



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

**VÝVOJ SOND PRO KOMBINOVANOU MIKROSKOPII
MAGNETICKÝCH SIL A ELEKTRONOVOU MIKROSKOPII**

DEVELOPMENT OF PROBES FOR COMBINED MAGNETIC FORCE MICROSCOPY AND ELECTRON
MICROSCOPY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Láznička

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Michal Pavera, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství
Student: **Tomáš Lázníčka**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Fyzikální inženýrství a nanotechnologie
Vedoucí práce: **Ing. Michal Pavera, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

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:

Vývoj sond pro kombinovanou mikroskopii magnetických sil a elektronovou mikroskopii

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rastrovací sondová mikroskopie (SPM) zaznamenala v průběhu posledních dvaceti let masivní rozvoj a stále se řadí mezi jednu z nejčastěji používaných analytických metod. Na Ústavu fyzikálního inženýrství (ÚFI) se již několik let intenzivně zabýváme vývojem těchto mikroskopů a rozvoj jejich funkcionality je dlouhodobým cílem.

Mikroskopie magnetických sil (MFM) je metoda založená na rastrování vzorku v tzv. nekontaktním režimu prostřednictvím magnetického hrotu. Tímto způsobem je možné studium magnetických vlastností povrchu (rozložení magnetických sil na povrchu vzorku) při vysokém rozlišení a nenáročném přípravě vzorku.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je navržení a testování sondy pro techniku mikroskopie magnetických sil:

1. Provedte rešeršní studii mikroskopie magnetických sil a "self-sensing" sond.
2. Navrhněte a vyrobte sondy k charakterizaci magnetických vlastností struktur.
3. V případě úspěšné výroby "self-sensing" sond otestujte jejich funkčnost v kombinaci s rastrovací elektronovou mikroskopii.

Seznam doporučené literatury:

MEYER, E., HUG, H. J., BENNEWITS, R., Scanning probe microscopy: the lab on a tip. Berlin: Springer, 2004, x, 210 s. ISBN 35-404-3180-2.

VŮJTEK, M., KUBÍNEK, R., MAŠLÁŇ, M., Nanoskopie. V Olomouci: Univerzita Palackého, 2012, 122 s. ISBN 978-80-244-3102-4.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. RNDr. Tomáš Šíkola, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Předkládaná práce se zabývá výrobou sond pro mikroskopii magnetických sil. Pro výrobu bylo nezbytné vymyslet přípravek, pomocí kterého můžou být z komerčních AFM sond vyrobeny sondy magnetické. Jsou specifikovány požadavky na přípravek pro depozici, jsou diskutovány konstrukční řešení postupně šesti návrhů přípravku, které byly zdokonalovány a dále je popsána výroba magnetických hrotů. Zvláštní kapitola je věnována zobrazování nadeponovaného materiálu na povrchu hrotů sond a testování magnetických sond.

Summary

This thesis deals with the production of magnetic probes for Magnetic Force Microscopy. For production, it was necessary to construct a device that can be used to make magnetic probes from commercial AFM probes. The requirements for the holder for deposition are specified, mechanical designs of six proposals which have been improved are discussed and further is described a production of magnetic probes. In a special chapter are shown deposited material on probe tips surface and results of testing magnetic probes.

Klíčová slova

Mikroskopie magnetických sil, sonda Akiyama, přípravek pro depozici

Keywords

Magnetic force microscopy Akiyama probe, holder for deposition

LÁZNIČKA, T. *Vývoj sond pro kombinovanou mikroskopii magnetických sil a elektronovou mikroskopii*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 45 s. Vedoucí Ing. Michal Pavera, Ph.D.

Prohlašuji, že bakalářskou práci na téma „Vývoj sond pro kombinovanou mikroskopii magnetických sil a rastrovací mikroskopii“ jsem vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Michala Pavery PhD., a že veškerá použitá literatura je uvedena v seznamu použité literatury.

Tomáš Láznička

Děkuji svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalu Paverovi za cenné odborné rady, pečlivé korektury a trpělivý přístup. Dále děkuji za pomoc v laboratořích a nesčetné rady Ing. Michalu Horkému. Také bych chtěl poděkovat Ing. Zdeňku Nováčkovi za pomoc a připomínky při měření. Danielu Vadlejchovi děkuji za pomoc při technických potížích a za skvěle strávený čas ve škole i mimo ni. V neposlední řadě bych rád poděkoval celé rodině za podporu během celého studia a svým kamarádům a spolužákům za příjemně strávené společné chvíle.

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

Tomáš Láznička

Obsah

Úvod	3
1 Mikroskopie skenující sondou	5
1.1 Mikroskopie atomárních sil	5
1.1.1 Silová interakce	5
1.1.2 Režimy AFM	8
Kontaktní režim	8
Bezkontaktní režim	8
Pokleповý režim	9
1.1.3 Detekční techniky	10
Statický mód	10
Dynamický mód	10
1.1.4 Sondy a detekce signálu	13
1.2 Mikroskopie magnetických sil	14
1.2.1 Magnetická interakce	15
1.2.2 Separace magnetického signálu	15
Lift mód	15
1.2.3 Sondy používané v MFM	16
2 Výroba MFM sond	19
2.1 Sonda Akiyama	19
2.2 Nanášení tenkých vrstev	21
2.2.1 Iontové naprašování	21
2.2.2 Magnetronové naprašování	21
2.2.3 Vakuové napařování	22
2.3 Návrh přípravku k depozici MFM sond	22
2.3.1 Návrh 1	23
2.3.2 Návrh 2	24
2.3.3 Návrh 3	24
2.3.4 Návrh 4	26
2.3.5 Návrh 5	26
2.3.6 Návrh 6	27
2.4 Proces výroby magnetických hrotů	27
3 Zkoumání a měření magnetických sond	31
3.1 Zkoumání magnetických hrotů v SEM	31
3.2 Měření magnetických hrotů pomocí AFM mikroskopu	34

Závěr	39
Seznam použité literatury	42
Seznam zkratek	43
Seznam příloh	45

Úvod

Mikroskopie magnetických sil (MFM) je mikroskopická technika, která byla vynalezena v roce 1987 Y. Martinem a H. K. Wickramasinghem [1]. Tato technika je odvozena z mikroskopie atomárních sil (AFM), která vznikla o rok dříve. MFM se využívá ke zkoumání magnetických nanostruktur nebo také například k manipulaci s víry v supravodičích nebo feromagnetickými doménami v různých materiálech. MFM je nezbytná v oblasti nanotechnologie, protože nabízí lepší prostorové rozlišení ve srovnání například se supravodivými kvantovými interferenčními měřeními.

Pro charakterizaci magnetických vlastností struktur je nezbytné využívat magnetické sondy. Jedna z metod detekce signálu je použití samosnímacích sond. Při použití těchto sond se nepoužívá laserový svazek pro detekci a to může přinášet určité výhody, jako například zkoumání vzorků náchylných na světlo. Po řadě testů byla jako vhodná zvolena komerční sonda Akiyama. Výrobu samosnímacích magnetických sond na Ústavu fyzikálního inženýrství zatím nikdo nerealizoval.

Práce je rozdělena do 3 hlavních částí. Na začátku je věnována pozornost teoretickému popisu souboru technik Mikroskopie rastrovací sondou (SPM), konkrétně AFM a MFM. V druhé části jsou popsány metody, které byly uvažovány pro výrobu magnetických hrotů. Byla vybrána metoda nanosení tenké feromagnetické vrstvy na hrot sondy, která zahrnuje některé experimentální metody jako iontové naprašování (IBS), magnetronové naprašování nebo vakuové napařování. Je také popsána sonda Akiyama, na kterou jsou nanášeny vrstvy feromagnetických materiálů. Je popsán také samotný postup výroby magnetické sondy. V této části je i vysvětlena konstrukce přípravku pro depozici sondy. V poslední části jsou prezentovány výsledky z depozice sondy, zkoumání magnetických vrstev na povrchu hrotů sond a také z měření pomocí mikroskopu LiteScope.

1. Mikroskopie skenující sondou

Mikroskopie skenující sondou (SPM, z anglického *Scanning Probe Microscopy*) je skupina mikroskopických technik, které se používá pro analýzu povrchu vzorku. Tyto techniky využívají těsného přiblížení velmi ostrého hrotu ke zkoumanému vzorku, kde dochází k interakci mezi hrotem a vzorkem. Ideálně ostrý hrot se posouvá po povrchu vzorku a v daných bodech zaznamenává signál, který je způsoben interakcí mezi hrotem a povrchem vzorku. Z hodnot, které jsou zaznamenány, je pak zkonstruován obraz vlastností povrchu vzorku. Technika umožňuje zobrazit oblasti vzorku od stovek mikrometrů po jednotky nanometrů.

Rozlišení získaného obrazu závisí především na velikosti a ostrosti použitého hrotu, ale také na vzdálenosti bodů, které jsou měřeny. Většina technik SPM dovoluje měřit parametry pouze povrchových nebo těsně podpovrchových vrstev [2]. Techniky SPM nemusí sloužit pouze k zobrazování vzorků, ale může být využita například k modifikaci povrchů až na atomární úrovni, manipulaci a pohybu s molekulami nebo i jednotlivými atomy [3].

Poloha hrotu vzhledem k povrchu vzorku je nastavována pomocí skeneru. Skener je obvykle vyroben z piezoelektrických materiálů [4], který může přesně ve všech třech osách pohybovat sondou nebo vzorkem.

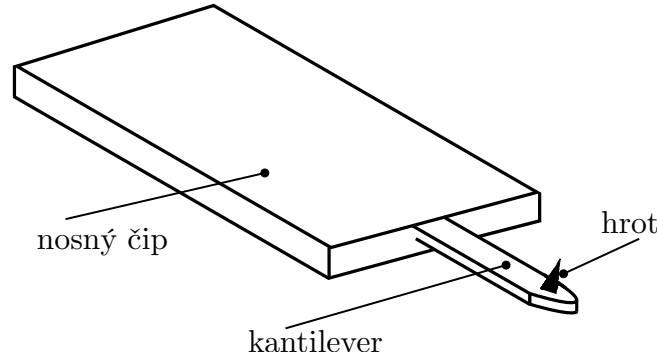
Technika SPM je velice široká oblast zahrnující dvě hlavní techniky rastrovací mikroskopie, Rastrovací tunelovací mikroskopii (STM, z anglického *Scanning Tunneling Microscopy*) a Mikroskopii atomárních sil (AFM, z anglického *Atomic Force Microscopy*).

1.1 Mikroskopie atomárních sil

Princip AFM je založen na detekci sil mezi hrotem a povrchem vzorku. K detekci sil se nejčastěji využívá sonda (obr. 1.1), která se skládá z čipu, ke kterému je připojen ohebný kantilever. Na volném konci tohoto kantileveru se nachází ostrý hrot. Hrot se přiblíží k povrchu vzorku, nastává interakce mezi hrotem a vzorkem a dochází k ohybu kantileveru. Tento ohyb je detekován a převeden na výsledný obraz topografie vzorku.

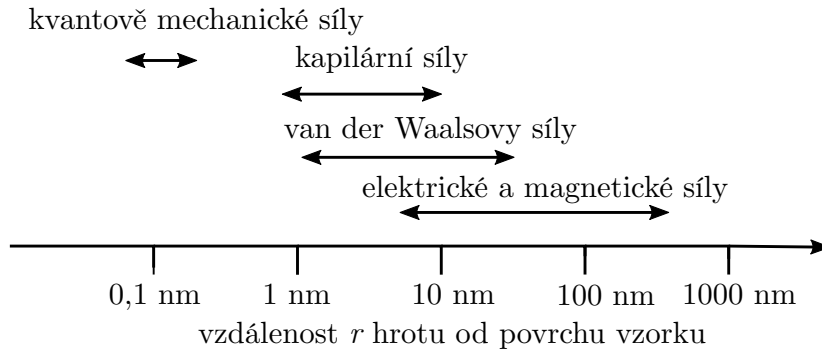
1.1.1 Silová interakce

U techniky AFM působí mezi hrotem sondy a povrchem vzorku velké množství sil. U AFM se jedná především o přitažlivé a odpudivé interakce. Dále také mohou mezi hrotem a vzorkem působit například magnetické, elektrické či tepelné (termální) síly,



Obrázek 1.1: AFM sonda skládající se z nosného čipu, kantileveru a ostrého hrotu.

keré taktěž přispívají k interakci. Na obr. 1.2 jsou tyto síly znázorněny i s rozsahem, ve kterých působí.



Obrázek 1.2: Síly, které působí na hrot, a vzdálenosti, na kterých dané síly působí, upraveno z [5].

Interakci mezi atomy hrotu sondy a vzorkem může být aproximována Lennard–Jonesovým potenciálem. Tento matematický model byl v roce 1924 publikován Johnem Lennard–Jonesem [6]. Model se skládá z přitažlivé van der Waalsovy interakce a z odpudivé, kvantově mechanické interakce. Nejběžnější vyjádření tohoto modelu je pomocí interakčního potenciálu:

$$w(r) = 4w_0 \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} \right], \quad (1.1)$$

kde w_0 je hodnota základního potenciálu (minimum potenciálu se nachází právě v $r = 1,12\sigma$, r představuje vzdálenost mezi atomy hrotu a povrhu vzorku, které mezi sebou interagují, σ rovnovážná vzdálenost mezi atomy). Síla, která charakterizuje interakci mezi atomy povrhu vzorku a hrotu, je dána záporně vzatou derivací potenciálu podle r , tedy:

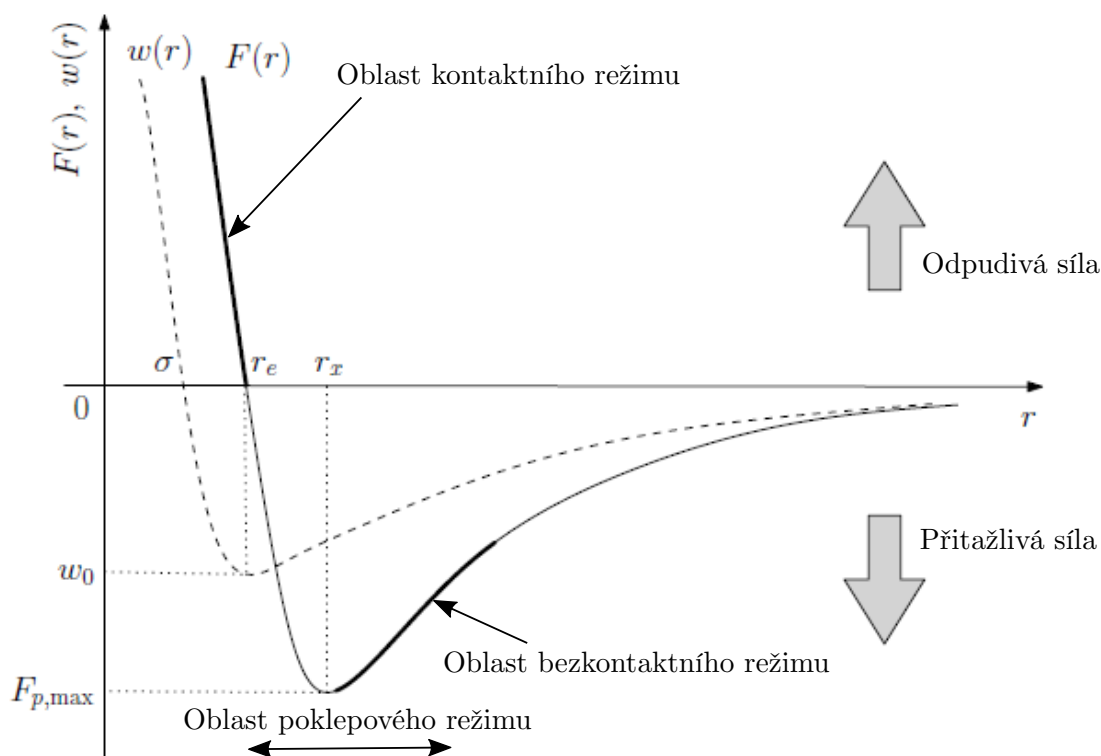
$$F(r) = -\frac{\partial w(r)}{\partial r} = 24w_0 \left[\left(\frac{2\sigma^{12}}{r^{13}} \right) - \left(\frac{\sigma^6}{r^7} \right) \right]. \quad (1.2)$$

Z rovnice (1.2) vyplývá, že síla má dvě složky, a to složku odpudivou a složku přitažlivou. Van der Waalsova interakce charakterizuje přitažlivou složku. Vzdálenost působení této interakce se pohybuje mezi 0,2 nm až 10 nm [7]. Interakce vzniká díky fluktuacím elek-

trických nábojů mezi účastníky vazby, např. mezi vzájemně indukovanými dipólovými momenty. V molekulární fyzice se považují takovéto dipóly za „bodové“. Přitažlivá složka je interakce delšího dosahu a je úměrná r^{-7} [5].

