

# Spintronika dnes a zítra

Kdy zaujme své místo v elektronickém průmyslu?



V prvním ze dvou předchozích příspěvků na téma nanotechnologie (24/2004) se představil Czech Nanoteam, iniciativa českých vědců pro pokrok v nanovědách a nanotechnologiích. Autor naznačil problémy mikroelektroniky, které ji čekají při vstupu do éry nanoelektroniky. Druhý příspěvek (TT 1/2005) ukázal možné řešení, totiž využití křemíkových nanočástic v optoelektronice. Na rozdíl od běžného křemíku lze v nich, vzhledem k lokalizaci elektronů a děr v nepatrném prostoru s rozměry srovnatelnými s vlnovou délkou elektronů, dosáhnout vyzařování světla. Vlnová (kvantová) podstata pohybu elektronů byla zmíněna i v úvodní části v souvislosti s tunelováním elektronu mezi hrotem skanujícího mikroskopu a vzorkem. Obecně lze říci, že právě tento rys, tj. srovnatelnost vlnové délky elektronů s rozměry struktur, je charakteristický pro polovodičovou nanoelektroniku.

V tomto příspěvku se věnujeme dalšímu, nově se ustavujícímu oboru moderní elektroniky, spintronice. V širším slova smyslu sem spadají všechny jevy, ve kterých je informace přenášena nikoliv prostřednictvím elektrického náboje elektronů, nýbrž pomocí jejich spinu. Některé z těchto jevů, např. magnetický záznam informací a zobrazování metodou nukleární magne-

tu, uspořádány antiparalelně (ventil „zavřen“) a nejmenší když magnetické momenty všech vrstev míří stejným směrem (ventil „otevřen“).

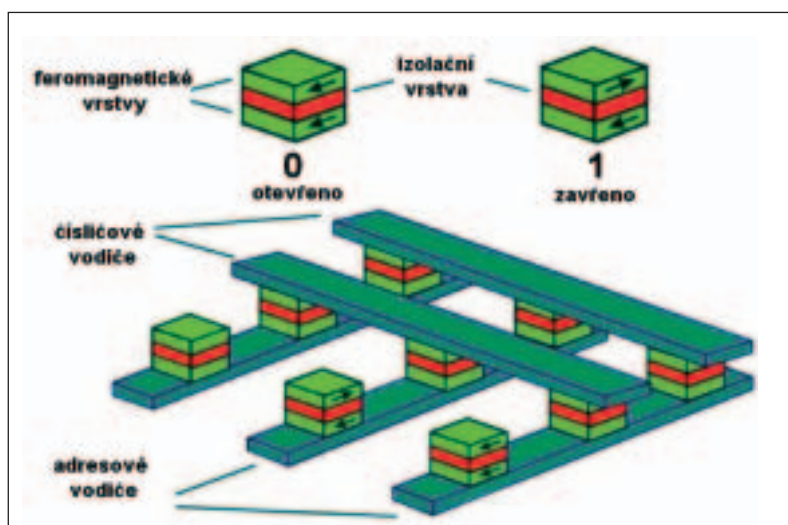
Ke změně magnetické konfigurace zde stačí velmi malá magnetická pole (několik Oe). Spinové ventily se dnes běžně používají ve čtecích hlavách pevných disků moderních počítačů a jejich vysoká citlivost umožnila dramaticky

stálém napájení, což si může připomínat každý, kdo netrpělivě čeká, až mu po zapnutí počítače „naběhne“ operační systém. Zásadní předností MRAM je permanentní uložení záznamu. V tomto ohledu jsou srovnatelné s elektrostatickými pamětmi typu Flash, které známe např. z mobilních telefonů, oproti nim však MRAM disponují až tisíckrát větší rychlostí zápisu. Vývoj MRAM již pokročil natolik, že nejméně dva přední výrobci - Motorola a IBM - plánovali zahájení jejich výroby v roce 2004.

## CO PŘINESE POLOVODIČOVÁ SPINTRONIKA?

Všechny dosud vyvinuté spintronicke součástky pracují s kovovými feromagnetickými materiály. To má řadu nevýhod, např. jejich obtížnou integraci do moderních elektronických obvodů založených na křemíku. Pokud by se podařilo nahradit kovové elektrody polovodiči obdobných magnetických vlastností, uplatnily by se takové součástky nejen při ukládání a čtení informací, ale i v řadě jiných aplikací, např. při převodu magnetické informace na optický signál. Magnetický stav některých polovodičů lze nepřímo ovládat přiložením elektrického pole či osvětlením, směr magnetizace lze měnit průchodem spinově polarizovaného proudu apod.

