

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Vladimír Kamberský; Pavel Šuda
Feromagnetické tenké vrstvy

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 8 (1963), No. 2, 57--71

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138544>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1963

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>

FEROMAGNETICKÉ TENKÉ VRSTVY

VLADIMÍR KAMBERSKÝ, PAVEL ŠUDA, Praha

ÚVOD

Historicky vznikl pojem tenké vrstvy pro vzorek, jehož tloušťka byla srovnatelná s vlnovou délkou viditelného světla. Pro optické vlastnosti je rozhodující poměr vzdálenosti obou povrchů k vlnové délce světla. Zkoumání dalších fyzikálních vlastností dává další speciální kritéria stejné kategorie, totiž srovnání tloušťky s některým fyzikálním parametrem (např. u elektrické vodivosti se střední volnou drahou elektronu v krystalu; kritéria související s magnetickými vlastnostmi poznáme v následujícím výkladu). Jiné obecné kritérium pro tloušťku, při které se očekávají změněné fyzikální vlastnosti, dává atomová struktura pevných látek. Je to taková tloušťka, při které počet atomů na povrchu vzorku není zcela zanedbatelný vůči počtu atomů uvnitř vzorku. Lze totiž očekávat, že atomy na povrchu, které nejsou zcela obklopeny atomy stejného druhu, budou k vlastnostem materiálu přispívat jinak než atomy uvnitř. V běžných krystalických látkách jsou meziatomové vzdálenosti okolo 3 Å ($= 3 \cdot 10^{-8}$ cm), takže pro vrstvy tloušťky desítek až stovek angströmů jsou jednotky až desítky procent atomů na povrchu nebo blízko povrchu.

Když ve dvacátých letech vznikla moderní představa o příčině feromagnetického stavu, podle které magnetické momenty atomů jsou spontánně orientovány do stejného směru vlivem kolektivní interakce celého ohromného množství atomů v krystalu, vznikla otázka, jak se bude měnit feromagnetický stav se zmenšováním rozměru krystalu a tím počtu interagujících atomů. Předmětem studia feromagnetismu je vedle interpretace feromagnetického stavu i vysvětlení způsobů přemagnetizace a existence i tvaru hysterezní smyčky. I v tomto oboru vedlo teoretické a experimentální zkoumání kompaktních materiálů k očekávání podstatných změn při zmenšování rozměrů vzorku.

Zatímco v dřívějších letech byly feromagnetické tenké vrstvy zajímavé svými specifickými vlastnostmi pouze z fyzikálního hlediska, objevily se v posledních letech možnosti technických aplikací. Feromagnetických elementů se užívá již dlouho v matematických strojích, které pracují ve dvojkové soustavě a jejichž základní operací je uchování nebo změna informace *ano* či *ne*. Tato informace je u relé vyjádřena stavem *sepnuto* či *rozepnuto*, u magnetického elementu v užším slova smyslu stavem *zmagne-*

továno jedním nebo opačným směrem. Tyto elementy jsou obecně rychlejší, menší a levnější; na základě předpovědí fyziků se očekávalo a v poslední době potvrdilo, že tenké feromagnetické vrstvy budou ještě menší, levnější a rychlejší než dosud běžně užívané feritové elementy. Při ověřování teoretických předpovědí se ukázaly odchylky v chování skutečných vrstev. To podnítilo rozsáhlý detailní výzkum způsobů přemagnetizace tenkých vrstev a jejich fyzikálních příčin, zejména struktury skutečných vrstev, i souvislosti struktury s magnetickým chováním na jedné straně a se způsobem přípravy na druhé straně.

K přípravě tenkých vrstev feromagnetických kovů, jejichž vlastnostmi se zabýváme v tomto článku, se používá prakticky tři způsobů, a to elektrolytického nanášení na vodivou podložku, kondenzace čistých par kovu vypařovaného ve vysokém vakuu na libovolnou podložku (krátce napařování), popřípadě kondenzace atomů uvolňovaných z katody při iontovém bombardování v elektrickém výboji v inertním plynu nebo v parách kovu na libovolnou podložku (krátce katodové napařování).

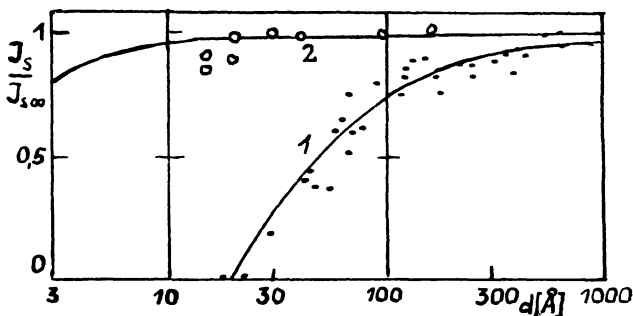
Podrobnější informace najde čtenář v knize MAYEROVĚ [1] a v novějším referátu [2], populární poučení o základních pojmech z oboru magnetismu v článku [3]. V prvním díle knihy [1] jsou popsány způsoby přípravy, měření tlouštěk a optické vlastnosti s odkazy na literaturu do r. 1950, ve druhém díle jsou obšírné informace o struktuře a elektrických vlastnostech a stručně údaje o magnetických vlastnostech s odkazy do r. 1955. Referát [2] shrnuje pouze výsledky studia magnetických vlastností do r. 1961. Počet publikací v oboru tenkých vrstev je v poslední době tak velký, že v době vyjití tohoto článku nebude ani citovaný referát dávat obraz o současném stavu výzkumu.

SPONTÁNNÍ MAGNETIZACE A STRUKTURA VRSTEV

Dnes je nesporně dokázáno, že feromagnetické látky jsou při teplotách nepřevyšujících jistou charakteristickou teplotu, zvanou Curieova, vždy spontánně zmagnetovány, tj. elementární magnetické momenty atomů jsou uspořádány do jednoho směru. V případě, kdy feromagnetické těleso se jeví navenek jako odmagnetované, je rozděleno v oblasti, zvané *domény*, zmagnetované homogenně, ale od domény k doméně různým směrem. Pod pojmem magnetický moment atomu zde rozumíme vlastní, tzv. spinový magnetický moment elektronu (který nesouvisí s pohybem elektronu); další magnetické momenty, jako je dráhový neboli orbitální moment elektronu, popřípadě magnetický moment atomového jádra, se neuplatňují při vzniku spontánní magnetizace. Příčinou rovnoběžného uspořádání spinů je jejich vzájemné působení, tzv. *výměnná interakce*. Poznamenejme, že výměnná interakce je zaváděna do teorie jako efektivní síla (elektrony se chovají, jakoby mezi nimi působily výměnné síly), ale ve skutečnosti je vzájemné působení spinů nepřímé a složité. Ze zákonů kvantové mechaniky vyplývá, že orientace spinů ovlivňuje prostorové rozložení elektronů a tím jejich elektrostatickou interakci. Výměnná interakce je tedy elektrostatického a nikoli

