

Az optikai mágneses tároló jövője

Mini oktatási jegyzet

Mi ez?

Hogyan működik?

Milyen gyors lehet?

**Kiválthatja-e a RAM és
ROM kettősségét?**



1. Mi az optikai mágneses tároló?

Az optikai mágneses tároló egy javasolt, nem felejtő memóriakonceptió, amelyben ultrarövid fényimpulzusokkal lehet a mágnesezettség állapotát írni vékonyrétegekben. A cél egy olyan memória, amely egyesítheti a RAM-szerűen gyors működési sebességet a nem felejtő adatmegőrzéssel.

1 Kezdeti állapot

A vékonyréteg mágnesezettsége felfelé mutat (felülnézeti kép).



Logikai állapot: „0”



2 Lézer–anyag kölcsönhatás

Egy femtoszekundumos, körkörösén polarizált lézerimpulzus gerjeszti az elektron- és spinrendszert, ami a mágnesezettség állapotváltozásához vezet.



3 Kapcsolt állapot

A mágnesezettség iránya megfordul (felülnézeti kép).



Logikai állapot: „1”



Fontos: a fény nem egyszerűen statikus mágneses teret hoz létre, hanem az elektron- és spinrendszerrel lép kölcsönhatásba, amely a mágnesezettség állapotának megváltozásához vezet.

Miért érdekes?

- **Nagyon gyors kapcsolás lehetősége**
A femtoszekundumos fényimpulzusok rendkívül rövid idő alatt képesek állapotot írni.
- **Nem felejtő működés**
Az információ a mágnesezettségben tárolódik, így tápfeszültség nélkül is megmarad.
- **Potenciálisan nagy újráirási élettartam**
A mágneses tárolás elvileg sokszor újráírható lehet.
- **Fotonika + spintronika összekapcsolása**
A fény és az elektronspin tulajdonságainak együttes kihasználása új lehetőségeket nyit.

Kulcsfogalmak

Femtoszekundumos impulzus

Nagyon rövid fényimpulzus, amelynek időtartama körülbelül 10^{-15} másodperc (1 fs).

Spin

Az elektronok egyik belső tulajdonsága, amely mágneses nyomatékkal rendelkezik, és lehet felfelé vagy lefelé irányuló.

Mágnesezettség

A mágneses momentumok együttes, makroszkopikus iránya egy anyagban.

Vékonyréteg

Néhány nanométer vastagságú mágneses anyagréteg, amelyben a mágnesezettség állapotát írjuk.

2. Hogyan működik a kapcsolás?

A cirkulárisan polarizált femtoszekundumos lézerimpulzus az anyag elektron- és spinrendszerével lép kölcsönhatásba. Az ultrarövid fényimpulzus energiát és impulzusmomentumot ad át, ami különböző fizikai folyamatokon keresztül a mágnesezettség állapotának átfordulásához vezethet.

1 Kezdeti állapot

A vékonyréteg mágnesezettsége felfelé mutat (felülnézeti kép).



Logikai állapot: „0”



2 Kölcsönhatás a lézerrel

Egy cirkulárisan polarizált femtoszekundumos lézerimpulzus kölcsönhat az elektron- és spinrendszerrel, ami a mágnesezettség állapotának változásához vezet.



3 Kapcsolt állapot

A mágnesezettség iránya megfordul (felülnézeti kép).



Logikai állapot: „1”



Klasszikus és optikai mágneses írás összehasonlítása

Klasszikus mágneses írás:

áram

mágneses tér

állapotváltás

Optikai írás:

lézerny
(femtoszekundumos,
cirkulárisan polarizált)

elektron/spin rendszer
gerjesztése

állapotváltás

Fontos: a fény nem egyszerűen statikus mágneses teret hoz létre. A hatás az elektronokkal és spinekkel való kölcsönhatásból ered.



