

Jeden bit, jeden atom

V dnešní digitální době, kdy je nutné ukládat stále více a více dat, je také potřeba rozšiřovat naše úložiště. Již dávno nežijeme v době, kdy nám stačila 3,5-palcová disketa, na kterou jsme mohli nahrát 1,44 MB dat (to by mimochodem nestačilo ani na fotografii pořízenou dnešními chytrými telefony). Dnes se dostáváme do situace, kdy je potřeba vyrábět co nejmenší paměťová média s co největší úložnou kapacitou. Vědcům z IBM se v tomto oboru podařil skutečně revoluční kousek: zvládli uložit 1 bit do jednoho jediného atomu. Pro srovnání uvedme, že dnešní pevné disky používají na zápis jednoho bitu přibližně 100 000 atomů.

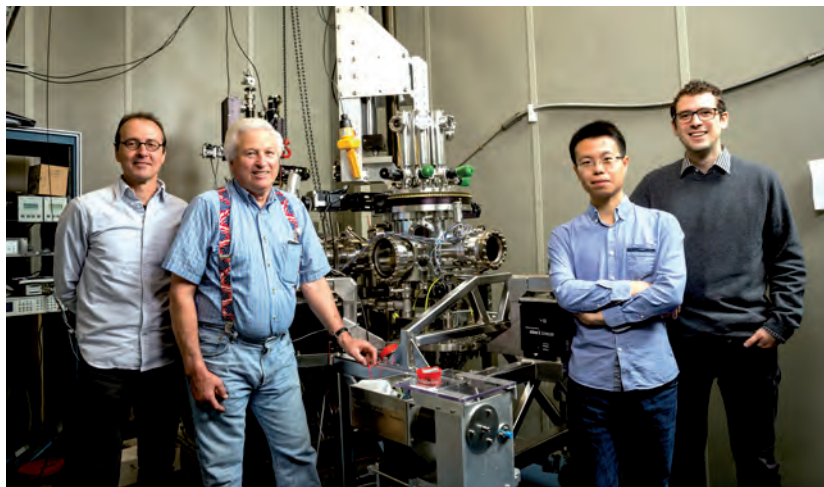
Jak se ukládají data na pevný disk?

Abychom se mohli podívat, jakým způsobem „zápis na atom“ funguje, pojďme nejdříve prozkoumat, jak fungují tzv. magnetická datová média, například pevné disky. Princip ukládání dat pomocí magnetizace je stále stejný. Pro ukládání do datových médií se používají bity. Bit je nejmenší datová jednotka, pod kterou si můžeme představit hodnotu 1 nebo 0. Dále pak existuje bajt (B), což je označení pro 8 bitů, například 10100101. Následně se používají standardní fyzikální předpony kilo, mega, giga atd. Pro příklad si uvedme, že standardní fotografie má velikost okolo 5 MB, což je přibližně 40 milionů bitů. Pro ukládání takových dat se běžně používají pevné disky. V dnešní době se rozmáhají SSD disky, ty však nemají s technologií, která nás zajímá, příliš společného, proto se podíváme na princip stále používaných rotujících pevných disků (HDD).

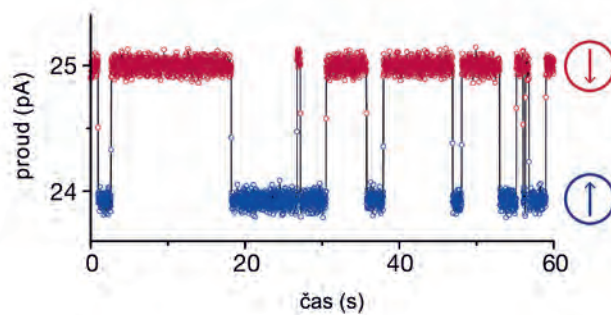
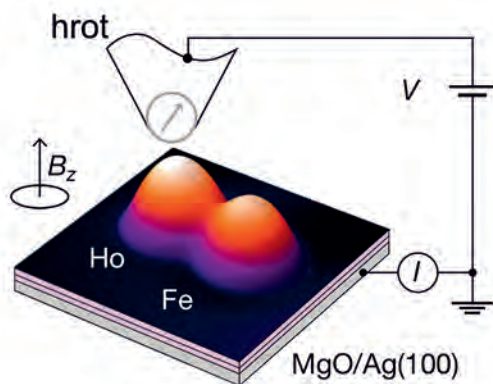
Každé magnetické datové médium se skládá ze dvou hlavních částí: čtecí/zapisovací hlavy (v dnešních HDD jich bývá víc) a magnetizačního média. U pevného disku se jedná o tenkovrstvý feromagnetický materiál, který je