Odpudivou složku interakci můžeme vysvětlit pomocí Pauliho vylučovacího principu. Podle Pauliho vylučovacího principu se nemůžou v atomu nacházet dva elektrony s úplně stejnou konfigurací kvantových čísel. Po následném přiblížení dvou atomů dojde k překrytí jejich elektronových obalů, kde se nacházejí elektrony, které v jednotlivých atomech mají stejná kvantová čísla. Po překrytí musí dojít k tomu, že některé elektrony přejdou na vyšší energetickou hladinu. Tento přechod do vyšších hladin pak vyvolá odpudivou sílu. Tato odpudivá síla je krátkodosahová a je úměrná r^{-13} .

Na obr. 1.3 je znázorněn průběh Lennard–Jonesova potenciálu a také interakční síly mezi atomy vzorku a hrotu. Křivka, která se nachází nad vodorovnou osou charakterizuje odpudivou sílu a kladný potenciál, síla pod touto osou naopak sílu přitažlivou a potenciál záporný. Z grafu vyplývá, že krátkodosahová síla je charakterizována křivkou jdoucí zleva k bodu r_e , který leží na ose r . Naopak dalekodosahovou sílu charakterizuje křivka jdoucí od r_e vpravo, roste pomalu a nabývá velkých hodnot r . Právě ve vzdálenosti r_e je potenciál minimální, což značí rovnováhu mezi přitažlivými a odpudivými silami, takže výsledná síla je zde nulová.[8]



Obrázek 1.3: Závislost Lennard–Jonesova interakčního potenciálu $w(r)$ a síly $F(r)$ na vzdálenosti r mezi dvěma atomy, převzato a upraveno z [9].

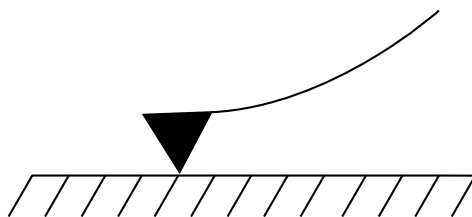
1.1.2 Režimy AFM

Při přibližování hrotu ke vzorku nejprve nepůsobí žádné síly. Při zmenšení vzdálenosti začínají působit síly přitažlivé. Při dalším přibližování se hrot dostane do bodu, kdy gradient sil překročí tuhost kantileveru a hrot se dostane do oblasti odpudivých sil. Při dalším přibližování se již zvětšuje pouze odpudivá síla. Při následném oddalování hrotu se opět dostáváme do bodu, kdy je gradient síly a tuhost kantileveru stejná, kantilever se stává nestabilní a oddálí se od povrchu. Signál, který odpovídá topografii, se získá z prohnutí raménka směrem nahoru nebo dolů. Můžou zde však existovat určité nepřesnosti při měření, a to díky setrvačnosti kantileveru nebo jeho zkroucení.

Dle oblastí Lennard–Jonesova interakčního potenciálu se rozlišují různé režimy měření.

Kontaktní režim

O kontaktním režimu hovoříme tehdy, je-li vzdálenost mezi hrotem a vzorkem tak malá, že převažují odpudivé síly (obr. 1.4). Síly, které v tomto režimu působí, jsou krátkodosahové, jak vyplývá z rovnice (1.2). Měření může probíhat ve dvou režimech, a to režim konstantní výšky nebo konstantní síly.



Obrázek 1.4: Znázornění kontaktního režimu měření.

V metodě konstantní výšky je nastavena vzdálenost mezi hrotem a povrchem vzorku a udržuje se v průběhu celého měření konstantní a měří se prohnutí kantileveru. Toto prohnutí odpovídá topografii povrchu. Tato metoda se ve většině případů využívá pro měření rovných povrchů. Nevýhodou metody konstantní výšky je možnost poškození vzorku popřípadě poškození hrotu o nerovnosti na povrchu vzorku.

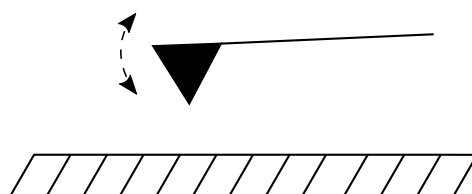
Druhá metoda využívá zpětné vazby, pomocí které je udržováno konstantní prohnutí kantileveru. Informace o prohnutí kantileveru se používá jako vstupní parametr zpětné vazby, která nastaví skener tak, že po celou dobu skenování působí na kantilever stejná síla. Je zaznamenávána výchylky skeneru a ta tvoří výsledný obraz topografie.

Nevýhodou režimu může být kontaminace hrotu například v případě měření biologických vzorků, proto se kontaktní režim omezuje na použití pouze pro tvrdší materiály. Může také docházet k deformaci vzorku nebo otupení vrcholu hrotu.

Bezkontaktní režim

Bezkontaktní režim probíhá v určité výšce nad povrchem vzorku a využívá zejména van der Waalových sil delšího dosahu. Stejně jako kontaktní režim můžeme bezkontaktní režim rozdělit do dvou metod, metoda s konstantní výškou a metoda s konstantní

silou. Volný kantilever má určitou vlastní rezonanční frekvenci i a tuhost k a v oblasti silového působení se jeho rezonanční frekvence změní. Kantilever je rozkmitáván v okolí své rezonanční frekvence (obr. 1.6) tak, aby nedošlo ke kontaktu s povrchem vzorku. Amplituda kmitů bývá v rozmezí 1 nm - 10 nm. Když kantilever zaznamená sílu, dojde ke změně rezonanční frekvence, a to se následně projeví změnou amplitudy kmitů. Při metodě konstantní výšky je skener nastaven tak, aby vzdálenost vzorku hrotu byla konstantní. Zaznamenává se změna rezonanční frekvence sondy nebo její amplituda. Změny těchto parametrů utváří výsledný obraz vzorku.



Obrázek 1.5: Znárodnění bezkontaktního režimu měření.

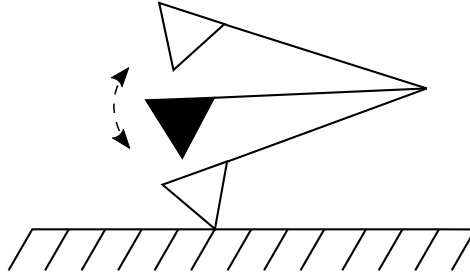
Při metodě konstantní síly je opět potřeba zpětné vazby, která používá jako vstup rezonanční frekvenci sondy, a zaznamenává se výchylka skeneru, ze které se poté tvoří výsledný obraz vzorku. Kvalitní kantilever by měl vykazovat pouze jednu rezonanční frekvenci.

Výhody tohoto režimu spočívají v tom, že nedochází ke kontaktu hrotu se vzorkem a proto nedochází k poškození vzorku, ani k jeho kontaminaci. Výhodou také je, že se prodlužuje životnost sondy. Tento režim je také výhodný například k měření měkkých vzorků, protože nedochází k dotyku sondy se vzorkem. Za největší nevýhodu lze považovat existenci případné tenké vrstvy vody pokrývající povrch vzorku. V kontaktním režimu hrot vrstvou vody proniká a zobrazí povrch pod vrstvou, v bezkontaktní režimu se hrotem zobrazí povrch kapaliny [10].

Poklepový režim

Poklepový režim (též *tapping mode*) je typ měření, který je založený na kombinaci předchozích dvou režimů, tedy kontaktního a bezkontaktního. Využívá stejně jako u bezkontaktního režimu oscilace nad povrchem vzorku, ale amplituda oscilací je natolik velká, že dochází k přímému pravidelnému kontaktu hrotu se vzorkem (obr. 1.6), jako je tomu u kontaktního režimu. Topografie vzorku je pak stejně jako u bezkontaktního režimu detekována pomocí změny rezonanční frekvence sondy. Vůči kontaktnímu režimu je výhodou větší rozlišení, nedochází zde k poškození vzorků nebo k jejich poškrábání.

Nevýhodou tohoto režimu je ale pomalejší skenování než v kontaktním režimu, protože dochází k interakci s povrchem pouze v jednom bodě, ve kterém se v nejnižším bodě kmitu vždy dotkne povrchu. Další nevýhodou oproti bezkontaktnímu režimu je, že dochází k opotřebení, deformaci či narušení atomární struktury hrotu kvůli kontaktu hrotu se vzorkem.



Obrázek 1.6: Znázornění poklepového režimu měření.

1.1.3 Detekční techniky

AFM při skenování využívá dvou detekčních módů a to módu statického a dynamického.

Statický mód

V tomto módu je kantilever vychýlen silovou interakcí mezi povrchem vzorku a samotným hrotem. Podle Hookova zákona je vychýlení Δz kantileveru s raménkem úměrné síle F , která působí mezi hrotem a vzorkem

$$F = k\Delta z, \quad (1.3)$$

kde k je konstanta pružnosti kantileveru. Je však potřeba hledat kompromis mezi vzdáleností od vzorku a působením parazitních sil, které nechceme zahrnovat v našem měření. Detekční zařízení poté měří pouze výchylku raménka, a proto je za výsledný obraz „zodpovědná“ pouze vychylující síla.

Dynamický mód

V druhém režimu můžeme kantilever chápat jako harmonický oscilátor s danou rezonanční frekvencí, která je dána jak hmotností m , tak konstantou pružnosti k . V dynamickém módu kmitá kantilever na své rezonanční frekvenci. Toto kmitání se dá dobře definovat tzv. harmonickou aproximací. Pohyb kantileveru je možné popsat rovnicí tlumeného harmonického oscilátoru (obr. 1.7):

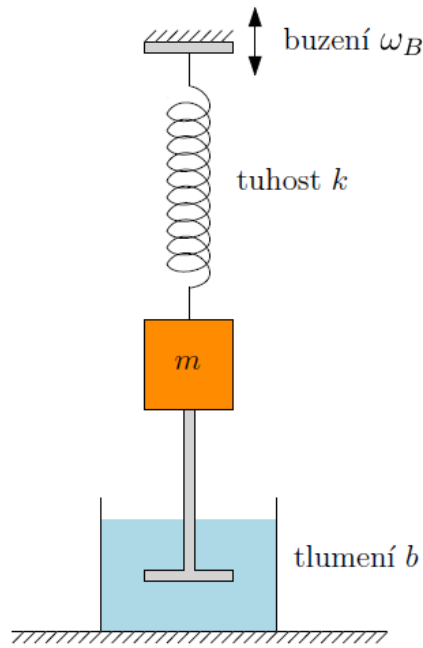
$$m\ddot{z} + b\dot{z} + kz = F_B(z) \cos(\omega_B t), \quad (1.4)$$

kde $F_B(z)$ je budící síla, ω_B je budící frekvence, m je hmotnost kantileveru s hrotem, b součinitel lineárního odporu a k je tuhost kantileveru. Řešení této rovnice v ustáleném stavu můžeme napsat jako:

$$z = A(\omega_B) \cos[\omega_B t + \varphi(\omega_B)], \quad (1.5)$$

kde $A(\omega_B)$ je amplituda kmitů, kterou lze vyjádřit jako

$$A(\omega_B) = A_B \frac{\omega_r^2}{\sqrt{(\omega_r^2 - \omega_B^2)^2 + (\omega_r \omega_B / Q)^2}}, \quad (1.6)$$

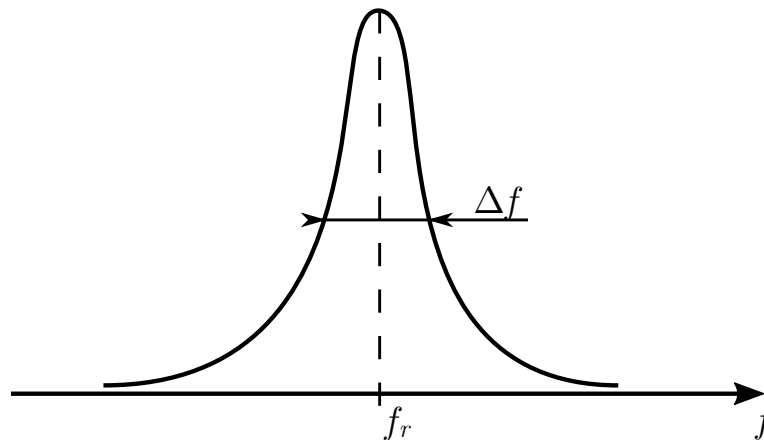


Obrázek 1.7: Tlumený harmonický oscilátor, převzato z [5].

kde $Q = \frac{m\omega_r}{b}$ se označuje jako tzv. *quality factor* (Q -faktor) [5]. Q -faktor je bezrozměrný parametr odpovídající kvalitě oscilátoru, tedy jeho útlumu. Čím větší je hodnota Q , tím déle vydrží oscilátor kmitat bez dodávání energie z vnějšku (nižší rychlost ztráty energie) a také je potřeba méně energie pro udržení kmitů s konstantní amplitudou. Další, avšak ne úplně ekvivalentní definicí Q -faktoru (obr. 1.8), je pomocí poměru frekvence a pološířky rezonanční křivky:

$$Q = \frac{\omega_r}{\Delta\omega} = \frac{f_r}{\Delta f}, \quad (1.7)$$

kde f_r je rezonanční frekvence a Δf je pološířka rezonanční křivky.



Obrázek 1.8: Definice Q -faktoru pomocí šířky rezonanční křivky a rezonanční frekvence.

Při dynamickém režimu se udržuje kantilever v okolí své rezonanční frekvence. Silové působení, které se může pomocí dynamického módu AFM měřit, je tak malé, že

můžeme hrot oddálit od povrchu vzorku. Podle toho, jak moc je hrot vzdálen od vzorku, rozlišujeme dva režimy snímání, a to kontaktní režim a pokleповý režim. Rezonanční frekvenci, kterou budíme sondy v dynamickém módu můžeme psát:

$$f_r = \frac{\omega_r}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{ef}}{m}}, \quad (1.8)$$

kde k_{ef} chápeme jako efektivní konstantu pružnosti materiálu. Efektivní konstanta pružnosti je tvořena dvěma příspěvky

$$k_{ef} = k - \frac{\partial F}{\partial z}, \quad (1.9)$$

a to konstantou pružnosti kantileveru k a také derivačním členem $\frac{\partial F}{\partial z}$, který se také mění se vzdáleností hrotu od povrchu vzorku. Derivační člen můžeme chápat jako přidanou konstantu pružnosti, kdy při malých výchylkách se tento člen měnit nebude a model harmonického oscilátoru může být zachován, v případě velkých výchylek bude tento člen velký a bude způsobovat neharmoničnost oscilací. Při malých výchylkách můžeme tedy psát

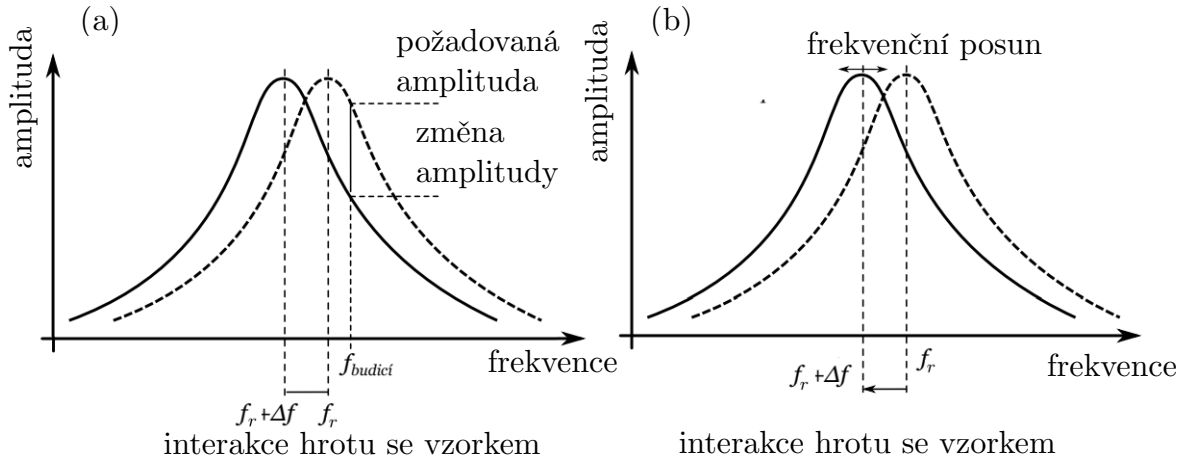
$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k - \frac{\partial F}{\partial z}}{m}}, \quad (1.10)$$

a můžeme i ukázat, že derivační člen $\frac{\partial F}{\partial z}$ změní rezonanční frekvenci kantileveru na

$$f_r = f_0 \sqrt{1 - \frac{\frac{\partial F}{\partial z}}{k}}, \quad (1.11)$$

kde f_0 je volná rezonanční frekvence kantileveru. V případě, že nedochází k žádné interakci mezi povrchem vzorku a hrotem sondy, je tato volná frekvence rovna rezonanční frekvenci kantileveru. Existují dva způsoby měření změny rezonanční frekvence kantileveru:

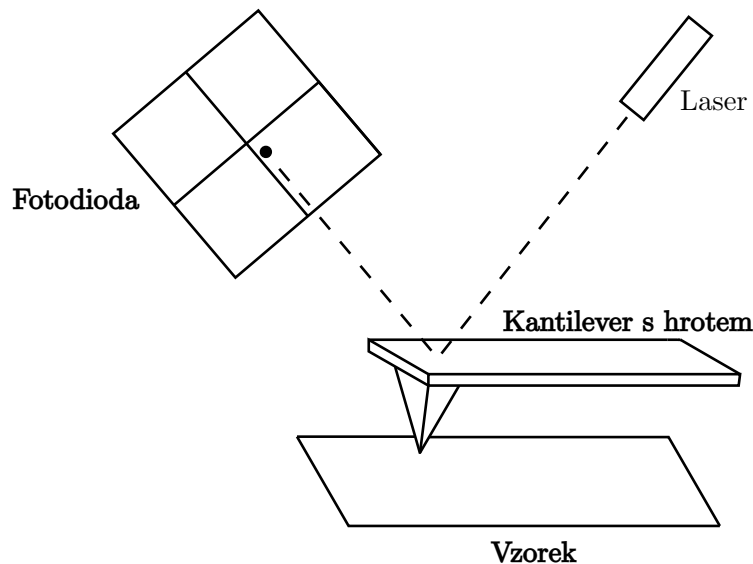
- Měření amplitudy - Kantilever osciluje s předem nastavenou konstantní frekvencí okolo své rezonanční frekvence. Při interakci hrotu s povrchem vzorku se změní jeho rezonanční frekvence a dojde k posunu amplitudové frekvenční charakteristiky (obr. 1.9a). Jelikož kantilever osciluje stále na stejné frekvenci, dochází ke změně amplitudových kmitů. Tato technika tedy zaznamenává změnu amplitudy kmitů kantileveru.
- Měření rezonanční frekvence - Při měření rezonanční frekvence je kantilever buzen právě na své rezonanční frekvenci. Při interakci se opět amplitudově frekvenční charakteristika posune, nyní se změní i budící frekvence kantileveru (obr. 1.9b). Změny v rezonanční frekvenci jsou zaznamenány. Do obvodu s kantileverem je přidán fázový závěs (PLL, z anglického *Phase-Locked Loop*), což je systém, který generuje signál vstupující do sondy. Tento systém porovnává fázi signálu, která do sondy vstoupila, a fázi výstupního signálu a upravuje vstupní signál tak, aby se fáze shodovaly [11].



Obrázek 1.9: Princip měření změny amplitudy a frekvenčního posunu. Čárkovane je vyznačena rezonanční frekvenční křivka volného kantileveru, plná čára znázorňuje rezonanční křivku po přiblížení kantileveru s hrotem ke vzorku. Znázornění metody měření amplitudy (a). Dochází ke změně amplitudy kmitů, zpětná vazba pak upraví vzdálenost hrotu tak, aby nastavená amplituda zůstala konstantní. Znázornění metody měření posunu rezonanční křivky (b). Raménko kmitá na frekvenci $f_r + \Delta f$ (kde se nastavuje Δf -zpětnou vazbu). Modulátor udržuje vzdálenost hrotu od vzorku tak, aby rezonanční frekvence odpovídala frekvenci nastavené. Převzato a upraveno z [12].

1.1.4 Sondy a detekce signálu

Jednou z nejpoužívanějších metod detekce ohybu kantileveru je měření pomocí odrazu laserového paprsku (obr. 1.10).



Obrázek 1.10: Princip AFM s ohebným kantileverem a detekcí pomocí fotodiody.

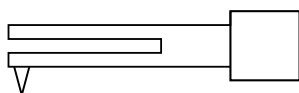
Laserový paprsek dopadá na cantilever, odráží se od jeho zadní strany, dopadá na čtyřdílnou fotodiodu a měří se intenzita v jednotlivých částech. Změní-li se ohnutí kantileveru, změní se i úhel, pod kterým se laserový paprsek odrazí, a proto svazek dopadne do jiného místa na fotodiodě. Výhodou tohoto systému je velmi vysoká citlivost k malým ohybům kantileveru [13]. Nevýhodou systému je složitější konstrukce

mikroskopu z důvodu nutnosti použití laseru, jeho správného nastavení, dopadu na konec kantileveru a odrazu na fotodiodu.

Další používaná metoda detekce signálu je za použití samosnímacích sond („*self-sensing*“). Hlavní výhodou této sondy je možnost přímého měření rezonanční frekvence a amplitudy kmitů. U některých mikroskopů s touto sondou lze nalézt výhodu také ve volném prostoru nad sondou, což lze využít například pro kombinaci s optickým mikroskopem nebo rastrovacím elektronovým mikroskopem. Těmito sondami dále můžeme měřit vzorky, které jsou velmi náchylné na světlo.

Jedním z typů samosnímacích sond je pružný kantilever, do kterého jsou následně vyleptány vodivé elektrické kontakty a také nanosená vrstva piezoelektrického materiálu [14]. Kantilever s hrotem může být vybuzen mechanicky pomocí externího zařízení nebo elektricky přivedením elektrického signálu na elektrody. Budící vstupní elektrický signál je porovnáván s měřeným výstupním signálem. Například nastavuje vždy rozdíl fáze mezi vstupním a výstupním signálem tak, aby byl tento rozdíl nulový a tím se může zaznamenat změna rezonanční frekvence kantileveru.

Dalším typem samosnímacích sond je křemenná ladička (QTF, z anglického *Quartz Tuning Fork*) na obr. 1.11. V běžné praxi se používá jako zdroj přesné frekvence pro měření času - nejrozšířenější pro tento účel jsou QTF s frekvencí 2^{15} Hz neboli 32,768 kHz. Při základní vlastní frekvenci ladičky kmitají raménka proti sobě. V tomto módu dosahuje ladička nejvyšších hodnot Q a je také nejméně ovlivňována vnějšími otřesy a rázy. To je výhodné pro použití v přenosných zařízeních, například v náramkových hodinkách, pro které byl rezonátor QTF vyvíjen především.



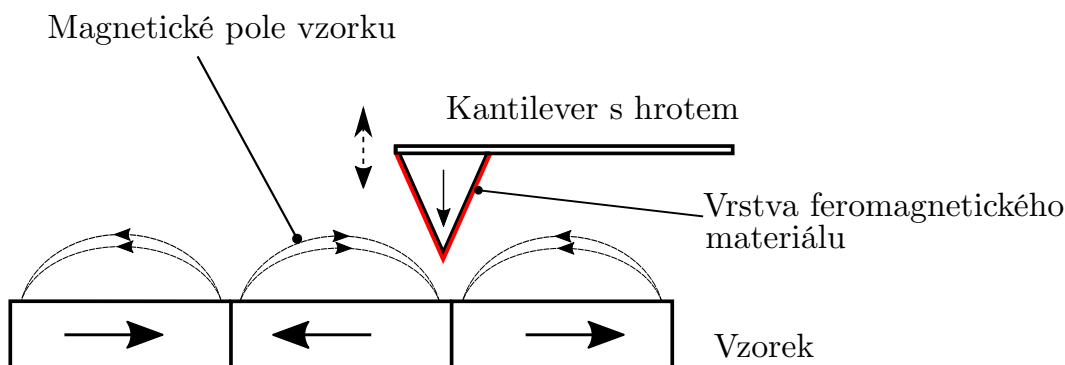
Obrázek 1.11: Schéma QTF s hrotem.

Díky vysokému Q -faktorů se využívá také v SPM mikroskopii. Symetrie ladičky ovlivňuje Q -faktor, proto je kladen důraz, aby se omezila hmotnost hrotu na minimum nebo se správně vyladila symetrie ladičky, například nalepením objektu stejné hmotnosti na druhé raménko ladičky.

1.2 Mikroskopie magnetických sil

Poté co roku 1986 vynalezli Binning a Rohrer AFM mikroskop, nechybělo málo k objevu mikroskopie magnetických sil (MFM, z anglického *Magnetic Force Microscopy*). V roce 1987 tento krok učinili Martin a Wickramasinghe a jejich postup je popsán v publikaci o použití magnetických hrotů v AFM [1]. MFM je jedna z magnetických zobrazovacích metod, která dokáže poskytnout vysoké rozlišení (10 nm - 100 nm). Oproti metodě AFM se používá ostrý magnetický hrot připevněný na ohebném kantileveru. Schéma metody je možné vidět na obr. 1.12.

Obraz je tvořen skenováním hrotu po povrchu. Měří se síla či gradient síly jako funkce polohy [15]. Interakcí mezi hrotem a povrchem vzorku dochází k vychýlení



Obrázek 1.12: Schéma skenování magnetickým hrotem při MFM

polohy kantileveru. Protože jsou magnetické síly dalekodosahové, měří se zpravidla ve vyšších vzdálenostech hrotu od povrchu vzorku, čímž se vyloučí vliv krátkodosahových sil.

1.2.1 Magnetická interakce

Ve ferromagnetickém materiálu se nachází doménové magnetické struktury, ve kterých mají atomy i molekuly shodně orientované magnetické momenty. Tyto domény jsou tvořeny dipólem, který vytváří magnetické pole. Pokud jsou domény shodně orientovány, nad povrchem vzorku se vytvoří magnetické pole. Magnetické síly jsou dalekodosahové (interakce mezi dipóly závisí na r^{-3} , naproti tomu krátkodosahové atomární síly, jako van der Waalsova interakce, závisí na r^{-6}). Proto pro separaci dalekodosahových magnetických sil a krátkodosahových sil je třeba se pohybovat s hrotem ve výšce nad povrchem vzorku od 10 nm do 100 nm [5].

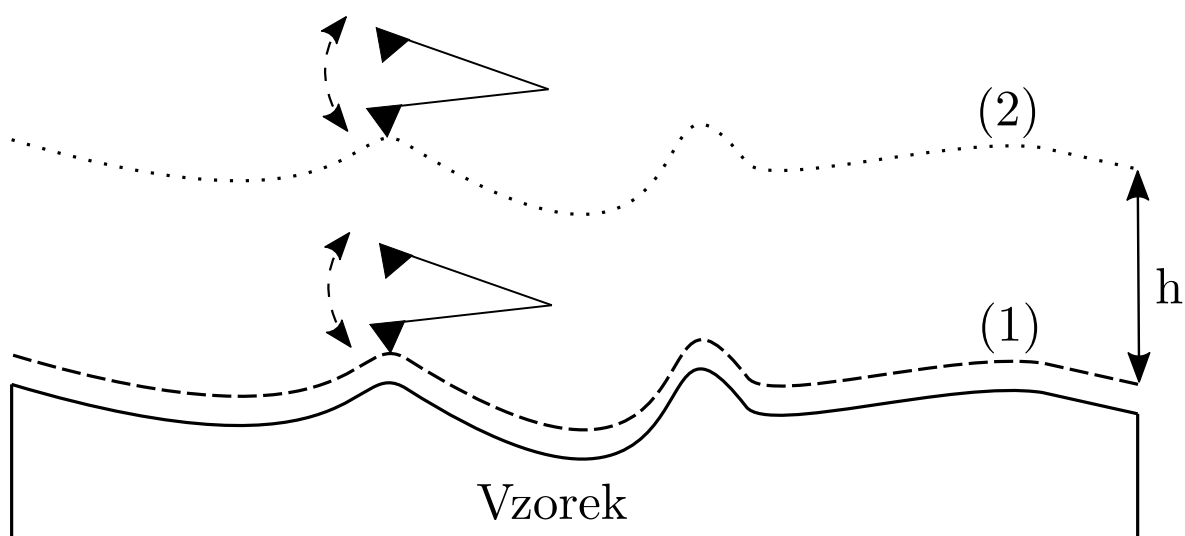
1.2.2 Separace magnetického signálu

Při zobrazení magnetických domén pomocí MFM je velice důležité, jak moc je hrot vzdálen od povrchu vzorku. Při práci v určité vzdálenosti, kdy působí dalekodosahové síly, se začne projevovat efekt magnetických sil a obraz tedy bude obrazem magnetického pole vzorku. V těchto vzdálenostech se mohou občas projevit i síly kratšího dosahu. Byl proto potřeba vymyslet způsob, kterým se dají tyto vlivy úplně odstranit. Nejvíce používaným způsobem, jak oddělit krátkodosahové síly, které vystupují v měřené topografii a dalekodosahové síly je nejdříve topografii změřit, a pak určitým způsobem tuto topografii použít pro měření magnetických sil. Nejužívanější metodou je tzv. Lift mód.

Lift mód

Lift mód (také *second pass*) je nejpoužívanější technika pro zobrazování MFM. Pro měření magnetického signálu se využívá dvou kroků, které jsou znázorněny na obr. 1.13. Při prvním kroku je hrot v blízkosti povrchu a převažují krátkodosahové interakce, které odpovídají topografii vzorku. Při druhém kroku se hrot vzdálí alespoň o 10 nm od povrchu vzorku a kopíruje topografii, kterou zaznamenal v předešlém kroku. To

způsobí to, že hrot udržuje konstantní výšku nad povrchem vzorku a topografie již neovlivní měření magnetického signálu.



Obrázek 1.13: Lift mód - nejběžnější technika skenování v MFM. Při první kroku (1) hrot zaznamenává topografii, v druhém kroku (2) je hrot zvednut o vzdálenost h (minimálně o 10 nm) a kopíruje topografii.

1.2.3 Sondy používané v MFM

Hrot, kterým skenujeme po povrchu vzorku, by měl být vyroben z takového materiálu, aby měl co největší magnetický moment. V ideálním případě by měl být hrot tvořen jednou magnetickou doménou, aby nedocházelo k ovlivňování magnetických domén na hrotu a tím by dosahoval hrot výborné citlivosti. Na výrobu prvních magnetických hrotů k mapování magnetických sil byly použity niklové či kobaltové dráty [15]. Dále se též používaly wolframové dráty, na které se nanášely tenké magnetické vrstvy [16]. V poslední době se spíše využívá křemíkových nebo křemík–nitridových hrotů, které jsou pokryty tenkou feromagnetickou vrstvou. Stále více se při studiu magnetických sil využívá vnějšího magnetického pole, proto jsou hroty vyráběny z magneticky tvrdých materiálu pro jejich velkou odolnost vůči vnějšímu magnetickému poli. Naopak magneticky měkké materiály tuto vlastnost nemají. Použité feromagnetické materiály se dělí na dvě skupiny, a to:

- Magneticky měkké materiály - směr magnetických momentů z takovýchto materiálů vždy podléhá vlivu přiloženého vnějšího magnetického pole. Hrot bude vždy ovlivňován přitažlivými silami, magnetický moment se postupně přizpůsobí měnícímu se magnetickému poli. Kvůli jeho snadné změně magnetického momentu jsou tyto materiály nevhodné pro měření v externím magnetickém poli [11]. Takovéto materiály jsou například železo (Fe) a permalloy (NiFe).

- Magneticky tvrdé materiály - tyto magnetické materiály zůstávají magnetické i po zániku pole, kterým byly zmagnetovány a částečně se chovají jako trvalé magnety. Směr magnetických momentů z takovýchto materiálů by se během skenování neměl měnit, což umožňuje získat informaci o směru působícího rozptylového pole vzorku. Příkladem takovýchto materiálů jsou kobalt nebo slitiny kobaltu a chromu (CoCr).

2. Výroba MFM sond

Existuje řada metod, kterými je možno magnetické sondy vyrábět. Možnosti výroby těchto sond závisely na dostupných prostředcích, kterými by bylo možné tyto sondy vyrábět. První metodou byl proces pomocí indukovaného fokusovaného elektronového svazku (FEBID, z anglického *Focused Electron Beam Induced Deposition* [17]). Jedná se o metodu umožňující přímou depozici materiálu za vzniku struktur definovaných tvarů a rozměrů. Jsou založeny na aplikaci vhodného plynu (prekurzoru), který je přiváděn pomocí systému vstříkovaní plynu na povrch materiálu, a pomocí působení elektronového svazku je rozkládán na jednotlivé komponenty. Z pohledu výroby je tento proces poměrně drahý a časově velmi náročný.