Lehetséges mechanizmusok

- inverse Faraday effect (egy lehetséges mechanizmus)
- ultragyors felmelegedés
- spin-orbit kölcsönhatás
- impulzusátadás
- doménfolyamatok



Lényeg

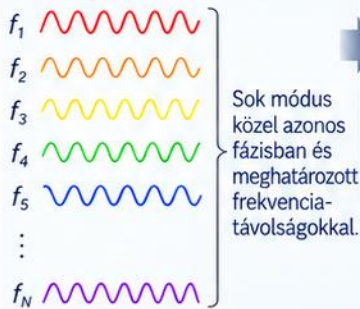
Az optikai kapcsolás anyagfüggő, nem egyetlen univerzális mechanizmus magyarázza. A különböző anyagokban eltérő folyamatok játszhatnak domináns szerepet, és gyakran több mechanizmus együttesen járul hozzá a mágnesezettség állapotának átváltásához.

3. Honnan jön a femtoszekundumos impulzus?

A femtoszekundumos impulzust nem egy hagyományos elektronikus kapcsoló hozza létre, hanem a lézerrezonátor móduszárása (mode-locking). A rezonátorban sok különböző optikai módus rezeg egyszerre, és a móduszárás gondoskodik arról, hogy ezek a módusok fázisa összhangba kerüljön, így konstruktív interferenciával rövid, nagy csúcsteljesítményű impulzusok jönnek létre.

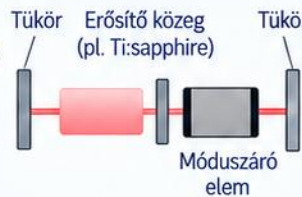
1 Több módus a rezonátorban

A lézerrezonátorban sok különböző frekvenciájú longitudinális módus (szinuszhullám) rezeg egyszerre.



2 Móduszárás (mode-locking)

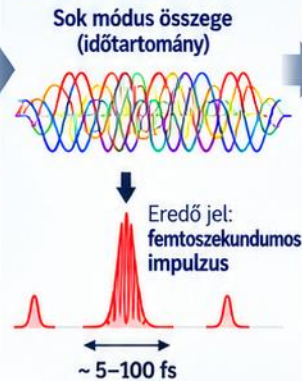
Egy móduszáró elem (pl. Kerr-lencsés móduszárás vagy telíthető abszorber) összehangolja a módusok fázisát.



A móduszárás biztosítja, hogy a sok módus konstruktív interferáljon, és rövid impulzusok jöjjenek létre.

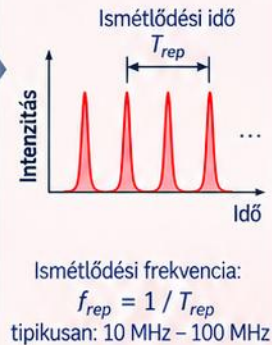
3 Konstruktív interferencia

Ha a módusok fázisban vannak, bizonyos időpontokban konstruktív összeadódnak, és egy nagyon rövid fényimpulzus keletkezik.



4 Ismétlődő impulzussorozat

A rezonátorban a rövid impulzusok periodikusan keringnek, így az impulzusok ismétlődnek.



Idő-sávszélesség kapcsolat

Minél rövidebb impulzust akarunk, annál szélesebb optikai frekvenciaspektrumra van szükség.

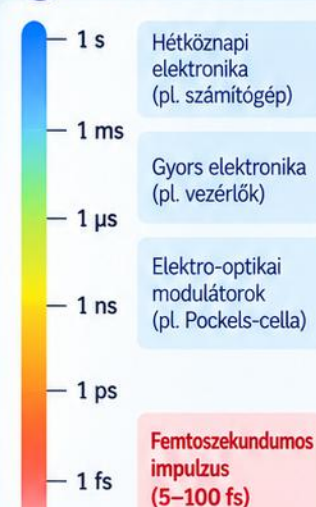
Szűk spektrum → hosszú impulzus
(pl. ps – ns)



Széles spektrum → rövid impulzus
(pl. 10–50 fs)



Jellemző időskálák

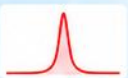


Hogyan méri?

