Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Ladislav Havela

Obří magnetorezistence a Nobelova cena za fyziku

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 53 (2008), No. 1, 1--6

Persistent URL: http://dml.cz/dmlcz/141833

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 2008

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.

This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* http://project.dml.cz

Obří magnetorezistence a Nobelova cena za fyziku 2007

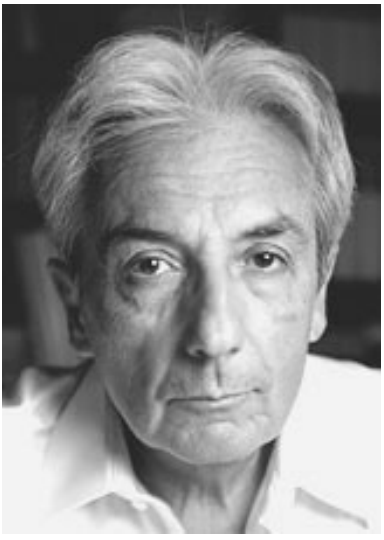
Ladislav Havela, Praha

Oznámení laureátů Nobelovy ceny je vždy na podzim očekáváno s jistým napětím. Nejinak tomu bylo i v roce 2007, přestože jména laureátů, Petera Grünberga z Výzkumného centra v Jülichu a Alberta Ferta z Univerzity Paris-Sud v Orsay, již jakoby „visela“ ve vzduchu po několik let. Jedním z důvodů je to, že ještě nikdy v historii nedošlo k tak rychlému masivnímu nasazení nového objevu základního výzkumu v technické praxi.

Jde o objev obří magnetorezistence, dnes obvykle nazývaný GMR (Giant magnetoresistance) efekt, jehož první demonstrace na umělých vrstevnatých strukturách byly provedeny nezávisle týmy vedenými oběma laureáty v polovině 80. let 20. století. Když v roce 1995 vznikal článek [1], ve kterém jsem srovnával obří magnetorezistenci takových umělých struktur s ještě výraznějšími efekty, které jsme pozorovali na přirozeně vrstevnatých kovových krystalech některých magnetických sloučenin, praktické aplikace se objevovaly spíše ve větách s časem budoucím. To se změnilo ještě před přelomem tisíciletí, kdy aplikace GMR čtecích hlav umožnila výrazně zvyšovat hustotu magnetického záznamu.

V čem tedy jev obří magnetorezistence spočívá? Důležitým prvkem je zjištění (experimentálně prokázáno Grünbergem v roce 1986), že jsou-li feromagnetické vrstvy např. železa separovány vrstvou nemagnetického kovu, je výměnná interakce mezi magnetickými vrstvami zprostředkována magnetickou polarizací indukovanou v nemagnetickém materiálu. Jde o analogii nepřímé výměnné interakce magnetických momentů v lanthanoidech — zde magnetické momenty 4f elektronů, jež jsou lokalizovány hluboko uvnitř vlastních atomů, vzájemně interagují prostřednictvím spinové polarizace vodivostních elektronů, které jsou vždy v kovech přítomny. A stejně jako v této tak zvané RKKY interakci, jejíž znaménko osciluje jako funkce vzdálenosti, má i interakce mezi feromagnetickými vrstvami tendenci k oscilaci v závislosti na tloušťce nemagnetické mezivrstvy. Je-li znaménko pro jistou tloušťku negativní, je výsledná interakce antiferomagnetická, tzn. že magnetizace feromagnetických vrstev se snaží nastavit vůči sobě antiparalelně. Interakce je však poměrně slabá, může být proto lehce překonána. Aplikujeme-li magnetické pole, magnetizace, které byly orientovány proti směru pole, se postupně stáčejí, až je dosažen stav se všemi magnetizacemi uniformně podél směru pole.

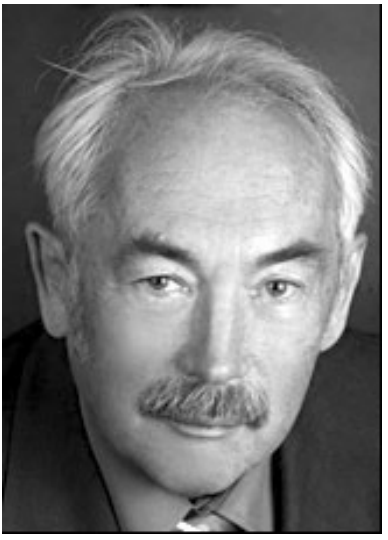
Doc. RNDr. Ladislav Havela, CSc., Matematicko-fyzikální fakulta UK, Ke Karlovu 5, 120 00 Praha 2, e-mail: `havela@mag.mff.cuni.cz`.