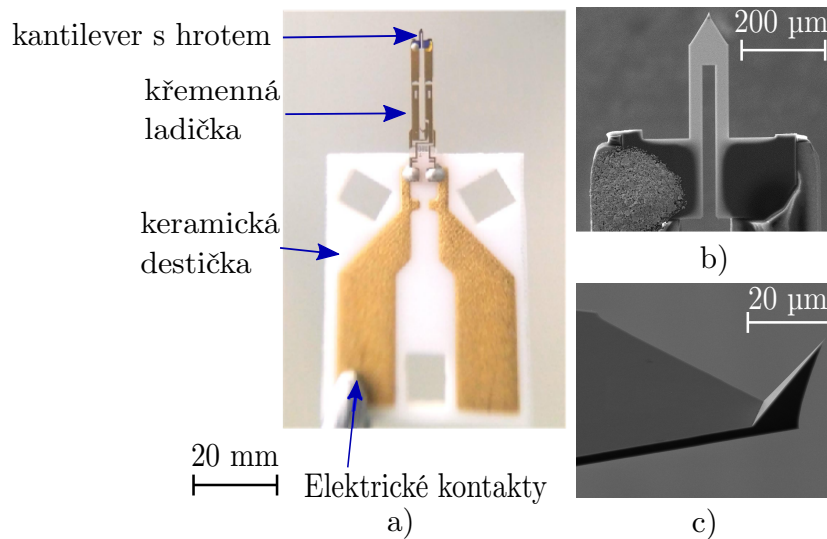
Druhou metodou výroby magnetických hrotů je lepení magnetických drátů na křemennou ladičku. Metoda je založena na křemenné ladičce o rezonanční frekvenci 32,768 kHz, na kterou je přilepen drát z magnetických materiálů, jakými je cín nebo kobalt. Drát je ukončen hrotem, který se může vytvářet dvěma způsoby. Jedním ze způsobů je elektrochemickým leptáním nalepeného hrotu k dosažení potřebné ostrosti hrotu. Dalším ze způsobů je stříhání drátku a jeho následné přilepení na konec křemenné ladičky.

Další metodou výroby magnetických hrotů je nanášení tenkých vrstev materiálu na komerční sondu. Sonda, která je použita pro depozici tenkých vrstev, je komerčně vyráběná sonda Akiyama (*Akiyama-Probe*).

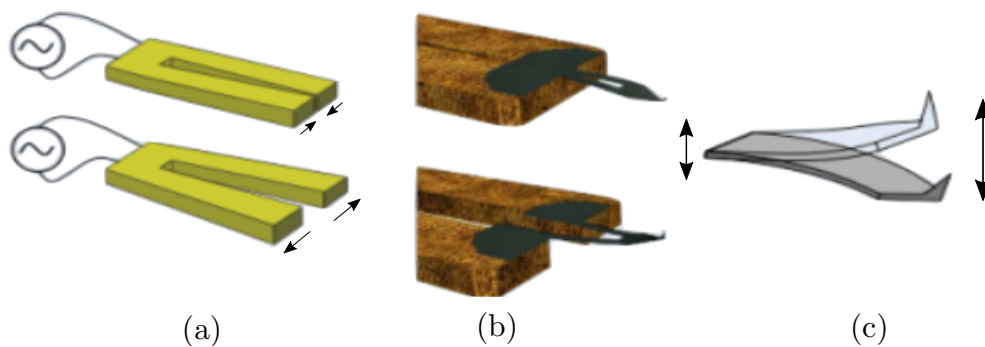
2.1 Sonda Akiyama

Pro výrobu byla zvolena komerčně dostupná sonda Akiyama (obr. 2.1). Akiyama je samosnímací sonda na bázi křemenné ladičky skládající se z keramické destičky s dvěma elektrickými kontakty, ke kterým je připevněna křemenná ladička. Kantilever s hrotem je připevněn mezi oba volné konce ladičky (obr. 2.1b). Resonanční frekvence sondy Akiyama je přibližně 50 kHz a Q -faktor okolo 1800. Sonda Akiyama je navržena pro práci v různých prostředích, například ve vakuu, za nízkých teplot nebo pro měření na vzduchu.

Elektrický signál je přiveden na elektrody ladičky a vyvolá jejich deformaci, což je vidět na obr. 2.2a. Raménka ladičky (obr. 2.2b) začnou kmitat ve stejné rovině, ale s opačnou fází, takže se přibližují a vzdalují. Tento pohyb má za následek rozkmitání přilepeného kantileveru s hrotem (obr. 2.2c), který kmitá v ose kolmé na rovinu kmitání ramének.



Obrázek 2.1: Zobrazení sondy Akiyama, (a) celý pohled na sondu [18], (b) pohled na sondu shora v SEM, (c) zvětšený boční pohled na hrot sondy Akiyama.



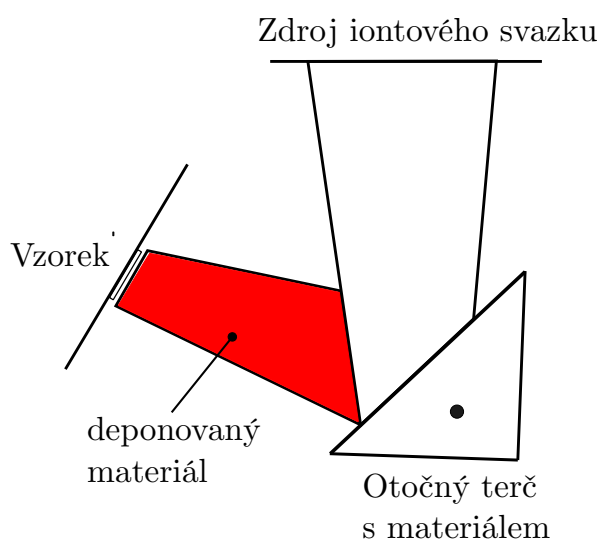
Obrázek 2.2: Kmitání ladičky sondy, (a) rozkmitání v rovině křemenné ladičky, (b) transformace pohybu na kantilever, (c) kmitání kantileveru s hrotem kolmo na rovinu kmitání křemenné ladičky. Převzato z [18].

2.2 Nanášení tenkých vrstev

V rámci této práce byla pro přípravu magnetických hrotů využita skupina technik s názvem Depozice z plynné fáze (PVD, z anglického *Physical Vapour Deposition*). Pro depozici byly vybrány tři metody, které byly dostupné na Ústavu fyzikálního inženýrství (ÚFI) nebo ve Středoevropském technologickém institutu (CEITEC, z anglického *Central European Institute of Technology*). Metoda iontového napařování (IBS, z anglického *Ion Beam Sputtering*) dostupná na ÚFI a dvě metody, magnetronová depozice a vakuové napařování nacházející se na technologickém institutu CEITEC.

2.2.1 Iontové napařování

Iontové napařování je jedna z metod fyzikální depozice tenkých vrstev. Využívá iontový svazek, který dopadá na terč s materiálem, který chceme nanést na vzorek. Tento materiál je pomocí iontů odprašován a dopadá na povrch vzorku, kde vytvoří tenkou vrstvu obr. 2.3. Na ÚFI je tato metoda realizována pomocí vysokovakuové depoziční aparatury, která obsahuje iontový zdroj Kaufmanova typu [19].



Obrázek 2.3: Schéma metody Iontového napařování, upraveno z [19].

2.2.2 Magnetronové napařování

Magnetronové napařování využívá podobného principu jako iontové napařování. Zařízení na magnetronové napařování od firmy BESTEC se nachází v technologickém institutu CEITEC. Bombardováním terče energetickými částicemi se materiál terče rozprašuje a tento rozprašený materiál dopadá na vzorek. Systém pro magnetronové napařování se skládá z vakuové komory, která je čerpána na vysoké vakuum. Uvnitř komory je usazen terč s materiálem. Terč je zapojen do obvodu jako katoda a přivádí se na něj napětí. Do komory se připoustí pracovní plyn, nejčastěji argon. Před terčem se po přivedení napětí zapálí v argonu doutnavý výboj (plazma). Výboj se projeví jako zdroj světla. Argonové ionty bombardují povrch terče, materiál se rozprašuje a je

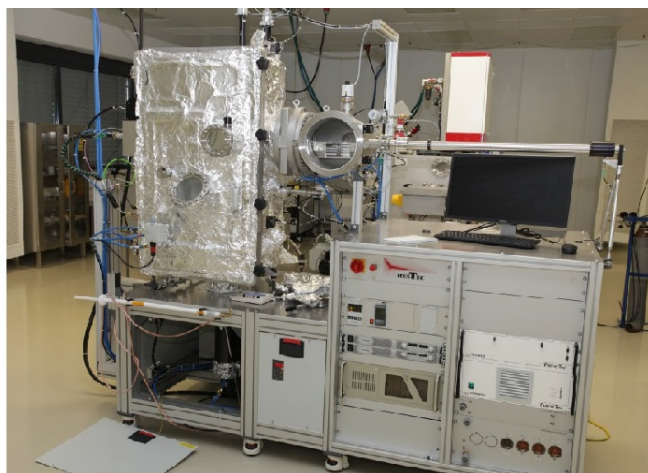
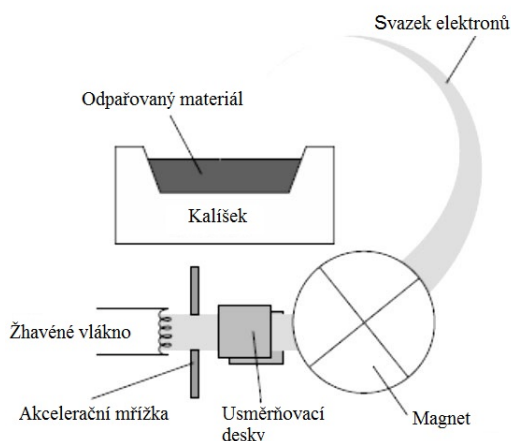
deponován na substrát. Pod materiálem terče je umístěn silný magnet, který je chlazený vodou. Přítomnost magnetického pole zefektivňuje ionizaci argonu v plazmatu a ve svém důsledku zlepšuje rozprašování. Nejvíce se tato technologie využívá pro depozice vrstev obsahujících vodivé materiály (kovy), které nejsou efektivně dosažitelné jinými, například chemickými metodami nanášení vrstev [20]. Výhoda této metody je především nanášení tenké vrstvy na velkou plochu vzorku. Nevýhoda je, že materiál po dopadu na vzorek nepředá dostatečné množství své energie, a proto se může od povrchu vzorku odrazit a dopadnou na jinou část vzorku. Další nevýhodou je, že depozice není směrová, ale atomy deponovaného materiálu jsou emitovány do celé komory. Po několika testech se zjistilo, že docházelo k depozici i na elektrické kontakty sondy, které se navzájem zkratovaly.

2.2.3 Vakuové napařování

Tato metoda zahrnuje dva základní procesy, a to zahřátí materiálu a následné odpaření a kondenzaci na substrátu. Pro odpaření materiálu se užívá elektronového svazku. Elektrony jsou emitovány z wolframového vlákna ve většině případů tepelnou emisí. Emitované elektrony jsou následně urychleny a jejich trajektorie je silným magnetickým polem ohýbána o 270° a dopadají na materiál. Odpařovaný materiál je většinou ve formě ingotů, což jsou malé peletky (ve formě malých válečků). Po dopadu elektronů na povrch materiálu ztrácí elektrony kinetickou energii, ta se přeměňuje na energii tepelnou a ta zahřívá materiál. Až je teplota dostatečně vysoká, začnou vznikat z materiálu páry. Vzniklá pára dále pokračuje směrem vzhůru ke vzorku, na který chceme nanést materiál. Materiál kondenzací ulpí na povrchu vzorku. Vzorek se také otáčí, aby došlo k rovnoměrnému nanášení materiálu. Tento proces se provádí ve vysokém vakuu (v rozmezí 1×10^{-6} mbar až 1×10^{-7} mbar), aby nedocházelo k znečištění nanášeného povrchu. Výhoda této metody je především ve směrovosti depozice, kdy deponovaný materiál nevytváří parazitní materiálové paprsky jako u magnetronové depozice. Tato metoda nanášení se jeví jako nejvhodnější pro přípravu magnetických sond. V technologickém institutu CEITEC je zařízení pro vakuové napařování od firmy BESTEC znázorněné na obr. 2.4.

2.3 Návrh přípravku k depozici MFM sond

Pro pokrytí hrotu sondy magnetickým materiálem bylo nezbytné navrhnout přípravek pro depozici sondy tak, aby nedošlo k nanášení materiálu na kontakty sondy, které jsou potřeba k tomu, aby raménko sondy kmitalo na rezonanční frekvenci. Dále je nutné brát ohled na použité materiály. Tenké vrstvy se nanášejí v depozičních komorách za vysokého vakua, aby nedocházelo k nanášení nečistot mezi nanášeným materiálem. Proto je potřeba přípravek pro sondy vyrobit z materiálů, které jsou kompatibilní s vakuem. Nevhodná vlastnost materiálů ve vakuu je desorpce plynů, tedy plynění materiálů, což je uvolňování nežádoucích částic do vakuového systému z materiálu. Je požadováno, aby materiály, které se vkládají do vakuových systémů, měly desorpci plynů co nejmenší. Tyto materiály pak méně ovlivňují čerpání komory a ty pak mohou dosahovat vyššího



Obrázek 2.4: Na levé straně zobrazení depoziční metody, na pravé straně obrázku přístroj pro vakuové napařování od firmy BESTEC, převzato a upraveno z [21].

vakua a nedochází ke kontaminaci vrstev na připravovaných sondách.

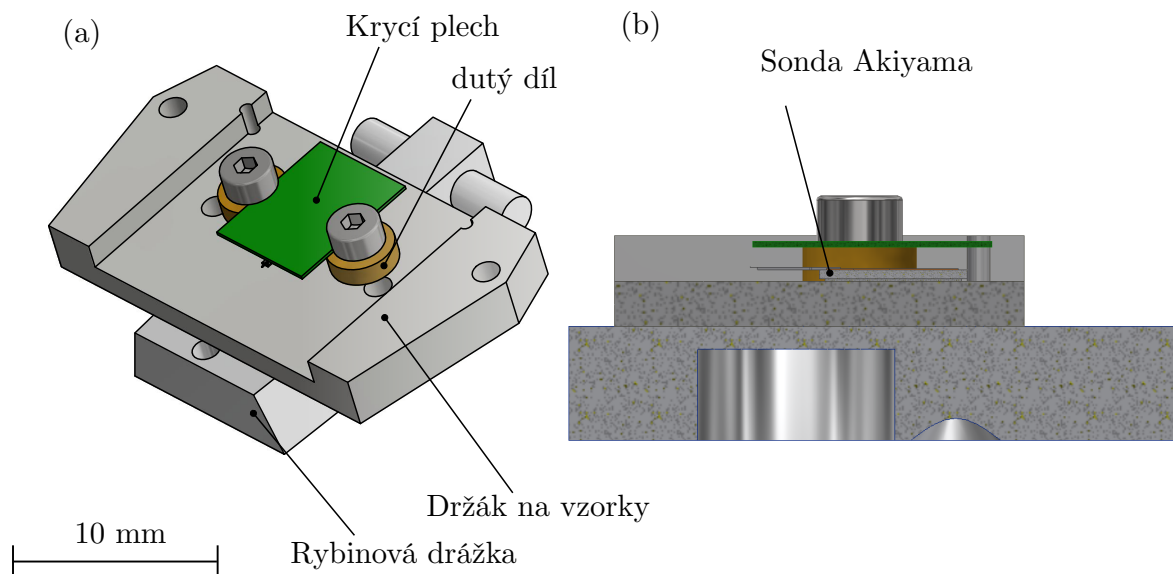
Při výrobě přípravku byly využívány převážně materiály jako dural, nerez a plechy ze slitiny mědi. Dural s označením EN AW 6082 je výhodný pro svoji nízkou hmotnost a jednoduchou obrobitelnost. V přípravku pro depozici sondy je z tohoto materiálu vyrobena většina nosných dílů. Ze slitiny mědi, konkrétně CuSn_6 jsou vyrobeny především součásti, které slouží k překryvu sond, aby nedošlo k depozici kontaktů a tím i znehodnocení celé sondy. Dalším materiálem je nerezová ocel, která slouží jako spojovací materiál.

