

# RAM memorija

---

**Babić, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2022**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:522571>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-13**



**Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**  
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



**uniri** DIGITALNA  
KNJIŽNICA



**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**POMORSKI FAKULTET**

**IVAN BABIĆ**

**RAM MEMORIJA**

**ZAVRŠNI RAD**

Rijeka, 2022.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**POMORSKI FAKULTET**

**RAM MEMORIJA**  
**RAM MEMORY**

**ZAVRŠNI RAD**

Kolegij: Mikro i osobna računala

Mentor/komentor: izv. prof. dr. sc. Jasmin Ćelić

Student/studentica: Ivan Babić

Studijski smjer: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112077482

Rijeka, rujan 2022.

Student: Ivan Babić

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112077482

### **IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA**

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom

**RAM MEMORIJA**

izradio/la samostalno pod mentorstvom

izv. prof. dr. sc. Jasmin Ćelić

Te komentorstvom

---

stručnjaka/stručnjakinje iz tvrtke

\_\_\_\_\_ (*naziv tvrtke*).

U radu sam primijenio/la metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio/la literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo/la u završnom radu na uobičajen, standardan način citirao/la sam i povezo/la s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student/studentica

*Ivan Babić*

Student: Ivan Babić

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0112077482

**IZJAVA STUDENTA – AUTORA  
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG ZAVRŠNOG RADA**

Izjavljujem da kao student – autor završnog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa završnim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog završnog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student/studentica - autor

*Ivan Babić*

## **SAŽETAK**

Ovaj rad se temelji na istraživanju RAM memorije i tehnologijama izrade same memorije. RAM memorija je jedna od najvažnijih elemenata vašeg računala jer se koriste za čuvanje programskog koda i podataka tijekom rada programa. Mnogi prijašnji oblici RAM-a gube podatke kada je računalo ugašeno. Kako bih smo se riješili toga problema te zadovoljili sve veće i zahtjevnije potrebe računalne tehnologije, počelo je sve intenzivnije istraživanje tehnologija izrade novih RAM memorija. Upravo je to i svrha ovoga rada da shvatite načela rada, karakteristike, prednosti i nedostatke samih memorija kao i samu usporedbu između različitih vrsta memorija.

**Ključne riječi:** memorija, RAM, MRAM, RRAM, PCM, FRAM, STT RAM, CAMM

## **SUMMARY**

This work is based on RAM memory research and memory manufacturing technologies. RAM memory is one of the most important elements of your computer because it is used to store program code and data while the program is running. Many previous forms of RAM lose data when the computer is turned off. In order to solve these problems and to meet the increasing and demanding needs of computer technology, more and more intensive research into new RAM memory manufacturing technologies began. This is exactly the purpose of this work, to understand the working principles, characteristics, advantages and disadvantages of the memories themselves, as well as the comparison between different types of memories..

**Keywords:** memory, RAM, MRAM, RRAM, PCM, FRAM, STT RAM, CAMM

## SADRŽAJ

<b>SAŽETAK .....</b>	<b>I</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>I</b>
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. SRAM.....</b>	<b>2</b>
2.1 NAČELO RADA.....	3
2.2 UPOTREBA .....	4
<b>3. DRAM.....</b>	<b>5</b>
3.1 NAČELO RADA.....	5
3.2 FORMATI MEMORIJSKIH MODULA .....	6
<b>4. SDRAM.....</b>	<b>8</b>
4.1 POVIJEST .....	8
4.2 DDR1 .....	9
4.3 DDR2 .....	10
4.4 DDR3 .....	11
4.5 DDR4 .....	12
4.6 DDR5 .....	13
<b>5. MRAM.....</b>	<b>15</b>
5.1 NAČELO RADA.....	15
5.2 USPOREDBA.....	16
<b>6. RRAM.....</b>	<b>17</b>
6.1 NAČELO RADA.....	17
6.2 CBRAM .....	18
6.3 USPOREDBA.....	19
<b>7. PCM .....</b>	<b>20</b>
7.1 NAČELO RADA.....	20
7.2 MATERIJALI IZRADE.....	21

7.3 PREDNOSTI .....	21
<b>8. FRAM .....</b>	<b>23</b>
8.1 PREDNOSTI .....	23
8.2 NAČELO RADA .....	24
<b>9. STT RAM .....</b>	<b>25</b>
9.1 NAČELO RADA .....	25
9.2 STRUKTURA .....	26
<b>10. CAMM .....</b>	<b>27</b>
10.1 STRUKTURA .....	27
10.2 PREDNOSTI .....	28
<b>11. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>30</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>31</b>
<b>KAZALO KRATICA.....</b>	<b>32</b>
<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>34</b>



# 1. UVOD

Memorija s nasumičnim pristupom ili RAM (eng. Random Access Memory) je fizički hardver unutar računala koji privremeno pohranjuje podatke te služi kao radna memorija računala kojoj pristupa CPU (eng. central processing unit). U RAM se upisuju aktivni programi, te informacije potrebne za trenutačan rad računala. Služi također i za čuvanje programskoga koda. Mnogi oblici RAM-a, za razliku od ostalih memorijskih uređaja, gube podatke kada je računalo ugašeno. Upravo radi takvih nedostataka kao što je gubljenje podataka kada se računalo izgasi, mnogi stručnjaci istražuju nove vrste i tehnologije RAM memorija s ciljem poboljšanja karakteristika memorija. Kako je i sam naslov ovoga rada RAM memorija, svrha ovoga rada je da još više upoznate s RAM memorijama i svime vezano za njih. Imamo dosta vrsta RAM memorije te svaka od njih ima svoju posebnost. Ta posebnost se može ogledati u tehnologiji izrade, načelu rada ili po specifičnim karakteristikama.

Današnja računalna tehnologija napreduje svakim danom sve značajnije, a samim time i potrebe korisnika. Postoji jako veliki broj novih memorija odnosno tehnologija izrade. Svaka memorija nosi svoje određene prednosti kao i nedostatke, ali to olakšava izbor jer sa većim izborom lakše je pronaći za kupca ono šta mu je potrebno. Memorije poput MRAM-a, PCM-a, FRAM-a, RRAM-a koje se mogu nazvati novije vrste svakim danom napreduju i sve imaju veću ulogu u svijetu memorija i zamjenjuju standardne prijašnje vrste memorije.

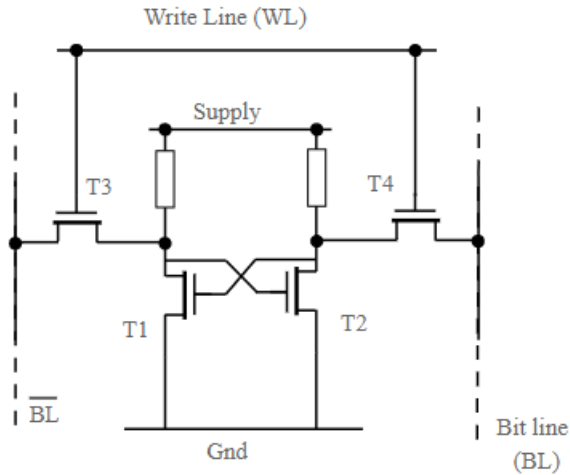
Također govorit će se o memorijskom obliku CAMM koji bi zamjenio dosadašnji SO-DIMM dizajn. SO-DIMM dizajn dugi niz godina nije imao značajnih promjena, a u današnje vrijeme nam je potrebno sve više RAM-a zbog sve većih zahtjeva korisnika, a upravo zato nam služi CAMM memorijski modul.

## 2. SRAM

SRAM (eng. Static random-access memory) je statička memorija sa slučajnim pristupom. To je vrsta RAM memorije koja se široko koristi u elektronici, mikroprocesorima i općim računalnim aplikacijama. Ovaj oblik računalne memorije dobiva svoje ime po činjenici da se podaci drže u memorijskom čipu na statičan način. Podaci u SRAM memoriji su nepostojani, što znači da kada se memorijski uređaj isključi iz napajanja, podaci se ne zadržavaju i nestat će. RAM je najprikladniji za sekundarne operacije poput procesorske memorije za brzo spremanje memorija i pohranjivanje registara. Najčešće se nalazi na tvrdim diskovima kao predmemorija diskova. SRAM memorija je oblik memorije s izravnim pristupom. Memorija s izravnim pristupom je ona u kojoj se lokacije u poluvodičkoj memoriji mogu pisati ili čitati bilo kojim redoslijedom, bez obzira na posljednju memorijsku lokaciju kojoj je pristupljeno.

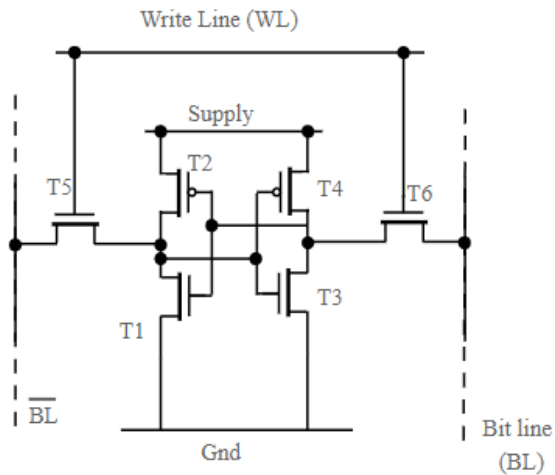
Krug za pojedinačnu SRAM memorijsku ćeliju obično se sastoji od četiri tranzistora pomoću dva invertera križno spojenih. U ovom formatu sklop ima dva stabilna stanja, a ona su jednaka logičkim stanjem 0 i logičkim stanjem 1. Tranzistori su MOSFET-ovi jer je količina energije koju troši MOS krug znatno manja od one kod tehnologije bipolarnog tranzistora koja je druga moguća opcija, ali će trošiti mnogo više energije. Uz četiri tranzistora u osnovnoj memorijskoj ćeliji potrebna su i dodatna dva tranzistora za kontrolu pristupa memorijskoj ćeliji tijekom operacija čitanja i pisanja. To čini ukupno šest tranzistora, što čini ono što se naziva 6T memorijska ćelija. Iako je složenija u smislu broja komponenti, ima brojne prednosti. Glavna prednost SRAM kruga sa šest tranzistora je smanjena statička snaga. U verziji s četiri tranzistora postoji konstantan tok struje kroz jedan ili drugi otpornik i to povećava ukupnu potrošnju energije čipa. To može ograničiti razinu integracije kao i povećati probleme s dizajnom strujnog kruga kao rezultat povećane disipacije snage. Također je vrijedno spomenuti da SRAM računalna memorijska ćelija s četiri tranzistora pruža neke prednosti u smislu svoje gustoće, ali to dolazi po cijenu složenosti proizvodnje jer je otpornike potrebno proizvesti i to zahtijeva dodatnu obradu. Također, otpornici moraju imati male dimenzije i velike vrijednosti kako bi zadovoljili zahtjeve za ćeliju. S poluvodičkim memorijama koje se protežu do vrlo velikih dimenzija, svaka ćelija mora postići vrlo

niske razine potrošnje energije kako bi se osiguralo da cjelokupni čip ne rasipa previše energije. U nastavku možete vidjeti slike 1. i 2. koji pokazuju SRAM memorijske ćelije sa četiri tranzistora kao i drugu verziju sa šest tranzistora.



