejše študije so pokazale, da moramo upoštevati naslednje izvore motenj:

1. Nesimetričnost dinamičnih tipalnih ojačevalnikov, ki nastane v proizvodnem procesu in v polovični kapacitivnosti slepih celic,
2. Šum v matriki, ki se pojavlja zaradi kapacitivnega sklopa med besednimi in bitnimi linijami ob dostopu do vrstice, ko spremeni stanje večje število bitnih linij,
3. Šum iz perifernih vezij, kot so generatorji potrebnih signalov ure,
4. Šum na napajalnih linijah.

Motnjam se izognemo tudi z uporabo ozemljitve besedne linije. Besednim linijam so dodali posebno povratno žilo nizke upornosti za zvezo z ozemljitvijo. Z aktivnimi tranzistorji, ki so vzdrževali nizek nivo neizbranih besednih linij so zmanjšali efekt kapacitivnega sklopa.

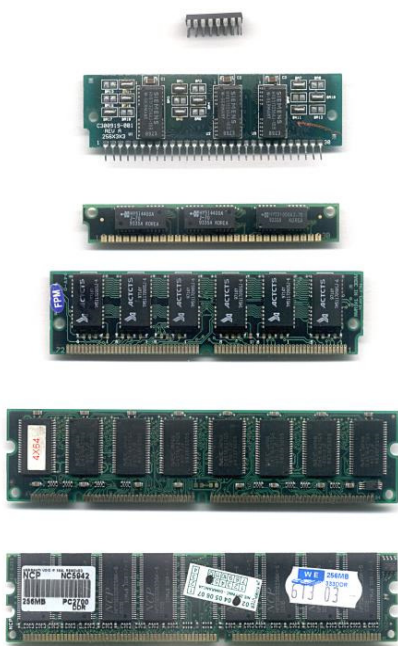
Taki običajni DRAMi se danes imenujejo asinhronski. Pri asinhronskem načinu se določi minimalni čas, potreben za izvršitev operacije. Če se zgodi fronta ure pred potekom tega časa, je

treba počakati na naslednjo fronto, preden se lahko začne naslednja operacija, kar zelo upočasnjuje delovanje. Procesor mora brezdelno čakati, da DRAM konča svoje interne operacije.

Pri sinhronskem (SDRAM) načinu delovanja se informacija iz procesorja zapahne pod kontrolo sistemske ure, kar omogoča procesorju izvajanje drugih nalog. Po določenem številu urinih ciklov so podatki na voljo in procesor jih lahko bere iz izhodnih linij. Osnovna razlika v primerjavi z asinhronskimi DRAMi je v tem, da v sinhronskemu DRAMu uporaba cevovodnega načina delovanja omogoča, da lahko damo zahtevo za naslednji dostop še preden je prejšnji dokončan.

DDR (Double Data Rate) SDRAM omogoča aktivacijo izhodnih operacij na čipu ob pozitivni in ob negativni fronti ure. Učinek je podvojitev hitrosti. Naslov in ukazi so vzorčeni ob pozitivni fronti sistemske ure, podatki (vhod/izhod) pa se menjavajo (vzorčijo/krmilijo) ob obeh frontah.

Na sliki 29 je prikazan razvoj DRAM pomnilniških modulov, v tabeli 7 pa specifikacije.



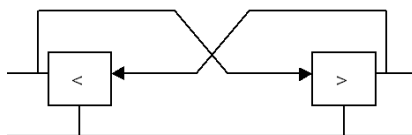
Slika 29: DRAM pomnilniški moduli (povzeto po [7])

Tip	Leto izdelave	Frekvenca ure	Širina podatkovne poti	Pasovna širina	Napetost
FPM	1990	25 MHz	64 bitov	200 MB/s	5 V
EDO	1994	40MHz	64 bitov	320 MB/s	5 V
SDRAM	1996	133 MHz	64 bitov	1,1 GB/s	3,3 V
RDRAM	1998	400 MHz (x2)	16 bitov	800 MB/s	2,5 V
DDR SDRAM	2000	266 MHz (x2)	64 bitov	4,2 GB/s	2,5 V
DDR2 SDRAM	2003	533 MHz (x2)	64 bitov	8,5 GB/s	1,8 V
DDR3 SDRAM	2007	800 MHz (x2)	64 bitov	12,8 GB/s	1,5 V

Tabela 7: Lastnosti DRAM pomnilnikov skozi razvoj (povzeto po [3])

5.1.10 Statični bralno/pisalni pomnilnik – SRAM

Pomnilno celico SRAM-a imenujemo zapah (latch oziroma flip-flop, slika 30). Gre za povezavo dveh ojačevalnikov s pozitivno povratno zanko.



Slika 30: Ojačevalnik imenovan zapah s pozitivno povratno zanko (povzeto po [3])

Kot pri bralnem pomnilniku so tudi tu celice razporejene v matriki in ležijo v kanalu med bitnima linijama na eni strani in med besednima linijama na drugi. Tako kot pri DRAM-ih tudi pri SRAM-ih poznamo asinhronske in sinhronske SRAM-e.

5.2 Prednosti pogonov SSD

Pogoni SSD so znani prav po svoji hitrosti. Zagon enote je hiter (v trenutku), ker nimajo gibljivih delov, ki bi jih bilo treba spraviti v gibanje. Dostopni in iskalni časi so v primerjavi z magnetnim diskom izredno kratki, saj nimajo bralno-pisalnih glav. To pripomore na primer k hitrejšemu zagonu operacijskega sistema.