magnetického původu. Charakteristikou výměnných sil je, že to jsou síly krátkého dosahu, takže stačí uvažovat jen vzájemné působení sousedních atomů. Dokonale rovnoběžné uspořádání spinů by existovalo pouze při teplotě absolutní nuly (neuvažujeme-li působení vnějšího magnetického pole). Jinak brání uspořádání tepelný pohyb, což má za následek pokles velikosti spontánní magnetizace s rostoucí teplotou a její úplné vymizení při Curieově teplotě (magnetizaci definujeme jako magnetický moment objemové jednotky).

Vyjádření spinové interakce výměnnými silami, které se snaží paralelně uspořádat sousední spiny, dovoluje provést konkrétní výpočty energie spojené s porušením homogenity magnetizace. (Příkladem takové nehomogenity může být hranice dvou domén spontánní magnetizace, o které budeme mluvit v další kapitole.) Ukazuje se, že elementární nehomogenita způsobená tepelným pohybem má tvar rovinné vlny; taková nehomogenita se proto nazývá *spinová vlna*. Její chování je ve všech ohle-



Obr. 1. Závislost spontánní magnetizace na tloušťce vrstvy pro nikl při pokojové teplotě podle různých autorů.

dech analogické chování elementárních částic hmoty, a proto se zde, stejně jako i v jiných oborech fyziky pevné fáze, mluví o kvazičástici — *magnonu*. Použití metod statistické fyziky na spinové vlny umožňuje vypočítat závislost středního počtu spinových vln na teplotě a tím i teplotní závislost celkové (průměrné) spontánní magnetizace (Blochova teorie). Tato metoda se osvědčila pro nízké teploty, kdy celkové malé porušení dokonalého uspořádání lze s dostatečnou přesností považovat za prostou superpozici elementárních nehomogenit, bez započítání jejich vzájemného ovlivňování. Pro vysoké teploty se prakticky osvědčila historicky starší metoda tzv. molekulárního pole (Weissova), která párovou interakci sousedních spinů dále nahrazuje působením jistého efektivního magnetického pole na každý spin. Vliv porušení uspořádanosti je vyjádřen úměrností mezi tímto (v celém krystalu stejným) efektivním polem a celkovou spontánní magnetizací. Teplotní závislost spontánní magnetizace se vypočítá vyšetřením chování jinak nezávislých spinových momentů v efektivním molekulárním poli.

Obou těchto metod se použilo při teoretickém studiu změn spontánní magnetizace při zmenšující se tloušťce feromagnetické tenké vrstvy. Na vývoji teorie a paralelního experimentálního výzkumu ukážeme jejich vzájemné doplňování.

V první teoretické práci Kleina a Smitha z r. 1951 bylo použito metody spinových vln. Při tomto postupu se tloušťka vrstvy objevuje přirozeně v okrajové podmínce

pro šíření vln. Výsledná teoretická závislost spontánní magnetizace na tloušťce vrstvy jeví znatelný pokles spontánní magnetizace již při tloušťkách stovek angströmů (křivka 1 na obr. 1). Tato teorie předpovídá i pokles Curieovy teploty, ale nedává možnost rigorózně vypočítat její závislost na tloušťce vrstvy. Prakticky současně byly provedeny první experimenty, které byly v pozdějších letech několikrát opakovány různými autory a různými metodami na odlišně připravených vrstvách, a to s přibližně stejnými výsledky. Pro srovnání svých výsledků s teorií museli experimentátoři teoretické závislosti přizpůsobit pro vyšší teploty a dostali poměrně velmi dobrý souhlas (plné body na obr. 1).

V roce 1957 uveřejnil VALENTA v Čs. časopisu pro fyziku teorii spontánní magnetizace tenkých vrstev, která postupovala metodou molekulárního pole. Nepředpokládá však, že molekulární pole je v celé vrstvě stejné. Atomy na povrchu mají menší počet sousedů a jejich spiny jsou méně vázány výměnnými silami. Proto magnetizace a jí úměrné molekulární pole ubývá směrem k povrchu vrstvy. Výsledky byly podstatně odlišné a předpovídaly pokles spontánní magnetizace a také Curieovy teploty teprve u tloušťky desítek angströmů (křivka 2 na obr. 1). Rozdíl mezi výsledky své teorie a do té doby známými experimenty vysvětloval autor tím, že teorie platí pro ideální monokrystalické vrstvy, kdežto reálné experimentálně vyšetřované vrstvy jsou polykrystalické, ovlivněné podložkou a oxidací a obsahují pravděpodobně značné množství poruch krystalického uspořádání.

O dva roky později byly na konferenci v New Yorku předneseny výsledky měření spontánní magnetizace tenkých vrstev niklu, které byly napařeny a studovány ve velmi vysokém vakuu (lepší než 10^{-9} torr). Na těchto vrstvách nebyl zjištěn pokles spontánní magnetizace ani Curieovy teploty do tloušťky 27 Å (prázdné kroužky na obr. 1). Tento výsledek potvrzuje platnost Valentovy teorie. Obdobné výsledky byly krátce poté získány na železných vrstvách. V poslední době bylo ukázáno, že při korektnějším postupu, než byl původní dává teorie spinových vln obdobné výsledky jako teorie molekulárního pole.

Aby bylo možno vysvětlit diametrální odlišnost starších a nových experimentálních výsledků, je třeba si všimnout jednak podstatného rozdílu v uspořádání experimentů, jednak struktury reálných vrstev. V posledních několika letech rozvinutá technika velmi vysokého vakua snížila tlaky prakticky použitelné při napařování asi desetitisíckrát. Při tlaku 10^{-5} torr, ve kterém byly starší vrstvy napařovány, dopadají za vteřinu několik molekul plynu na každý atom povrchu vrstvy. Některé z těchto molekul se zachytí na povrchu; bylo zjištěno, že monomolekulární adsorbovaná vrstva se při tomto tlaku vytvoří již ve zlomku vteřiny. S klesajícím tlakem se úměrně zmenšuje počet dopadajících molekul a nepřímo úměrně prodlužuje doba, po kterou velká část povrchu zůstává čistá. Současně se v nových experimentech věnuje větší pozornost dokonalému odplynění podložky, a tím se snižuje možnost difúze nečistot do vrstvy. Vrstvy touto technikou připravené a ve vakuu studované jsou mnohem čistší a svou strukturou bližší ideálním vrstvám předpokládaným v teorii.