A femtoszekundumos impulzusokat nem hagyományos oszcilloszkóppal méri, mert azok nem elég gyorsak. Ehelyett optikai, nemlineáris mérési módszereket használnak.

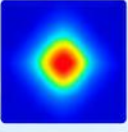
Autocorrelator

Az impulzus önkorelációját méri.



FROG

(Frequency-Resolved Optical Gating)
Az idő- és frekvenciainformáció együttes rekonstrukciója.



SPIDER

(Spectral Phase Interferometry for Direct Electric-field Reconstruction)
A spektrum és a fázis közvetlen mérése, nagyon pontos.



Példa: Ti:sapphire femtoszekundumos lézer



Tipikus paraméterek:

- Hullámhossz: ~ 800 nm
- Impulzushossz: 5 – 100 fs
- Ismétlési frekvencia: tipikusan 10 – 100 MHz
- Móduszárási technikák: Kerr-lencsés móduszárás, telíthető abszorber, SESAM stb.

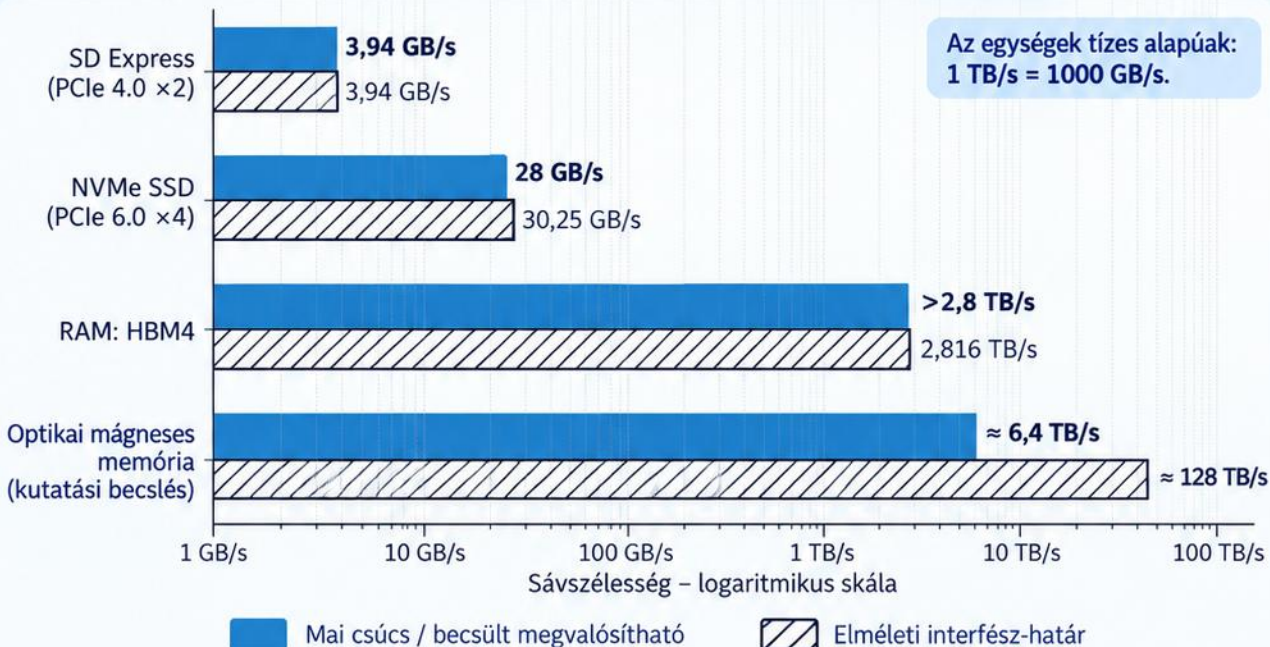


Fontos: A femtoszekundumos időzítés optikai fázisösszehangolásból ered, nem egyszerű elektronikus be-ki kapcsolásból.