Rastrovací tunelový mikroskop – STM (Scanning Tunneling Microscope), zařízení založené na tunelovém jevu, které umožňuje zobrazit povrch pevné látky v rozlišení jednotlivých atomů. Povrch je doslova osaháván piezoelektricky vychylovaným wolframovým hrotem, z něhož tunelují elektrony k povrchu, a přitom se měří vzniklý tunelový proud. Ve směru povrchu je rozlišení řádově 10^{-10} m, v kolmém směru k povrchu je rozlišení řádově lepší v důsledku velmi nelineární závislosti velikosti proudu na vzdálenosti od povrchu. Na špičce wolframového hrotu je v ideálním případě jediný atom, podle toho, jak se hrot podaří vyleptat. Je to nejostřejší hrot, jaký dokážeme vyrobit. Rastrovací tunelový mikroskop umožňuje nejenom zviditelnit polohu atomů na povrchu krystalové mříže, ale také je přenášet z místa na místo, když se pomocí přiloženého napětí překoná chemická vazba s povrchem a atom se hrotem mikroskopu přenesou.

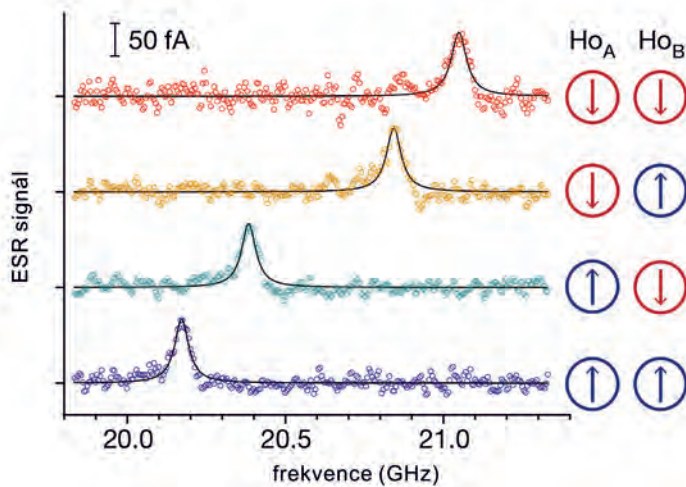
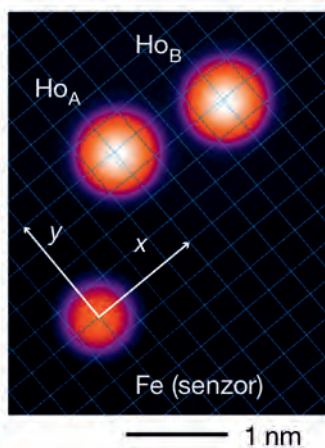
Vědecký tým z IBM, kterému se podařilo zapsat informaci na jeden jediný atom. Zleva doprava: Chris Lutz, Bruce Melior, Kai Yang, Philip Willke. Zdroj: IBM.



