Razvoj NAND memorijskih čipova i sučelja

Golubić, Bruno

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Organization and Informatics / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet organizacije i informatike**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:211:811811

Rights / Prava: Attribution-NoDerivs 3.0 Unported/Imenovanje-Bez prerada 3.0

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ORGANIZACIJE I INFORMATIKE
VARAŽDIN

Repository / Repozitorij:

Faculty of Organization and Informatics - Digital Repository

zir.nsk.hr

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET ORGANIZACIJE I INFORMATIKE

V A R A Ž D I N

Bruno Golubić

Razvoj NAND memorijskih čipova i sučelja

ZAVRŠNI RAD

Varaždin, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET ORGANIZACIJE I INFORMATIKE

V A R A Ž D I N

Bruno Golubić

Matični broj: 46224/17-R

Studij: Informacijski sustavi

Razvoj NAND memorijskih čipova i sučelja

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Igor Balaban

Varaždin, lipanj 2022.

Bruno Golubić

Izjava o izvornosti

Izjavljujem da je moj završni/diplomski rad izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onima koji su u njemu navedeni. Za izradu rada su korištene etički prikladne i prihvatljive metode i tehnike rada.

Autor/Autorica potvrdio/potvrdila prihvaćanjem odredbi u sustavu FOI-radovi

Sažetak

Ovaj rad bavi se objašnjavanjem NAND flash memorije, njezine povijesti, načinom na koji ona funkcionira, to jest kako se uopće na nju spremaju podaci i po kojim vrstama se ona može podijeliti. Svaka od tih vrsti biti će opisana kako bi se dobio dojam kompleksnosti ove tehnologije. Za primjer, ova memorija dolazi na čipovima koji u sebi sadrže memoriju i u njoj postoji hijerarhijska struktura gdje je na najnižoj razini ćelija koja u sebi pohranjuje elektrone i time zapisuje podatke u memoriju. Kroz rad se nastoji približiti korisnika s ovom tehnologijom kako bi u budućnosti mogao, recimo prilikom kupovine SSD-a, odlučiti što mu je točno potrebno. Zbog toga će se u radu prikazati prednost i mana svake vrste ove tehnologije. Nakon obrade svih vrsta ove memorije na samom kraju će se usporediti NAND flash memorija po vrstama gdje će se iskazati neki faktori po kojima se može uspoređivati implementacija u obliku SSD-a kao što su cijena po gigabajtu, brzina pisanja i brzina čitanja te pouzdanost samog diska.

Ključne riječi: NAND; flash; memorija; čip; SSD; ćelija

Sadržaj

Sadržaj iii
1. Uvod 1
2. Metode i tehnike rada 2
3. NAND flash memorija 3
3.1. Povijest 3
3.2. Način rada NAND flash-a 4
4. Vrste NAND flash memorije 7
4.1. Vrste po tehnologiji ćelija 7
4.2. Vrste po rasporedu ćelija 10
4.3. Vrste po obliku SSD-ova 11
4.4. Vrste po sučeljima SSD-ova 13
5. Usporedba NAND flasha 16
5.1. Usporedba po tehnologijama ćelije 16
5.2. Usporedba po rasporedu ćelija 20
6. Zaključak 22
Popis literature 23
Popis slika 26
Popis tablica 27

1. Uvod

Tema ovog rada je razvoj NAND memorijskih čipova i sučelja, a opisat će se povijest te tehnologije i kako uopće ta tehnologija funkcionira. Prikazat će se unutrašnja struktura flash memorije na razini cijele memorije i na razini ćelije te način spremanja podataka u memoriju. Opisat će se i tehnike koje se koriste prilikom spremanja i brisanja podataka kako bi se produžio vijek trajanja memorije.

Sljedeće će se podijeliti memorija po četiri vrste, prema tehnologiji ćelije, prema rasporedu ćelija, prema oblicima diskova s flash memorijom i prema sučeljima tih diskova. Kod tehnologija ćelije opisat će se sve one koje su se koristile od izuma samog NAND flasha do onih koje se koriste u današnjim diskovima. Kod rasporeda ćelija objasnit će se dva moguća i po čemu se razlikuju, a kod oblika sučelja popisat će se mogući oblici te se kasnije navesti sučelja koja koriste pojedini oblici.

Za sam kraj rada usporedit će se implementacije NAND flash memorije u diskovima, prema tehnologiji i rasporedu ćelija. U tablicama će se biti neki diskovi koji koriste pojedinačnu tehnologiju i za njih će se navesti neke specifikacije kao što su cijena, kapacitet te brzine pisanja i čitanja. Kod svake usporedbe prikazat će se najbitniji podaci koji mogu poslužiti kod kupovine diskova ili općenito flash memorije.

2. Metode i tehnike rada

Za pisanje ovog rada korištena je najpopularnija web-tražilica Google da bi se pronašli svi potrebni materijali za opisivanje svih pojmova. Samo pisanje će se odraditi u Microsoft Word programu, za izradu tablica će se koristiti Microsoft Excel, a za izradu i uređivanje slika online alat draw.io.

3. NAND flash memorija

NAND flash memorija je vrsta nevolatilne tehnologije pohrane koja ne zahtijeva napajanje za čuvanje podataka. Važan cilj razvoja te memorije bio je smanjenje troškova i povećavanje kapaciteta kako bi se flash memorija mogla natjecati s magnetskom pohranom. Tržište na kojemu je NAND uspio su MP3 playeri, digitalne kamere, USB stickovi i kasnije Solid State Diskovi (SSD), a sve su to uređaji gdje se velike datoteke često pohranjuju i zamjenjuju. [1]

3.1. Povijest

Glavne značajke uređaja za pohranu digitalnih podataka uključuju visoke brzine čitanja i pisanja, nevolatilnost, nisku potrošnju energije i nisku cijenu. U prošlosti su se koristili magnetski mediji kao što su tvrdi diskovi i diskete. DRAM memorija koja je superiorna u pogledu brze obrade i koja se koristi kao glavna memorija računala i ostalih uređaja nije bila prikladna za korištenje kao vanjski medij za pohranu zbog toga što se svakim gubitkom napona, tj. isključivanjem gube svi pohranjeni podaci i to se opisuje pojmom volatilnosti. Osim toga, postojeća nevolatilna memorija još uvijek je bila neadekvatna u omjeru troškova i kapaciteta. [2]

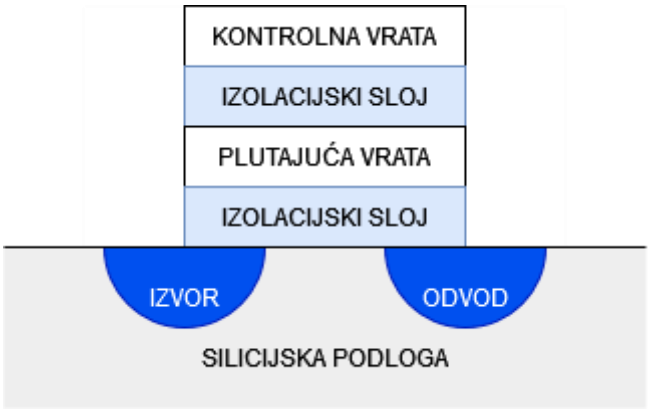
Godine 1989. kompanija Toshiba izumila je NAND flash memoriju koja je nadmašila prethodne vrste nevolatilne memorija u pogledu niskih troškova i kapaciteta. Toshiba je prva na svijetu ovu memorija stavila u praktičnu upotrebu kao poluvodičku memoriju koja je optimalna za organizaciju podataka primjenjujući ju na serijsko sučelje kompatibilno s onim za tvrde diskove. Nakon najave NAND flash memorije na IEEE međunarodnoj konferenciji naziva IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC) 1989. Toshiba je razvila aplikacije za pohranu podataka na memoriju, uspjevši uspostaviti NAND flash kao de facto standard u industriji, a to je bio Japanski prvi globalni standard u polju memorije. [2]

Kroz nadolazeće godine radilo se na razvoju ovog oblika nevolatilne memorije i tako je već 1991. Toshiba napravila prvi 4 megabitni NAND flash. Samsung je 1996. krenuo s isporukom NAND flasha, a 5 godina kasnije, 1991. Toshiba i SanDisk najavljuju NAND od jednog gigabita koji koristi MLC (Multi Level Cell) tehnologiju. Velik pridonos novijim vrstama te memorije imao je i Samsung koji je 2003. predstavio TaNOS strukturu koju kasnije primjenjuju u izradi 3D NAND čipova. Jedna od najvećih prekretnica bila je godinu kasnije, 2004. kada je cijena tih čipova pala ispod cijene DRAM memorije. Te godine se još dvije kompanije uključuju u izradu takvog tipa memorije, Hynix i Infineon. Nakon njih, godinu nakon,

izradi NAND proizvoda priključuje se i tvrtka Micron i izvoz istih premašuje izvoz DRAM memorije. Od 2006. pa sve do danas, svake godine neka od kompanija razvije novu NAND tehnologiju koja omogućuje povećani kapacitet i nižu cijenu. [3]