Albert Fert (narozen 7. 3. 1938 v Carcassone ve Francii). Vystudoval École Normale Supérieure v Paříži. V roce 1970 získal titul Ph. D. na Université Paris-Sud, kde působí dodnes jako profesor a ředitel pro výzkum společné laboratoře CNRS (francouzská národní výzkumná organizace) a Thales Group, významné francouzské firmy zabývající se elektronikou.

Druhou ingrediencí objevu je pak zjištění, že elektrický odpor takových vrstevnatých systémů závisí na vzájemné orientaci magnetizací sousedních magnetických vrstev. Je-li orientace antiparalelní, je odpor vysoký. Při stáčení do stejného směru ale odpor dramaticky klesá a tento pokles představuje desítky procent při dosažení paralelní orientace. Proto magnetorezistivní senzor v čtecí hlavě výrazně reaguje na magnetické pole velmi malých magnetických částic v magnetických discích, a umožňuje tak zvyšovat hustotu záznamu nutnou pro disky sahající do terabytových výšin. Zajímavé je, že odpor je vzájemnou orientací magnetizace ovlivňován i v případě, že proud teče jakoby podél vrstev; i v této tzv. CIP (current in plane) geometrii je náboj přenášen z velké části elektrony pohybujícími se šikmo a protínajícími jednotlivá rozhraní. V geometrii CPP (current perpendicular to plane), ve které elektrony protínají rozhraní častěji, je však efekt pochopitelně výraznější.

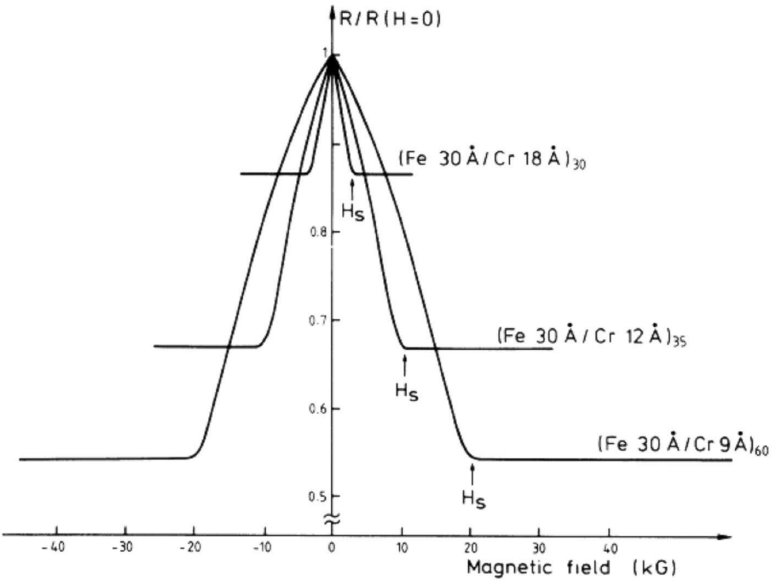
Vlastní mechanismus spinově závislého rozptylu, který zajišťuje, že elektron registruje směr magnetizace vrstvy, ve které se pohybuje, byl předmětem studia A. Ferta od konce 60. let [2,3]. Objevil se zde, zatím v kontextu normálních feromagnetických slitin, pojem spinově závislých proudů, tj. rozdělení celkového elektrického proudu na dvě složky, se spinem nahoru a dolů. Rozptylový potenciál působící na elektrony je odlišný, díky opačnému znaménku výměnné interakce pro rozptyl na magnetických atomech se spinem paralelně či antiparalelně vůči spinu vodivostního elektronu [1]. Od poloviny 80. let pracuje A. Fert na multivrstvách, a díky svým zkušenostem se spinově polarizovaným transportem se orientuje na elektronový transport v multivrstvách. Brzy si uvědomuje, že kdyby byla možnost přepínat relativní orientaci sousedních magnetických vrstev, získali bychom magnetorezistenční efekt neobvyklých rozměrů. Tato možnost se skutečně objevila s Grünbergovým objevem antiferomagnetické interakce v magnetických multivrstvách [4]. V roce 1988 pak Fert se svými spolupracovníky skutečně jev obří magnetorezistence (pokles odporu byl bezprecedentních 50 %) pozorovali na Fe/Cr multivrstvách [5]. Nezávisle na nich postupoval i P. Grünberg,



