

Potenciální nástupci SSD disků

Pevné disky budoucnosti budou menší, levnější a mnohem rychlejší než současné flashové SSD disky.

CHRISTOPH SCHMIDT

SSD disky jsou dnes v kurzu. Rychlá flashová úložiště najdeme ve všech tablettech, smartphonech, ve většině lepších notebooků, a dokonce i ve stolních počítačích. Největší výkonnostní prospěch z SSD disků mají právě stolní počítače a notebooky, což potvrdí všichni uživatelé, kteří vyzkoušeli upgrade z magnetického disku na SSD disk a už by nikdy neměnili. Technologicky vzato je ale sázka na flashové disky spatná a budoucnost úložných zařízení se bude muset ubírat jiným směrem. Flashové paměti nebyly původně vyvinuty pro účely vysokokapacitních a dlouhodobě využívaných úložných zařízení. Polovodičové buňky flashových pamětí jsou totiž příliš pomalé a navíc se během provozu opotřebovávají. Operační paměť RAM i procesor počítače dokážou zpracovávat data minimálně $20\times$ rychleji, než kolik činí rychlosť čtení či zápisu SSD disků s flashovými paměťovými buňkami. Pokud by flashová paměť byla stejně rychlá jako RAM a CPU, již dnes bychom používali smartphony, tablety a notebooky, které by naběhly okamžitě po zapnutí a zpracovaná či přijímaná data by automaticky a okamžitě zaznamenávaly do stabilní paměti. Jakákoliv rozpracovaná práce by tedy mohla být kdykoliv přerušena a ani počítače, ani servery by už nikdy neměly problémy po nečekaném pádu systému.

O následnictví úložné technologie flashových SSD disků se momentálně uchází několik technologií. Většina z nich je momentálně ve fázi vývoje, část z nich je ale již dnes využívána v praxi. Není divu, že důležité technologické firmy, jako IBM, Toshiba či Fujitsu, si přejí ukrojit co největší kus z multimiliardového koláče trhu se superrychlými úložnými technologiemi budoucnosti, a proto investují nemále částky a úsilí do jejich vývoje. Právě zmínění výrobci disponují dostatečným finančním i vývo-

joyvým potenciálem, a jejich výsledkem je přibližně tucet různých dostatečně rychlých, bezpečných a energeticky úspornějších metod, než je technologie flashových SSD disků. V tomto článku vám mimo jiné popíšeme potenciál technologií MRAM, FeRAM a PCM a prozradíme vám, jak fungují a kdy budou komerčně dostupné na trhu. Některé z nich očekáváme již v roce 2013.

Nástupnické technologie SSD disků bude třeba uvést na trh do několika let, protože potenciál flashových SSD pamětí je již principiálně vyčerpán. Flashové buňky nelze snadno dále miniaturizovat, abychom dosáhli výšší záznamové hustoty, a nejde ani nijak výrazně prodloužit jejich životnost a snížit jejich energetickou spotřebu. Důvod spočívá v samotné technologii a principu flashových buněk (viz schéma napravo). Tyto buňky jsou v podstatě tranzistory se třemi kontakty: emitorem, kolektorem a řídící linkou. Řídící linka se stará o průchod elektrického proudu – buď jej do buňky pustí a vyvolá stav „1“, nebo jeho přístupu zabrání a buňka zůstane ve stavu „0“. Z tranzistorů se skládají i procesor a operační paměť, na rozdíl od flashových buněk ale tranzistory CPU a RAM ztrácejí svůj stav v okamžiku, kdy dojde k přerušení přívodu proudu. Z toho důvodu obsahuje flashová buňka ještě jednu část, kterou je plovoucí brána. Plovoucí brána neustále uchovává elektrický náboj v podobě elektronů. Je nabita elektrickým napětím v rozmezí 10 až 20 voltů. Při čtení obsahu paměťové buňky jí probíhá slabý měřicí proud. Při jeho průchodu od kolektoru k emitoru je plovoucí brána v nenabitém stavu a buňka je přečtena s hodnotou „1“. V případě, že je měřicí proud blokován, brána musí být nabita, což odpovídá stavu „0“.