Požadavky na přípravek k depozici sond byly takové, aby překryl všechny důležité části sondy a aby byl materiál nanesen v ideálním případě pouze na hrot sondy. V následujících podkapitolách uvedeme postupně vývoj jednotlivých dílů přípravku pro depozici sond. Při návrhu přípravku byl brán zřetel také na to, aby byl přípravek kompatibilní s různými zařízeními. Tato zařízení jsou již zmíněné aparatura „Kaufman“ využívající iontové napařování na ÚFI, magnetronové napařování a vakuové napařovací zařízení od firmy BESTEC v institutu CEITEC. Zpočátku byl držák navrhován pro aparaturu „Kaufman“. Byl vyroben dodatečný mezikus, na který se držák upevní, a poté se může umístit do této aparatury. Návrhy modelu součástí byly vytvořeny v programu Autodesk Inventor.

2.3.1 Návrh 1

Pro první návrh přípravku pro depozici byly využity nosiče vzorku, které se běžně využívají v depoziční aparatuře IBS. Skládá se z dvou částí, rybinové drážky a destičky, na kterou se dají vzorky různě připevňovat. Pro upevnění sondy na destičku byla zvolena oboustranná uhlíková páska. Aby nedošlo ke zkratování kontaktů deponovaným materiálem, byl nad sondu umístěn krycí plech, který zakrýval celou sondu s výjimkou hrotu, na který se nanášel deponovaný materiál. Plech byl umístěn na dva duté díly, díky kterým se krycí plech nemohl dotknout hrotu.

Hlavním nedostatkem bylo lepení na pásku, kterým mohla být sonda nalepena



Obrázek 2.5: Prvotní návrh přípravku pro depozici sondy.

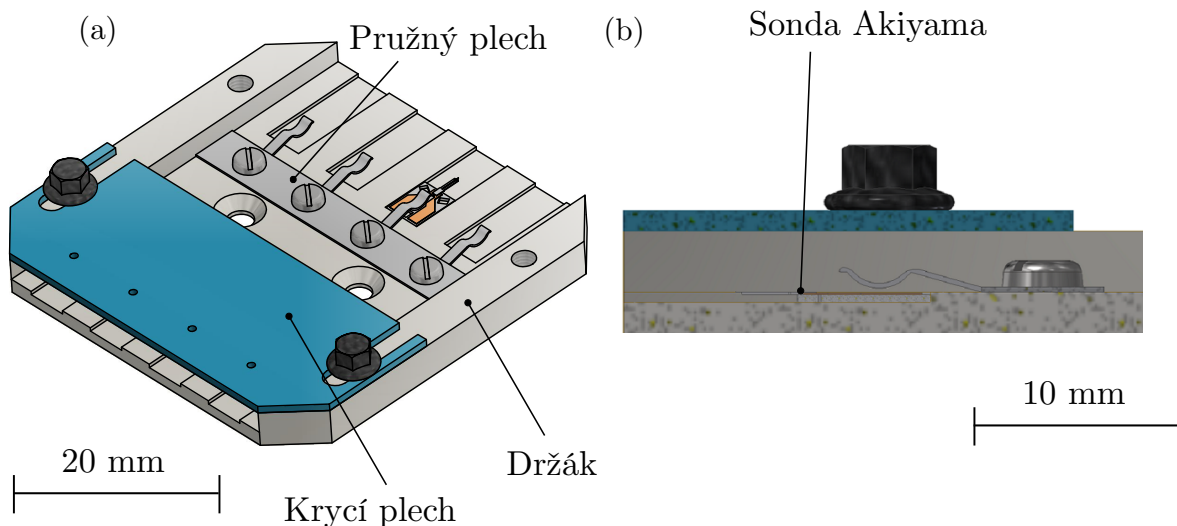
křivě a při zakrytí krycím plechem mohlo dojít k nanesení tenké vrstvy kovu i na části křemenné ladičky. Dále mohla být sonda přilepením na pásku a následným odejmutím z pásky poničena.

2.3.2 Návrh 2

V druhém návrhu tvořil přípravek držák z hliníku s drážkami, do kterých se sonda Akiyama dala umístit, a mohlo být deponováno více sond současně. Sonda byla v drážce uchycena pomocí pružného plechu, který byl k držáku připevněn několika šrouby a zamezoval pohybu sondy. Sondy byly následně překryty plechem, který zakrýval celou oblast. V krycím plechu byly vyvrtány otvory o průměru 1 mm, aby deponovaný materiál mohl pronikat tímto otvorem a dopadat na hrot sondy. Krycí plech byl volně nastavitelný a pomocí šroubů se dal lehce zaaretovat. Největší nedostatek představoval velkou vzdálenost krycího plechu s otvory od hrotu sondy, protože pak mohl být materiál nanesen i na části ladičky.

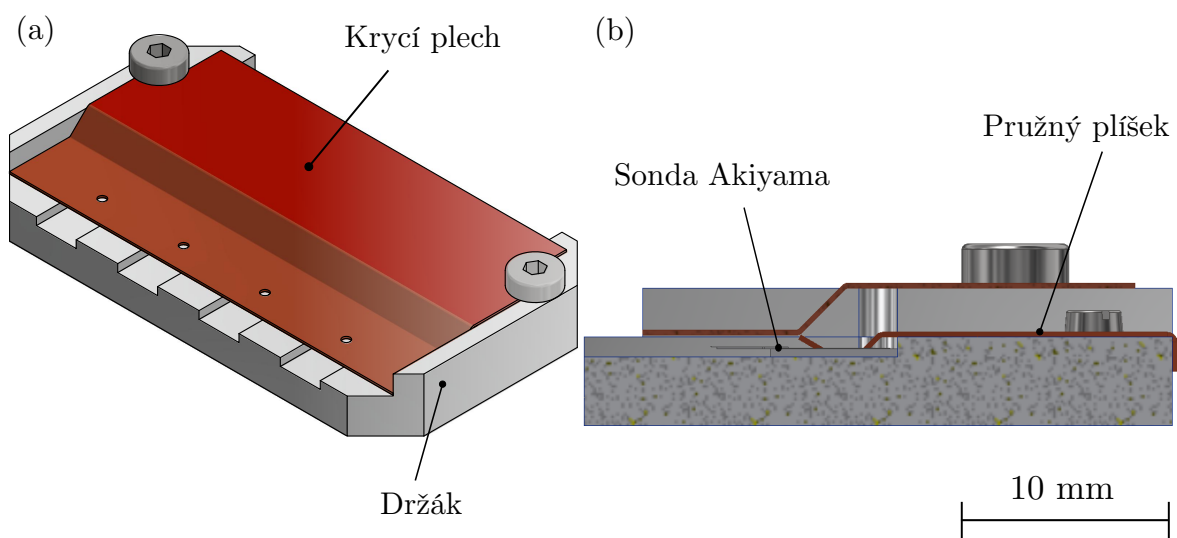
2.3.3 Návrh 3

Ve třetím návrhu (obr. 2.7) bylo oproti návrhu druhému provedeno odlišné frézování, aby mohl být plech umístěn blíže hrotu sondy. Bylo také změněno uchycení Akiyamy. Nebyl to jeden plech, který držel sondy, ale čtyři samostatné delší plíšky, kvůli lepší manipulaci. Pružný plíšek byl přizvednut, sonda mohla být vložena do drážky a zasunuta pod plíšek, který sondu držel při jakékoliv manipulaci na místě. Krycí plech byl ohnut do potřebného tvaru tak, aby dosedl na vyvýšená místa nad sondou, která zabraňovala kontaktu sondy s plechem a tím její poškození. Krycí plech byl opět volně nastavitelný a pomocí dvou šroubů se dal lehce zaaretovat. Tento návrh byl již realizován a reálně při depozici vyzkoušen. Už při první depozici nastal problém při nastavování otvoru nad hrotem druhé sondy. Bylo nutné pohybovat celým krycím plechem, abychom na-



Obrázek 2.6: Druhý návrh držáku pro depozici sondy.

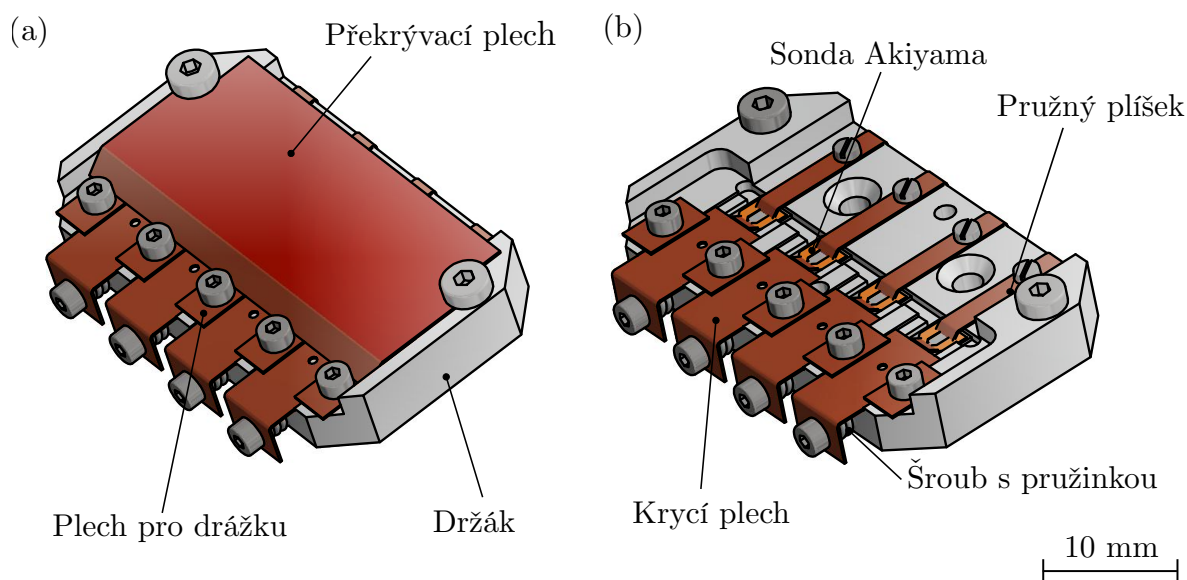
stavili otvor nad druhý hrot, a tím bylo manipulováno i s otvorem nad hrotem, který byl už nastaven. Poněvadž nejsou vždy sondy Akiyama stejné, občas se mohou lišit rozměry keramické destičky, proto se nepodařilo lehce nastavit obě sondy zároveň. Po dlouhé přípravě se nastavení otvorů přeci jen povedlo, ale při další modifikaci držáku byl tento nedostatek brán v úvahu. Největší nedostatek v tomto návrhu tedy představovalo nastavování krycího plechu nad hroty sond. V následujícím návrhu byl proto krycí plech rozdělen na více částí, aby každá sonda měla svůj samostatný krycí plech nemuseli být na sobě závislé. velkou vzdálenost otvoru od hrotu sondy, která byla v následném kroku odstraněna. Krycí plech byl lehce upraven tak, aby vzdálenost otvoru a hrotu byla co nejmenší.



Obrázek 2.7: Třetí návrh držáku pro depozici sondy.

2.3.4 Návrh 4

Ve čtvrtém návrhu (obr. 2.8) byl problém s nastavováním krycího plechu s otvory vyřešen a každá sonda měla svůj krycí plech s otvorem, takže mohl být otvor pro depozici nastavován libovolně pro každou sondu zvlášť. To byla obrovská výhoda, protože se krycí plechy mohly nastavovat nezávisle na sobě. Krycí plech byl umístěn v drážce, která byla do držáku dodatečně vyfrézována, a aby se krycí plech mohl pohybovat jen v jednom směru, byly do držáku přimontovány zarážky, které zabraňovaly pohybu vzhůru. Pohyb krycího plechu v drážce zajišťoval šroub, který byl připevněn ke krycímu plechu a se kterým šlo otáčet, a tím šlo pohybovat také krycí plech. Aby krycí plech držel ve správně pozici, byla ke šroubu přidána pružina, která naopak odtlačovala krycí plech od držáku tak, aby bylo možné jemným otáčením šroubu nastavit takovou polohu otvoru, která by umožnila nanesení materiálu pouze na hrot sondy. Zbytek držáku zakrýval stínící plech, který sloužil k překrytí především zbylé části sondy, aby nedošlo k nanesení kontaktů.

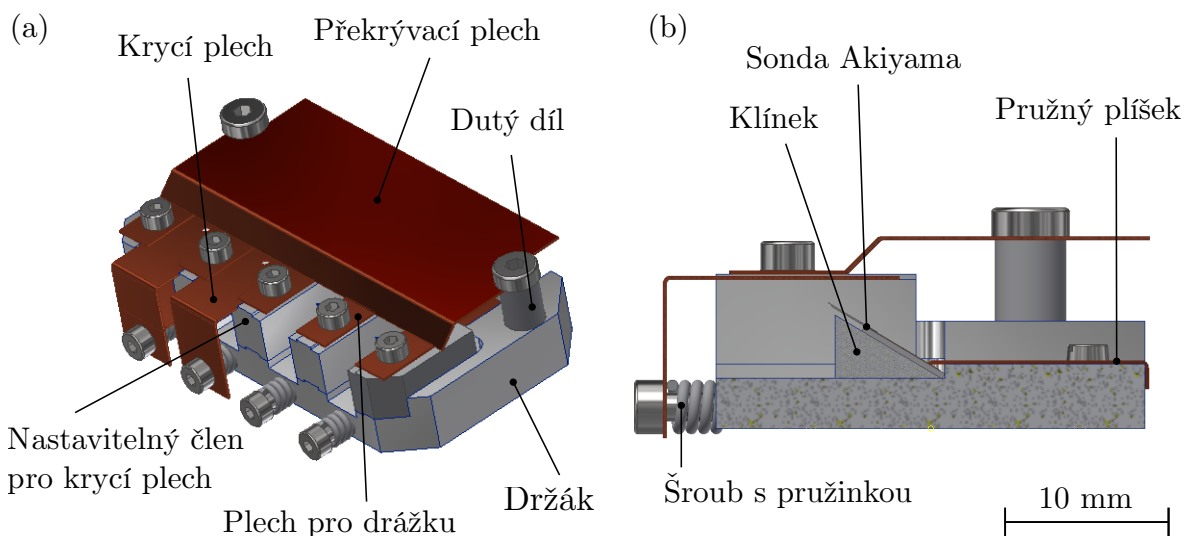


Obrázek 2.8: Čtvrtý návrh držáku pro depozici sondy.

2.3.5 Návrh 5

Jak je z (obr. 2.1b) dobře patrné, hrot, kterým je zakončena sonda, není přesně kolmý na rovinu katileveru, ale je pod určitým úhlem. Za pomoci skenovacího elektronového mikroskopu (SEM, z anglického *Scanning Electron Microscopy*) byly pořízeny obrázky sondy i s hrotem a následně byl určen úhel náklonu hrotu. Tento úhel byl po řadě měření určen přibližně na 27° . Z tohoto důvodu byly na držáku provedeny výraznější změny, a to přidáním čtyř modifikačních členů, které sloužily k náklonu sondy pod patřičným úhlem, a jsou zobrazeny na obr. 2.9. Malý klínek se k držáku upevňoval pomocí oboustranné uhlíkové pásky. Krycí plech se může pohybovat ve stejných drážkách, které jsou v modifikačních členech, jako v předchozím návrhu a překrývací plech byl podložen dvěma dutými díly, aby překrýval zbytek sondy, kterou maska nebyla

schopna zakrýt.



Obrázek 2.9: Pátý návrh držáku pro depozici sondy.