Pogoni so praktično neslišni, razen nekaterih visoko zmogljivih, ki imajo vgrajene ventilatorje. Poraba energije je v primerjavi z magnetnimi diski precej manjša. Mehanske okvare so prava redkost, pogoni so sposobni preživeti nenadne sunke, močne vibracije in skrajne temperature (povprečni pogon SSD lahko nemoteno deluje celo pri 70°C).

Nezanemarljiv vidik je tudi velikost in teža pogonov. Večina pogonov SSD je velikosti 2,5 palca, tiste z manjšo zmogljivostjo najdemo tudi v 1,8 palični obliki. Pogoni SSD enake zmogljivosti kot primerljivi magnetni diski so tudi precej lažji in s tem pripomorejo k manjši skupni teži celotne naprave.

Vmesnik (običajno SATA) pogona SSD je identičen vmesniku magnetnega diska, kar pripomore k enostavni zamenjavi.

Proizvajalci pogonov SSD za zanesljivost izdelkov pogosto navajajo MTBF (Mean Time Between Failures – vmesni čas med napakama), ki pri nekaterih sega čez 2 milijona delovnih ur. Če že pride do napake pogona, je napaka z vidika uporabnika bistveno manj kritična. Večina napak pri pogonih SSD se zgodi pri pisanju, ko odpove kaka pomnilniška celica, katero pogon zazna in jo preneha uporabljati, ne da bi uporabnik to sploh zaznal. Odpoved se opazi šele pri zmanjšani zmogljivosti hranjena podatkov. Večina napak pri magnetnih diskih se (ravno nasprotno kot pri pogonih SSD), zgodi pri branju, to pa večinoma pomeni tudi izgubo podatkov.

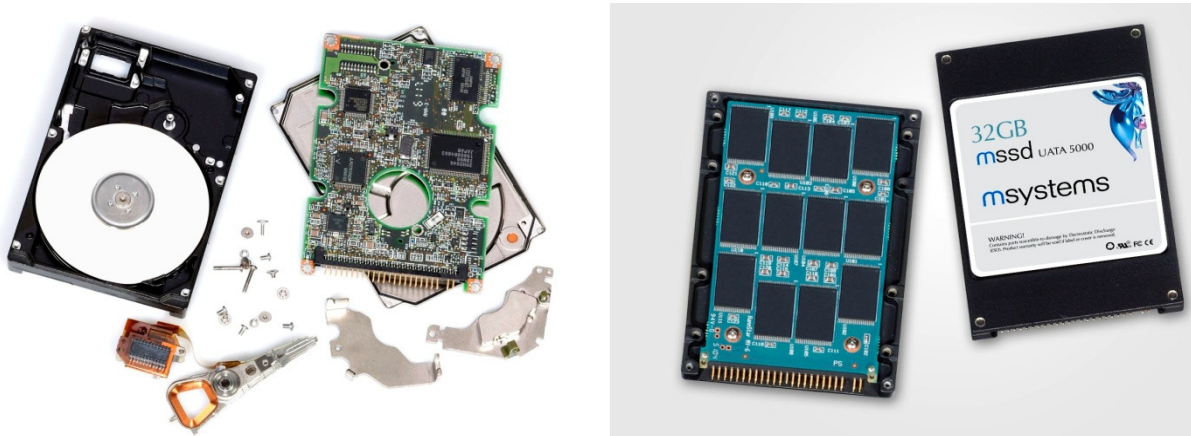
5.3 Slabosti pogonov SSD

Poglavitna slabost pogonov SSD je visoka cena. Vsi pogoni, še posebej tisti zadnje generacije, stanejo bistveno več kot magnetni diski. Razmerje za kapaciteto 1 GB je od 1:16 pa vse do 1:50 v korist magnetnih diskov. Razmerja pri zmogljivejših SLC SSD pogonih, ki se uporabljajo predvsem v strežniških računalnikih, pa se lahko povečajo tudi do 1:150. Zmogljivost hranjenja podatkov (velikost diska) je pri pogonih SSD še vedno nekoliko manjša, čeprav so izdelovalci že prikazali delujoče primerke pogonov velikosti 1 TB. Za razliko od cene se prednost magnetnih diskov v tem primeru hitro manjša.

Nekoliko več težav imajo pogoni SSD pri pisanju podatkov. Predvsem naključno pisanje predstavlja velike težave. Pogoni SSD hkrati brišejo precej velike bloke podatkov, od 0,5 do 1 MB, zato manjše datoteke upočasnijo naključno pisanje. Zadnja generacija pogonov SSD z uporabo RAID-u podobnih tehnik (Redundant Array of Inexpensive Disks ali Redundant Array of Independent Disks) ta problem že skoraj popolnoma odpravlja.

Največji ugovor proti pogonom SSD je poleg visoke cene omejeno število ciklov pisanja in branja. V povprečju naj bi se MLC celice iztrošile nekje po 1000 ali 10000 pisalno/bralnih ciklusih, pri SLC celici pa nekje pri 100000 ciklusih. Izdelovalci se tej omejitvi pri MLC celici poskušajo izogniti s tako imenovano uravnoteženo obrabo (wear leveling), ki poskuša izravnati obrabo celic s tem, da enakomerno razporeja pisanje po celotnem pogonu.

