

Impedanční skenovací mikroskopie

Impedance scanning microscopy

Tomáš Martínek

Bakalářská práce
2011



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Tomáš MARTÍNEK**
Osobní číslo: **A08129**
Studijní program: **B 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**

Téma práce: **Impedanční skenovací mikroskopie**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s metodami zobrazení morfologie povrchů.
2. Vyberte zobrazovací metodu, kterou je možno realizovat v laboratořích FAI UTB.
3. Sestavte měřicí aparaturu a napište program pro řízení a sběr dat.
4. Provedte vizualizaci povrchu pomocí vybraného software.
5. Rozeberte výhody a nevýhody vámi použité metody.
6. Navrhněte možné pokračování prací se zaměřením na bezpečnostní aplikace.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Hawkes P.W., Spence J.C.H. eds.: Science of Microscopy, vol.I vol.II Springer 2007
2. Heinz R.: Návrh detekčního uzlu pro mikrovlnný mikroskop, diplomová práce FAI UTB 2005
3. Trochta O.: Zpracování signálu z mikrovlnného koaxiálního rezonátoru, diplomová práce FAI UTB 2005
4. Firemní literatura fy Stanford Research
5. Firemní literatura fy Agilent
6. Ultramicroscopy, časopis dostupný přes knihovnu UTB

Vedoucí bakalářské práce:

doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání bakalářské práce:

25. února 2011

Termín odevzdání bakalářské práce:

23. května 2011

Ve Zlíně dne 25. února 2011

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá principy zobrazování morfologií povrchů a hlavně možností realizace měřicí aparatury – skenovacího mikroskopu, jenž bude schopen zobrazovat povrch vzorků pomocí impedančního skenovacího hrotu.

Klíčová slova: Skenovací mikroskopie, zobrazování povrchů, vizualizace

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the principles of imaging surface morphology and especially possibility of realization of measuring apparatus – scanning microscope, which will be able to view surface of samples using impedance scanning tip.

Keywords: Scanning microscopy, surfaces imaging, visualization

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěl poděkovat panu docentovi RNDr. Vojtěchovi Křesálkovi, CSc. za odborné a inspirativní konzultace, optimistický motivační přístup a pomoc při psaní této práce. Také bych rád poděkoval mé rodině za veškerou podporu po celou dobu studia.

Motto:

„Quidquid discis, tibi discis.“

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....
podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 ZOBRAZOVACÍ METODY	11
1.1 OPTICKÁ MIKROSKOPIE	11
1.1.1 Odražené a procházející světlo	11
1.1.2 Polarizované světlo	11
1.1.3 Temné pole	11
1.1.4 Fázový kontrast	12
1.1.5 Další metody optické mikroskopie.....	12
1.2 MIKROSKOPIE SKENUJÍCÍ SONDOU	12
1.2.1 Rastrovací tunelovací mikroskopie	14
1.2.2 Mikroskopie atomových sil	16
1.2.3 Mikroskopie magnetických sil	17
1.2.4 Mikroskopie laterální síly	18
1.2.5 Další metody SPM	19
1.3 ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE	20
1.3.1 Transmisní elektronová mikroskopie	20
1.3.2 Skenovací elektronová mikroskopie	20
1.3.3 Skenovací transmisní elektronová mikroskopie.....	20
1.3.4 Environmentální elektronová mikroskopie.....	21
2 VYUŽITÉ FYZIKÁLNÍ JEVY.....	22
2.1 PIEZOELEKTRICKÝ JEV	22
2.2 ELEKTROMAGNETICKÁ INDUKCE.....	22
3 POUŽITÉ PŘÍSTROJE A MĚŘÍCÍ TECHNIKA.....	24
3.1 SERVOMOTOR	24
3.1.1 Mercury M-110 1DG	24
3.2 DIGITÁLNÍ MULTIMETR	25
3.2.1 Hewlett Packard 34401A	25
II PRAKTICKÁ ČÁST.....	26
4 MĚŘÍCÍ APARATURA.....	27
5 SKENOVACÍ METODY	28
5.1 KONTAKTNÍ METODA.....	28
5.2 PIEZOELEKTRICKÁ METODA	28
5.3 METODA ELEKTROMAGNETICKÉ INDUKCE	29
6 SOFTWARE PRO ŘÍZENÍ A SBĚR DAT	31