Jedním ze zásadních problémů flashových pamětí je, že pro zápis a mazání dat uložených do buněk vyžadují poměrně vysoké napětí. Jelikož plovoucí brána špatně udržuje uložené elektro-

ny, musí být obalena tlustou vrstvou izolačního materiálu, který elektronky dokážou překonat pouze pomocí silného proudu. Vyšší napětí urychluje přístupovou dobu, ale je třeba jej pokaždé znovu vyvinout. Zároveň však dochází ke zkrácení životnosti paměťové buňky, protože při každém zápisu či vymazání jejího obsahu se zmenšuje kapacita izolační vrstvy. Flashové paměťové buňky většiny SSD disků určených pro běžné použití vydrží přibližně 10 000 zápisů, a poté jejich životnost končí. Kvůli této „choullosti“ musí paměťové buňky spolupracovat se složitými a drahými řadiči a zápis musí být prováděn pomocí strategií pro prodloužení jejich životnosti, což má další negativní vliv na rychlosť a spotřebu této technologie. Čím pokročilejší miniaturizací jsou paměťové buňky vyráběny, tím jsou drobnější, a tím slabší je i izolační vrstva jejich plovoucí brány.

Paměti SONOS: Elektronové pasti zajistí vyšší efektivitu

Technologii **SONOS** paměti vyvinuly společnosti Philips a Spansion. Tzv. SONOS paměti řeší výše zmíněný problém tím, že si v porovnání s flashovými paměti vystačí s polovičním napětím a jejich životnost je o 1 000 až 10 000 zápisových cyklů delší. Paměťové buňky typu SONOS jsou produkované stejně jako buňky flashových USB disků, jen jejich plovoucí brána není vyrobena z křemíku, ale z nitridu křemíku, který má rovnoměrnější molekulární strukturu, která stabilněji váže elektrony. Proto může být také jejich izolační vrstva tenčí a rovnoměrněji rozložená než u flashových buněk. Pro zápis do paměťové buňky typu SONOS je třeba vyvinout pouze poloviční napětí v rozsahu 5 až 8 voltů. Tohoto napětí lze dosáhnout dvakrát rychleji než u flashových paměti.

Vývoj paměťových buněk SONOS je velmi pokročilý. Jeho počátky sahají až do sedmdesátých let, přičemž první čipy byly vyrobeny již v letech sedmdesátých. Paměťové čipy s buňkami typu SONOS se již dnes používají ve vojenském a kosmickém průmyslu, kde je kladen důraz na odolnost vůči radiaci. Nižší úroveň miniaturizace a vysoké výrobní náklady zatím brání masovému komerčnímu nasazení, ale tyto překážky nejsou tak nepřekonatelné. Klasické flashové buňky již nelze dále zmenšovat, a pokud se čipy typu SONOS stanou jejich nástupci, urychlí se jejich vývoj a hromadná produkce sníží cenu této technologie.

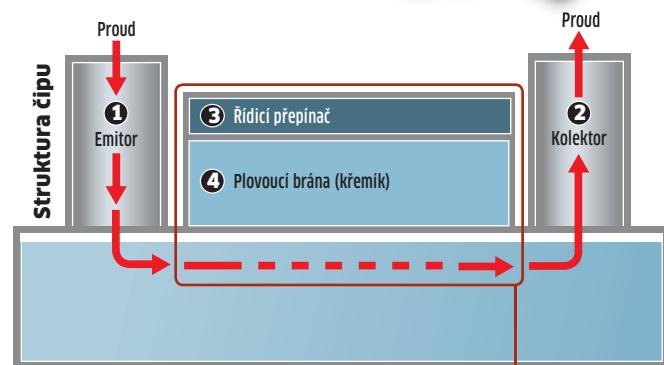
FeRAM: Přepínatelné molekuly prodlužují životnost

Zatímco životnost flashových paměťových buněk se pohybuje na úrovni 10 000 zápisů, paměti typu **FeRAM** (někdy také označované jako FRAM či F-RAM) mají snést více než 10 biliard zápisů, takže vlastně vydrží do nekonečna. V současné době pracují na vývoji této technologie výzkumné týmy společností Ramtron, Fujitsu a Texas Instruments. Na rozdíl od paměťových buněk typu Flash a SONOS ukládá tato ferolelektrická RAM paměť informace přeskupením atomů, přičemž takovéto přepnutí lze opakovat téměř nekonečně. Prototypy paměťových čipů této technologie existují již od osmdesátých a devadesátých let. V současné době pokročila miniaturizace výrobního procesu FeRAM paměti až na úroveň 130 nanometrů. To je v porovnání s 20nm flashovými buňkami sice stále ještě příliš velký rozměr, ale stačí pro výrobu prvních reálných IT produktů. Ferolelektrická paměť FeRAM je konstruována tak, že měřicí proud prochází ferolelektrikem. Zápisový proud dokáže ve struktuře tohoto materiálu posouvat atomy nahoru či dolů, címž dochází ke změně vodivosti fotoelektrika a buňka nabývá stavu „1“, nebo „0“. Svou polarizaci si materiál udrží i po přerušení přístupu elektrického proudu.