2.3.6 Návrh 6

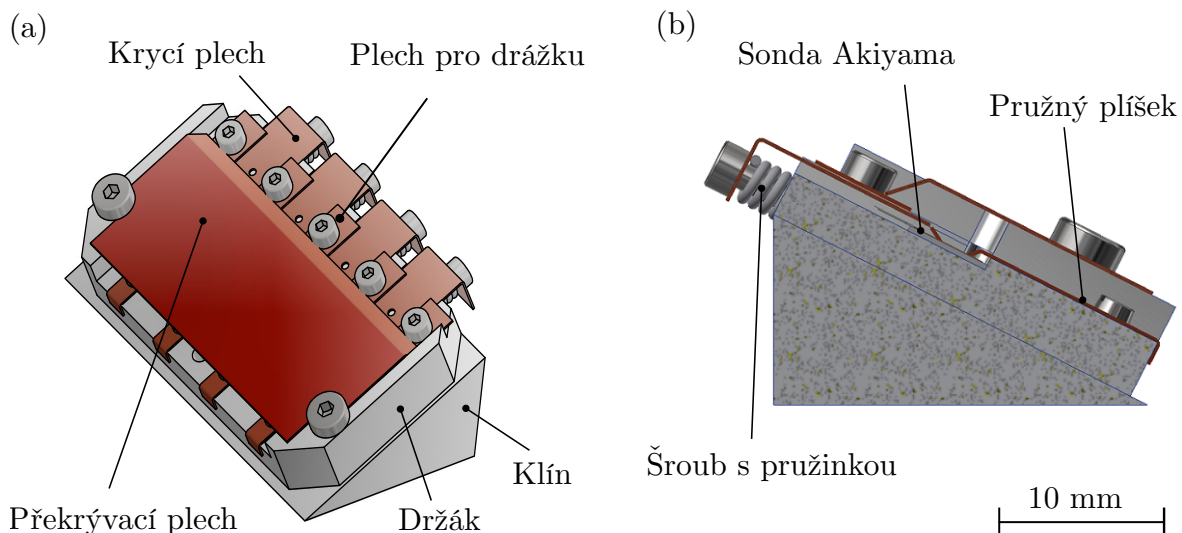
Důvodem k vylepšení pátého návrhu bylo obtížnější vkládání sondy do držáku. Všechny modifikační členy, které byly použity v pátém návrhu, byly nahrazeny jediným členem, a to velkým klínem, který se připevnil pod celý držák. V pátém návrhu byla sonda vkládána na klínek, který byl již pod úhlem a neopatrná manipulace mohla způsobit poničení sondy nebo ulomení raménka. V šestém návrhu (obr. 2.10) bylo vkládání sondy usnadněno tím, že se nejprve sonda vložila do drážky, v držáku se připevnila, překryla krycím plechem a následně mohl být celý držák pomocí dvou šroubů upevněn na velký klín, který byl umístěn na držák vzorků a založen do přístroje na depozici tenkých vrstev. Je vidět, že šestý návrh se v hodně ohledech podobá čtvrtému návrhu. Šestý návrh sloužil k lepší manipulaci při vkládání sondy do přípravku. Čtvrtý návrh byl pro naše potřeby dostatečný, proto byla jeho koncepce využita i při tomto návrhu.

2.4 Proces výroby magnetických hrotů

Převážná většina procesu výroby magnetických hrotů probíhala v budově technologického institutu CEITEC. Při prvních testech depozice tenkých vrstev se využívaly dvě podobné metody, IBS a magnetronová depozice. Bylo zjištěno, že materiál v některých případech dopadl i na elektrody sondy, což způsobilo její zkrat a zničení sondy. Proto byla depozice dále prováděna jen v zařízení pro vakuové napařování.

Pro správnou funkčnost a optimalizaci funkce sondy bylo zapotřebí zjistit vlastnosti této sondy před samotným nanesením materiálu na hrot. Pro charakterizaci byla sonda umístěna také do elektronového mikroskopu.

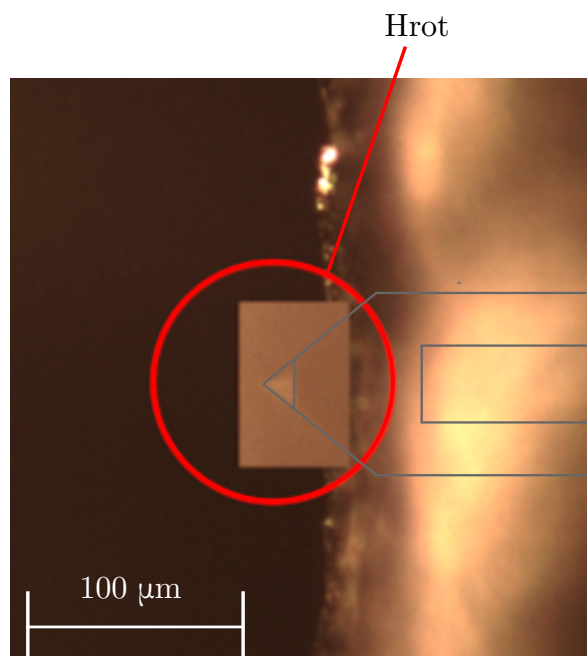
Po zobrazení sondy v elektronovém mikroskopu byla vložena do přípravku pro depozici. Byla upevněna pružným plechem, překryta krycím plechem a následně byl celý



Obrázek 2.10: Šestý, finální návrh držáku pro deposici sondy.

držák umístěn na klín. Byl přimontován k držáku pro vzorky, který se vkládal do základací komory depozičního zařízení.

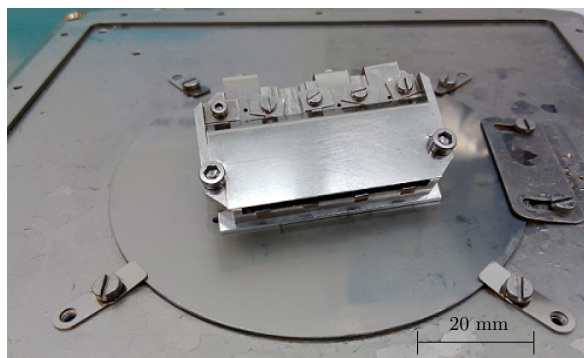
Celý přípravek byl přenesen k optickému mikroskopu, kde byl nastaven otvor v krycím plechu přímo nad hrotem sondy. Nastavování otvoru nad hrot sondy probíhalo tak, že byl krycí plech posouván pomocí šroubu, který se nacházel v čele držáku. Pomocí zaostření na hranu otvoru krycího plechu a následně na hrot sondy (obr. 2.11) byla hrana nastavována tak, aby byl vidět pouze hrot.



Obrázek 2.11: Proložení dvou snímků zaostřených na hranu a na hrot sondy.

Poté byl celý přípravek se sondou vložen do základací komory depozičního zařízení a začala samotná deposice. Jako feromagnetickou tenkou vrstvou jsme zvolili kobalt. Nanesená vrstva byla deponována rychlostí od $0,6 \text{ \AA/s}$ do $0,9 \text{ \AA/s}$. Kvůli geometrii hrotu a

otvoru v krycím plechu byla celková vrstva feromagnetického materiálu zvolena 300 nm. Po přepočtech vycházela tloušťka nanesené vrstvy na hrotu přibližně 42 nm, což je podle [22] dostačující vrstva pro magnetická měření.

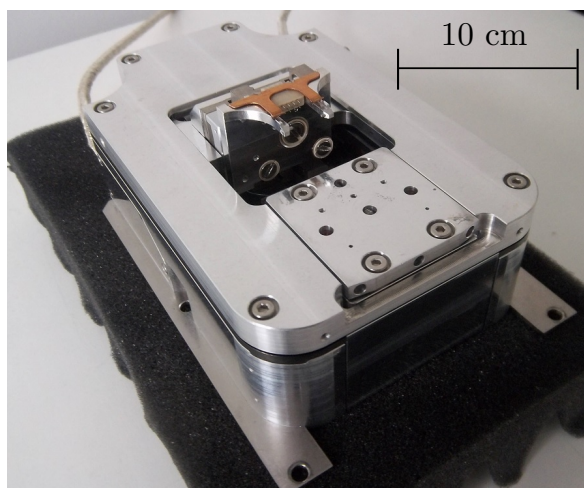


Obrázek 2.12: Přípravek připevněný na držák vzorků a připravený k vložení do zakládací komory vakuového napařovacího zařízení BESTEC.

Následně byla sonda vyjmuta z depozičního zařízení a z držáku, aby byla opět vložena do elektronového mikroskopu a provedeno opětovné zobrazení sondy.

3. Zkoumání a měření magnetických sond

Ke zkoumání vyrobených magnetických hrotů byl využit mikroskop TESCAN LYRA3 s iontovým/elektronovým svazkem umístěný v technologickém institutu CEITEC [23]. Pro zkoumání magnetických hrotů dostačil elektronový svazek. Pro účely měření byl použit mikroskop LiteScope firmy NenoVision (obr. 3.1) [24]. Měření bylo prováděno v bezkontaktním módu.



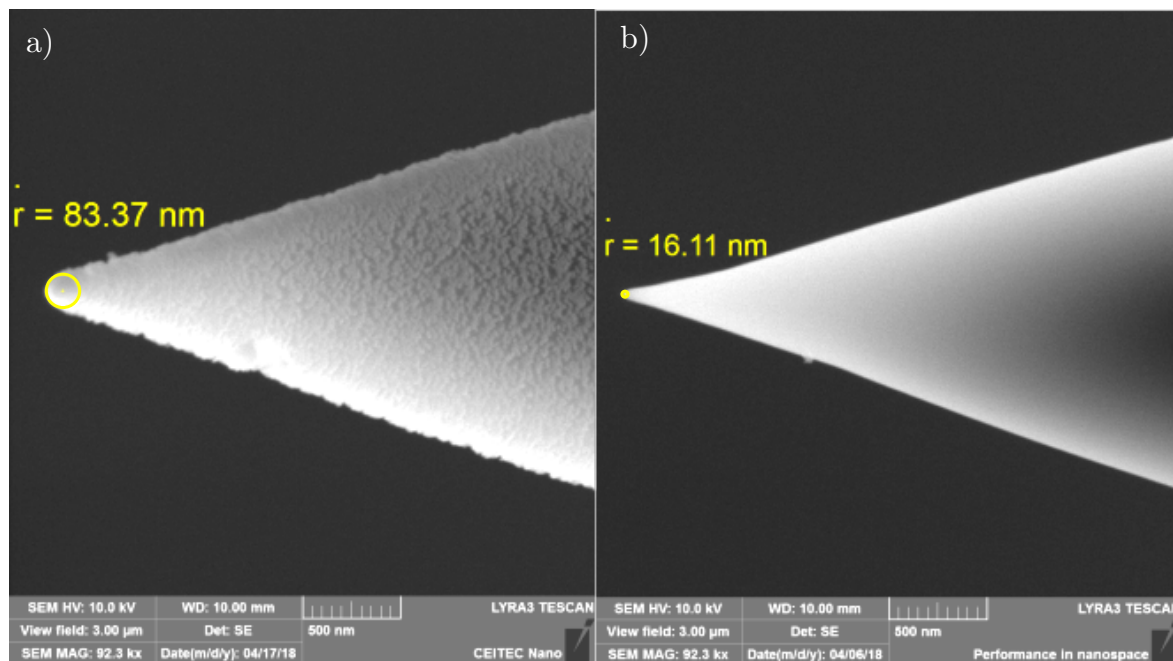
Obrázek 3.1: Mikroskop LiteScope.

3.1 Zkoumání magnetických hrotů v SEM

Při zkoumání sond v SEM byly sondy zobrazovány před depozicí, bez magnetické vrstvy. Tyto komerční sondy Akiyama budeme dále nazývat jako nemagnetické sondy. Po depozici, sondy s magnetickou vrstvou budeme nazývat magnetické sondy.

Pro zkoumání magnetické vrstvy byly využity některé detektory nacházející se v mikroskopu TESCAN LYRA3. Pro běžné zobrazování vzorku slouží detektor sekundární elektronů (SE, z anglického *Secondary Electron*). Elektrony z elektronového svazku vyřáží elektrony v elektronovém obalu atomů a tyto elektrony jsou poté tímto detektorem detekovány. Pomocí SE detektoru byly zobrazovány sondy před i po depozici. Byla zkoumána homogenita nanosených vrstev nebo zjišťován vrcholový poloměr hrotů jednotlivých sond. V mikroskopu byly pořizovány snímky sondy před a po každé depozici

magnetické vrstvy. Před depozicí bylo ze snímků zjišťováno, jestli není hrot poškozen a také byl změřen vrcholový poloměr hrotu sondy (obr. 3.2). Po depozici byl vrcholový poloměr změřen znovu a z rozdílu vrcholových poloměrů sondy před a po depozici mohla být určena tloušťka nanesené vrstvy.

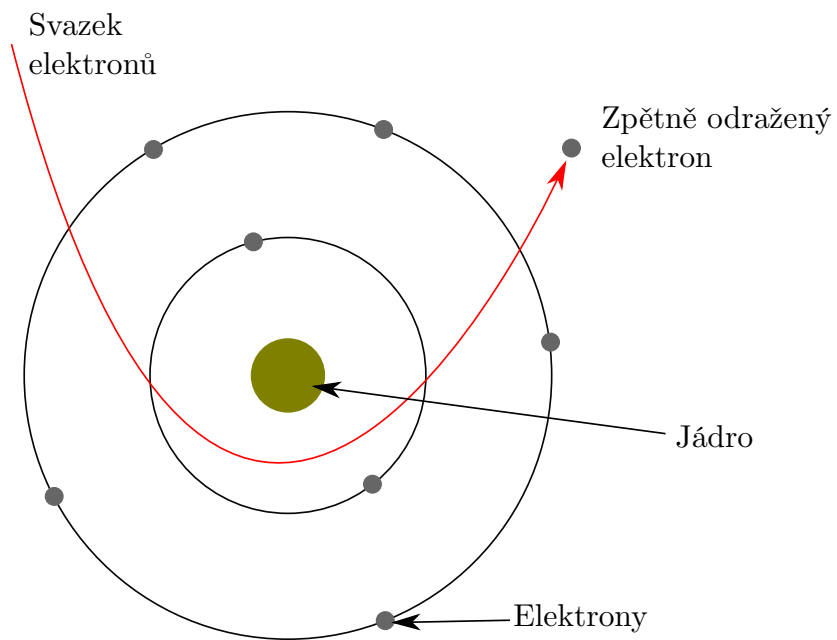


Obrázek 3.2: Zobrazení hrotu stejné sondy před a po depozici, (a) měření poloměru hrotu před depozicí, (b) měření poloměru hrotu po depozici

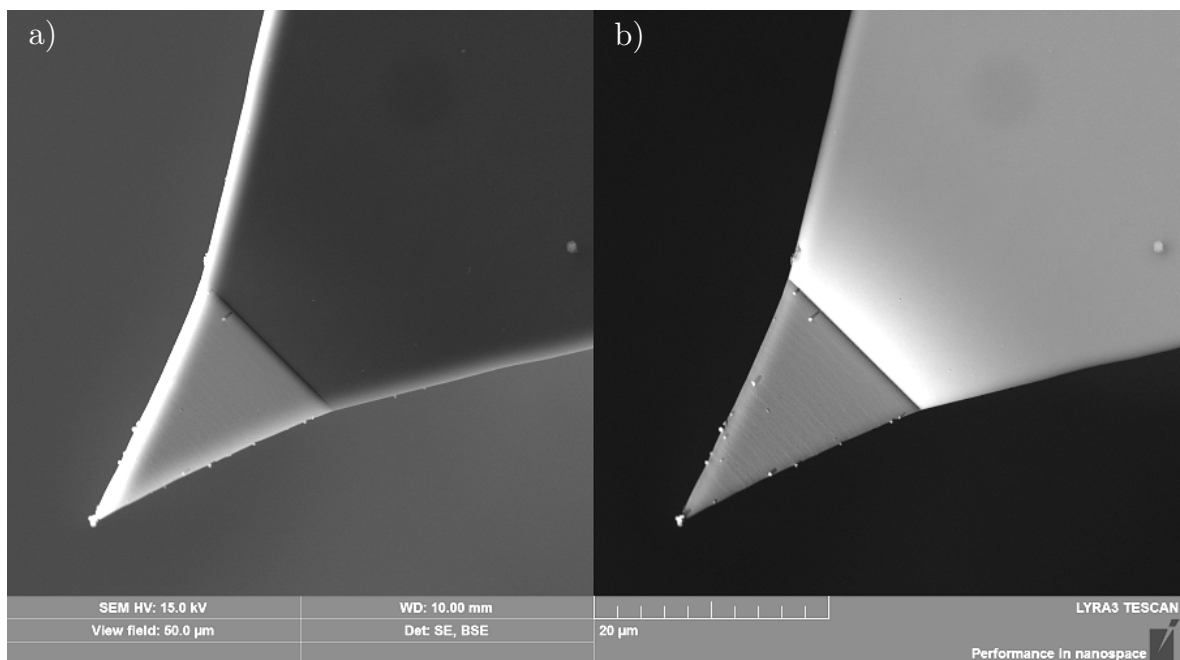
Dalším důležitým parametrem pro sondu bylo, kde všude je kobalt nanesen, protože hmotnost materiálu ovlivňuje jak rezonanční frekvenci sondy, tak i Q -faktor. Pro zobrazení materiálů na povrchu sondy se mohou používat detektor zpětně odražených elektronů (BSE, z anglického *Back Scattered Electrons*).