6.1	VÝVOJOVÝ DIAGRAM	31
6.2	POPIS PROGRAMU PRO ŘÍZENÍ A SBĚR DAT	32
7	NAMĚŘENÉ HODNOTY A JEJICH VIZUALIZACE	33
7.1	VÝSLEDKY KONTAKTNÍ METODY	33
7.2	VÝSLEDKY PIEZOELEKTRICKÉ METODY	40
8	ZAMĚŘENÍ NA BEZPEČNOSTNÍ APLIKACE	45
	ZÁVĚR	48
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ	49
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	50
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	53
	SEZNAM OBRÁZKŮ	54
	SEZNAM TABULEK	56
	SEZNAM PŘÍLOH	57

ÚVOD

Ve této práci se zabývám vytvořením skenovacího mikroskopu, jenž bude schopen zobrazovat morfologii povrchů pomocí měření na impedančním hrotu s využitím servomotorů Mercury M-110 1DG.

V teoretické části rozeberu problematiku zobrazování morfologií povrchů. V první části rozebírám jednotlivé zobrazovací metody a to metody optické mikroskopie, mikroskopie skenující sondou a elektronové mikroskopie.

V kapitole druhé rozebírám principy fyzikálních jevů, které jsem během realizace této práce využil: piezoelektrický jev a elektromagnetická indukce.

Třetí kapitola rozebírá použité přístroje a měřicí techniku, jenž jsem využil při měřeních. Servomotory M-110 1-DG a krokové ovladače C-862 od firmy Physik Instrumente a digitální multimetr 34401A od firmy Hewlett Packard (Agilent Technologies).

V praktické části se věnuji problematice skenovacích metod, jenž jsem realizoval v laboratořích FAI UTB a rozebírám výhody a nevýhody těchto metod. Věnuji se použité měřicí aparatuře a jejímu zapojení, principům měření a vytvořenému programu na řízení a sběr dat.

V další části se zabývám zpracováním, vizualizací a prezentací naměřených dat.

Poslední kapitola se zaměřuje na možnosti aplikace těchto metod v oblasti bezpečnosti. Konkrétně se jedná o kriminalistickou balistickou expertizu.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZOBRAZOVACÍ METODY

Pro zobrazování morfologií povrchů se využívá celá škála metod. V závislosti na rozlišovací schopnosti a způsobu zobrazení od těch bezkontaktních metod, jenž využívají optické přístroje, přes kontaktní a bezkontaktní metody, využívající měření určité veličiny na skenování sondě, až po použití elektronových mikroskopů.

1.1 Optická mikroskopie

Optické mikroskopy jsou jedním z nejrozšířenějších optických přístrojů využívaných v širokém spektru vědních a technických aplikací. Pro zkoumání vzorku se používá elektromagnetické záření o vlnové délce 180-1300 nm. Při zkoumání daného předmětu dochází ke změně charakteristik používaného záření jako je amplituda, fáze, polarizace a frekvence. Rozlišovací schopnost daného zařízení závisí na použitých optických soustavách – objektivu a okuláru a jejich kvalitě. Vzorek lze pozorovat různými metodami, například v procházejícím, odraženém nebo polarizovaném světle. [5]

1.1.1 Odražené a procházející světlo

Volba pozorování v odraženém nebo procházejícím světle závisí na typu použitého vzorku, jeho průhlednosti, tloušťce, atd.

1.1.2 Polarizované světlo

Polarizační mikroskopie využívá lineárně polarizovaného světla, které kmitá v jedné rovině. Polarizace je uskutečněna filtry (polarizátorem a analyzátorem), které jsou v optické ose mikroskopu. Jsou-li roviny těchto filtrů k sobě kolmé, je zorné pole mikroskopu temné. Jednolomné látky, jako je například voda, zůstávají při zkřížených filtrech tmavé, nejsou tedy zobrazeny. Dvojlomné látky, jako například krystaly, mění rovni kmitu procházejícího světla, a proto jsou při zkřížených filtrech zobrazeny. [6]

1.1.3 Temné pole

Podstata mikroskopie v temném poli neboli zástinu spočívá v tom, že do roviny objektu vstupují z kondenzoru pouze okrajové, velmi šikmé světelné paprsky, zatímco středové paprsky jsou pohlceny a při zobrazení se neuplatní. Vzorek je tedy osvětlen jen ze strany,

paprsky se od něj odrážejí a lámou. Do objektivu vstupují jen paprsky odražené od povrchu objektu a ten proto září v temném poli. [6]

1.1.4 Fázový kontrast

Metoda fázového kontrastu se používá pro zvýraznění nekонтastních, bezbarvých a průhledných objektů. Princip této metody spočívá ve změně fáze vlnového pole, jež prochází vzorkem. Pomocí vhodného zařízení se tento rozdíl změny v rozdíl amplitudy, který detekujeme jako světlejší a tmavší místa objektu. [5]

1.1.5 Další metody optické mikroskopie

Z dalších metod například vícebarevné osvětlení, šikmé osvětlení, barvicí metody, impregnační metody, interferenční mikroskopii, fluorescenční mikroskopii atd.