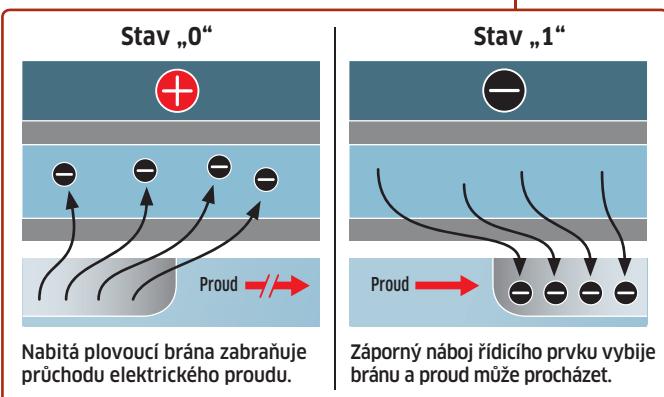
Čtení obsahu paměťové buňky probíhá tak, že je do ní zapisován stav „0“ a zároveň buňkou probíhá měřicí proud. Pokud již byla buňka ve stavu „0“, měřicí proud jí prochází bez jaké-

FLASHOVÁ PAMĚŤ

Základem flashových paměťových buněk je tzv. „plovoucí brána“, tedy část tranzistoru, která izoluje průtok elektrického proudu. Může ale ukládat elektrický náboj a ovlivňuje průchod proudu mezi emitorem a kolektorem. Používá se mimojiné v USB klíčích, paměťových kartách a SSD discích.

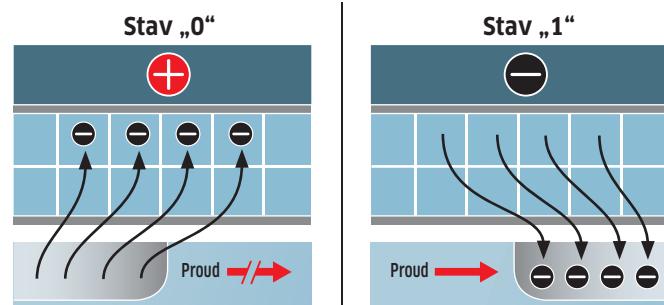


Emitor **1** je záporný pól, zatímco kolektor **2** představuje v obvodu flashové buňky pól kladný. Řídící přepínač **3** dokáže zaplnit paměťový prvek, tedy plovoucí bránu **4** elektrony. V nabitém stavu zabraňuje průchodu proudu mezi emitorem a kolektorem a buňka se nachází ve stavu „0“. Pokud není plovoucí brána nabita, prochází jí proud bez odporu a buňka je v stavu „1“.



PAMĚTI SONOS

Název SONOS vznikl z anglického označení „Silicon-oxide-nitride-oxide-silicon“ a tyto buňky používají plovoucí bránu z nitridu křemíku, který lépe ukládá náboj.



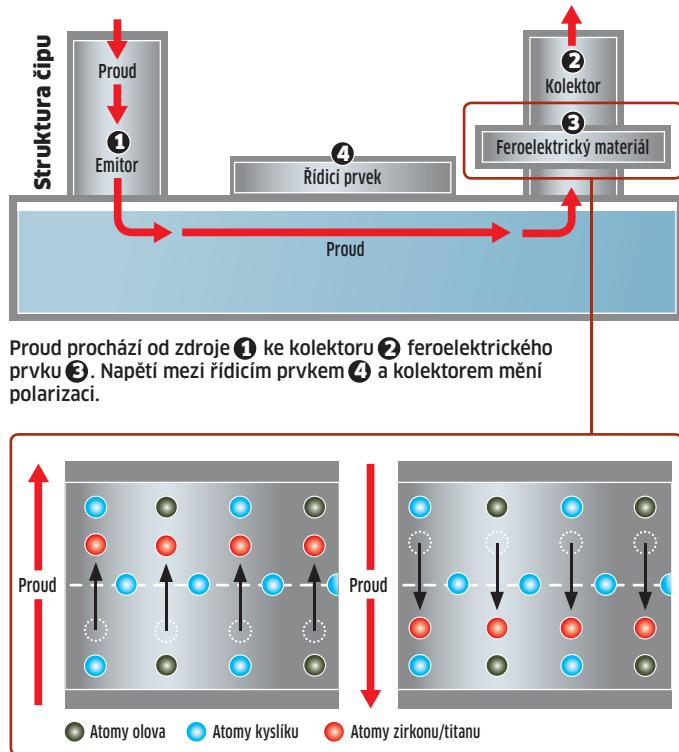
Elektronové pasti v nitridu křemíku zachycují náboj efektivněji. Díky tomu lze použít tenčí izolační vrstvu a vytvořit o polovinu menší paměťové buňky.



