



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

**TRANSPORTNÍ VLASTNOSTI JEDNOROZMĚRNÝCH
MAGNETICKÝCH NANOSTRUKTUR**

TRANSPORT PROPERTIES OF ONE DIMENSIONAL MAGNETIC NANOSTRUCTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Holobrádek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marek Vaňatka

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství
Student: **Jakub Holobrádek**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Fyzikální inženýrství a nanotechnologie
Vedoucí práce: **Ing. Marek Vaňatka**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Transportní vlastnosti jednorozměrných magnetických nanostruktur

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Magnetické nanostrukтуры jsou v současné vědě studovány za účelem využití např. v záznamových médiích nebo vysokofrekvenčních obvodech. Omezením rozměrů lze modifikovat průběh magnetizačních procesů a tím docílit zajímavých vlastností týkajících se například pohybu doménových stěn.

Náplní této práce je charakterizace jednorozměrných nanodrátů na bázi Co připravených metodou růstu z plynné fáze ve spolupráci s Technickou Univerzitou v Sydney. Charakterizace bude provedena zejména pomocí měření anizotropní magnetorezistence ve vnějším magnetickém poli. Budou také provedena komplementární měření např. pomocí magnetooptického Kerrova jevu a mikroskopie magnetických sil (MFM). Dále mohou být charakterizovány také jiné systémy, připravené elektronovou litografií a naprašováním/napařováním. Materiálové a strukturní složení nanodrátů bude dle potřeby prozkoumáno metodami např. XPS, XRD nebo TEM.

Cíle bakalářské práce:

- Vypracovat rešeršní studii o problematice růstu magnetických nanodrátů z plynné fáze a o problematice transportních vlastností nanodrátů.
- Připravit vzorky nakontaktovaných nanodrátů. Pro přípravu elektrických kontaktů bude třeba si osvojit elektronovou litografii, naprašování/napařování a další nutné procesy.
- Sestavit měřící aparaturu umožňující aplikování magnetického pole a rotaci vzorku včetně softwaru.
- Provést úhlově závislé transportní měření magnetických nanodrátů.

Seznam literatury:

Wegrowe J. E. et al., Magnetoresistance of Ferromagnetic Nanowires. Phys. Rev. Lett. 82, 3681 (1999).

Xia Y. et al., One-Dimensional Nanostructures: Synthesis, Characterization, and Applications. Adv. Mater. 15, 353 (2003).

J. Wang et al., Interplay between superconductivity and ferromagnetism in crystalline nanowires, Nat. Phys. 6, 389 (2010).

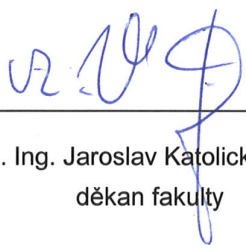
Wong D. W. et al., Current-induced three-dimensional domain wall propagation in cylindrical NiFe nanowires, J. Appl. Phys. 119, 153902 (2016).

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 15. 11. 2016



prof. RNDr. Tomáš Šíkolá, CSc.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Magnetické nanodráty jsou v posledních letech studovány, jelikož jejich specifické vlastnosti mohou být využity v aplikacích v mikroelektronice a senzorech. Tato práce se zabývá měřením transportních vlastností nanodrátů v magnetickém poli. Nanodráty, zkoumané v rámci práce, byly narosteny metodou chemické depozice z plynné fáze ve spolupráci s Technickou Univerzitou v Sydney. Hlavním úkolem práce bylo vyvinout proces kontaktování jednotlivých nanodrátů pomocí litografie elektronovým svazkem a jejich měření v magnetickém poli pomocí jevu anizotropní magnetorezistence. Dále byly provedeny základní charakterizace studovaných nanodrátů pomocí metod transmisní elektronové mikroskopie, energiově disperzní spektroskopie a mikroskopie magnetických sil.

Abstract

Magnetic nanowires have been recently under the scope for their specific properties and applications in microelectronics and sensors. This work deals with measurement of transport properties of nanowires in magnetic field. Nanowires prepared in the range of the thesis were grown by the physical vapor deposition method in collaboration with the University of Technology Sydney. The main task of the thesis was to develop a process of contacting single nanowires by electron beam lithography and measuring them using anisotropic magnetoresistance in angle dependent magnetic field. Characterization techniques such as transmission electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy and magnetic force microscopy were used to provide further analysis.

Klíčová slova

Nanodráty, magnetismus, magnetorezistence, AMR

Keywords

Nanowires, magnetism, magnetoresistance, AMR

HOLOBRÁDEK, J. *Transportní vlastnosti jednorozměrných magnetických nanostruktur*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 48 s. Vedoucí Ing. Marek Vaňatka.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Marka Vaňatky, a že veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Brně dne

.....
(podpis autora)

Na prvním místě a nejhlasitěji bych chtěl poděkovat Ing. Marku Vaňatkovi za nadstandardní péči, se kterou mě vedl při tvorbě bakalářské práce. Dále děkuji prof. RNDr. Jiřímu Spoustovi, Ph.D za kontrolu textu a věcné připomínky. Za charakterizaci TEM děkuji Ing. Janu Michalíčkovi. Děkuji celé magnetické skupině za to, že je taková jaká je. Hlavně pak svému bratru ve zbrani Jiřímu Jaskowiecovi, za společně strávený čas a pomoc v průběhu celého studia. V neposlední řadě bych rád poděkoval mým rodičům, bratrovi a přítelkyni za to, že jsou tady pro mě vždy, když potřebuji.

Tato práce byla provedena za podpory výzkumné infrastruktury CEITEC Nano (ID LM2015041, MŠMT, 2016–2019), CEITEC Vysoké učení technické v Brně.

Jakub Holobrádek

Obsah

1	Úvod	4
2	Nanodráty a jejich vlastnosti	5
2.1	Tepelná stabilita krystalové struktury	6
2.2	Tepelná vodivost	6
2.3	Mechanické vlastnosti	6
2.4	Elektrické transportní vlastnosti	7
2.5	Optické vlastnosti	7
2.6	Fotovodivost	7
2.7	Magnetické vlastnosti	7
3	Výroba a využití nanodrátů	10
3.1	<i>Bottom-up</i> metody	10
3.1.1	Růst pomocí šablon	10
3.1.2	Metoda VLS	11
3.1.3	Chemická depozice z plynné fáze	12
3.2	<i>Top-down</i> metody	14
3.2.1	Optická litografie	14
3.2.2	Elektronová litografie	14
3.2.3	Litografie pomocí rastrování hrotem	14
3.3	Využití nanodrátů	14
4	Základy magnetizmu	16
4.1	Magnetický moment atomu	16
4.2	Magnetické vlastnosti pevných látek	18
4.3	Druhy magnetických látek	18
4.3.1	Diamagnetické látky	19
4.3.2	Paramagnetické látky	19
4.3.3	Feromagnetické látky	19
4.3.4	Antiferomagnetické látky	20
4.4	Energie mikromagnetických systémů	20
4.4.1	Výměnná energie	21
4.4.2	Energie anizotropie	21
4.4.3	Zeemanova energie	22
4.4.4	Dipolární energie	22
4.4.5	Celková energie	23
5	Magnetorezistence	24
5.1	Anizotropní magnetorezistence	24
5.1.1	Mikromagnetické simulace pomocí programu MuMax3	25
5.2	Obří magnetorezistence	26
5.3	Tunelová magnetorezistence	28
5.4	Aplikace založené na magnetorezistenci	29

6	Charakterizace monokrystalických magnetických nanodrátek	30
6.1	Energiově disperzní spektroskopie	30
6.2	Transmisní elektronová mikroskopie	30
6.3	Mikroskopie magnetických sil	32
7	Příprava elektrických kontaktů a měření AMR nanodrátek	34
7.1	Monokrystalické nanodrátky	34
7.1.1	Přenesení nanodrátek na substrát	34
7.1.2	Lokalizace nanodrátek v optickém mikroskopu	35
7.1.3	Hledání přesné polohy nanodrátek v elektronovém mikroskopu	35
7.1.4	Žíhání	36
7.1.5	Příprava kontaktů pro čtyřbodovou metodu měření odporu	36
7.1.6	Mikrokontaktování	38
7.1.7	Uspořádání měřicí soustavy	39
7.1.8	Diskuze výsledků	40
7.2	Polykrystalické NiFe nanodrátky	41
7.2.1	Příprava vzorku	41
7.2.2	Výsledky	41
8	Závěr	44
9	Literatura	45
10	Seznam použitých zkratk	48

1. Úvod

Jednou z oblastí zájmu současného fyzikálního výzkumu jsou nanostruktury. Patří mezi ně i nanodráty, kterým se věnuje tato práce, a které společně s nanotrůbkami, nanotyčemi a nanovlákny patří mezi tzv. jednodimenzionální (1D) nanostruktury, což jsou nanostruktury, jejichž dva rozměry jsou v řádu nanometrů ($<100\text{ nm}$) a třetí je výrazně převyšuje. Důvodem ke zkoumání nanodrátů jsou jejich zajímavé vlastnosti (např. optické, elektrické, mechanické, magnetické). Díky svým vlastnostem nacházejí nanodráty četné aplikace. A to například v oblasti integrovaných obvodů, biologických či environmentálních senzorů. Tyto vlastnosti plynou jednak z velkého poměru povrchu a objemu, který je nevídaný u objektů makrosvětla, jednak z charakteristické hustoty elektronových stavů, která je způsobená omezením geometrie v některých směrech.

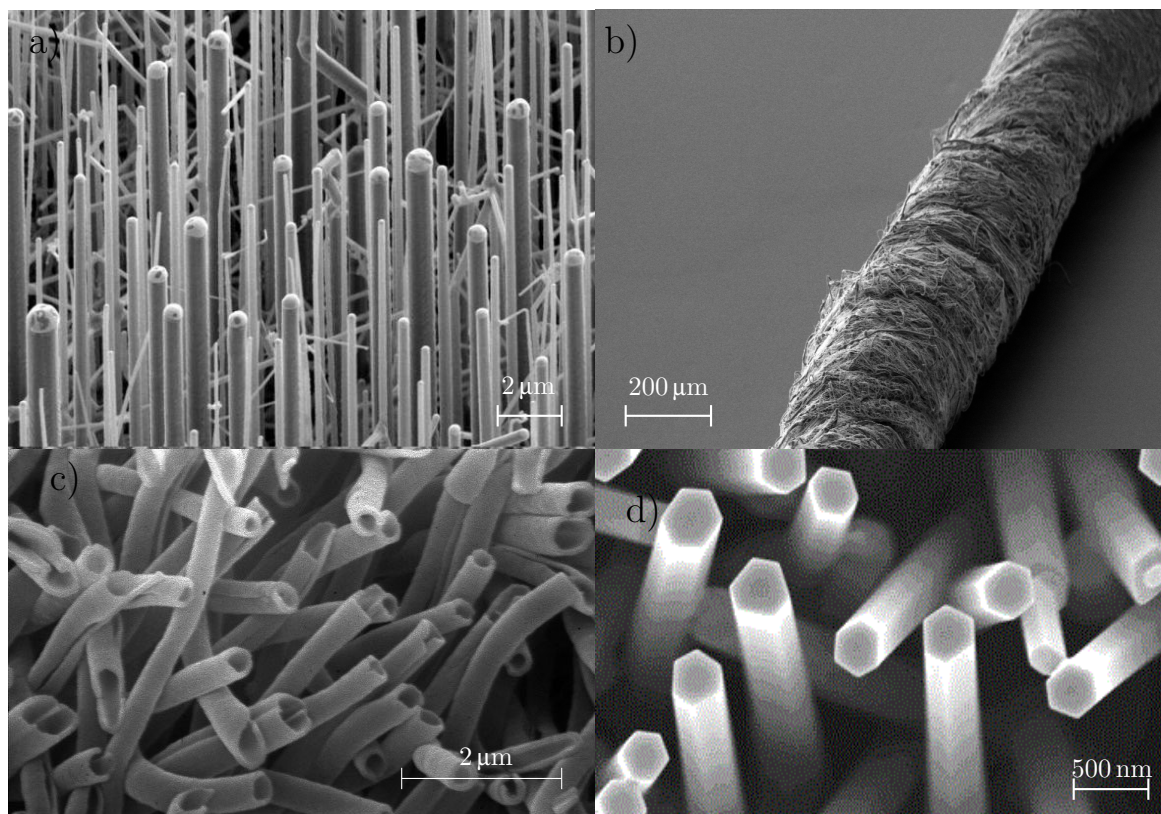
Jednou ze zajímavých zkoumaných magnetických vlastností nanodrátů je magnetorezistence. Ta má hojně využívané aplikace v magnetických záznamových zařízeních – zejména ve čtecích hlavách u pevných disků (HDD z angl. *Hard disk drive*). Oproti záznamovým zařízením, která ukládají informace pomocí elektrického náboje, ty magnetické ukládají informace do orientace spinu feromagnetické vrstvy záznamové buňky, čímž je možné dosáhnout hustšího zápisu a nižších finančních nákladů na jednotku úložného prostoru. Tato informace je vyčítána pomocí tzv. magnetorezistivní hlavy. První magnetorezistivní čtecí hlava byla vyrobena v roce 1991 firmou IBM a pracovala na základě jevu anizotropní magnetorezistence (AMR). Podstatou tohoto jevu je změna odporu v závislosti na úhlu mezi magnetizací a proudovou hustotou. AMR je jev s malou amplitudou, a tak když následující vývoj přinesl objev dalších druhů magnetorezistence (obří, tunelová) s větší amplitudou, vedlo to k novým druhům výkonějších magnetorezistivních čtecích hlav a vzniku nového vědního oboru spintroniky, která se zabývá chováním spinů v látce.

Hlavním cílem této práce je změřit magnetotransportní vlastnosti magnetických monokrystalických nanodrátů vyrobených na Technické univerzitě v Sydney, se kterou na tomto projektu spolupracujeme. Práce je proto rozdělena do čtyř hlavních významových částí. První část pojednává o vlastnostech, aplikacích a výrobě nanodrátů. Druhá část se věnuje základním pojmům magnetizmu, které jsou nezbytné pro pochopení magnetotransportních měření. Třetí část má za cíl rozebrání jevu magnetorezistence a představení jeho druhů. Ve čtvrté experimentální části jsou pak popsány provedené charakterizace monokrystalických magnetických nanodrátů a postup přípravy vzorku pro magnetotransportní měření. Tato část také obsahuje výsledky a jejich diskuzi.

2. Nanodráty a jejich vlastnosti

Tato kapitola se věnuje uvedení do problematiky nanodrátů a pojednává o jejich vlastnostech. Nanodráty se řadí mezi nanostruktury. Nanostrukturou rozumíme takový objekt, který má alespoň jeden rozměr mezi 1 a 100 nm [1]. Nanostruktury dále dělíme podle počtu omezených rozměrů na 2D nanovrstvy, 1D nanodráty a 0D kvantové tečky.

Společně s nanodráty patří mezi jednodimenzionální (1D) nanostruktury také nanotrubičky, nanovlákná a nanotyče (viz Obrázek 2.1).



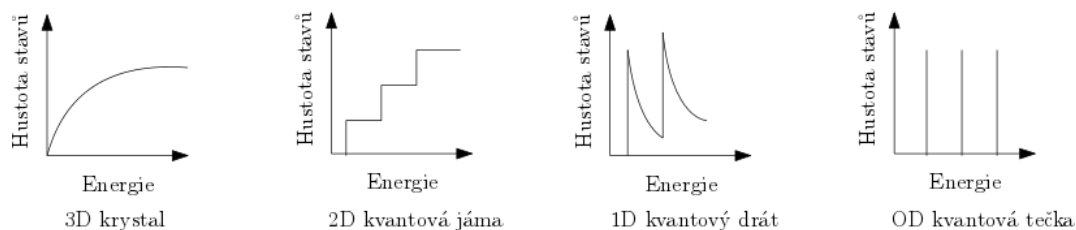
Obrázek 2.1: a) Křemíkové nanodráty [2] b) nanovláknenná příze z polymeru PVA [3] c) uhlikové nanotrubičky d) ZnMgO nanotyče [4].

Pozoruhodné vlastnosti nanodrátů a ostatních 1D nanostruktur, lišící se od vlastností makroskopických, plynou z vysokého poměru povrchu a objemu. Dalé také z hustoty elektronových stavů blíží se diskretním hodnotám hustoty stavů v kvantové tečce (viz Obrázek 2.2) [5]. Na obrázku si můžeme povšimnout, že jisté energie mají významně vyšší hustotu elektronových stavů, a proto se elektrony v nanodrátu s největší pravděpodobností nacházejí ve stavu s těmito energiemi.

Vlastnosti nanodrátů

Díky významnému prostorovému omezení elektronů v nanodrátích přicházejí do hry kvantové jevy. Uzavření elektronů do kvantové jámy v nanostruktuře je jednou z nejsnazších cest, jak kontrolovat elektrické, optické, magnetické nebo termoelektrické vlastnosti pevných látek. V této práci se věnujeme měření převážně magnetických vlastností, ale na ukázkou uvedeme i několik dalších vlastností, které se s omezením rozměrů zajímavě mění.

2.1. TEPELNÁ STABILITA KRYSTALOVÉ STRUKTURY



Obrázek 2.2: Schématická závislost hustoty elektronových stavů na energii elektronů pro různé struktury.

2.1. Tepelná stabilita krystalové struktury

Tato vlastnost je klíčová pro uplatnění nanodrátů v nanoelektronice a fotonice. Je dobře zdokumentováno [6], že bod tání pevných látek se v nanostrukturách zmenšuje. Je také možné pozorovat hysterezi vytvořenou cyklem tání a následné rekrystalizace, což bylo v literatuře ukázáno na příkladu germaniového nanodrátu s průměrem 55 nm a délkou 1 μm [7]. Takový nanodrát se začne z obou konců vypařovat při teplotě 650 °C (germaniová vrstva má teplotu tání 930 °C) a tání poté pokračuje směrem ke středu až celý nanodrát roztaje za teploty 848 °C. Při následném ochlazování rekrystalizační proces započne při 558 °C. Těchto vlastností se dá využít ke svařování nanodrátů. Díky rozdílným bodům tání pro tvarově rozdílné nanostruktury je také možné změnou teploty zjistit jejich zastoupení ve vzorku.

2.2. Tepelná vodivost

Molekulární dynamické simulace ukazují [8], že i tepelná vodivost se se zmenšujícími se rozměry snižuje. Například pro křemíkový nanodrát (v rozmezí teplot 200 K a 500 K) je tepelná vodivost až dvakrát menší oproti křemíkové vrstvě. To je velmi žádoucí u aplikací do termoelektrického chlazení nebo generátorů elektřiny. Naproti tomu to omezuje užití v elektronice a fotonice [7].

2.3. Mechanické vlastnosti

Pochopení mechanických vlastností nanodrátů a jiných nanostruktur může pomoci při studiu manipulace s objekty na atomární úrovni. Velký pokrok při zjišťování mechanických vlastností 1D nanostruktur byl vykonán při výzkumu mikroskopie atomárních sil (AFM) od 80. let minulého století do současnosti. Velmi zajímavá je změna vlastností při přechodu z mikro do nanorozměrů. Pro polykrystalické objekty s rozměry v řádech mikrometrů platí, že tvrdost a mez skluzu rostou se zmenšující se velikostí zrn materiálu [7]. U objektů s nanometrovými rozměry můžeme pozorovat přesně opačný jev. Z toho plyne, že pro každý materiál existuje rozměr struktury, pro který je nejtvrdší. Pro měď a paladium je to 19,3 nm respektive 11,2 nm [7]. Monokrystalické 1D nanostruktury, kterých se týká i tato práce, jsou oproti strukturám s většími rozměry pevnější, což je přičítáno menšímu výskytu defektů. Pevnost atomárních vazeb v nanodrátu je asi dvakrát větší než ve vrstvě materiálu [7].

2.4. Elektrické transportní vlastnosti

Některé kovové nanodráty se při zmenšování svých rozměrů stanou polovodivými. U monokrystalického bismutového nanodrátu k této změně dojde při průměru 52 nm [7]. Tento jev byl vysvětlen výpočty kvantové jámy, z nichž plyne, že valenční a vodivostní pás při zmenšujících se rozměrech od sebe vzdalují, čímž se rozšiřuje zakázaný pás. Pohyblivost nosičů náboje je omezena jak nedokonalostmi povrchu, tak uvězněním nosičů podél dlouhé osy nanodrátu [7].