1.2 Mikroskopie skenující sondou

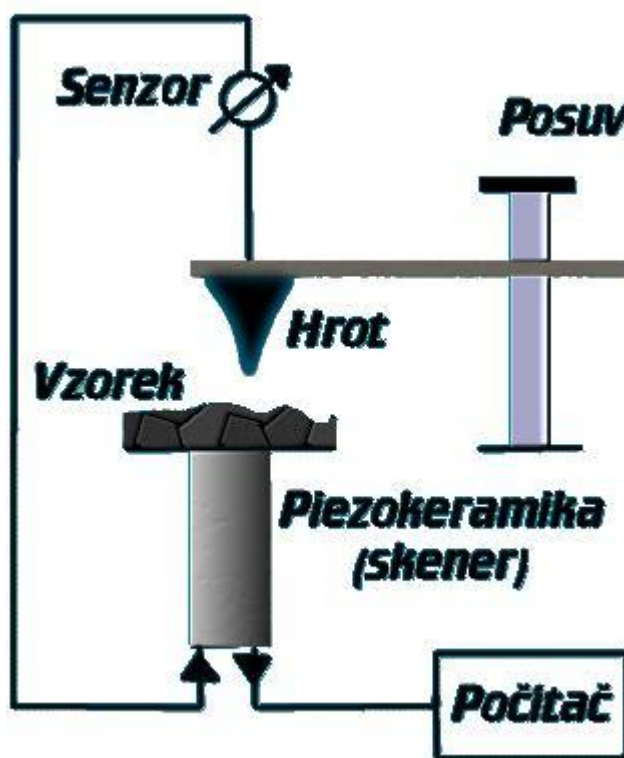
Mikroskopie skenující sondou (Scanning Probe Microscopy - SPM) je soubor experimentálních metod určených ke stanovení struktury povrchu se subatomárním rozlišením. SPM využívá těsného přiblížení měřicí sondy ke vzorku – jenž pracují v oblasti blízkého pole. Pro charakterizaci celého vzorku je nutno provádět postupná měření ve více bodech pro poskytnutí trojrozměrného obrazu. Velká blízkost sondy a vzorku umožňuje snížení energetického zatížení vzorku, zvláště s porovnáním s elektronovou mikroskopií. Na druhou stranu klade nároky na mechanickou stabilitu a řízení pohybu, protože může dojít k poškození vzorku. Toho se ale někdy úmyslně využívá k vytvoření nanostruktur na úrovni jednotlivých atomů. [4]

Metoda umožňuje zobrazovat vzorky o velikosti od stovek mikrometrů až do jednotek nanometrů, pro nejmenší oblast až se subatomárním rozlišením. Z principu metody vyplývá různé rozlišení v rovině skenování (povrch vzorku) a směru k ní kolmém (osa Z). První z nich je dáno zejména velikostí sondy a měřících rozestupů, druhé závisí na charakteru interakce a mechanické stabilitě mikroskopu. V nejlepších případech dosahuje rozlišení hodnot setin nanometrů až jednotek pikometrů.

Jak bylo výše uvedeno, SPM metody nemusí být pouze zobrazovací, ale lze jich využít k modifikaci povrchů až na atomární úrovni. Lze provádět litografické zpracování, mechanické odstraňování, manipulace a molekulami i jednotlivými atomy. [4]

Různé metody SPM našly uplatnění především ve fyzice povrchů, biologii, při studiu práškových nanočástic nebo v technologii testování integrovaných obvodů. Velké naděje jsou rovněž vkládány do použití SPM v záznamové technice, která umožní několikanásobně zvětšit hustotu dat oproti současným médiím. [4]

Každý mikroskop z kategorie SPM se skládá z následujících částí:



Obrázek 1.: Obecné schéma Mikroskopu se skenující sondou [4]

Skener - piezokeramické pohybové členy, které jednak vytváří měřicí rastr, přibližují a oddalují sondu.

Hrot (Sonda) - umístěna v držáku, tvořená zpravidla ostrým hrotem o nosnou částí, liší se dle typu mikroskopie, zprostředkovává měřící interakci.

Senzor - snímá měřenou veličinu, někdy je přímo sondou, někdy potřebuje aktivní část (například LASER).