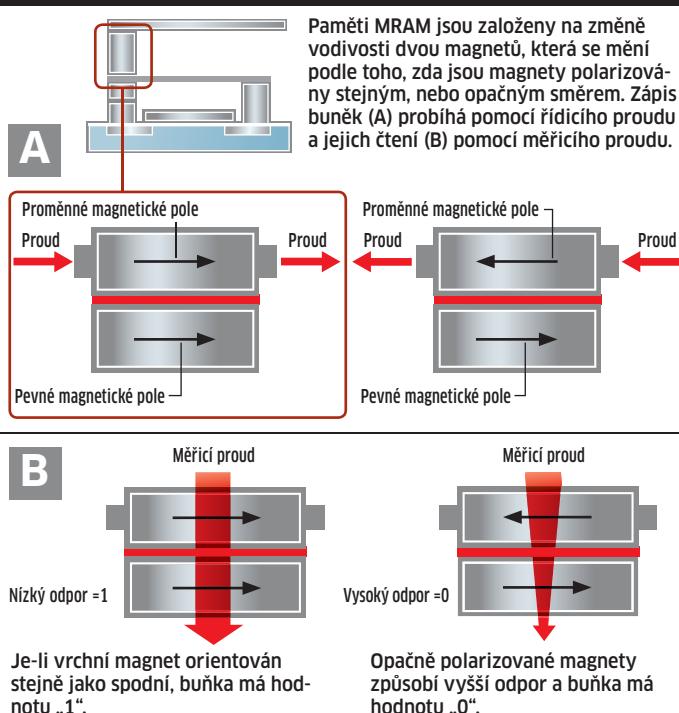


FEROELEKTRICKÁ PAMĚŤ FERAM

FeRAM využívá jevu, při kterém lze otočit orientaci atomů feroelektrického materiálu. Změna polarizace ovlivňuje vodivé vlastnosti buňky.



MAGNETOREZISTIVNÍ RAM



koliv změny, a v řadiči je tedy zaznamenána jako „0“. V případě, že se buňka nachází ve stavu „1“, změněná polarizace feroelektrického materiálu způsobí v měřicím proudu znatelný napěťový impulz, který po zesílení předá řadiči informaci o tom, že daná buňka se nacházela ve stavu „1“. Ihned poté, co je buňka takto „zápisově přečtena“, následuje její polarizace zpět do původního stavu „1“.

Jednou z hlavních výhod paměti typu FeRAM je, že zápis probíhá prostřednictvím nízkého napětí. Díky tomu se spotřeba tohoto typu paměti pohybuje na úrovni jedné čtvrtiny až poloviny spotřeby paměťových buněk typu Flash, a přitom je zápis rychlejší. Přepnutí paměťové buňky FeRAM je extrémně rychlé. Cyklus zápisu jednoho bitu trvá u FeRAM jen 150 nanosekund a je tak 67× rychlejší než zápis do paměťové buňky Flash, který trvá 10 mikrosekund.

Moduly osazené paměťovými čipy FeRAM vyrábí mimo jiné společnosti Fujitsu a Texas Instruments a používají se pro mikrořadiče. V současné situaci jsou náklady na uložení bit příliš vysoké, takže se používají pouze ve specifických oblastech, jako v medicíně nebo například v řidicích prvcích automobilových airbagů.

MRAM: Magnety udrží informace navěky

Magnetorezistivní RAM paměti (MRAM) slibují stejně jako FeRAM dlouhou výdrž a vysokou rychlosť, princip ukládání dat je ale naprosto odlišný. Technologie MRAM pochází již z paděstátých let a je založena na využití magnetické paměti, ale na rozdíl od doby před půl stoletím je tento princip miniaturizován do mikroskopické podoby integrovaného obvodu. Informace ukládá v podobě magnetického půlování, které lze měnit extrémně rychlostí, udrží informaci o svém stavu po dlouhou dobu a na rozdíl od flashové technologie lze stav buněk měnit neomezeně často.