**Slika 1. Struktura SRAM memorijske ćelije sa četiri tranzistora**

Izvor: [www.electronics-notes.com](http://www.electronics-notes.com)



**Slika 2. Struktura SRAM memorijske ćelije sa šest tranzistora**

Izvor: [www.electronics-notes.com](http://www.electronics-notes.com)

## 2.1 NAČELO RADA

Rad SRAM memorijske ćelije je relativno jednostavan. Kada je ćelija odabrana, vrijednost koju treba upisati pohranjuje se u jedan od krugova. Ćelije su raspoređene u matricu, pri čemu se svaka ćelija zasebno adresira. Većina SRAM memorija odabire cijeli red ćelija odjednom i čita sadržaj svih ćelija u retku duž linija stupaca. Iako nije

potrebno imati dvije linije bita, koristeći signal i njegov inverzni signal, to je normalna praksa koja poboljšava granice šuma i poboljšava integritet podataka. Ako su dvije linije iste, tada će sustav shvatiti da postoji problem i ponovno ispitati ćeliju. Dvije linije bita prosljeđuju se na dva ulazna priključka na komparatoru kako bi se omogućio pristup prednostima diferencijalnog podatkovnog načina, a male promjene napona koja su prisutna mogu se točnije otkriti. Pristup SRAM memorijskoj ćeliji omogućen je preko adresnoga voda za upis i čitanje (Word line). On upravlja dvama tranzistorama za kontrolu pristupa koji kontroliraju treba li ćelija biti spojena na vod za upis i čitanje (Bit line). Ova dva voda koriste se za prijenos podataka za operacije čitanja i pisanja.

## **2.2 UPOTREBA**

SRAM memorija se koristi kao mikrokontroler i računalna memorija. Sa SRAM memorijom je lakše upravljati nego recimo sa DRAM memorijom budući da ciklusi osvježavanja ne moraju biti uzeti u obzir, a osim toga način na koji se SRAM-u može pristupiti je lakši pristup. Dodatna prednost SRAM-a je ta što je gušći od DRAM-a. SRAM memorija se koristi tamo gdje se razmatraju brzina ili niska snaga. Njegova veća gustoća i manje komplicirana struktura prednost je pa ga se može koristiti u poluvodičkim memorijama gdje se koristi memorija velikog kapaciteta, kao u slučaju radne memorije unutar računala. Široko se koristi u mikrokontrolerima gdje je potreban manje kompliciran rad i niska snaga. Za razliku od Flash memorije ili EEPROM tehnologije, trajni SRAM nema ograničenja pisanja, tj. nema ograničenja broja ciklusa pisanja/čitanja što ga čini idealnim za aplikacije za bilježenje podataka u stvarnom vremenu. Iako nema mogućnosti nekih oblika računalne memorije, svejedno se naširoko koristi za aplikacije kao što je rukovanje predmemorijama u računalima, a posebno u mikrokontrolerima gdje mu brzina, niska snaga i jednostavniji rad pomažu u ovakvim situacijama daleko više nego DRAM, Flash i drugi oblici računalne memorije.

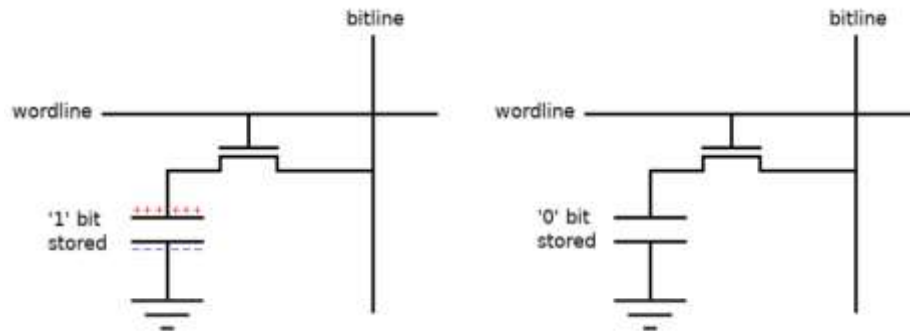
### 3. DRAM

DRAM (eng. Dynamic Random Access Memory) ili dinamički RAM vrsta je poluvodičke memorije kod koje se podaci čuvaju kao električni naboj u kondenzatoru unutar integriranog kruga. DRAM je uobičajena vrsta memorije s izravnim pristupom koja se koristi u osobnim računalima. Nasumični pristup omogućuje procesoru osobnog računala izravan pristup bilo kojem dijelu memorije umjesto da mora nastaviti uzastopno od početnog mjesta. RAM se nalazi u blizini procesora računala i omogućuje brži pristup podacima. Zbog nesavršenosti kondenzatora električni naboj se izbija, pa ga je potrebno periodično osvježavati. Tome služe dodatni sklopovi koji prvo čitaju trenutno stanje, te ga potom obnavljaju. Čitanje podataka iz DRAM-a je destruktivno. To znači da se kondenzator pri čitanju prazni te ga je poslije čitanja potrebno ponovo napuniti, ovisno o stanju prije čitanja. Sva računala imaju RAM, a DRAM je jedna vrsta RAM-a koju vidimo u modernim stolnim i prijenosnim računalima. DRAM je 1968. godine izumio Robert Dennard, a Intel ga je na tržište pustio 70-ih prošlog stoljeća. Obično ima oblik čipa integriranog kruga, koji se može sastojati od desetaka do milijardi DRAM memorijskih ćelija. DRAM čipovi naširoko se koriste u digitalnoj elektronici gdje je potrebna jeftina računalna memorija velikog kapaciteta. Jedna od najvećih primjena DRAM-a je da je glavna memorija u modernim računalima i grafičkim karticama.

#### 3.1 NAČELO RADA

Osnovna ćelija za pohranu unutar DRAM-a sastoji se od dva elementa: tranzistora i kondenzatora. Kada treba staviti bit u memoriju, tranzistor se koristi za punjenje ili pražnjenje kondenzatora. Napunjeni kondenzator predstavlja logičku 1, dok ispražnjeni kondenzator predstavlja logičku 0. Punjenje ili pražnjenje se vrši preko adresnoga voda za upis i čitanje (wordline) te voda za upis i čitanje (bitline). Naboj pohranjen na svakom kondenzatoru je premalen da bi se mogao izravno očitati i umjesto toga se mjeri krugom koji se naziva senzorsko pojačalo. Senzorsko pojačalo detektira male razlike u naboju i daje odgovarajuću logičku razinu. Čin čitanja iz linije bitova tjera naboj da izbije iz kondenzatora. Stoga su u DRAM-u čitanja destruktivna. Kako bi se to zaobišlo, izvodi se operacija poznata kao prednaboj kako bi se vrijednost očitana s linije bitova vratila u kondenzator. Jednako je problematična činjenica da kondenzatori s vremenom ispuštaju naboj. Stoga, za održavanje podataka pohranjenih u

memoriji, kondenzatori se moraju povremeno osvježavati. Osvježavanje funkcionira kao čitanje i osigurava da se podaci nikada ne izgube. Objašnjeno možemo vidjeti na slici broj 3.



**Slika 3. Dizajn MRAM ćelije**

Izvor: [www.renesas.com](http://www.renesas.com)

### 3.2 FORMATI MEMORIJSKIH MODULA

Iako se DRAM proizvodi kao integrirani sklopovi, obično u formatu za površinsku montažu na tiskane ploče, memorija dostupna za korištenje u osobnim računalima i drugim računalnim aplikacijama često je u formatu malih modula koji sadrže niz različitih IC-ova. Ovi moduli s više čipova dostupni su u brojnim formatima:

- Jednoredni memorijski modul, SIMM: Ova vrsta DRAM-a ili memorijskog paketa sadrži do osam RAM čipova. Drugi važan faktor je širina sabirnice, koja za SIMM-s iznosi 32 bita. S porastom brzine procesora i njihovom sve većom snagom došlo je do povećanja širine sabirnice.
- Dual In-line memorijski modul, DIMM: S povećanjem širine podatkovne sabirnice, DIMM-ovi su počeli zamjenjivati SIMM-ove kao dominantnu vrstu memorijskih modula. Glavna razlika između SIMM-a i DIMM-a je u tome što DIMM ima zasebne električne kontakte sa svake strane modula, dok su kontakti na SIMM-u s obje strane suvišni. Standardni SIMM-ovi također imaju 32-bitnu sabirnicu podataka, dok standardni DIMM-ovi imaju 64-bitnu sabirnicu podataka.

- Rambus In-line Memory Module, RIMM: Ova vrsta DRAM memorijskog paketa je u biti ista kao DIMM, ali se naziva RIMM-ovima zbog zahtjeva proizvođača i vlasničkog prava.
- DIMM male konture, SO-DIMM: Ova vrsta DRAM paketa otprilike je upola manja od standardnog DIMM-a. Budući da su manji, koriste se u malim osobnim računalima, uključujući prijenosna računala, netbookove i slično.