U magnetických nanodrátů můžeme pozorovat zajímavé transportní vlastnosti, kterým se budeme věnovat v kapitole o magnetorezistenci.

2.5. Optické vlastnosti

Intenzivně zkoumaná oblast jsou optické vlastnosti, a to kvůli možným optickým aplikacím. Například absorpční spektrum křemíkového nanodrátu je oproti křemíkové vrstvě významně posunuto ke kratším vlnovým délkám. Také můžeme pozorovat silnou fotoluminiscenci¹, která je posílena kvantovým chováním elektronů v drátu. Optické vlastnosti jsou ovlivněny význačnými směry v krystalové mřížce. Na rozdíl od světla emitovaného kvantovými tečkami je světlo z nanodrátů silně polarizováno ve směru dlouhé osy drátu. Ukázalo se, že nanodráty se dají využít i jako vlnovody [7]. Vlnovody jsou struktury, které dokážou přenášet elektromagnetické vlnění. Dále se dělí podle druhu vln, které se nimi šíří např. na elektromagnetické nebo zvukové.

Nanodráty s plochými konci mohou být také popsány jako optické rezonanční dutiny emitující koherentní světlo. Při pokojové teplotě bylo pozorováno UV záření vycházející z pole ZnO nanotrubek narostlých na safírovém substrátu. Ty by tak mohly být vhodným kandidátem na výrobu nanolaseru, který by našel uplatnění v nanofotonice a analýzách v mikrosvětě. Oproti běžným laserům má nanolaser nižší excitační energii a je méně náchylný na změny teploty [7].

2.6. Fotovodivost

Fotovodivost je vlastnost, která zvyšuje elektrickou vodivost díky absorbovanému elektromagnetickému záření. Toto bylo ukázáno u ZnO nanodrátu, který je ve tmě špatným vodičem. Posvítíme-li na něj UV světlem, tak jeho vodivost vzroste až šestkrát. Jedná se o vratný děj a tak můžeme získat špatný vodič – vodič přepínač. S dopováním se můžeme dostat na rychlost přepnutí v řádu mikrosekund, což se dá dobře uplatnit například v detektorech UV záření [7].

2.7. Magnetické vlastnosti

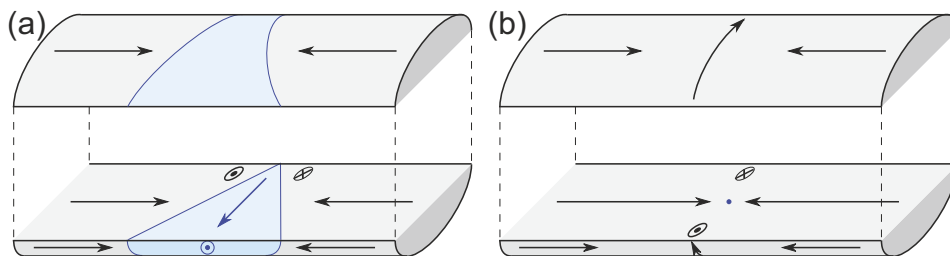
V této části uvedeme na ukázkou jen několik magnetických vlastností. Znovu se k nim vrátíme v kapitole o magnetorezistenci, kde budeme důkladně diskutovat magnetické jevy, kterým se budeme věnovat v praktické části této práce.

¹Samovolné vyzařování fotonů z pevné nebo kapalně látky vybuzečné dopadajícím elektromagnetickým zářením.

Magnetizace ve feromagnetickém nanodrátu přirozeně směřuje podél jeho dlouhé osy (tzv. osa snadné magnetizace) [1]. Pokud směřuje magnetizace kolmo na dlouhou osu nanodrátu, nazývá se tento směr osou obtížné magnetizace. Toto pojmenování vyplývá z toho, že při směřování magnetizace ve směru obtížné osy je potřeba daleko větší vnější magnetické pole, aby se magnetizace v drátu natočila do směru pole. Toto je způsobeno tvarovou anizotropií drátu.

Bez vnějšího vlivu se nanodrát přirozeně vyskytuje ve stavu s jen jednou doménou². V uspořádání s jednou doménou v celém drátu je minimální tzv. demagnetizační energie³, což plyne z tendence drátu nacházet se ve stavu s minimální celkovou energií [1]. Nicméně vnějšími podmínkami je možné nukleovat na jednom konci drátu doménu s opačnou magnetizací a tím vytvořit hranici mezi dvěma doménami – doménovou stěnou. Na základě Kerrova magneto-optického jevu nebo anomálního Hallova jevu je možné měřit rychlost šíření doménové stěny v závislosti na přiloženém vnějším magnetickém poli. V tenkých nanodrátech může rychlost dosahovat až stovek ms^{-1} [1].

Existují dva hlavní typy doménových stěn. U prvního je magnetizace ve stěně kolmá na dlouhou osu drátu a tato stěna se nazývá příčná [viz Obrázek 2.3a)]. U druhého typu se magnetizace ve stěně stáčí do kruhu a nazývá se proto vortexová stěna [viz Obrázek 2.3b)]. Doménová stěna může být velmi úzká a její šířka je přímo úměrná poloměru drátu a závisí na typu doménové stěny [1].



Obrázek 2.3: a) Příčná doménová stěna. b) Vortexová doménová stěna. Převzato z [9].

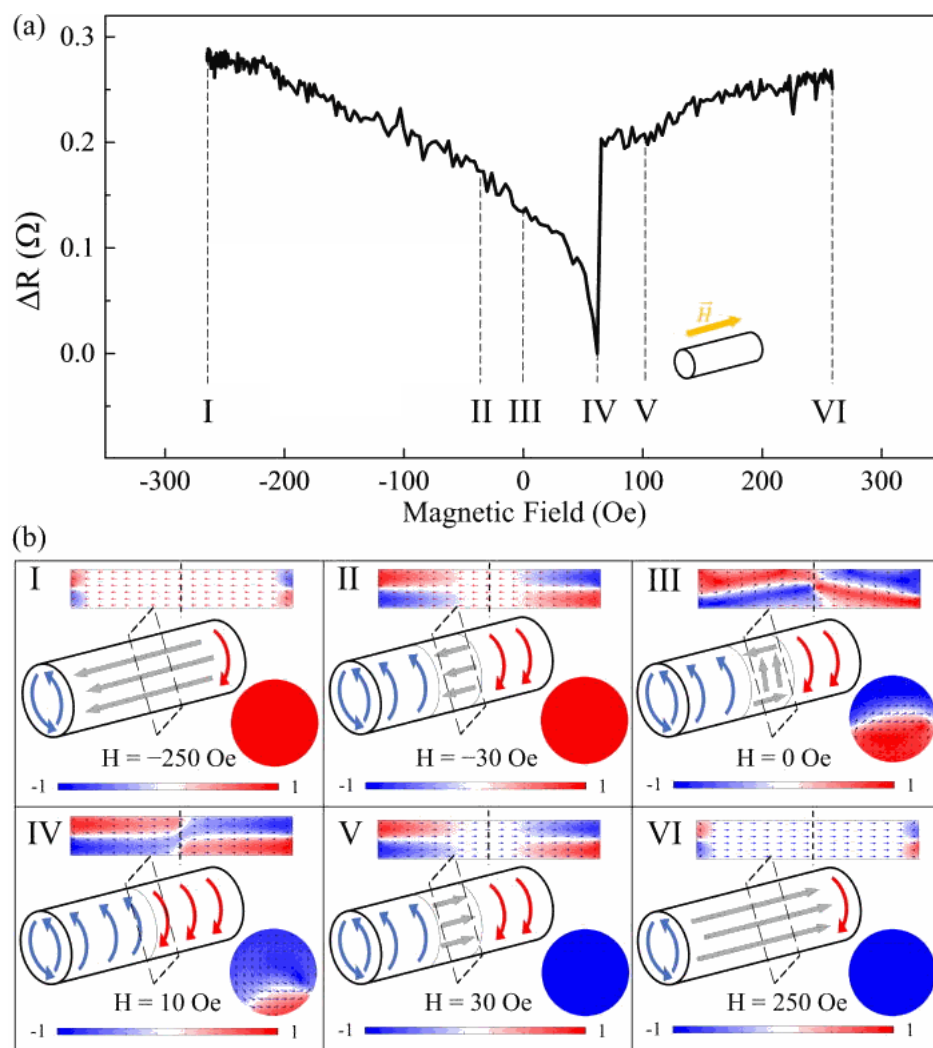
Další magnetickou vlastností mění se v důsledku omezení rozměrů je koercitivita⁴. Niklové nanodráty s průměrem 30 nm mají koercitivitu až 68 mT, zatímco niklová vrstva má koercitivitu v jednotkách mT. U stejného drátu se také dá pozorovat 90% nárůst remanentní (zbytkové) magnetizace [7].

Vlastnosti doménových stěn v magnetických nanodrátech jsou zajímavé z pohledu aplikací na uchování informací. Data jsou uložena do oblastí – domén s rozdílnou magnetizací, které jsou oddělena doménovou stěnou. Hustota uložených dat závisí na rozměrech nanostruktury a vlastnostech doménových stěn. Například v NiFe drátu s kruhovým průřezem o průměru 350 nm jsou domény s magnetizací ve tvaru spirály s lišícím se směrem otáčení. Přepínání doménové stěny měřené pomocí anizotropní magnetorezistence je ukázáno na Obrázku 2.4 [10].

²Oblast, ve které všechny magnetické dipólové momenty směřují stejným směrem.

³Tato energie pochází od pole, které vzniká v magnetu a působí proti směru magnetizace $\vec{M}$, čímž snižuje její velikost. Více viz 4.4.4.

⁴Intenzita magnetického pole, kterou je potřeba k tomu, aby byl materiál demagnetován – jeho magnetizace byla nulová.



Obrázek 2.4: a) Měření změny odporu s měnícím se vnějším magnetickým polem v nanodrátu s magnetizací směřující ve snadné ose b) Vizualizace změn s rostoucím vnějším magnetickým polem. Převzato z [10].

3. Výroba a využití nanodráťů

Při výrobě nanodráťů již bylo vyzkoušeno mnoho postupů. Ty nejdůležitější z nich jsou popsány v této kapitole. Postupy výroby se tradičně dělí na:

- *Bottom-up*: podstatou je skládání nanodráťu z jeho dílčích komponent. Jedná se převážně o chemické metody.
- *Top-down*: podstatou je leptání nebo modelování nanodráťu z většího kusu materiálu. Spadají sem například litografické metody.

Top-down metody jsou tradičně používány v elektronice, protože mohou zaručit definovaný růst, který je pro výrobu elektronických součástek nezbytný. V dnešní době ale aplikace *bottom-up* metod do nanoelektroniky překonává mnohé limity *top-down* nanodráťů a otvírá se tak možnost pro projení obou přístupů a využití výhod obou z nich [7].

3.1. *Bottom-up* metody

Mezi nejvyžívanější *bottom-up* metody patří růst v šablonách a VLS metoda (z angl. vapor-liquid-solid, tj. pára-kapalina-pevná látka) [11], kterým se budou věnovat následující odstavce. Výhodou oproti *top-down* metodám je například možnost dopování nanodráťů během růstu nebo růst víceprvkových drátů [11].

3.1.1. Růst pomocí šablon

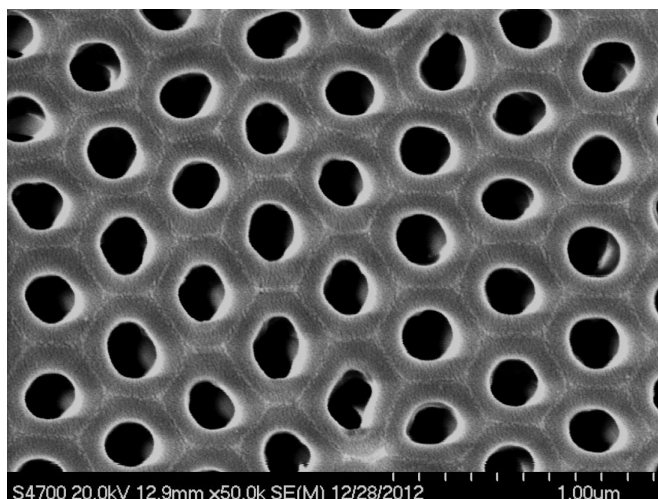
Pro usnadnění výroby nanodráťů se často využívá šablon (viz příklad šablony z Al_2O_3 na Obrázku 3.1), díky nimž můžeme získat struktury požadovaných rozměrů. Existuje několik základních druhů šablon. Porézní šablony mají ve své struktuře válcovité nanopóry, které se vyplňují požadovaným materiálem. Je také možné využít jiných, už hotových nanostruktur – například růst nanodráťu v nanotrubici. Taktéž se dají využít biošablony nebo vysoce orientovaný pyrolitický grafit [5]. Příkladem použití biošablon je růst niklových a kobaltových nanodráťů s průměrem jen 3 nm ve viru tabákové mozaiky (TMV) [12]. U pyrolitického grafitu se dá dobře využít schodů mezi jednotlivými rovinami, na kterých mohou růst například palladiové nanodráty [13]. Následující podkapitoly se budou věnovat způsobům vyplnění šablon.

Růst pomocí tlakové injekce

Tahle metoda se využívá při výrobě monokrystalických nanodráťů z materiálu s nízkým bodem tání. Pro použitou šablonu je důležité, aby při zvýšeném tlaku a teplotě byla chemicky stálá a neměnila svou strukturu. Potřebný tlak p k vyplnění šablony taveninou udává Washburnova rovnice [15]:

$$p = \frac{-4\gamma \cos \phi}{d_w}, \quad (3.1)$$

kde d_w je průměr pórů v šabloně, γ povrchové napětí kapaliny a ϕ dotkový úhel mezi šablonou a kapalinou.



Obrázek 3.1: Šablona z oxidu hlinitého [14].

Růst pomocí elektrochemické depozice

Nejprve je na jednu stranu šablony nanесena tenká vodivá kovová vrstva, která následně poslouží jako katoda při elektrolytickém pokovování. Délka narostlých drátů se dá řídit délkou depozice. Protože je šablona celou dobu ponořená v elektrolytu, je nutné zamezit její degradaci. Defekty v šabloně mají na depozici negativní vliv, protože proces přednostně probíhá právě na defektech. Na rozdíl od růstu pomocí tlakové injekce dostaneme elektrochemickou depozicí polykrystalické dráty bez preferované orientace krystalů [15]. Na Vysokém učení technickém v Brně byla tato metoda zkoumána v rámci bakalářské práce Michala Staňky [5].

Napařování a naprašování

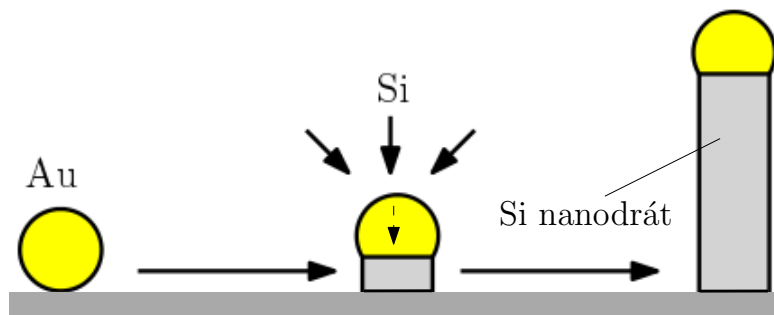
Při napařování je materiál nejprve zahřát, aby se začal vypařovat, nebo je terč z daného materiálu odprašován ionty. Pára je pak vedena skrze vhodně umístěnou šablonu, kde je zchlazena a kondenzuje. Touto metodou byly připraveny například bismutové nanodráty o průměru jen 7 nm [15].

3.1.2. Metoda VLS

Název této metody pochází z anglického vapor-liquid-solid (pára-kapalina-pevná látka). Tato metoda využívá pro výrobu polovodičových nanodrátů kapalný kovový katalyzátor (nejčastěji zlaté nanočástice). K roztavenému katalyzátoru se přivádějí páry deponovaného materiálu, které na něm kondenzují. Po nasycení slitiny deponovaného materiálu a katalyzátoru dochází k vylučování pevné fáze slitiny na rozhraní substrátu a katalyzátoru (viz Obrázek 3.2)[16].

Pro VLS metodu je důležitým parametrem teplota. Pokud totiž není katalyzátor v kapalném stavu, probíhá celý proces mnohem pomaleji. Na druhou stranu však můžeme mít větší kontrolu nad složením a strukturou. Této příbuzné metodě k VLS se říká *Vapor-solid-solid* (VSS). Potřebná teplota závisí na druhu katalyzátoru a jeho velikosti, přičemž se zmenšující se velikostí potřebná teplota roste. A protože průměr nanodrátu závisí na velikosti roztavené kapky, tak pro růst nanodrátů s menším průměrem potřebujeme větší

depoziční teplotu. Je možné použít i jiné katalyzátory než tradiční zlato (například Ni, Cu, Ag, Pt), ty však vyžadují vyšší depoziční teplotu [5, 15].



Obrázek 3.2: Schéma VLS růstu polovodičových nanodrátů. Překresleno podle [17].

3.1.3. Chemická depozice z plynné fáze

Chemická depozice z plynné fáze (angl. Chemical vapor deposition – CVD) je velká skupina metod rozvíjejících se od 60. let 20. století, pro které je společné použití plynného prekursoru¹. Depozice probíhá obvykle ve vakuové komoře, kde je vzorek vystaven plazmatu nebo zahřátému plynu nesoucímu dané prekuzory. Na povrchu vzorku poté dochází k růstu vrstvy [5]. Velkou výhodou těchto metod je možnost připravovat nanodráty ze sloučin (například z GaN) použitím více prekursorů. Existuje několik modifikací této metody [15]:

- *ALCVD* (epitaxní růst atomových vrstev z angl. Atomic layer CVD) – dvouprekursorový proces, při kterém jeden z nich adsorbuje na povrch substrátu, ale k reakci dojde až za přítomnosti druhého prekursoru [18].
- *MOCVD* (z angl. Metal organic CVD) – jako prekuzory jsou používány organokovové² látky [18].
- *PECVD* (CVD podporované plasmatem angl. plasma enhanced CVD) – pro iniciaci chemických reakcí je využívána plasma, která umožňuje snížit depoziční teplotu [18].

Příprava monokrystalických magnetických nanodrátů

Magnetické monokrystalické nanodráty, kterým se budu věnovat v praktické části této práce, byly vyrobeny ve spolupráci s Technickou univerzitou v Sydney metodou chemické depozice z plynné fáze. Obvykle se kovové nanodráty vyrábějí elektrodpozicí v šablonách. Takhle se zatím ale podařilo připravit pouze nanodráty s malým průměrem, velkou drsností a velkým množstvím defektů. Vyrobit kovové monokrystalické nanodráty v dobré kvalitě a velké hustotě je obtížné [19]. Tento proces je složitější než ty dosud popsané a kvůli přímé návaznosti na předloženou práci mu budou věnovány následující řádky.

