

SEKCE FYZIKY KONDENZOVANÝCH LÁTEK

Milada Glogarová, Jan Petzelt



Historie různých oddělení nyní soustředěných do Sekce fyziky kondenzovaných látek je poměrně komplikovaná a je spjata s postupným vývojem Fyzikálního ústavu od jeho založení do dnešní podoby.

Sekce vznikla v r. 1990 jako část pracoviště Fyzikál-

ního ústavu Na Slovance zabývající se problematikou pevných látek a kapalných krystalů. V současnosti je tvořena šesti odděleními: magnetismu, dielektrik, kovů, teoretickým, chemickým a nízkých teplot.

Problematika magnetismu a dielektrik byla studována již v Laboratoři pro experimentální a teoretickou fyziku, která vznikla v roce 1952. Tato laboratoř se stala zárodkem Fyzikálního ústavu, který byl v rámci Akademie věd založen o rok později. V nově vzniklém ústavu byla problematika magnetismu a dielektrik rozdělena do samostatných

oddělení a postupně vznikala i oddělení další. V roce 1954 vzniklo Oddělení výbojů v plynech (předchůdce dnešní Sekce výkonových systémů), dále roku 1955 Oddělení luminiscence a chemie, roku 1956 Oddělení vysokých energií a elementárních částic (nyní Sekce vysokých energií) a roku 1957 Oddělení mechanických vlastností pevných látek (nyní Oddělení kovů).

V šedesátých let neměl ještě Fyzikální ústav vlastní budovu, byl dislokován na mnoha pracovištích a různé části se často přemísťovaly. V roce 1970 byla dokončena nová budova Na Slovance, do které se převážná většina oddělení nastěhovala. Tato budova je dodnes hlavním pracovištěm sekce.

Roku 1979 byl ústav sloučen s Ústavem fyziky pevných látek a Oddělením nízkých teplot, vyčleněným z Ústavu jaderné fyziky ČSAV v Řeži. V té době bylo rovněž zrušeno Oddělení luminiscence a založeno Oddělení teoretické.

Oddělení nízkých teplot, v druhé polovině devadesátých let přestěhované z Řeže do Prahy a dislokované na MFF UK v Tróji, bylo do sekce přičleněno v roce 2003.

V dalších kapitolách jsou jednotlivá oddělení popsána podrobněji.

MAGNETISMUS

Zdeněk Frajt, Miloš Jirsa, Luděk Kraus, Ivan Tomáš

Oddělení magnetismu je jedním ze zakládajících útvarů Fyzikálního ústavu. Po celou dobu existence se v jeho rámci vědeční pracovníci věnují fyzikálním jevům, ke kterým dochází v magneticky uspořádaných látkách. Mezi takové v první řadě počítáme látky silně magnetické, tzv. feromagnetika, např. železo. Ale patří sem také množství kovových slitin nebo oxidů magnetických kovů s širokým spektrem magnetických vlastností. Denně se s nimi setkáváme v nejrůznějších oblastech našeho života. Od malých feritových magnetů pro přidržení lístku s nákupem na ledničce doma v kuchyni přes veškeré druhy elektromotorů a transformátorů, všemožná komunikační zařízení včetně mobilních telefonů, mag-

netické karty bankomatů, až po paměťové vrstvy a senzory disků v počítačích a serverech internetu.

K poznávání magnetických vlastností a projevů různých látek a pro hledání ještě lepších magnetických materiálů než jsou ty, které máme doposud k dispozici, se používá široká škála metod měření a výpočtů. V hrubých rysech můžeme tyto metody rozdělit na vysokofrekvenční a kvazistatické. V oddělení magnetismu jsou obě tyto kategorie zastoupeny: existuje zde dlouhá tradice studia feromagnetických látek pomocí vysokofrekvenční feromagnetické rezonance, stejně jako kvazistatické zkoumání magnetizačních procesů těchto materiálů pomocí elektromagnetických indukčních i optických metod.