Kako se veličina memorije povećava, pitanje omjera signala i šuma postaje vrlo važno. Na prvi pogled ovo se možda ne čini kao veliki problem, ali može dovesti do problema s oštećenjem podataka. Omjer signala i šuma ovisi o omjeru kapaciteta kondenzatora za pohranu unutar DRAM memorije prema kapacitetu linije na koju se naboj prazni kada se pristupi ćeliji. Kako se gustoća bitova po čipu povećava, omjer se smanjuje jer se površina ćelije smanjuje kako se više ćelija dodaje na liniji bitova. Iz tog je razloga važno pohraniti što veći napon na kondenzator ćelije, a također i povećati kapacitet DRAM memorijskog kondenzatora za određena područja što je više moguće. Ovo je vrlo važno i bitno jer je otkrivanje malog naboja na kondenzatoru memorijske ćelije jedno od najizazovnijih područja dizajna DRAM memorijskog čipa. DRAM memorijski čipovi naširoko se koriste i tehnologija je vrlo dobro uspostavljena.

## 4. SDRAM

SDRAM (eng. Synchronous Dynamic Random Access Memory) je vrsta DRAM memorije koja može raditi većim brzinama od standardnoga DRAM-a i naširoko se koristi kao memorija s izravnim pristupom u računalu. SDRAM posjeduje sinkrono sučelje kroz koje se promjena upravljačkog ulaza može prepoznati nakon rastućeg ruba njegova takta. Memorija je podijeljena u nekoliko jednakih, ali neovisnih odjeljaka (zvanih banke), tako da uređaj može istodobno raditi prema naredbama za pristup memoriji u svakoj banci i ubrzati brzinu pristupa. Sa SDRAM-om koji ima sinkrono sučelje, također ima interni stroj koji usmjerava dolazne upute. To omogućuje SDRAM-u da radi na složeniji način od asinkronog DRAM-a i rad pri puno većim brzinama. Kao rezultat toga, može držati dva seta memorijskih adresa otvorenima istovremeno. Prijenosom podataka naizmjenično s jednog skupa adresa, a zatim s drugog, smanjuje kašnjenja povezana s asinkronim RAM-om, koji mora zatvoriti jednu banku adresa prije otvaranja sljedeće.

### 4.1 POVIJEST

Korištenje SDRAM-a bilo je toliko učinkovito da je trebalo samo oko četiri godine nakon njegovog uvođenja 1996. godine prije nego što je njegova upotreba premašila upotrebu DRAM-a kao glavnog oblika računalne memorije zbog veće brzine rada. Osnovna ideja iza SDRAM-a postoji već mnogo godina. Prve ideje pojavile su se već sedamdesetih godina prošlog stoljeća. Koncept SDRAM-a također se koristio u nekim ranim Intelovim procesorima. Jedna od prvih komercijalnih ponuda SDRAM-a bio je KM48SL2000 koji je predstavio Samsung 1993. Iako nije odmah dobio univerzalno prihvaćanje, prihvaćanje je bilo relativno brzo nakon što je ideja uspostavljena. Poboľjšana brzina SDRAM-a značila je da je otprilike na prijelazu stoljeća, 2000. godine SDRAM praktički zamijenio standardnu DRAM tehnologiju u većini računalnih aplikacija. Kako bi se osiguralo da je SDRAM tehnologija međusobno zamjenjiva, JEDEC, industrijsko tijelo za standarde poluvodiča, usvojilo je svoj prvi SDRAM standard 1993. To je omogućilo otvoreni zajednički standard za razvoj SDRAM-a. Također je omogućio razvojnim programerima da budu u mogućnosti koristiti proizvode više od jednog proizvođača i imati održivu opciju drugog izvora. S uspostavljanjem osnovnog SDRAM-a došlo je do daljnjeg razvoja.



Oblik SDRAM-a poznat kao dvostruka brzina prijenosa podataka, DDR1 (eng. Double Data Rate) pojavio se 2000 godine. Nakon DDR1 uslijedila je sljedeća verzija nazvana DDR2. Prve ponude DDR2 bile su inferiornije u odnosu na prethodni DDR1, ali do kraja 2004. njegove su performanse poboljšane tako da su njegove performanse premašile performanse DDR1 formata. Kasnije je lansirana sljedeća verzija DDR3, a prvi prototipovi najavljeni su početkom 2005. Međutim, trebalo je do sredine 2007. prije nego što su prve matične ploče računala koje koriste DDR3 postale dostupne. Daljnji razvoj uključuje sljedeću fazu SDRAM-a koja je bila DDR4 nakon koje je uslijedio DDR5.

## 4.2 DDR1

DDR1 bio je razvoj prve SDRAM memorijske tehnologije za poboljšanje njezinih performansi. Inicijali DDR označavaju Double Data Rate i kao takav dao je značajno povećanje brzine rada prethodne generacije SDRAM tehnologije u vrijeme svog predstavljanja. DDR1 bila je prva verzija ove tehnologije i postigla je povećanje brzine prijenosom podataka dva puta po ciklusu, tj. i na uzlaznom i zatim na silaznom rubu signala takta. Kao rezultat poboljšane brzine, DDR1 je brzo prihvaćen. Vrlo uski vremenski zahtjevi često zahtijevaju upotrebu fazno zaključanih petlji i tehniku samokalibracije kako bi se osiguralo da je vremenski raspored dovoljno točan. Ključ rada je da DDR1 može prenijeti podatke i na rastućim i na silaznim rubovima impulsa takta. Ovo ima mnoge prednosti, ne samo da povećava brzinu prijenosa podataka, već i smanjuje druge probleme kao što su zahtjevi za integritetom signala. Pri ovim brzinama, integritet signala može postati značajan problem, a maksimiziranje brzine prijenosa podataka za danu brzinu takta osigurava poboljšanja u tom području. Snaga potrebna za DDR1 povezana je s brojem redova koji su otvoreni u bilo kojem trenutku. Dakle, da bi se postigao najbrži rad, potrebno je otvoriti niz redova zajedno, ali to troši više energije. Za rad s malom snagom, samo jedan red bi trebao biti otvoren u bilo kojem trenutku u svakoj banci, a također ne bi trebalo biti više banaka s otvorenim redovima. DDR1 dao je značajna poboljšanja u performansama u to vrijeme. Što se tiče brojki i usporedbe sa SDRAM-om možemo izdvojiti radni napon (Voltage), brzinu prijenosa (Transfer Rate), širina međuspremnika prethodnog dohvaćanja (Prefetch) i brzina izvođenja operacije (Data Rate). Na slici broj 4. možemo vidjeti u brojkama usporedbu prve generacije DDR1 u odnosu SDRAM.

	SDRAM	DDR
Prefetch	1 - Bit	2 - Bit
Data Rate (MT/s)	100 - 166	266 - 400
Transfer Rate (GB/s)	0.8 - 1.3	2.1 - 3.2
Voltage (V)	3.3	2.5 - 2.6

**Slika 4. Usporedba SDRAM i DDR1**

Izvor: [www.crucial.com](http://www.crucial.com)

### 4.3 DDR2

DDR2 je skraćenica od Double Data Rate 2. DDR2 u odnosu na DDR1 ne samo da može dvostruko puniti podatkovnu sabirnicu (prenositi podatke o rastućim i padajućim rubovima takta sabirnice) već i povećati brzinu sabirnice i smanjiti potrošnju energije pokretanjem unutarnjeg sata na polovici brzine sabirnice podataka. Kombinacija ova dva čimbenika rezultira u ukupno četiri prijenosa podataka po unutarnjem ciklusu takta. DDR2 koji radi na dvostrukom taktu vanjske sabirnice podataka od DDR1-a može pružiti dvostruku širinu pojasa s istim kašnjenjem. Brzina najboljeg DDR2 memorijskog modula najmanje je dvostruko veća od brzine najboljeg DDR1 memorijskog modula. Budući da DDR2 unutarnji takt radi na polovici DDR1 vanjskog takta, DDR2 memorija radi na istoj brzini takta vanjske sabirnice podataka kao DDR1, što omogućuje DDR2 da pruži istu propusnost, ali s boljom latencijom. Glavna razlika između DDR2 i DDR1 je povećanje duljine preddohvaćanja. U DDR-u duljina preddohvata je dva bita po bitu u riječi, dok u DDR2-u iznosi 4 bita. Tijekom pristupa, četverobitni red za unaprijed dohvaćanje u dubinu je pročitano ili zapisano s četiri bita. Poboljšanja u električnim sučeljima, završetak na čipu, međuspremnicima za unaprijed dohvaćanje i upravljački programi izvan čipa povećali su frekvenciju sabirnice DDR2. Ipak, kao faktor kompromisa, latencija DDR2 uvelike će se povećati. Povećanje duljine preddohvata omogućilo je DDR2 da udvostruči brzinu prijenosa podataka kroz sabirnicu podataka bez povećanja brzine prijenosa podataka. Dizajn je izbjegao pretjerano povećanje potrošnje energije. Ušteda energije uglavnom se postiže poboljšanjem proizvodnog procesa smanjenjem površine čipa, što dovodi do smanjenja radnog napona na 1.8 V. Niža frekvencija takta memorije također smanjuje potrošnju energije u aplikacijama koje ne zahtijevaju najvišu dostupnu brzinu prijenosa podataka.

Iako je uobičajena latencija čitanja DDR1 2 do 3 ciklusa sabirnice, latencija čitanja DDR2 može biti 3 do 9 ciklusa. Međutim, tipični raspon je od 4 do 6. Stoga on mora raditi s dvostrukom brzinom prijenosa podataka da bi postigao istu latenciju. Slika 5. nam prikazuje usporedbu DDR21 i DDR2 u brojkama kao i prethodna usporedba između DDR1 i SDRAM-a.