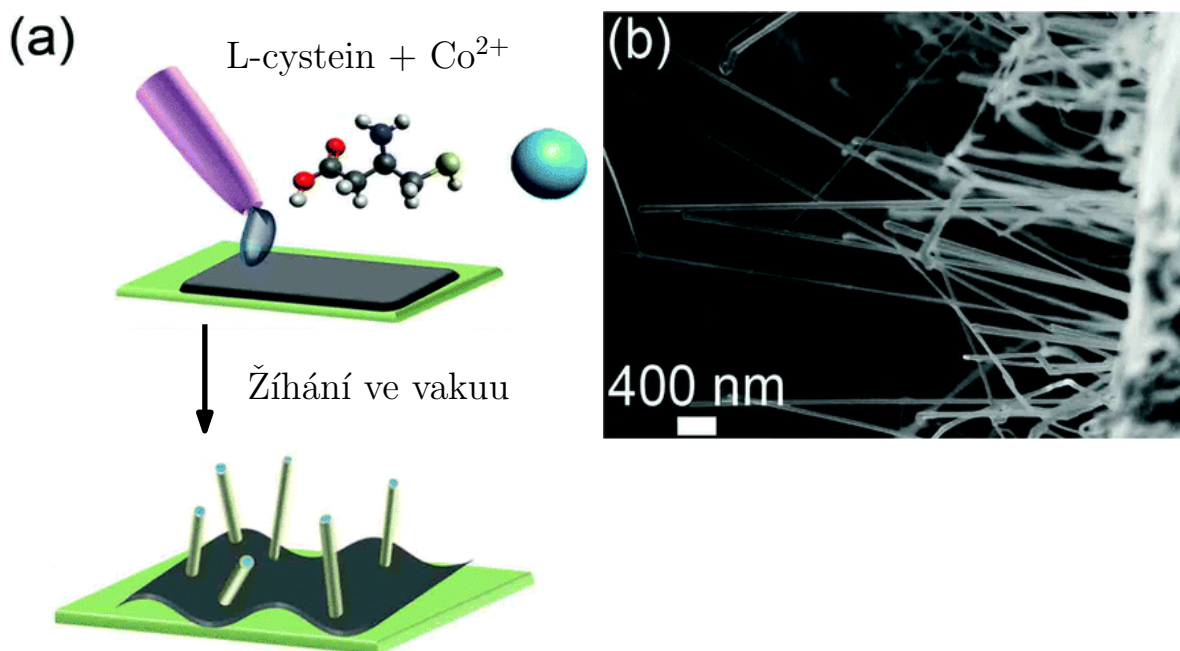
Touto metodou se připravují Co, Ni, NiCo, CoFe a NiFe nanodráty. Proces je redukcí kovového nitridového prekursoru, který na začátku procesu vzniká reakcí kovové soli a dusíku. Redukce probíhající za přítomnosti thiolů (sirných alkoholů) a teplotě 500–600 °C

¹Látka určená k chemické reakci.

²Chemické sloučeniny obsahující vazbu mezi atomy uhlíku a kovu např. ethoxid tantaličný.

vede k růstu kovových nanodrátků. Síra z thiolů hraje v procesu důležitou roli, protože zajišťuje růst jen v jedné ose pasivací již narostlého povrchu. Proces může probíhat s nitrídným prekursorem v plynné nebo kapalně fázi. Možná je i kombinace obou fází [19].

Příprava je možná různými modifikacemi základního procesu, které se liší v postupu i použitých chemikáliích. Proces probíhá na křemíkových vzorcích s vrstvou termálního oxidu silnou 100 nm. Každý vzorek velký $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ se 10 minut čistí postupně v acetonu, isopropyl alkoholu a destilované vodě za pomoci ultrazvuku. Kobaltový acetát a L-cystein ($\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_2\text{S}$) jsou rozpuštěny v destilované vodě bez dalších čistících procedur. Tento roztok je 5 minut ultrazvukován a při $100\text{ }^\circ\text{C}$ napipetováním přenesen na substrát. Ten je pak umístěn do vakuové komory a zahřát na $550\text{ }^\circ\text{C}$ – $600\text{ }^\circ\text{C}$. Růst pak probíhá po dobu 1 hodiny za tlaku 10^{-5} mbar [19]. Proces je znázorněn na Obrázku 3.3.



Obrázek 3.3: a) Schéma procesu výroby Co nanodrátků. b) Snímek Co nanodrátků z řádkovacího elektronového mikroskopu (SEM). Adaptováno z [19].

- Při první modifikaci tohoto procesu se vzorek zahřeje na $145\text{ }^\circ\text{C}$ a umístí do komory s plynným $\text{Co}(\text{CO})_3\text{N}$ při $0,27\text{ mbar}$. Po 20 minutách je $\text{Co}(\text{CO})_3\text{N}$ vyčerpán a do komory je při tlaku $0,13\text{ mbar}$ vpuštěn amoniak a butanthiol. Vzorek je pak zahříván po jednu hodinu na $60\text{ }^\circ\text{C}$ [19].
- Při druhé modifikaci jsou kobaltový acetát a serin ($\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_3$) rozpuštěny v etanolu. Vzorek je dán do komory, která je následně vyčerpána na $0,03\text{ mbar}$. Do komory je pak vpuštěn butanthiol a vzorek je postupně ($30\text{ }^\circ\text{C}$ za minutu) zahříván na $550\text{ }^\circ\text{C}$. Na této teplotě vzorek v komoře zůstane jednu hodinu [19].
- Při třetí modifikaci je kobaltový acetát rozpuštěn v destilované vodě. Tento roztok je pak napipetován na vzorek o teplotě $100\text{ }^\circ\text{C}$, který je následně umístěn do komory

s tlakem 0,03 mbar. Do komory je vpuštěn amoniak (0,4 mbar) a vzorek je zahříván na 350 °C. Po hodině je amoniak nahrazen butantiolem, ve kterém je vzorek hodinu ponechán při teplotě 550 °–600 °C [19].

3.2. Top-down metody

Průmyslovým standardem pro výrobu nanodráťů *top-down* metodami je optická litografie, na kterou navazuje elektronová litografie a litografie prováděná pomocí rastrování hrotem [11].

3.2.1. Optická litografie

Její podstatou je definované osvětlení rezistu (fotocitlivá makromolekulární látka) fotony. Podle principu můžeme rezisty dělit na pozitivní a negativní. Při práci s pozitivním rezistem je naexponované místo narušeno a následně odplaveno v tzv. vývojce. U negativního rezistu je naexponované místo vytvrzeno a ve vývojce se odplaví nenaexponovaný rezist.

Tato metoda se dále vyvíjí hlavně směrem inovace rezistů a optiky – zkracování vlnové délky použitého světla, což umožňuje vyrábět menší struktury. Existuje tak ultrafialová a rentgenovská litografie. Imerzní optická litografie neprobíhá ve vzduchu, ale v prostředí s vyšším indexem (např. voda), což také vede ke zmenšení minimálního možného zobrazeného rozměru ve fotorezistu. Litografické masky můžeme také použít na zakrytí povrchu při vyleptávání nanodráťů [11].

3.2.2. Elektronová litografie

Elektronová litografie pracuje na stejném principu jako optická, jen místo fotonů používá elektrony, čímž může dosáhnout menších vyrobených struktur. Na druhou stranu je ale pomalejší (má menší stopu), což se projevuje hlavně při zápisu velkých ploch. Podílí se také na ostatních litografických metodách například výrobou masek [11]. Detailněji o elektronové litografii pojednává například [20].

3.2.3. Litografie pomocí rastrování hrotem

Rezist nebo přímo povrch mohou být upravovány také pomocí hrotu (nejčastěji AFM – mikroskopie atomárních sil). Lokální oxidační nanolitografie využívá vzdušné vlhkosti pro zoxidování povrchu na přesně definovaném místě. AFM litografie používá hrot k mechanickému vytvoření vzoru. STM (tunelovací mikroskopie) litografie pak lokálně povrch dopuje [11].

3.3. Využití nanodráťů

V předchozích odstavcích byly ukázány některé zajímavé vlastnosti nanodráťů, které jsou často nastavitelné změnou rozměrů. V dnešní době je velká snaha tyto vlastnosti využít k různým aplikacím. Tomu napomáhá i pokrok v metodách jejich přípravy, které jsou levné a schopné produkovat velké množství nanodráťů.

- Jedná se například o **mikroelektroniku**, kde se v integrovaných obvodech díky využití nanostruktur vejde více komponentů na čip, jsou rychlejší, levnější a mají menší spotřebu energie. Díky malým rozměrům struktur není nutné se při výběru materiálu ohlížet na jeho cenu a je tak možné zvolit ten nejvhodnější. Již existující prototypy součástek jsou například unipolární a bipolární transistory, p–n přechody, rezonanční tunelovací diody nebo logická hradla [5].
- Účinnost **termoelektrických součástek** (např. převaděč mezi elektrickou a tepelnou energií – Peltierův článek) je závislá na parametrech měnících se s rozměry. S použitím nanodrátů je tak možné dosáhnout u těchto součástek vyšší účinnosti [15].
- Další oblastí, pro kterou jsou nanostruktury zajímavé, je **uchování informací**. Velký poměr délky a průměru způsobuje, že směr magnetizace není natáčen tepelnými kmity, což by vedlo ke ztrátě dat. Tomuto nežádoucímu jevu lépe odolávají jednodoménné monokrystalické nanodráty, které budou zkoumány v praktické části. Pole nanodrátů může poskytnout paměť až 10^{13} bitů/cm². Tohle omezení plyne z minimální vzdálenosti mezi jednotlivými nanodráty, při jejímž překročení se dráty začnou vzájemně ovlivňovat dipólovými interakcemi [15].
- Nanostruktury se dají využít i v **medicině** nebo **environmentálních vědách**. Díky jejich nízkému poměru objemu a povrchu jsou jejich elektrické vlastnosti extrémně citlivé na částice adsorbované na povrchu, což nám umožňuje sledování určitých molekul. Absorbovaná částice rozptýlí vodivostní elektrony, čímž klesne elektrická vodivost. Takovými senzory můžeme určovat například výskyt NO₂, který je součástí výfukových plynů a způsobuje kyselé deště a narušuje ozonovou vrstvu [7]. Další senzory mohou měřit pH nebo detekovat streptavidin z biomolekul [15].
- Zajímavou aplikací je také využití pro **čárové kódy**, kde se využívá odrazu světla na nanodrátu složeného střídavě ze zlatých a stříbrných komponent [15].

4. Základy magnetizmu

Pro pochopení magnetizmu je nutné podívat se na úroveň samotných atomů, tedy do mikrosvěta. Tato kapitola pojednává o některých základních magnetických pojmech potřebných k pochopení magnetických vlastností diskutovaných v této práci.

4.1. Magnetický moment atomu

Základní magnetickou charakteristikou volného atomu je jeho magnetický dipólový moment $\vec{\mu}$. K celkovému momentu přispívá jak elektronový obal, tak jádro. Příspěvek od jádra je ale vlivem větší hmotnosti řádově 10^3 krát menší než příspěvek od elektronového obalu. Chceme-li tedy proniknout do magnetických vlastností látek, musíme se detailněji zaměřit na magnetický moment elektronu. Ten se skládá ze spinového a orbitálního příspěvku. Oba příspěvky jsou závislé a jejich vztah je popsán spin-orbitální interakcí.

- **Spinový magnetický moment**

Tato čistě kvantová veličina je vyvolána tzv. vnitřním momentem hybnosti neboli spinem elektronu $\vec{S}$ [21]:

$$\vec{\mu}_S = -\frac{e}{m_e}\vec{S}. \quad (4.1)$$

Měřitelná je však pouze její složka ve zvoleném směru z , která nezávisle na zvoleném směru nabývá dvou diskretních hodnot:

$$\mu_{S,z} = \pm \frac{e\hbar}{2m_e}, \quad (4.2)$$

kde e je elementární náboj, $\hbar$ redukovaná Planckova konstanta a m hmotnost elektronu.

Dva možné spinové stavy se často vyjadřují jako $\uparrow$ a $\downarrow$. Hovoříme-li o elektronu se spinem $\uparrow$, znamená to, že jeho magnetický moment je ve směru kladné osy z . Stav elektronu lze vyjádřit jako superpozici spinů v Diracově symbolice:

$$|\Psi\rangle = \alpha |\uparrow\rangle + \beta |\downarrow\rangle, \quad (4.3)$$

kde α a β jsou amplitudy pravděpodobnosti výskytu v daném stavu. Aby měla funkce Ψ fyzikální význam musí platit rovnice $\alpha^2 + \beta^2 = 1$.

- **Orbitální magnetický moment**

Tento moment je vyvolán pohybem elektronu kolem jádra. V analogii s klasickou fyzikou si toto můžeme představit jako proudovou smyčku, po které se pohybuje jeden náboj. Orbitální moment takové smyčky lze vyjádřit vztahem [21]

$$\mu_{\text{orb}} = IS, \quad (4.4)$$

kde I je proud vytvořen obíhajícím nábojem a můžeme ho vyjádřit jako prošlý náboj za čas $I = \frac{e}{2\pi r/v}$ a $S = \pi r^2$ je plocha proudové smyčky. Pro μ_{orb} tedy dostáváme:

$$\mu_{\text{orb}} = \frac{evr}{2} \quad (4.5)$$

Takto pohybující se elektron má moment hybnosti:

$$\vec{L} = m_e \vec{r} \times \vec{v}, \quad (4.6)$$

jehož velikost je kvantována pomocí vedlejšího kvantového čísla l :

$$L = \hbar \sqrt{l(l+1)}. \quad (4.7)$$

Vedlejší kvantové číslo l může nabývat celočíselných hodnot $l = 0, 1, \dots, n-1$, kde n je hlavní kvantové číslo, které je dáno slupkou, ve které se elektron nachází a je úměrné energii. Vedlejší kvantové číslo l zase vyjadřuje pravděpodobnost výskytu elektronu kolem jádra (tvar orbitalu).

Ze vztahů 4.5 a 4.6 plyne vztah mezi magnetickým orbitálním momentem a momentem hybnosti:

$$\vec{\mu}_{\text{orb}} = -\frac{e}{2m_e} \vec{L}. \quad (4.8)$$

Záporné znaménko vyplývá z opačné orientace vektorů $\vec{\mu}_{\text{orb}}$ a $\vec{L}$. Můžeme však opět měřit pouze průmět do směru z , který je kvantován podle magnetického kvantového čísla m_l , které může nabývat hodnot $m_l = -l, (-l+1), \dots, 0, \dots, (l-1), l$

$$\mu_{\text{orb},z} = -m_l \frac{e\hbar}{2m_e} = -m_l \mu_B, \quad (4.9)$$

kde výraz $\frac{e\hbar}{2m_e}$ nazýváme Bohrovým magnetonem μ_B .

• Spin-orbitální interakce

Celkový moment hybnost $\vec{J}$ je vektorovým součtem spinového a orbitálního momentu hybnosti:

$$\vec{J} = \vec{L} + \vec{S}. \quad (4.10)$$

Tyto dva momenty hybnosti však nelze považovat za nezávislé, neboť jsou navzájem provázány spin-orbitální interakcí. Velikost celkového momentu hybnosti je kvantována podle kvantového čísla j , které nabývá hodnot $|l - 1/2|$ nebo $l + 1/2$ a platí pro ni vztah:

$$J = \hbar \sqrt{j(j+1)}. \quad (4.11)$$

Stejně jako celkový moment hybnosti můžeme získat i celkový magnetický moment:

$$\vec{\mu} = \vec{\mu}_{\text{orb}} + \vec{\mu}_S = -\frac{e}{2m_e} \vec{L} - 2\frac{e}{2m_e} \vec{S}. \quad (4.12)$$

Po vytknutí můžeme celkový moment vyjádřit jako:

$$\vec{\mu} = -\frac{e}{2m_e} (\vec{L} + 2\vec{S}) = -\frac{e}{2m_e} g_j \vec{J}, \quad (4.13)$$

kde g_j je Landého faktor, který zohledňuje nestejně velký příspěvek orbitálního a spinového momentu¹. Landého faktor se dá vyjádřit jako:

$$g_j = \frac{3}{2} + \frac{S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)}. \quad (4.14)$$

¹Příspěvek spinového magnetického momentu je přibližně dvojnásobný.

4.2. Magnetické vlastnosti pevných látek

Předchozí odstavce se zabývaly magnetizmem na atomární úrovni. Poskládáme-li ale atomy do krystalové struktury pevné látky, přestává popis pomocí magnetický momentů jednotlivých elektronů stačit a musíme definovat nové veličiny. K popisu magnetického pole v látce o objemu ΔV se definuje vektor magnetizace $\vec{M}$, který vyjadřuje objemovou hustotu magnetického momentu:

$$\vec{M} = \frac{1}{\Delta V} \sum_i \vec{\mu}_i, \quad (4.15)$$

kde i indexuje všechny magnetické dipólové momenty v objemu ΔV . Každá látka má charakteristickou maximální hodnotu magnetizace M_S , která se nazývá saturační. Saturace je stav, kdy zvýšení externího magnetického pole nevede k dalšímu nárustu magnetizace.

Chování látek ve vnějším magnetickém poli udává magnetická susceptibilita χ , která vyjadřuje závislost magnetizace dané látky na vnějším poli jako:

$$\vec{M} = \chi \vec{H}. \quad (4.16)$$

Výjimku tvoří feromagnetické látky, pro které tato lineární závislost neplatí. Více viz sekce 4.3.3. Pro ostatní materiály s magnetizací $\vec{M}$, které jsou ve vnějším poli $\vec{H}$, pak můžeme magnetickou indukci $\vec{B}$ psát jako:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}). \quad (4.17)$$

Tento vztah můžeme pomocí rovnice 4.16 upravit na:

$$\vec{B} = \mu_0(1 + \chi)\vec{H} = \mu_0\mu_r\vec{H}, \quad (4.18)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua² a μ_r je relativní permeabilita dané látky. Ve většině reálných krystalů závisí magnetizace $\vec{M}$ na orientaci vnějšího pole vůči krystalové struktuře. Vektory $\vec{M}$ a $\vec{H}$ tedy nemusí mířit stejným směrem a magnetická susceptibilita χ je směrově závislá a musí být definována jako tenzor a vztah 4.16 přejde na:

$$\vec{M}_i = \chi_{ij}\vec{H}_j, \quad (4.19)$$

kde indexy i a j mají význam směrů v kartézském souřadném systému.

4.3. Druhy magnetických látek

Jak už bylo ukázáno v sekci 4.1, každý elektron má orbitální a spinový moment, které se dohromady skládají. Pokud je látka magnetická, tak součet magnetických momentů vytváří makroskopické magnetické pole. Existuje několik základních druhů magnetických látek, které budou popsány v dalších odstavcích.

² $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{N} \cdot \text{A}^{-2}$.

4.3.1. Diamagnetické látky

Diamagnetizmus je jev, který vykazují všechny látky. Ostatní magnetické jevy jsou ale mnohem silnější a pokud jsou v látce přítomny, tak diamagnetizmus překryjí. Za diamagnetickou látku se pak obvykle označuje taková, která vykazuje pouze diamagnetizmus. Umístěním látky do vnějšího magnetického pole $\vec{B}_{\text{ext}}$ se vytvoří v jejích atomech magnetické dipólové momenty směřující proti vnějšímu poli. Tyto momenty dohromady dávají slabé magnetické pole. Po vyjmutí z vnějšího pole $\vec{B}_{\text{ext}}$ dipólové momenty i pole nimi způsobené zmizí [21].

4.3.2. Paramagnetické látky

Paramagnetizmus vykazují všechny látky s nenulovým momentem hybnosti elektronů ve svých atomech. Ten může být způsoben například lichým počtem elektronů. Každý atom paramagnetické látky má i bez vnějšího zásahu svůj magnetický dipólový moment, který je však náhodně orientován. V součtu od všech elektronů tedy nevzniká žádné magnetické pole. To vznikne až při vložení do $\vec{B}_{\text{ext}}$, které magnetické dipólové momenty částečně natočí do svého směru a tím vznikne i magnetické pole v látce. Vzniklé uspořádání zanikne při vytažení látky z $\vec{B}_{\text{ext}}$ [21].

Susceptibilita paramagnetických látek se řídí Curieovým zákonem [22]:

$$\chi(T) = \frac{C}{T}, \quad (4.20)$$

kde C je Curieova konstanta pro daný materiál a T je absolutní teplota.

4.3.3. Feromagnetické látky

Feromagnetismus je silnou formou magnetismu, kterou vykazují některé prvky v důsledku kvantového jevu zvaného výměnná interakce a díky němu například permanentní magnety vytvářejí magnetické pole ve svém okolí. Ve feromagnetech se v určitých oblastech, zvaných domény, orientují magnetické momenty souhlasně. Vložíme-li takovou látku do vnějšího magnetického pole $\vec{B}_{\text{ext}}$, natočí se magnetické oblasti domén stejným směrem, čímž vznikne silné magnetické pole látky, které částečně přetrvává i po vytažení z vnějšího pole $\vec{B}_{\text{ext}}$. Mezi feromagnetické látky patří železo, nikl, kobalt a jejich slitiny [21].