Specifickým rysem napařovaných a elektrolyticky nanášených tenkých vrstev je,

že začínají růst současně z velkého počtu kondenzačních center. Rostoucí krystality mohou proto dosáhnout jen velmi malých rozměrů, běžně stovek angströmů, což je o mnoho řádů méně než v polykrystalických materiálech. V místech srůstu zrn je krystalová mřížka porušena a již z tohoto důvodu obsahují tenké vrstvy nesrovnatelně více poruch než masivní materiály. Relativně velký povrch hranic zrn má i další důsledky. V porušených oblastech na hranicích zrn a v jejich okolí je pohyblivost vlastních i cizích atomů vyšší, jak vyplývá např. z měření rychlosti difúze. Ve vrstvách je tedy velká možnost znečištění difúzí podle hranic. Měření sorpce inertních plynů na tenkých vrstvách ukazuje, že zvláště při nízkých teplotách mají vrstvy efektivní povrchy uplatňující se při sorpci mnohokrát větší než vnější geometrický povrch. To svědčí o existenci vnitřních povrchů a o porézitě vrstvy. Porézitu vrstvy potvrzuje také srovnání geometrického objemu vrstvy, určeného např. interferometrickým měřením tloušťky, se skutečným objemem kovu, který se určuje např. vážením.

Vedle extrémní citlivosti k znečištění ovlivňuje jemnozrnost magnetické vlastnosti přímo. Je třeba poznamenat, že velikost krystalitů závisí především na teplotě podložky při růstu vrstvy. Tato teplota (-200°C až $+500^{\circ}\text{C}$) je vždy mnohem nižší než teplota tuhnutí (okolo $1\ 500^{\circ}\text{C}$), při které rostou krystaly masivních materiálů. Atomy proto nemají dostatečnou pohyblivost, aby zaujaly rovnovážné polohy a vytvořily velké krystaly. V důsledku poruch krystalického uspořádání vznikají také experimentálně měřitelná vnitřní pnutí, která dosahují až teoretických mezí pevnosti materiálu. Obecně lze očekávat snížení počtu poruch zvýšením teploty podložky při napařování, popřípadě temperováním napařených vrstev.

Podložka může ovlivňovat orientaci jednotlivých krystalitů. Při vhodném typu a rozměrech krystalické mřížky podložky a v jistém teplotním oboru (obvykle okolo 500°C) jsou rostoucí zrna stejně krystalograficky orientována. Tento jev se nazývá *epitaxie* a je způsoben tím, že atomy zárodků kondenzují v periodickém silovém poli atomové mřížky podložky. Tímto způsobem lze připravit zatím nejdokonalejší a prakticky monokrystalické tenké vrstvy.

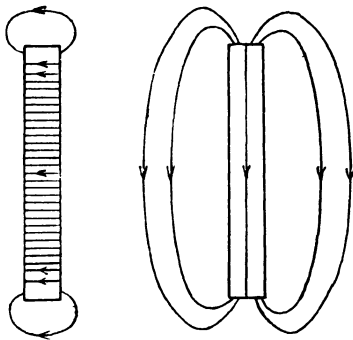
Otázka vlivu struktury na spontánní magnetizaci je velmi složitá. Není vůbec známo, jak vypadá výměnná interakce a spontánní magnetizace v silně porušené krystalové mřížce. Je však zřejmé, že je-li vrstva na povrchu zoxydována, je skutečný objem feromagnetické fáze menší, než jaký odpovídá měřené, tj. geometrické tloušťce vrstvy. Při vyhodnocování výsledků měření se tak autoři dopouštějí dvou chyb: jednak dělí změřený magnetický moment větším objemem, než je skutečný objem feromagnetika, což posouvá bod v grafu směrem k nižším hodnotám spontánní magnetizace, jednak umísťují bod k větším tloušťkám, než jsou skutečné. Obě tyto chyby se sčítají a mohou značně zkreslit výsledek. U velmi tenkých vrstev bylo zjištěno elektronovým mikroskopem, že vrstvy nejsou souvislé, nýbrž že jde spíše o shluk malých částic rozměru jen několik desítek angströmů. U tak malých částic se již projevují tepelné fluktuace směru spontánní magnetizace; magnetické momenty jednotlivých spontánně zmagnetovaných částic se orientují (v magnetických polích stovek až tisíců oerstedů užívaných při měření) statisticky stejně jako elementární momenty v paramagnetických látkách.

Tento jev se nazývá *superparamagnetismus* a je v tenkých vrstvách dále komplikován slabou magnetickou a zbytkovou výměnnou interakcí mezi částicemi. Podobné poměry mohou nastat při vnitřní oxidaci vrstvy. Nelze tedy obecně redukovat vliv oxidace jen na změnu objemu a pro zoxydované vrstvy nelze použít dosavadní teorie. Naopak souhlas teorie s výsledky měření na vrstvách ve velmi vysokém vakuu naznačuje, že vysoká koncentrace poruch v čistém materiálu nemá podstatný vliv na spontánní magnetizaci. Tato měření však pouze ukázala, že do tloušťky několika desítek angströmů neklesá spontánní magnetizace. Potvrzení teorie v oboru, kde se předpokládá pokles, naráží na experimentální potíže. Jak jsme se již zmínili, nepodařilo se dosud připravit souvislé velmi tenké vrstvy feromagnetických kovů. Vysoké povrchové napětí způsobuje totiž kondenzaci ve formě trojrozměrných krystalitů; situace je obdobná jako u nesmáčivých kapalin, např. u rtuti na skle. Není zatím známa podložka, na které by feromagnetické kovy rostly skutečně ve formě filmu, kde by tedy přilnavost převládala nad povrchovým napětím.

PŘEMAGNETIZAČNÍ PROCESY

Je známo, že magnetické pole působí na každý magnetický moment dvojicí sil, která jej natáčí do směru tohoto pole. Účinky vnějšího pole na chování feromagnetik, kde jsou spinové magnetické momenty uspořádány působením výměnných sil, je v současné době předmětem rozsáhlejšího zkoumání než spontánní magnetizace.

