

Seriál: Počítačové pamäte

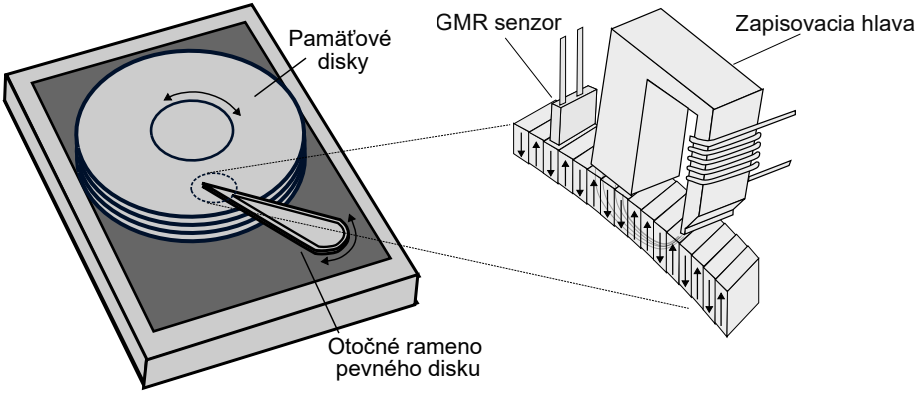
V minulom diele sme objasnili, prečo je potrebné stále zlepšovať elektroniku a kde sú jej aktuálne limity. Rovnako sme si vysvetlili pojem *spin* a že jeho prenos vedie k spinovému prúdu. V tomto dieli budeme prezentovať jeden reálny spintronický[1] komponent, s ktorým sa stretávame každý deň a ktorý podstatne zmenil možnosti ukladania dát – *pevný disk* – a jeden komponent, ktorý kombinuje vlastnosti pamäte s veľkou kapacitou a rýchlosť RAM pamäte – *magnetickú RAM (MRAM)*.

Predtým, ako si tieto dve technológie predstavíme, poďme sa zamyslieť nad tým, čo vlastne od takej pamäte očakávame. Budeme mať tri požiadavky:

1. **Malé binárne štruktúry.** Potrebujeme technológiu, ktorá bude využívať fyzikálne vlastnosti s dvomi veľmi presne definovanými stavmi, ktoré budú predstavovať naše jednotky a nuly. Ďalej budeme chcieť, aby bolo možné vytvoriť priestorovo dobre definované štruktúry, ktoré budú veľmi malé. Vďaka tomu dokážeme na malej ploche koncentrovať veľké množstvo informácie.

2. **Dlhodobá stabilita.** Aby pamäť bola skutočne využiteľná, musí byť schopná uchovať informáciu na dlhý čas. Napríklad štandardné pamäte v pevných diskoch uchovávajú informáciu rádovo desiatky rokov.

3. **Neinvazívne čítanie.** Uchovaná informácia musí byť čitateľná tak, aby pri čítaní nedošlo k jej ovplyvneniu.



Obrázek 1: Ilustrácia pevného disku. Vľavo je nákres celého pevného disku a vpravo detail rezu platňou pevného disku a čítacej hlavy.

[1] Samotný pevný disk je založený na magnetizme, obsahuje však spintronický prvok: GMR senzor.

Poďme sa pozrieť na typický pevný disk, ktorého nákres je na obrázku 1. Ako napovedá názov, jadrom celej technológie je disk alebo sada diskov, ktoré sú pokryté špeciálnou magnetickou vrstvou. Vedľa je na pohyblivom ramene čítacia a zapisovacia hlava. Mechanickým pohybom ramena a otáčaním disku je následne možné dostať sa na ľubovoľné miesto na disku s veľkou presnosťou. V prípade viacerých diskov nad sebou sú aj ramená uložené nad sebou a riadiaca jednotka iba určí, ktorá hlava práve zapisuje alebo číta. Čítaciu hlavu tvorí GMR senzor, o ktorom si povieme neskôr. Zápis sa realizuje pomocou špeciálnej cievky, ktorá fokusuje magnetické pole a tým prepína magnetické momenty magnetickej vrstvy.