Elektronový svazek dopadající na vzorek interaguje s kladnými jádry atomů. Pokud je úhel elektronu takový, že vletne do gravitačního pole atomu, obletí ho a vrátí se ze vzorku bez zpomalení, pak se tyto elektrony nazývají zpětně odražené a detekují se BSE detektorem (obr. 3.3). Jádra atomů jsou ve všech prvcích rozdílné, se zvyšující se velikostí jádra se počet BSE zvětšuje a tím se můžou rozeznávat jednotlivé materiály. Na obr. 3.4 lze vidět zobrazení hrotu sondy pomocí dvou detekčních metod. Pomocí metody BSE byl určen materiálový kontrast, světlejší místa znamenají nanesený materiál o větším atomovém čísle (tedy kde se nachází kobalt), tmavší místa znázorňují materiál skládající se z atomů o nižším atomovém čísle (kantilever s hrotem je vyroben z křemíku).

Další metodou, která byla pro charakterizaci naneseného materiálu využita, byla energeticky disperzní rentgenová spektroskopie (EDS, z anglického *Energy-dispersive X-ray Spectroscopy*). Ozáření materiálu elektrony vzniká také rentgenové záření. Při dopadu elektronů na povrch zkoumaného vzorku jsou z vnitřních slupek atomů vyraženy elektrony, které jsou nahrazeny elektrony z vyšších energetických hladin. Rozdíl energie při přechodu se projeví ve formě záření. Pro každý prvek toto záření dosahuje specifických hodnot energie, podle které se může určit zastoupení prvků ve zkouma-

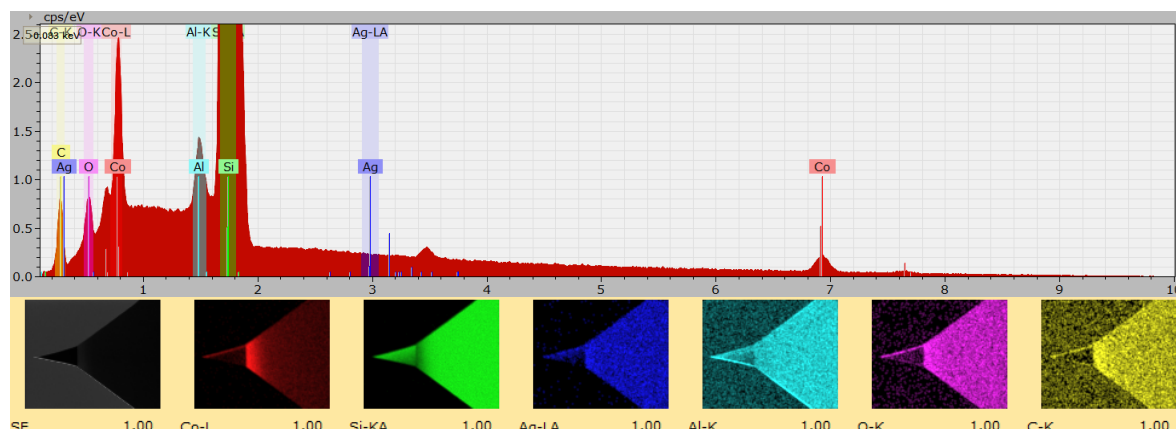


Obrázek 3.3: Schéma znázorňující zpětně odražený elektron.



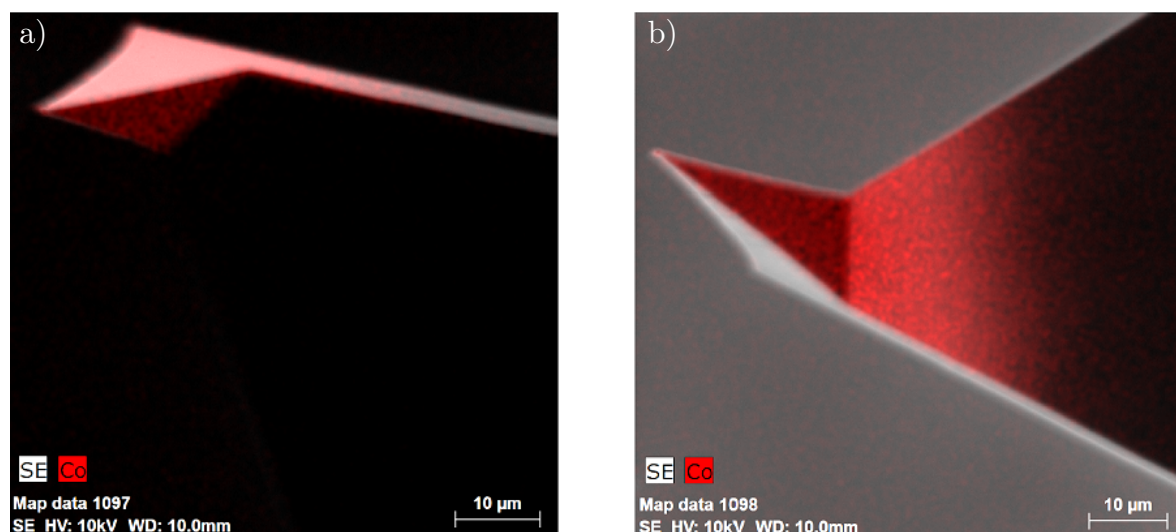
Obrázek 3.4: Snímek z elektronového mikroskopu LYRA3, (a) snímek pomocí SE detektoru, (b) snímek pomocí detektoru BSE, kde lze vidět materiálový kontrast.

ném vzorku. Na obr. 3.5 je znázorněno energiové rozložení materiálů na hrotu sondy. Největší zastoupení má křemík (Si), ze kterého je kantilever s hrotem vyroben.



Obrázek 3.5: Energiové rozložení materiálů na hrotu sondy. Největší zastoupení z prvků má křemík, ze kterého je kantilever vyroben, dále kobalt, který je nanesen na hrotu sondy. Hliník se ve spektru objevuje také, protože je sonda umístěna na hliníkovém držáku.

Na obr. 3.6 lze vidět, kde všude byl nanesen kobalt po depozici.



Obrázek 3.6: Kobalt (znázorněn červenou barvou) na hrotu sondy Akiyama.

3.2 Měření magnetických hrotů pomocí AFM mikroskopu

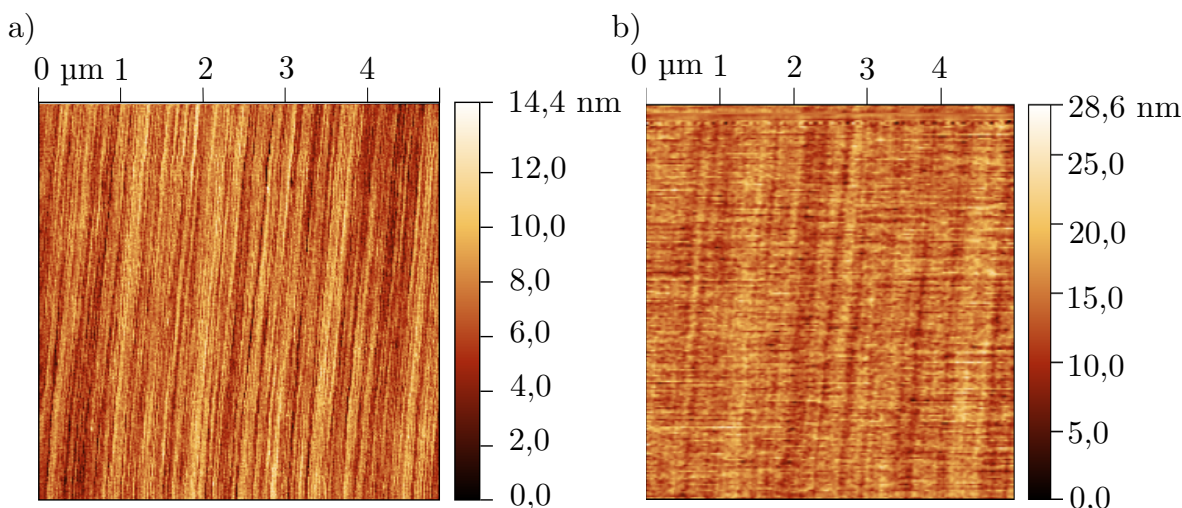
Dále byla testována funkčnost vyrobených sond. Testování probíhalo na AFM mikroskopu LiteScope. Bylo vyrobeno celkem šestnáct magnetických sond, z nichž dvanáct bylo po depozici funkčních. Čtyři sondy, které nebyly funkční, měly nanesený mimo jiné kontakty, takže byla sonda nefunkční. Tyto sondy byly deponovány za použití přípravků ve fázi návrhů 3 a 5. U třetího kvůli krycímu plechu, kterým bylo obtížné

nastavit otvory nad více sond. U pátého návrhu šlo o nastavení jednotlivých krycích plechů, protože byly sondy pod úhlem a nebylo zřejmé, jak moc by měl být hrot zakryt. Charakteristickými vlastnostmi sondy Akiyama jsou její rezonanční frekvence a Q -faktor (viz 1.1.3). Je důležité, aby se depozicí Q -faktor i rezonanční frekvence změnily co nejméně. Ze souboru šesti měření před a po depozici byla vybrána jedna reprezentativní sonda a v tab. 3.1 je znázorněna rezonanční frekvence a Q -faktor této sondy před a po depozici. Rezananční frekvence v tomto případě vzrostla o 5,76 Hz a Q -faktor klesl o 630,1.

	f_r [Hz]	Q -faktor
Bez mag. vrstvy	46222,68	1877,4
S mag. vrstvou	46228,44	1247,3
změna	5,76	630,1

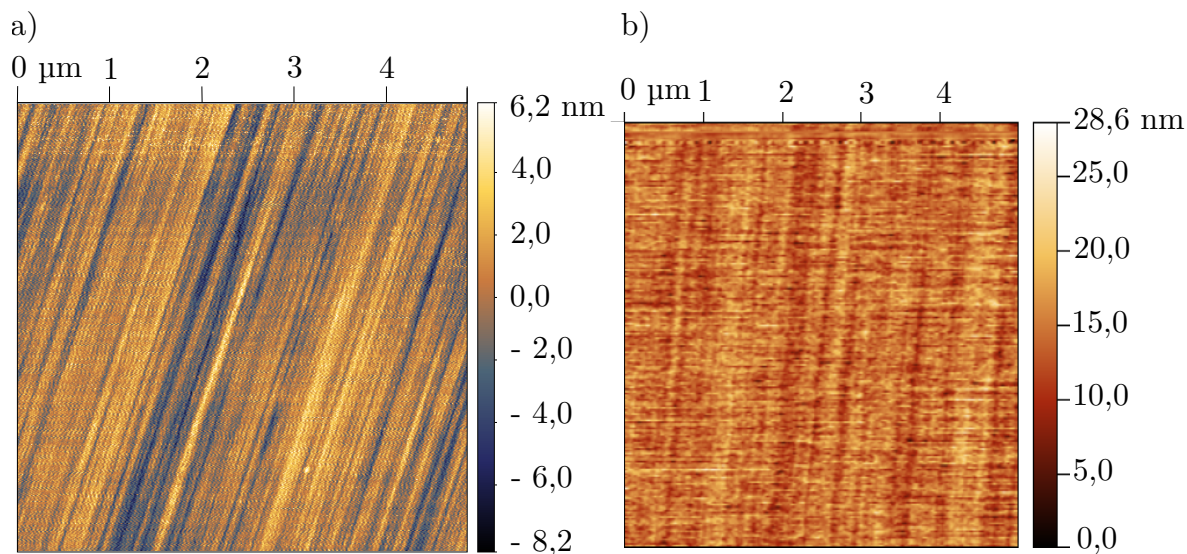
Tabulka 3.1: Porovnání rezonanční frekvence (f_r) a Q -faktoru stejné sondy před a po nanesení magnetického materiálu na hrot.

Prvním z pokusů bylo změřit topografii vzorku. Jako vzorek byla zvolena malá část záznamového zařízení z harddisku (HDD, z anglického *Hard Disk Drive*). Jako reference byla topografie vzorku změřena pomocí komerčního AFM mikroskopu ICON od firmy Bruker [25] s komerčně dostupným magnetickým kantileverem a také nemagnetickou sondou Akiyama na mikroskopu LiteScope. Tyto reference byly porovnávány s měřením magnetickými sondami taktéž na mikroskopu LiteScope. Cílem bylo změřit stejnou topografii s magnetickou sondou, jako se sondou nemagnetickou. Na obr. 3.7 je zobrazeno porovnání topografií s nemagnetickou sondou Akiyama a s magnetickou sondou Akiyama. Dále na obr. 3.8 je srovnání magnetické sondy Akiyama s měřením na komerčním mikroskopu ICON.



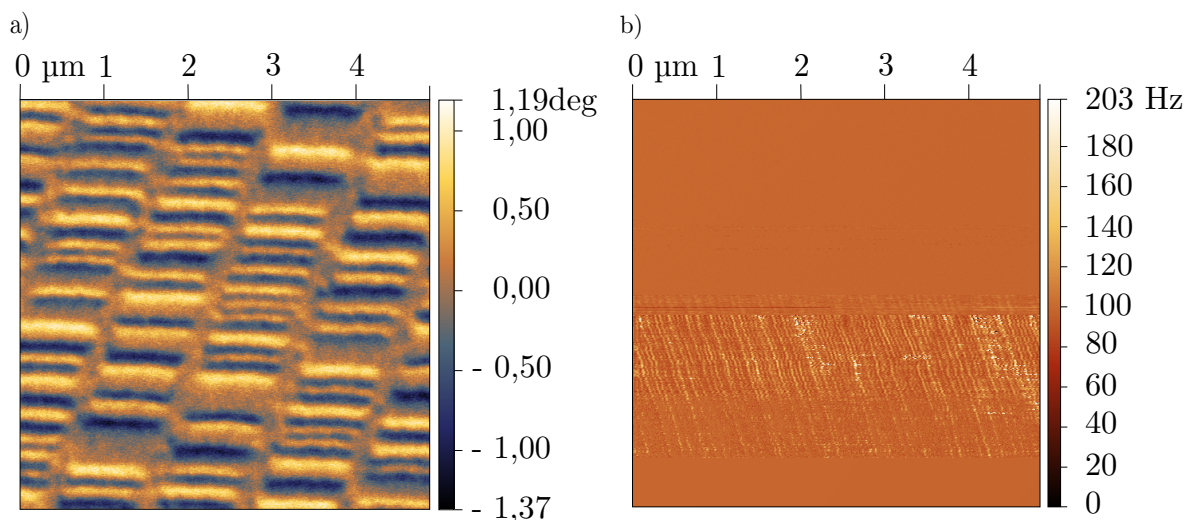
Obrázek 3.7: Topografie HDD, (a) měření s nemagnetickou sondou Akiyama, (b) měření s magnetickou sondou Akiyama.

Dalším krokem bylo změřit magnetický signál. Měření bylo prováděno na stejném vzorku HDD. Před měřením musel být hrot zmagnetován tak, aby se vytvořila jednotná



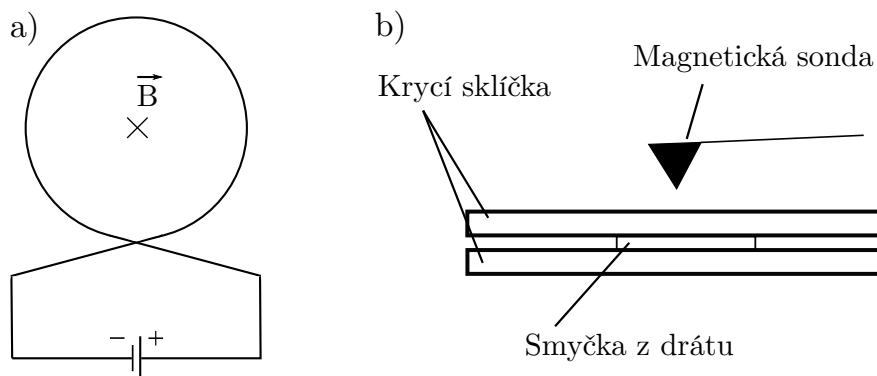
Obrázek 3.8: Topografie HDD, (a) měření na komerčním mikroskopu ICON, (b) měření s magnetickou sondou Akiyama.

orientace magnetických domén na hrotu sondy. K zmagnetování se používal neodymový magnet. Při měření byl volen lift mód mezi 20 nm a 100 nm, měněna byla také i amplituda kmitů. I při různých nastaveních mikroskopu se ale požadovaný magnetický signál nepodařilo zaznamenat (obr. 3.9).