Princip paměti typu MRAM je snadný: jsou založeny na dvou blízko sebe umístěných magnetech. První z nich je napevno magnetizován jedním směrem, zatímco polarizaci druhého magnetu lze měnit pomocí proudu protékajícího jedním nebo druhým směrem. Jsou-li magnety polarizovány stejným směrem, čtecí proud se nesetkává s žádným odporem a obsah buňky je označen „1“. Pokud je polarizace magnetů opačná, odpor je vysoký a obsah buňky je označen „0“.

Teoreticky vzato, MRAM reaguje rychlostí jedné nanosekundy, takže je 1 000× rychlejší než paměť typu Flash. Obsah 8GB DVD disku je možné na MRAM SSD disk uložit během 0,02 sekundy, zatímco na klasický flashový SSD disk záznam stejného množství dat proběhne přinejlepším za 21 sekund. Je zde ale jeden háček. Při frekvenčním cyklu na úrovni 400 MHz se začínají magnety navzájem ovlivňovat. Tento problém však bude možné časem řešit technologickým vývojem. Již dnes existuje projekt, který v laboratorních podmínkách zvýšil rychlosť MRAM buněk pětinásobně.

Stejně jako u výše popsaných konkurenčních technologií se i paměťové čipy MRAM dnes již vyrábějí, ale opět se používají pouze ve specifických oblastech, jako je kosmický průmysl. Na vývoji a optimalizaci technologie magnetorezistivní paměti však pracuje řada největších IT gigantů, jako jsou Toshiba, IBM a NEC, takže lze v horizontu několika let s největší pravděpodobností očekávat její sériovou výrobu.

Phase Change Memory: Vysoká rychlosť zápisu technologií podobnou CD-RW

Technologie Phase Change Memory je v současnosti 100× rychlejší než flashové buňky stávajících SSD disků, a po jejím vylepšení bude ještě rychlejší. Zatímco většina úložných systémů pracuje na principu elektrických či magnetických jevů, Phase Change

Memory (**PRAM**) funguje na základě fyzikální změny materiálu. Tento jev používá podobným způsobem, na jakém fungují přepisovatelná optická záznamová média. Použitý materiál může být dvou stavů: buňka se nachází v krystalické podobě s nízkým elektrickým odporem, nebo v podobě nekrystalické s vyšším elektrickým odporem.

Během zápisu paměťové buňky dochází prostřednictvím impulzů napětí ke změně stavu materiálu. Delší impulz materiál zcela rozpustí, takže jsou během ochlazování jeho molekuly neuspořádané. Kratší impulz zahřeje materiál na nižší teplotu, při které má uspořádanou krystalickou strukturu. Stejně jako u technologie MRAM je i zde obsah paměťové buňky čten pomocí měření jejího elektrického odporu. Změny stavu lze dosáhnout velmi rychle. V laboratořích IBM dosáhli rychlosti, která je stokrát vyšší než u klasických flashových buněk, přičemž každá paměťová buňka dokáže přejít z jednoho stavu přímo do druhého, zatímco flashové buňky je před zápisem třeba nejprve vymazat. Komponenty využívající technologii Phase Change Memory v současnosti vyrábějí společnosti Samsung, Intel a Hynix. Prozatím jsou osazovány do mobilních telefonů a jejich kapacita dosahuje maximálně 64 MB.

ReRAM a CBRAM: Miniaturizace je trumfem

Zatímco flashové paměťové a úložné technologie již téměř dosáhly limitu možné miniaturizace, jiné, jako například Resistive RAM (ReRAM) nebo Conductive Bridging RAM (CBRAM), lze dále zmenšovat až na úroveň několika iontů. Obě technologie pracují podobným způsobem a využívají tzv. „mosty“ vytvořené z izolačního materiálu, které mohou přenášet nebo blokovat elektrický proud. Rozdíl mezi nimi je hlavně v použitých materiálech.



Výroba ReRAM: Zařízení od společnosti ULVAC sloužící k výrobě ReRAM modulů.