Obvod zpětné vazby - slouží k řízení měření, záznamu a vizualizace dat.

Napájecí zdroj.

Stolek pro upevnění a manipulaci se vzorkem.

Optický systém pro orientaci na vzorku.

Pomocné části (tlumení vibrací, vakuové vývěvy, generátory magnetického pole atd.).

První úspěšnou realizací SPM byla rastrovací tunelovací mikroskopie (Scanning Tunneling Microscopy - STM) v roce 1981. Její autoři o pět let později obdrželi Nobelovu cenu. [4]

1.2.1 Rastrovací tunelovací mikroskopie

Rastrovací tunelovací mikroskopie je založena na monitorování proudu, který protéká mezi vodivým hrotem a vodivým vzorkem, aniž by byly v přímém mechanickém styku. Její teoretický popis je založen na kvantové fyzice, konkrétně na tunelovém jevu. Mezi oběma kovy se vytváří energetická bariéra, kterou elektrony dle klasické teorie nemohou proniknout. Z hlediska kvantové interpretace však pravděpodobnost průchodu není nulová, ale znatelných hodnot nabývá teprve pro velmi úzké bariéry. Možnost praktického využití závisí na schopnosti měřit protékající proud, který má velikost nanoampéry a méně. Takové hodnoty jsme schopni změřit poměrně přesně. [3,4]

Rozlišení STM je určeno převážně mechanickou stabilitou šířky tunelování mezery, dosažitelné rozlišení bývá až 1 pm. Rozlišení dále závisí na velikosti skenovacího hrotu a velikosti skenovacího kroku. Velikost kroku nepřímo závisí na počtu měřených bodů, který ovlivňuje dobu měření jednoho obrazu. Délka vhodného kroku je tedy kompromisem mezi rozlišením a délkou měření. [4]

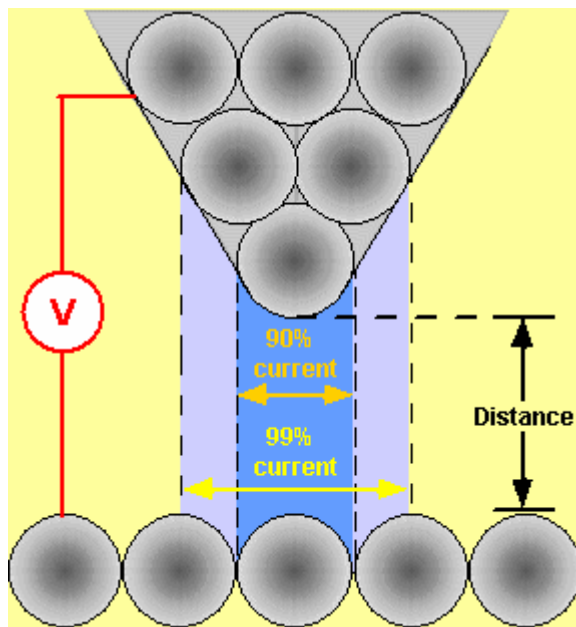
Velikost a typ interakce působící mezi hrotem a vzorkem závisí na jejich vzájemné vzdálenosti d . Přibližně můžeme rozdělit interakci do čtyř oblastí: [4]

$d > 10 \text{ nm}$ zanedbatelný vliv, při popisu lze systém uvažovat jako dvě nezávislé elektrody

$1 < d < 10 \text{ nm}$ velmi slabé van der Waalsovy síly, při napětích do 5 V netuneluje

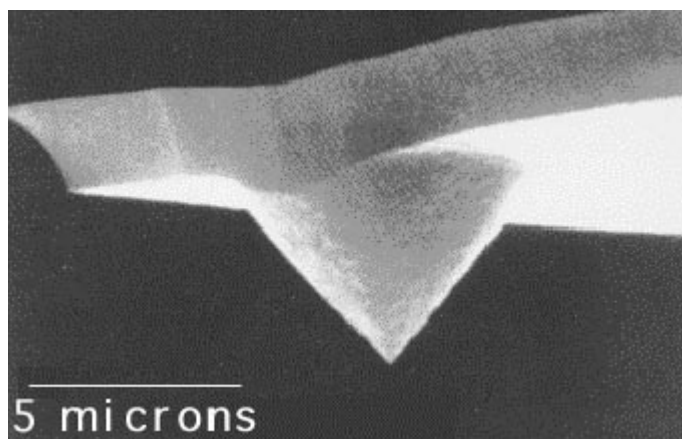
$0,3 < d < 1 \text{ nm}$ výměna procházejících elektronů vede ke vzniku přitažlivosti, pod napětím tuneluje – vlastní režim STM