	DDR	DDR2
Prefetch	2 - Bit	4 - Bit
Data Rate (MT/s)	266 - 400	533 - 800
Transfer Rate (GB/s)	2.1 - 3.2	4.2 - 6.4
Voltage (V)	2.5 - 2.6	1.8

**Slika 5. Usporedba DDR1 i DDR2**

Izvor: [www.crucial.com](http://www.crucial.com)

#### 4.4 DDR3

DDR3 je vrsta sinkrone dinamičke memorije slučajnog pristupa (SDRAM) s sučeljem velike propusnosti. DDR3 je brži nasljednik DDR1-a i DDR2-a, a ujedno je i prethodnik DDR4 čipova. Glavna prednost DDR3 u usporedbi s njegovim izravnim prethodnikom, DDR2, je sposobnost prijenosa podataka dvostrukom brzinom, osam puta većom od brzine internih memorijskih nizova, omogućujući veću propusnost ili vršne brzine podataka. 64-bitni DDR3 modul može postići brzinu prijenosa do 64 puta veću od brzine memorijskog takta odašiljajući dva puta ciklus četverokutnog signala. DDR3 standard dopušta DRAM čipove kapaciteta do 8 gigabita i ima maksimalno 4 razine, svaka od 64 bita, ukupnog kapaciteta do 16 GB po DDR3 DIMM-u. U usporedbi s DDR2, DDR3 troši manje energije. Ovo smanjenje dolazi zbog neusklađenosti napona napajanja: DDR2 je 1,8 V, dok DDR3 iznosi 1,35 V ili 1,5 V. Napon od 1,5 V dobro funkcionira s 90-nanometarskom tehnologijom izrade koja se koristi u originalnim DDR3 čipovima. DDR3 dual-inline memorijski moduli (DIMM-ovi) imaju 240 pinova i nisu električki kompatibilni s DDR2. Lokacije ključnih ureza u DDR2 i DDR3 DIMM-ovima razlikuju se, sprječavajući slučajnu zamjenu. Ne samo da se različito tipkaju, već strana DDR2 ima okrugle ureze, dok strana DDR3 modula ima četvrtaste ureze. Latencije DDR3 su brojčano veće jer su ciklusi takta I / O sabirnice

koji ih mjere kraći. Stvarni vremenski interval sličan je kašnjenju DDR2, oko 10 ns. Slika 6 nam prikazuje usporedbu DDR2 i DDR3.

	DDR2	DDR3
Prefetch	4 - Bit	8 - Bit
Data Rate (MT/s)	533 - 800	1066 - 1600
Transfer Rate (GB/s)	4.2 - 6.4	8.5 - 14.9
Voltage (V)	1.8	1.35 - 1.5

**Slika 6. Usporedba DDR2 i DDR3**

Izvor: [www.crucial.com](http://www.crucial.com)

#### 4.5 DDR4

DDR4 vrsta je sinkrone dinamičke memorije s izravnim pristupom sa sučeljem visoke propusnosti. Kao i kod uvođenja DDR3 standarda, DDR4 prvenstveno radi na bržoj brzini. Najbrža JEDEC standardna DDR3 memorija radi na 1600MHz. Nasuprot tome, nove DDR4 memorijske brzine počinju na 2133MHz što je povećanje brzine od 33%. JEDEC standardi za DDR4 također određuju brzinu od 3200MHz što je duplo od trenutnog ograničenja DDR3 1600MHz. Kao i kod drugih generacija, povećane brzine također znače povećanje latencije. Latencija se odnosi na to koliko dugo je potreban memorijski kontroler da u pravilu preuzmu naredbe za pristup memoriji i zapravo čitanje ili pisanje memorijskih modula. Što je brža memorije, to je više ciklusa koje obično traži da kontroler to obradi. Snaga koju računala troše je najvažnije pitanje naročito kada gledamo tržište. Što je manje energije koja se troši, duže se uređaj može pokrenuti na baterijama. Kao i kod svake generacije DDR memorije, DDR4 još jednom smanjuje količinu energije potrebne za rad. Ovoga puta, naponski nivoi su pali sa 1.5 V na 1.2 V. Ovo možda ne izgleda puno, ali može napraviti veliku razliku sa laptop sistemima. Kao i DDR3, DDR4 ima niskonaponski standard koji omogućava još niže zahtjeve za napajanje za one sisteme dizajnirane da koriste ovaj tip memorije. Slika 7 nam prikazuje usporedbu DDR3 i DDR4.

	DDR3	DDR4
Prefetch	8 - Bit	Bit per Bank
Data Rate (MT/s)	1066 - 1600	2133 - 5100
Transfer Rate (GB/s)	8.5 - 14.9	17 - 25.6
Voltage (V)	1.35 - 1.5	1.2

**Slika 7. Usporedba DDR3 i DDR4**

Izvor: [www.crucial.com](http://www.crucial.com)

#### 4.6 DDR5

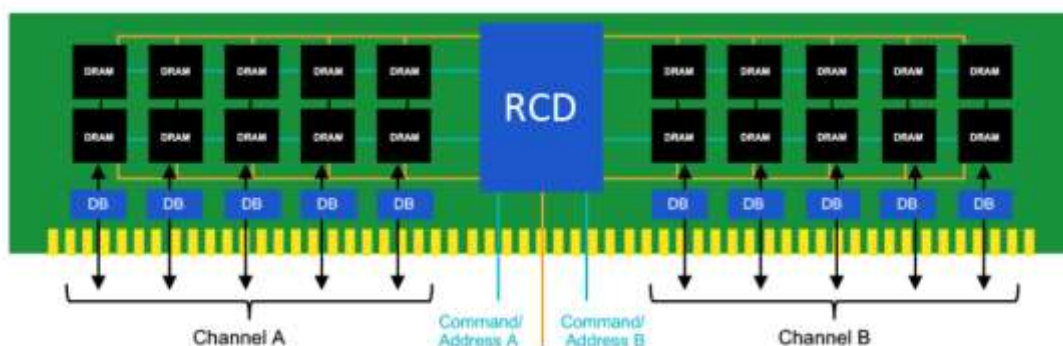
DDR5 je najnovija verzija SDRAM memorije koja je izašla na tržište 2020. godine. U usporedbi sa svojim prethodnikom DDR4, planirano je da DDR5 smanji potrošnju energije i udvostruči propusnost kao glavne značajke napredka. Kada se govori o propusnosti memorije, uvijek je potrebna što veća propusnost, a upravo to donosi DDR5 memorija. Velika prednost kod DDR5 memorije je smanjanje radnoga napona na 1.1V. Još jedna prednost DDR5 je što će se nositi s regulacijom napona na samim modulima, što će značiti da matična ploča neće više morati upravljati naponom. Kod DDR4 je napon od 1.2V. Smanjenjem radnoga napona dobivamo manju potrošnju energije. DDR5 memorijski moduli također uključuju ECC (ili kontrolu ispravljanja pogrešaka), što pomaže u otkrivanju ispravljanja i otkrivanju pogrešaka. Još jedna revolucionarna promjena s DDR5 memorijskim standardom je da je regulator napona premješten na sam modul. U memorijskim modulima stare generacije, regulatori napona su smješteni na matičnoj ploči. Također imamo i veliko povećanje kapaciteta memorija. DDR5 može imati kapacitet do 256 GB, što je četiri puta više nego šta imamo na DDR4 s kapacitetom od 64 GB. Još jedna velika promjena kod DDR5, je nova arhitektura DIMM kanala. DDR4 DIMM-ovi imaju 72-bitnu sabirnicu, koja se sastoji od 64 podatkovna bita plus osam ECC bitova. Slika 8 nam prikazuje usporedbu DDR4 i DDR5.

	DDR4	DDR5
Prefetch	8 Bit per Bank	16 - Bit
Data Rate (MT/s)	2133 - 5100	3200 - 6400
Transfer Rate (GB/s)	17 - 25.6	38.4 - 51.2
Voltage (V)	1.2	1.1

**Slika 8. Usporedba DDR4 i DDR5**

Izvor: [www.crucial.com](http://www.crucial.com)

Uz DDR5, svaki DIMM će imati dva kanala. Svaki od ovih kanala je širok 40 bita: 32 podatkovna bita s osam ECC bitova. Dok je širina podataka ista (ukupno 64 bita), dva manja neovisna kanala poboljšavaju učinkovitost pristupa memoriji. U arhitekturi DDR5 DIMM-a, lijeva i desna strana DIMM-a, a svaku opslužuje neovisno 40-bitni široki kanal, dijeli RCD. RCD je čip registriranog pokretača sata, ili jednostavno poznat kao registar, jedna je od glavnih komponenti RDIMM-ova. Njegova glavna funkcija je prvo primanje uputa ili naredbi od CPU-u prije nego šta ih pošalje memorijskim modulima. RCD služi kao veza između CPU-a i DIMM-a. Podatkovni signal ostaje na RCD-u jedan ciklus takta, a zatim se prenosi s RCD-a na DIMM na uzlaznom rubu sljedećeg signala takta. To rezultira time da instrukcije traju jedan CPU ciklus dulje, ali pohranjivanje u međuspremnik smanjuje opterećenje memorijskog kontrolera CPU-a i pomaže smanjiti utjecaj na integritet signala. U DDR4, RCD daje dva izlazna takta po strani. U DDR5, RCD daje četiri izlazna takta po strani. Arhitekturu DIMM kanal kod DDR5 vidimo na slici broj 9.



**Slika 9. Arhitekturu DIMM kanal kod DDR5**

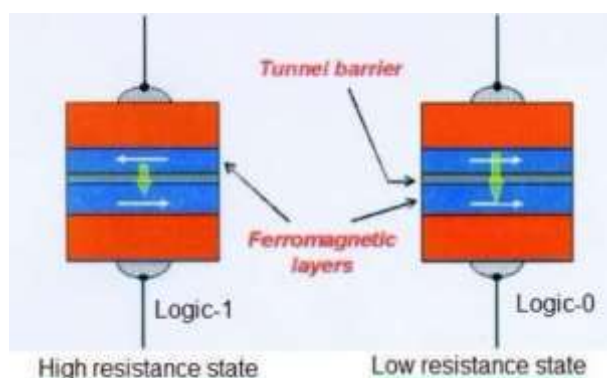
Izvor: [www.rankred.com](http://www.rankred.com)

## 5. MRAM

MRAM (eng. Magnetoresistive random-access memory) je nehlapljiva memorijska tehnologija s slučajnim pristupom koja koristi magnetske naboje za pohranu podataka umjesto električnih naboja. Memorijska tehnologija MRAM također ima prednost što je tehnologija male snage jer ne zahtijeva napajanje za održavanje podataka kao u slučaju mnogih drugih memorijskih tehnologija. Iako je memorijska tehnologija MRAM-a poznata više od deset godina, tek nedavno se ta tehnologija počela proizvoditi u velikim količinama. Time je MRAM tehnologija dovedena do točke u kojoj je komercijalno isplativa. Prednost je ta šta MRAM zadržava svoje podatke kada se napajanje isključi. U usporedbi s Flash memorijom i EEPROM nudi veću brzinu pisanja čitanja. Također ima prednost u obliku potrošnje energije jer troši relativno nisku razinu energije.