Bity, bajty, štruktúry

V klasických HDD diskoch prebieha zápis do tenkých feromagnetických vrstiev. Dôvodom je to, že vo feromagnetoch sú magnetické momenty jednotlivých atómov usporiadané jedným smerom, vďaka čomu vytvárajú výrazné magnetické pole aj bez externého poľa, ktoré je ľahko čitateľné čítacou hlavou. Navyše je takáto konfigurácia momentov vo feromagnetoch úplne spontánna (bez vplyvu externého magnetického poľa sa zachová) a spôsobená tzv. výmennou interakciou, čo možno efektívne chápať ako pôsobenie veľmi silného magnetického poľa rádovo v tisícoch tesla. Mikroskopicky má výmenná interakcia kvantovomechanický pôvod a presahuje rámec tohto seriálu. Podstatné je, že umožňuje uchovať daný stav na dlhý čas bez vynaloženia ďalšej energie, keďže tento stav je pre feromagnety prirodzený.

Reálne materiály však majú aj určité preferenčné smery, v ktorých sa magnetizácia zvykne ustáliť. Tie popisuje tzv. magnetická anizotropia. Z mikroskopického hľadiska existuje jej viacero zdrojov, napríklad tvarová anizotropia zvýhodňuje určité smery na základe tvaru telesa; alebo magnetokryštalická anizotropia vedie k uprednostneniu určitej rovnovážnej polohy v dôsledku symetrie kryštálu. Preferenčné smery magnetizácie musia reflektovať symetriu kryštalickej štruktúry reálnych materiálov, a práve to nám umožní reprezentovať „jednotky a nuly“ vo feromagnetickej vrstve.

Aby sme s týmito príspevkami mohli pracovať, musíme vytvoriť príslušný matematický aparát. V rámci tohto seriálu budeme anizotropiu popisovať pomocou hustoty energie ε. Anizotropiu si možno matematicky predstaviť ako dodatočné efektívne magnetické pole, ktoré rozrušuje dôsledky výmennej interakcie. My začneme s najjednoduchším možným modelom magnetickej anizotropie, ktorým je *uniaxiálna magnetická anizotropia*. Tá vytvára dva preferenčné smery magnetizácie pozdĺž príslušnej osi. Spolu dostaneme funkcionál voľnej energie $\varepsilon(\theta)$ v tvare

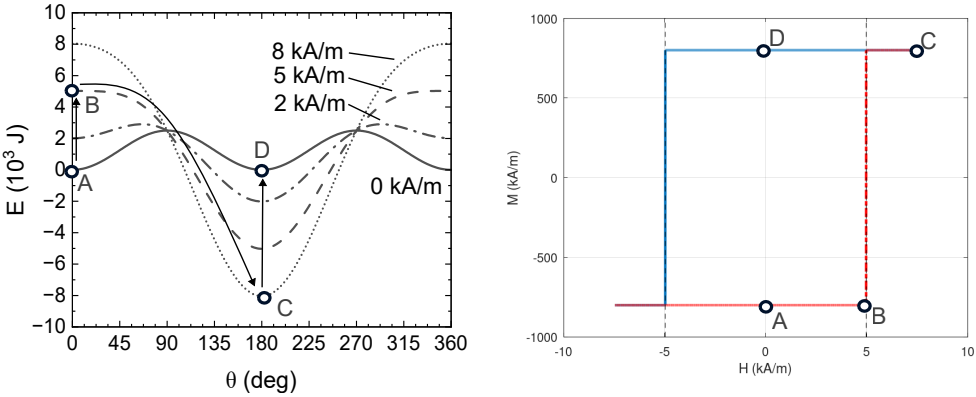
$$\varepsilon(\theta) = K_\mathrm{u} \sin^2\theta - \mu_0 M_\mathrm{s} H \cos(\theta - \theta_H)\,, \tag{1}$$

kde θ je uhol určujúci smer magnetizácie, K_u konštanta popisujúca magnetickú anizotropiu, H intenzita magnetického poľa, ktoré mieri smerom daným uhlom θ_H; a μ_0 permeabilita vákua a M_s je saturačná magnetizácia. Príklad funkcionálu energie je zobrazený na obrázku 2 vľavo.