3.2. Način rada NAND flash-a

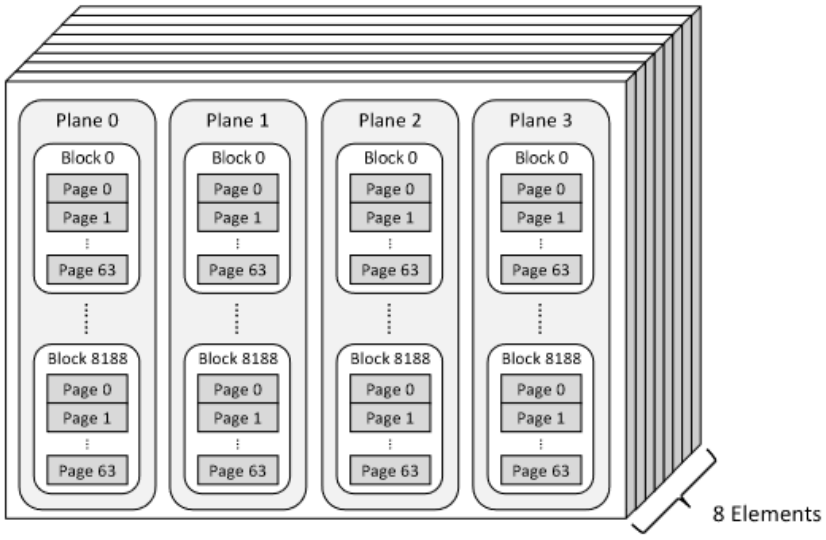
NAND čipovi bazirani su na MOSFET (Metal Oxite Semiconductor Field Effect Transistor) tranzistorima no s još jednim vratima koja se zovu plutajuća vrata. Ta kombinacija čini svaku ćeliju u NAND flash memoriji. Plutajuća vrata su najbitniji dio ćelije budući da se u njima spremaju elektroni koji ostaju u ćeliji i kada nestane napona. [4]



Slika 1. Prikaz arhitekture NAND ćelije (Izvor: Hyperstone, 2019.)

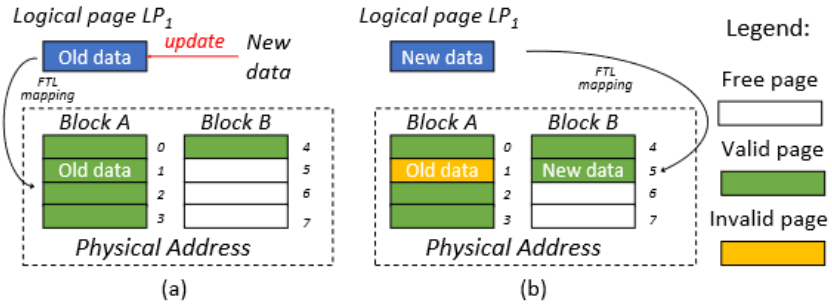
Kako bi se promijenilo stanje ćelije potrebno je dovesti napon na kontrolna vrata kada su izvor i odvod uzemljeni. Tada elektroni imaju dovoljno energije kako bi probili donji izolacijski sloj i ušli u plutajuća vrata i tako se zapisuje u ćeliju. Budući da su ta vrata izolirana elektroni ostaju u njima čak i kada nema napona. Da bi se maknuli ti elektroni iz plutajućih vrata na izvor i odvod dovodi se visoki napon, a na kontrolna vrata negativni napon što izbacuje elektrone kroz donji izolacijski sloj i time se briše ćelija. Za čitanje stanja ćelije dovodi se manji napon na kontrolna vrata i mjeri se napon između izvora i odvoda. Ako napon prolazi od izvora do odvoda znači da u plutajućim vratima nema ničega tj. stanje je 1, a ako ne prolazi stanje je 0. Kod zapisivanja i brisanja svaki put kada se primjeni napon koji uzrokuje ulazak ili izlazak elektrona zbog jakog električnog polja oštećuje se izolacijski sloj ispod plutajućih vrata i tako se smanjuje mogućnost čuvanja elektrona u vratima što može utjecati na performanse memorije. [4]

NAND flash memorija u sebi ima hijerarhiju od četiri razine. Na najvišoj razini imamo elemente koji u sebi sadrže područja. U tim područjima nalazi se više blokova, a oni u sebi sadrže stranice, a to su ujedno i najniži nivo hijerarhije. [5]



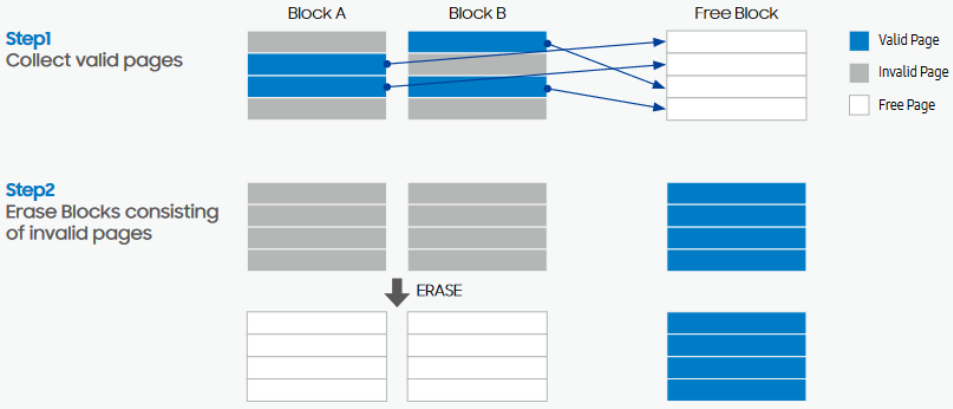
Slika 2. Prikaz hijerarhije NAND flash memorije (Izvor: C. Liu, H. A. Khouzani, C. Yang, 2017.)

Na slici 2 prikazana je memorija od 64GB s 8 elemenata gdje svaki element ima 4 područja, a ta područja u sebi imaju 2048 blokova i svaki sadrži 64 4KB stranice. Jedna od karakteristika flash memorije je out-of-place svojstvo. Kako je i ranije navedeno postoje 3 operacije nad memorijom: čitanje, pisanje i brisanje. Pisanje mijenja stanje ćelije s 1 na 0, a ćelija mora biti obrisana na stanje 1 da bi se u nju moglo ponovo pisati. Operacije čitanja i pisanja mogu se vršiti na razini stranice, dok se brisanje vrši na razini blokova. Za ažuriranje podataka u stranici prvo se sve ispravne stranice u bloku spremaju u buffer nakon čega se briše blok i tada se iz buffera uzimaju stranice i dodaje se ažurirana stranica te se nazad upisuje u blok. Zbog toga što je ova operacija vremenski i energetski zahtjevna, SSD-ovi ne ažuriraju već upisanu stranicu nego spremaju u slobodnu stranicu. To svojstvo se zove out-of-place ažuriranje. To svojstvo uzrokuje da stranica ima 3 moguća stanja: prazno, ispravno i neispravno. Operacija brisanja mijenja stanje stranice iz neispravnog u slobodno, a operacija pisanja može promijeniti iz slobodnog u ispravno te iz ispravnog u neispravno. [5]



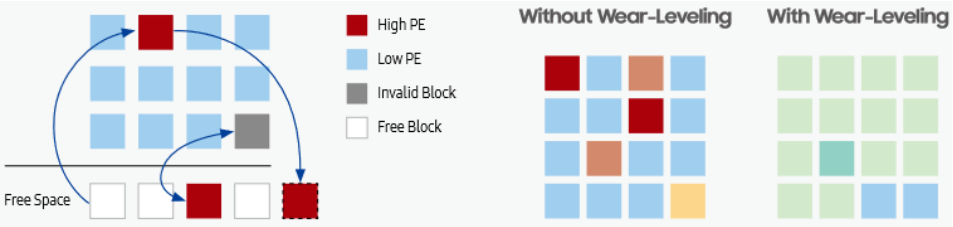
Slika 3. Prikaz ažuriranja podataka u memoriji (Izvor: C. Liu, H. A. Khouzani, C. Yang, 2017.)

U SSD-ovima postoji komponenta koja je bitna isto kao i flash memorija, a to je kontroler. To je ugrađeni procesor odgovoran za upravljanje operacijama nad podacima unutar diska i zaslužan je za odlučivanje u koje blokove se upisuju podaci, organizira podatke pritom vodeći računa o wear-levelingu i skupljanju smeća. Skupljanje smeća (eng. garbage collection) briše podatke koje je operacijski sustav označio kao obrisane ili promijenjene. Kontroler sortira stranice koje su još korisne i miče ih u novi blok ostavljajući one koje mogu biti izbrisane i briše cijeli blok podataka kako bi se podaci mogli ponovo zapisati. [6]



Slika 4. Prikaz skupljanja smeća (Izvor: Samsung, 2019.)

Proces pisanja u SSD-u naziva se P/E ciklus, gdje je P programiranje (eng. Program), a E brisanje (eng. Erase). Svaka ćelija u memoriji ima ograničeni P/E ciklus i kada se dostigne ta granica disk postaje nepouzdan i nestabilan. U tom slučaju disk će proizvoditi greške, no u gorim slučajevima postat će potpuno neupotrebljiv. Često pisanje u iste ćelije znatno smanjuje životni vijek diska stoga kontroler brine o tome gdje će se upisivati i pritom koristi tehniku wear-levelinga. Ta tehnika primjenjuje se kako bi se sve ćelije ravnomjerno trošile i time se produljuje vijek trajanja diska. Tako se ne može desiti da neke ćelija ima veliki P/E ciklus, a ostatak ćelija mali P/E ciklus. [6]



Slika 5. Prikaz wear-levelinga (Izvor: Samsung, 2019.)