Nejjednodušší způsob orientace magnetického momentu vzorku do směru vnějšího



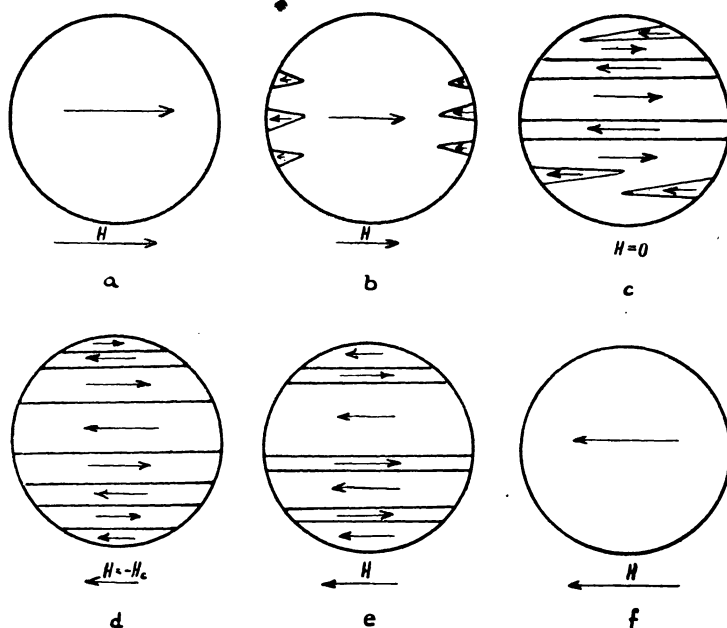
Obr. 2. Demagnetizační pole desky (schematicky).

pole je současné natočení spinů bez porušení jejich paralelního uspořádání (homogenní rotace). Daleko častější je však nehomogenní změna celkového magnetického momentu, při které se feromagnetické těleso rozděljuje v domény zmagnetované různým směrem. Příčinou tohoto jevu je nejčastěji existence vnitřního demagnetizačního pole. Je všeobecně známo, že zmagnetované těleso vytváří ve svém okolí magnetické pole, které však neprobíhá jen okolím, ale také vnitřkem vzorku a sčítá se s vnějším magnetickým polem. Zdrojem pole vzorku jsou ta místa jeho povrchu, kde magnetizace má nenulovou složku do směru normály k povrchu. Velikost a prostorové rozložení

tohoto pole je závislé na tvaru vzorku. Ukážeme si to na tenké desce zmagnetované jednou kolmo k povrchu a podruhé rovnoběžně s povrchem. Velikost pole můžeme reprezentovat hustotou siločar. Počet siločar vycházejících z jednotky plochy povrchu je v obou případech stejný. V prvním případě (obr. 2a) prochází velká většina siločar vnitřkem vzorku; vnitřní pole se nazývá *demagnetizační* a je v tomto případě velké.

V druhém případě (obr. 2b) prochází většina siločar okolím vzorku a demagnetizační pole je tedy malé. Pole v okolí se někdy nazývá *rozptylové*.

Průběh přemagnetizace vzorku tvaru koule ukazuje schematicky obr. 3. V dostatečně velkém vnějším poli je vzorek zmagetován homogenně do směru pole (nasyčen,



Obr. 3. Schéma průběhu přemagnetizace.

obr. 3a). Zmenšíme-li vnější magnetické pole až pod hodnotu vnitřního demagnetizačního pole, má celkové pole působící na spiny opačný směr než magnetizace vzorku. Homogenním natočením spinů by se celková energie systému zvýšila; vnitřní pole natáčí se totiž současně s magnetizací, tj. poloha magnetizace vzhledem k vnitřnímu poli by nebyla výhodnější a naopak poloha vzhledem k vnějšímu poli by byla méně výhodná. Existuje však stav s výhodnější konfigurací spinů a s nižší energií. Ve vzorku vzniknou (obr. 3b) malé oblasti, ve kterých je magnetizace orientována opačným směrem (zárodky přemagnetizace). V tomto stavu je celkový magnetický moment vzorku nižší a demagnetizační pole má nižší energii. Uzavírá se totiž na kratší vzdálenosti mezi opačnými póly ležícími vedle sebe na povrchu vzorku. K vytvoření takových zárodků dochází lokálním nehomogenním přetočením magnetizace. (Tento děj se nazývá *nukleace*.) K tomu nestačí působení homogenního vnitřního a vnějšího magnetického pole. Příčinou vzniku zárodku jsou lokální nehomogenity vzorku působící lokální nehomogenitu celkového magnetického pole. Další změna magnetizace při zmenšování vnějšího pole se děje růstem opačně zmagetovaných domén. Po

vypnutí vnějšího pole je vzorek rozdělen v domény zmagnetované opačným směrem (obr. 3c). Magnetický moment vzorku v tomto stavu není však roven nule, protože domény zmagnetované původním směrem mají stále relativně větší objem (remanence). Tento stav neodpovídá absolutnímu minimu energie, a je tedy metastabilní. Tato metastabilita je způsobena překážkami v pohybu hranic mezi doménami; hranice jsou v polohách odpovídajících jistému lokálnímu minimu energie. Úplnému odmagnetování vzorku, při kterém celkový magnetický moment je roven nule, nastává teprve působením opačného vnějšího magnetického pole, jehož hodnota se v tomto případě nazývá *koercitivní síla* (obr. 3d). Při dalším zvyšování opačného vnějšího pole dojde růstem výhodněji orientovaných domén (obr. 3e) k postupnému nasycení vzorku (obr. 3f).

Proces, který jsme zjednodušeně popsali, je ve skutečnosti komplikován jevem magnetokrystalické anizotropie. Energie zmagnetovaného krystalu, tj. práce, kterou je třeba vykonat k jeho zmagnetování, je totiž různá v různých krystalografických směrech. Směry, ve kterých je tato energie nejmenší, se nazývají směry snadné magnetizace; spiny mají tendenci natáčet se do některého z těchto směrů. V remanentním stavu leží magnetizace každé domény v některém ze snadných směrů. Při nasycování vzorku vnějším polem dochází pak mimo posuvy stěn též k rotaci magnetizace, a to ze snadného směru do směru pole.