Jednoduchý príklad výpočtu hysteréznej slučky možno ukázať pre prípad $\theta_H = 0°$. Použitý model už dokáže predpovedať reálnu reprezentáciu informácie dvomi stavmi jedného bitu, ktoré zodpovedajú dvom orientáciám magnetizácie. Feromagnety sú totiž typické tzv. hysteréziou magnetizácie, čo označuje fakt, že magnetický stav nezávisí iba od aktuálnych podmienok, ale aj od predošlých stavov systému. Majme napríklad feromagnet zmagnetovaný tak, že všetky jeho momenty mieria nahor a my začneme aplikovať magnetické pole smerom nadol. Feromagnet si svoj stav uchová dovtedy, kým externé pole nevytvorí pôsobenie dostatočné na to, aby momenty preklopilo. V našom funkcionáli energie $\varepsilon(\theta)$ to zodpovedá stavu, keď je prvá derivácia energie systému nulová (systém je v energeticky rovnovážnom stave, ktorý ale nemusí byť

stabilný) a zároveň jej druhá derivácia záporná (systém je nestabilný a aj malé výchylky ho preklopia do najbližšieho stavu energetického minima). Hoci v jednoduchých prípadoch možno hysteréznu slučku spočítať analyticky, my budeme používať priložený skript `hysteresis.m` [2], ktorý tieto podmienky numericky overuje, nájde minimá a nakoniec hysteréznu slučku vykreslí. Na jeho úspešné spustenie je potrebné vyplniť funkcionál energie (riadky 26–27) a jeho prvú a druhú deriváciu (riadky 30–31 a 34–35).

Možný výsledok takejto simulácie pre ilustračný funkcionál energie je na obrázku 2 vpravo. Pri nulovom aplikovanom magnetickom poli sa magnetizácia nachádza v pôvodnej polohe A ($\theta = 0\,\mathrm{deg} = 0°$). Ďalšie minimum je v bode D pri $\theta = 180\,\mathrm{deg} = 180°$, čo zodpovedá druhej stabilnej polohe. Pri aplikácii poľa kladnej polarity sa funkcionál energie pre bod A (resp. bod $\theta = 0\,\mathrm{deg}$) začne zvyšovať. Systém je v neoptimálnom stave, ale nie natoľko, aby preskočil do druhého, globálneho minima. Hranicou je bod B, v ktorom sa už v podstate minimum nenachádza a aj malé výchylky prehodia systém do druhého minima. Pri ďalšom zvýšení H systém preskočí do bodu C ($\theta = 180\,\mathrm{deg}$), kde sa magnetizácia preklopí. Keď teraz magnetické pole vypneme, systém sa vráti do bodu D, pretože je to stále lokálne minimum energie najbližšie bodu $\theta = 180\,\mathrm{deg}$. Body A, B, C a D sú vyznačené aj na obrázku vpravo, kde vidíme vznik hysterézy. Analogickým postupom pre opačnú polaritu H by sme získali plnú slučku.



Obrázek 2: Vľavo: funkcionál energie[3] feromagnetickej vrstvy pre $M_\mathrm{s} = 800\,\mathrm{kA{\cdot}m^{-1}}$, $K_\mathrm{u} = 2\,500\,\mathrm{J}$, $\theta_H = 0°$ a rozličné aplikované magnetické polia H od $0\,\mathrm{kA{\cdot}m^{-1}}$ do $8\,\mathrm{kA{\cdot}m^{-1}}$. Vpravo: magnetizácia M ako funkcia aplikovaného magnetického poľa H.

Je potrebné zdôrazniť, že ide o najjednoduchší možný model a pre reálne správanie komplexnejších materiálov je potrebné započítať viacero efektov (pnutie, efekt kryštálovej štruktúry a pod.), ktoré by sa do rovnice (1) jednoducho pričítali. V ďalšom pokračovaní seriálu si budete môcť hysterézne slučky sami nasimulovať pre magneticky zriedený polovodič GaMnAs, ktorý bol v jednom momente považovaný za kandidáta pre spintronické súčiastky.

[2] `https://drive.google.com/file/d/14lFLXKfB1QJweUY-MvRvVVEELoShf7aU/view?usp=sharing`

[3] Na grafe je použitá celková energia namiesto hustoty energie, význam však pre naše potreby ostáva rovnaký. Podobne je vo význame energie použitá aj konštanta K_u.