Določeni proizvajalci celo priporočajo, da na pogonih SSD ne poganjamo defragmentacijskih programov, ki naj bi dodatno obrabljali celice. Spet drugi se s tem ne strinjajo, saj se pogoni SSD na datotečnem sistemu NTFS (New Technology File System) ob vsakodnevni rabi hitro "nasmetijo" in se hitrosti prenosa občutno zmanjša.



Slika 31: Magnetni disk in pogon SSD (povzeto po [5])

6 PRIMERJALNI TEST MAGNETNEGA DISKA IN POGONA SSD

Primerjalni test, rezultati so v tabeli 8, je bil izveden z magnetnim diskom Western Digital (WD) Caviar Black WD7501AALS in SSD diskom Kingston Intel SSD SNM125-S2 80 GB (slika 32).

Pogon SSD zadnje generacije, ki je nastal v skupnem sodelovanju Kingston-a in Intel-a, je daleč najhitrejši pogon. Hitrosti zaporednega branja se povsem približajo robu zmogljivosti vmesnika SATA 2. Najvidnejši napredek nove generacije SSDjev je izboljšana tehnologija SSDnow, ki podatke zapisuje zaporedno in naključno s praktično enako hitrostjo.

	Kingston Intel SSD SNM125-S2 80 GB	WD Caviar Black WD7501AALS
Zaporedno branje (64 KB)	217,6 MB/s	104,6 MB/s
Zaporedno pisanje (64 KB)	76,1 MB/s	104,4 MB/s
Naključno branje (64 KB)	132,8MB/s	7,9 MB/s
Naključno pisanje (64 KB)	78,3 MB/s	17,2 MB/s
Povprečni dostopni čas	0,1 ms	11,3 ms
Zagon Windows XP SP3	22 s	33 s
Cena za GB	6,4 €	0,15 €

Tabela 8: Primerjalni test (povzeto po [5])



Slika 32: Pogon SSD Kingston Intel SSD SNM125-S2 80 GB in Magnetni disk WD Caviar Black WD7501AALS (povzeto po [5])

7 VPLIV SSD POGONOV NA MICROSOFT SQL SERVER 2008

Rezultati testiranj so pokazali, kako pogoni SSD pozitivno vplivajo na odzivnost podatkovnih baz Microsoft SQL Server 2008. Ugotovitve so prikazane z vidika končnega uporabnika z uporabo primerjalne analize TPC-C (Transaction Processing Performance Council) nad zbirko podatkov OLTP (On-Line Transaction Processing). TPC-C je analiza zmogljivosti in učinkovitosti sistema pri sprotni obdelavi transakcij.

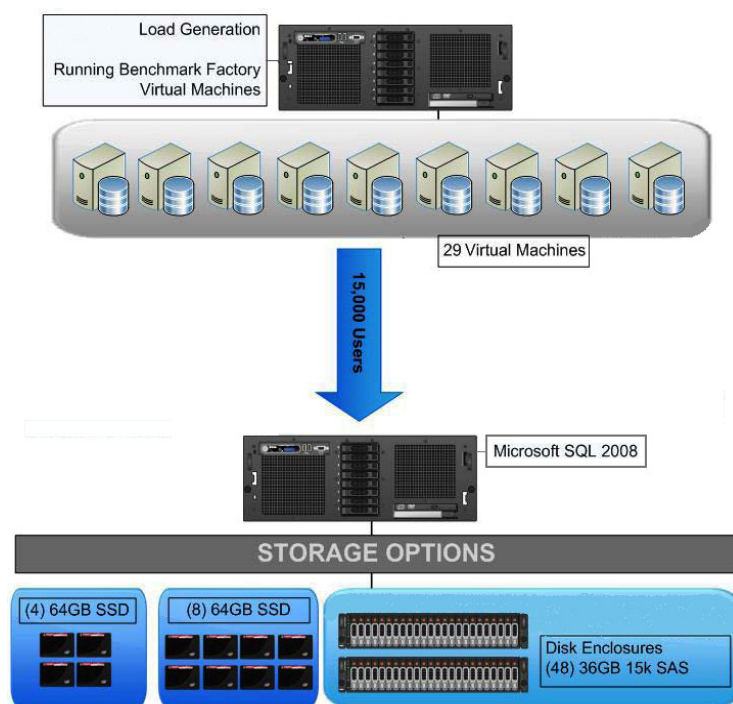
Rezultati so pokazali boljši odzivni čas, kljub znatno povečani obremenitvi sistema pri 15000 uporabnikih. Z uporabo pogonov SSD je bil prihranek energije kar 45 odstotkov v primerjavi s tradicionalnimi trdimi diski, zmanjšal se je hrup in možnosti za strojno napako. Da bi zagotovili večjo učinkovitost trdih diskov, je potrebno povečati njihovo število ne glede na zmogljivosti. Z uporabo pogonov SSD lahko zagotovimo enako ali višjo stopnjo učinkovitosti z znatno manj infrastrukture.

Ključna merila, ki so bila izbrana kot temelj pri tem preizkusu:

1. Prikaz učinkovitosti pogonov SSD in njihov odzivni čas,
2. Uporaba primerjalne analize TPC-C,
3. To analizo izvajati nad zbirko podatkov OLTP z vidika končnega uporabnika,
4. Ohraniti enake nastavitve baze podatkov z enako lokacijo in
5. Z uporabo enake strojne in programske opreme.