Jak již bylo zmíněno v sekci 4.2, pro feromagnetické látky není magnetická susceptibilita konstantní, ale je teplotně závislá. Tuto závislost vyjadřuje Curieův-Weissův zákon [23]:

$$\chi = \frac{C}{T - T_C}, \quad (4.21)$$

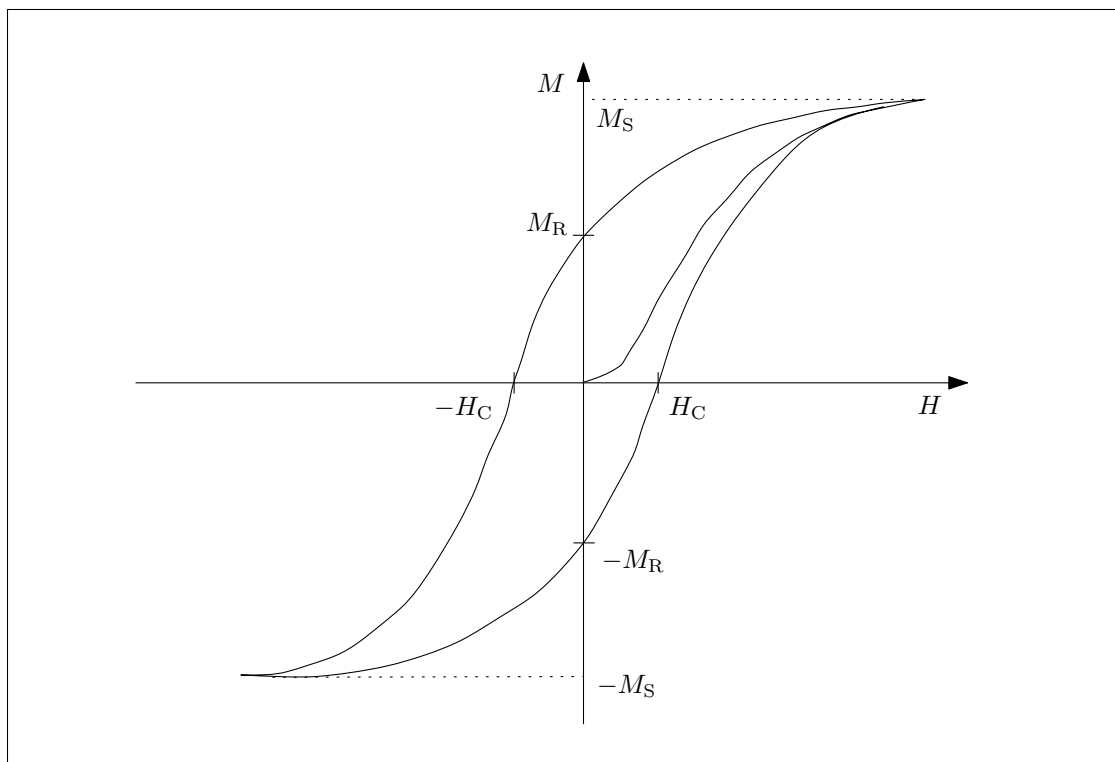
kde T je aktuální teplota a T_C Curieova teplota, což je taková teplota, nad kterou látka ztrácí své feromagnetické vlastnosti³.

Jevu, kdy pro feromagnetika neplatí přímá úměra mezi $\vec{M}$ a $\vec{H}$, říkáme hystereze. Typická hysterezní křivka je ilustrována na Obrázku 4.1.

Část hysterezní křivky začínající v bodě s nulovou magnetizací i vnějším magnetickým polem a pokračující za zvyšujícího se $\vec{H}$ i $\vec{M}$ se nazývá křivka prvotní magnetizace. Tato křivka pokračuje až do maximální – satureované magnetizace M_S . Při následném snížení

³Např. pro železo $T_C = 1043 \text{ K}$ [21].

vnějšího pole na nulovou hodnotu se látka nevrátí do původního stavu, ale zachová si zbytkovou remanentní magnetizaci M_R . Aby bylo dosaženo stavu s nulovou magnetizací, je nutné působit opačně orientovaným polem s velikostí H_C , kterému se říká koercitivní pole. Další snižování pole vede k opačné saturaci.



Obrázek 4.1: Hysterezní křivka.

4.3.4. Antiferomagnetické látky

Antiferomagnetická látka je charakterizována zápornou výměnou interakcí (viz sekce 4.4.1), která způsobuje preferovanou antiparalelní orientaci mezi sousedními magnetickými momenty a celková magnetizace je tak nulová [23]. Mezi příklady antiferomagnetických látek patří FeRh, FeMn nebo IrMn. Každá antiferomagnetická látka má svou charakteristickou Néelovu teplotu T_N , po jejímž překonání dochází k transformaci na paramagnetickou látku.

4.4. Energie mikromagnetických systémů

Rovnovážný stav uspořádání magnetizace je výsledkem několika souběžně působících interakcí, které jsou obvykle popisovány pomocí energie. Následující odstavce představí některé z nich. Tyto energie jsou důležité proto, že se látka snaží zaujmout stav s minimální celkovou energií.

4.4.1. Výměnná energie

Pro popis této energie je nejprve nutné si zavést tzv. výměnný integrál $\mathcal{J}$. V rovnici 4.22 $\mathcal{J}$ vystupuje jako konstanta úměrnosti. Pro dva elektrony je energetický příspěvek vzniklý orientací jejich spinů dán hamiltoniánem [1]:

$$\mathcal{H} = -2\mathcal{J}\hat{S}_1 \cdot \hat{S}_2 = -2\mathcal{J}S_1S_2 \cos \alpha, \quad (4.22)$$

kde $\hat{S}_1$ a $\hat{S}_2$ jsou bezrozměrné spinové operátory a α úhel mezi spiny. Pokud je $\mathcal{J} > 0$, jsou spiny orientovány paralelně a pokud $\mathcal{J} < 0$, jsou orientovány antiparalelně. V případě víceelektronového systému přejde vztah 4.22 na:

$$\mathcal{H} = -2 \sum_{i>j} \mathcal{J}_{ij} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j. \quad (4.23)$$

Detailněji výměnný integrál rozebírá např. [1].

Interakční výměnná energie mezi atomy je dána rovnicí 4.22. V mikromagnetizmu nelze z praktických důvodů uvažovat interakce mezi jednotlivými atomy. Proto se magnetizace aproximuje jako spojitá funkce přes prostorové souřadnice. V aproximaci kontinua je výměnná energie dána tvarem [1]:

$$E_{\text{ex}} = \int_V A \left(\nabla \frac{M_i}{M_S} \right)^2 dV, i = x, y, z, \quad (4.24)$$

kde A je koeficient výměnné interakce⁴, M_i jsou složky vektoru magnetizace a M_S je saturační magnetizace.

Minimalizace výměnné energie pro $\mathcal{J} > 0$ způsobuje tendenci k souhlasné orientaci spinů látky. Pokles výměnné energie s velikostí materiálu vede ke zvýšení vlivu magnetostatické energie a ke vzniku magnetických domén [24].

4.4.2. Energie anizotropie

Anizotropní látky jsou takové, které mají preferované směry magnetizace (tzv. osy snadné magnetizace), které v krystalu feromagnetické látky typicky míří v určitých krystalografických směrech. Odchylna magnetických momentů od snadné osy magnetizace (např. v hexagonálním krystalu kobaltu) vyvolává nárůst energie, který je v případě uniaxiální anizotropie popsán vztahem:

$$E_A = \int_V K \sin^2 \theta dV, \quad (4.25)$$

kde K je konstanta anizotropie a θ úhel mezi magnetizací a snadnou osou magnetizace. Anizotropie má původ v krystalové mřížce materiálu a lze ji také indukovat magnetickým polem v průběhu depozice vrstvy [25].

⁴Např. pro NiFe $A = 13 \text{ pJm}^{-1}$.

4.4.3. Zeemanova energie

Vložíme-li materiál do vnějšího magnetického pole o intenzitě $\vec{H}$, získá v důsledku toho zmagnetovaný materiál potenciální energii, která se nazývá Zeemanova:

$$E_Z = -\mu_0 \int_V \vec{M} \cdot \vec{H} dV. \quad (4.26)$$

Záporné znaménko v rovnici 4.26 způsobuje, že minimální Zeemanově energii odpovídá stav se stejně směřujícími vektory $\vec{H}$ a $\vec{M}$. Společně s výměnou energií proto Zeemanova energie způsobuje tendenci látky k jednodoménovému uspořádání.

4.4.4. Dipolární energie

Při definování magnetických pojmů v sekci 4.1 jsme elektronu přiřadili magnetický dipólový moment. Dipolární energie je podobná Zeemanově energii. Zdrojem magnetického pole je ale materiál sám sobě [24]. Pro energii E_d vzájemné dipól-dipólové interakce v magnetickém objemu můžeme psát:

$$E_d = -\frac{1}{2} \sum_{i,j \neq i} \vec{\mu}_i \cdot \vec{B}_{ij}, \quad (4.27)$$

kde $\vec{\mu}_i$ je magnetický dipólový moment v bodě r_i a $\vec{B}_{ij}$ je magnetická indukce v tomto bodě způsobená magnetickým dipólovým momentem $\vec{\mu}_j$ z bodu r_j .

Máme-li magnetickou látku bez protékajících proudů, můžeme nahradit $B_i = \mu_0 \vec{H}_d$, kde $\vec{H}_d$ je tzv. demagnetizační nebo rozptylové pole, které vzniká jen magnetizací $\vec{M}$ dané látky. Rovnici 4.27 můžeme přepsat:

$$E_d = -\frac{1}{2} \mu_0 \int_V \vec{M} \cdot \vec{H}_d dV = \frac{1}{2} \mu_0 (\hat{N} \vec{M}) \vec{M} V, \quad (4.28)$$

kde $\hat{N}$ je demagnetizační tenzor, který vystupuje v roli úměry mezi demagnetizačním polem a magnetizací, která ho způsobila.

Demagnetizační tenzor $\hat{N}$ je tvarově závislý, což způsobuje vznik magnetostatické tvarové anizotropie. Ve zvláštním případě dlouhého válce – nanodrátu zmagnetovaného podél jeho dlouhé osy nabývá tenzor hodnoty:

$$\hat{N}_{\text{válec}} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (4.29)$$

Při absenci externího pole a s respektováním Maxwellovy rovnice $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ můžeme z rovnice 4.17 odvodit vztah $\nabla \cdot \vec{H}_d = -\nabla \cdot \vec{M}$. Z této rovnice vyplývá, že divergence magnetizace způsobuje vznik demagnetizačního pole $\vec{H}_d$ a s ním spojený nárůst dipolární energie. Vztah $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ se dá interpretovat také tak, že neexistují zdroje pole $\vec{B}$. Není ovšem žádný důvod, aby totéž platilo pro $\vec{H}$ a $\vec{M}$. Tato myšlenka nás vede ke konceptu magnetických nábojů.

4.4. ENERGIE MIKROMAGNETICKÝCH SYSTÉMŮ

V analogii s elektrostatikou můžeme definovat objemovou (ρ_m) a plošnou (σ_m) hustotu magnetického náboje:

$$\rho_m = -\mu_0 \vec{\nabla} \cdot \vec{M} = \mu_0 \vec{\nabla} \cdot \vec{H}, \quad (4.30)$$

$$\sigma_m = \mu_0 \vec{n} \cdot \vec{M}, \quad (4.31)$$

kde vektor $\vec{n}$ je normálový vektor povrchu obklopujícího magnetický náboj. Aplikujeme-li tyto poznatky na magnetické nanodráty, získáme u nanodrátu s magnetizací podél jeho dlouhé osy divergenci magnetizace, čili nenulovou objemovou hustotu magnetického náboje, pouze na koncích nanodrátu. Při zmagnetování nanodrátu kolmo na jeho dlouhou osu je nenulová divergence magnetizace na mnohem větší ploše povrchu nanodrátu. První stav s magnetizací podél dlouhé osy drátu má menší dipolární energii oproti stavu, kdy je magnetizace kolmá na dlouhou osu nanodrátu. Tomuto důsledku se říká tvarová anizotropie, protože tento nárůst je dán pouze geometrií nanodrátu.

4.4.5. Celková energie

Ve vzorku jsou najednou přítomny všechny druhy energie 4.4.1 – 4.4.4. Pro celkovou energii E_C tedy můžeme psát:

$$E_C = E_{\text{ex}} + E_A + E_Z + E_d. \quad (4.32)$$

Látka se snaží dostat do ustáleného stavu minimalizací celkové energie E_C . Řešení tohoto problému navržené Brownem [26] definuje efektivní magnetické pole $\vec{H}_{\text{eff}}$, které v sobě zahrnuje všechny interakce a je dáno vztahem:

$$\vec{H}_{\text{eff}} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial E_C}{\partial \vec{M}}. \quad (4.33)$$

Zápis $\frac{\partial E_C}{\partial \vec{M}}$ je dle [1] ekvivalentní se zápisem $\frac{1}{M} [\frac{\partial E_C}{\partial \vec{e}_{Mx}}, \frac{\partial E_C}{\partial \vec{e}_{My}}, \frac{\partial E_C}{\partial \vec{e}_{Mz}}]$, kde $\vec{e}_{Mx}$, $\vec{e}_{My}$, $\vec{e}_{Mz}$ jsou složky jednotkového vektoru magnetizace $\vec{e}_M$.

Podmínkou pro dosažení rovnovážného stavu je druhá Brownova rovnice:

$$\vec{M} \times \vec{H}_{\text{eff}} = \vec{0}. \quad (4.34)$$

Časový vývoj magnetizace popisuje Landau-Lifshitz-Gilbert rovnice [27, 1, 22]. Na základě těchto rovnic pracují některé mikromagnetické numerické simulace.

5. Magnetorezistence

Magnetorezistence (MR) je vlastnost materiálu, která zapříčiňuje změnu odporu R v závislosti na stavu magnetizace uvnitř materiálu. Jednou z možností, jak ji lze kvantitativně popsat je pomocí poměru změny odporu a hodnoty v saturaci R_{sat} :

$$\text{MR} = \frac{R - R_{\text{sat}}}{R_{\text{sat}}}. \quad (5.1)$$

V některých případech může být vhodné použít jinou referenční hladinu, například odpor v nulovém magnetickém poli. Obě tyto definice se potýkají s některými nevýhodami. Pro odpor v saturaci je nutné mít k dispozici dostatečné pole pro její dosažení. Do odporu v nulovém poli se zase promítá historie vzorku. Ke změně odporu může dojít různými mechanismy. Hovoříme proto u druhých magnetorezistence. Těm nejdůležitějším se budeme věnovat v této kapitole.

5.1. Anizotropní magnetorezistence

Odpor feromagnetických látek závisí na úhlu mezi magnetizací $\vec{M}$ a proudovou hustotou $\vec{j}$ procházející strukturou. Tohoto si jako první všiml lord Kelvin v roce 1856, kdy zjistil zvýšení odporu železa pro magnetické pole orientované stejným směrem jako proudová hustota. Při kolmém magnetickém poli na proud se odpor zvýšil o něco méně. Stejný experiment poté zopakoval i s niklem a pozoroval obdobný efekt s větší amplitudou. Tento jev dostal název anizotropní magnetorezistence (AMR) [28].

Změny odporu způsobené AMR jsou oproti jiným druhům magnetorezistence dosti malé (maximálně 3%). Můžeme definovat dvě rezistivity: $\rho_{\parallel}$ pro rovnoběžné vektory $\vec{M}$ a $\vec{j}$ a $\rho_{\perp}$ pro kolmé vektory $\vec{M}$ a $\vec{j}$. Výslednou rezistivitu pak lze psát jako [1]:

$$\rho(\varphi) = \rho_{\perp} + (\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}) \cos^2 \varphi, \quad (5.2)$$

kde φ je úhel mezi $\vec{M}$ a $\vec{j}$. Z rovnice 5.2 plyne, že pro proudovou hustotu rovnoběžnou s magnetizací naměříme maximální rezistivitu $\rho_{\parallel}$. Naopak pro proudovou hustotu kolmou k magnetizaci naměříme minimální rezistivitu $\rho_{\perp}$. Největší citlivost změny rezistivity na úhlu plyne ze vztahu $d^2\rho/d\varphi^2 = 0$. Po dosazení z rovnice 5.2 dostáváme nejvyšší citlivost pro $\varphi = \pi/4$, čehož je využíváno v AMR senzorech.

Když proud teče v jednoduchém směru anizotropie (např. podél dlouhé osy drátu) může být tento jev popsán tvarovou anizotropií struktury (drátu) pomocí anizotropní konstanty K_u . Pokud je vnější pole kolmé na proudovou hustotu $\vec{j}$ můžeme úhel φ získat z rovnice pro volnou energii systému [1]:

$$E = M_S H' \sin \varphi + K_u \cos^2 \varphi \quad (5.3)$$

její minimalizací pro φ . Pro φ tedy získáváme vztah:

$$\sin \varphi = M_S H / 2K_u, \quad (5.4)$$

jehož dosazením do rovnice 5.2 získáváme závislost rezistivity na vnějším poli:

$$\rho(H) = \rho_{\perp} \left[1 + \frac{\Delta\rho}{\rho_{\perp}} \left(1 - \frac{M_S^2 H^2}{4K_u^2} \right) \right]. \quad (5.5)$$

5.1.1. Mikromagnetické simulace pomocí programu MuMax3

Pro porovnání výsledku z experimentální části byl jev AMR na NiFe nanodrátu nasimulován v programu MuMax3 [29]. Tento mikromagnetický simulační program řeší časovou a prostorovou závislost magnetizace za pomoci metody konečných diferencí. Celý prostor je rozdělen do buněk a každé z nich je přidělen vlastní vektor magnetizace.

Byly nasimulovány tři případy pro NiFe drát o rozměrech rozměry $1\text{ }\mu\text{m} \times 100\text{ nm} \times 100\text{ nm}$, které jsou vyneseny v Obrázku 5.1. Lišily se v úhlu θ mezi nanodrátem (respektive proudovou hustotou $\vec{j}$, která jím protéká) a vnějším magnetickým polem $\vec{B}$, do kterého je nanodráť vložen. Toto pole se měnilo v rozmezí od -1 T do 1 T.

Tři simulované případy podle úhlu θ mezi $\vec{j}$ a $\vec{B}$:

- $\theta = 90^\circ$ tzv. osa obtížné magnetizace,
- $\theta = 45^\circ$,
- $\theta = 1^\circ$ tzn. směr blízký ose snadné magnetizace.

U osy snadné magnetizace musel být zadán úhel $\theta = 1^\circ$ a ne 0° , jak by bylo očekávané, protože simulace byla provedena při nulové teplotě, což zabraňuje realistickému přepnutí směru magnetizace z důvodů termální povahy inicializace přepínání.