Po praktickej stránke by bola ideálna čo najužšia hysterézna slučka, aby nás zápis stál čo najmenej energie, situácia však nie je taká jednoduchá. Doteraz sme úplne zanedbávali fluktuácie momentov, ktoré vznikajú pre nenulovú okolitú teplotu. To, čo určuje, ako dlho bude informácia uchovaná (teda za ako dlho sa magnetické momenty samé popretáčajú kvôli tepelným fluktuáciám), je práve magnetická anizotropia. V praxi je preto nutné zvoliť správny materiál, ktorý bude dlhodobo uchovávať informáciu a zároveň nebude vyžadovať veľa energie na prepnutie magnetických momentov.

Ako však vytvoriť malé oblasti na uloženie jednotlivých bitov? Feromagnet sa za určitých podmienok prirodzene rozdeľuje na magnetické domény – oblasti, v ktorých magnetizácia smeruje približne rovnakým smerom. Rozdelením do domén je možné znížiť energiu magnetického poľa v okolí telesa. Vytvorenie hraníc medzi doménami však stojí energiu, preto výsledná doménová štruktúra závisí od veľkosti, tvaru a materiálu feromagnetu. Dostatočne malé častice môžu zostať jednodoménové.

Prirodzené domény však samy osebe neposkytujú pravidelnú a stabilnú sústavu pamäťových buniek. V pevných diskoch sa preto používajú granulárne magnetické vrstvy tvorené drobnými feromagnetickými zrnami oddelenými nemagnetickými hranicami. Tie potláčajú výmennú väzbu medzi susednými zrnami. Jeden zapísaný bit spravidla zahŕňa viacero zŕn, ktorých magnetizácie sa pri zápise orientujú rovnakým smerom. Ich anizotropia následne pomáha zachovať tento stav aj po odstránení zapisovacieho poľa.

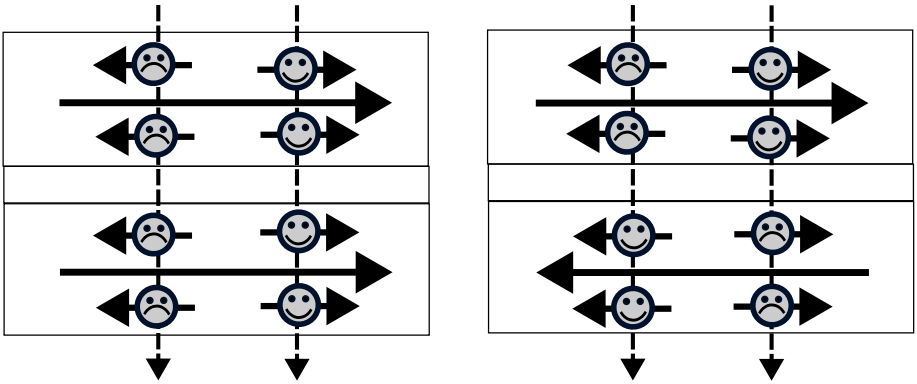
Senzory

Podarilo sa nám nájsť cestu, ako bity zapísať a uložiť. Ako ich však detegovať? Magnetické pole môžeme merať napríklad pomocou cievky, pričom pohyby rotujúcej platne disku by vytvárali malé zmeny magnetického indukčného toku. Takýto senzor však nie je dostatočne citlivý. Využívajú sa preto metódy založené na zmenách elektrického odporu vyvolaných magnetickým poľom. Ide o tzv. magnetorezistenciu, konkrétne gigantickú magnetorezistenciu (GMR).

Takýto senzor môže byť komplikovaný, ale základnú myšlienku možno pochopiť z modelu s dvomi feromagnetickými vrstvami F oddelenými nemagnetickou vrstvou N. Účelom usporiadania je rozdielny rozptyl elektrónov na rozhraní feromagnetu a nemagnetickej vložky. Ak je spin elektrónu paralelný s magnetizáciou, rozptyľuje sa menej ako elektrón s opačným spinom. Zaujímavá situácia však nastane, keď si urobíme „sendvič“ F|N|F načrtnutý na obrázku 3. Magnetizáciu jednej vrstvy zafixujeme a v druhej ju necháme voľnú. Následne môže magnetické pole „bitov“ (resp. magnetických domén) obrátiť magnetizáciu voľnej magnetickej vrstvy senzora. Pri paralelnom usporiadaní (magnetizácie oboch vrstiev majú zhodný smer) sa silno rozptyľujú elektróny so spinom iba jedného smeru (opačného voči magnetizácii), čo vedie k malému odporu. Naopak, pri antiparalelnom usporiadaní (magnetizácie vrstiev majú opačné smery) sa silno rozptyľujú elektróny so spinom nahor aj nadol (každý typ v inej vrstve), čo vedie k prudkému nárastu odporu. Kvantitatívne môžu tieto zmeny dosahovať až stovky percent, vďaka čomu možno detegovať aj malé magnetické domény, a teda aj zvýšiť kapacitu pevných diskov.