4. Milyen gyors lehet?

A fizikai kapcsolás ideje nagyon rövid lehet, de a kész memória sebességét a címezés, a kiolvasás, a hőelvezetés és a párhuzamosítás is befolyásolja. A ténylegesen elérhető sebesség ezért az elméleti lehetőségeknél kisebb is lehet, mert a teljes rendszer – az elektronika, az adatformátum és a hűtés – összhangban kell, hogy működjön.

Mai csúcok és elméleti határok összehasonlítása



Honnan jönnek a számok?

1 SD Express (PCIe 4.0 ×2)



$$1,97 \text{ GB/s/sáv} \times 2 = 3,94 \text{ GB/s.}$$

Az SD Express két, PCIe 4.0 sávot használ, sávonként 1,97 GB/s átviteli sebességgel.

2 NVMe SSD (PCIe 6.0 ×4)



$$64 \text{ GT/s} \times 4 \times 242/256 \div 8 \approx 30,25 \text{ GB/s.}$$

A PCIe 6.0 négy sávval, 64 GT/s átviteli sebességgel, 242/256 kódolási hatékonysággal és 8 bites bájtokkal számolva.

3 RAM: HBM4



$$11 \text{ Gbit/s/pin} \times 2048 \text{ pin} \div 8 = 2816 \text{ GB/s} = 2,816 \text{ TB/s.}$$

A HBM4 11 Gbit/s sebességgel, 2048 adatpinnel és 8 bites bájtokkal számolva.

4 Optikai mágneses memória (kutatási becslés)



$$1 / 20 \text{ ps} = 50 \text{ Gbit/s bitvonalanként;} \\ 50 \times 1024 \div 8 = 6,4 \text{ TB/s.}$$

Agresszív fizikai határ:

$$1 / 1 \text{ ps} = 1 \text{ Tbit/s;} \\ 1 \times 1024 \div 8 = 128 \text{ TB/s.}$$

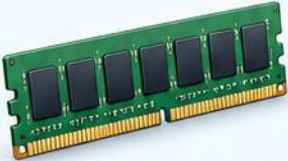
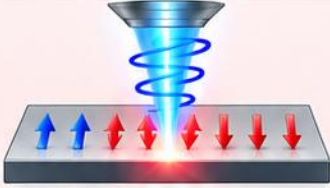


Fontos: Az optikai mágneses memória még kutatási fázisban van.

A fenti értékek elméleti számítások és kutatási becslések, nem termékspecifikációk.

5. Kiválthatja-e a RAM és ROM kettősségét?

Ma a gyors, felejtő RAM és a lassabb, nem felejtő háttértár külön szerepet tölt be a számítógépekben. Az optikai mágneses memória azért érdekes, mert elvileg nagyon gyors és közben nem felejtő is lehet, így egyesítheti a RAM-szerű gyors működést a háttértár-szerű adatmegőrzéssel.

Tulajdonság	RAM (DRAM/SRAM)	Flash / SSD / SD	Optikai mágneses memória (cél)
			
Sebesség	Nagyon gyors (nanoszekundumos elérési idők).	Lassabb (mikro–milliszekundumos elérési idők).	Cél: RAM-szerűen nagyon gyors (femtoszekundumos– pikoszekundumos tartomány).
Nem felejtő?	Nem (felejtő).	Igen (nem felejtő).	Igen (nem felejtő).
Újraírhatóság	Korlátlan ideig újraírható a gyakorlatban.	Korlátozott számú írási ciklus (általában $10^3 - 10^5$).	Cél: nagyon nagy újraírási élettartam (akár $10^{12} - 10^{15}$).
Adatmegőrzés táp nélkül	Nem (az adatok elvesznek).	Igen (évek–évtizedek).	Igen (hosszú távú adatmegőrzés).
Várható újraírási élettartam	Nagyon nagy (a gyakorlatban nem jelent korlátot).	Korlátozott ($10^3 - 10^5$ írási ciklus).	Cél: nagyon nagy (akár $10^{12} - 10^{15}$ írási ciklus).
Mai érettség	Érett, széles körben használt.	Érett, széles körben használt.	Még kutatási fázisban, fejlesztés alatt.