Analiza se je izvajala nad bazo podatkov velikosti 105 GB z različnim številom diskovnih pogonov (podrobnosti infrastrukture so prikazane na sliki 33):

- 48 SAS (Serial Attached SCSI) pogonov po 36 GB konfiguriranih kot RAID 10 z zunanjimi RAID upravljalnikom.
- 8 SSD pogonov po 64 GB konfiguriranih kot RAID 10 z zunanjimi RAID upravljalnikom.
- 4 SSD pogoni po 64 GB konfigurirani kot RAID 10 z internim RAID upravljalnikom.



Slika 33: Podrobnosti testne infrastrukture (povzeto po [12])

Učinkovitost in razširljivost baze podatkov je ocenjena na podlagi dveh glavnih parametrov:

1. Odzivni čas in
2. Število končnih uporabnikov.

Za končnega uporabnika je najbolj pomemben odzivni čas. Če se povprečni odzivni čas dostopa do baze podatkov dvigne nad eno sekundo, se učinkovitost s strani končnega uporabnika šteje za nesprejemljivo. Zaradi te predpostavke je število uporabnikov, ki dostopajo do baze podatkov, sprejemljivo, dokler je odzivni čas manjši od ene sekunde.

Velika večina strežnikov z bazami podatkov ima vgrajenih dovolj procesorjev in pomnilnika, vendar pa jim primanjkuje resursov za izvajanje vhodno/izhodnih operacij. Microsoft SQL Server 2008 je aplikacija, ki je zelo zahtevna glede vhodno/izhodnih operacij za izvajanje nalog nad bazo podatkov. Kadar je zbirka podatkov obsežna, potrebujemo za zadovoljevanje potreb tisočev, če ne celo več deset tisočev uporabnikov na ducate, če ne stotine diskovnih pogonov.

Tolikšno število diskov običajno ni potrebno zaradi količine podatkov, temveč zaradi zagotavljanja zmogljivosti oziroma izvedbe zahtev nad podatki. Vsak posamezen disk lahko omogoči le določeno količino vhodno/izhodnih operacij. Ko pride do nasičenja, odzivni čas naraste na nesprejemljivo raven.

7.1 Specifikacija uporabljene strojne opreme

Za pogon SSD so bili uporabljeni pogoni Intel X25-E Extreme SATA kapacitete 32 GB in 64 GB, ki temeljijo na SLC NAND flash pomnilniški celici. Za sistem magnetnih diskov pa pogoni Seagate 15K SAS kapacitete 36 GB (tabela 9).

	48x Seagate 15k SAS	8x Intel's X25-E 32GB	4x Intel's X25-E 64GB
Vmesnik krmilnika	SAS/SAS, 15k	SSD/SATA	SSD/SATA
Število pogonov	48	8	4
RAID nivo	RAID 10	RAID 10	RAID 10
Kapaciteta pogona	36 GB	64 GB	64 GB
Skupna formatirana kapaciteta	116 GB	116 GB	116 GB

Tabela 9: Podrobnosti o testnih pogonih (povzeto po [12])

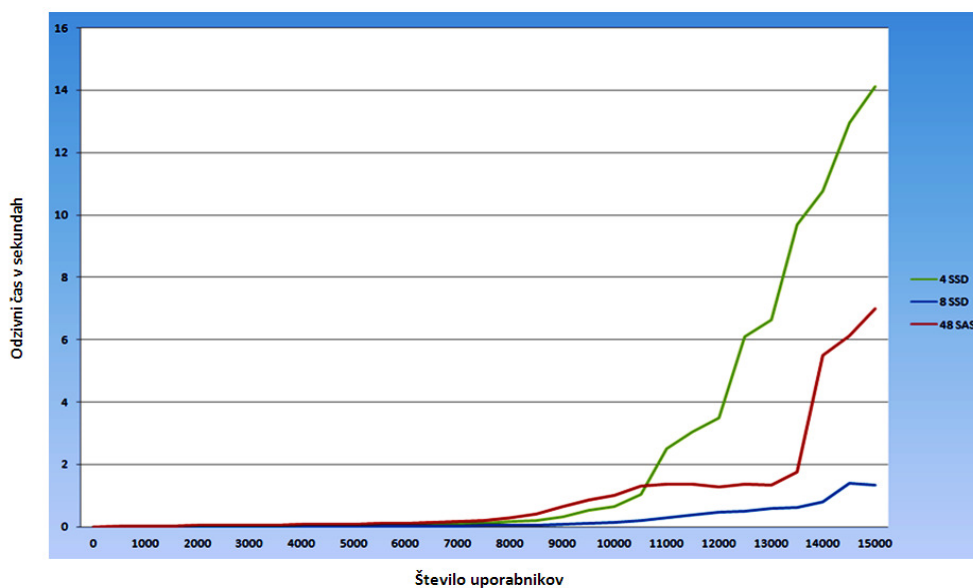
Za strežniški sistem je bil uporabljen strežnik s štirimi procesorji s frekvenco ure 2.4 GHz in 64 GB RAM pomnilnika (tabela 10). Izbrano število procesorjev in količina pomnilnika je precej večje, kot je potrebno. Namen tega je, da se zagotovi kar največji poudarek na testiranju diskovne infrastrukture. Microsoft Windows Server 2008 Enterprise 64-bitna izdaja je bil izbran za operacijski sistem, za upravljanje z bazo podatkov pa Microsoft SQL Server 2008 Enterprise.