$d < 0,3 \text{ nm}$ převládá odpudivá interakce, dochází ke kontaktu, proud je určen vlastní vodivostí



Obrázek 2.: Rozložení průtoku proudu [7]

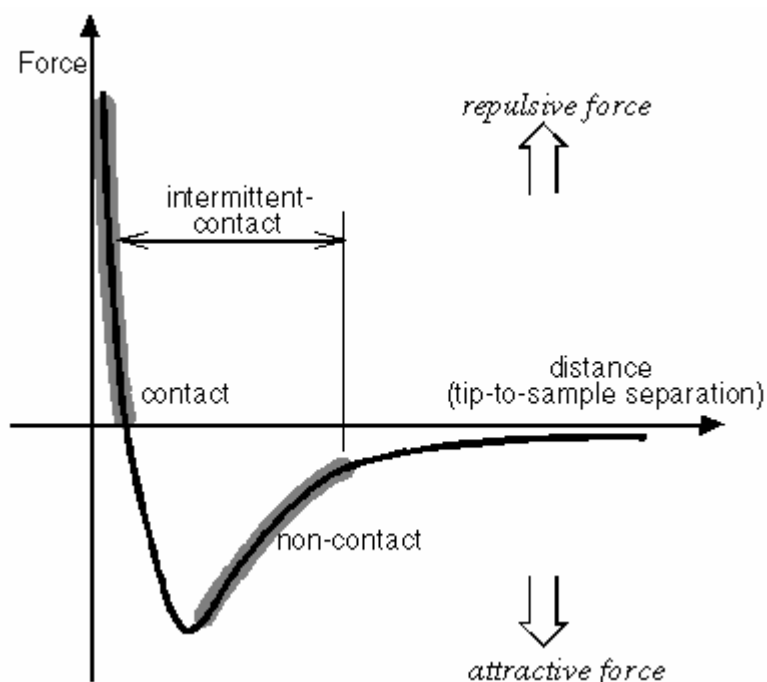
Princip měření STM: Vlastní měření probíhá tak, že se nejprve provede hrubý posuv vzorku ke hrotu (ve směru osy Z), tento může být čistě mechanický. Poté dojde k přiložení napětí mezi hrotem a vzorkem, aby mohl procházet proud a nyní se jemným posuvem (pomocí piezokeramiky) přiblíží vzorek ke hrotu tak, aby procházel proud a nabyt měřitelných hodnot. Získání obrazu se provádí skokovým posuvem ve dvou rozměrech (X,Y) rastru. [4]



Obrázek 3.: Příklad skenovacího hrotu [7]

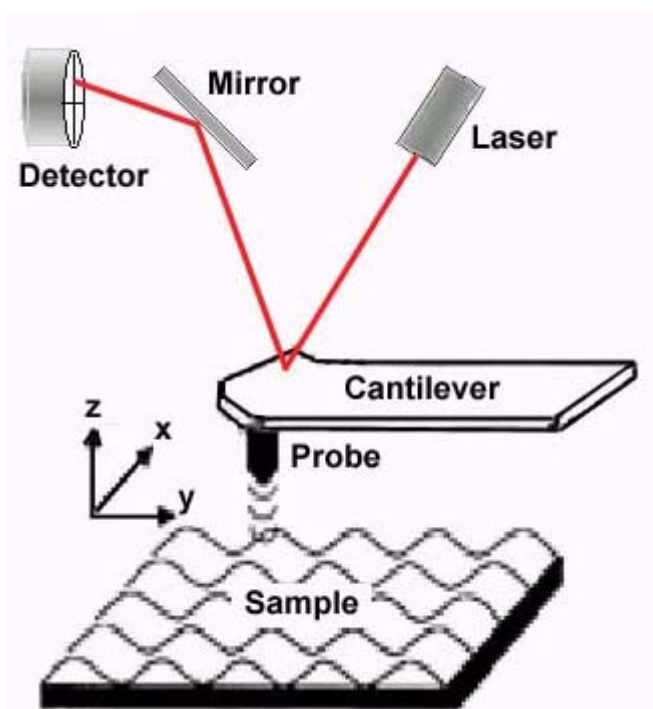
1.2.2 Mikroskopie atomových sil

Při měření metodou STM byly pozorovány systematické odchylky, které se daly vysvětlit silovým působením mezi hrotem a vzorkem. Vznikla myšlenka na využití těchto sil přímo k měření, zvláště z důvodu měření dielektrických vzorků – vznikla mikroskopie atomových sil (Atomic Force Microscopy - AFM), která se stala nejrozšířenější metodou SPM. [4]