Na záver tejto podkapitoly dodáme, že v súčasnosti existujú ešte citlivejšie senzory napr. na báze tunelovej magnetorezistencie (TMR), ktoré fungujú na podobnom, no fyzikálne náročnejšom princípe. Táto téma je pre zvedavých čitateľov rozobraná v odbornej literatúre[4].

[4]COEY, J. M. D. Magnetic tunnel junctions. In: *Magnetism and Magnetic Materials*. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. ISBN 978-0-521-81614-4.



Obrázek 3: Náčrt GMR senzora. Vľavo je nákres paralelného (nízkoodporového) stavu a vpravo antiparalelného (vysokoodporového) stavu. Smutný smajlík označuje silno rozptyľované elektróny.

Budúcnosť pevných diskov

Hoci prezentovaný princíp fungovania pevných diskov môže pôsobiť jednoducho, sú za ním ukryté desaťročia vývoja, ktoré umožnili dosiahnutie takých kapacít, aké máme dnes. A ich vývoj nie je zďaleka na konci. Je zaujímavé nahliadnuť na aktuálne trendy a výzvy v tomto odbore. Tie nájdeme v tzv. roadmape (v pláne vývoja). Pre pevné disky predstavuje spoločné výhľady celého odvetvia a zaoberá sa tým, koľko dát chceme byť v budúcnosti schopní uložiť na disk a aké technológie na to musíme vyvinúť. Roadmapy vydávajú výrobcovia diskov, ich dodávatelia a výskumníci, a to buď spoločne cez odborné združenia, alebo ako individuálne firmy formou vlastného plánu. Cieľom roadmáp je pomáhať zosúladiť výskum, výrobu a investície tak, aby jednotlivé súčiastky boli pripravené približne v rovnakom čase. Napríklad, zatiaľ čo plošná hustota zápisu sa v roku 2018 odhadovala na 1 Tb na štvorcový palec, do roku 2035 sa očakáva viac ako 10 Tb na štvorcový palec a firmy tomu prispôsobujú svoje aktivity.

Aké sú teda aktuálne trendy? V podstate sme ich spomenuli už vyššie, sú však ešte ambicióznejšie – chceme „priblížiť bity“ ešte viac k sebe a zmenšiť energiu potrebnú na ich zápis. V súčasnosti sa na výrobu platní pevných diskov vyvíjajú zliatiny železa a platiny vo forme zŕn. Vďaka tomu sú jednotlivé zrná oddelené nemagnetickými medzerami, ktoré znižujú vzájomné magnetické pôsobenie medzi zrnami. To umožňuje zápis bitu do dobre definovaného počtu zŕn a vedie k zmenšeniu plochy pripadajúcej na jeden bit. Ak by sme sa pozreli do roadmapy z roku 2022, zistili by sme, že sa zvažuje umelé vytvorenie tzv. magnetických ostrovčekov. V takto upravených ostrovčekoch možno zapísať bit do jedinej dobre definovanej feromagnetickej domény.

Dokážeme navyše zmenšiť energiu potrebnú na prepis bitu? Jednou z možností je pridanie ďalšieho mechanizmu k zápisu. Napríklad, ako si ukážeme v ďalších dieloch, vysokofrekvenčná elektromagnetická vlna dokáže rozpohybovať magnetizáciu, a keď už je magnetizácia roztočená, ľahšie sa prepne. Tento jav využíva tzv. MAMR (Microwave-Assisted Magnetic Recording) technológia. Aplikačne zaujímavejšia je tzv. HAMR (Heat-Assisted Magnetic Recording) technológia, pri ktorej tenký laserový zväzok na krátky okamih zvýši teplotu feromagnetu, čím

zmenší jeho magnetickú anizotropiu a umožní ľahší zápis. Práve tieto dve technológie by po implementácii mohli v blízkej budúcnosti zvýšiť plošnú hustotu zápisu na približne 10 Tb na štvorcový palec.