Kod svakog diska može se primijetiti da iskoristivi kapacitet nije jednak kapacitetu flash memorije koja se nalazi na disku. Tome je tako zbog overprovisioninga (OP) koji uzima otprilike 7% kapaciteta diska i taj prostor kontroler koristi za prethodno opisane tehnike i time omogućuje veće performanse i dulji vijek trajanja. [7]

4. Vrste NAND flash memorije

NAND flash memorija može se podijeliti po više vrsta, a to su tehnologija izrade same ćelije, raspored ćelija te vrsta sučelja diska, a unutar ovog poglavlja memorija će se opisati po svim tim vrstama.

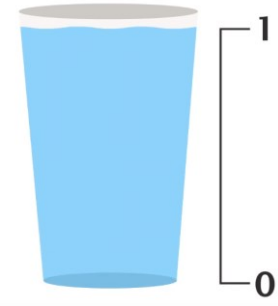
4.1. Vrste po tehnologiji ćelija

Postoje četiri vrste tehnologije ćelija od kojih svaka ima svoje prednosti i mane, a to su Single Level Cell (SLC), Multi Level Cell (MLC), Triple Level Cell (TLC) i Quad Level Cell (QLC). Sve te tehnologije koriste se prilikom proizvodnje NAND diskova, a korisnici sami biraju koju tehnologiju žele ovisno o potrebi rada s podacima.

1) Single Level Cell (SLC)

U SLC flash memoriji, svaka ćelija pohranjuje samo jedan bit podataka, logičku nulu ili logičku jedinicu. Svaka ćelija u sebi ima samo jednu razinu napona koja se uspoređuje s graničnim naponom. Ukoliko je ta razina iznad granice u ćeliju se pohranjuje logička nula, a ako je ispod pohranjuje se logička jedinica. Zbog toga što ta ćelija može poprimiti dva stanja, naponska granica između tih stanja može biti poprilično visoka. [8]

Usporedi li se ova tehnologija praznom čašom spremanjem jednog bita podataka u ćeliju, tj. čašu, ta prazna čaša može u sebi sadržavati punu čašu vode ili uopće ne sadržavati vodu. Takvu čašu koja može biti samo puna ili samo prazna lako je napuniti, isprazniti ili provjeriti stanje pa se u ćeliju tog tipa brže čitaju, zapisuju i brišu podaci. [9]



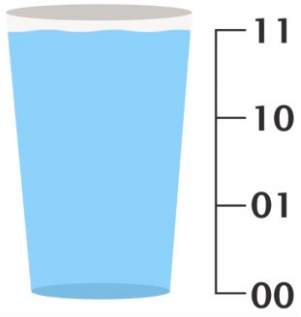
Slika 6. Prikaz SLC ćelije kao čaše (Izvor: Hyperstone, 2019.)

Prednost ove tehnologije izrade ćelije je brzina i izdržljivost s čak 100000 P/E ciklusa. Međutim, niska gustoća podataka čini ovu tehnologiju najskupljom stoga se često ili čak uopće ne koristi u potrošačkim proizvodima kao što su SSD-ovi za računala, SD kartice ili USB pohrana. Obično se koristi za servere i neke industrijske aplikacije gdje je potrebna visoka brzina, pouzdanost izdržljivost diskova. [10]

2) Multi Level Cell (MLC)

MLC tehnologija omogućuje da se u jednu ćeliju spremi dva bita podataka što znači da ona u sebi sadrži tri razine napona koje se uspoređuju s graničnim naponom i u nju se može pohraniti četiri različita stanja. Zbog više razina za usporedbu, sve operacije s podacima moraju biti preciznije što rezultira sporijom brzinom nego kod SLC tehnologije. [8]

Ukoliko se takva ćelija usporedi s čašom ona u sebi može sadržavati vodu po trećinama, znači da može biti prazna, 1/3 puna, 2/3 puna i sasvim puna što nam daje četiri različita stanja. Prilikom punjenja, pražnjenja ili provjere stanja takve čaše treba više opreza zbog toga što treba pogoditi pravu razinu, ovisno o stanju koje se želi postići, a pri tome je potrebna mirnija ruka i samim time kod ovakve tehnologije gubi se brzina jer su razine više zgusnute na istoj veličini čaše. [9]



Slika 7. Prikaz MLC ćelije kao čaše (Izvor: Hyperstone, 2019.)

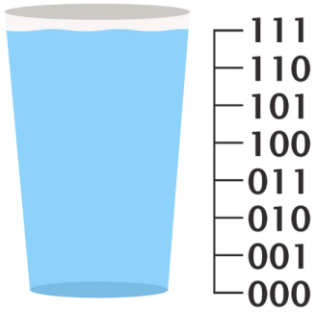
Zbog toga što ima veću gustoću podataka nego SLC, ova tehnologija može se proizvoditi u većim kapacitetima. MLC ima dobru kombinaciju cijene, performansi i izdržljivosti. Međutim to dolazi s većom osjetljivošću na greške podataka budući da ima samo 10000 P/E ciklusa, što je 10 puta manje nego SLC i samim time manja je izdržljivost. Ova tehnologija može se pronaći u potrošačkim proizvodima kao što su SSD-ovi i ostali koji sadrže NAND flash memoriju gdje fenomenalna izdržljivost nije u prvom planu. [10]

3) Triple Level Cell (TLC)

Kod ove tehnologije svaka ćelija može spremiti tri bita podataka što znači da u sebi sadrži sedam razina napona koje se uspoređuju s graničnim naponom te time može poprimiti osam različitih stanja. Više razina znači da operacije nad podacima moraju biti preciznije i samim time sporije nego kod SLC ili MLC tehnologije. [8]

Kako su se prijašnje tehnologije zamišljale kao čaše vode tako se i kod ove to može primijeniti. U triple level ćeliju, tj. čašu moguće je napuniti osam različitih stanja, od prazne čaše, 1/7, 2/7 pa sve do 6/7 i pune čaše. Budući da je čaša iste veličine kao i kod SLC-a i MLC-a, a u njoj se ima više mogućih stanja teže je pogoditi razinu vode koju želimo u njoj i

samim time usporava se njezino punjenje, pražnjenje i očitavanje stanje što u konačnici utječe i na performanse onoga što se opisuje, a to je ćelija. [9]



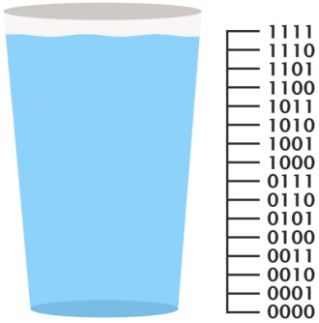
Slika 8. Prikaz TLC ćelije kao čaše (Izvor: Hyperstone, 2019.)

Najveća prednost ove tehnologije je niska cijena i veliki kapacitet. Dodavanje bitova u ćeliju utječe na performanse i izdržljivost i to se znatno osjeti na P/E ciklusima koji iznose 3000. To je više od trećine manje nego kod MLC-a i čak više od 300 puta manje nego kod SLC-a. No, zbog niske cijene i sasvim solidnih performansi, veliki broj SSD-ova i uređaja s NAND flashom koristi ovu tehnologiju. [10]

4) Quad Level Cell (QLC)

Kao što je viđeno kod svake prethodne tehnologije ćelija, samo ime govori da ova tehnologija ima sposobnost spremanja četiri bita podataka tj. u sebi ima sedam razina napona koje se uspoređuju s graničnim i samim time se u takvu ćeliju može pohraniti 16 različitih stanja. Kako i kod prethodnih, tako i kod ove tehnologije to znači da će se operacije s podacima morati izvršavati preciznije i samim time se gubi na performansama.

Prikaže li se ova ćelija kao čaša vode, u nju se može točiti od prazne čaše, pa 1/15, 2/15, sve do 14/15 i na kraju samog vrha. Veličina čaše tj. ćelije ista je kao i kod prijašnjih tehnologija, no granice su gušće raspoređene i tako je teže pogoditi željenu razinu vode, tj. napona u ćeliji te se tako gubi na brzini čitanja i pisanja. [9]



Slika 9. Prikaz QLC ćelije kao čaše (Izvor: Hyperstone, 2019.)

Uređaji s ovom tehnologijom ćelija ostvaruju manju cijenu i povećani kapacitet, ali zbog toga gube na izdržljivosti i pouzdanosti. Ćelije ove tehnologije mogu izdržati samo 1000 P/E ciklusa prije nego se potroši izolacijski sloj. To je veliki gubitak s obzirom na to da ćelije SLC tehnologije imaju 100 puta veći broj P/E ciklusa. [11]

4.2. Vrste po rasporedu ćelija

Iz naziva ove tehnologije može se zaključiti da ona ovisi o tome kako su posložene ćelije u flash memorijskom čipu. Kada je Toshiba razvila prvi NAND flash tada su čipovi bili posloženi u planarno i to je poznatije kao 2D NAND. Razvojem tehnologije Samsung je 2003. godine predstavio način izrade memorije koji je kasnije zaživio u obliku 3D NAND memorije.