Obrázek 4.: Působení přitažlivé a odpuzivé síly v závislosti na vzdálenosti vzorku a hrotu [7]

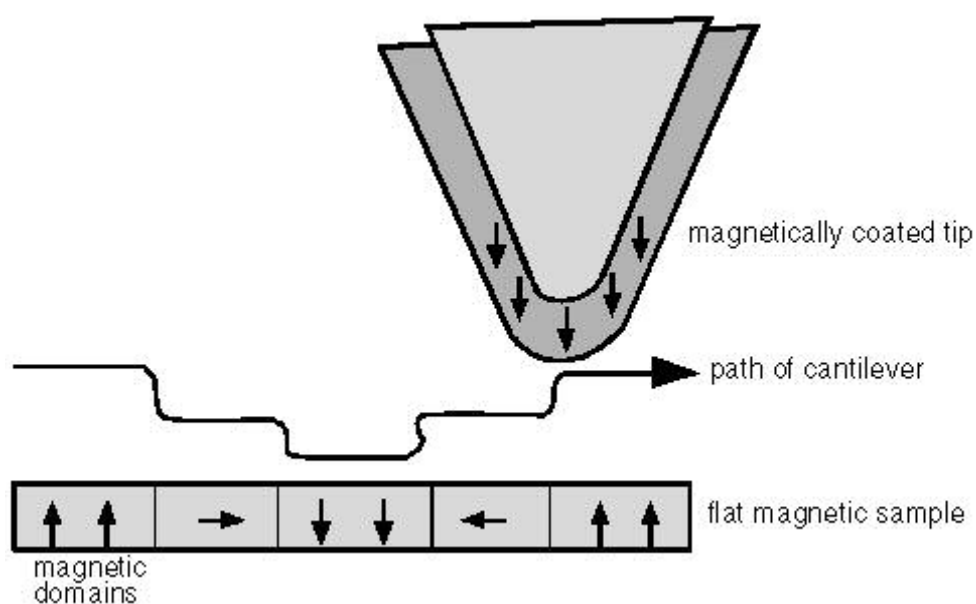
Tato metoda využívá elektromagnetických sil atomárního původu, které působí mezi atomy hrotu a atomy vzorku. Princip metody je podobný SPM - velmi ostrý hrot se pohybuje nad vzorkem či v dotyku s ním a je odpuzován a přitahován vzorkem. Hrot, který interakci snímá je upevněn a tenkém pružném pásku - nosníku. Ten svým ohybem zprostředkovává informaci o velikosti interakce. Síly, které nosník ohýbají, mohou mít různý původ, nejčastěji se jedná o van der Waalovu sílu a repulsivní sílu plynoucí z Pauliho principu. První z nich působí pouze při větších vzdálenostech od vzorku, druhá pouze v dotyku, je-li vzdálenost menší než součet atomových poloměrů. Dále působí síly adhezní, vazební, třecí, deformační a kapilární. Jedna síla při měření působí jako signálová, ostatní jako šumové. [4]



Obrázek 5.: Princip metody AFM [7]