EXPERIMENTÁLNÍ USPOŘADÁNÍ A MĚŘENÍ MAGNETICKÉHO STAVU ATOMU HOLMIA



EXPERIMENT S DVĚMA ATOMY HOLMIA A JEDNÍM KONTROLNÍM ATOMEM ŽELEZA

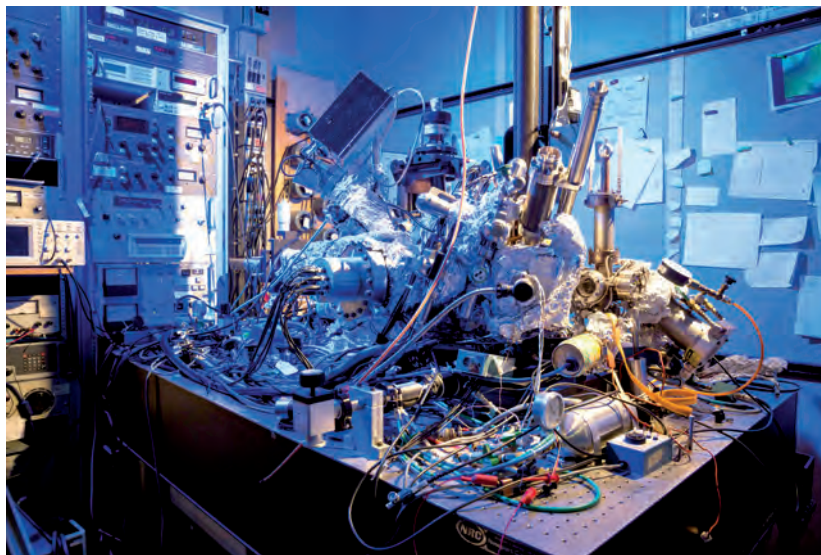


Zeemanův jev – štěpení energetických hladin atomů vlivem přítomnosti magnetického pole. Jde o skupinu hladin, které bez přítomnosti magnetického pole mají stejnou energii (tzv. degenerovaná energetická hladina). V přítomnosti magnetického pole mají jednotlivé hladiny již nepatrně odlišnou energii, která vede k rozštěpení jedné spektrální čáry na více čar.

SSD – Solid State Drive, datové médium, které neobsahuje pohyblivé součástky. Existuje několik technologií přípravy takových médií, k nejznámějším patří tzv. flash paměti.

HDD – Hard Disk Drive, pevný disk. Zařízení k uchování většího množství dat formou magnetického zápisu. Zápis i čtení probíhá pomocí hlav pohybujících se nad magnetickým médiem. První pevný disk se objevil v roce 1956. Dnešní komerčně prodávané disky pojmu mnoho terabajtů dat.

Fotografie rastrovacího tunelového mikroskopu, která byla pořízena dne 28. 2. 2017 ve výzkumném kampusu IBM v San Jose. Foto: Stan Olszewski pro IBM.



nanesen na diskovém kotouči v několika nanovrtvách. Tento materiál lze pomocí zapisovací hlavy zmagnetizovat tak, že se vytvoří takové magnetické domény, které jsou natočeny v jednom, nebo v druhém směru. Pomocí čtecí hlavy je možné měřit magnetické pole, které tyto domény vytvářejí, a následně určit orientaci těchto domén. Ke čtení i k zápisu se v současnosti využívá jevu obří magnetorezistence (viz heslo na str. 270). Využití této technologie vedlo po roce 1997 ke zmnohásobení kapacity harddisků.

Jak se ukládají data na jeden atom?

Experiment vědců z IBM lze rozdělit do tří fází: příprava úložného prostoru, zápis a čtení dat a nezávislé ověření, že se atom skutečně zmagnetizoval v jednom, nebo ve druhém směru. Jako úložné médium byl zvolen vzácný atom holmia (Ho), který byl nanesen na destičku oxidu hořečnatého (MgO). Pro ověření, zda se skutečně jednalo o jediný atom holmia, byla použita speciální mapovací technika – rastrovací tunelový mikroskop (STM, Scanning Tunneling Microscope). Pomocí této metody byl zmapován povrch a bylo ověřeno, že je nanesen jediný atom holmia. Atom holmia je velice těžké udržet zmagnetovaný. Je nutné ochladit ho na teplotu 40 kelvinů ($-233,15\text{ }^{\circ}\text{C}$), a tím zajistit stabilitu jeho magnetizace. Proto je celý experiment prováděn ve speciální komoře, která je na tuto teplotu vychlazená.