1) 2D NAND

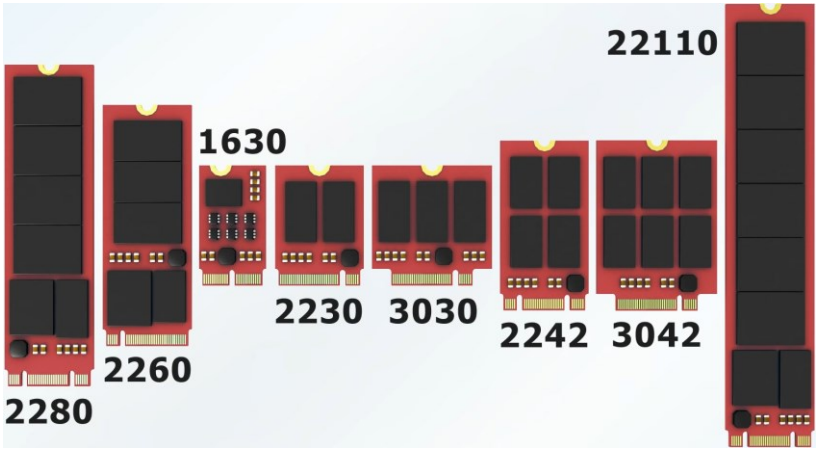
Kod ovakvog rasporeda memorijske ćelije stavljene su jedna do druge na ploču. To je u prošlosti omogućilo bolje performanse, brzine čitanja i pisanja te mehaničku robusnost naspram tvrdih diskova, ali postojao je problem cijene. Kada je prvo izumljen NAND, njegova cijena nije mogla parirati klasičnim mehaničkim diskovima zbog toga što je to bila sasvim nova tehnologija. Postoji često pogrešno shvaćanje da se u ćelije planarne NAND memorije ne može pohraniti više bitova što nije istina zbog toga što je to sasvim drugačija vrsta tehnologije nego izrada same ćelije. Kod 2D NAND-a može se spremiti više bitova u ćeliju no te ćelije se ne mogu složiti u vertikalni slog. Glavni ograničavajući faktor kod ovakvog rasporeda je veličina ćelija koje se mogu spremiti u jedno područje. Čim manja ćelija znači više ćelija na jednom području, ali to dolazi s cijenom pouzdanosti zato što se može dogoditi curenje elektrona. Zbog toga što je 2D NAND starija tehnologija, proizvođači ju u današnje vrijeme više ne koriste u svojim proizvodima. Naravno ona i dalje može poslužiti kod legacy implementacija koje zahtijevaju ovu tehnologiju i kod mikrouređaja koji ne koriste puno memorije, ali trebaju performanse i pouzdanost SLC-a. [12]

2) 3D NAND

Poznat kao i vertikalni NAND (V-NAND) je vrsta nevolatilne flash memorije u kojoj su ćelije postavljene vertikalno, tj. jedna na drugu, kako bi se povećao kapacitet. Što se više ćelija može staviti na jedno područje bez značajnijeg ugrožavanja integriteta podataka to će biti veći kapacitet. Slaganje NAND ćelija vertikalno u slojeve pruža nekoliko prednosti, od čega je najveća ta da se ćelije mogu više razdvojiti kako bi se izbjegle eventualne smetnje između istih, a to poboljšava stabilnost i dugovječnost ćelije. No 3D NAND ima nedostatke, a to je viša cijena proizvodnje i kompromis između većeg kapaciteta i manje pouzdanosti/dugovječnosti ćelija. [13]

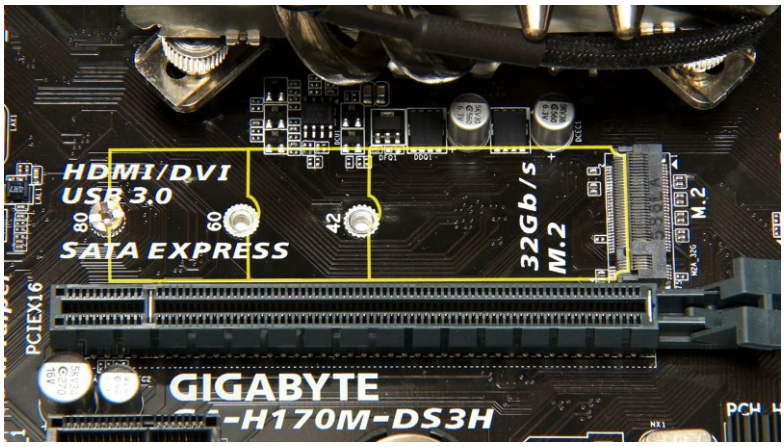
4.3. Vrste po obliku SSD-ova

Skoro sva računala godinama su pohranjivala operacijske sustave, programe i podatke na tvrde diskove (eng. Hard Disk Drive), gdje su 3.5 inčni modeli bili češći u desktop računalima, a 2.5 inčni modeli većinom u prijenosnim. Međutim, danas sve više računala koristi Solid State Drive (SSD) diskove umjesto ili u kombinaciji s HDD-om. Budući da SSD-ovi spremaju podatke na memorijske čipove to ih čini bržim, energetski učinkovitijim i robusnijim, no to dolazi s višom cijenom po gigabajtu nego kod tvrdih diskova. Današnji SSD-ovi dolaze u više veličina ili oblika (eng. form factor), a najučestaliji su 2.5 inčni diskovi i M.2 diskovi. 2.5 inčni SSD-ovi iste su veličine kao i 2.5 inčni HDD-ovi i povezuju se s računalom koristeći kabel koji se spaja u konektor na disku te se nakon toga montiraju u kućište koristeći četiri vijka. S druge strane, M.2 uređaji se spajaju izravno u matičnu ploču računala i dolaze u različitim veličinama koje se izrazuju pomoću šifri. [14]



Slika 10. Prikaz mogućih veličina M.2 uređaja (Izvor: ExplaningComputers, 2020.)

Na slici 9 prikazano je 8 različitih veličina M.2 uređaja od kojih je svaka predstavljena posebnom šifrom. 2280 šifra znači da je uređaj 22 milimetra širok i dug 80 milimetara. 2260 M.2 uređaji su prema šifri 22 milimetra širine i 60 metara duljine, a isto vrijedi i za sve ostale uređaje uz napomenu da se ne koriste sve te veličine za M.2 SSD-ove. Još jedna stvar koja se može uočiti na slici je da svi uređaji nemaju iste konektore tj. imaju različite utore, a to je zbog toga što kod takvih uređaja proizvođači stavljaju tzv. ključeve kako bi spriječili stavljanje istih u krivi oblik M.2 utora. Postoji tri vrste takvih ključeva, a to su B ključ, M ključ i B&M ključ i razlikuju se ovisno o implementiranom sučelju. Kod kupovine takvih diskova bitno je voditi računa o tome da matična ploča računala podržava željenu veličinu M.2 uređaja, no većina današnjih matičnih podržava više veličina što se može primijetiti na slici ispod, gdje je kraj svakog utora za vijak oznaka podržane duljine M.2 uređaja. [14]



Slika 11. Prikaz M.2 utora na matičnoj ploči (Izvor: ExplaningComputers, 2020.)

Dok su 2.5 inčni i M.2 SSD-ovi najčešći, dostupni su i drugi oblici. Postoji i nekoliko 3.5 inčnih diskova kao što je Nimbus ExaDrive DC 100 koji ima kapacitet od 100 terabajta (TB) i u vrijeme pisanja ovog rada to je disk s najvećim kapacitetom na tržištu i koristi se u enterprise rješenjima. Također postoji još jedan oblik diskova pod nazivom AIC (Add-In Card) koji se spaja izravno u PCI Express utor matične ploče računala. Ovakav oblik isto dolazi u različitim veličinama, a to su HH/HL (Half-Height Half-Length) i FH/HL (Full-Height Half-Length). Ovakav oblik ima i adapter koji omogućuje spajanje jednog ili više M.2 diskova u standardni PCIe utor. Zadnji oblik SSD-a je prilično uobičajen, no već stariji, pod nazivom mSATA i predstavljen je 2011. godine prije nego što je predstavljen M.2 2013. godine i moguće ga je pronaći u prijenosnim računalima. U današnje vrijeme kod kupovine SSD-a za osobna računala najveća je vjerojatnost da će izbor biti samo između 2.5 inčne varijante i M.2 varijante. [14]
Na slici ispod prikazani su oblici diskova koji se u današnje vrijeme mogu pronaći u osobnim računalima, a s lijeva na desno to su mSATA, M.2 2260, M.2 2280 i 2.5 inčni disk.



Slika 12. Oblici SSD-ova (Izvor: A. S. Gillis, C. Sliwa (bez dat.))

4.4. Vrste po sučeljima SSD-ova

Razvojem flash memorije povećavale su se brzine prijenosa podataka i samim time bila su potrebna nova sučelja koja će podržavati sve veći protok podataka. Postoje diskovi koji koriste već zastarjelo sučelje PATA no to sučelje je samo vrijedno spomena. U današnje vrijeme mogu se pronaći modernija sučelja s većim protokom koja se koriste u osobnim i prijenosnim računalima. Ta sučelja su SATA, NVMe, U.2 i SAS. Svako od tih će se ukratko opisati i prikazat će se primjer diska koji koristi to sučelje.