CPE	Intel Xeon E7450
Frekvenca CPE	2.4 GHz
Število CPE	4
Število jeder v CPE	6
Pomnilnik	PC2-5300 FB-DDR2
Kapaciteta enega pomnilnika	2048 MB
Število pomnilniških enot	32
Skupna kapaciteta pomnilnika	64 GB
Mrežna kartica	Broadcom Corporation BCM5708C
Operacijski sistem	Windows Server 2008 Enterprise 64-bit
Datotečni sistem	NTFS

Tabela 10: Podrobnosti o strežniku (povzeto po [12])

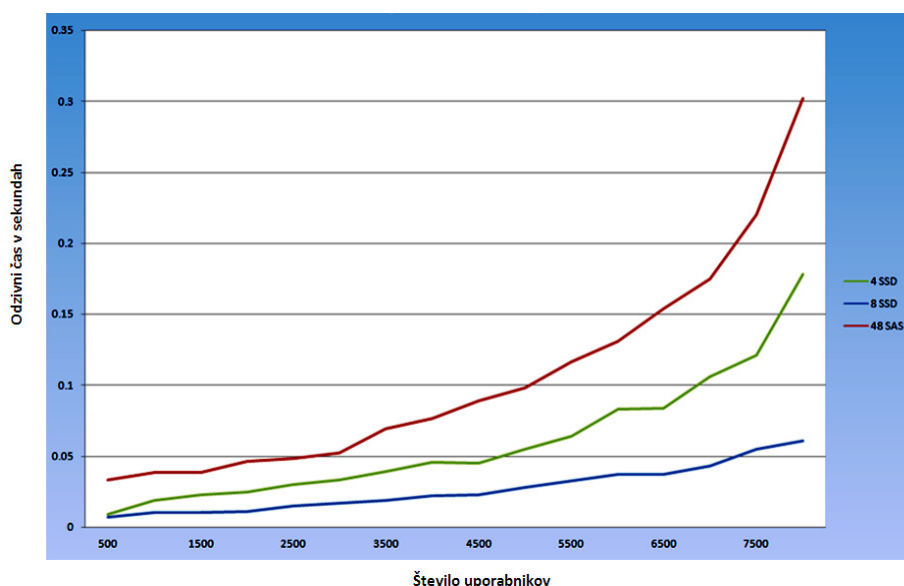
7.2 Rezultati testiranja

Celoten test se je izvedel v 500 poskusnih ciklih oziroma ponovitvah. Na grafu 1 je podan odzivni čas v sekundah, pri različnem številu uporabnikov (od 0 do 15000), ki so dostopali do baze podatkov. Pri 10000 uporabnikih je odzivni čas pri 48-pogonih SAS dosegel nesprejemljivo raven. Celo samo 4 pogoni SSD so se odrezali bolje, saj so ozko grlo dosegli pri 10500 uporabnikih.



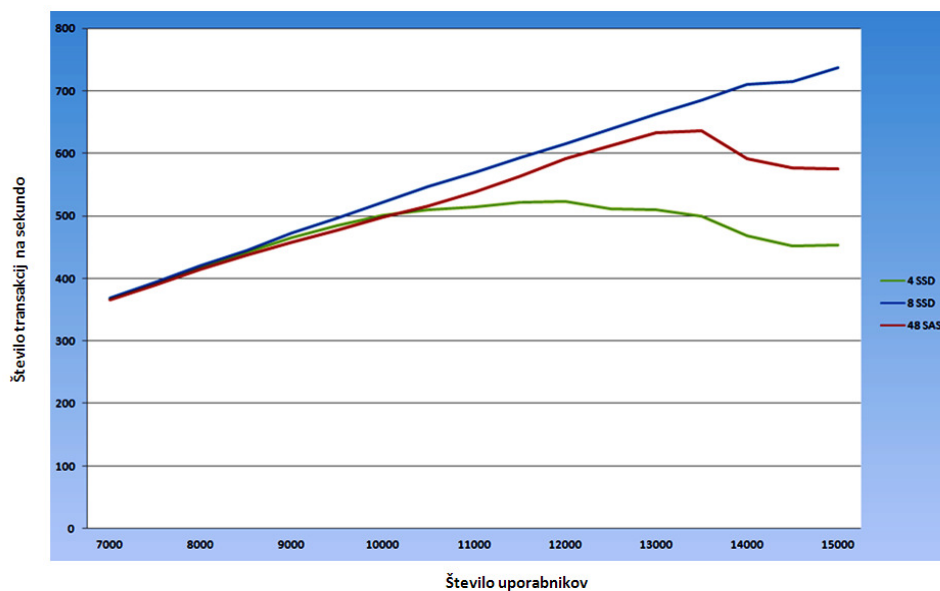
Graf 1: Odzivni čas v odvisnosti od števila uporabnikov (od 0 do 15000) (povzeto po [12])

Na grafu 2 je podroben pregled nad odzivnimi časi pri 500 do 8000 uporabnikih. Razvidno je, da je z uporabo pogonov SSD možno opraviti opravilo v povprečju 50% hitreje.