MRAM

Ďalšou technológiou, ktorú si v rýchlosti predstavíme, sú magnetické pamäte s náhodným prístupom (MRAM). Ako bolo spomenuté minule, výhodou pevných diskov je schopnosť spoľahlivo uchovať informáciu na dlhý čas. Sú však pomalé. Naopak, pamäť RAM je rýchla, no oproti pevnému disku uchová len zlomok množstva informácií, a to iba pri neustálom napájaní. Prečo teda neskombinovať vlastnosti magnetických materiálov, v ktorých výmenná interakcia drží spiny pokope; s rýchlym prístupom k informácii? Práve táto otázka stojí za MRAM technológiou.

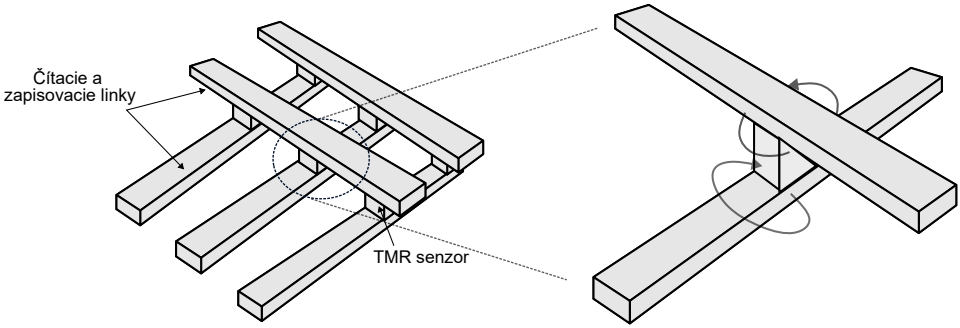
MRAM využíva orientáciu magnetizácie na uchovanie informácie, ktorú elektricky číta prostredníctvom magnetorezistencie. Hlavnou motiváciou jej konštrukcie je kombinovať rýchle čítanie a zápis s vysokou odolnosťou voči opakovanému prepisovaniu a nevolatilitou (zachovaním dát aj po odpojení napájania). Na rozdiel od DRAM (dynamickej RAM) nepotrebuje pravidelné obnovovanie dát a umožňuje vypínanie neaktívnych pamäťových blokov bez straty ich obsahu. MRAM tak ponúka cestu k energeticky úspornejším vstavaným pamätiam a perspektívne aj k niektorým úrovniam vyrovnávacej pamäte procesorov.

V tomto dieli si predstavíme iba nultú generáciu MRAM, pretože technológia, ktorá ju vylepšila, bude predmetom až ďalšieho pokračovania seriálu. V nultej generácii bola vytvorená mriežka z nanometrových vodičov, pričom v každom uzle sa nachádzal TMR senzor (ako na obrázku 4). Informácia sa tu zapisovala pomocou magnetického poľa vytvoreného prúdmi v adresovacích vodičoch. K zápisu došlo iba v mieste, kde sa vodiče pretli, pretože magnetické pole oboch vodičov sa sčítalo a výsledné pole bolo dostatočne silné na zápis. Tieto stavy sa čítali ako nízky alebo vysoký odpor prostredníctvom tunelovej magnetorezistencie. Nevýhodami boli vysoké zapisovacie prúdy a riziko nežiaduceho prepnutia susedných buniek vystavených časti zapisovacieho poľa, čo vyriešila technológia spin-orbit torque (SOT) a spin-transfer torque (STT).

Peter Kubaščík
peter.kubascik@fykos.cz

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/.



Obrázek 4: Ilustrácia field MRAM (príklad na MRAM nultej generácie). V uzloch sú umiestnené TMR senzory, ktoré informácie zaznamenávajú. Zápis sa realizuje pomocou simultánnej aplikácie poľa z čítacej a zapisovacej linky, čo je ilustrované v priblížení vpravo.