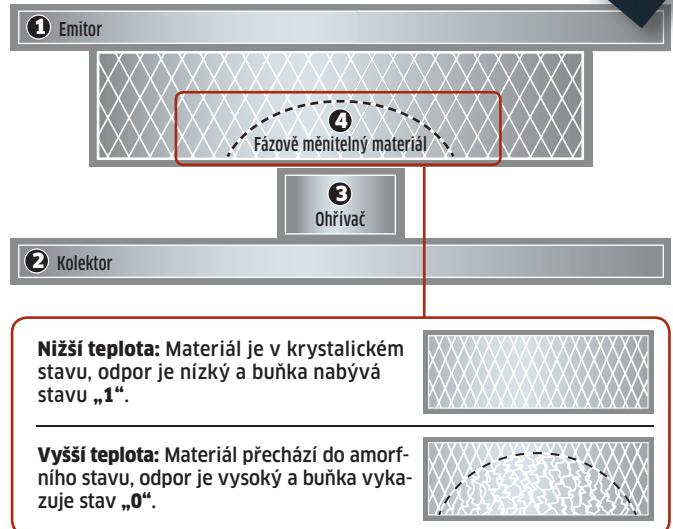
V případě technologie **ReRAM** je izolační vrstva tvořena dielektrikem, tedy materiálem, ve kterém se elektrony nemohou volně pohybovat. V otevřeném stavu zabraňuje průchodu čtecího proudu mezi elektrodami a buňka tak nabývá stavu „0“. Pro přepnutí do stavu „1“ je třeba, aby řadič vyslal k elektrodám vyšší napětí, které prorazí dielektrickou vrstvu a otevře v ní vodivý kanál. Díky němu dokáže čtecí proud projít dielektrickou vrstvou a označí informační hodnotu buňky jako „1“. Pro opětovný přepis buňky do stavu „0“ je nutné použít zpětné napětí, které opět uzavře dříve vytvořený kanál.

Buňka typu **CBRAM** je konstrukčně podobná, jen jedna její elektroda je vytvořena z elektrochemicky aktivního materiálu, jako je například stříbro, zatímco druhá je vyrobena z neaktivního materiálu, jako je například wolfram. Elektrody jsou odděleny izolační vrstvou elektrolytu, takže pokud je čtecí proud blokován, buňka má stav „0“. Pro přepis buňky do stavu „1“ přivede řadič vysoké napětí na wolframovou elektrodu. Tímto způsobem se mezi oběma elektrodami vytvoří nanokanál, který sníží odpor buňky a vznikne stav „1“. Pro opětovný přepsání buňky CBRAM do stavu „0“ je obrácen tok proudu, a tak dojde ke zrušení prospustného nanokanálu.

Největšími výhodami pamětí ReRAM a CBRAM je v porovnání s flashovou pamětí vyšší rychlosť, delší životnost a lepší

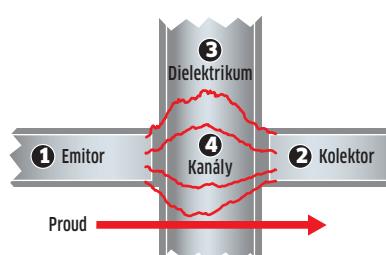
PHASE CHANGE MEMORY

Odpor mezi emitorem **1** a kolektorem **2** závisí na tom, do jaké míry ohříváč **3** zahřeje fázově měnitelný materiál **4**.



REZISTIVNÍ RAM (RERAM)

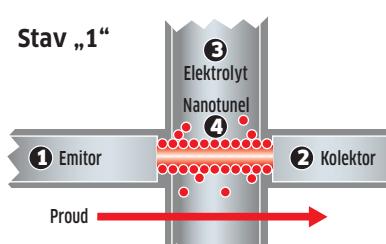
Vysoké napětí vytváří ve vrstvě izolačního materiálu vodivý propojovací kanál. Proud probíhající opačným směrem kanál dokáže zrušit a vrátí buňku do původního stavu.



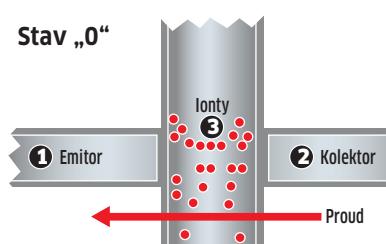
Mezi emitorem **1** a kolektorem **2** je uložena izolační dielektrická vrstva **3**. Při aplikaci vysokého napětí se vytvoří vodivé kanály **4**, kterými může procházet měřicí proud a buňka vykazuje stav „1“. Neprochází-li izolační vodou žádný proud, buňka se nachází ve výchozím stavu „0“.