V hranicích mezi doménami je porušena homogenita uspořádání spinů. Výměnné síly se snaží zmenšit úhel mezi směry sousedních magnetických momentů, tj. při daných směrech magnetizace sousedních domén zvětšit tloušťku hraniční oblasti. V této oblasti neleží však magnetizace ve snadných směrech; anizotropie vede tedy naopak k zúžení stěny. Výsledné uspořádání magnetizace ve stěně a její touščka je určena minimem součtu výměnné a anizotropní energie. Tloušťka stěny je kolem sta atomových rovin, rozměry domén jsou nejčastěji o několik řádů větší. Autorem první teorie stěny je BLOCH (odtud název Blochova stěna), který vypočítal též její energii v ideálním krystalu. V reálném porušeném krystalu závisí její energie na poloze vzhledem k poruchám. To vysvětluje existenci překážek pohybu stěny — hysterezi. (V ideálním krystalu by nebylo třeba k rovnoměrnému pohybu stěny dodávat žádnou energii.) Magnetická tvrdost materiálu (tj. velikost remanence a koercitivní síly) je tedy určena jednak citlivostí energie Blochovy stěny k poruchám, jednak množstvím těchto poruch. Ve speciálních magneticky tvrdých materiálech (pro permanentní magnety) je pohyb Blochových stěn prakticky nemožný a k přemagnetování dochází pouze rotací magnetizace uvnitř domén. Podmínkou pro tvrdost je pak navíc vysoká hodnota anizotropní energie, která ztěžuje tyto rotace. Naopak podmínkou pro magnetickou měkkost materiálu (např. pro transformátory, relé apod.) je vysoká pohyblivost Blochových stěn.

Dosud jsme nemluvili o vlivu tvaru vzorku na přemagnetizaci. Naznačili jsme pouze, že nepravidelnosti tvaru se uplatňují při nukleaci domén. Uvažovali jsme pouze přemagnetizaci koule, ve které je demagnetizační pole homogenní a jeho velikost nezávisí na směru magnetizace. Ze srovnání obr. 2a a 2b je však zřejmé, že při přemag-

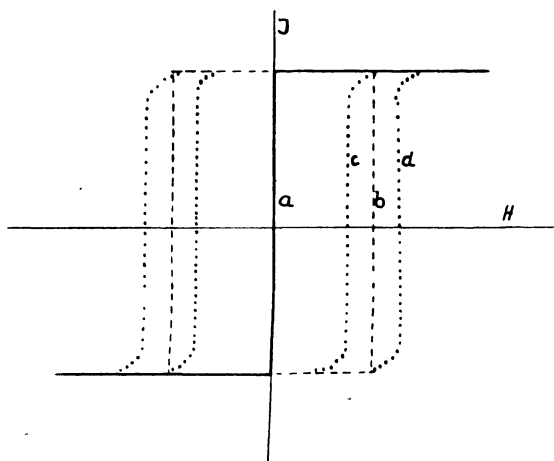
netování desky rovnoběžně s jejím povrchem by rotace, při které se magnetizace vychyluje z roviny desky, způsobila značný vzrůst demagnetizačního pole a byla by energeticky nevýhodná. Naopak při rotaci v rovině desky je velikost demagnetizačního pole opět nezávislá na směru. Ve velmi tenkých deskách je demagnetizační pole tak malé, že rozdělení vzorku v domény již podstatně nesníží celkovou energii. Snížení energie demagnetizačního pole je pak totiž menší než přírůstek energie způsobený Blochovými stěnami.

Na základě této úvahy lze očekávat, že přemagnetizace v tenkých vrstvách může probíhat procesem homogenní rotace. Nutným předpokladem k tomu je dostatečná homogenita magnetických vlastností vrstvy. V polykrystalických vrstvách bude totiž rotaci bránit magnetokrystalická anizotropie jednotlivých krystalitů. Její vliv bude v každém krystalitu jiný, což povede k porušení homogenity rotace. Tomu je možno zabránit dvojným způsobem: přípravou monokrystalických vrstev nebo použitím materiálu, jehož magnetokrystalická anizotropie je blízká nule. Takovým materiálem jsou slitiny železa a niklu s obsahem niklu kolem 75%. Je nutno poznamenat, že podobný vliv jako magnetokrystalická anizotropie má další anizotropie souvisící s porušením symetrie krystalu deformací. Vliv deformace na energii zmagnetovaného krystalu (který se mimo jiné projevuje spontánní deformací známou jako magnetostrikce) je nejmenší při obsahu niklu kolem 80%. Proto při žádném složení slitiny nebudou vrstvy zcela izotropní.

Možnost uskutečnit přemagnetizaci homogenní rotací vzbudila pozornost techniků, kteří hledají stále rychlejší prvky pro matematické stroje. Rychlost, kterou může proběhnout homogenní rotace, je v ideální vrstvě omezena jen vnitřním tlumením spinového systému. Odhady provedené na základě dosavadních znalostí o tomto tlumení ukazují, že přemagnetování může proběhnout za dobu řádově 10^{-9} sec. Přemagnetizace růstem domén je podstatně pomalejší. Při pohybu stěny si můžeme zjednodušeně představit, že stěna ve výchozí poloze zaniká a současně vzniká jiná ve vzdálenosti jedné tloušťky stěny. Potom zaniká v této nové poloze a vzniká opět o jednu tloušťku dále. Každý takový proces představuje jednu rotaci a doba potřebná k posuvu stěny bude ve stejném poměru k trvání homogenní rotace jako poměr dráhy, kterou stěna musí proběhnout, k její tloušťce. Početní odhad potvrzuje výsledek této jednoduché úvahy. Je však třeba respektovat také brzdicí vliv vířivých proudů vznikajících změnou magnetického toku a ovlivnění rychlosti efektivní silou, kterou na magnetizaci působí vnější přemagnetizační pole. Charakter těchto působení je při rotaci a při pohybu stěny různý.

Jak jsme se už zmínili v úvodu, je nositelem informace v magnetickém elementu směr, popřípadě smysl magnetizace. Aby si vrstva uchovala tuto informaci i po vypnutí vnějšího magnetického pole, musí mít vysokou remanenci. Průběh procesu přemagnetizace si často znázorňujeme hysterezní smyčkou, tj. grafem závislosti průběhu magnetizace do směru vnějšího pole na tomto poli. Křivka *a* na obr. 4 představuje hysterezní smyčku ideální izotropní vrstvy, o které jsme mluvili výše. Magnetizace míří vždy do směru vnějšího pole, koercitivní síla je rovna nule. V nulovém vněj-

ším poli není remanence definována a magnetizace může mřít do libovolného směru. Prakticky použitelná je teprve vrstva s hysterezní smyčkou podle křivky *b* na obr. 4. To je smyčka ideální monokrystalické vrstvy s nenulovou anizotropií se směry snadné magnetizace ve směru vnějšího pole. Anizotropie způsobuje, že magnetizace má stabilní polohu rovnoběžně se směrem vnějšího pole do té doby, než velikost pole dosáhne záporné hodnoty koercitivní síly, která je v tomto případě určena rovnicí



Obr. 4. Hysterezní smyčky tenkých vrstev.

$$H_c = H_K = \frac{2K}{I_s}, \quad (1)$$

kde H_c je koercitivní síla, K konstanta magnetokrystalické anizotropie, tj. rozdíl magnetizačních prací v nesnadném a snadném směru, a I_s velikost nasycené magnetizace. Přemagnetizace probíhá tak, jako by vnější pole muselo překonávat

působení jakéhosi vnitřního efektivního pole anizotropie, které se označuje symbolem H_K . Totéž platí pro přemagnetizaci opačným směrem; vrstva je tedy bistabilní.