1.2.3 Mikroskopie magnetických sil

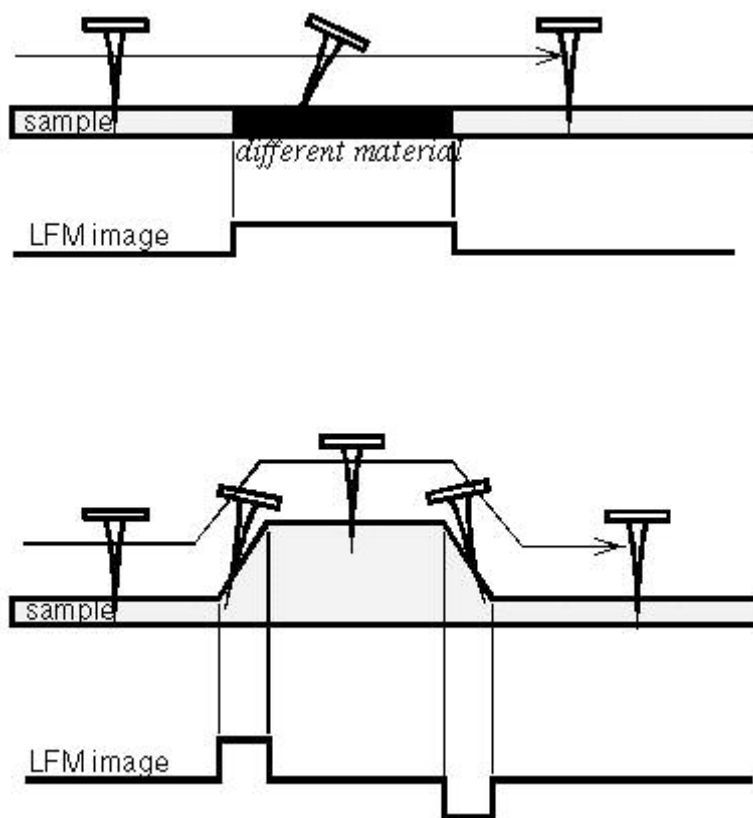
Mikroskopie magnetické síly (Magnetic Force Microscopy - MFM) umožňuje prostorově zobrazit změny magnetické (Lorentzovy) síly ve vzorcích z magnetických materiálů. Pro MFM je třeba hrot potáhnout tenkou feromagnetickou vrstvou. Systém detekuje změny rezonanční frekvence nosníku způsobené magnetickým polem vzorku v závislosti na vzdálenosti hrotu od povrchu. Obraz získaný metodou MFM obsahuje informaci nejen o struktuře, ale také o magnetických vlastnostech povrchu. [8]



Obrázek 6.: Magnetické síly působící na hrot [8]

1.2.4 Mikroskopie laterální síly

Mikroskopie laterální síly (Lateral Force Microscopy - LFM) vychází z vyhodnocení příčného ohybu (krutu) nosníku, ke kterému dochází v důsledku rozložení sil na nosníku umístěném rovnoběžně k rovině povrchu vzorku. LFM je užitečná pro zobrazení změn, vyplívajících z nehomogenit povrchu (změna koeficientu tření). [8]



Obrázek 7.: Znáznornění příčin vzniku laterální síly [8]

V prvním případě (obrázek 7., horní část) hrot prochází přes oblasti z odlišných materiálů, charakterizovaných různými koeficienty tření. Ve druhém případě (obrázek 7., dolní část) se může nosník zkroutit v důsledku kontaktu se strmým náklonem. [8]

1.2.5 Další metody SPM

Mezi další metody vycházející z SPM patří například:

Mikroskopie modulace síly (Force Modulation Microscopy – FMM)

Mikroskopie detekce fázových posunů (Phase Detection Microscopy - PDM)

Mikroskopie elektrostatických sil (Electrostatic Force Microscopy - EFM)

Rastrovací kapacitní mikroskopie (Scanning Capacitance Microscopy - SCM),

Rastrovací teplotní mikroskopie (Scanning Thermal Microscopy – SThM)

Rastrovací optická mikroskopie v blízkém poli (Near Field Scanning Optical Microscopy - NFSOM). [8]

1.3 Elektronová mikroskopie

Elektronová mikroskopie (Electron Microscopy - EM) je metoda založená na vlnových vlastnostech elektronů pracující na principu klasické optické mikroskopie. Zdrojem záření je elektronová tryska a elektromagnetické čočky nahrazují čočky optické. Oproti optickému mikroskopu musí ty elektronové pracovat ve vakuu, což je poměrně velká nevýhoda, jedinou výjimku tvoří environmentální elektronový mikroskop. Elektronové mikroskopy se dělí podle typu zobrazení obrazu vzorku, nejklasičtějším je pozorování zvětšeného obrazu okem, dále záznamem na film, fotografickou desku nebo se snímá pomocí CCD čipu. Snímání CCD čipem je nejelegantnější metodou z důvodu digitalizace a následné snadné archivace a úpravě obrazu. Rozlišení elektronových mikroskopů se pohybuje od řádové desítek nm (TEM) až po jednotky nm (SEM). [3]

1.3.1 Transmisní elektronová mikroskopie

U transmisní elektronové mikroskopie (Transmission Electron Microscopy - TEM) se prozařuje vzorek najednou a detekuje elektrony na fluorescenčním stínítku pro průchodu vzorkem. TEM se dá použít pouze u vzorků s tloušťkou do 50 nm, aby tímto materiálem elektrony prošly a nebyly úplně pohlceny. Při urychlovacích napětích okolo několika set kV již mluvíme o HRTEM – High-Resolution transmission elektron microscopy – transmisní elektronový mikroskop s vysokým rozlišením. [3]