Výstupem ze simulace v programu MuMax3 je textový soubor se složkami magnetizace m_x, m_y, m_z a složkami magnetického pole B_x, B_y, B_z aplikovanými v daném kroku. Uvažujeme-li jednotkový vektor proudové hustoty j_x podél dlouhé osy drátu, pak ze vzorce pro skalární součin:

$$\vec{j} \cdot \vec{M} = |j||M| \cos \theta \quad (5.6)$$

plyne vztah:

$$m_x = \cos \theta. \quad (5.7)$$

Dalším krokem k výpočtu odporu je výpočet rezistivity ρ ze vztahu 5.2, kam dosadíme hodnoty pro NiFe[30]:

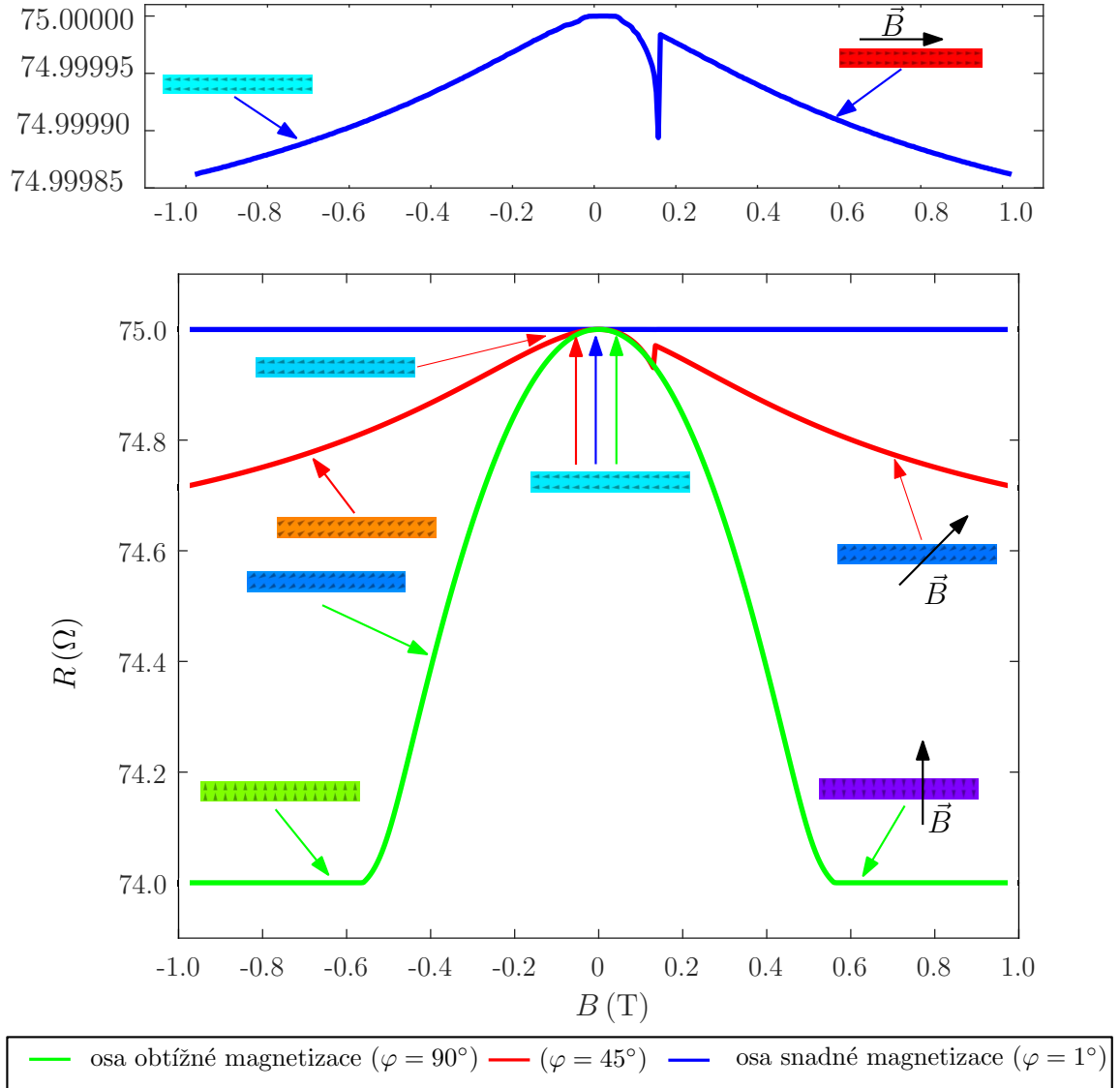
$$\rho_{\parallel} = 7,50 \cdot 10^{-7} \Omega\text{m} \quad (5.8)$$

$$\rho_{\perp} = 7,40 \cdot 10^{-7} \Omega\text{m} \quad (5.9)$$

a za $\cos^2 \theta$ byla dosazena průměrná m_x^2 složka normované magnetizace celého drátu. Samotný odpor pak získáme ze vztahu[21]:

$$R = \rho \frac{L}{S}, \quad (5.10)$$

kde L je délka drátu a S obsah jeho průřezu.



Obrázek 5.1: Výsledek simulace jevu AMR na nanodrátu s rozměry $1\text{ }\mu\text{m} \times 100\text{ nm} \times 100\text{ nm}$. Součástí je graficky znázorněný směr magnetizace v nanodrátu pro některé body na křivkách. Ve vrchní části obrázku je detail simulace pro snadnou osu magnetizace. Simulace byla provedena v programu MuMax3.

5.2. Obří magnetorezistence

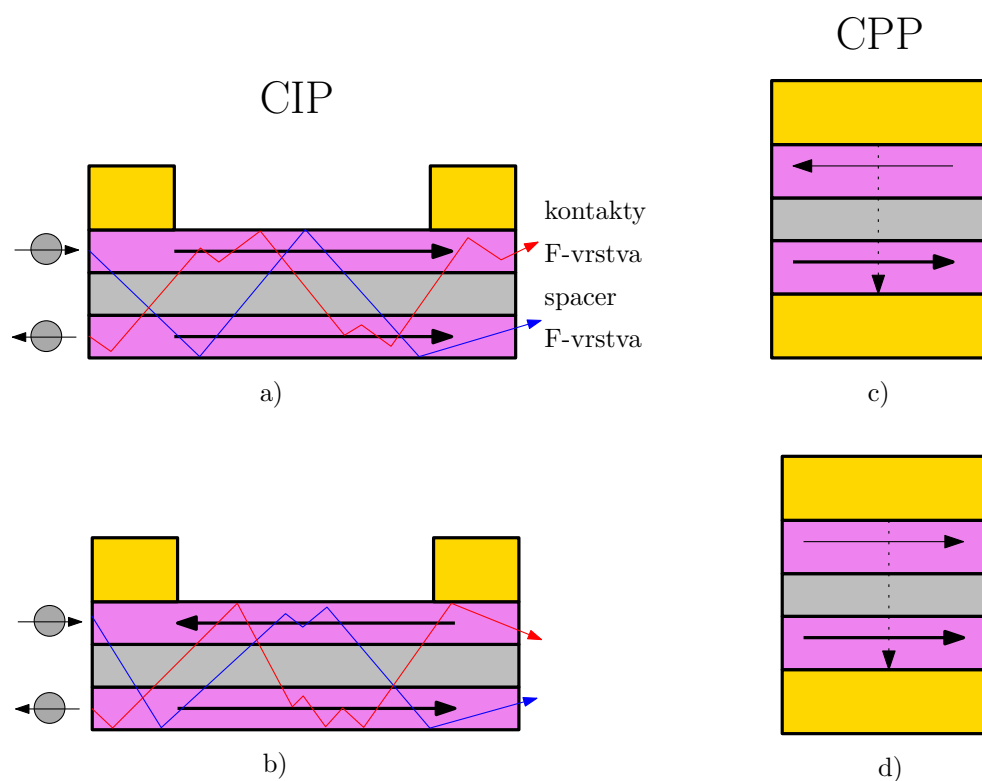
Při tomto kvantově-mechanickém jevu je pravděpodobnost rozptylu elektronů ve feromagnetické vrstvě (tzv. F-vrstvě) závislá na spinu procházejících elektronů (spinově závislý rozptyl). Pro opačné orientace spinu se liší střední volné dráhy elektronu $\lambda_\downarrow$ a $\lambda_\uparrow$. Vytvoříme multivrstvu vložím nemagnetické vrstvy mezi dvě F-vrstvy takovou, že za předpokladu $\lambda_\downarrow \gg \lambda_\uparrow$ splňuje tloušťka F-vrstev t_F nerovnost $\lambda_\uparrow > t_F > \lambda_\downarrow$. Ze stejného předpokladu můžeme pro F-vrstvy zavést také rezistivity $\rho_\uparrow > \rho_\downarrow$. Pokud má magnetizace obou F-vrstev stejný směr magnetizace, tak elektrony se spinem, který je orientován souhlasně jako tato magnetizace, se nerozptylují, a prochází proto s menším odporem r [viz Obrázek 5.2a)]. Elektrony s opačně orientovaným spinem se naopak silně rozptylují a prochází s větším odporem $R > r$ [viz Obrázek 5.2b)]. Při uspořádání s opačnými směry

magnetizace v F-vrstvách prochází s velkým odporem R elektrony s oběma směry orientace spinu. Tento jev vykazující závislost odporu na orientaci F-vrstev nazýváme obří magnetorezistence (Giant magnetoresistance - GMR). Změna odporu je v desítkách %, což v porovnání s AMR (maximálně 3%) vedlo k označení obří magnetorezistence [1].

Nemagnetická vrstva se nazývá spacer (oddělovač) a má za úkol od sebe separovat F-vrstvy a zamezit jejich vzájemné magnetické interakci [30].

Existují dvě možná uspořádání multivrstvy z pohledu proudové hustoty:

- Proud v rovině vzorku – current in plane (CIP) viz Obrázek 5.2a,b).
- Proud kolmý na rovinu vzorku – current perpendicular to plane (CPP) viz Obrázek 5.2c,d).



Obrázek 5.2: CIP uspořádání a) s paralelní magnetizací v F-vrstvách, b) s antiparalelní orientací v F-vrstvách. Červenou a modrou barvou jsou znázorněny dráhy elektronů s opačným spinem skrze multivrstvu. CPP uspořádání c) s antiparalelní magnetizací v F-vrstvách, d) s antiparalelní magnetizací v F-vrstvách. Tečkovanou čarou je naznačen směr proudu.

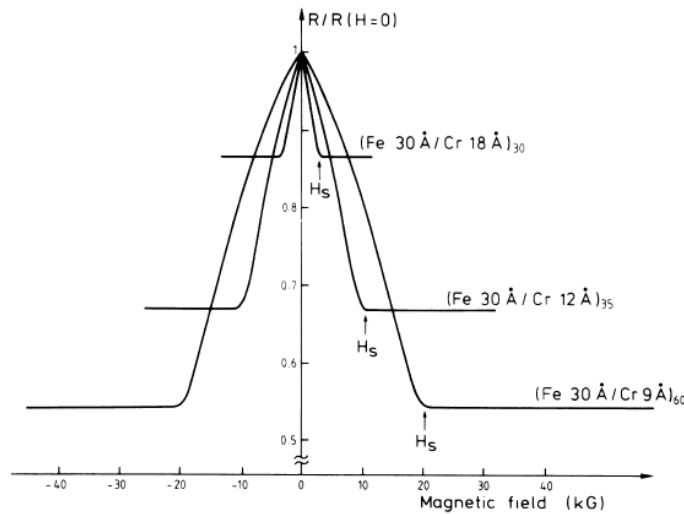
V případě CIP uspořádání tečou proudy paralelně oběma F-vrstvami, kde se různé rozptylují v závislosti na orientaci spinu a magnetizace vrstvy. Zároveň je nežádoucí, aby spacerem tekla velký podíl proudu, protože jev GMR by tím byl oslaben (v CIP konfiguraci). Celkový odpor multivrstvy pak můžeme určit jako odpor paralelně zapojených odporů.

Za objev jevu GMR byla v roce 2007 udělena Nobelova cena Francouzi Albertu Fertovi a Němci Peteru Grünbergovi, kteří tento jev nezávisle na sobě objevili v roce 1988 [1].

Systémy obří magnetorezistence

- **Antiferomagnetické vázané systémy**

Efekt GMR byl poprvé naměřen v multivrstvách $(\text{Fe}/\text{Cr})_n$ připravených metodou MBE¹ (n značí počet opakování vrstev Fe a Cr). Při vhodné tloušťce Cr vrstev vznikne v multivrstvě antiferomagnetická interakce a při nulovém vnějším poli se systém uspořádá do antiparalelní konfigurace s vysokým odporem. Při zvyšování vnějšího magnetického pole se konfigurace magnetice ve vrstvách mění na paralelní a odpor klesá [30]. Průběh odporu je znázorněn na Obrázku 5.3.



Obrázek 5.3: Závislost odporu na magnetickém poli v multivrstvě $(\text{Fe}/\text{Cr})_n$ [31].

- **Spin valve**

Jedná se o strukturu, ve které jsou dvě shodné F-vrstvy oddělené nemagnetickým spacerem. Jedna z F-vrstev je vázaná s antiferomagnetickou vrstvou a preferuje proto jeden směr magnetizace. Jev popisující tuto interakci se jmenuje exchange bias a způsobuje jakousi předmagnetizaci, která zvyšuje koerцитivu F-vrstvy a posouvá hysterezní křivku i magnetizaci ve směru preferovaného uspořádání. Druhá F-vrstva je tzv. volná a může směr své magnetizace měnit. Příkladem spin valve multivrstvy je $\text{NiFe}/\text{Cu}/\text{NiFe}/\text{FeMn}$ [30, 32].

- **Pseudo spin valve**

Jedná se o velmi podobnou strukturu jako spin valve. Chybí zde ale antiferomagnetická vrstva a dosažení antiparalelního stavu je způsobeno rozdílnými materiály F-vrstev, který mají každý jinou koerцитivu. Příkladem struktury pseudo spin valve je multivrstva $\text{Co}/\text{Cu}/\text{NiFe}$ [30].

5.3. Tunelová magnetorezistence

Jedná se o obdobný jev jako GMR, místo spinově závislého rozptylu se ovšem jedná o spinově závislé tunelování. Namísto nemagnetické oddělovací vrstvy je mezi dvěma F-vrst-

¹Molecular beam epitaxy: kontrolovaný růst monokrystalických tenkých vrstev.

vami nevodič (např. Al_2O_3 nebo MgO), který představuje pro elektrony potenciálovou bariéru. Podle kvantové teorie mají elektrony nenulovou pravděpodobnost průchodu bariérou, i když k tomu nemají potřebnou energii. Při vhodném nastavení tloušťky bariéry (asi 1 - 2 nm) je pravděpodobnost průchodu dostatečně velká a elektrony se buď rozptylují nebo procházejí systémem bez rozptylu. Toto záleží na relativní orientaci F-vrstev. Jev tunelové magnetorezistence (TMR) je možné pozorovat jen v CPP konfiguraci. Systému využívajícímu TMR se říká magnetický tunelový článek (Magnetic tunnel junction - MTJ) [30].

5.4. Aplikace založené na magnetorezistenci

Různé druhy magnetorezistence popsané v této kapitole našly široké uplatnění, a to zejména v oblasti elektrotechniky a počítačových technologiích. Spin valve (viz sekce 5.2) může sloužit jako senzor magnetického pole, protože magnetizace volné F-vrstvy se může natáčet vlivem vnějšího magnetického pole. Měřenou veličinou je pak odpor multivrstvy, který se mění v závislosti relativní orientace mezi volnou a vázanou F-vrstvou. Multivrstvy mohou být také využity jako paměťová buňka, kde paralelní resp. antiparalelní směr magnetizace jednotlivých vrstev vyjadřuje logickou hodnotu 0 resp. 1. O některých aplikacích se nyní rozepíšeme podrobněji.

- **Čtecí hlava v pevném disku**

Mezi nejrozšířenější aplikaci jevů AMR, GMR a TMR patří čtecí hlavy v počítačovém pevném disku. Magnetorezistentní senzor ve čtecí hlavě je realizován pomocí spin valvu nebo magnetického tunelového článku. Indukční zapisovací hlava změní magnetizaci ve volné F-vrstvě zapisované buňky. Čtecí hlava poté měří odpor, který je závislý právě na směru magnetizace. Tento způsob čtení dat je velmi citlivý a díky zmenšování záznamových buněk umožnil zvýšení kapacity disků [33].

- **Magnetická „racetrack“ paměť**

Výzkum v oblasti kontrolovaného šíření doménových stěn v magnetických nanodrátech vedl k vývoji stabilního paměťového zařízení, které má stejný výkon a spolehlivost jako běžné paměťové zařízení. Výrobní náklady jsou ale menší. Tomuto zařízení bylo pojmenováno jako racetrack paměť [34]. Informace je uložena v magnetizaci části drátu, který je od okolních oblastí oddělen doménovou stěnou. Spinově polarizovaný proud posouvá doménové stěny a GMR/TMR senzor vyčítá z drátu magnetizaci. Mezi další výhody patří teoreticky neomezená přepisovatelnost, což je limitující faktor současných pamětí využívajících flash technologii.

- **Magnetická paměť MRAM**

Další možnou podobou magnetické paměti je pole složené ze spin valvů nebo magnetických tunelových článků (MTJ), do kterých se informace ukládá v podobě magnetizace volné F-vrstvy. Na obou stranách spin valvů nebo MTJ prochází proudové vedení, které je na sebe kolmé. K přepsání informace může dojít pouze v místě, kde se kříží dva zápisové pulzy a vytvoří tak dostatečné magnetické pole pro změnu magnetizace. Čtení probíhá přes tranzistor, který je na každé buňce [35].

6. Charakterizace monokrystalických magnetických nanodrátů

Na studovaných nanodrátech je třeba provést analýzu složení a struktury za účelem ověření výsledného produktu po růstu popsaném v sekci 3.1.3, který byl proveden v Austrálii. Analytické metody jsou často omezeny na vzorky větších rozměrů nebo tenké vrstvy, proto je jen omezený výběr z technik vhodných pro analýzu nanodrátů. Z nich se následující sekce budou zabývat energiově disperzní spektroskopií (EDS) provedenou v Austrálii, transmisí elektronovou mikroskopií a mikroskopií magnetických sil provedenými ve sdílené laboratoři CEITEC NANO.

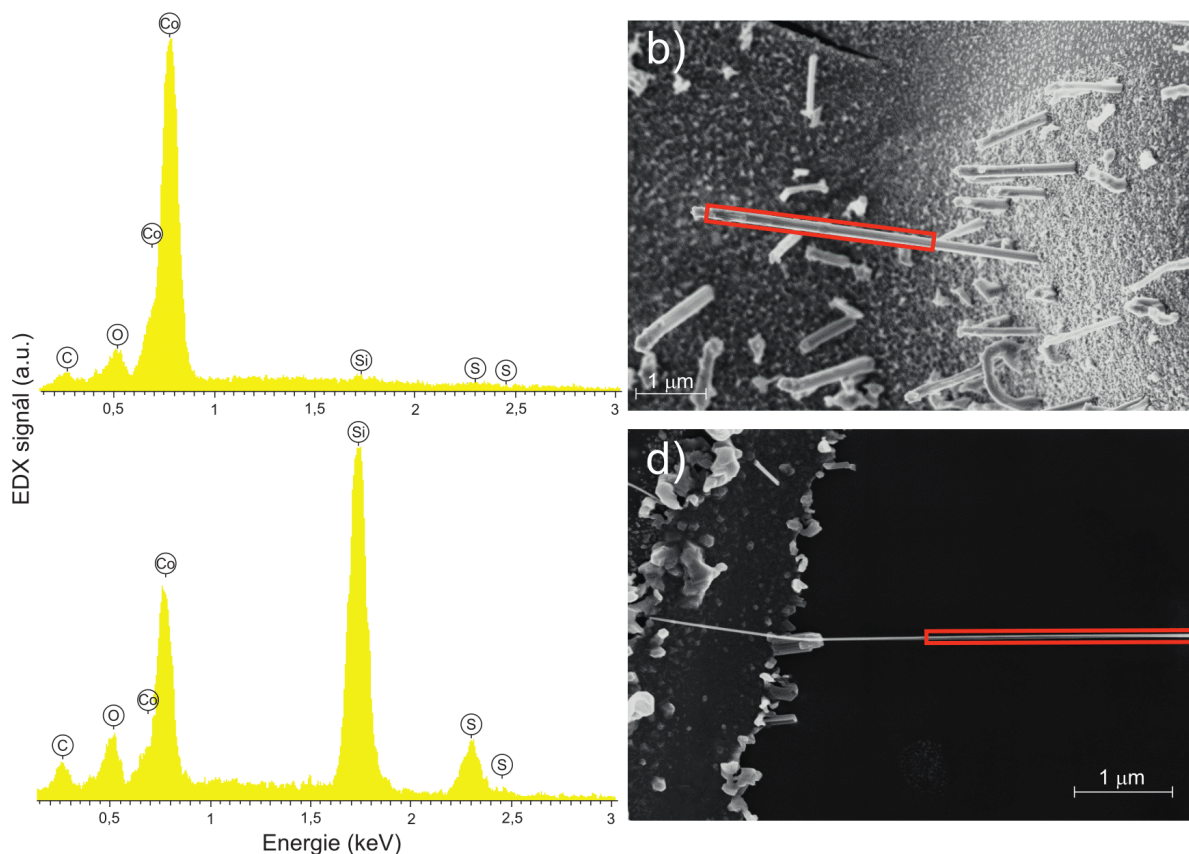
6.1. Energiově disperzní spektroskopie

Jednou z metod umožňující zjištění chemického složení vzorku je energiově disperzní spektroskopie (EDS) [36]. Jedná se o detekci rentgenovského záření generovaného vysokoenergovým svazkem elektronů dopadajících na vzorek. Dopadající elektron vyrazí elektron z vnitřní slupky. Následně pak dojde k přechodu z vyšších hladin na uvolněnou nižší hladinu za současného vyzáření rentgenovského fotonu. Tato energie definovaná právě kvantovým přechodem mezi jednotlivými energiovými hladinami je charakteristická pro každý prvek a můžeme tak podle energie vylétávajících fotonů určit složení vzorku. Na Obrázku 6.1 je EDS analýza provedená spolupracující Australskou stranou na dodaných nanodrátech, která zjišťuje, že na vzorcích může probíhat více módů růstu zároveň. Bylo zjištěno, že dráty s velkým poměrem tloušťky vůči délce [typicky rostou s průměrem cca 100 nm, viz Obrázek 6.1 a),b)] rostou metalicky, což dokazuje chybějící pík síry na EDS spektru. Naopak tenší dráty, které typicky rostou v menším průměru cca 50 nm rostou v podobě sulfidů, což dokazuje vysoký pík síry v EDS spektru. Podle této analýzy bychom se po přenesení drátů na substrát měli více věnovat kratším a širším drátům.