Také u zmíněných pamětí MRAM bychom uvítali, kdyby k přepnutí konfigurace elektrod tunelových spojů docházelo bez použití vnějšího magnetického pole. To vše polovodičová spintronika v principu nabízí, je však nejprve třeba např. objasnit fyzikální podstatu spinově závislého tunelování a nalézt nejvhodnější polovodičové materiály, použitelné i za pokojových teplot.



Obr. 1: Schéma magnetických tunelových spojů (nahore) a jejich uspořádání v magnetických pamětech MRAM. Jednotlivé spoje submikronových rozměrů jsou propojeny vodivými drahami, které umožňují zápis i čtení informace

tické rezonance v lékařství našly praktické uplatnění dávno předtím, než se pojem spintronika vůbec objevil.

## SPINOVÉ VENTILY

Jistě jste si všimli jak v posledních letech vzrostla kapacita pevných disků v počítačích. Nyní se běžně udává v gigabytech místo megabytů, tj. v jednotkách tisíckrát větších než dříve, a přesto jejich cena zůstala v podstatě stejná. Takto potichu a nenápadně vstoupila spintronika do našeho každodenního života. Za to může objev gigantické magnetorezistence (GMR - Giant Magnetoresistance) magnetických multivrstev v roce 1988.

Magnetismus v běžných feromagnetických kovech, jako je železo nebo kobalt, těsně souvisí s vlastním rotačním momentem elektronů - spinem - a s ním spojeným magnetickým momentem. Spin přitom může mít pouze dvě hodnoty, nahoru a dolů. V nemagnetických kovech je elektronů s oběma orientacemi stejně. Ve feromagnetických kovech jedna orientace převažuje a určuje kde bude mít magnet severní a jižní pól. Zapisovací hlava v magnetických záznamových zařízeních lokálně přepólovává magnetické médium.

Moderní čtecí hlavy získávají záznamované informace měřením změny odporu (magnetorezistence) čidla pohybujícího se v magnetickém poli nad médiem. Je zřejmé, že rozlišovací schopnost celého zařízení podstatně závisí na citlivosti čidla, tj. na tom jak velká změna odporu odpovídá dané změně magnetického pole. A právě zde bylo dosaženo podstatného pokroku zavedením čidel z magnetických multivrstev, tak zvaných spinových ventilů, v nichž se pravidelně střídají vrstvy feromagnetických a normálních (nemagnetických) kovů. Odpor takové multivrstvy je největší pokud jsou magnetické momenty sousedních feromagnetických vrstev

zvýšit hustotu záznamu, která v dnešních prototypch dosahuje hodnot cca 15 Gbit/cm<sup>2</sup>.

## MAGNETICKÉ TUNELOVÉ SPOJE A PAMĚTI TYPU MRAM

K dosažení ještě vyšších hustot záznamu však bude patrně třeba využít spintronicke součástek jiného typu, tzv. magnetických tunelových spojů. I zde jde o výraznou změnu odporu v závislosti na magnetické konfiguraci, na rozdíl od spinových ventilů se však měří odpor při průchodu proudem kolmo na rozhraní mezi dvěma feromagnetickými vrstvami (elektrodami) a velmi tenkou izolační vrstvou, která je odděluje (viz horní část obr. 1).

Existence měřitelného proudu je důsledkem kvantového procesu tunelování, jehož pravděpodobnost závisí na orientaci spinu tunelujících elektronů. Každý takový spoj může uchovávat 1 bit informace a jejich propojením do dvourozměrného pole, jak je naznačeno ve spodní části obr. 1, vzniká nový typ magnetické paměti, označované zkratkou MRAM (Magnetic Random Access Memory).

Jednotlivé spoje submikronových rozměrů jsou propojeny vodiči, které umožňují jak „čtení“ (tj. měření napětí na jednotlivých spojech), tak i „zápis“ (změnu magnetické konfigurace daného spoje prostřednictvím lokálního magnetického pole generovaného proudem ve vodičích). Pro pamětníky dodáváme, že stejný princip zápisu a čtení používaly feritové paměti na počátku počítačové éry ([http://wikipedia.info/star.cz/m/ma/magnetic\\_core\\_memory.html](http://wikipedia.info/star.cz/m/ma/magnetic_core_memory.html)).