Peter Grünberg (narozen 18. 5. 1939 v Plzni v protektorátu Čechy a Morava). Poté, co byl po válce se svými rodiči odsunut, studoval v Německu, na Univerzitě Johanna Wolfganga Goetha ve Frankfurtu a na Technice v Darmstadtu, kde získal v roce 1969 titul Ph. D. Největší část jeho kariéry je spojena s působením ve Výzkumném centru Jülich, kde působil až do svého penzionování v roce 2004.

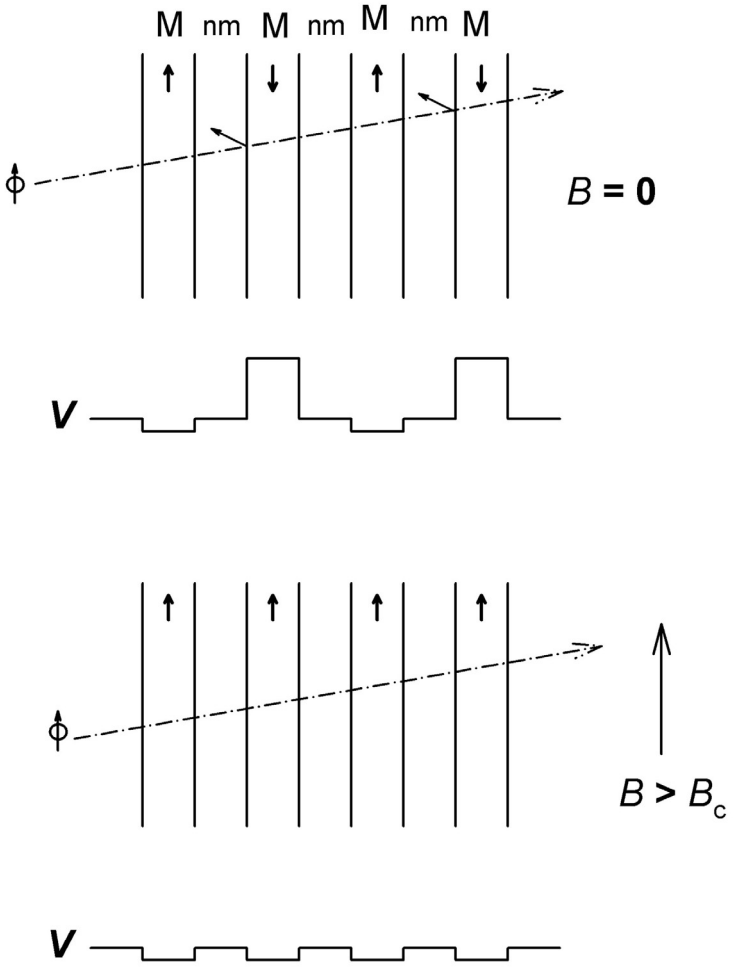
který své výsledky publikoval v roce 1989 [6]. Byl tedy Grünberg „až druhý“? Ne v každém ohledu. Zatímco A. Fert se věnoval vysvětlování jevu obří magnetorezistence v odborných časopisech, P. Grünberg si okamžitě uvědomil možnosti technických aplikací a požádal o udělení patentů. Již v roce 1988 v Německu (patent DE 3820475), pak v Evropě (0346817) a pak i v USA (4,949,039).