6.2. Transmisí elektronová mikroskopie

Transmisí elektronová mikroskopie (TEM) je metoda, která zkoumá vzorek při průchodu elektronů. Vzorek proto musí být dostatečně tenký, typicky desítky nm, v krajním případě až několik set nm. Základní mód je zobrazování pomocí prošlých elektronů na kameru. Toto funguje analogicky s optickým mikroskopem, místo použití světla jsou ovšem použity elektrony, které procházejí systémem elektromagnetických čoček. Oproti optickému mikroskopu má TEM výhodu v mnohem vyšším rozlišení, které je u nejlepších přístrojů až 50 pm (oproti cca 250 nm u optického mikroskopu, který je omezen difrakčním limitem světla). Důvod tedy spočívá v krátké vlnové délce elektronů, která činí při energii 300 keV 2 pm a omezujícím faktorem jsou optické vady elektromagnetických čoček. Detailně o TEM zobrazování ve vysokém rozlišení (HRTEM) pojednává reference [37].

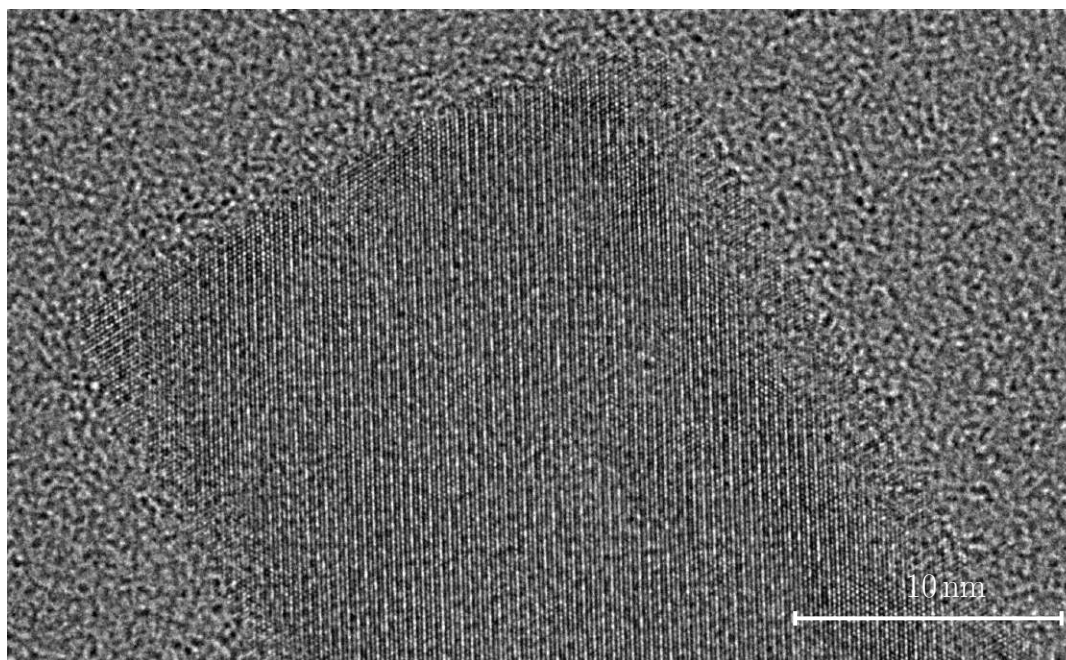
Transmisí elektronová mikroskopie je nyní dostupná na našem pracovišti díky špičkovému 300 kV přístroji FEI Titan vybaveném korektorem sférické vady pro dosažení nejvyššího rozlišení. Pro pozorování v TEMu jsme museli nejprve dráty přenést na měděnou mřížku s uhlíkovou membránou, což bylo provedeno metodou pipetování (viz sekce 7.1.1). Jako první experiment bylo provedeno zobrazování ve vysokém rozlišení, které prokázalo



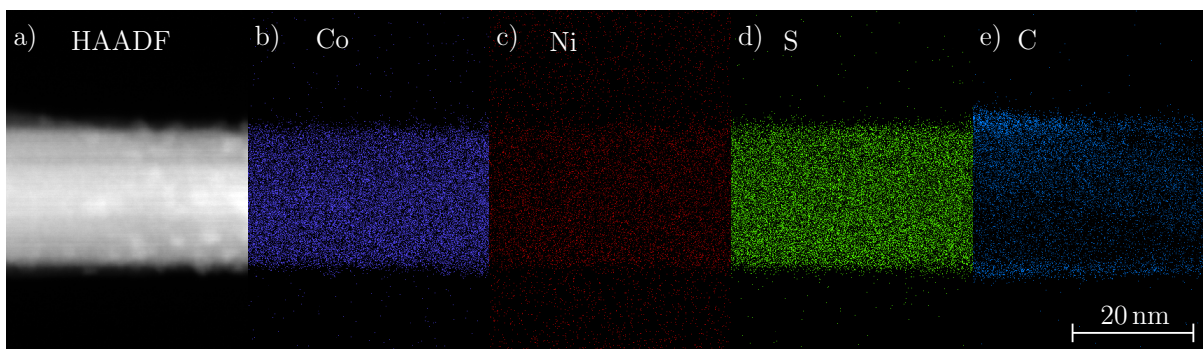
Obrázek 6.1: EDS analýza nanodrátů. V části b,d) jsou obrázky ze SEM. Během procesu na vzorku vyrostou dva druhy drátů. a), b) Kratší kobaltové nanodráty narostené metalicky. c), d) Delší nanodráty obsahující vysoký podíl síry, které jsou pravděpodobně narostené ve formě sulfidů. S laskavým svolením J. Scotta.

krystalickou povahu zkoumaných drátů. Za účelem pozorování v atomárním rozlišení byl vzorek nejprve správně natočen. Na Obrázku 6.2 je vidět konec nanodrátu s atomárními rovinami (v podobě čar) ve středu drátu nebo sloupce (tečky), které jsou pozorovatelné na okrajích a můžeme tedy potvrdit krystalický charakter zkoumaných nanodrátů.

Za účelem chemické analýzy může být EDS metody využito i v transmisním elektronovém mikroskopu. V transmisním mikroskopu se tato analýza provádí v rastrovacím módu (STEM), aby bylo možné získat mapy chemického složení, nikoli pouze průměr z celého vzorku. Největší výhoda spočívá v absenci signálu od substrátu, což často deformuje spektra získaná na rastrovacím elektronovém mikroskopu. Sběr signálu navíc probíhá na 4 detektorech rozmístěných do všech stran, což zajišťuje větší signál. Samotné zobrazování ve STEM módu probíhá měřením signálu detektory, nejčastěji zachycujících rozptýlené elektrony (detektory tmavého pole), zejména detektor HAADF (z anglického high-angle annular dark-field), na který dopadají elektrony rozptýlené do velkých úhlů. Signálu na HAADF detektoru se říká Z-contrast, protože intenzita je úměrná atomárnímu číslu pozorovaného prvku. V našem případě jsme se zaměřili na detekci Co, Ni, S a C. Z dat na Obrázku 6.3 lze usoudit, že se objem zde studovaných CoNi drátů skládal ze sulfidů, protože signál síry je na celé ploše vysoký. Naopak uhlík má silnější signál na okrajích drátu, což můžeme přisoudit kontaminaci, která drát pokryla v důsledku dlouhé expozice při sběru dat EDS.



Obrázek 6.2: Snímek krystalického nanodráty v transmisním elektronovém mikroskopu.



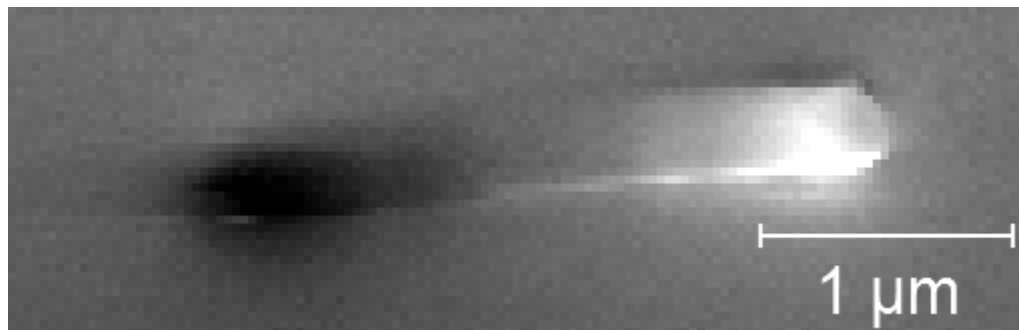
Obrázek 6.3: Chemická analýza nanodráty provedená pomocí transmisního elektronového mikroskopu. a) Obrázek části drátu pořízený v rastrovacím módu (STEM) pomocí detektoru HAADF. Ostatní obrázky obsahují EDS signál příslušející obsahu b) Co, c) Ni, d) S, e) C ve studovaném drátu.

6.3. Mikroskopie magnetických sil

Jelikož mohou v použitých procesech dráty růst i v podobě nemagnetických sulfidů, bylo třeba ověřit, zda jsou dráty feromagnetické. K tomuto účelu bylo využito měření mikroskopii magnetických sil (MFM z angl. Magnetic force microscopy), která je odvozená z mikroskopie atomárních sil (AFM). Touto metodou neměříme přímo magnetizaci vzorku, ale interakci magnetického hrotu s tzv. rozptylovým polem, které pochází od feromagnetických domén uvnitř vzorku. Pokud se drát nachází v základním, uniformě zmagnetovaném stavu, tak můžeme očekávat rozptylové pole opačných orientací vystupující z konců drátů. Měření je realizováno podobně jako AFM pomocí raménka s hrotem, které je rozkmitáno na frekvenci blízkou své vlastní frekvenci. Rozdíl oproti běžnému AFM hrotu spočívá v pokovení magnetickou vrstvou (typicky CoCr), která zajišťuje magnetickou interakci se vzorkem. Vlivem interakce s rozptylovým polem dochází ke změně fáze, se kterou raménko kmitá. Z této změny je pak možno usoudit stav magnetizace ve zkoumané struktuře, ve

6.3. MIKROSKOPIE MAGNETICKÝCH SIL

složitějších situacích je nutno data porovnat se simulací. K ovlivnění fáze kmitání dochází i vlivem topografie. Proto je v prvním kroku změřena topografie, která je využita při následném měření magnetického signálu, kdy je udržována konstantní vzdálenost mezi hrotem a povrchem vzorku. MFM metodou byla naměřeny data pro některé závěrečné práce z minulých let [38, 39]. Na Obrázku 6.4 je MFM snímek Co nanodrátu s tmavým a světlým koncem, což odpovídá právě uniformní magnetizaci uvnitř drátu. Měření bylo provedeno na mikroskopu Dimension Icon od firmy Bruker.



Obrázek 6.4: MFM snímek monokrystalického Co nanodrátu potvrzující jeho magnetické vlastnosti.

7. Příprava elektrických kontaktů a měření AMR nanodráťů

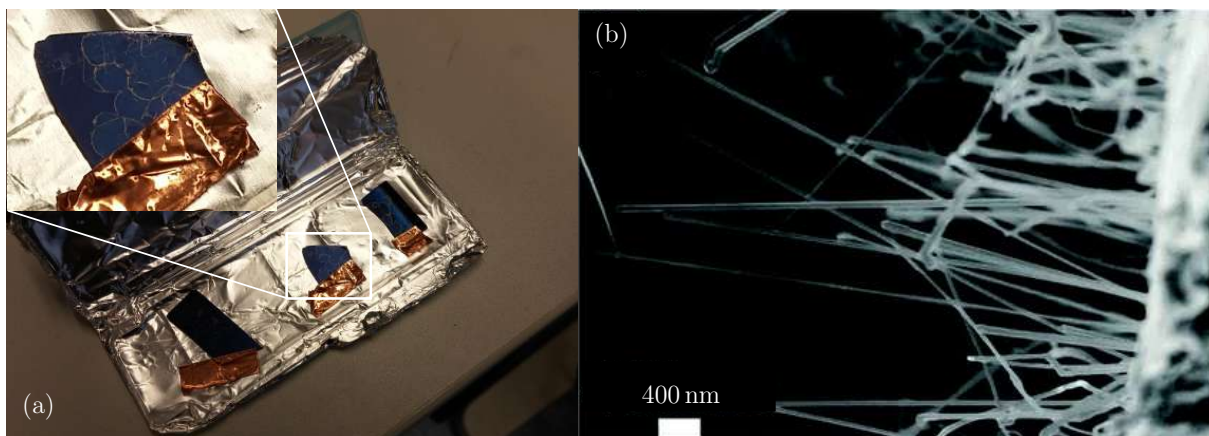
V této kapitole je popsán popis přípravy vzorku pro měření anizotropní magnetorezistence dvou typů nanodráťů. Měření bylo provedeno na monokrystalických magnetických nanodrátech, jejichž charakterizace byla provedena v kapitole 6 a NiFe nanodrátech připravených elektronovou litografií. U každého druhu bylo potřeba zvolit jiný postup, který se potýkal s odlišnými problémy.

7.1. Monokrystalické nanodráty

Příprava vzorku pro AMR měření se skládala z několika kroků, kterým se bude postupně detailněji věnovat tato podkapitola. Jednalo se o přenesení na substrát se značkami, lokalizaci v optickém a elektronovém mikroskopu, přípravu elektrických kontaktů, mikrokontaktování a AMR měření.

7.1.1. Přenesení nanodráťů na substrát

Výroba monokrystalických magnetických nanodráťů byla provedena na Technické univerzitě v Sydney metodou CVD popsanou v sekci 3.1.3. Na Obrázku 7.1a) je vzorek s narostnými nanodráty. V části b) pak SEM obrázek tohoto vzorku. Protože nelze na vzorku s narostnými nanodráty kontaktovat jednotlivé nanodráty, je nutné je přenést na substrát se značkami, které tvoří souřadný systém pro snazší orientaci. Substrát se značkami uspořádanými v pravidelné síti byl vyroben na elektronovém litografu s interferometricky odměřovaným stolem (TESCAN MIRA3 vybavený systémem Raith Elphy).



Obrázek 7.1: a) Fotografie vzorku s narostnými monokrystalickými nanodráty včetně detailu. b) SEM snímek narostných monokrystalických nanodráťů na vzorku. S laskavým svolením J. Scotta.

Byly vyzkoušeny dvě možnosti tohoto přenosu nanodráťů na substrát se značkami:

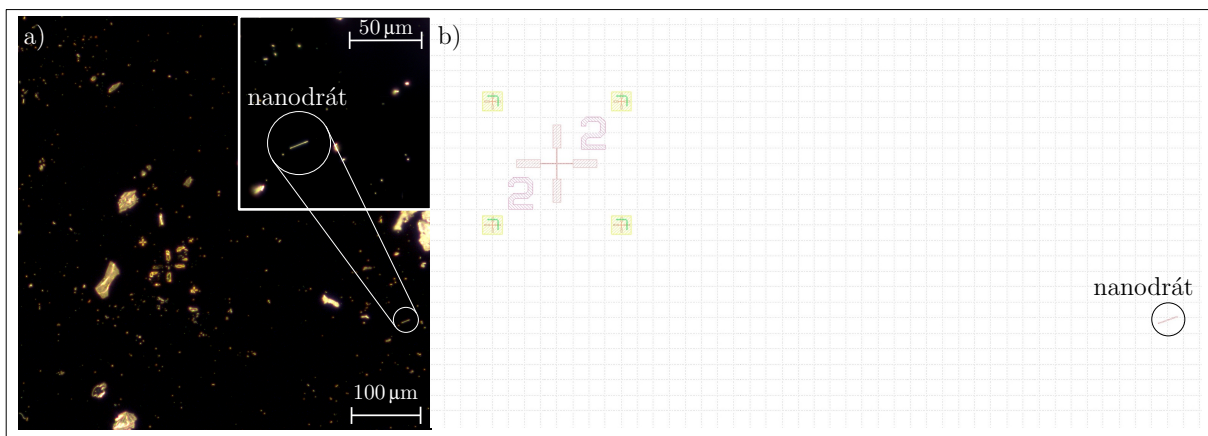
- V prvním případě byl na substrát se značkami přiložen vzorek s narostnými dráty, které byly přeneseny mechanickým tlačáním a odíráním. Tato metoda měla větší

úspěšnost přenosu. Na druhou stranu se nanodráty přenášely převážně poblíž hran a postupem času se snižoval počet přenesených nanodrátů a bylo zapotřebí vynaložit větší sílu při přenášení.

- V druhém případě byla část vzorku odlomena a ultrazvukována v isopropylalkoholu. Tím vznikl roztok s nanodráty, který byl následně napipetován na substrát se značkami. Tento postup se příliš neosvědčil, protože množství přenesených nanodrátů nebylo takové jako v prvním případě. Navíc bylo nutné odlomit část vzorku s narostnými nanodráty a v některých případech byly přenesené nanodráty obalené v nečistotách. Tuhle metodu bylo ale nutné použít při přípravě vzorku na TEM charakterizaci (viz sekce 6.2), která se kvůli nutnosti prosvítit vzorek provádí na měděné mřížce s uhlíkovou membránou, na kterou není možné nanodráty přenést první metodou.

7.1.2. Lokalizace nanodrátů v optickém mikroskopu

V druhém kroku byly nanodráty hledány v optickém mikroskopu Zeiss Axio. Hledané nanodráty mají sice menší rozměr než je bodové rozlišení optického mikroskopu, i přesto je lze najít v temném poli díky silnému rozptylu světla. Z fotografie nalezeného drátu [viz Obrázek 7.2a)] byla následně odměřena poloha vzhledem ke značkám v programu ImageJ, který umožňuje zavedení uživatelských souřadnic. Tato poloha byla poté zanesena do designu vzorku ve formátu GDS, který je vytvořen programem KLayout [viz Obrázek 7.2b)].

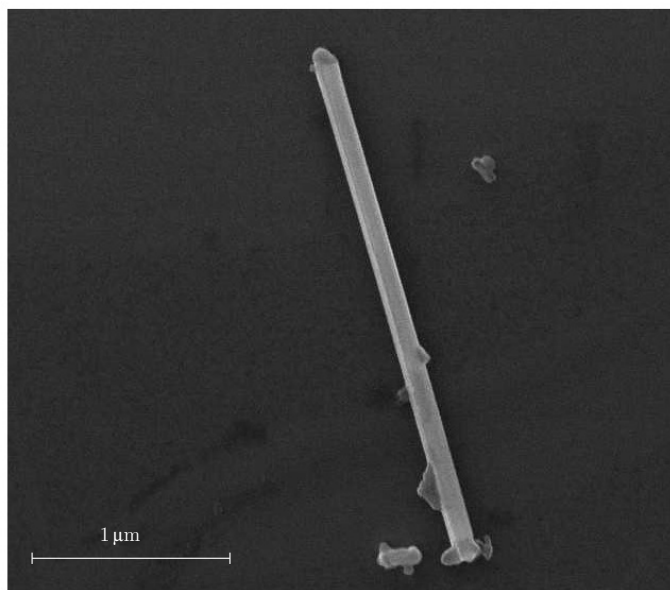


Obrázek 7.2: a) Fotografie nanodrátu s detailem ve výřezu z optického mikroskopu Zeiss Axio. b) Překreslení polohy nanodrátu do designu v programu KLayout.