Pro aplikaci musí tedy vrstvy splňovat tyto tři požadavky: musí být homogenní, aby přemagnetizace probíhala rotací; musí mít nenulovou anizotropii, aby byly bistabilní; koercitivní síla musí být malá, aby k přemagnetování stačilo slabé pole, a tedy i malá energie. Poslední dva požadavky jsou do jisté míry protichůdné, prakticky vhodné jsou vrstvy s koercitivní silou kolem jednoho oerstedu.

Prvé dva požadavky jsou splněny u ideálních monokrystalických vrstev. Je však možno je splnit i u homogenních polykrystalických vrstev z materiálu s prakticky nulovou magnetokrystalickou anizotropií a magnetostrickí, jestliže v nich uměle vyvoláme malou anizotropii jiného původu. Tuto možnost poskytují vrstvy z železníkových slitin, o kterých jsme se již zmínili. Je již dlouho známo, že zmagnetujeme-li krystal takové slitiny při teplotě několika set stupňů Celsia, zorientují se po čase atomy tak, že spojnice stejných atomů (tj. Fe—Fe, Ni—Ni) míří převážně kolmo ke směru magnetizace, kdežto spojnice různých atomů (tj. Fe—Ni) míří převážně ve směru magnetizace. Tato orientace se zachová i po vychlazení krystalu a má za následek slabou magnetickou anizotropii. Vytvoříme-li takovou anizotropii ve všech krystallitech vrstvy tím, že ji žiháme, popřípadě již vyrábíme v magnetickém poli, získáme vrstvu s jednoosou homogenní anizotropií (tj. pouze se dvěma antiparalelními směry snadné magnetizace). Příčinou orientace slitiny je závislost magnetické energie na úhlu mezi směrem spojnic stejných atomů a mezi směrem magnetizace. Za vysoké

teploty dochází proto k přesunům atomů do energeticky výhodných poloh. Po snížení teploty je pohyblivost atomů nepatrná a tatáž závislost energie se projevuje magnetickou anizotropií. Stejně jako atomy ve slitině se mohou orientovat i atomy v jednosložkovém kovu v oblastech se silně defektní strukturou, kde nemají jednoznačně určené polohy minimální energie v krystalové mříži. Nadto vyšší pohyblivost atomů v defektních oblastech umožňuje vznik magnetické anizotropie v tenkých vrstvách při nižších teplotách než v masívních materiálech. Lze také vytvářet anizotropii napařením na podložky skloněné šikmo k proudu dopadajících atomů. Vrstva je pak složena z částic protáhlého tvaru, které mají směr snadné magnetizace rovnoběžný s delším rozměrem (srovnej výklad k obr. 2).

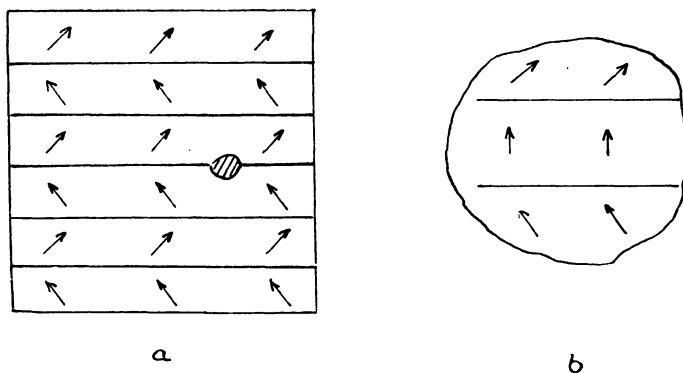
Při přemagnetování vrstev s jednoosou magnetickou anizotropií polem rovnoběžným s osou snadné magnetizace očekáváme pravouhlou hysterezní smyčku (křivka *b* na obr. 4), průběh přemagnetizace rotací a koercitivní sílu rovnou efektivnímu poli anizotropie H_K .

Takovému ideálnímu chování však stojí v cestě dva procesy, které probíhají v reálných tenkých vrstvách, jak se ukázalo již při prvních pokusech. Prvý z nich je vznik domén a pohyb stěn, který vede k přemagnetizaci s nižší hodnotou koercitivní síly, druhý je porušení homogenity rotace, při kterém je koercitivní síla naopak vyšší než H_K . Oba tyto procesy jsou pomalejší než ideální homogenní rotace a je nutno jim zabránit ve vrstvách určených pro aplikace.

Ukázali jsme, že vznik zárodků domén opačné magnetizace je způsoben lokálními nehomogenitami hlavně na okrajích vzorků. Zárodky proto vznikají i v tenkých vrstvách. Protože však demagnetizační pole je zanedbatelně malé, nemají důvod se rozšiřovat, pokud pole nezmění polaritu (na rozdíl od masívních vzorků — srovnej obr. 3). V remanenci má proto vrstva téměř 100% nasycené magnetizace. Teprve při zvyšování pole opačného směru se vrstva přemagnetuje růstem domén. Koercitivní síla je určena velikostí překážek v pohybu stěn, je menší než H_K a hysterezní smyčku představuje křivka *c* na obr. 4. Pomalá přemagnetizace růstem domén začne tedy dříve, než dojde k rotaci. Užije-li se však k přemagnetizaci dostatečně rychlého pulsu, dosáhne pole hodnoty H_K dříve, než zárodky domén podstatně vzrostou, a přemagnetizace proběhne rychlou rotací.