Miért lenne nagy áttörés?

- **Gyors indulás**
A rendszer azonnal használható, mivel az adatok nem vesznek el kikapcsoláskor.
- **Kevesebb adatmozgatás**
Nem kell folyamatosan adatokat másolni a RAM és a háttértár között.
- **Egyszerűbb memóriahierarchia**
Csökkenne a különböző memóriatípusok közötti összetett adatkezelés.
- **Nagy teljesítmény + nem felejtő működés**
Egyesítheti a RAM sebességét a háttértár adatmegőrzésével.



Mi a fő mérnöki akadály?

- **Címezhetőség**
Hogyan lehet nagy adatsűrűség mellett gyorsan és pontosan elérni a kívánt memóriacellát?
- **Integrált fényforrások vagy fotonikai csatolás**
Hogyan lehet a femtoszekundumos fényimpulzusokat egy kompakt, chip-szintű rendszerben előállítani és a megfelelő helyre juttatni?
- **Hőkezelés**
A gyors, ismételt írás és olvasás közben keletkező hő hatékony elvezetése.
- **Kiolvasás**
Az elektron- és spinállapot megbízható, gyors és érzékeny detektálása.
- **Gyárthatóság**
A technológia ipari méretű, költséghatékony előállítása.



A cél nem egyszerűen egy gyorsabb SD-kártya, hanem egy új memóriaosztály, amely közelebb hozhatja egymáshoz a RAM és a háttértár világát.

6. Játék a számokkal – egyszerű példák

A következő példák szemléltető becslések, nem kész termékadatok. Céljuk, hogy egyszerű számolásokkal megmutassák, hogyan juthatunk el a különböző sebességértékekhez.

1 Optikai memória, 20 ps

Egy 20 pikoszekundumos (20 ps) fényimpulzus elméletileg 50 Gbit/s sebességet jelent bitvonalanként.

$$1 / 20 \text{ ps} = 1 / (20 \times 10^{-12} \text{ s}) \\ = 50 \times 10^9 \text{ bit/s}$$

50 Gbit/s
bitvonalanként

2 1024 bites párhuzamosítás

Ha 1024 bitvonalat használunk, és az eredményt bájtra váltjuk ($\div 8$), akkor 6,4 TB/s elméleti adatátviteli sebességet kapunk.

$$50 \text{ Gbit/s} \times 1024 \div 8 \\ = 51\,200 \text{ Gbit/s} \div 8 \\ = 6\,400 \text{ GB/s}$$

6,4 TB/s

3 Agresszív 1 ps határ

Egy 1 pikoszekundumos (1 ps) fényimpulzus 1 Tbit/s sebességet jelent bitvonalanként. 1024 bitvonal esetén ez 128 TB/s.

$$1 / 1 \text{ ps} = 1 / (1 \times 10^{-12} \text{ s}) \\ = 1 \times 10^{12} \text{ bit/s} = 1 \text{ Tbit/s}$$

$$1 \text{ Tbit/s} \times 1024 \div 8 \\ = 128\,000 \text{ GB/s}$$

128 TB/s

4 HBM4 referencia

A HBM4 memóriánál 11 Gbit/s/pin sebességgel és 2048 párhuzamos adattúvel számolva a sávszélesség 2,816 TB/s.

$$11 \text{ Gbit/s/pin} \times 2048 \div 8 \\ = 22\,528 \text{ Gbit/s} \div 8 \\ = 2\,816 \text{ GB/s}$$

2,816 TB/s

Mennyi idő 1 GB adat átvitele?