7.1.3. Hledání přesné polohy nanodrátů v elektronovém mikroskopu

Poloha získaná v sekci 7.1.2 není kvůli parametrům optického mikroskopu dostatečně přesná, protože je třeba umístit kontakty s přesností pod 100 nm (v závislosti na délce drátu). K přesné lokalizaci použijeme stejný elektronový mikroskop (TESCAN MIRA3 vybavený systémem Raith Elphy), jako pro výrobu substrátu se značkami. Ten nám umožní svázat UV koordinační systém vzorku a mikroskopu. Hledaný nanodrát je poté možno

lokalizovat na pozici zakreslené v designu získaném v sekci 7.1.2. Odměřovaný stolek je použit pro kalibraci zápisového pole (angl. writefield alignment) za účelem získání obrázků drátů (viz Obrázek 7.3) se správnou velikostí a zaznamenanou polohou (s přesností až na jednotky nm) do textového souboru. Na takto získaném obrázku je pak odměřena přesná poloha a dle toho se upřesní poloha nanodrátu v designu.



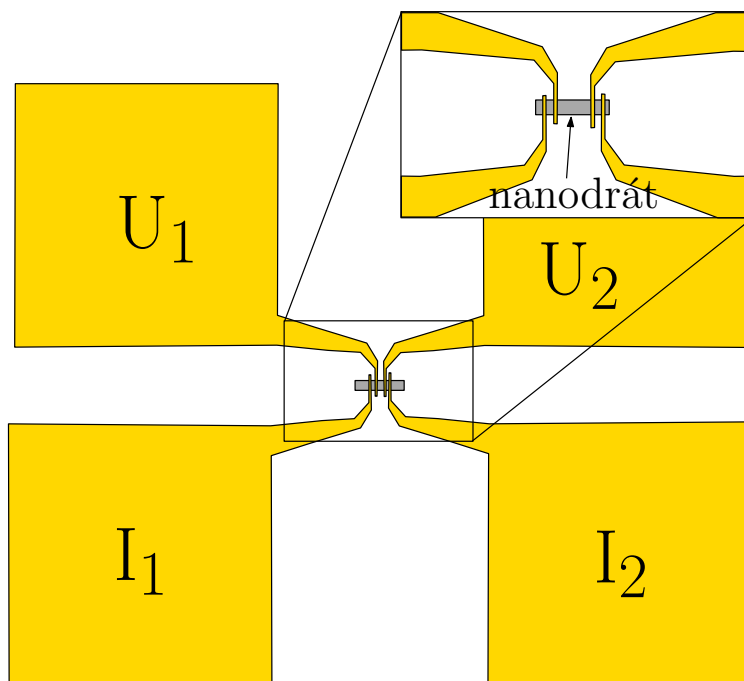
Obrázek 7.3: Snímek nanodrátu z elektronového mikroskopu TESCAN MIRA3.

7.1.4. Žihání

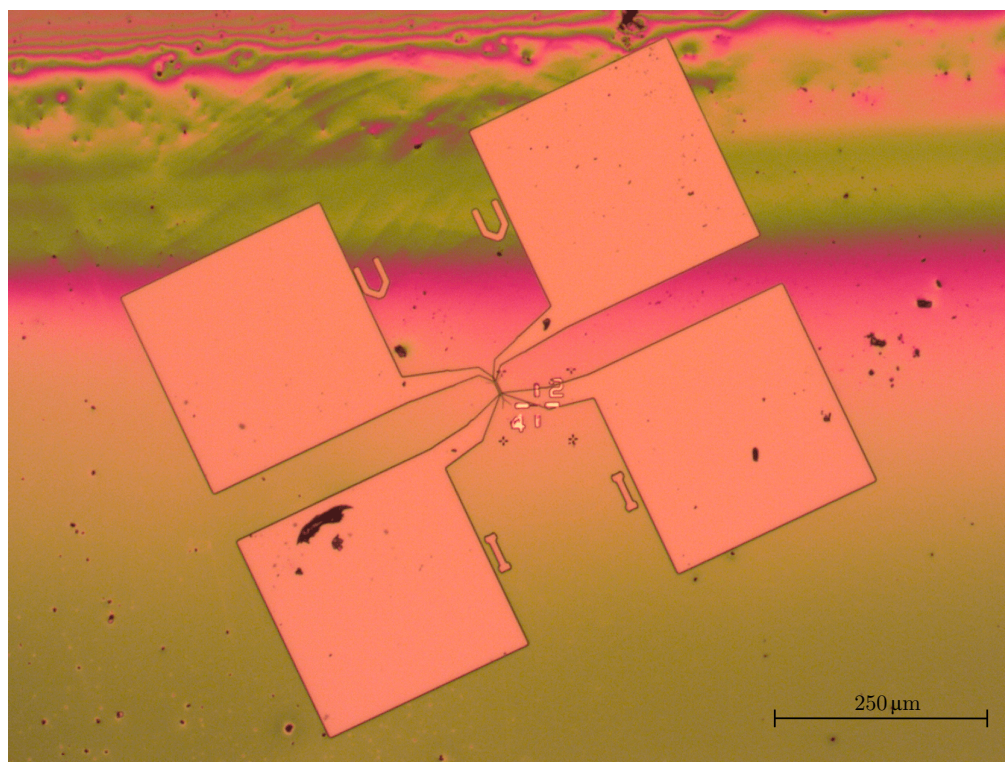
Účelem žihání (volitelný krok) je odstranění síry, která se může nacházet na povrchu nanodrátů (viz Obrázek 6.3) z thiolových prekurzorů používaných během procesu popsaného v sekci 3.1.3. Tato vrstva může zabránit průchodu elektrického proudu a tím zcela zamezit měření. Síry jsme se pokoušeli zbavit žiháním v přístrojích Xerion XREACT a CambridgeNanoTech Fiji 200. Žihání probíhalo vždy v argonové atmosféře o tlaku cca 10^0 mbar a při teplotách 250 °C nebo 300 °C.

7.1.5. Příprava kontaktů pro čtyřbodovou metodu měření odporu

Podstatou měření magnetorezistence (viz kapitola 5) nanodrátů je změna jejich odporu v závislosti na natočení drátu vůči vnějšímu magnetickému poli a velikosti tohoto pole. Tento odpor byl měřen tzv. čtyřbodovou metodou, která je schematicky znázorněna na Obrázku 7.4. Odpor se spočítá jako poměr napětí mezi napěťovými kontakty a proudu procházejícího nanodrátlem skrze proudové kontakty. Výhodou této metody oproti dvoubodové metodě je to, že do výsledného odporu nezapočítává odpor samotných kontaktů.



Obrázek 7.4: Schéma kontaktů na čtyřbodové měření odporu nanodrátu s detailem. Pomocí proudového zdroje se proudovými kontakty I_1 , I_2 do nanodrátu pouští proud, v důsledku čehož mezi napěťovými kontakty U_1 a U_2 měříme úbytek napětí.

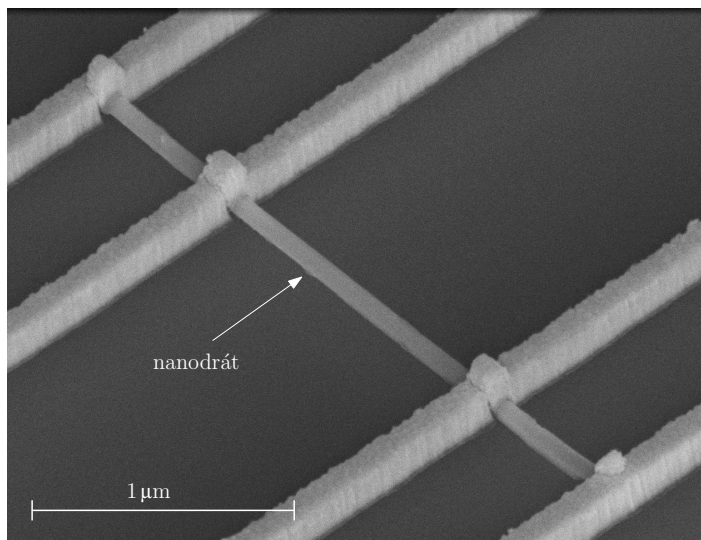


Obrázek 7.5: Vzorek s vyvolanými kontakty po elektronové litografii.

Kontakty byly připravovány pomocí elektronové litografie na mikroskopu TESCAN MIRA3. Do GDS designu s přesnou polohou nanodrátů ze sekce 7.1.3 byly přidány kontakty s uspořádáním na Obrázku 7.4. Na vzorek byl následně nanesen pozitivní rezist¹ polymethylmetakrylát (PMMA). V elektronovém mikroskopu byla potom ozářena plocha kontaktu dávkou $250 \mu\text{C cm}^{-2}$ při urychlovacím napětí 20 kV. Rezist byl následně vyvolán v methylišobutylketonu (MIBK), čímž se selektivně rozpustila exponovaná místa. Na Obrázku 7.5 je vzorek po vyvolání.

V další fázi je zapotřebí na vzorek pokrytý rezistem s dírami ve tvaru požadovaných kontaktů nadeponovat kovovou vrstvu. Toto bylo provedeno metodou napařování v přístroji značky BESTEC, kde se k roztavení a následnému odpařování daného materiálu používá elektronový svazek. Elektrony z wolframového vlákna dopadají do kalíšku s kovem a díky předané energii mění fázi atomů kovu na plynnou. Tyto atomy pak dopadají na vzorek, mění svou fázi zpět na pevnou a pokrývají tak vzorek kovovým povlakem. Na naše kontakty jsme deponovali 3–10 nm Ti jako adhezní vrstvu² a 100–150 nm Cu nebo Au jako vodivou vrstvu.

Posledním krokem při přípravě kontaktu je tzv. lift-off. V tomto kroku je celý vzorek na několik hodin ponořen do organického rozpouštědla (typicky do acetonu), které odstraní zbylý rezist a vrstva kovu je odplavena s výjimkou exponovaných míst. Snazšímu odplavení rezistu můžeme pomoci proudem acetonu ze stříčky nebo ultrazvukem, který ale může poškodit kontakty. Na závěr lift-off procesu je ještě vzorek opláchnut v isopropylalkoholu a osušen dusíkem. Konečná podoba nakontaktovaného nanodrátu je na Obrázku 7.6.



Obrázek 7.6: Nakontaktovaný nanodrát.

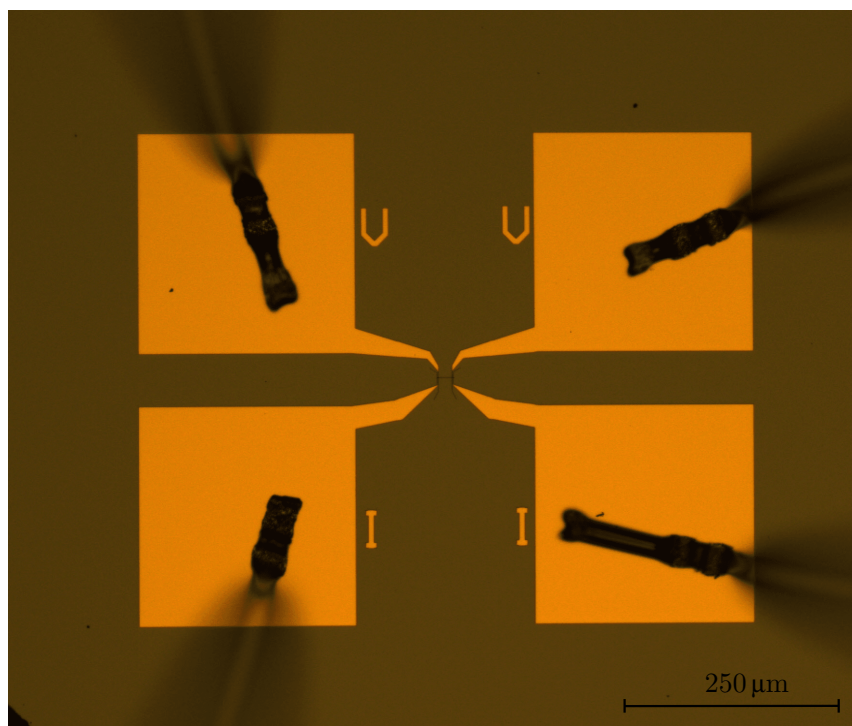
7.1.6. Mikrokontaktování

Protože ani velké zlaté kontakty nejde uspokojivě samostatně napojit na měřící přístroje, je nutné je tzv. namikrokontaktovat na držák vzorků se zdírkami na piny. Držák vzorků byl vyroben na 3D tiskárně a na CNC přístroji určenému k frézování desek plošných spojů. Vzorek byl na držák nalepen stříbrnou pastou. Mikrokontaktovací proces probíhal

¹Látka citlivá na dopad elektronů.

²Zajišťuje dostatečnou přilnavost kontaktu k povrchu vzorku.

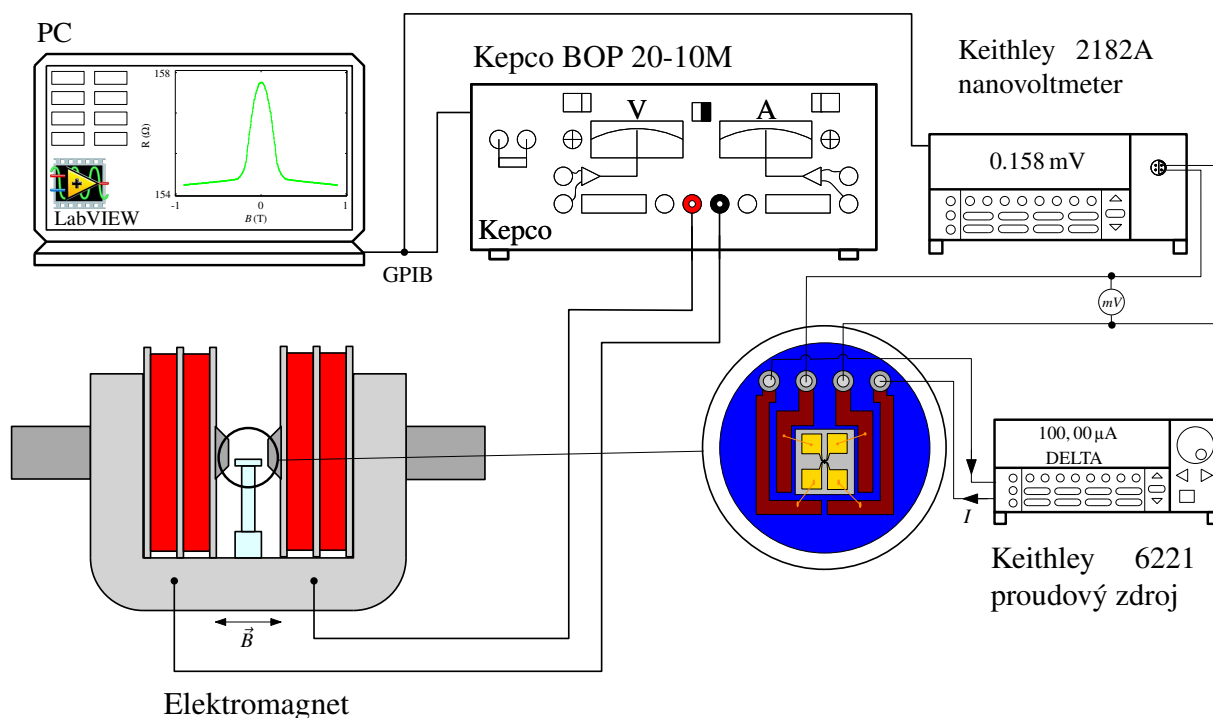
na přístroji TPT HB 16 a spočívá v přivaření 25 μm zlatého drátu na plošky připravené na vzorku a na držák s konektory. Zlatý drát je pomocí ultrazvukem rozkmitávaného nástroje lokálně přivařen jak na kontakt, tak na držák. Kontakty na vzorku s lokálně přivařenými zlatými dráty jsou na Obrázku 7.7.



Obrázek 7.7: Namikrokontaktovaný vzorek na držák.

7.1.7. Uspořádání měřicí soustavy

Pro změření jevu AMR byla sestavena měřicí aparatura. Její schéma je na Obrázku 7.8. Vzorek na držáku je umístěn mezi dvě jádra elektromagnetu, který je napájen bipolárním proudovým zdrojem Kepco BOP 20-10M ($U_{\text{max}}=20\text{ V}$, $I_{\text{max}}=10\text{ A}$). Držák je umístěn na stolku, který umožňuje otáčení díky motorizovanému goniometru. Velikost magnetického pole je měřena teslametrem F.W. Bell 6010 a jeho maximální hodnota je cca 1 T při rozevření pólových nástavců 18 mm. Pro odporové měření je používán nanovoltmetr Keithley 2182A a proudový zdroj Keithley 6221. Použití nanovoltmetru je nutné, protože měřené změny odporu jsou velmi malé ($\sim 10^{-4}\text{ }\Omega$). Celé měření je řízené přes počítač programem National Instruments LabVIEW. Všechny používané přístroje jsou připojeny na sběrnice rozhraní IEEE-488 (GPIB).



Obrázek 7.8: Schéma uspořádání měřicí soustavy.

7.1.8. Diskuze výsledků

U monokrystalických magnetických nanodrátů nebylo magnetotransportní měření čtyřbodovou metodou úspěšné. To se projevilo tak, že nanodrát měl velký odpor v řádech $M\Omega$, přičemž přibližný výpočet jeho odporu dle vzorce $R = \rho \frac{L}{S}$ vychází v řádech desítek Ω , uvažujeme-li rezistivitu kobaltu $\rho_{Co} = 5,6 \times 10^{-8} \Omega m$, průměr drátu 100 nm a jeho délku $5 \mu m$. Měřením MFM (viz Obrázek 6.4) jsme alespoň vyvrátili hypotézu, že nanodrát není magnetický. Možné důvody neúspěšného měření a návrhy na odstranění těchto problémů:

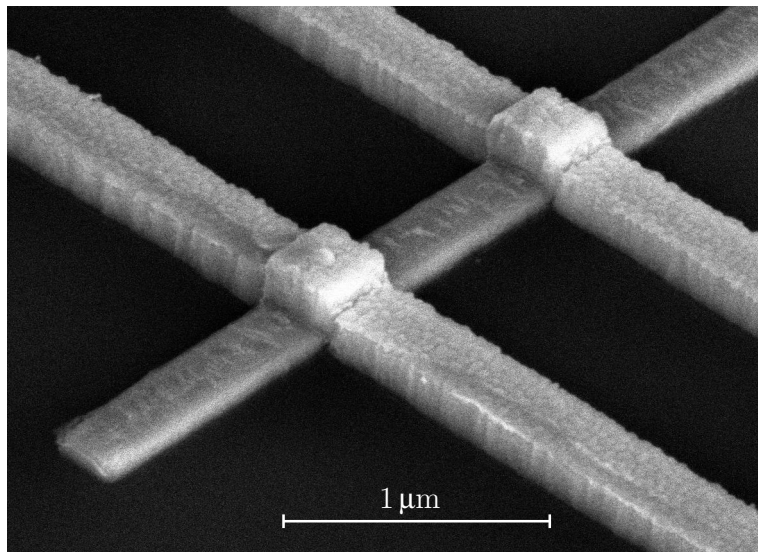
- Nanodráty i přes žihání v argonové atmosféře (viz sekce 7.1.4) měly na povrchu povlak síry zabráňující průchodu elektrického proudu. Případně se v objemu mohly nacházet sulfidy kobaltu. Možným řešením je vyzkoušení obměněných podmínek při žihacím procesu nebo žihání v plasmě, které ale velmi pravděpodobně povede k poškození nanodrátu. Alternativně je možné exponovaná místa pro kontakty nanodrátu jemně odprášit. To ovšem skrývá nevýhodu v potenciálním poškození krystalické struktury drátu.
- Druhou možností je nedostatečná vodivost na rozhraní nanodrát-kontakt kvůli špatné přilnavosti kontaktu. Možným řešením je nechat mírně nakloněný vzorek při depozici kovové vrstvy otáčet, čímž by mohlo být dosaženo kontaktu, který bude na nanodrátu lépe držet. Alternativním řešením je provést depozici metodou magnetronového naprašování v přístroji od firmy Bestec. Depozice je zde totiž všesměrová a kontakt by mohl na nanodrát lépe přilhnout.

Autor má v plánu se problému nadále věnovat i po odevzdání této práce a vyzkoušet výše nastíněné možnosti vyřešení potenciálních problémů.