SSD-ovi su dostupni s više sučelja, od kojih su najčešća SATA (Serial Advanced Technology Attachment) i NVMe (Non-Volatile Memory Express) sučelja. Oblik diska ne određuje i njegovo sučelje, a veliki broj korisnika tvrdi da su M.2 diskovi brži nego 2.5 inčni što nije uvijek točno. M.2 diskovi mogu imati i SATA i NVMe sučelje te su kod M.2 SATA diskova brzine iste kao i kod 2.5 inčnih diskova. Ti diskovi se obično razlikuju po ranije spomenutim ključevima na konektoru diska, gdje diskovi s NVMe sučeljem koriste M ključ, a diskovi sa SATA sučeljem koriste B&M ključ. Kako postoje M.2 diskovi sa SATA sučeljem tako postoje i 2.5 inčni diskovi koji imaju NVMe sučelje, poznatije pod imenom U.2. Još jedno sučelje koje koriste 2.5 inčni diskovi je Serial Attached Small Computer System Interface (SAS). Ono što je najbitnije kod U.2 i SAS sučelja je da se ne koriste u potrošačkim proizvodima poput osobnih i prijenosnih računala već se koriste u enterprise rješenjima kao što su serveri. [14]

1) SATA

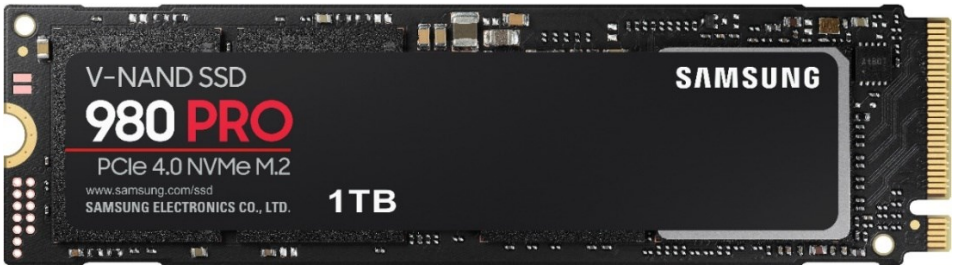
Serial ATA sučelje nasljednik je Parallel ATA i napravljeno je 2000. godine. Koristi se za povezivanje medija za pohranu podataka kao što su tvrdi diskovi, optički čitači i SSD-ovi. Za razliku od PATA sučelja gdje se koristio 4-pinski Molex konektor za napajanje, ovdje se koristi 16-pinski SATA konektor za napajanje, a za prijenos podataka upotrebljava se 7-pinski konektor. Najbitnije što je SATA omogućila NAND flash diskovima je brži prijenos podataka. 2003. predstavljena je revizija SATA 1.0a koja omogućuje prijenos podataka po brzini od 160MB/s. Godinu nakon, 2004. predstavljena je revizija SATA 2.0 koja je podržavala brzine do 300MB/s, čak duplo više nego godinu prije. Najveći napredak dogodio se 2008. godine pri reviziji 3.0 koja je omogućila brzine od čak 600MB/s. [16]



Slika 13. Primjer SSD-a sa SATA sučeljem (Prema: jeftinije.hr, (bez dat.))

2) NVMe

Non-Volatile Memory Express ili skraćeno NVMe je komunikacijsko sučelje koje je dizajnirano za SSD-ove. Komunicira između pohrane i procesora koristeći PCIe sabirnicu, neovisno o obliku diska. IO (Input/Output) operacije koje izvode NVMe diskovi počinju brže, prenose više podataka i završavaju brže nego kod starijih sučelja za pohranu podataka poput SATA-e. Kako je dizajnirano samo za SSD-ove, NVMe je postao novi industrijski standard i za servere i centre podataka, te u potrošačkim uređajima kao što su igraće konzole nove generacije i prijenosna te osobna računala. [18]



Slika 14. Primjer SSD-a s NVM-e sučeljem (Izvor: Conrad, (bez dat.))

3) U.2

Poznato i pod nazivom SFF-8639, ovo sučelje isključivo se koristi za spajanje SSD-ova na računalo. Razvijeno je za enterprise tržište i koristi do 4 PCI Express trake i do 2 SATA trake. Diskovi s ovim sučeljem mogu se koristiti i na M.2 sučelju budući da postoje adapteri. Glavna prednost nad M.2 je ta da ovo sučelje omogućuje hot-swap, tj. promjenu diskova bez da se gasi računalo. [20]



Slika 15. Primjer SSD-a s U.2 sučeljem (Izvor: Wikipedia, (bez dat.))

4) SAS

Serial Attached Small Computer System Interface, skraćenije Serial Attached SCSI, skraćeno SAS sučelje je koje je došlo na tržište 2004. godine i predstavlja značajniju tehničku prednost nad SATA sučeljem. Omogućuje tzv. od točke do točke (point-to-point) serijski protokol koji koristi SCSI set komandi za prijenos podataka s i na povezane uređaje velikom brzinom. SAS je kompatibilno sa SATA uređajima i zbog toga je preferirano sučelje za servere i radne stanice u poslovnom svijetu. [21]

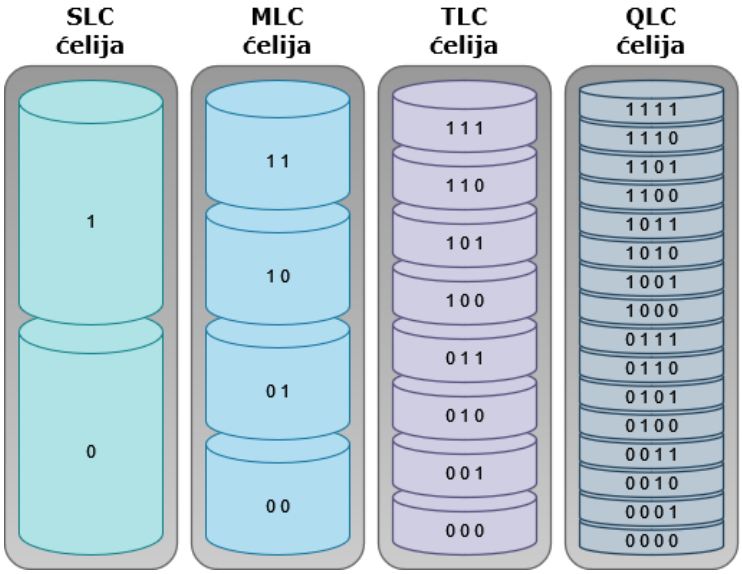
Tablica 1. Sažetak oblika i sučelja SSD-ova [14]

Oblik diska	**Dostupna sučelja**
2.5 inča	SATA, U.2 (NVMe), SAS
M.2	SATA, NVMe
AIC	NVMe
mSATA	SATA

5. Usporedba NAND flasha

U ovom poglavlju usporedit će se NAND flash tehnologija po tri kriterija, a to su tehnologija spremanja podataka u ćelije, tehnologija izrade same ćelije i izvedba NAND memorije na sučelje. Kod svake usporedbe će biti prikazani proizvođači, cijene po gigabajtu, oblici, sučelja te brzine pisanja i čitanja.

5.1. Usporedba po tehnologijama ćelije



Slika 16. Prikaz mogućih stanja NAND ćelija (Prema: Kingston, 2021.)

Na slici 16 prikazana su moguća stanja svake od opisanih tehnologija ćelija. Vidljivo je na prvu da se svaka od tehnologija bitno razlikuje kao što je bilo i opisano. Kod SLC tehnologije broj stanja koje ćelija može poprimiti je 1-bitna, a to znači da se u jednu ćeliju može pohraniti 1 bit podataka što u prijevodu znači da može poprimiti samo 2 stanja pa se iz slike vidi da su ta stanja 0 i 1. Nadalje, kod MLC ćelija situacija je nešto drugačija jer se u takvu ćeliju može pohraniti 2 bita podataka, to jest ta ćelija može imati 4 stanja koja se mogu vidjeti na slici. Može se primijetiti kako svaka tehnologija ćelija ima 1 bit više nego prethodna pa kako MLC ima 2 bita logično je da će TLC imati 3 bita i samim time spremiti 3 bita podataka te može poprimiti 8 stanja. Sljedeća tehnologija ćelije je QLC koja u jednu ćeliju sprema 4 bita podataka i ima 16 mogućih stanja. Kako raste broj bitova tako se smanjuje brzina čitanja i pisanja podataka, cijena po gigabajtu i vijek trajanja ćelija zbog navedenih faktora kod opisivanja svake tehnologije. U sljedećim tablicama prikazat će se podaci o diskovima svake tehnologije ćelija.