V druhé fázi experimentu použili vědci jako čtecí/zapisovací hlavu hrot z rastrovacího tunelového mikroskopu. Při obou operacích byla využívána obří magnetorezistence – závislost elektrického odporu na intenzitě magnetického pole. Princip čtení je tedy následující: čtecí hlavou, která je umístěna v blízkosti zmagnetovaného atomu, teče elektrický proud, který se mění v závislosti na orientaci spinu (magnetického momentu) zmagnetovaného atomu. Změna protékající-

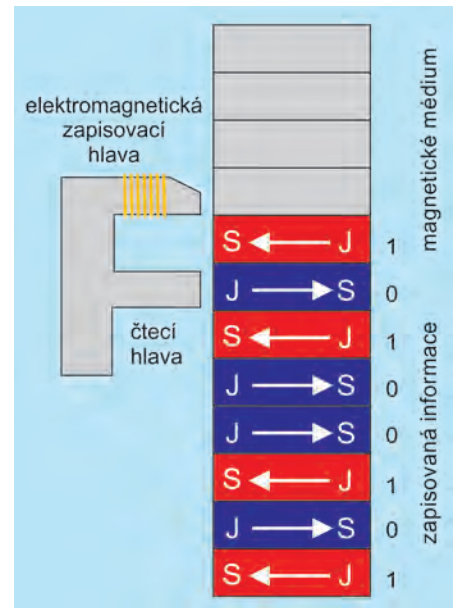
cího proudu je v řádu 2 až 4 %, což odpovídá změně velikosti proudu přibližně o jeden miliampér. Tuto změnu velikosti proudu je možné spolehlivě změřit. Pro zápis se používají krátké napěťové pulzy, které jsou větší než 150 mV. Pakliže se změni orientace magnetizace, dojde ke změně protékajícího proudu. Tím je prokázána změna magnetizace atomu a dosažení požadovaného stavu.

Poslední fází experimentu bylo nezávislé ověření, že se magnetické pole v okolí atomu holmia skutečně mění v závislosti na orientaci jeho spinu. K tomu slouží atom železa, který je umístěn v blízkosti atomu holmia. Při nenulovém externím magnetickém poli dochází u atomů železa k Zeemanově jevu – rozštěpení energetických hladin. K jeho vyvolání využili vědci externí pole o velikosti 100 mT, při kterém ke štěpení hladin již zřetelně dochází. Pokud přiblížíme hrot z rastrovacího tunelového mikroskopu a použijeme střídavý signál, jsme schopni odhalit rezonanční frekvence, které odpovídají jednotlivým energetickým hladinám. Tato fyzikální metoda se nazývá elektronová spinová rezonance rastrovacího tunelového mikroskopu (ESR-STM). Je-li velikost magnetického pole změněna vlivem působení pole zmagnetizovaného atomu holmia, dochází k posunu rezonanční frekvence, kterou jsme schopni metodou ESR-STM detekovat. Vědci touto metodou změřili, že velikost změny magnetického pole způsobená zmagnetizovaným holmiem je $(10,1 \pm 0,1)$ násobek elementárního magnetického kvanta (Bohrova magnetonu). To odpovídá změně rezonanční frekvence o 947 MHz.

Týmu z IBM se povedl i další experiment, při němž použili dva atomy holmia. Na obrázku (str. 295) můžeme vidět, že se podařilo detekovat posun rezonanční frekvence pro všechny čtyři možné kombinace magnetizace. Technicky jsme tedy schopni uložit i dva bity informace.

Vědci z IBM prokázali, že je možné magnetizovat jednotlivé atomy. Tím se otevírají zcela nové možnosti pro paměťová média. Pro představu můžeme uvést, že na pevný disk o velikosti kreditní karty by se vešla celá knihovna iTunes, která má více než 30 milionů písniček. Kdy se budou paměťová média na principu „1 bit – 1 atom“ konstruovat komerčně, nejsme zatím schopni říct, ale určitě se máme na co těšit.

■ Jakub Jirsa, 7. 4. 2017, AB 10/2017



Princip zápisu a čtení elektromagnetickou hlavou na magnetické médium. Zdroj: Computer Hope.