7.2. Polykrystalické NiFe nanodráty

7.2.1. Příprava vzorku

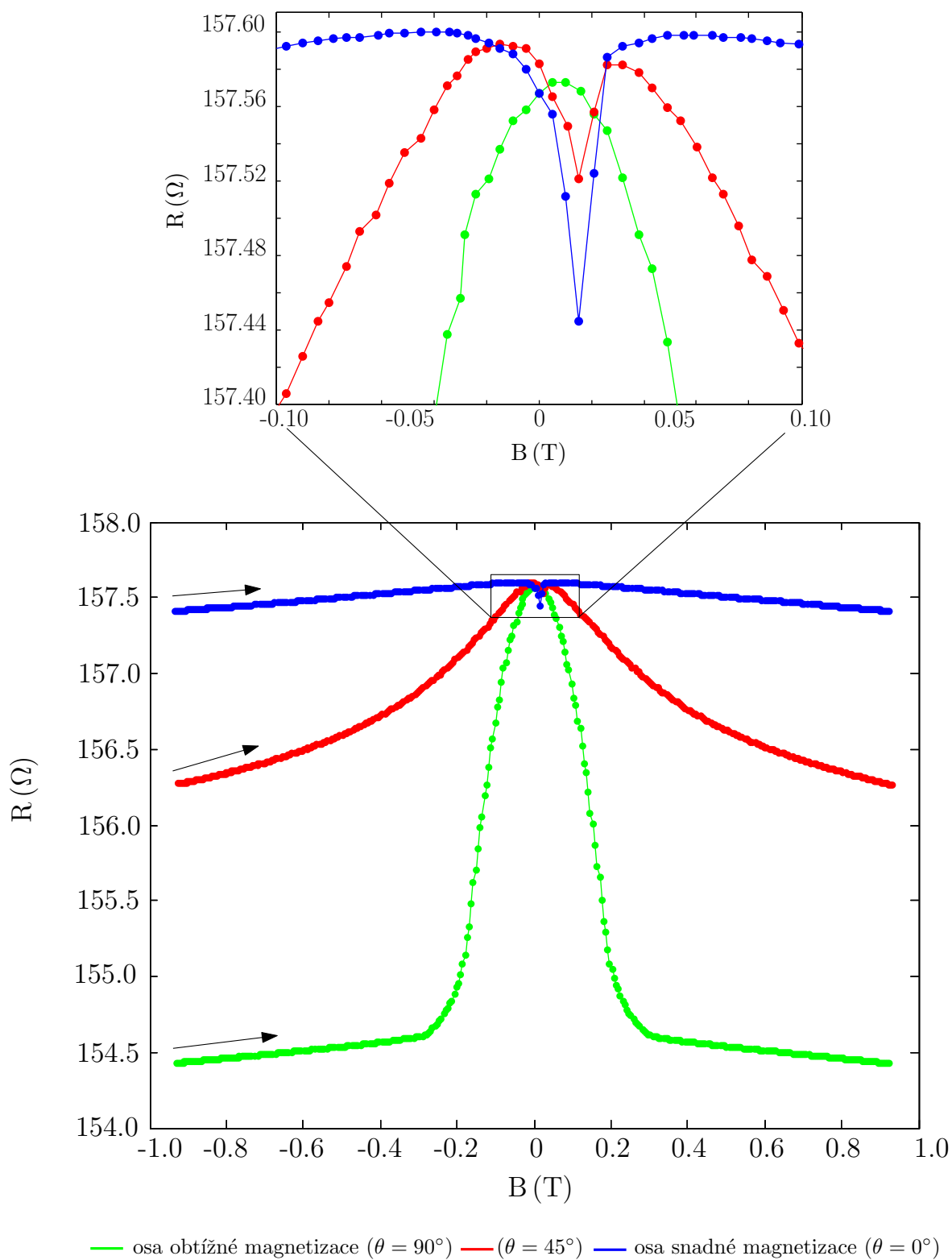
Postup přípravy vzorku s NiFe nanodráty se velmi podobá postupu popsanému v sekci 7.1. Namísto přenášení a lokalizace byl přidán ještě jeden litografický krok, během kterého byly připraveny NiFe nanodráty o rozměrech $100\text{ nm} \times 300\text{ nm} \times 10\text{ }\mu\text{m}$. To má tu výhodu, že drát s kontaktem byl vyroben na definované UV pozici. Detail nakontaktovaného NiFe nanodrátu je na Obrázku 7.9.



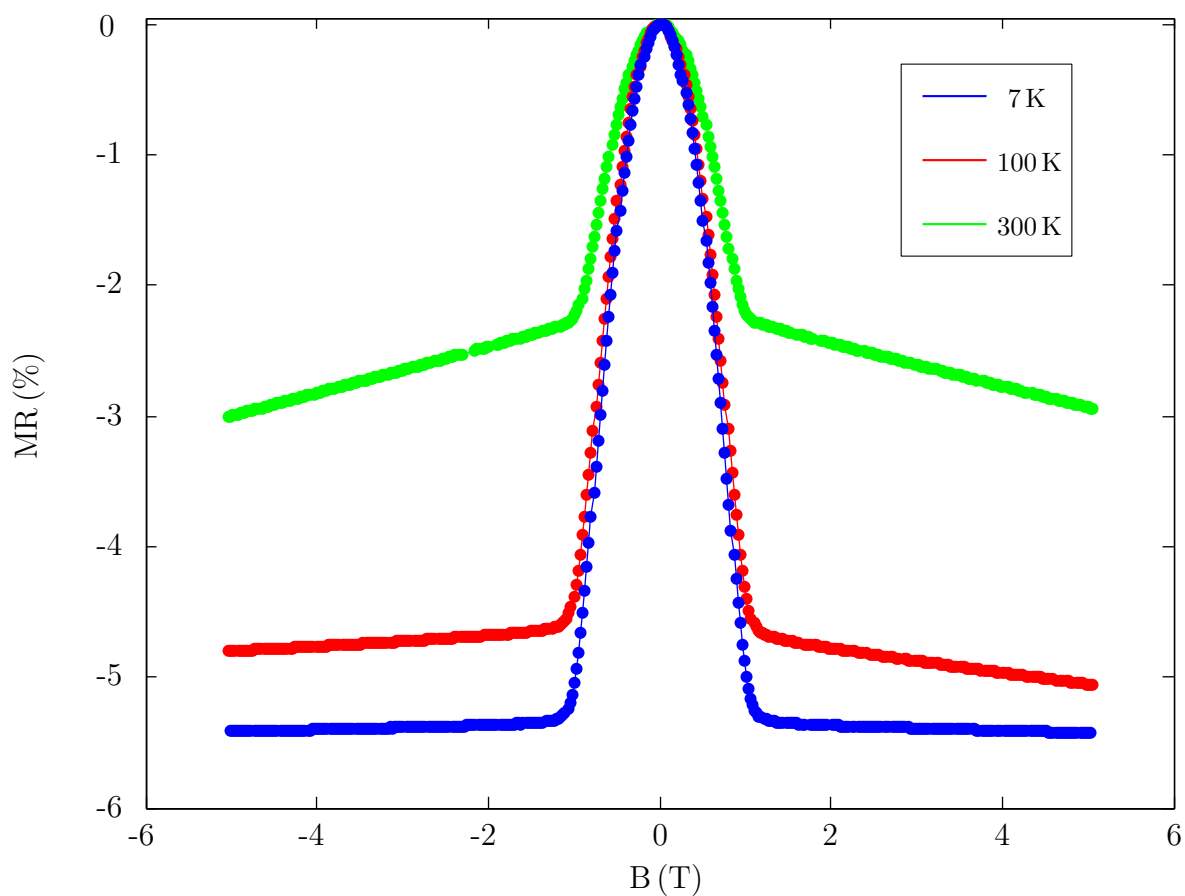
Obrázek 7.9: Detail nakontaktovaného NiFe litografického nanodrátu.

7.2.2. Výsledky

Připravený vzorek s NiFe nanodráty byl úspěšně změřen pomocí měřicí soustavy popsané v sekci 7.1.7. Výsledky jsou vyneseny do Obrázku 7.10 a byly srovnány se simulací představenou v sekci 5.1.1. Rozdílné absolutní hodnoty odporu R jsou způsobeny rozdílnými rozměry drátu, základní rysy naměřených dat kvalitativně souhlasí se simulací. Na grafech, kdy byl drát vůči poli zorientován rovnoběžně (osa snadné magnetizace) nebo pod úhlem 45° je pozorovatelné přepnutí drátu, které je zachyceno v podobě poklesu a poté náhlého nárůstu odporu. Při aplikaci největšího magnetického pole (1 T) je u všech křivek vidět tendence k dalšímu poklesu odporu, pokud by bylo pole dále zvyšováno. Toto lze u měření v ose obtížné magnetizace vysvětlit pomocí termálních oscilací spinů kolem směru magnetického pole do určitého úhlu, který se s rostoucím polem zmenšuje a větší část celkové magnetizace míří kolmo na směr elektrického proudu. To je ukázáno na Obrázku 7.11, kde je transportní měření NiFe nanodrátu provedeno pro teploty 7 K, 100 K a 300 K a směrnice odporové závislosti v saturaci s klesající teplotou klesá. Je tedy potvrzen vliv termálních oscilací. Data byla naměřena na přístroji od firmy Cryogenic. Podle této argumentace by ovšem v ose snadné magnetizace měla magnetizace více směřovat ve směr proudu, což by vedlo k nárůstu odporu. Naměřen byl ovšem přesný opak, odpor se zvyšujícím se polem mírně klesá. Ve snadné ose nebylo VSM měření provedeno z toho důvodu, že v přístroji od firmy Cryogenic není možné vzorkem otáčet a je tudíž velmi obtížné dostat nanodrát do osy snadné magnetizace. Toto chování tak bohužel nebylo do odevzdání práce vysvětleno.



Obrázek 7.10: Naměřené AMR závislosti NiFe nanodráty s detailem na oblast v okolí nulového vnějšího pole. θ je úhel mezi drátem a vnějším magnetickým polem.



Obrázek 7.11: AMR závislosti NiFe nanodráty v obtížné ose pro teploty 7 K, 100 K a 300 K, data jsou změřena v poli supravodivého magnetu. Magnetorezistence (MR) je spočítána vzhledem k odporu v nulovém poli.

8. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo provedení magnetotransportního měření monokrystalických magnetických nanodráťů připravených na Technické univerzitě v Sydney. K tomu bylo nezbytné osvojit si a optimalizovat proces přípravy vzorku vyžadující si zvládnutí četných laboratorních technik.

Na začátku projektu se zdálo být největší výzvou kontaktování nanodráťů pomocí elektronové litografie. Toto bylo zvládnuto díky postupně vyvinutému procesu přenosu a lokalizace nanodráťů na substrátu se značkami a následné přípravy kontaktů. Jednotlivé kroky finálního postupu byly detailně popsány v sekci 7.1. Větší překážkou se nakonec ukázalo být měření samotné, protože se ani jednou nepodařilo dosáhnout očekávaných hodnot odporu samotného nanodráťu, což je podle odhadu výpočtem v řádu desítek, maximálně stovek Ohmů. Tento problém jsme se pokusili vyřešit žíháním drátů, což by podle konzultace se spolupracující Australskou stranou mělo vést k odstranění síry z povrchu drátu - i když dráty rostou ve formě metalické struktury, tak je na nich po ukončení CVD procesu zanechán tenký povlak.

Další důvodné podezření jsme měli na (ne)přítomnost feromagnetického uspořádání a alespoň některé dráty skutečně rostly jako sulfidy použitých kovů (k dispozici jsme měli vzorky obsahující Co, CoNi a CoFe, jejichž sulfidy jsou paramagnetické), jak bylo potvrzeno metodou EDS (sekce 6.1). Toto bylo ovšem vyvráceno alespoň na některých drátech měřením mikroskopie magnetických sil jasně prokazujícím feromagnetické uspořádání v daném drátu (sekce 6.3).

Mimo krystalické nanodráty dodané z Austrálie jsme ještě připravili polykrystalické dráty pomocí elektronové litografie, které se nám změřit podařilo. Tyto dráty se chovaly dle očekávání, hlavní faktor zde hrála tvarová anizotropie a od ní se odvíjející tvar odporové křivky (viz Obrázek 7.10). Když je drát vůči poli zorientován rovnoběžně (osa snadné magnetizace) nebo pod úhlem 45° je pozorovatelné přepnutí drátu, které je zachyceno v podobě poklesu a poté náhlého nárůstu odporu. Naměřené výsledky kvalitativně odpovídají simulacím v sekci 5.1.1.

Ač nebylo dosaženo hlavního cíle, hodnotí autor své první vědecké kroky pozitivně, protože mu bylo umožněno získat si kladný vztah k práci v laboratoři a osvojit si četné experimentální techniky a také mnohé znalosti z oblasti fyziky magnetismu. Do budoucna je autor motivován vyzkoušet navržené modifikace přípravného postupu a dosáhnout vytyčeného cíle.

9. Literatura

- [1] Coey, J. M.: *Magnetism and magnetic materials*. Cambridge University Press, 2010, ISBN 978-0521816144.
- [2] keyword.org: Silicon Nanowire [online]. [cit. 23. 4. 2017].
URL: <http://keywordsuggest.org/gallery/726365.html>
- [3] Chvojka, J.: Nanovláknó [online]. [cit. 23. 4. 2017].
URL: <https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Nanovl%C3%A1kno&oldid=14259948>
- [4] Wang, F.; Zhao, C.; Liu, B.; aj.: Synthesis and photoluminescence of quasi-arrayed ZnMgO nanorods. *Journal of Physics D: Applied Physics*, ročník 42, č. 20, 2009.
- [5] Staňo, M.: *Výroba nanodráťů do porézniho oxidu hliníku pomocí elektrolyzy*. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012.
- [6] Buffat, P.; Borel, J.-P.: Size effect on the melting temperature of gold particles. *Phys. Rev. A*, ročník 13, č. 6, 1976.
- [7] Xia, Y.; Yang, P.; Sun, Y.; aj.: One-dimensional nanostructures: synthesis, characterization, and applications. *Advanced Materials*, ročník 15, č. 5, 2003.
- [8] Wang, Z.; Cao, H. C.; Guan, H. W.: Molecular Dynamics Simulation of Thermal Conductivity of 3C-SiC Nanowire. *Advanced Materials Research*, ročník 13, č. 6, 2013.
- [9] Da Col, S.; Jamet, S.; Rougemaille, N.; aj.: Observation of Bloch-point domain walls in cylindrical magnetic nanowires. *Physical Review B*, ročník 89, č. 18, 2014.
- [10] Wong, D.; Purnama, I.; Lim, G.; aj.: Current-induced three-dimensional domain wall propagation in cylindrical NiFe nanowires. *Journal of Applied Physics*, ročník 119, č. 15, 2016.
- [11] Hobbs, R.: *Semiconductor nanowire fabrication via bottom-up & top-down paradigms*. Dizertační práce, University College Cork, 2011.
- [12] Knez, M.; Bittner, A. M.; Boes, F.; aj.: Biotemplate synthesis of 3-nm nickel and cobalt nanowires. *Nano letters*, ročník 3, č. 8, 2003.
- [13] Ji, X.; Banks, C. E.; Xi, W.; aj.: Edge plane sites on highly ordered pyrolytic graphite as templates for making palladium nanowires via electrochemical decoration. *The Journal of Physical Chemistry B*, ročník 110, č. 45, 2006.
- [14] Ascnanomaterial: Single-pass AAO [online]. [cit. 14. 2. 2017].
URL: <http://www.acsnanomaterial.com/product.asp?cid=133&id=173>
- [15] Bhushan, B.: *Springer Handbook of Nanotechnology*. sv. 1, Springer Berlin Heidelberg, 2004, ISBN 9783540012184.

- [16] Wacaser, B. A.; Dick, K. A.; Johansson, J.; aj.: Preferential interface nucleation: an expansion of the VLS growth mechanism for nanowires. *Advanced Materials*, ročník 21, č. 2, 2009.
- [17] Lu, W.; Lieber, C. M.: Semiconductor nanowires. *Journal of Physics D: Applied Physics*, ročník 39, č. 21, 2006.
- [18] Jones, A. C.; Hitchman, M. L.: *Chemical vapour deposition: precursors, processes and applications*. Royal Society of Chemistry, 2009, ISBN 978-0-85404-465-8.
- [19] Scott, J. A.; Totonjian, D.; Martin, A. A.; aj.: Versatile method for template-free synthesis of single crystalline metal and metal alloy nanowires. *Nanoscale*, ročník 8, č. 5, 2016.
- [20] Babocký, J.: *Tvorba plasmonických mikro a nano struktur pomocí elektronové litografie*. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012.
- [21] D. Halliday, J. W., R. Resnick: *Fyzika, Část 2*. VUTIM, 2013, ISBN 978-80-214-4123-1.
- [22] Blundell, S.: *Magnetism in Condensed Matter*. Oxford Master Series in Condensed Matter Physics, OUP Oxford, 2001, ISBN 9780198505914.
- [23] Kittel, C.: *Úvod do fyziky pevných látek*. Academia, nakl. ČSAV, Praha, 1985. John Wiley and Sons, Inc., ISBN 978-0471415268.
- [24] Hubert, A.; Schäfer, R.: *Magnetic domains: the analysis of magnetic microstructures*. Springer Science & Business Media, 2008, ISBN 978-3-540-85054-0.
- [25] Uhlíř, V.: *Studium tenkých vrstev a povrchů pomocí megnetooptických jevů*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2006.
- [26] Hrabec, A.: *Domain wall dynamics in magnetic nanostructures: Effect of magnetic field and electric current*. Dizertační práce, Grenoble, 2011.
- [27] Gilbert, T. L.: A phenomenological theory of damping in ferromagnetic materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, ročník 40, č. 6, 2004.
- [28] Magnetoresistance – Wikipedia, The Free Encyclopedia. 2017, [Online; cit. 15. 4. 2017].
URL: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Magnetoresistance&oldid=774775361>
- [29] Vansteenkiste, A.; Leliaert, J.; Dvornik, M.; aj.: The design and verification of MuMax3. *Aip Advances*, ročník 4, č. 10, 2014.
- [30] Vaňatka, M.: *Magnetické multivrstvy pro aplikace ve spintronice*. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2013.
- [31] Baibich, M. N.; Broto, J. M.; Fert, A.; aj.: Giant magnetoresistance of (001) Fe/(001) Cr magnetic superlattices. *Physical review letters*, ročník 61, č. 21, 1988.

- [32] Kameš, J.: *Studium magnetických nanostruktur pro spintroniku*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2009.
- [33] Chappert, C.; Fert, A.; Van Dau, F. N.: The emergence of spin electronics in data storage. *Nature materials*, ročník 6, č. 11, 2007.
- [34] Parkin, S. S.; Hayashi, M.; Thomas, L.: Magnetic domain-wall racetrack memory. *Science*, ročník 320, č. 5873, 2008.
- [35] Prinz, G. A.: Magnetoelectronics applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, ročník 200, č. 1, 1999.
- [36] Goldstein, J.; Newbury, D. E.; Echlin, P.; aj.: *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis: a text for biologists, materials scientists, and geologists*. Springer Science & Business Media, 2012, ISBN 978-1461276531.
- [37] Kachtík, L.: *Aplikace transmisní elektronové mikroskopie s vysokým rozlišením pro strukturní analýzu nanovláken*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2016.
- [38] Turčan, I.: *Mikroskopie magnetických sil v proměnném magnetickém poli*. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2015.
- [39] Staňo, M.: *Chrakterizace magnetických nanostruktur pomocí mikroskopie magnetických sil*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014.

10. Seznam použitých zkratek

AFM	Mikroskopie atomárních sil (Atomic force microscopy)
AMR	Anizotropní magnetorezistence
CVD	Chemická depozice z plynné fáze (Chemical vapor deposition)
CIP	Proud v rovině (current in plane)
CPP	Proud kolmý k rovině (current perpendicular to plane)
EBL	Elektronová litografie
EDS	Energiově disperzní spektroskopie
GMR	Obří magnetorezistence (Giant magnetoresistance)
HDD	Pevný disk (Hard disk drive)
IPA	Isopropylalkohol
MFM	Mikroskopie magnetických sil (Magnetic force microscopy)
MTJ	Magnetický tunelový článek (Magnetic tunnel junction)
PMMA	Polymetylmetakrylát
SEM	Řádkovací elektronový mikroskop (Scanning electron microscope)
TEM	Transmisní elektronová mikroskopie
TMR	Tunelová magnetorezistence
VLS	Vapor-liquid-solid
VSM	Vibrating sample magnetometr
VSS	Vapor-solid-solid