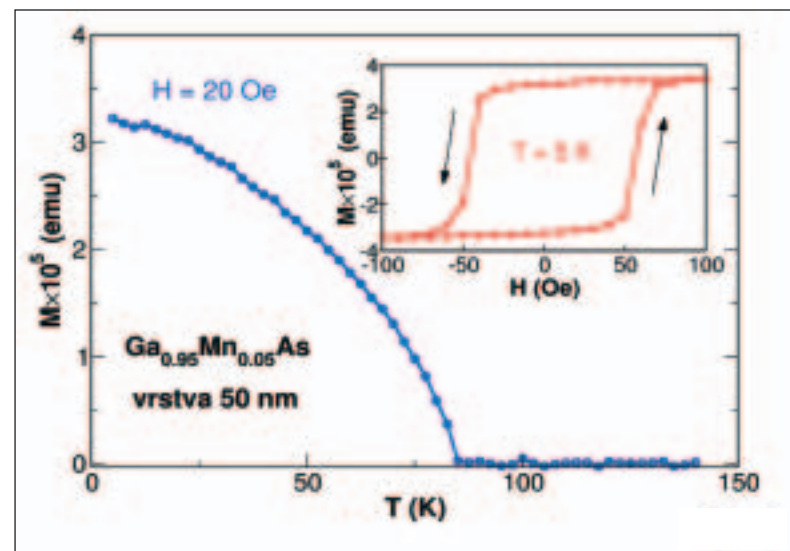
Očekává se, že dnes vyvíjené paměti MRAM dosáhnou hustoty záznamu i přístupových časů srovnatelných s polovodičovými pamětmi dnešních počítačů (DRAM, SRAM). Tyto součástky však uchovávají informaci pouze při

## ZŘEDĚNÉ MAGNETICKÉ POLOVODIČE - CO SE NÁM UŽ PODARIL

Do výzkumu zředěných magnetických polovodičů se již od samého počátku velmi úspěšně zapojili i pracovníci Fyzikálního ústavu AV ČR a někteří z nás stáli u samých počátků oboru. Největšího pokroku jsme zatím dosáhli v teoretické práci, kde lze rychle reagovat na bouřlivý vývoj bez vynaložení značných finančních prostředků. Jedním z našich příspěvků je i vytvoření a průběžná aktualizace databáze výzkumu feromagnetických polovodičů,

MBE (epitaxe z molekulárních svazků) nebo MOVPE (epitaxe z par metalorganických sloučenin). Klíčovým problémem je zde velmi omezená rozpusťnost Mn v mřížce GaAs a s tím související tendence iontů Mn k nežádoucímu shlukování, pokud zachováme podmínky růstu optimální pro samotný GaAs. Je tedy třeba hledat vhodný kompromis, podrobit vrstvy následnému žhání za účelem potlačení defektů mřížky atd.

Naštěstí ani v přípravě a experimentálním zkoumání nemusíme zůstávat



Obr. 3: Charakteristiky jedné z prvních feromagnetických vrstev (GaMn)As, vypěstovaných v Praze metodou MBE. Teplotní závislost magnetizace  $M$  určuje hodnotu Curieovy teploty  $T_C \approx 200^\circ\text{C}$ , vložený obrázek ukazuje hysterézní smyčku  $M(H)$ , typickou pro feromagnetické materiály

ve spolupráci s řadou renomovaných pracovišť v zahraničí a která je dostupná na webové stránce <http://unix12.fzu.cz/ms/index.php>.

Nejlépe prozkoumaným zástupcem této třídy materiálů je (GaMn)As - arsenid galia dopovaný několika procenty magnetických iontů manganu. Feromagnetické uspořádání iontů Mn v mřížce GaAs je zprostředkováno pohyblivými nositeli náboje, jejichž koncentraci - a tím i magnetické vlastnosti materiálu - lze ovládat jak technologií přípravy, tak i vnějšími parametry experimentu, konkrétně hradlovým napětím nebo osvětlením. Bohužel, feromagnetický stav zaniká při teplotách  $T > T_C$  a i dnešní „rekordní“ hodnota Curieovy teploty  $T_C \approx 100^\circ\text{C}$  leží stále hluboko pod pokojovou teplotou, potřebnou pro praktické aplikace.

Tato situace je dnes hlavní výzvou pro technologii přípravy vrstev (GaMn)As; zdá se totiž, že neexistuje žádné teoretické omezení hodnoty  $T_C$ . Výzkum probíhá nejčastěji na velmi tenkých epitaxních vrstvách (GaMn)As (tloušťky pod 100 nm), pěstovaných na podložkách z GaAs technologiemi

v roli pasivních čekatelů na výsledky dosažené jinde.

Ve Fyzikálním ústavu AV ČR máme v provozu obě zmíněné technologie přípravy tenkých epitaxních polovodičových vrstev a dostatek zkušeností s přípravou polovodičových nanostruktur. První vzorky s dvojrozměrným elektronovým plynem, vhodné pro měření kvantového Hallova jevu, jsme připravili již v roce 1990. Proto jsme se také mohli podílet spolu s Českým metrologickým institutem na zavádění kvantového Hallova jevu jako standardu elektrického odporu a v této spolupráci pokračujeme dodnes.