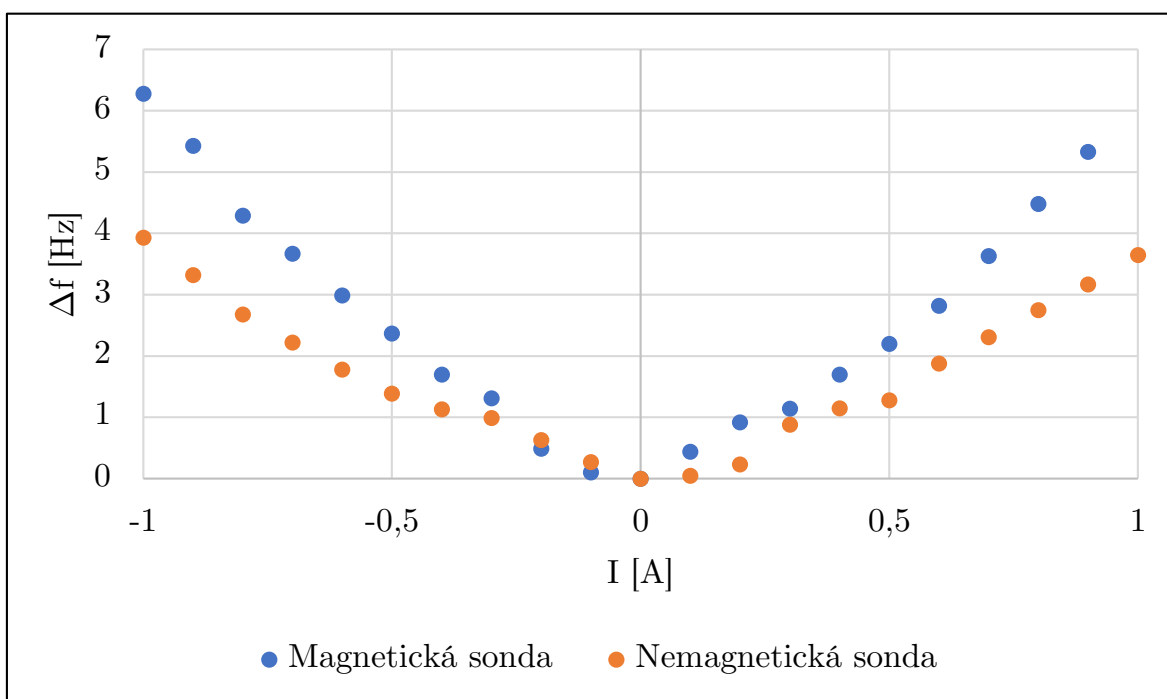
Obrázek 3.9: Měření MFM na vzorku HDD, (a) měření MFM na komerčním mikroskopu ICON, (b) měření MFM s magnetickou sondou Akiyama. Při měření byla měněna výška lift módu, což se při nízkém lift módu projevilo vystoupením topografie vzorku v MFM signálu.

Jelikož měření na vzorcích nefungovalo, bylo nutné vymyslet způsob, jak ověřit, jestli vyrobená sonda opravdu funguje. V článku [17] je experiment s magnetickou sondou Akiyama. Sonda. Pro ověření, zda magnetická sonda funguje byl proveden podobný experiment. Byla vytvořena smyčka (obr. 3.10) z měděného izolovaného drátu o průměru 0,1 mm. Nejmenší vytvořený průměr smyčky byl 300 μm . Smyčka byla vložena mezi dvě laboratorní krycí sklíčka (tloušťka 150 μm) a zalita lepidlem.



Obrázek 3.10: Smyčka o jednom závitě pro ověření reakce sondy na magnetické pole, (a) schématické zobrazení smyčky (b) pohled na smyčku a krycí sklíčka z boku.

Na konce smyčky byl připojen zdroj stejnosměrného napětí, kterým bylo možné nastavovat proud ve smyčce, který generoval magnetické pole uvnitř smyčky. Magnetická sonda byla umístěna do osy smyčky a od horního krycího sklíčka byl hrot vzdálen $50 \mu\text{m}$, tedy od středu smyčky $250 \mu\text{m}$. V tomto místě byla výpočtem určena velikost magnetického pole $570 \mu\text{T}$ při proudu 1 A . Velikost magnetického pole byla srovnatelná s experimentem v [17]. Při pokusu byl volen rozsah proudu od 0 A do 1 A , poté byl změněn směr proudu ve smyčce a měření bylo opakováno. Byl měřen posun rezonanční frekvence v závislosti na proudu a naměřené hodnoty byly zaneseny do grafu na obr. 3.11. Pro porovnání byla změřena i nemagnetická sonda Akiyama za stejných podmínek.



Obrázek 3.11: Závislost změny rezonanční frekvence sondy na proudu ve smyčce pro magnetickou i nemagnetickou sondu.

Neočekávané bylo, že nemagnetická sonda reagovala na magnetické pole změněním

rezonanční frekvence. Změna rezonanční frekvence nebyla sice tak výrazná, jako v případě magnetické sondy. Ke změně rezonanční frekvence u nemagnetické sondy nemělo dojít. Možným důvodem, proč sonda reagovala na magnetické pole, byla přítomnost stříbra na sondě, které spojovalo kantilever s jedním z ramének ladičky. Stříbro, které je diamagnetické, mohlo být ovlivněno magnetickým polem smyčky a tím mohlo dojít ke změně rezonanční frekvence. Dalším důvodem, který mohl změnit rezonanční frekvenci sondy, mohla být zvyšující se teplota měděného drátu, kterým procházel elektrický proud. Tento důvod byl ale méně pravděpodobný, protože se délka měření pohybovala do 1 minuty a zároveň byl drát překryt dvěma laboratorními sklíčky, takže nedocházelo k velkému růstu teploty a zároveň laboratorní sklíčko v malé míře zajišťovalo odvod tepla.

Dalším neočekávaným chováním magnetické sondy bylo, že při měření pro oba směry toku proudu se rezonanční frekvence sondy vychylovala pouze jedním směrem. Příčina zatím nebyla objasněna.

Závěr

Bakalářská práce je výsledkem autorovy roční práce zabývající se výrobou sond pro Mikroskopii magnetických sil. Cílem práce bylo seznámit se s problematikou mikroskopie magnetických sil. Získané poznatky autor zužitkoval v návrhu přípravku pro depozici sond, který je v odstavci 2.3.

Pro výrobu magnetických hrotů byly zvoleny tři metody. Metoda výroby sond pomocí indukovaného fokusovaného elektronového svazku byla v důsledku časové náročnosti a drahé výroby zamítnuta. Další metodou bylo lepení magnetických hrotů na křemennou ladičku. Tato metoda byla realizována pomocí lepení cínových drátů. Metoda byla kvůli nízkému Q-faktoru u většiny vyrobených sond zamítnuta. Další metodou výroby magnetických hrotů je nanášení tenkých vrstev materiálu na hrot sondy. Pro výrobu byla zvolena komerční sonda Akiyama. Byly využity některé metody depozice tenkých vrstev, iontového naprašování, magnetronového naprašování a vakuového naprašování. Přístroje, které využívají tyto metody byli dostupné na Ústavu fyzikálního inženýrství nebo na technologickém institutu CEITEC. Z testů byla pro konečnou verzi vybrána metoda vakuového naprašování zejména pro výhodu směrové depozice.

Byly vymyšleno šest návrhů přípravku pro depozici magnetických sond. Postupným vývojem a testováním byl přípravek zdokonalován. Návrhy byly zprvu konstruovány do přístroje na Ústavu fyzikálního inženýrství, pozdější návrhy do přístrojů na technologickém institutu CEITEC, proto bylo potřeba zajistit i kompatibilitu přípravku pro tyto zařízení. Návrhy byly postupně vyvíjeny až do finálního, 6. návrhu. Základ přípravku byl držák z hliníku, který měl čtyři pozice, takže se daly deponovat až čtyři sondy Akiyama zároveň. Sondy byly v drážce přichyceny pomocí pružného plíšku. Sondy byly překryty krycím plechem s otvorem, který byl nastaven pomocí optického mikroskopu přesně nad hrot sondy, aby nedošlo k depozici jiných částí, než jen hrotu. Zbytek držáku zakrýval překrývací plech, aby nedošlo k nanesení kontaktů na sondě Akiyama. Celý držák byl připevněn na klínu, který kompenzoval sklon hrotu tak, aby byly rovnoměrně všechny strany hrotu.

Magnetické sondy byly zkoumány v elektronovém mikroskopu. Bylo důležité provést snímky sondy před i po depozici, aby bylo možné porovnat změnu povrchu hrotu nebo jeho vrcholový poloměr, ze kterého se dala určit tloušťka nanesené vrstvy. Dále se pomocí detektoru BSE a EDS dalo určit pokrytí materiálu na hrotu sondy. Toto testování pak sloužilo jako zpětná vazba pro nastavování hrotu pod optickým mikroskopem, aby se následně mohl hrot více zakrýt nebo ne.

Měření s magnetickými sondami probíhalo na mikroskopu LiteScope od firmy Neno-Vision. Při měření topografie vzorku byly data získané z magnetické sondy srovnatelné s

nemagnetickou sondou Akiyama nebo s topografií měřenou pomocí komerčního magnetického kantiliveru na AFM mikroskopu ICON. Při měření magnetického signálu byly zkoušeny různé nastavení parametrů mikroskopu, ale žádné nastavení nebylo optimální pro měření MFM signálu a proto signál nebyl naměřen.

Pro ověření reakce sondy na magnetické pole byla vytvořena smyčky z měděného drátu, která byla připojena na zdroj stejnosměrného napětí. Při měření byly používány dvě sondy, magnetická a nemagnetická. Podle získaného grafu reaguje magnetická sonda více na vzrůstající magnetické pole, než sonda nemagnetická. Zvláštní ale je, že i při změně směru toku proudu se rezonanční frekvence vychýlí na stejnou stranu.

Byly zkoumány a testovány sondy, které byly pokryty vrstvou s nominální hodnotou 100 nm, 300 nm a 600 nm. Bylo by vhodné dále vyzkoušet nanášení větších vrstev magnetického materiálu na sondy. V případě úspěšné výroby magnetických sond by bylo vhodné nanést na hroty těchto sond tenkou vrstvu tvrdého materiálu, aby nedocházelo k velkému opotřebování nebo deformaci hrotů.

Seznam použité literatury

- [1] MARTIN, Y.; WICKRAMASINGHE, H. K. Magnetic imaging by “force microscopy” with 1000 Å resolution. *Applied Physics Letters* [online]. 1987, **50**(20), 1455–1457 [cit. 2018-03-02]. ISSN 0003-6951. Dostupné z DOI: 10.1063/1.97800.
- [2] *Mikroskopie skenující sondou* [online]. Olomouc, 2003 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <<http://www.nanotechnologie.cz/storage/MikrOlomouc.pdf>>.
- [3] EIGLER, D. M.; SCHWEIZER, E. K. Positioning single atoms with a scanning tunnelling microscope. *Nature* [online]. 1990, **344**(6266), 524–526 [cit. 2018-05-02]. ISSN 0028-0836. Dostupné z DOI: 10.1038/344524a0.
- [4] AFM Scanner for Atomic Force Microscopy. *Physikinstrumente* [online]. 2014 [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <<https://www.physikinstrumente.com/en/applications/microscopy/atomic-force-microscopy/>>.
- [5] TURČAN, Igor. *Mikroskopie magnetických sil v proměnném magnetickém poli*. Brno, 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [6] JONES, J. E. On the Determination of Molecular Fields. II. From the Equation of State of a Gas. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1924-10-01, **106**(738), 463–477. ISSN 1364-5021. Dostupné z DOI: 10.1098/rspa.1924.0082.
- [7] PORTHUN, S.; ABELMANN, L.; LODDER, C. Magnetic force microscopy of thin film media for high density magnetic recording. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1998, **182**(1-2), 238–273. ISSN 03048853. Dostupné z DOI: 10.1016/S0304-8853(97)01010-X.
- [8] DOUPAL, Antonín. *Studium vlastností kovových tenkých vrstev a nanostruktur pomocí rastrovací sondové mikroskopie*. Brno, 2010. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [9] M., Bartošik. *Aplikace AFM/STM v oblasti nanotechnologií*. Brno, 2003. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [10] PAVERA, Michal. *Konstrukce nízkoteplotních ultravakuových rastrovacích sondových mikroskopů*. Brno, 2015. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [11] HENDRYCH, A.; KUBÍNEK, R; VŮJTEK, M. *Mikroskopie magnetických sil* [online]. Olomouc, 2008 [cit. 2018-03-26]. Dostupné z: <<http://atmilab.upol.cz/texty/SPM-teorie.pdf>>.

- [12] WERTHEIMER, P. *Metody SPM založené na sondách vyrobených z křemenného rezonátoru*. Brno, 2015. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [13] PUTMAN, Constant A. J.; GROOTH, Bart G. De; HULST, Niek F. Van; GREVE, Jan. A detailed analysis of the optical beam deflection technique for use in atomic force microscopy. *Journal of Applied Physics* [online]. 1992, **72**(1), 6–12 [cit. 2018-04-29]. ISSN 0021-8979. Dostupné z DOI: 10.1063/1.352149.
- [14] LEE, Chengkuo. Development of a piezoelectric self-excitation and self-detection mechanism in PZT microcantilevers for dynamic scanning force microscopy in liquid. *JVST B* [online]. 1997, **15**(4), 1559– [cit. 2018-05-01]. ISSN 0734211X. Dostupné z DOI: 10.1116/1.589400.
- [15] RUGAR, D.; MAMIN, H. J.; GUETHNER, P. et al. Magnetic force microscopy: General principles and application to longitudinal recording media. *Journal of Applied Physics* [online]. 1990, **68**(3), 1169–1183 [cit. 2018-04-13]. ISSN 0021-8979. Dostupné z DOI: 10.1063/1.346713.
- [16] BOEF, A. J. den. Preparation of magnetic tips for a scanning force microscope. *Applied Physics Letters* [online]. 1990, **56**(20), 2045–2047 [cit. 2018-04-30]. ISSN 0003-6951. Dostupné z DOI: 10.1063/1.102991.
- [17] STILLER, Markus; BARZOLA-QUIQUIA, José; ESQUINAZI, Pablo D et al. Functionalized Akiyama tips for magnetic force microscopy measurements. *Measurement Science and Technology* [online]. 2017-12-01, 125401– [cit. 2018-05-01]. ISSN 0957-0233. Dostupné z DOI: 10.1088/1361-6501/aa925e.
- [18] *Nanosenzors Akiyama probe* [online]. 2006 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: <<http://www.akiyamaprobe.com/features/working-principle/>>.
- [19] URBÁNEK, Ivan. *Modernizace aparatury IBAD*. Brno, 2008. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [20] SCHMIDTOVÁ, Tereza. *Magnetronové naprašování* [online]. 2012 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <<http://www.chempoint.cz/magnetronove-naprasovani>>.
- [21] BESTEC. *Electron beam evaporator BESTEC* [online] [cit. 2018-04-11]. Dostupné z: <<https://nano.ceitec.cz/electron-beam-evaporator-bestec/>>.
- [22] STAŇO, Michal. *Characterization of magnetic nanostructures by magnetic force microscopy*. Brno, 2014. Master's thesis. Brno University of Technology.
- [23] *TESCAN LYRA3* [online]. TESCAN [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <<https://www.tescan.com/en-us/technology/fib-sem/lyra3>>.
- [24] *LiteScope* [online]. Nenovision [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <<http://www.nenovision.com/litescope/litescopetm/description/>>.
- [25] *Scanning Probe Microscope Bruker Dimension Icon* [online]. Bruker [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <<https://www.bruker.com/products/surface-and-dimensional-analysis/atomic-force-microscopes/dimension-icon/overview.html>>.

Seznam zkratek

SPM	Scanning Probe Microscopy
STM	Scanning Tunneling Microscopy
AFM	Atomic Force Microscopy
QTF	Quartz Tuning Fork
MFM	Magnetic force Microscopy
FEBID	Focused Electron Beam Induced Processes
PVD	Physical Vapour Deposition
PLL	Phase-Locked Loop
ÚFI	Ústavu fyzikálního inženýrství
CEITEC	Central European Institute of Technology
IBS	Ion Beam Sputtering
SEM	Scanning Electron Microscopy
SE	Secondary Electron
BSE	Back Scattered Electrons
EDX	Energy-dispersive X-ray Spectroscopy
HDD	Hard Disk Drive

Seznam příloh

Výkresová dokumentace přiložená v deskách, elektronicky ve formátu pdf.

Číslo výkresu	Název	Formát
UFI-420-00	SESTAVA PŘÍPRAVKU	A3
UFI-420-01	DRŽÁK	A3
UFI-420-02	KLÍN	A3
UFI-420-03	KRYCÍ PLECH	A4
UFI-420-04	PLECH PRO DRÁŽKU	A4
UFI-420-05	PŘEKRÝVACÍ PLECH	A4
UFI-420-06	PRUŽÍCÍ PLÍŠEK	A4