Graf 2: Podroben pregled nad odzivnim časom pri 500 do 8000 uporabnikih (povzeto po [12])

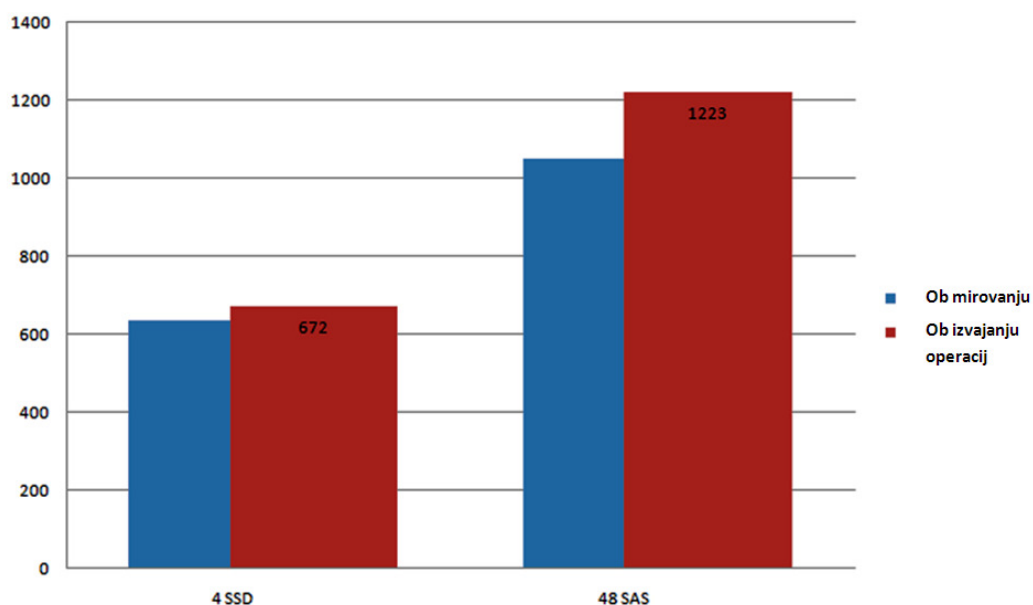
Povečanje odzivnega časa povzroči zmanjšanje števila dejanskih transakcij na sekundo. Kot je razvidno iz grafa 3, začne število transakcij pri 4-ih pogonih SSD upadati pri okoli 12000 uporabnikih, pri SAS pogonih pri 13.500 uporabnikih. Pri 8 pogonih SSD število transakcij še vedno skoraj linearno raste, vse do obremenitve sistema s 15000 uporabniki.



Graf 3: Število transakcij na sekundo v odvisnosti od števila uporabnikov (povzeto po [12])

7.3 Poraba energije

Ob zamenjavi tradicionalnih magnetnih diskov s pogoni SSD je bil prihranek energije zelo impresiven. 48 SAS diskov v primerjavi s 4-mi pogoni SSD, ki so na testu primerljivo uspešni kot pogoni SAS, je pokazal za kar za 551 W manjšo porabo energije na uro. 45 odstotkov energije bi prihranili ob zamenjavi pogonov SAS za pogone SSD ob približno enaki obremenitvi. Poraba energije je prikazana na sliki 34.



Slika 34: Poraba energije v vatih (W) (povzeto po [12])

8 KAJ SLEDI PO POGONIH SSD?

Zelo obetavna za prihodnjih 5 do 10 let je organska nanotehnologija – tehnologija živih nanokončičev. Razvoj vse več nanokomponent, zasnovanih na nanožicah, nanocevkah in drugih nanostrukturah, nas približuje obdobju superhitrih nanoračunalnikov.

Gordon Moore je leta 1965 napovedal, da se bo število tranzistorjev, ki so jih proizvajalci sposobni izdelati na čipu podvojilo vsako leto. Leta 1975 je napoved popravil, da se bo število tranzistorjev podvojilo vsaki dve leti. Po zaslugi podvojitev števila tranzistorjev na vsaki dve leti, ki v grobem velja še danes se je število tranzistorjev na silicijevem čipu v manj kot pol stoletja povečalo z enega samega na skoraj milijardo. Napredek v miniaturizaciji komponent integriranega vezja je neverjetno izboljšal sposobnost digitalnih strojev, da izvajajo logične operacije in shranjujejo podatke. Ta tehnološki napredek je omogočil revolucionarne spremembe v našem vsakdanjem življenju in delu ter ustvaril največjo in najvplivnejšo industrijo na svetu.

8.1 NANOTEKNOLOGIJA

V svetu, ki ga poznamo, so vsi predmeti narejeni iz atomov. Ker je velikostni razred orodij, s katerimi manipuliramo nad molekulami, manjši kot 10^{-9} m, se je teh postopkov prijelo ime nanotehnologija. Nanotehnologije ne moremo definirati samo s termini dimenzij. Gre namreč za konvergenco disciplin, kot so fizika, kemija in biologija. Največji problem predstavlja sedanja tehnologija, kar v zelo splošnem pomeni sestavljanje lego kock z boksarskimi rokavicami. Nanotehnologija pa je orodje, ki bo snelo te rokavice. Vsem tehnologijam, ki jim lahko dodamo predpono nano, pa je skupno to, da mora biti velikost gradnikov največ 1000 nanometrov.