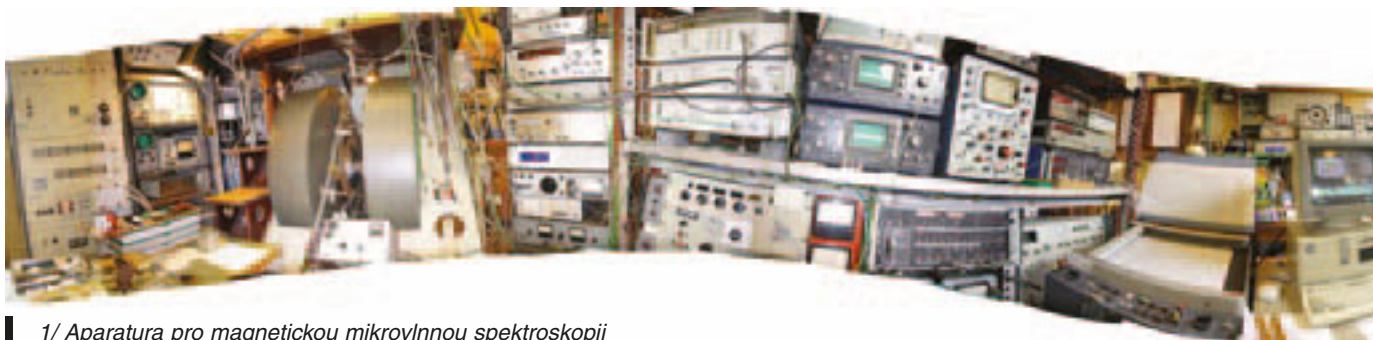
Feromagnetická rezonance je metoda studia feromagnetických látek, při které vzorek vložíme do statického magnetického pole a zároveň na něj působíme vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem [Z. Frait, D. Fraitová, NATO ASI Series 3, Kluwer Acad. Publ. (Dordrecht), **49**, 121 (1998)]. Velikostí intenzity statického pole pak „ladíme“ podmínky periodického pohybu „magnetických elektronů“ ve feromagnetiku tak, aby „rezonovaly“ na předem zvolené frekvenci, jinými slovy aby selektivně absorbovaly energii mikrovln daného kmitočtu. Z těchto měření získáváme řadu důležitých základních informací o veličinách popisujících feromagnetikum, např. hodnoty objemové magnetizace (míra vzájemné rovnoběžnosti magnetických atomárních momentů), g-faktoru (udává orbitální a spinový moment magnetických elektronů), relaxace (určuje limit rychlosti pohybu vektoru magnetizace). Pro vyhodnocení experimentů přitom používáme teorie šíření elementárních magnetických excitací, ke které pracovníci našeho oddělení podstatně přispěli.

Feromagnetická rezonance probíhá v mikrovlnné oblasti elektromagnetických vln o délce řádově cm až mm, tj. na kmitočtech 10 až 100 GHz. Ke generaci a transportu těchto vln jsou potřebné speciální elektronové či polovodičové zdroje a vlnovodná technika. Statická magnetická pole, ve kterých jsou zkoumané látky umístěny, jsou vytvářena elektromagnety nebo supravodivými magnety. Během řady let se podařilo vybudovat zařízení pokrývající rozsah kmitočtů od 8 do 108 GHz, statické magnetické pole do 3,1 T pro měření v teplotním rozsahu 3 až 600 K (viz digitálně „sešitý“ panoramatický snímek na obr. 1). Díky finančním prostředkům z AV ČR a z řady mezinárodních grantů dosáhlo zařízení světové úrovně zejména svým širokým kmitočtovým rozsahem. Digitálně řízená aparatura je často vyhledávána a využívána i předními zahraničními pracovníky a jejich studenty.

Metodika mikrovlnné spektroskopie, jejíž součástí je i feromagnetická rezonance, dovoluje charakterizovat a vyvíjet feromagnetické systémy pro elektroniku a v poslední době i pro nový obor, tzv. spintroniku, což je elektronika v magnetických

polích. V současné době vyvíjíme ve spolupráci s dalšími devíti evropskými laboratoři nanočásticová média, která dovolí až desetkrát zvýšit současnou hustotu záznamu informací (např. v pevných discích). Paralelně s touto experimentální činností pracujeme také na teoretických výpočtech, které modelují pozoruhodné konfigurace soustav atomárních magnetů ve vzájemně izolovaných magnetických objektech o velikosti nanometrů. V takto malých izolovaných částech feromagnetických materiálů, tzv. magnetických nanotečkách, se již nemohou vytvářet magnetické domény. Atomární magnetické momenty takových objektů jsou přesto vzájemně vázány feromagnetickou „výměnnou“ vazbou a vytvářejí neobvyklé singulární útvary [K. L. Metlov, Appl. Phys. Lett. **79**, 2609 (2001)].