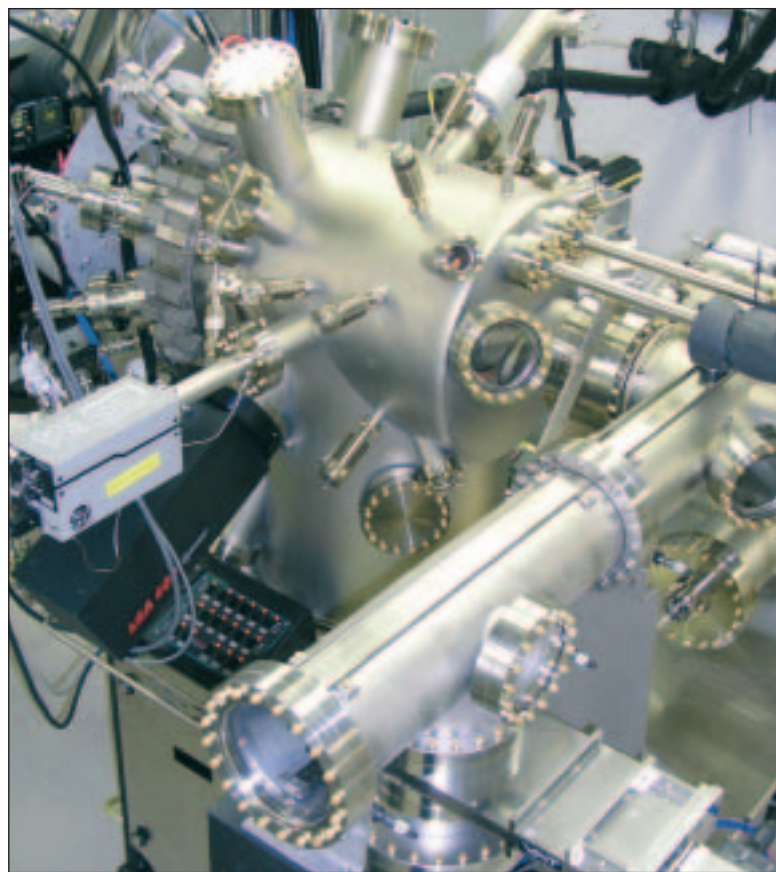
Díky velkorysosti a pochopení vedení Fyzikálního ústavu AV ČR a zvláště pak vedení Akademie věd ČR jsme mohli počátkem roku 2004 instalovat a uvést do provozu novou špičkovou aparaturu MBE (viz obr. 2), od počátku orientovanou na růst magneticky uspořádaných vrstev (GaMn)As. Graf na obr. 3 ukazuje jeden z prvních výsledků tohoto úsilí - teplotní závislost magnetizace vrstvy s 5% Mn, o tloušťce 50 nm, měřené v magnetickém poli  $H = 20$  Oe. Vložený graf představuje hysterézní smyčku, naměřenou na této vrstvě při teplotě  $T = 5$  K a dokazující, že jde skutečně o feromagnetickou látku. To je sice jen první krůček na cestě k prakticky použitelné spintronicke součástce, ovšem zařadili jsme se tím mezi přední laboratoře ve světě, které tuto nesnadnou a nákladnou technologii zvládnou.

## KAM KRÁČÍŠ, SPINTRONIKO?

Ačkoliv je (GaMn)As nejvíce studovaným a svým způsobem modelovým materiálem, není zdaleka jediným kandidátem na magnetický polovodič, použitelný za pokojové teploty v praktických aplikacích. Slibně se jeví manganem dopované nitridy, naděje vkládáme i do některých oxidových polovodičů. S těmito materiály se již např. podařilo prokázat, že je možno v polovodičových heterostrukturách pracovat se spinově polarizovanými proudy a převádět spinovou informaci na optický nebo elektrický signál.

Až se zvládne technologie přípravy struktur, které si i za pokojové teploty zachovávají současně feromagnetické vlastnosti i schopnosti typické pro moderní nemagnetické polovodiče, bude moci polovodičová spintronika zaujmout důležité místo v elektronickém průmyslu. Očekává se, že by to mohlo nastat už v příštím desetiletí a přispívají k tomu i členové Czech Nanoteamu ve Fyzikálním ústavu AV ČR. ●

ING. LUDVÍK SMRČKA, DRSc.  
ING. PAVEL SVOBODA, CSC.  
FYZIKÁLNÍ ÚSTAV AV ČR, PRAHA



Obr. 2: Část aparatury MBE, instalované ve Fyzikálním ústavu AV ČR. Obrázku dominuje růstová komora, kde jsou v ultravysokém vakuu pěstovány epitaxní tenké vrstvy (GaMn)As na podložkách z krystalického GaAs