K detailnímu popsání GMR efektu bylo vypracováno několik přístupů. Na některých z nich se přímo podílel i A. Fert. Nejjednodušší představa je založena právě na existenci dvou paralelně běžících elektrických proudů, každý pro jednu orientaci spinu [1]. Jsou-li směry magnetizace magnetických vrstev alternující (tedy při antiparalelní vzájemné orientaci sousedních vrstev), každý elektron je silně rozptylován na vrstvách s opačnou orientací magnetizace a odpor obou hypotetických proudových větví je stejný. Dojde-li pod vlivem pole ke stočení magnetizací do jednoho směru, jeden druh elektronů (ten se spinem orientovaným opačně, než je směr pole) je rozptylován na vrstvách s opačně orientovanou magnetizací, kterých je nyní ještě více než ve stavu bez pole. Avšak pro elektrony běžící v druhém kanále, se spinem orientovaným podél směru magnetického pole, je cesta snazší. Ty nepotkají silně rozptylující vrstvy s opačně orientovanou magnetizací vůbec, rozptyl je tudíž minimální, příslušný elektrický odpor také. Podle sčítání odporů ve dvou paralelních větvích — sčítají se obrácené hodnoty — se také výrazně sníží odpor celkový. Platnost tohoto modelu předpokládá, že tzv. délka spinové difuze (spin diffussion length) je podstatně větší než střední volná dráha elektronů. Tedy že vodivostní elektrony mohou být několikanásobně rozptylovány, aniž se změní orientace jejich spinu. Pro vrstevnaté struktury musí samozřejmě platit i to, že délka spinové difuze je o dost větší než tloušťka jednotlivých vrstev. Tento model vysvětluje, proč musí jít o vrstvy velmi tenké (dalším důvodem je i nutnost nenulové interakce přes nemagnetickou vrstvu) a proč celý efekt záleží na počtu vrstev. Multivrstvy s mnohonásobným opakováním jsou výkonnější než jednoduché sendviče, zvané také spinové ventily. Charakteristická velikost takových struktur musí být v řádu nanometrů.



Obr. 1. Ukázka prvních výsledků měření elektrického odporu v závislosti na magnetickém poli pro několik různých multivrstev Fe/Cr, tak jak byly publikovány v článku [5]. Pro každou multivrstvu je zde elektrický odpor normalizován na hodnotu v nulovém poli.

Realizace a praktická aplikace jevu obří magnetorezistence na magnetických multivrstvách by byla nemyslitelná bez rozvoje precizních nanotechnologií, zejména metod depozice vrstev pomocí epitaxe z molekulárních svazků nebo naprašování. Např. existence defektů typu můstků mezi dvěma feromagnetickými vrstvami nedovoluje dosáhnout antiparalelního uspořádání, což klade na skutečně funkční jednotky náročné podmínky. Během několika let ale tato technologie vyzrála natolik, že poskytuje v současnosti nejvyšší komerčně dostupné hustoty záznamu, převyšující 30 gigabitů na cm^2 při čtecích rychlostech 10^9 bit/s. Je to právě velká citlivost magnetorezistivní čtecí hlavy ke změnám magnetického pole, která umožňuje výrazně zmenšovat jednotlivé zmagnetované oblasti na povrchu disku, které představují jednotlivé bity informace. Taková hustota záznamu je stále ještě o několik řádů nižší, než je dosud maximální předvedená hustota záznamu, který se skládá z atomů křemíku rozmístěných na povrchu zlata ve stopách, které mají šířku 5 atomů. Takový záznam, který dosahuje hustoty 40 terabitů/cm^2, lze však vytvářet a číst pouze rastrovacím tunelovacím mikroskopem, a rychlost čtení je neprakticky nízká, pouhých 100 bit/s [7]. Co se týká záznamu na magnetickém principu, zdá se, že hlavním limitujícím faktorem nejsou spolehlivé čtecí hlavy, ale stabilita magnetizace záznamu. Jsou-li feromagnetické částice příliš malé, tepelné fluktuace již mohou magnetizaci překlopit. Nadějí je přejít na magnetická média s tak exotickými složkami, jako je např. uran, který může přispět extrémně vysokou magnetickou anizotropií, zajišťující větší odolnost vůči tepelným fluktuacím.