Při studiu magnetizačních procesů feromagnetik je především nutno vycházet ze znalosti magnetického uspořádání těchto materiálů a jeho chování v situaci, kdy na feromagnetickou látku začne působit vnější magnetické pole. O tom se nejvíce dozvídáme ze studia změn velikosti, případně orientace tzv. magnetických domén. To jsou mikroskopické oblasti, ve kterých jsou všechny magnetické atomární momenty spontánně vzájemně uspořádány. Magnetizační proces feromagnetika postupuje plynulým nebo skokovým posuvem hranic domén s různými směry uspořádání, popřípadě natačením směru magnetizace v některých doménách, pod vlivem vnějšího magnetického pole. Právě „kolektivní“ vnitřní magnetické uspořádání a výše popsané reakce na vnější magnetické pole jsou výsadními vlastnostmi feromagnetik. Zároveň je to i důvod, proč jsou vlastnosti feromagnetik tak pozoruhodné a jejich reakce i na velmi slabá pole je tak výrazná. Průběh magnetizačního procesu jednotlivých feromagnetických látek zásadním způsobem ovlivňuje krystalová struktura, druh jejich skladebních atomů, typ a hustota případných poruch, mechanická pnutí, teplota, tvar a velikost vzorku, zkrátka kdeco. Vytváří se tak široký prostor pro hledání a přípravu „na míru šitých“ magnetických materiálů, u kterých některé vlivy posílíme a jiné zase potlačíme. Anebo naopak, můžeme určitou charakteristiku a její změny využít pro testování



1/ Aparatura pro magnetickou mikrovlnnou spektroskopii
(foto Meckenstock & Spoddig, Ruhr-Univ.-Bochum, Německo)

stavu běžných technických feromagnetických konstrukčních materiálů.

Pozoruhodnou myšlenkou, jak získat feromagnetika mimořádných vlastností, byl nápad potlačit jejich krystalovou strukturu a s ní spojené směrové vlastnosti i lokální strukturní poruchy. Vznikla tak nekystalická (amorfní), popř. velmi jemně krystalická (nanokrystalická) feromagnetika. Vzhledem k potřebě neustálé miniaturizace a zvyšování operační rychlosti moderních magnetických součástí dochází v poslední době k prudkému rozvoji tzv. nanostrukturovaných feromagnetik. Jedná se o celou řadu materiálů, od nanokrystalických kovů s magneticky měkkými nebo magneticky tvrdými vlastnostmi přes uspořádané soubory nanometrických teček pro záznamová media s vysokou hustotou zápisu až po složité vícevrstevné struktury pro spintroniku.

Historie nanostrukturovaných magnetických materiálů začala kolem roku 1988, kdy byl objeven zcela nový magneticky měkký materiál, známý jako Finemet. Tento materiál se skládá z železo-křemíkových krystalických zrn o velikosti 20-30 nm, vnořených do amorfnní matrice. Připravuje se rychlým zchlazením roztavené slitiny FeCuNbSiB vystříknuté na studený rotující měděný válec. Rychlost ztuhnutí taveniny je tak vysoká, že atomy kovu se nestačí uspořádat do pravidelné krystalové mřížky. Vynikající magneticky měkké vlastnosti jsou způsobeny extrémně nízkou magnetickou anizotropií a zanedbatelnou magnetostrikcí. Výzkum nanokrystalických magnetických materiálů v oddělení magnetismu byl zahájen záhy po objevení Finemetu. Strukturu vzorků kontrolujeme rentgenovou difrakcí a řadou magnetických metod (Mössbauerova spektroskopie, pozorování magnetických domén, měření hysterezních smyček atd.) a jejich magnetické vlastnosti dále zlepšujeme dodatečným tepelným zpracováním.