Pri manipulaciji na največ mikrometrskem velikostnem nivoju, pri kateri uporabljamo termine nanotehnologija, molekularna nanotehnologija in proizvodnja, morajo le te zadostiti naslednjim pogojem:

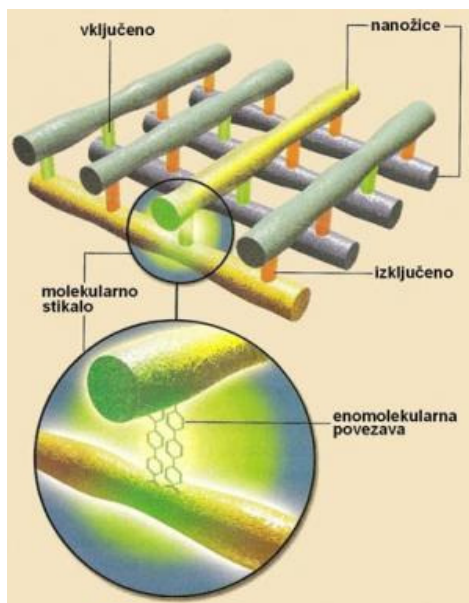
1. Vsak atom mora biti na svojem mestu.
2. Vse strukture se morajo podrežati fizikalnim zakonom na molekularnem nivoju.
3. Zaželena je ekonomičnost procesa.

Trenutno poznamo dva načina za doseg teh ciljev in sicer samosestavljanje in pozicijsko nadzorovano sestavljanje.

8.2 ARHITEKTURA PREČK

Velikost silicijevih tranzistorjev se že desetletja nenehno zmanjšuje, njihove zmogljivosti pa povečujejo. Silicijevo integrirano vezje se bo v največ poldrugem desetletju zmanjšala na skoraj molekularne razmere. Preden se to zgodi, bodo raziskovalci morali najti povsem nove rešitve, s katerimi bi presegli mejo silicijevih čipov, ki je na približno 10 nanometrov oziroma dolžini 30 atomov. Približevanje silicijevim fizičnim omejitvam sili raziskovalce k iskanju nekonvencionalnih materialov, struktur in postopkov. Alternativne rešitve, bi morale biti pripravljene za komercialno uporabo v manj kot desetih letih.

Največ raziskav med morebitnimi kandidati za nanoračunalnike so doslej izvedli z arhitekturo prečk (prečke nanožic, slika 35). V rešitvi, ki jo razvijajo v podjetju Hewlett-Packard (HP), so prečke vzporedne žičke, debele manj kot 100 atomov, ki jih pod kotom 90 stopinj prekrži druga skupina vzporednih žičk. Med dvema skupinama nanožic je sloj materiala, ki ga je moč električno spodbujati, da prepušča več ali manj električnega toka. Na spojnih mestih se tako oblikujejo stikala, ki lahko obdržijo stanje vključeno (1) ali izključeno (0). Spoj dveh prečk je ločen z eno samo enoplastno molekulo, ki ima normalno visoko upornost (izključeno - rdeče), pri višji negativni napetosti pa se upornost zmanjša in vzpostavi tok elektronov med prečkami (vključeno - zeleno).



Slika 35: Prečke nanožic (povzeto po [14])

Tovrstne prečke nanožic imajo naslednje dobre lastnosti:

1. Zaradi pravilnosti obrazcev se lahko proizvajajo.
2. Pravilna množica spojev omogoča razmeroma lahko odpravljanje defektnih delov.
3. Za gradnjo struktur je mogoče uporabiti različne materiale in postopke.
4. Preprosta geometrija omogoča enostavno izdelavo pomnilnikov, logike in povezav ter njihovo prilagajanje.

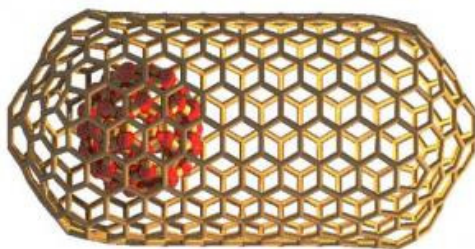
8.3 GOSTOTA ZA LETO 2018

Podjetje HP je izdelalo 16-bitni nanopomnilnik z gostoto 100 milijard bitov na kubični centimeter. Zahteve za proizvodnjo takšnih pomnilnikov so tako kompleksne, da jih bo industrija dosegla šele v letu 2018. Raziskovalci podjetja HP razvijajo različne modele vezja, ki temeljijo na prečkah nanožic. V nadaljnjem razvoju morajo raziskovalci zagotoviti skupni napredek na vseh treh področjih (v arhitekturi, fiziki in proizvodnji naprav).

Zadnja leta kot medij razvoja nanoračunalnikov postajajo še privlačnejše enoplastne ogljikove nanocevice (nanocevni tranzistorji). Po nekaterih izračunih bo s takšnimi tranzistorji mogoče doseči 10-krat večje hitrosti v primerjavi s podobnimi napravami, zasnovanimi na siliciju, z bistveno manjšo porabo energije.

Glavna ovira nadaljnjega razvoja struktur iz nanožic je nezmožnost nadzorovanega povezovanja nanocevnih tranzistorjev v kompleksna integrirana vezja.

Nano pomnilnik na sliki 36 je sposoben izvajanja trilijon operacij v sekundi.