### 5.1 NAČELO RADA

Kao primjer rada MRAM-a i za lakše razumijevanje navesti ćemo jedan primjer. Jedan od feromagnetskih slojeva MTJ -a, nazvan referentni sloj, održava svoj magnetski smjer fiksnim, dok se drugi, zvani slobodni sloj, može promijeniti smjer pomoću magnetskih polja ili primjenom polariziranih struja. Kada i referentni i slobodni sloj imaju isti smjer, otpor MTJ je mali i pohranjuje se logičko stanje 0. Međutim, ako imaju različite smjerove, otpor je velik i pohranjuje se logičko stanje 1 kao i što vidimo na slici broj 10.



**Slika 10. Logička stanja MRAM-a**

Izvor: [www.rfwireless-world.com](http://www.rfwireless-world.com)

MRAM tehnologija temelji se na strukturi zvanoj magnetski tunelski spoj (eng. MTJ-magnetic tunnel junction) koja se sastoji od dva feromagnetna sloja odvojena izolacijskim slojem. MRAM radi tako da mijenja otpor MTJ-a za pohranu promjenom stanja na logičko stanje 1 i logičko stanje 0. Otpor MTJ-a ovisi o relativnim orijentacijama dva feromagnetska sloja i može prihvatiti dvije vrijednosti otpora, a to su veliki otpor ili mali otpor.

## **5.2 USPOREDBA**

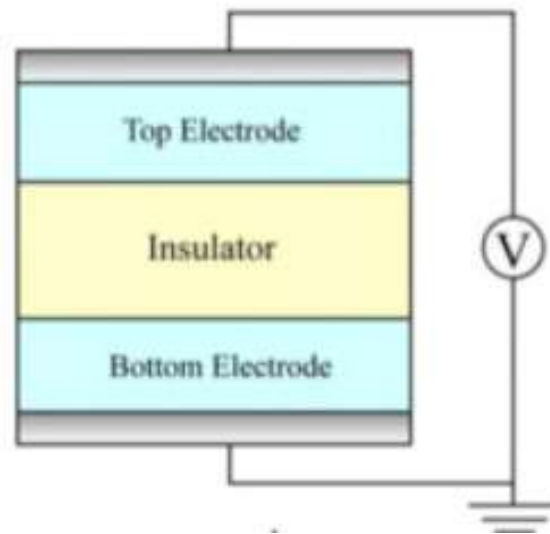
Za razliku od većine ostalih memorijskih tehnologija, podaci se pohranjuju kao magnetsko stanje, a zapisuje se mjerenjem otpora bez narušavanja magnetskog stanja. Ova tehnologija ima dvije glavne prednosti. Prva prednost je ta šta magnetska polarizacija ne slabi s vremenom kao naboj, tako da se informacije pohranjuju čak i kada se isključi napajanje. Druga prednost je prebacivanje magnetske polarizacije između dva stanja ne uključuje stvarno kretanje elektrona ili atoma i stoga nema trošenja mehanizma.

Usporedba MRAM-a s drugom memorijskom tehnologijom sugerira nam da sveukupno može biti konkurentan. Budući da je MRAM nehlapljiv, on zadržava podatke kada je potpuno isključen. Jednostavna integracijska shema koja se koristi za MRAM olakšava ugradnju. Usporedba sa SRAM-om pokazuje da je MRAM povoljniji što se tiče same cijene zbog manje veličine ćelija. U usporedbi s Flash-om, MRAM postiže mnogo bolje performanse u karakteristikama upisivanja jer nije potreban visokonaponski način tuneliranja i MRAM ciklus pisanja je puno brži. Osim toga, MRAM izdržljivost je neograničena, dok je tipična izdržljivost Flash-a samo 105 ciklusa pisanja



## 6. RRAM

Sljedeća generacija NVM-a trebala bi pokazati izvanredna svojstva uključujući visoku gustoću, izvrsnu skalabilnost, nisku potrošnju energije i nisku cijenu. Otporna memorija s slučajnim pristupom (eng. RRAM- Resistive random-access memory) jedan je od obećavajućih kandidata koji ispunjavaju zahtjeve nove generacije NVM-a. Dodatno, RRAM ima jednostavnu metal/izolator/metal strukturu. Struktura je prikazan na slici broj 11.



**Slika 11. Struktura RRAM memorije**

Izvor: [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)

Također ima dobru komplementarnu kompatibilnost metal-oksid-poluvodič (CMOS), što je od vitalnog značaja za njegovu praktičnu primjenu i masovnu proizvodnju.

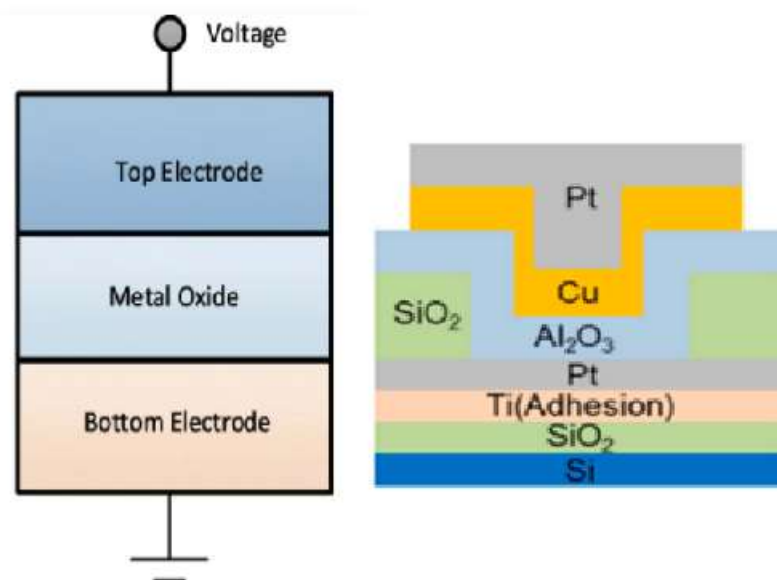
### 6.1 NAČELO RADA

Kao što naziv implicira, RRAM je memorija koja koristi promjenu otpora u električnom polju za zapisivanje informacija, pri čemu stanje visokog i niskog otpora odgovara logičkoj 0 i 1. U RRAM-u se prijelaz iz stanja visokog otpora (eng. HRS- high resistance state) u stanje niskog otpora (eng. LRS- low resistance state) obično naziva set, dok se obrnuti prijelaz naziva reset. U RRAM-u postoji dva načina preklapanja, unipolarni i bipolarni. Za unipolarni način rada, prebacivanje je neovisno o polaritetu primijenjenog napona, dok je za bipolarno prebacivanje potreban suprotan polaritet napona. Prebacivanje RRAM ćelije temelji se na rastu vodljive niti unutar

dielektrika. Vodljiva nit je kanal koji ima vrlo manji promjer reda nanometara koji povezuje gornju i donju elektrodu memorijske ćelije. Stanje niskog otpora (LRS) s visokom vodljivošću dobiva se kada je nit spojena, a visoki otpor (HRS) nastaje kada se nit odspoji s razmakom između elektroda.

## 6.2 CBRAM

Najpoznatija podvrsta RRAM memorije je CBRAM (eng. Conductive Bridging RAM). CBRAM tehnologija je univerzalno prilagodljiva kao temeljna memorija za širok raspon primjena od medicinskih uređaja sve do pametnih telefona. Omogućuje 100 puta manju potrošnju energije od današnjih vodećih memorijskih tehnologija bez gubitaka performansi i pouzdanosti. CBRAM ima veliku mogućnost da ispuni zahtjeve za tehnologiju nepromjenjive memorije sljedeće generacije (NVM). Glavne prednosti su velika brzina (nekoliko nanosekundi) i rad na niskom naponu ( $\pm 3$  V). U osnovi, struktura CBRAM sastoji se od jedne metalne elektrode koja je elektrokemijski aktivna tj. anoda ili, kao što je srebro (Ag) ili bakar (Cu), i druge koja je elektrokemijski inertna tj. katoda, kao što je platina (Pt), iridij (Ir), zlato (Au), volfram (W) ili titan-nitrid (TiN). Ove dvije elektrode su odvojene čvrstim elektrolitom ili oksidnim materijalima. Shematski prikaz strukture CBRAM-a vidimo na slici broj 12.



**Slika 12. Struktura i prikaz materijala CBRAM**

Izvor: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

Osnovno načelo rada CBRAM-a temelji se na reverzibilnom stvaranju elektrokemijski inducirane nanoskalarne vodljive niti u posebnom dielektriku koji djeluje kao ionski vodič. Podaci u memorijskim ćelijama pohranjeni su u obliku vrijednosti otpora dielektrika. Visok otpor podrazumijeva logičku 0, a nizak otpor implicira logičku 1. Ćelije se mogu prebacivati između ove dvije vrijednosti otpora primjenom kratkog naponskog impulsa na njih.

### **6.3 USPOREDBA**

Tijekom posljednjih nekoliko godina, istraživanja u području novih memorijskih tehnologija značajno su porasla i razvijeno je nekoliko prototipnih RRAM proizvoda koji pokazuju potencijal za aplikacije velike brzine i male snage ugrađene memorije. RRAM je jedna od najperspektivnijih memorijskih tehnologija zbog prednosti jednostavne strukture, kompatibilnosti s postojećom CMOS tehnologijom, dobre brzine prebacivanja i mogućnosti skaliranja do najmanjih dimenzija. Zapravo, trenutno se tehnologija Flash memorije suočava s poteškoćama da se smanji na manje dimenzije i kao takav RRAM se pojavljuje kao potencijalna zamjena posebno za brz rad i aplikacije memorije srednje veličine.