V roce 1998 jsme se začali zabývat studiem magnetických nanokompozitů nebo nanogranulárních látek. To jsou materiály, které obsahují velké množství feromagnetických kovových zrn velikosti několika nm rozptýlených v elektricky nevodivé matrici. Tyto materiály se vyznačují řadou zajímavých vlastností, například silnou závislostí elektrického odporu na magnetickém poli, tzv. obří magnetorezistencí. Nanokompozitní vrstvy se připravují technologií plazmové trysky, která byla vyvinuta v našem ústavu [L. Kraus, O. Chayka, J. Touš, F. Fendrych, K. R. Pirola, M. Šícha, L. Jastrabík, J. Magn. Mater. **226-230**, 669 (2001)]. Ionty pracovního plynu, vznikající v radiofrekvenčním výboji v duté katodě rozprašují materiál vnitřního povrchu katody (v tomto případě složené ze střídajících se kroužků Fe a Hf, respektive Ta). Rozprašený materiál trysky je unášen proudem plazmatu, reaguje s kyslíkem a usazuje se na podložce.



2/ Vysokovakuová plazmová tryska

Výsledky ukazují, že metoda plazmové trysky je pro přípravu nanogranulárních magnetických vrstev mimořádně vhodná (viz obr. 2).

Zcela opačným způsobem využívá závislosti magnetizačních procesů na struktuře, poruchách a mechanických pnutí původní metoda magnetického adaptivního testování feromagnetických materiálů, kterou v současné době v oddělení magnetismu vyvíjíme [Y. Melikhov, C. C. H. Lo, O. Perevertov, J. Kadlecová, D. C. Jiles, I. Tomáš, J. Phys. D: Appl. Phys. **35**, 413 (2002)]. Tato výzkumná metoda nehledá podmínky a nové materiály k tomu, aby proces magnetizace nabyl žádaných vlastností, ale naopak studuje procesy magnetizace na existujících a běžně používaných feromagnetických konstrukčních materiálech. Z detailů jejich průběhů se pak pokouší získat co nejúplnější odpověď o pnutích, struktuře, poruchách, korozi, mechanické únavě, zkrátka o postupující degradaci mechanických součástí průmyslových materiálů a zařízení. Testování je založeno na postupné střídavé magnetizaci zkoumaného vzorku magnetickým polem s amplitudou, která je cyklus po cyklu postupně zvyšována od nuly až po předem odhadnuté maximum. Zaznamenáváme přitom indukovaný napěťový signál, který obsahuje detailní popis celého komplikovaného magnetizačního procesu, včetně charakteristických změn odrážejících přítomnost poruch. Důležitým rysem testovací metody je její nedestruktivnost (měřeními nijak neporušíme celistvost zkoumaného vzorku) a její hlavní předností je adaptivnost, tedy optimální přizpůsobení měřené veličiny a rozsahu aplikovaných polí

zkoumanému druhu materiálu a právě studovanému degenerativnímu procesu. Důsledkem této adaptivnosti je pak selektivní citlivost měření a – srovnáme-li naše měření s tradičním způsobem magnetické charakterizace materiálů – velmi praktické a žádoucí snížení potřebné úrovně magnetizace vzorku pro jeho dostatečnou charakterizaci. Vývoj nedestruktivního magnetického adaptivního testování podnítl širokou mezinárodní spolupráci a opírá se o získané finanční grantové podpory.

Posledním okruhem výzkumů, které mají - pro leckoho možná překvapivě - velice blízko k problematice magnetizačních procesů ve feromagnetikách, je studium magnetických vlastností a magnetizačních procesů v supravodičích. Také vás přivádějí v úžas kouzelnické triky s levitací? Vznášet se volně ve vzduchu je fascinující. Kromě ptáků se však dnes může vznášet ve vzduchu třeba i magneticky levitující vlak. V Japonsku takový vlak dosáhl na testovací trati rekordní rychlosti 560 km/hod. Jeho klasické supravodivé cívky musejí být chlazeny drahým kapalným heliem (4,2 K). V Číně byla nedávno otevřena testovací trasa magneticky levitujícího vlaku využívajícího vysokoteplotních supravodičů. Jako chladivo mu tedy stačí mnohem levnější kapalný dusík (77 K).