Existenci koercitivní síly vyšší než H_K (obr. 4 d) v některých vrstvách lze vysvětlit jen tím, že rotace nastávající při velikosti pole H_K se nějakým způsobem přeruší — zablokují — a přemagnetizace se dokončí teprve po zvětšení vnějšího pole opět pomalejším pohybem stěn. Také tomuto jevu lze zabránit, všimneme-li si blíže jeho podstaty. V reálné vrstvě není anizotropie nikdy zcela homogenní. Je to způsobeno jednak nenulovou anizotropií jednotlivých krystalitů, jednak fluktuacemi umělé jednoosé anizotropie, ke které, jak jsme poznali, přispívají podstatně defektní oblasti vrstvy. Vlivem této nehomogenity má magnetizace v různých oblastech vrstvy tendenci přetáčet se v různém smyslu — někde ve směru hodinových ručiček, někde opačně. V krajním případě, kdy vrstva je silně zoxydována v hranicích zrn, se skutečně krystality přemagnetují individuálně, a to neuspořádanými rotacemi. Obvykle však výměnné

a magnetické interakce mezi zrny způsobují homogenizaci rotace ve velkých oblastech vrstvy. Výsledkem opačných tendencí těchto interakcí a nehomogenity anizotropie je rozpad vrstvy na oblasti, ve kterých rotace magnetizace probíhá v opačném smyslu. Schematicky je to znázorněno na obr. 5a. Mezi těmito oblastmi vznikají stěny, v jejichž středu míří magnetizace původním směrem (jako před počátkem přemagnetování —

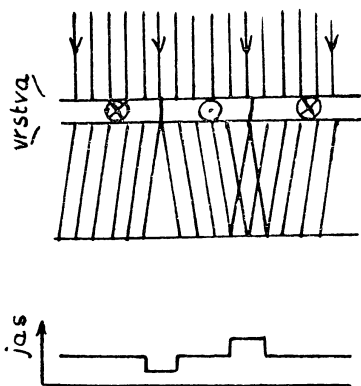


Obr. 5. Schéma nehomogenní rotace magnetizace v tenké vrstvě (b je detail se schématem stěny).

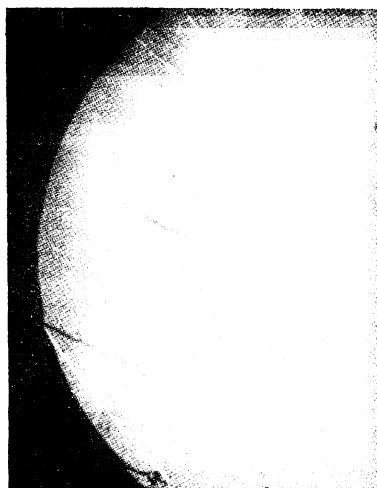
obr. 5b). Tyto stěny vytvářejí ve svém okolí, tj. v sousedních doménách, rozptylové magnetické pole mířící směrem původní magnetizace. Toto pole tedy na rozdíl od makroskopického demagnetizačního pole v masivních vzorcích nepomáhá přemagnetizaci, ale naopak jí brání. To je příčinou „blokování“ rotace. K přemagnetování vrstvy je nejprve třeba „přemagnetovat stěnu.“ Jak ukazují experimenty, děje se to vznikem a růstem jakýchsi „domén“ uvnitř stěny oddělených oblastmi zvanými „Blochovy čáry“. Vychýlíme-li však před počátkem přemagnetování magnetizaci o jistý úhel ze směru snadné magnetizace působením pole kolmého k tomuto směru, bude se při přemagnetování přetáčet magnetizace v celé vrstvě ve smyslu této umělé výchylky a dojde k homogenní rotaci.

Věnovali jsme tak mnoho pozornosti výkladu přemagnetizačních procesů v tenkých vrstvách nejen vzhledem k jejich důležitosti při technických aplikacích, ale také abychom ukázali principy přemagnetizace vůbec. Stejně jako v úzkém oboru tenkých vrstev je úkolem fyziků zabývajících se feromagnetismem získávat nové informace o podstatě přemagnetizačních procesů, které probíhají v nejrůznějších magnetických materiálech užívaných v technice; rozdíl mezi technickou a fyzikální informací je patrně jen v hloubce a ve stupni rozložení složitých jevů na elementární procesy a interakce. Studium zvláštností anizotropie tenkých vrstev přispívá k hlubšímu poznání magnetické anizotropie vůbec, studium doménové struktury tenkých vrstev vedlo k objevení nových typů stěn i vlastní struktury stěn a umožnilo měření energie stěny i jejích složek (výměnné a anizotropní energie). V této souvislosti se zmíníme o nových metodách zviditelňování domén a stěn, které přineslo právě zkoumání tenkých vrstev.

Především v tenkých vrstvách prostupují stěny celou tloušťku vzorku a pozorování povrchové doménové struktury např. koloidní metodou (viz práce [3]) dává obraz o rozdělení magnetizace v celém objemu vzorku. Tenké vrstvy jsou tedy vhodným modelem pro dokonalé porovnání změny magnetického momentu vzorku se změnami objemu domén a tím pro přesný výklad přemagnetizace.



Obr. 6. Schematické znázornění vzniku obrazu stěn v elektronovém mikroskopu.



Obr. 7. Zobrazení stěn mezi doménami elektronovým mikroskopem (šířka obrázku okolo $5\ \mu\text{m}$).

Koloidní metoda využívá rozptylových polí stěn, která přitahují koloidní feromagnetické částice; usazený koloid se pozoruje mikroskopem. U tenkých vrstev lze využít jejich průhlednosti k pozorování rozložení směrů magnetizace vrstvy v procházejícím polarizovaném světle. Polarizační rovina světla procházejícího zmagnetovaným vzorkem se totiž natáčí a smysl natočení závisí na směru magnetizace (Faradayův jev). Při vhodně nastaveném analyzátoru (téměř zkříženém) zařazeném za vrstvou vznikne za ním světelný kontrast — domény zmagnetované jedním směrem budou světlejší, opačně tmavší.

Největšího rozlišení detailů rozložení magnetizace lze dosáhnout užitím moderní metody transmisní elektronové mikroskopie. Vrstvy do tloušťky $1000\ \text{\AA}$ jsou přístupné pro elektrony; přitom svazek procházejících elektronů je vychylován z přímé dráhy silou úměrnou jejich rychlosti a velikosti magnetizace (Lorentzova síla; jejím projevem je také indukce elektromotorické síly ve vodiči, který se pohybuje ve stálém magnetickém poli, využívaná v dynamech). Smysl odchylky je opět určen směrem magnetizace; schéma je na obr. 6. Za stěnami vznikají zředění a zhuštění elektronového svazku, která umožňují zobrazit stěny na stínítku mikroskopu střídavě jako světlé a tmavé čáry. Při tom je možno využít velkého zvětšení i rozlišovací schopnosti elektronové optiky. Obr. 7 (převzatý z práce H. W. FULLERA, M. E. HALEA:

J. Appl. Phys. 31, 238 (1960)) je proveden touto technikou při zvětšení 15 000krát (šířka obrázku je 5 μm). Přitom z fotometrického stanovení rozdělení intenzity osvětlení je možno získat údaje i o rozložení magnetizace uvnitř stěny.