Jedan od najkritičnijih aspekata koji treba temeljito istražiti je pouzdanost RRAM-a. Mora se razviti mehanizam koji osigurava otkrivanje kvara u radu uređaja. Iako je zabilježeno da je izdržljivost RRAM-a sve stabilnija i bolja, to još uvijek nije dovoljno da bi se mogao zamijeniti DRAM. RRAM ima brzinu prebacivanja dovoljno brzu za zamjenu DRAM-a, a materijali korišteni u izradi RRAM-a vrlo su slični onima u DRAM-u, što postaje kritičan izazov za poboljšanje karakteristika izdržljivosti RRAM-a. Da bi se poboljšale karakteristike izdržljivosti, potrebno je kontrolirati kretanje kisika između elektrode i oksidnog sloja na sučelju. Predlaže se umetanje drugog metalnog sloja na sučelje koji se može lako oksidirati i koji djeluje kao spremnik kisika kako bi se spriječilo prodiranje kisika u elektrodu tijekom promjene otpora. Prije implementacije RRAM-a u buduće memorijske aplikacije potrebno je učinkovito riješiti gore navedene probleme. Iako je značajan uspjeh postignut u RRAM tehnologiji, još uvijek je potrebno više rada jer RRAM još uvijek ima problema u smislu velike radne struje, nižih omjera otpora i problema s pouzdanošću.

## 7. PCM

PCM (eng. Phase-change memory) je memorija s promjenom faze i to je vrsta nehlapljive računalne memorije koja se ponekad naziva savršenom RAM-om zbog svojih vrhunskih performansi. Ova memorija je oblik stalne memorije ili računalne memorije koja je brža od mnogo češće korištene tehnologije Flash memorije.

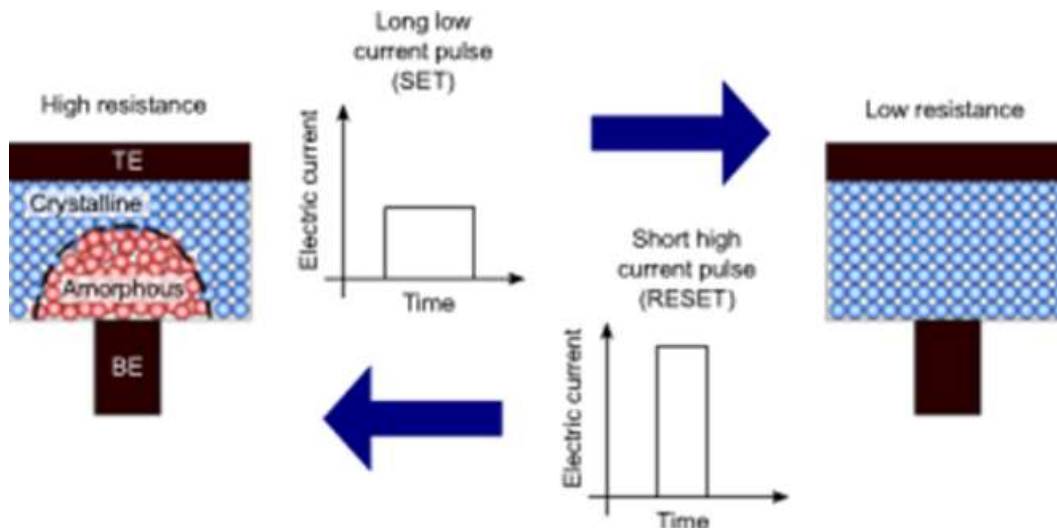
Memorija za promjenu faze (PCM) ključna je tehnologija koja omogućuje trajno skladištenje električnih podataka u nanometarskoj skali. U PCM-u, podaci se pohranjuju korištenjem kontrasta električnog otpora između visoko vodljive kristalne faze i niskovodljive amorfne faze materijala s promjenom faze. Materijal za promjenu faze može se prebaciti iz niskog u visoko vodljivo stanje, i obrnuto, primjenom impulsa električne struje. Pohranjeni podaci mogu se dohvatiti mjerenjem električnog otpora PCM uređaja. Kod PCM-a je se pohranjeni podaci zadržavaju jako dugo (obično 10 godina na sobnoj temperaturi), ali se zapisuju u samo nekoliko nanosekundi.

### 7.1 NAČELO RADA

Temeljno svojstvo memorijskog uređaja je da mora omogućiti pohranu i dohvat podataka. PCM bilježi podatke na način da se materijal s promjenom faze unutar memorijskog uređaja prebaci iz kristalne faze u amorfnu fazu i obrnuto. Ova transformacija je popraćena snažnom promjenom električnih i optičkih svojstava. Amorfna faza ima visok otpor i nisku optičku refleksiju, dok kristalna faza ima nisku otpornost i visoku optičku refleksiju. Kontrast u optičkim svojstvima materijala s promjenom faze naširoko se koristio za omogućavanje optičkih uređaja za pohranu podataka kao što su DVD i Blu-Ray diskovi. Međutim, za pohranu električnih podataka s PCM-om, za pohranu informacija koristi se kontrast u otpornosti između dvije faze. Dakle, operacija WRITE u PCM-u uključuje prebacivanje između amornog i kristalnog stanja primjenom električnog impulsa. Operacija READ obično uključuje očitavanje električnog otpora PCM uređaja, što zatim omogućuje da se zna je li on u amorfnom (visoki otpor, logička 0) ili kristalnom (niski otpor, logička 1) stanju.

Amorfna faza je termodinamički nestabilno staklo, ali vrijeme kristalizacije na sobnoj temperaturi je vrlo dugo. Međutim, pri zagrijavanju amornog materijala na dovoljno visoku temperaturu, ali ispod temperature taljenja, brzo će kristalizirati. Kako bi se materijal vratio u amorfnu fazu, potrebno ga je zagrijati iznad njegove temperature taljenja i zatim brzo ohladiti. U PCM, toplina se proizvodi prolaskom električne struje

kroz materijal za promjenu faze (Jouleov učinak zagrijavanja). Električni impuls koji se koristi za prebacivanje uređaja u amorfno stanje visokog otpora naziva se RESET impulsom, a impuls koji se koristi za vraćanje uređaja u kristalno stanje niskog otpora naziva se SET impulsom. Na slici broj 13. možemo vidjeti objašnjeno.



**Slika 13. Načelo rada PCM memorije**

Izvor: [iopscience.iop.org](http://iopscience.iop.org)

## 7.2 MATERIJALI IZRADE

Unatoč činjenici da je PCM tehnologija već 1960-ih počela se istraživati, tehnološki uspjeh optičkog skladištenja na temelju materijala s faznom promjenom bio je omogućen tek nakon otkrića nove klase materijala koji su ispunili sve zahtjeve za ovu tehnologiju. Otkriveno je da poluvodička legura GeTe- Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> ima veliki optički kontrast i može brzo prebacivati između amorfne faze niske refleksije i polikristalne faze visoke refleksije pomoću laserskih impulsa. Ovo otkriće dovelo je do vrlo uspješne optičke memorijske tehnologije.

## 7.3 PREDNOSTI

PCM nudi obećanje ciklusa pisanja koji bi mogli biti znatno brži od NAND Flash memorije. NAND Flash zahtijeva brisanje podataka prije upisa novih podataka, dok

PCM nema takav zahtjev, što ga čini znatno bržim. Jedna od prednosti je također i brzo vrijeme pristupa. Istraživanje je otkrilo da se vrijeme pristupa ispod 5  $\mu$ s može postići s PCM-om. Izdržljivost je također prednost PCM. S obzirom na to da PCM ne mora prvo izbrisati podatke, dobavljači i istraživači su procijenili da memorija promjene faza može podnijeti više ciklusa pisanja od NAND bljeskalice. PCM nudi prednost u odnosu na ostale tehnologije u pogledu potrošnje energije. On ima jako niske energetske zahtjeve.

## 8. FRAM

FRAM (eng. ferroelectric random access memory) je trajna memorija male snage s brzim nasumičnim pristupom. Kombinira prednosti trajne memorije (kao Flash i EEPROM) i brzi statički RAM (SRAM i DRAM). Ova univerzalna memorija nadmašuje trajne memorije potrošnjom mnogo manje snage, pisanje je mnogo brže i ima mnogo veću izdržljivost na višestruke operacije čitanja i pisanja.

### 8.1 PREDNOSTI

Kao rezultat toga, FRAM tehnologija je mnogo energetski učinkovitiji od Flasha ili E2PROM-a. Budući da FRAM radi na temelju slučajnog pristupa, proces pisanja može se dovršiti bez ikakvih odgoda. Vrijeme pristupa za pisanje i čitanje je u raspon od 2 do 3 nanosekunde i usporediv je s onima od RAM-a. Kao rezultat toga, FRAM može dovršiti proces pisanja čak i pri iznenadnom nestanka struje, čime se osigurava sigurnost podataka. Maksimalni broj ciklusa pisanja i brisanja za Flash i E2 PROM je između 100 tisuća i 1 milijun. U usporedbi s preko 10 trilijuna ciklusa pisanja i čitanja, životni vijek FRAM-a memorija je gotovo neograničen.

U usporedbi s flashom, prednosti su mnogo očitije. Dok će operacija čitanja vjerojatno biti slična u izvedbi, pumpa za punjenje koja se koristi za pisanje zahtijeva dosta vremena gubi za dobivanje struje, FRAM-u taj process uopće nije potreban. Flash memoriji obično treba milisekunda ili više da dovrši upisivanje, dok trenutni FeRAM-ovi mogu dovršiti upisivanje za manje od 150 ns. Dane usporedbe možemo vidjeti na slici broj 14.

	FRAM	E2PROM	Flash	SRAM
Type	Non-volatile	Non-volatile	Non-volatile	Volatile
Method writing	Overwriting	Erase (byte) + write	Erase (sector) + write	Overwriting
Write cycle time	150ns	3ms	1s	55ns
Endurance	10 trillion ( $10^{13}$ )	1 million ( $10^6$ )	1 million ( $10^6$ )	Unlimited

**Slika 14. Usporedbe FRAM memorije s konkurencijom**

Izvor: [www.embedded.com](http://www.embedded.com)

FRAM se vrlo dobro ponaša pri visokim temperaturama. Sve više i više aplikacija zahtijeva komponente s produženom ili industrijskom temperaturom, a FRAM se dobro uklapa u ovaj zahtjev. Pokazalo se da zadržava svoje podatke više od 10 godina na 85 stupnjeva C.