Slika 36: Nano pomnilniški element (povzeto po [14])

8.4 NA PRAGU NANOČUDES

Podjetje IBM je lani izdelalo prvo integrirano vezje na osnovi ogljikovih nanocevk, zasnovano na eni sami molekuli. Z vzpostavitvijo kompletnega vezja okrog ene nanocevke je IBM prišel do približno milijonkrat večje hitrosti, kot je bilo prej mogoče z večkratnimi nanocevkami. Novi nananoproizvodni procesi že danes omogočajo superiorne potenciale nanocevne elektronike.

Profesor Richard Feynman, s Kalifornijskega tehnološkega inštituta Caltech, ki je prejel Nobelovo nagrado za temeljni prispevek v kvantni elektrotermodinamiki, je dejal, da bo nekoč mogoče upravljati atomsko strukturo stvari do točke, ko bomo lahko vse informacije na svetu shranili v prostor velikosti glavice bučike. Sestavljanje in povezovanje večkratnih slojev funkcionalnih nano blokov bo verjetno prej ali slej pripeljalo do resničnih tridimenzionalnih računalniških strojev in nanoračunalniških sistemov. Naprave s kvantnimi fenomeni bodo uporabljene za kvantno kodiranje in kvantno računalništvo. Vgrajevanje nanoelektronskih naprav v biozdružljive polimere bo pripeljalo do novih oblik pametnega tkiva ali hibridnih bionanoelektrontronskih možganov.

9 ZAKLJUČEK

Rdeča nit današnjega trga je energijska učinkovitost in čim daljša avtonomija računalniških sistemov. Klasični magnetni diski, kot jih poznamo že vsaj 20 let, so poleg visoke energijske porabe, najpogostejši krivci za počasno delo računalniških sistemov ter na prvem mestu tudi razlog za izgubo podatkov.

Dejstvo je, da tehnologija pri magnetnih diskih še vedno vztrajno napreduje v smeri hitrejšega vrtenja plošč, gostejšega zapisa, boljše in zanesljive mehanike, kar prispeva k še večjim zmogljivostim diskov in s tem tudi računalniških sistemov. Kljub temu pa ne morejo konkurirati pogonom SSD.

Najbolj pričakovani mejnik v bližnji prihodnosti so torej diski, v celoti sestavljeni iz Flash (bliskovnega) pomnilnika - pogoni SSD. Slabost slednjega je, da ne omogoča neposrednega dostopa do katerekoli pomnilne lokacije, temveč se je treba ukvarjati z bloki podatkov. Druga slabost, ki pa bo z napredovanjem tehnologije in množični proizvodnji izzvenela, je cena. Pogoni SSD so v primerjavi z magnetnimi diski neverjetno hitri pri dostopu do naključnih podatkov. So manjši, neslišni, delujejo v nižjem temperaturnem območju, so odporni na tresljaje (spremembo višine in pritisk, padce), magnetne motnje ter porabijo manj energije. Omogočajo hitrejši zagon sistema, saj nimajo faze zagona na delovne vrtljaje.

Na podlagi opravljenih testov lahko zaključim, da je pogon SSD zelo dobra zamenjava magnetnega diska.

10 LITERATURA

- [1] Dušan Kodek, Arhitektura in organizacija računalniških sistemov, Bi-Tim, 2008, ISBN 978-961-6046-08-4
- [2] Igor Škraba, Vhodno izhodne naprave – magnetni diski (povzetek predavanj z enakim naslovom)
- [3] Branko Šter, Digitalna tehnika 2 (skripta predavanj z enakim naslovom)
- [4] MaFiRaWiki, Trdi disk, dostopno na: http://wiki.fmf.uni-lj.si/wiki/Trdi_disk
- [5] Monitor, Zares trd(n)i diski, dostopno na: <http://www.monitor.si/clanek/zares-trd-n-i-diski>
- [6] Wikipedia, MOSFET, dostopno na: <http://en.wikipedia.org/wiki/Mosfet>
- [7] Wikipedia, (EEP)ROM, dostopno na: http://en.wikipedia.org/wiki/Read-only_memory
- [8] Super Talent Technology, Inc., SLC vs. MLC: An Analysis of Flash Memory, dostopna na: <http://www.supertalent.com>
- [9] Texas Memory System, Flash Solid-State Disk, 2008, dostopno na: <http://www.texmemsys.com/files/f000252.pdf>
- [10] Wikipedia, Flash memory, dostopno na: http://en.wikipedia.org/wiki/Flash_memory
- [11] Wikipedia, Solid-state drive, dostopno na: http://en.wikipedia.org/wiki/Solid-state_drive#Comparison_of_SSD_with_Hard_Disk_Drives
- [12] Kingston Technology Corporation, Effects of Solid-State Drives on Microsoft SQL Server 2008, dostopna na: http://www.kingston.com/ssd/pdf_files/MKP_104_Kingston_WhitepaperSSD_ColorFINAL.pdf
- [13] Micron, NAND Flash Basics, dostopna na: <http://www.micron.com>
- [14] Onstran silicija, dostopno na: http://www.mojmikro.si/geekfest/pogled_naprej/onstran_silicija

- [15] David A. Patterson in John L. Hennessy, Computer Organization and Design (The Hardware / Software Interface), 2008, ISBN 978-0-12-374493-7
- [16] Shan X. Wang in Alexander M. Tratorin, Magnetic Information Storage Technology, Academic Press, 1999, ISBN 0-12-734570-1