Nakonec se můžeme zmínit o jedné moderní metodě měření magnetických vlastností tenkých vrstev, totiž o feromagnetické rezonanci. V předcházejícím výkladu jsme často považovali za známé, že magnetické pole natáčí magnetické momenty do svého směru (stejně jako zemské pole střelku kompasu). Máme-li na mysli spinový magnetický moment elektronu, je jeho chování o něco složitější. Vedle vlastního magnetického momentu má elektron vlastní spinový moment hybnosti a na tendenci vnějšího momentu sil natočit jej do jiného směru odpovídá stejně jako setrvačnický precesním pohybem. Tento efekt je možno při přemagnetizačních procesech většinou zanedbávat (projevuje se např. omezením rychlosti homogenní rotace spinového systému, o kterém jsme mluvili). Stacionární precesní pohyb je však možno vzbudit uměle vysokofrekvenčním magnetickým polem, jestliže na spinový systém současně působí jistým momentem sil jiné konstantní magnetické pole. Uvedením vysokofrekvenčního pole do rezonance se spinovou precesí můžeme měřit frekvenci precese. Tato frekvence závisí na velikosti vnějšího konstantního magnetického pole i na dalších vlivech působících na spinový systém, jako je anizotropie, demagnetizační pole aj. Současné měření frekvence vysokofrekvenčního pole a velikosti konstantního vnějšího pole umožňuje měřit velikost energie anizotropie, magnetizaci a další parametry. Výhodou této metody, která ovšem není omezena jen na tenké vrstvy, je hlavně její vysoká citlivost — umožňuje např. proměřovat magnetické parametry vrstvy 1000 Å tlusté od místa k místu na ploškách velikosti 0,0001 mm² (viz [2]). Jedna aplikace této metody je specifická pro tenké vrstvy. Vysokofrekvenčním polem je možné vybudit v tenké vrstvě koherentní stojaté spinové vlny a měřit jejich energii (spinvlňová rezonance). Jde tu o velmi přesně definované porušení homogenity magnetizace a z měření energie s ním spojené lze přímo vypočítat velikost výměnné interakce ve feromagnetiku.

ZÁVĚR

V tomto článku jsme se omezili na poměrně úzkou část problematiky feromagnetických tenkých vrstev. Šlo nám v podstatě o vliv tloušťky na magnetické vlastnosti, tj. na spontánní magnetizaci a chování ve vnějším magnetickém poli. Jinou důležitou část představuje možnost užití magnetických vlastností jako parametrů charakterizujících strukturu nebo stav povrchu při studiu vlivu struktury nebo povrchu na jiné fyzikální vlastnosti, popřípadě při studiu vlastností povrchů (např. katalýza, koroze apod.). Na rozdíl od přímých parametrů struktury jsou magnetické vlastnosti snadno měřitelné (např. v průběhu sorpce, katalýzy apod.). Jejich citlivost ke strukturálním změnám jsme v předcházejícím výkladu naznačili. Zbývá se zmínit o citlivosti ke stavu povrchu. Stejně jako je výměnná interakce a tím spontánní magnetizace ovlivněna tím, že atomům na volném povrchu chybějí sousedé, projeví se na těchto veličinách i vliv cizích atomů na povrchu, které chybějící sousedy nahradí (např. atomy ad-

sorbované vrstvy plynu). Mnohem citlivější než spontánní magnetizace je magnetická anizotropie způsobená nižší symetrií v obklopení povrchových atomů stejnými sousedy (povrchová anizotropie). Existuje zatím teoretický odhad její předpokládané velikosti a první měření jsou s ním v řádovém souhlasu. Povrchová anizotropie se silně mění, jak se ukazuje, je-li na povrchu vrstva cizích atomů. Záleží přitom na složení povrchové vrstvy; zvláštní případy vznikají, je-li povrchem rozhraní feromagnetické a jiné krystalické fáze, např. antiferomagnetického oxydu. Studium povrchové anizotropie je však teprve v počátcích.

Důležité poznatky přináší srovnání strukturních, magnetických a elektrických vlastností tenkých vrstev. Vliv tloušťky vrstvy na elektrické vlastnosti je kvalitativně objasněn, kdežto o vlivu struktury, tj. zejména defektů, je známo dosud velmi málo.

Závěrem shrneme hlavní výsledky studia magnetických vlastností tenkých vrstev feromagnetických kovů:

1. Spontánní magnetizace dostatečně čistých tenkých vrstev prakticky nezávisí na tloušťce v oboru nad 20 Å v souhlase s teorií. Vrstvy tenčí než 20 Å se zatím nepodařilo připravit souvislé.

2. Užití nových metod, jako je transmisní elektronová mikroskopie a spinvlivná rezonance, umožnilo experimentálně řešit některé základní otázky, jako je rozložení magnetizace ve stěně a měření konstanty výměnné interakce.

3. Za určitých okolností je možno přemagnetovat tenké vrstvy homogenní rotací za doby řádově 10^{-9} sec. K tomu poznamenejme, že nejrychlejší paměť s feritovými elementy má vybavovací dobu $7 \cdot 10^{-7}$ sec a trvání přemagnetizace je při tom nejpodstatnějším omezením rychlosti. Paměť s tenkými vrstvami (je již v provozu v zahraničí) je téměř desetkrát rychlejší a trvání přemagnetizace je při tom jen 5 % celkové vybavovací doby.

Literatura

[1] H. MAYER: *Physik dünner Schichten*. Stuttgart, I (1950), II (1955).

[2] W. ANDRÄ, Z. FRAIT, V. KAMBERSKÝ, Z. MÁLEK, U. RÖSLER, W. SCHÜPPEL, P. ŠUDA, L. VALENTA, G. VOGLER: *Physica status solidi* 2 (1962).

[3] J. KACZÉR: *PMFA* 4, 54 (1959).

NOVÉ METODY PRO ZOBRAZENÍ DRAH ČÁSTIC

JAN HLADKÝ, IVAN LEHRAUS, PŘEMYSL MOKRÝ, Praha

Studium základních vlastností elementárních částic a jejich vzájemného působení se provádí různými metodami zobrazujícími a detekčními. Tyto původně samostatně používané metody byly postupně zdokonalovány, doplňovány novými metodami a navzájem kombinovány. Z metod zobrazujících dráhy částic bylo nejdříve rozvinuto