Technológia	Sebesség	Idő 1 GB-ra
SD Express	3,94 GB/s	kb. 0,254 s
NVMe SSD	28 GB/s	kb. 0,0357 s
HBM4	2,816 TB/s	kb. 0,000355 s = 0,355 ms
Optikai memória	6,4 TB/s	kb. 0,000156 s = 0,156 ms

Mennyi idő 10 GB adat átvitele?

Technológia	Sebesség	Idő 10 GB-ra
SD Express	3,94 GB/s	kb. 2,54 s
NVMe SSD	28 GB/s	kb. 0,357 s
HBM4	2,816 TB/s	kb. 3,55 ms
Optikai memória	6,4 TB/s	kb. 1,56 ms

Mit mutat ez?

Már néhány szoros sebességnövekedés is nagyon sokat számít, ha hatalmas adatmennyiséget kell mozgatni.

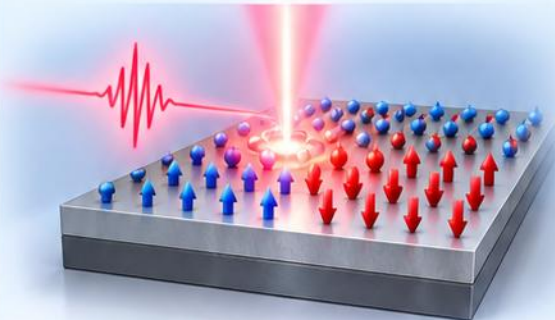
 A valós rendszerteljesítményt a vezérlő, a párhuzamosság, a késleltetés és a hűtés is korlátozza.

7. Kik kutatják, és hol olvashatok róla?

Ez a terület a fotonika, spintronika, mágneses anyagtudomány és memória-architektúrák határán helyezkedik el.

1 Jellemző kutatási irányok

- all-optical switching
- optikailag írható MTJ-k
- integrált fotonikai csatolás
- anyagfejlesztés (GdFeCo, Co/Gd stb.)
- ultragyors mágneses dinamika



2 Kik kutatják?

- **Radboud University Nijmegen** – Alexey V. Kimmel és munkatársai
- **University of Washington** – Mo Li és munkatársai
- **Paul Scherrer Institut / Swiss Light Source** – F. Nolting és munkatársai
- **Aarhus University** – Johan Pelloux-Prayer, Farshad Moradi
- több európai és ázsiai spintronikai, fotonikai és anyagtudományi csoport



3 Példák hiteles, DOI-val rendelkező cikkekre

- 1 Kimel, A. V.; Li, M. "Writing magnetic memory with ultrashort light pulses." *Nature Reviews Materials* 4, 189–200 (2019). DOI: [10.1038/s41578-019-0086-3](https://doi.org/10.1038/s41578-019-0086-3)
- 2 Le Guyader, L. et al. "Nanoscale sub-100 picosecond all-optical magnetization switching in GdFeCo microstructures." *Nature Communications* 6, 5839 (2015). DOI: [10.1038/ncomms6839](https://doi.org/10.1038/ncomms6839)
- 3 Pelloux-Prayer, J. M. A.; Moradi, F. "Compact Model of All-Optical-Switching Magnetic Elements." *IEEE Transactions on Electron Devices* 67(7), 2960–2965 (2020). DOI: [10.1109/TED.2020.2991330](https://doi.org/10.1109/TED.2020.2991330)
- 4 Parchenko, S. et al. "Magnetization switching in GdFeCo induced by dual optical excitation." *Physical Review B* 110, 174401 (2024). DOI: [10.1103/PhysRevB.110.174401](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.110.174401)

4 Hol érdemes keresni?



Crossref DOI
<https://doi.org>



Google Scholar
scholar.google.com



Nature
www.nature.com



APS
journals.aps.org



IEEE Xplore
ieeexplore.ieee.org



Ez a technológia még fejlesztés alatt áll, de tudományosan nagyon aktív és hitelesen követhető terület.