CONDUCTIVE BRIDGING RAM (CBRAM)

CBRAM pracuje podobně jako ReRAM. Používá jiné materiály, díky nimž nedochází k tvorbě několika kanálů, ale jednoho nanotunelu, který sníží odpor a buňka vykazuje stav „1“.



Probíhá-li mezi emitorem **1** a kolektorem **2** vysoký proud, vytvoří ionty na nanotunelu mezi elektrolytem **3** a kolektorem **2**. Odpor paměťové buňky je nízký a tunel propouští proud.

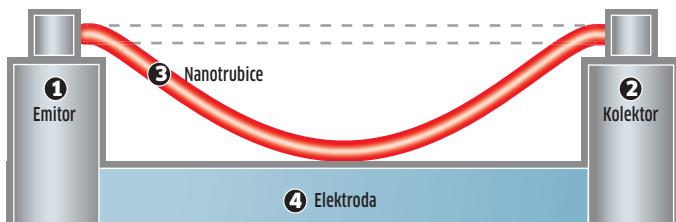


Probíhá-li mezi emitorem **1** a kolektorem **2** proud v opačném směru, dojde k uzavření tunelu a stav buňky je „0“. Ionty mezi elektrolytem a elektrochemicky aktivní elektrodou kolektoru.



NANO-RAM

Nano-RAM je založena na nanotrubicích, které mají v zakřiveném stavu nižší elektrický odpor než ve stavu přímém. Stav nanotubice se mění prostřednictvím elektrody.



Nanotubice (3) vytváří spojení mezi emitorem (1) a kolektorem (2). V průhnutém stavu má trubice nižší odpor než ve stavu přímém. Podle toho, jak je nabité, pak elektroda tuto trubici budé přitahují, nebo odpuzuje, čímž dochází k jejímu narovnání. Trubice přetrvává i bez přístupu proudu, jelikož v běžném stavu je přímá a ve stavu zakřiveném na ní a elektrodi působí Van der Waalsova síla (odpudivá či přitažlivá interakce síly mezi molekulami).

Vesmírné technologie:

Technologie nano-RAM byla mimo jiné vyzkoušena v raketoplánech.

potenciál pro miniaturizaci až do velikosti nanočistic. Výzkumné centrum společnosti HP letos oznámilo, že technologie ReRAM komerčně představí již v roce 2013 v podobě memristorových čipů.

Další možnosti vývoje: Nano-RAM, Racetrack a Millipede

Nejnovější výzkum se kromě elektrických obvodů znovu poohlíží i po mechanických přepínačích. Před několika lety přišla společnost Nantero s technologií **Nano-RAM**, která je ale stále ve stadiu prototypu. Nano-RAM slibuje extrémně vysokou hustotu paměti. Je založena na principu „nanomostu“, vytvořeného pomocí napětí na vstup či výstup buňky, přičemž pokaždé má buňka jiný odpor. Prostřednictvím technologie Nano-RAM by bylo možné vytvořit paměťové moduly s vysokou hustotou modulů DRAM. V současné době ale nejsou paměti typu Nano-RAM produkovaný ve větších objemech.

Vývojáři pracují i na dalších dvou technologiích, které by mohly přinést princip starých pevných disků do velikosti nanočistic. Společnost IBM pracuje na vývoji paměti typu **Racetrack**, které mají ukládat data stejně jako pevné disky v podobě série magnetizovaných a polarizovaných buněk, které budou místo magnetického pole uloženy na pevném nanovlákně. Během čtení a zápisu posouvá elektrický proud magnetická pole okolo čtecích a zápisových hlaviček. Posun magnetických polí dal této technologii i název, jelikož informace probíhají pod hlavičkami stejně jako koně na dostihové dráze. Technologie Racetrack umožní dosáhnout rychlejších přístupových dob, než s jakými pracují mechanické disky. Vysokou přenosovou rychlosť pak zajistí paralelní zpracování paměťových buněk.