S pozoruhodnou vlastností supravodičů vést za nízkých teplot beze ztrát obrovské elektrické proudy souvisí i možnost tyto proudy do supravodivého bloku vhodným procesem naindukovat a díky velmi vysokému magnetickému poli tohoto proudu tak vytvořit trvalý - permanentní magnet. Při magnetování vniká magnetické pole do supravodivého materiálu ve formě tzv. vortexů. To jsou jakési kapiláry o průměru několika nanometrů, nesoucí po jednom kvantu magnetického toku.

Abyste supravodič projevoval magnetické vlastnosti, je nutné uvnitř vzorku vytvořit co největší gradient magnetického pole, tedy hustoty vortexů. V tzv. supravodičích II. druhu je možné gradient vytvořit

zachycováním vortexů na poruchách supravodivé mříže. Čím efektivnější je upínání vortexů na poruchách, tím lepší je supravodivý permanentní magnet. Upínací schopnost poruch se mění s teplotou a velikostí vnějšího magnetického pole a charakter tokočar rovněž závisí na magnetickém poli, teplotě, typu materiálu i tvaru vzorku. Díky vrstevnaté struktuře kyslíčnickových, tzv. vysokoteplotních supravodičů se setkáváme i s dvourozměrnými vortexy, „koláčky“ svázanými mezi sebou relativně volně do řetězců. Ty pochopitelně interagují se záchytnými centry zcela jinak než vortexy ve formě tuhé dlouhé kapiláry. Popsat takové interakce teoreticky i experimentálně v celé šíři je velmi složitý úkol, na kterém spolupracujeme s řadou zahraničních pracovišť [V. Zablotskii, M. Jirsa, P. Petrenko, Phys. Rev. B **65**, 2245081 (2002)].

V poslední době se naše supravodivá skupina podílela na objevu velmi jemné upínací struktury ve formě lamel mezi hranicemi krystalového dvojčatění v supravodiči $(\text{Nd}_{0,33}\text{Eu}_{0,38}\text{Gd}_{0,28})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. Hranice dvojčatění představují téměř dokonalou překážku pro pohyb vortexů a ty se pak tedy mohou pohybovat jen podél těchto hranic. Pokud se mezi hranicemi vyskytuje další upínací struktura, dojde k omezení pohyblivosti i ve směru podélném a vortexy jsou znehybněny až do velmi vysokých magnetických polí. Nově objevené lamely představují rovinné sítě nanoskopických oblastí s chemickým složením slabě se lišícím od okolní supravodivé látky. Hranice použitelnosti supravodiče v magnetickém poli se vlivem této upínací struktury při 77 K posunula z 5 T až na 15 T.

Na všech výše uvedených aktivitách oddělení magnetismu Fyzikálního ústavu se mohou podílet a podílejí studenti jak z vysokých škol, tak i doktorandi z Čech i ze zahraničí. Velmi rádi mezi sebou uvítáme nové tváře, které zajímá výzkum perspektivních materiálů a metod pro budoucí nevídané aplikace.

DIELEKTRIKA

Jan Petzelt, Milada Glogarová

Vznik Oddělení dielektrik lze datovat již do října 1953. Tehdy se oddělení, čítající pouze dva začínající aspiranty Jana Fouska a Václava Janovce pod vedením pozdějšího profesora na MFF UK Josefa Beneše, začalo zabývat v té době novým a exotickým druhem dielektrik - feroelektrickými látkami. Tato tematika, navržená prof. Václavem Petržílkou,

se ukázala být velice zajímavá a různorodá a dominuje v oddělení až do dnešního dne.

Feroelektrický jev, tj. nenulová spontánní elektrická polarizace, kterou lze převracet vnějším elektrickým polem (tzv. přepolarizace), byl objeven už v roce 1920 americkým fyzikem českého původu Josephem Valaskem na krystalech Seignettovy soli.