Tablica 2. Podaci o diskovima sa SLC tehnologijom

Proizvođač	Serija	Cijena	Kapacitet	Cijena po gigabajtu	Oblik	Sučelje	Brzina pisanja	Brzina čitanja
Apacer	SS210-25	18.172,38 kn	240 GB	75,72 kn	2.5 inča	SATA	440 MB/s	310 MB/s
Apacer	SS210-25	18.730,20 kn	240 GB	78,04 kn	2.5 inča	SATA	440 MB/s	310 MB/s
Greenliant	G3200 EX	57.451,31 kn	1.92 TB	29,92 kn	2.5 inča	SATA	520 MB/s	530 MB/s
Greenliant	G7200 EX	57.508,84 kn	1.92 TB	29,95 kn	2.5 inča	U.2	1900 MB/s	2600 MB/s
Swissbit	X-76	1.558,73 kn	80 GB	19,48 kn	2.5 inča	SATA	480 MB/s	560 MB/s
Swissbit	X-76	1.667,69 kn	80 GB	20,85 kn	2.5 inča	SATA	480 MB/s	560 MB/s
TDK	SDE1B	3.162,94 kn	128 GB	24,71 kn	2.5 inča	SATA	325 MB/s	430 MB/s
Apacer	SS220-M242	5.308,73 kn	64 GB	82,95 kn	M.2	SATA	455 MB/s	520 MB/s
Apacer	SS220-M242	5.455,76 kn	64 GB	85,25 kn	M.2	SATA	455 MB/s	520 MB/s
Swissbit	X-600m2	10.575,41 kn	128 GB	82,62 kn	M.2	NVMe	405 MB/s	520 MB/s
Swissbit	X-600m2	11.314,68 kn	128 GB	88,40 kn	M.2	NVMe	405 MB/s	520 MB/s

(Izvor: Mouser Electronics, (bez dat.))

U tablici 2 prikazani su podaci diskova koji koriste tehnologiju SLC, tj. u njihove ćelije spremaju se samo dva bita podataka. Prosječna cijena, neovisno o obliku i sučelju, iznosi 56, 17 kn po gigabajtu memorije, ali ukoliko se kupac odluči za 2.5 inčne diskove ta cijena pada na 39,81 kn po GB, a raste kod M.2 oblika. Preciznije za M.2 diskove sa SATA sučeljem prosječna cijena je 84,10 kn za GB, a za NVMe sučelje 85,51 kn. Proizvođač Apacer s 2.5 inčnim diskovima diže prosjek istih budući da cijena po GB doseže čak 78,04 kn, dok je kod ostalih proizvođača u rasponu od 19 do 30 kuna. Neke zanimljivosti koje se mogu primijetiti su da je brzina pisanja kod Apacer 2.5 inčnih diskova niža nego brzina čitanja i druga je ta da proizvođač Swissbit kod M.2 NVMe diskova ne koristi veće brzine koje to sučelje omogućuje. S druge strane, Greenliant kod diska s U.2 sučeljem iskorištava te benefite pa njihov disk doseže puno veće brzine nego diskovi sa SATA sučeljem. M.2 diskovi sa SATA sučeljem znatno su skuplji od 2.5 inčnih s istim sučeljem, a tome je vjerojatno tako zbog toga što zauzimaju manje prostora. Podatak koji u tablici nije prikazan je operativna temperatura navedenih diskova. Može se primijetiti da diskovi iste serije imaju drugačiju cijenu, a tome je tako zbog manjeg podržanog raspona operativne temperature. Kod skupljih diskova u seriji taj raspon je od -40°C pa sve do +85°C, a kod jeftinijih od 0°C do 70°C. Kao što je i prije bilo spomenuto, ovi diskovi ne koriste se u osobnim računalima, nego u enterprise rješenjima poput servera, radnih stanica i podatkovnih centara. Njihova cijena po gigabajtu je izrazito velika, ali s obzirom na to da SLC ćelije imaju najveći broj P/E ciklusa, kompanije koje kupuju ovakve diskove ne riskiraju gubitak podataka i spremne su za to platiti više nego inače, a kod kupovine veće količine diskova taj se trošak smanjuje za otprilike 200 kn po disku.

Tablica 3. Podaci o diskovima s MLC tehnologijom

Proizvođač	Serija	Cijena	Kapacitet	Cijena po gigabajtu	Oblik	Sučelje	Brzina pisanja	Brzina čitanja	TBW
Apacer	AS510S	701,31 kn	480 GB	1,46 kn	2.5 inča	SATA	505 MB/s	545 MB/s	670 TB
Intel	DC S3510	2.907,49 kn	800 GB	3,63 kn	2.5 inča	SATA	450 MB/s	500 MB/s	450 TB
Seagate	600	2.156,83 kn	480 GB	4,49 kn	2.5 inča	SATA	400 MB/s	500 MB/s	72 TB
Transcend	SSD370S	1.465,84 kn	512 GB	2,86 kn	2.5 inča	SATA	460 MB/s	560 MB/s	204 TB
Transcend	MTS600S	984,76 kn	256 GB	3,85 kn	M.2	SATA	400 MB/s	530 MB/s	740 TB
Intel	DC S3520	4.663,78 kn	960 GB	4,86 kn	M.2	SATA	320 MB/s	410MB/s	1.75 PB
Corsair	MP500	1.269,56 kn	480 GB	2,65 kn	M.2	NVMe	2400 MB/s	3000 MB/s	640 TB
TeamGroup	P30	1.159,71 kn	480 GB	2,42 kn	M.2	NVMe	1350 MB/s	2500 MB/s	670 TB
ADATA	SX8000	1.272,35 kn	512 GB	2,49 kn	M.2	NVMe	1100 MB/s	1900 MB/s	320 TB
Samsung	970 PRO	1.648,93 kn	1024 GB	1,61 kn	M.2	NVMe	2700 MB/s	3500 MB/s	1.2 PB

(Izvor: Geizhals Priesvergleich, (bez dat.))

U tablici 3 prikazani su podaci o diskovima koji koriste MLC ćelije, točnije one koje imaju mogućnost spremanja 4 bita podataka u ćeliju. Prosječna cijena gigabajta kod ove tehnologije drastično pada u odnosu na SLC te iznosi 3,03 kn. Daljnjom analizom, za 2.5 inčne diskove je 3,11 kn, za M.2 SATA diskove je 4,36kn i konačno za M.2 NVMe diskove je 2,29 kn. Ovakva tehnologija je u današnje vrijeme sve manje popularna stoga su na tržištu diskovi koji su proizvedeni još prije nekoliko godina, a dalje postoji njihova zaliha. Kod ovih diskova iskorištena je prednost NVMe sučelja i brzine pisanja i čitanja su oko pet puta veće nego kod SATA sučelja. U ovoj tablici dodana je i kolona TBW (Total Bytes Written), a to je mjera izdržljivosti diska, tj. koliko se podataka može zapisati prije nego se ćelije potroše. Diskovi s većim kapacitetom automatski imaju i veći TBW jer nema smisla da se na disk većeg kapaciteta može pisati manje puta nego na disku manjeg kapaciteta. Najveći TBW kod ovih podataka ima Intelov disk iz serije DC S3520 koji iznosi 1.75 petabajta, no ima i drugi najveći kapacitet od 960 GB. Kod Samsungovog 970 PRO diska je drugi najveći TBW od 1.2 PB, ali je najveći kapacitet i iznosi 1024 GB. Najbitnija razlika između tih dvaju diskova je njihovo sučelje. Intelov disk koristi zastarjelo SATA sučelje i pruža brzine preko osam puta manje nego Samsungov koji dominira u brzinama. Najjeftiniji disk ove tehnologije je 2.5 inčni Apacer AS510S čija cijena po GB iznosi samo 1,46 kn, a ima iznadprosječni TBW i brzine pisanja i čitanja naspram ostalih 2.5 inčnih diskova. Svi ovi diskovi dostupni su za kupovinu običnim potrošačima koji koriste osobna i prijenosna računala te igraće konzole novije generacije koje koriste M.2 diskove. Kako je bilo spomenuto da se ova tehnologija baš više i ne koristi u

sljedećoj tablici prikazat će se podaci o diskovima s danas najpopularnijim tehnologijama ćelija, TLC i QLC.

Tablica 4. Podaci o diskovima s TLC i QLC tehnologijom

Proizvođač	Serija	Cijena	Kapacitet	Cijena po gigabajtu	Oblik	Sučelje	Brzina pisanja	Brzina čitanja	TBW	Tehnologija
Acer	RE100	665,83 kn	1024 GB	0,65 kn	2.5 inča	SATA	515 MB/s	557 MB/s	560 TB	TLC
ADATA	SU650	622,05 kn	960 GB	0,65 kn	2.5 inča	SATA	450 MB/s	520 MB/s	560 TB	TLC
Apacer	AS350X	639,68 kn	1024 GB	0,63 kn	2.5 inča	SATA	540 MB/s	560 MB/s	835 TB	TLC
Samsung	860 EVO	708,24 kn	1024 GB	0,69 kn	2.5 inča	SATA	530 MB/s	560 MB/s	600 TB	TLC
Samsung	860 EVO	710,13 kn	1024 GB	0,69 kn	M.2	SATA	520 MB/s	550 MB/s	600 TB	TLC
Samsung	970 EVO Plus	1.386,35 kn	2048 GB	0,68 kn	M.2	NVMe	3300 MB/s	3500 MB/s	1.2 PB	TLC
Samsung	980	667,56 kn	1024 GB	0,65 kn	M.2	NVMe	3000 MB/s	3500 MB/s	600 TB	TLC
Samsung	980 Pro	952,66 kn	1024 GB	0,93 kn	M.2	NVMe	5000 MB/s	7000 MB/s	600 TB	TLC
ADATA	SU630	320,07 kn	480 GB	0,67 kn	2.5 inča	SATA	450 MB/s	520 MB/s	100 TB	QLC
Crucial	BX500	571,79 kn	1024 GB	0,56 kn	2.5 inča	SATA	500 MB/s	540 MB/s	360 TB	QLC
Kingston	A400	595,07 kn	960 GB	0,62 kn	2.5 inča	SATA	450 MB/s	500 MB/s	300 TB	QLC
Samsung	870 QVO	4.264,45 kn	8192 GB	0,52 kn	2.5 inča	SATA	530 MB/s	560 MB/s	2.88 PB	QLC
Kingston	A400	188,66 kn	240 GB	0,79 kn	M.2	SATA	350 MB/s	500 MB/s	80 TB	QLC
Corsair	MP400	1.503,81 kn	2048 GB	0,73 kn	M.2	NVMe	3000 MB/s	3480 MB/s	400 TB	QLC
Crucial	P1	1.521,97 kn	2048 GB	0,74 kn	M.2	NVMe	1750 MB/s	2000 MB/s	400 TB	QLC
Intel	670p	653,24 kn	1024 GB	0,64 kn	M.2	NVMe	2500 MB/s	3500 MB/s	370 TB	QLC
PNY	CS2130	684,06 kn	1024 GB	0,67 kn	M.2	NVMe	1800 MB/s	3500 MB/s	225 TB	QLC
Sabrent	Rocket Q	828,72 kn	1024 GB	0,81 kn	M.2	NVMe	2000 MB/s	3200 MB/s	260 TB	QLC
Sabrent	Rocket Q4	941,74 kn	1024 GB	0,92 kn	M.2	NVMe	1800 MB/s	4700 MB/s	200 TB	QLC

(Izvor: Geizhals Priesvergleich, (bez dat.))