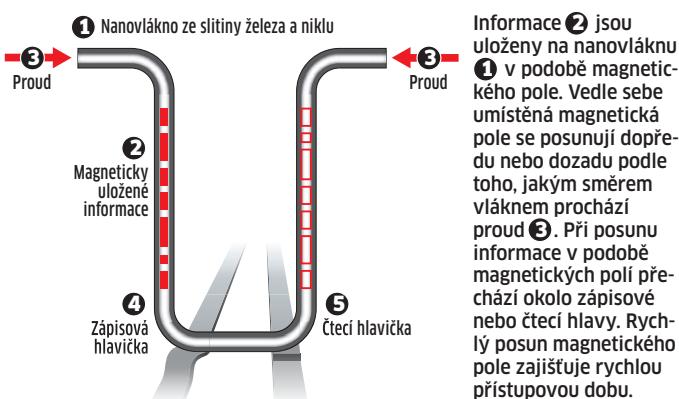
Vysoký výkon slibuje díky paralelizaci i technologie **Millipede**. Jednotlivé bity jsou v jejím případě ukládány na posuvném disku a mají stejně jako na magnetickém disku podobu „pit“ neboli prohlubnin, nad kterými je umístěna řada snímačů. Pro zapsání hodnoty „1“ zahřeje hrot senzoru záznamový materiál na teplotu, která jej roztaví, a poté do roztaveného materiálu datové vrstvy hrot senzoru vytlačí prohlubeň. Pokud je třeba zapsat hodnotu „0“, hrot zápisové hlavy pouze roztaví záznamovou plochu, ale pak se posune dál, a místo toho, aby došlo k jejímu promáčknutí, se naopak povrch vyrovná do původní, „ploché“ podoby. Při čtení posunou miniaturní motorky povrch disku tak, aby byly senzory umístěny nad odpovídajícím polem. Poté se hlavičky přiblíží k datovému povrchu a přečtou, zda se pod nimi nachází prohlubně, nebo ne, tedy zda čte informace v podobě „0“ nebo „1“. Jedna jednotka disku Millipede dosahuje propustnosti na úrovni 50 až 150 MB/s, ale díky tomu, že čtení i zápis probíhá paralelně prostřednictvím více hlaviček, dosahuje disk této technologie propustnosti srovnatelné s elektronickou pamětí. Navíc se může díky miniaturní „nanovelikosti“ pochlubit vysokou hustotou, takže zabere méně místa než elektronické paměťové moduly.

Všechny technologie, které jsme vám tentokrát představili, slijují radikální urychlení čtení a zápisu dat z paměťových médií. Která z nich se nejlépe uchytí a která nakonec dospěje do podoby masově vyráběných médií, to je těžké odhadnout. Nejslibněji zatím zní prohlášení společnosti HP, která chce začít provádět koncovým zákazníkům paměťové moduly memristor s technologií ReRAM již v roce 2013. Už nyní se těšíme na to, že během několika let bude me používat počítače, které se do funkčního provozu probudí okamžitě po zapnutí a navíc vydrží opět o něco déle na baterie. ☐

AUTOR@CHIP.CZ

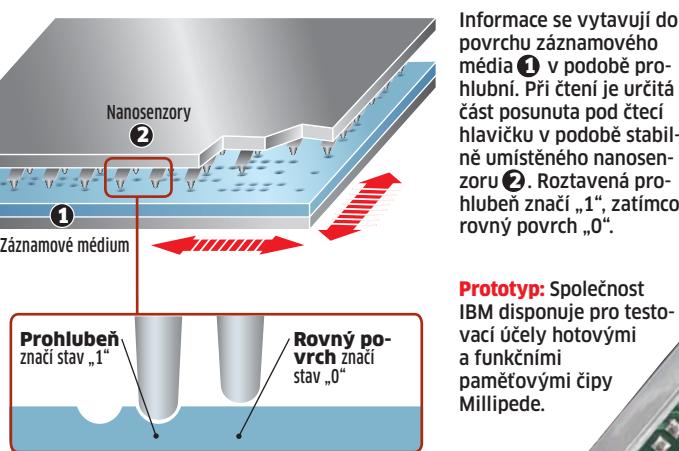
PAMĚŤ RACETRACK

Technologie paměti Racetrack vyvinula společnost IBM a spočívá v magnetickém ukládání informací na tenké nanovlákně. Během čtení a zápisu se magnetická pole pohybují po tomto vlákně.



MILLIPEDE

Podobně jako u děrných štítků zaznamenává paměťová technologie Millipede od IBM informace v podobě děr. Jelikož mají tyto otvory průměr v řádu nanometrů, umožňují vysokou hustotu zapsaných dat.



Prototyp: Společnost IBM disponuje pro testovací účely hotovými a funkčními paměťovými čipy Millipede.