Obr. 2. Interakce vodivostního elektronu (jeho trajektorie znázorněna čerchovaně) s magnetickou multivrstvou, ve které alternují vrstvy magnetické M a nemagnetické nm, a to pro spin elektronu orientovaný nahoru. Stav bez pole je nahoře, stav v magnetickém poli dole. V obou případech je znázorněn také potenciál V, který na elektron působí. Je-li směr magnetizace jednotlivé vrstvy totožný s orientací spinu elektronu, potenciál působící na elektron se snižuje o energii výměnné interakce. Je-li směr opačný, tato výměnná energie potenciál zvyšuje. Pak elektron musí překonávat vysoký potenciálový val, na němž je silně rozptylován. Pro elektrony se spinem ve směru pole se při orientaci magnetických vrstev ve stejném směru tento silný rozptyl eliminuje a odpor klesá. Pro elektrony se spinem opačným (ty na obrázku nevidíme) se samozřejmě rozptyl zesiluje (silně rozptylujících rozhraní je dvojnásobný počet), ale kanál s nízkým odporem dominuje podle principu sčítání paralelně zapojených odporů. Efekt je nejvyšší, pokud potenciál elektronů v nemagnetické vrstvě je co nejbližší hodnotě potenciálu v magnetické vrstvě pro jeden směr magnetizace. Této podmínky lze dosáhnout vhodnou kombinací obou materiálů, tj. tak, aby rozdíl potenciálů obou kovů (bez výměnné interakce) byl právě kompenzován výměnnou energií.

Zůstane hlavní použitelnost obří magnetorezistence v oblasti magnetického záznamu? Předpokládá se, že zdaleka ne. Je základem nového typu elektroniky, zvaného spintronika. Ta využívá spinu elektronu, ne pouze jeho náboje jako elektronika klasická. Zde je však ještě třeba udělat velký skok kupředu. Materiály, které by byly současně feromagnety i polovodiči s vhodnými parametry, jako je např. GaAs substituovaný manganem – (Ga,Mn)As – zatím dosahují Curieovy teploty T_C nižší než 200 K [8]. Zajímavým objevem je však to, že spinově polarizovaný elektrický proud protékající magnetickou multivrstvou působí na magnetické vrstvičky tak velkým točivým momentem, že může magnetizaci přetočit do opačného směru. Tato schopnost proudu zapisovat magneticky kódovanou informaci bez použití magnetického pole (označuje se jako Spin Transfer Torque) umožňuje vznik nového typu pamětí MRAM (Magnetic Random Access Memory), jejichž funkční vzorky již existují (tento typ se někdy nazývá SPRAM), či jakýchsi univerzálních procesorů. Udělení Nobelovy ceny fyzikům Fertovi a Grünbergovi (kteří mimochodem získali, společně se Stuartem Parkinem z IBM, již i prestižní Hewlett-Packard Europhysics Prize za rok 1997) je nejen oceněním přínosu obou výzkumníků, ale i připomenutím veřejnosti, že např. za možnost hrát stále realističtější počítačové hry je třeba děkovat něčemu tak zvláštnímu, jako je základní výzkum a kvantové materiálové inženýrství.

Literatura

[1] Havela, L.: *Obří magnetorezistence.* PMFA *40* (1995), 297–306.

[2] Fert, A., Campbell, I. A.: *Two-Current Conduction in Nickel.* Phys. Rev. Lett. *21* (1968), 1190–1192.

[3] Fert, A., Campbell, I. A.: *Electrical resistivity of ferromagnetic nickel and iron based alloys.* J. Phys. F *6* (1976), 849–871.

[4] Grünberg, P., Schreiber, R., Pang, Y., Brodsky, M. B., Sowers, H.: *Layered Magnetic Structures: Evidence for Antiferromagnetic Coupling of* Fe *Layers across* Cr *Interlayers.* Phys. Rev. Lett. *57* (1986), 2442–2445.

[5] Baibich, M. N., Broto, J. M., Fert, A., Nguyen Van Dau, F., Petroff, F., Eitenne, P., Creuzet, G., Friedrichs, A., Chazelas, J.: *Giant Magnetoresistance of* (001)Fe/(001)Cr *Magnetic Superlattices.* Phys. Rev. Lett. *61* (1988), 2472–2475.

[6] Binasch, G., Grünberg, P., Saurenbach, F., Zinn, W.: *Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures with antiferromagnetic interlayer exchange.* Phys. Rev. B *39* (1989), 4828–4830.

[7] Himpsel, F. J.: „Nanoscale Memory“. `http://uw.physics.wisc.edu/~himpsel/memory.html`

[8] Ohno, H.: *Making Nonmagnetic Semiconductors Ferromagnetic.* Science *281* (1998), 951–956.