Tablica 4 prikazuje podatke o diskovima koji koriste i TLC i QLC tehnologiju ćelija. Prosječna cijena TLC diskova neovisno o obliku i sučelju iznosi 0,70 kn po gigabajtu, a ista cijena je i kod QLC diskova. 2.5 inčni SATA TLC diskovi imaju prosječnu cijenu od 0,66 kn po GB, a isti QLC imaju nešto manju, 0,59 kn. Razlike nema kod M.2 NVMe diskova, jer njihova prosječna cijena neovisno o tehnologiji iznosi 0,75 kn po GB. Bitno je napomenuti kako M.2 SATA diskova skoro pa i nema na tržištu ako se gleda njihov broj naspram sveukupnog broja dostupnih diskova. Postoji nekoliko modela, a njihove cijene nisu najsretnije budući da se za manje novaca može kupiti 2.5 inčni disk, pa čak i M.2 NVMe disk koji ima bolje performanse. Najveće razlike između TLC i QLC diskova su brzine čitanja i pisanja kod M.2 NVMe sučelja te TBW. Kod najboljeg TLC diska, Samsung 980 Pro, brzine pisanja idu do 5000 MB/s, čitanja do 7000 MB/s, a kod najboljeg QLC diska, Corsair MP400, pisanje ide do 3000 MB/s, a čitanje

do 3480 MB/s. To je više od 1,6 puta brže pisanje i više od 2 puta brže čitanje podataka. Razlika se osjeti i na TBW, gdje Intel dominira u QLC području gdje diskovi imaju od 200 do 260 TB TBW na 1024 GB, a Intel ima čak 370 TB. TLC ima između 2 i 3 puta više, ovisno o disku s kojim se uspoređuje, gdje Samsung ima 600 TB TBW na 1024 GB. U današnje vrijeme sve nove generacije diskova koji dolaze na tržište koriste TLC i QLC tehnologiju ćelija jer su se one pokazale najisplativijim i dovoljno pouzdanim za korištenje uređajima običnih potrošača. Svi navedeni diskovi dostupni su u praktički svakoj trgovini informatičkom opremom, a cjenovno su slični i kupci bi prilikom kupovine M.2 NVMe diskova uvijek odabrati one s TLC tehnologijom ćelija kako je tu najveća razlika. Ukoliko se pak odluče na 2.5 inčne varijante bolje je dati nešto više novaca za GB memorije i dobiti na izdržljivosti, nego prišparati pa imati disk s manjim životnim vijekom.

5.2. Usporedba po rasporedu ćelija

Trenutno, 2D NAND je glavna vrsta flash memorije za SSD-ove. Stotine ili tisuće ćelija raspoređeno je po stranicama u bloku, a svaki memorijski čip sadrži veliki broj blokova i ćelije su naslagane jedna do druge. Kod novije tehnologije, 3D ili vertikalnog NAND-a ćelije su naslagane jedna na drugu i to je glavna razlika. Detaljnije se može usporediti po stopi iskorištenja veličine pod što se smatra koliko se ćelija može staviti u jedno područje, što rezultira većim kapacitetom. Samsung uspoređuje stopu između 3D i 2D NAND-a kao razliku između nebodera i prizemnica. Umjesto pokušaja gradnje više prizemnica u jednom području, gdje su te prizemnice ćelije, Samsung u svojim diskovima ćelije vertikalno i time na istom području dobiva veći broj istih. Osim izvrsnog korištenja prostora i niže potrošnje energije, vertikalni NAND je bolji od planarnog u brzini procesiranja podataka. 3D NAND je oko dva puta brži i deset puta dugovječniji nego 2D NAND. [24]

Tablica 5. Podaci o diskovima s 2D i 3D rasporedom ćelija

Proizvođač	Serija	Kapacitet	Cijena po gigabajtu	Oblik	Sučelje	Brzina pisanja	Brzina čitanja	TBW	Tehno-logija	Raspored ćelija
Samsung	860 PRO	4096 GB	0,98 kn	2.5 inča	SATA	530 MB/s	560 MB/s	4.8 PB	MLC	3D
Samsung	970 PRO	1024 GB	1,61 kn	M.2	NVMe	2700 MB/s	3500 MB/s	1.2 PB	MLC	3D
Intel	S3510	800 GB	3,63 kn	2.5 inča	SATA	450 MB/s	500 MB/s	450 TB	MLC	2D
Transcend	MTS600S	256 GB	3,85 kn	M.2	SATA	400 MB/s	530 MB/s	740 TB	MLC	2D
Toshiba	OCZ RD400	256 GB	1,45 kn	M.2	NVMe	1150 MB/s	2600 MB/s	148 TB	MLC	2D

(Izvor: Geizhals Priesvergleich, (bez dat.))

Iz priložene tablice vidljivo je da su uspoređeni diskovi koji koriste MLC tehnologiju ćelija. Tome je tako zato što u današnje vrijeme sve više diskova koristi 3D raspored, a kako je prije bilo spomenuto da je MLC starija tehnologija onda se mogu pronaći diskovi koji imaju i 2D i 3D raspored. Na prvu je odmah vidljivo da je cijena po gigabajtu znatno niža kod diskova koji imaju vertikalno raspoređene ćelije, a izdržljivost je veća. Naravno taj faktor ovisi i o samom proizvođaču diska pa Transcend za isti kapacitet kao i Toshiba ima puno veći TBW. Brzina je također faktor koji ovisi o samom proizvođaču, ali Samsung kod M.2 NVMe diska ima više nego duplu brzinu pisanja i oko 1,35 puta veću brzinu čitanja. Diskovi koji koriste tehnologiju TLC većinom koriste vertikalan raspored, a oni koji koriste planarni su rijetki i postoji jako mali broj takvih na današnjem tržištu. Bitno je spomenuti i QLC diskove jer svi takvi na današnjem tržištu koriste 3D raspored i nije moguće kupiti takav disk s 2D rasporedom. Time se može zaključiti da se vertikalni raspored ćelija pokazao kao uspješna tehnologija pri proizvodnji SSD-ova.

6. Zaključak

Tema ovog rada bila je NAND flash memorija, a u radu je kroz sva poglavlja bila ista opisana. Na početku je bilo poglavlje povijesti te tehnologije, gdje i kada je izumljena te kako se kroz godine u prošlosti razvijala. Nakon toga prezentirano je kako funkcionira, koje se tehnike koriste u optimizaciji korištenja memorije kako je podijeljena u čipovima.

Nakon prvog poglavlja pojašnjeno je po kojim vrstama se može ta memorija podijeliti, a to su tehnologija ćelije, raspored ćelija, oblici diskova i sučelja koja se koriste. Opisane su sve tehnologije na današnjem tržištu te su navedene prednosti i mane svake od njih. Tako su kod SLC tehnologije prednosti brzina i izdržljivost, a nedostatak visoka cijena. Ta tehnologija obično biva korištena u enterprise rješenjima i ne isplati se kupovati za svakodnevno korištenje osobnih računala. Ostale tehnologije gube na brzini i izdržljivosti, ali i na cijeni što ih čini povoljnijim za obične korisnike, a nepogodnije za rješenja gdje je potrebna visoka izdržljivost.

Kasnije je u radu opisana i podjela prema rasporedu ćelija te postoje dvije takve podjele, planarna i vertikalna. Planarna ili 2D bila je prva koja se koristila u takvoj memoriji, no kasnije se razvojem tehnologije pojavila i vertikalna ili 3D tehnologija koja je omogućila slaganje ćelija jedne na drugu kako bi se povećao kapacitet i brzina operacija nad podacima. Nakon toga opisani su oblici diskova koji koriste NAND flash, a postoji ih četiri. Svaki oblik ima drugačiji priključak u računalo, a jedan oblik može imati više vrsta sučelja što je ujedno i zadnji faktor vrsti memorije.