## **8.2 NAČELO RADA**

FRAM memorije izgrađene su na feroelektričnoj tehnologiji. FRAM čip sadrži tanki feroelektrični film olovo cirkonat titanata, koji se obično naziva PZT. Atomi u PZT-u mijenjaju polaritet u električnom polju, stvarajući energetski učinkovit binarni prekidač. Međutim, najvažniji aspekt PZT-a je da na njega ne utječu prekidi napajanja, što FRAM čini pouzdanom trajnom memorijom. Temeljni princip rada F-RAM-a i njegova jedinstvena arhitektura memorijskih ćelija daje specifične prednosti koje ovu tehnologiju izdvajaju od konkurentskih memorijskih tehnologija kao što su EEPROM ili NOR Flash.

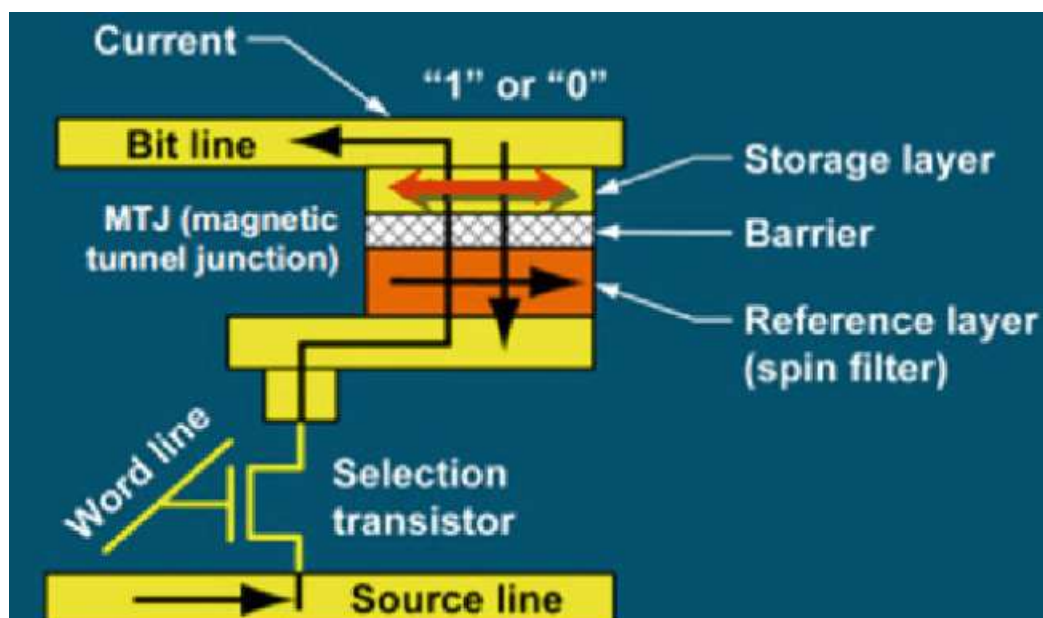


## 9. STT RAM

STT-RAM (eng. Spin transfer torque random access memory) nova je memorijska tehnologija koja kombinira kapacitet i troškovne prednosti DRAM-a, performanse brzog čitanja i pisanja SRAM-a i nepromjenjivost Flasha s praktički neograničenom izdržljivošću. Ima izvrsnu selektivnost pisanja, izvrsnu skalabilnost, nisku potrošnju energije i jednostavniju arhitekturu. STT-RAM ima potencijal da postane vodeća tehnologija za pohranu budući da je to memorija visokih performansi.

### 9.1 NAČELO RADA

Nanomagneti se koriste za kontrolu vrtnje. Prolaskom elektrona kroz nanomagnet, spin elektrona može se poravnati u istom smjeru magnetizacije kao nanomagnet. Magnetski tunelski spoj (MTJ) nalazi se u sredini STT-RAM bit ćelije. Magnetski tunelski spoj se sastoji od dvije feromagnetske elektrode s tankim izolacijskim slojem između. Gornji nanomagnet je sloj za pohranu ili slobodni sloj, sredina je barijera, a donji nanomagnet je referentni ili sloj ili spin filter. Dizajn memorije možemo vidjeti na slici broj 15.



Slika 15. Dizajn STT RAM memorije

Izvor [www.embedded.com](http://www.embedded.com)

Spin Transfer Switching (STS) mijenja stanje MTJ-a iz antiparalelnog ili logičkoga stanja 1 u paralelno ili logičko stanje 0 i obrnuto. To se izvodi pokretanjem struje od vrha do dna magnetskog tunelskog spoja i obrnuto. STT-RAM čip adresira svaki bit pojedinačno propuštanjem struje izravno kroz bit. Posljedično, nenamjerne pogreške u pisanju su potpuno eliminirane. Konvencionalni CMOS tranzistor ispod MTJ proizvodi struju. U ovom slučaju, prebacivanje se izvodi putem spin polariziranih struja. Polarizacijom struje podaci se prenose od fiksnog MTJ sloja koji je polarizator do slobodnog MTJ sloja. Taj se proces naziva spin-transfer zakretnog momenta. Struja koja teče kroz fiksni sloj polarizira elektrone. Ti polarizirani elektroni tada utječu na prebacivanje slobodnog sloja, pa stoga na paralelne i antiparalelne konfiguracije.

## **9.2 STRUKTURA**

U konvencionalnoj MRAM ćeliji, vodiči ili žice iznad i ispod magnetskoga tunelskog spoja koriste se za generiranje polja potrebnih za promjenu stanja slobodnog magnetskog sloja. Dodatna linija za pisanje riječi i zaobilazna linija potrebne u ovoj geometriji ćelije pretvaraju se u kompliciraniju arhitekturu. Svaki vodič ili žica zahtijeva minimalno 5 do 10 miliampera (mA) struje za izvođenje sklopke. Suprotno tome, STT-RAM tehnologija izaziva znatno manju struju preklapanja reda veličine 100 mikroampera, kao rezultat učinkovitije tehnike vrtnje prijenosa okretnog momenta.

Magnetska polja proizvedena metodama prebacivanja prve generacije obično izlažu cijeli stupac ili red bitova, što dovodi do nenamjernih pogrešaka u bitu ili pisanju. Kako se standardna MRAM tehnologija skalira, a memorijske ćelije postaju manje, ćelije moraju biti strukturirane sa sve većim poljem prebacivanja kako bi se održala toplinska stabilnost svake ćelije. Inače se povećava vjerojatnost smetnji pri pisanju. Toplinska nestabilnost stanice može pogrešno pokrenuti nasumično prebacivanje u suprotno stanje. To znači da stabilnost ćelije u konvencionalnom MRAM-u zahtijeva sve veću struju koja teče u vodičima ili žicama za učinkovitu promjenu stanja. S druge strane, STT-RAM ne zahtijeva metalnu žicu ispod MTJ. Linija za pisanje riječi i linija za premošćivanje su eliminirani. Umjesto toga, struja teče okomito kroz memorijsku ćeliju. Kako se STT-RAM tehnologija skalira i njezine ćelije postaju sve manje, površina poprečnog presjeka postaje sve manja i manja.

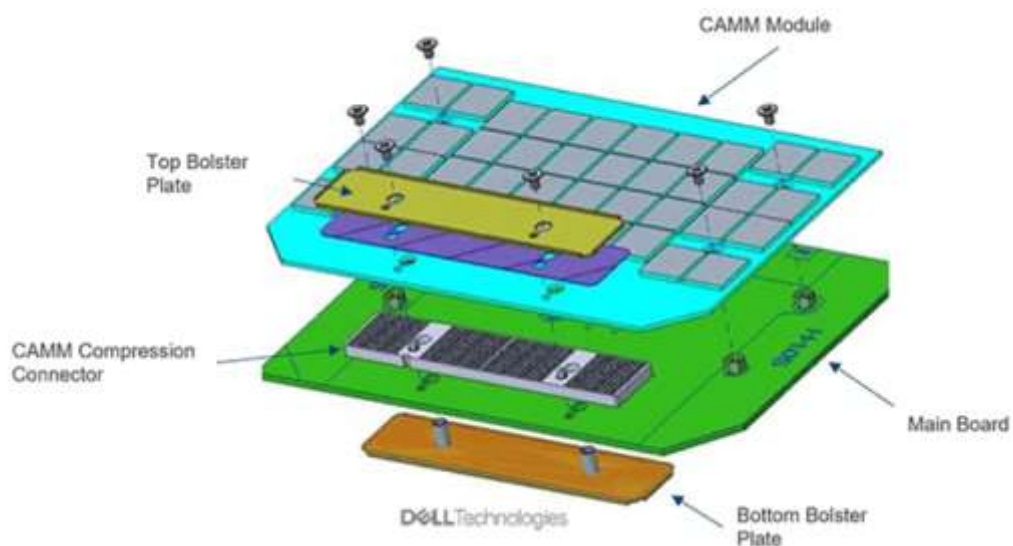
## 10. CAMM

CAMM (eng. Compression Attached Memory Module ) je novi memorijski oblik za DDR5 tehnologiju koji bi zamjenio dosadašnji SO-DIMM (eng. Small outline dual inline memory module) dizajn. SO-DIMM je vrsta je računalne memorije koja je manja od običnog DIMM-a koji se koristi u stolnim računalima. SO-DIMM koristi isti sklop i mikročipove kao i drugi memorijski moduli, ali je napravljen u manjem formatu kako bi odgovarao uređajima koji nemaju puno prostora kao što su prijenosna računala. Od razvoja prvih prijenosnih računala, pokušaj da cijelo računalo smjestimo u mali prostor i koje može pratiti trenutne tehnološke standarde nije mali podvig. Budući da su dijelovi smanjeni u veličini, oni imaju tendenciju zagrijavanja, a smanjenje veličine dijela učinit će taj dio skupljim ili će imati manje mogućnosti obrade. Na primjer, mobilni procesor koji se koristi u tipičnom prijenosnom računalu imat će manje jezgri, nižu frekvenciju takta i jednostavniji hardver tako da troši manje energije.