Kada su opisane sve vrste tehnologije, uspoređeni su diskovi prema vrsti tehnologije ćelija i vrsti rasporeda ćelija. Potvrđena je teorija da su SLC diskovi najskuplji na tržištu zbog njihove iznimne pouzdanosti, a da je ostatak diskova znatno jeftiniji. Došlo se i do zaključka da su TLC i QLC diskovi praktički isti po cijeni, ali se razlikuju po broju zapisanih bajtova (TBW) i po brzinama, te je za istu cijenu uvijek bolje kupiti TLC disk nego QLC. Za kraj uspoređeni su diskovi koji koriste 2D i 3D raspored ćelija, a kako je broj planarnih diskova na tržištu iznimno malen velika je vjerojatnost da će se kod kupovine diska uzeti onaj s vertikalnim rasporedom ćelija.

Popis literature

[1] S. J. Bigelow, M. Jones, „NAND flash memory“, (bez dat.) [Na internetu.] Dostupno: https://www.techtarget.com/searchstorage/definition/NAND-flash-memory [pristupano: 10.06.2022.].

[2] Toshiba (bez dat.) *World's First NAND Flash Memory* [Na internetu]. Dostupno: https://toshiba-mirai-kagakukan.jp/en/learn/history/ichigoki/1991memory/index.htm [pristupano: 10.06.2022.].

[3] Flash Memory Summit (2020.) *2020 Flash Memory Timeline* [Na internetu]. Dostupno: https://www.flashmemorysummit.com/English/PDFs/FMS2020-Timeline.pdf [pristupano: 10.06.2022.].

[4] Hyperstone, (24.07.2019.) „Floating Gate Technology | NAND Flash Transistors (suggested #1 for training sequel)“, *Youtube* [Video datoteka]. Dostupno: https://youtu.be/AO7CNNZmtTw [pristupano 11.06.2022.].

[5] C. Liu, H. A. Khouzani, C. Yang, „ErasuCrypto: A Light-weight Secure Data Deletion Scheme for Solid State Drives“, 2017. [Na internetu.] Dostupno: https://www.researchgate.net/publication/311883956_ErasuCrypto_A_Light-weight_Secure_Data_Deletion_Scheme_for_Solid_State_Drives [pristupano: 10.06.2022.].

[6] G. Navarrete, „How Do SSDs Work?“, 2021. [Na internetu.] Dostupno: https://linuxhint.com/how-ssds-work/ [pristupano: 10.06.2022.].

[7] Samsung, 2019. *Over-Provisioning Benefits for Samsung Dana Center SSDs* [Na internetu.] Dostupno: https://semiconductor.samsung.com/resources/white-paper/S190311-SAMSUNG-Memory-Over-Provisioning-White-paper.pdf [pristupano: 11.06.2022.].

[8] A. Aravindan, „Flash 101: Types od NAND Flash“, 2018. [Na internetu.] Dostupno: https://www.embedded.com/flash-101-types-of-nand-flash/ [pristupano: 11.06.2022.].

[9] Hyperstone, (16.07.2019.) „SLC, MLC, TLC and QLC | SSD Flash Memory Explained (suggested #2 for training sequel)“, *Youtube* [Video datoteka]. Dostupno: https://youtu.be/5S_gUbzVdh8 [pristupano: 11.06.2022.].

[10] Kingston, 2021. *What is NAND?* [Na internetu.]. Dostupno: https://www.kingston.com/en/blog/pc-performance/difference-between-slc-mlc-tlc-3d-nand [pristupano: 12.06.2022.].

[11] Purestorage, (bez dat.) *What Is QLC SSD?* [Na internetu.]. Dostupno: https://www.purestorage.com/knowledge/what-is-qlc-flash.html [pristupano: 12.06.2022.].

[12] Purestorage, (bez dat.) *What Is „D NAND and How Does It Work?* [Na internetu.]. Dostupno: https://www.purestorage.com/it/knowledge/what-is-2d-nand.html [pristupano: 12.06.2022.].

[13] Purestorage, (bez dat.) *What Is 3D NAND and How Does It Work?* [Na internetu.]. Dostupno: https://www.purestorage.com/knowledge/what-is-3d-nand.html [pristupano: 11.06.2022.].

[14] ExplaningComputers, (15.11.2020.) „Explaining SSDs: Form Factors, Interfaces & Technologies“, *Youtube* [Video datoteka]. Dostupno: https://youtu.be/EXLfErPEYiw [pristupano: 12.06.2022.].

[15] A. S. Gillis, C. Sliwa, „mSATA SSD (mSATA solid-state drive)“, (bez dat.) [Na internetu.] Dostupno: https://www.techtarget.com/searchstorage/definition/mSATA-SSD-mSATA-solid-state-drive [pristupano: 11.06.2022.].

[16] „Serial ATA,“ (bez dat.) u *Wikipedia, the Free Encyclopedia*. Dostupno: https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_ATA [pristupano: 12.06.2022.].

[17] jeftinije.hr, (bez dat.) *SAMSUNG SSD 870 EVO 1TB 2.5inch SATA, MZ-77E1T0B/EU* [Na internetu.] Dostupno: https://www.jeftinije.hr/Proizvod/21821990/racunalna-oprema/pc-komponente/ssd-diskovi/samsung-ssd-870-evo-1tb-25inch-sata-mz-77e1t0beu [pristupano: 12.06.2022.].

[18] Kingston, 2017. *Understanding SSD Technology: NVMe, SATA, M.2* [Na internetu.]. Dostupno: https://www.kingston.com/en/community/articledetail/articleid/48543 [pristupano: 12.06.2022.].

[19] Conrad, (bez dat.) *Samsung 980 PRO 1 TB unutarnji M.2 PCIe NVMe SSD 2280 maloprodaja MZ-V8P1T0BW* [Na internetu.]. Dostupno: https://www.conrad.hr/p/samsung-980-pro-1-tb-unutarnji-m2-pcie-nvme-ssd-2280-maloprodaja-mz-v8p1t0bw-2303952 [pristupano: 12.06.2022.].

[20] „U.2,“ (bez dat.) u *Wikipedia, the free Encyclopedia*. Dostupno: https://en.wikipedia.org/wiki/U.2 [pristupano: 12.06.2022.].

[21] Ciphertex data security, 2021. *SSD Interfaces: SAS vs. SATA vs. NVMe* [Na internetu.]. Dostupno: https://ciphertex.com/ssd-interfaces-sas-sata-nvme/ [pristupano: 12.06.2022.].

[22] Mouser Electronics, (bez dat.) *Solid State Drives – SSD* [Na internetu.]. Dostupno: https://hr.mouser.com/c/embedded-solutions/memory-data-storage/storage/solid-state-drives-ssd/ [pristupano: 15.06.2022.].

[23] Geizhals Priesvergleich, (bez dat.) *Solid State Drives (SSD)* [Na internetu.]. Dostupno: https://geizhals.eu/?cat=hdssd [pristupano: 03.07.2022.].

[24] Helen, „2D vs 3D NAND: What Are the Differences & How to Switch to Them? [MiniTool Tips]“, 2022 [Na internetu.] Dostupno: https://www.minitool.com/backup-tips/2d-nand-vs-3d-nand.html [pristupano: 05.07.2022.].

Popis slika

Slika 1. Prikaz arhitekture NAND ćelije (Izvor: Hyperstone, 2019.) 4

Slika 2. Prikaz hijerarhije NAND flash memorije (Izvor: C. Liu, H. A. Khouzani, C. Yang, 2017.) 5

Slika 3. Prikaz ažuriranja podataka u memoriji (Izvor: C. Liu, H. A. Khouzani, C. Yang, 2017.) 5

Slika 4. Prikaz skupljanja smeća (Izvor: Samsung, 2019.) 6

Slika 5. Prikaz wear-levelinga (Izvor: Samsung, 2019.) 6

Slika 6. Prikaz SLC ćelije kao čaše (Izvor: Hyperstone, 2019.) 7

Slika 7. Prikaz MLC ćelije kao čaše (Izvor: Hyperstone, 2019.) 8

Slika 8. Prikaz TLC ćelije kao čaše (Izvor: Hyperstone, 2019.) 9

Slika 9. Prikaz QLC ćelije kao čaše (Izvor: Hyperstone, 2019.) 9

Slika 10. Prikaz mogućih veličina M.2 uređaja (Izvor: ExplaningComputers, 2020.) 11

Slika 11. Prikaz M.2 utora na matičnoj ploči (Izvor: ExplaningComputers, 2020.) 12

Slika 12. Oblici SSD-ova (Izvor: A. S. Gillis, C. Sliwa (bez dat.)) 12

Slika 13. Primjer SSD-a sa SATA sučeljem (Prema: jeftinije.hr, (bez dat.)) 14

Slika 14. Primjer SSD-a s NVM-e sučeljem (Izvor: Conrad, (bez dat.)) 14

Slika 15. Primjer SSD-a s U.2 sučeljem (Izvor: Wikipedia, (bez dat.)) 15

Slika 16. Prikaz mogućih stanja NAND ćelija (Prema: Kingston, 2021.) 16

Popis tablica

Tablica 1. Sažetak oblika i sučelja SSD-ova [14] 15
Tablica 2. Podaci o diskovima sa SLC tehnologijom 17
Tablica 3. Podaci o diskovima s MLC tehnologijom 18
Tablica 4. Podaci o diskovima s TLC i QLC tehnologijom 19
Tablica 5. Podaci o diskovima s 2D i 3D rasporedom ćelija 20