### 10.1 STRUKTURA

Isti se izazovi odnose na RAM prijenosnih računala u smislu da ograničenja prostora i težine rezultiraju potrebom za malim memorijskim modulima. Što se tiče performansi, često je na razini stolnih računala po brzini, ali okruženja stolnih računala dopuštaju puno više RAM-a po nižoj cijeni. Dakle, prijenosno računalo s 8 GB ima istu cijenu kao stolno računalo s između 16 GB i 32 GB. Ograničenje prostora također znači da su utori za prijenosna računala ograničeni, a dva su najčešći broj utora (dok će stolna računala lako imati četiri utora). Memorijski modul s kompresijom je tehnologija pakiranja memorije koju je razvio i patentirao Dell kako bi zamijenio zastarjeli SO-DIMM dizajn. Unatoč tome što prijenosna računala postoje desetljećima, korišteno pakiranje RAM-a gotovo se nije promijenilo u stilu ili dizajnu, što znači da nije optimizirano za novije sustave koji zahtijevaju sve više količine RAM-a.

Dok SO-DIMM koristi rubni konektor na samom rubu memorijske kartice, CAMM umjesto toga koristi niz kontaktnih pločica što je vrlo slično modernim CPU-ima koji su uklonili pinove. Ove kontaktne pločice zauzimaju prednji dio tiskane pločice (ali ne na rubu), omogućujući povećanu gustoću konektora. Nadalje, cijeli paket je komprimiran u konektor na matičnoj ploči, a vijci se koriste za držanje cijele tiskane ploče na mjestu. Sve je prikazano na slici broj 16.

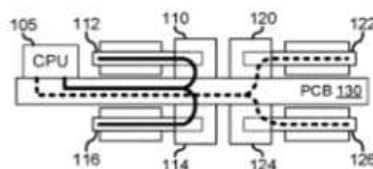


**Slika 16. Dizajn CAMM memorije**

Izvor: [www.pcworld.com](http://www.pcworld.com)

## 10.2 PREDNOSTI

Prema Dellu, novi dizajn koristi mnogo tanju tiskanu pločicu, što pomaže u smanjenju težine. Povećana fizička veličina memorijskog modula omogućuje značajno više memorije, s veličinama do 128 GB. Nadalje, svi IC-ovi na memorijskim modulima smješteni su na gornjoj strani memorijske kartice, što sugerira da bi se regularne komponente mogle postaviti ispod kartice na tiskanoj pločici. To omogućuje kompaktiji dizajn dok još uvijek omogućuje nadogradnju na uređaje sa samo jednom zamijenjenom karticom (umjesto više fizičkih kartica). Velik dio problema SO-DIMM-a dolazi od njegovog relativno zamršenog dizajna koje je prikazan na slici broj 17.



**Slika 17. SO-DIMM dizajn**

Izvor [www.pcworld.co](http://www.pcworld.co)

On zahtijeva veće duljine žice koji moraju povezati CPU s RAM modulom u odnosu na CAMM. Ta je udaljenost značajno skraćena s Dellovim CAMM dizajnom, koji možete vidjeti na slici broj 18.



**Slika 18. CAMM dizajn**

Izvor: [www.pcworld.com](http://www.pcworld.com)

Kraća udaljenost koju žica mora proći znači manje potrebne snage kao i veće moguće brzine. Uz CAMM, udaljenost od CPU-a može biti dvostruko manja odnosu na SO-DIMM dizajnu. Već danas može se vidjeti praktičnu upotrebu CAMM-a. U prijenosnom računalu Intel 12. generacije koje koristi dva SO-DIMM-a, na primjer, možete postići DDR5/4800 brzinu prijenosa. Ali prebacimo li ga na dizajn s četiri DIMM-a, kao što je prijenosno računalo sa 128 GB RAM-a, morat ćemo ga vratiti na DDR5/4000 brzinu prijenosa. S CAMM-om, međutim, možete dosegnuti 128 GB gustoće i postići DDR5/4800 brzinu prijenosa.

## 11. ZAKLJUČAK

RAM memorija se kroz povijest mijenjala sukladno zahtjevima računalne tehnologije koja je svako malo zahtjevala sve kvalitetnije verzije memorija. Nezamislivo je koliko je RAM memorija u zadnja tri desetljeća napredovala te koje su sve granice pomjerile sa svakom novom vrstom. Očigledni primjer imamo gledajući na SDRAM memoriju i generacije DDR memorije. Od prvotne DDR1 memorije koja je predstavljala značajni napredak u odnosu na SDRAM memoriju, svaka sljedeća generacija je donosila značajni napredak sve do trenutno najnovije DDR5 memorije.

U samo istrživanje novih vrsta tehnologija uloženo je dosta vremena i znanja i truda svih istraživača, ali može se zaključiti da se taj trud isplatio jer memorija kao što su MRAM, RRAM i PCM počinju se sve više koristiti te predstavljati ne samu budućost RAM memorija nego već i sadašnjost. Iako ove vrste su u fazi istraživanja kako bi poboljšale svoj rad te uklonili nedostatke koje imaju.

Kako cijeli svijet u današnje vrijeme jako brzo raste i sve je veća potreba za novim tehnološkim otkrićima, upravo zato ovo je tek početak za nove vrste memorija. Novije vrste omogućavaju svojim novim karakteristikama puno toga više u odnosu na memorije koje se trenutno koriste. Ono šta ste može primjetiti gledajući kroz vrijeme istraživanja i otkrivanja novih vrsta je to da se sve može povezati s samim napretkom svijeta i svega oko nas. U zadnjih dvadesetak godina otkrivamo jako puno novih stvari, znanja, mogućosti i sličnoga i upravo nam sve to pomaže i kod istraživanja novijih vrsta memorija. Možemo biti sigurni da je ovo tek početak te da nas u budućnosti očekuje dosta novih inovatnih stvari vezanih za memorije.

Za kraj može se reći da je svaka memorija navedena u radu ima svoje prednosti i da koliko god su dosta slične toliko su i različite jedne od drugih. Tako da među njima nema memorije za koju bismo rekli da je najbolja, nego da svaka od njih nudi neku karakteristiku s kojom se izdvaja od ostalih, a upravo ta karakteristika nam je potrebna te će nam ta memorija biti najbolja za vaš odabir.

## LITERATURA

[1] Rohit Gupta, What is NVMe™ and why is it important ,online:

<https://blog.westerndigital.com/nvme-important-data-driven-businesses/?fbclid=IwAR1xzM2R6fZh2ZffbcfRkjp8XgucrDuxbNhodD4JtPBVfYHe6sJNp5Xz21Y> (01.06.2022)

[2] Andy Walker, MRAM overcomes SRAM, DRAM, and flash limitations, online:

[https://www.itproportal.com/features/mram-overcomes-sram-dram-and-flash-limitations/?fbclid=IwAR1Yf6WBVwEK\\_5vGkqePB\\_VoVxuznUIGWzRkKJ5mOZiYV2\\_uYWQYeeImhA0](https://www.itproportal.com/features/mram-overcomes-sram-dram-and-flash-limitations/?fbclid=IwAR1Yf6WBVwEK_5vGkqePB_VoVxuznUIGWzRkKJ5mOZiYV2_uYWQYeeImhA0) (05.06.2022)

.

[3] Athul Domichen, NVMe Storage-Understanding the Protocol That Redefines Storage Architecture, online:

<https://vexxhost.com/blog/nvme-storage-protocol-basics/?fbclid=IwAR3AWbLrwhWv80Et9VmtggXCM7FDsl0qNJRHdk5fA8tygvA0-awSKpbrtto> (03.09.2022)

[4] Ahmed Bahgat, NVMe Storage-Understanding the Protocol That Redefines online:

[https://kinsta.com/blog/what-is-ssd/?fbclid=IwAR1jKwTAs9S49IXRsdLbgoAgtOhX4Yfp7XKHM0F38n\\_sKx-nOnl0HXeiSgM](https://kinsta.com/blog/what-is-ssd/?fbclid=IwAR1jKwTAs9S49IXRsdLbgoAgtOhX4Yfp7XKHM0F38n_sKx-nOnl0HXeiSgM) (05.09.2022)

## KAZALO KRATICA

KratICA	Puni naziv na engleskom jeziku	Tumačenje na hrvatskome jeziku
ATA	Advanced Technology Attachment	Standard za prijenos podataka
CBRAM	Conductive Bridging RAM	Podvrsta RRAM memorije
CPU	Central Processing Unit	Procesor
DRAM	Dynamic Random Access Memory	Vrsta RAM memorije
Gbps	Gigabits per second	Mjera za brzinu prijenosa podataka
HDD	Hard disk drive	Sekundarna jedinica za pohranu podataka u računalima
HRS	High resistance state	Stanje visokog otpora
LRS	Low resistance state	Stanje niskoga otpora
MRAM	Magnetoresistive random-access memory	Nehlapljiva memorijska tehnologija
PCIe	Peripheral Component Interconnect Express	Standard sučelja za povezivanje komponenti velike brzine
PCM	Phase-change memory	Vrsta nehlapljive memorije
RRAM	Resistive random-access memory	Vrsta nehlapljive memorije
RAM	Random Access Memory	Glavna memorija uređaja
SDRAM	Synchronous Dynamic Random Access Memory	Vrsta DRAM memorije
SCSI	Small Computer System Interface	Standard za prijenos podataka



SSD	Solid state drive	Uređaj za pohranu podataka
SRAM	Static random-access memory	Vrsta RAM memorije

## POPIS SLIKA

Slika 1. Struktura SRAM memorijske ćelije sa četiri tranzistora .....	3
Slika 2. Struktura SRAM memorijske ćelije sa šest tranzistora .....	3
Slika 3. Dizajn MRAM ćelije .....	6
Slika 4. Usporedba SDRAM i DDR1 .....	10
Slika 5. Usporedba DDR1 i DDR2 .....	11
Slika 6. Usporedba DDR2 i DDR3 .....	12
Slika 7. Usporedba DDR3 i DDR4 .....	13
Slika 8. Usporedba DDR4 i DDR5 .....	14
Slika 9. Arhitekturu DIMM kanal kod DDR5 .....	14
Slika 10. Logička stanja MRAM-a .....	15
Slika 11. Struktura RRAM memorije .....	17
Slika 12. Struktura i prikaz materijala CBRAM .....	18
Slika 13. Načelo rada PCM memorije .....	21
Slika 14. Usporedbe FRAM memorije s konkurencijom .....	23
Slika 15. Dizajn STT RAM memorije .....	25
Slika 16. Dizajn CAMM memorije .....	28
Slika 17. SO-DIMM dizajn .....	28
Slika 18. CAMM dizajn .....	29