1.3.2 Skenovací elektronová mikroskopie

Skenování elektronová mikroskopie (Scanning Electron Microscopy - SEM) se používá pro zobrazování vzorků o větší tloušťce. Hlavní paprsek elektronů skenuje povrch vzorku řádek po řádku spolu s elektronovým paprskem v pozorovací obrazovce. Oba tyto paprsky jsou synchronní. Z každého bodu jsou svazkem elektronů vybudeny signály, které přináší určitou informaci o struktuře vzorku. [3]

1.3.3 Skenovací transmisní elektronová mikroskopie

Skenování transmisní elektronová mikroskopie (Scanning Transmission Electron Microscopy - STEM) je kombinací metod TEM a SEM. [3]

1.3.4 Environmentální elektronová mikroskopie

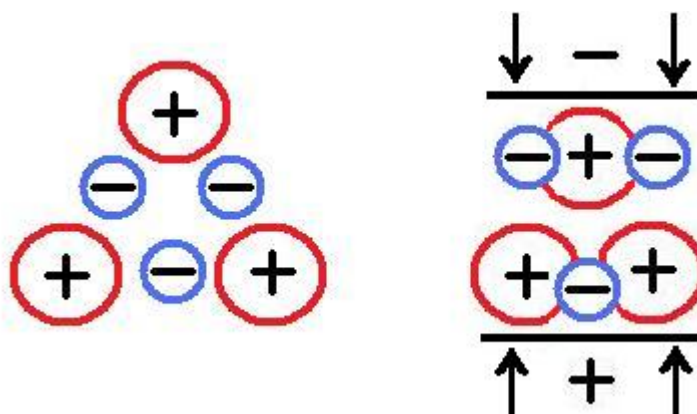
Environmentální elektronové mikroskopy (Environmental Electron Microscopy – EEM) jsou na rozdíl od ostatních metod EM schopny práce v prostředí bez vakua. Jsou určeny hlavně pro biologické aplikace. [3]

2 VYUŽITÉ FYZIKÁLNÍ JEVY

V rámci praktické části bylo při realizaci skenovacích metod využito několika fyzikálních jevů. Piezoelektrický jev a elektromagnetická indukce.

2.1 Piezoelektrický jev

Piezoelektrický jev spočívá v tom, že elastickou deformací se mění elektrická polarizace krystalu. Feroelektrické krystaly vykazují i elektrostrikcí, což je jev inverzní k jevu piezoelektrickému: při změně elektrického pole, které má za následek změnu elektrické polarizace, dochází ke vzniku elektrostriční deformace. Piezoelektrické chování však mohou jevit i krystaly, které nejsou feroelektrické. Klasickým představitelem takových látek je krystalický křemen, na němž byl jev Pierrem Curiem v roce 1880 objeven. [15]



Obrázek 8.: Vlevo je krystal elektricky neutrální, vpravo je znázorněna polarizace způsobená deformační silou

Piezoelektrického jevu se využívá například v krystalových gramofonových přenoskách, piezoelektrických mikrofonech, fonografech, elektromechanických měničích, piezoelektrických mechanických rezonátorech atd.

2.2 Elektromagnetická indukce

Uvažujeme-li vodivou uzavřenou smyčku zhotovenou z homogenního vodiče, která je umístěna v blízkosti zdrojů magnetického pole. Předpokládejme dále, že máme možnost měřit proud protékající smyčkou. Zjistíme, že smyčkou nepoteče žádný proud, jestliže magnetické pole v jejím okolí bude neproměnné a smyčka bude v klidu. Naopak smyčkou počne protékat proud, jestliže se smyčka počne vhodným způsobem pohybovat, jestliže se

vhodným způsobem počnou pohybovat zdroje magnetického pole, nebo jestliže smyčka i zdroje magnetického pole zůstanou v klidu vůči pozorovací soustavě, ale počne se měnit magnetické pole uvnitř smyčky. [15]

3 POUŽITÉ PŘÍSTROJE A MĚŘÍCÍ TECHNIKA

V rámci realizace byla použita metoda obdobná SPM. Měření bylo prováděné na stacionárním skenovacím hrotu pomocí digitálního multimetru (DMM) Hewlett Packard (HP) 34401A a pro posuvy vzorku byly využity tři servomotory Mercury M-110 1DG, jenž zajistily posuv v osách X,Y a Z. Tyto servomotory, stejně jako DMM, byly ovládány pomocí vývojového prostředí MatLab R2009b.

3.1 Servomotor

Servomotory jsou zařízení, jenž se vyznačují vysokou přesností pohybu. Na rozdíl od běžných motorů u nich lze nastavit přesnou polohu natočení osy. Ovládají se jimi například posuvy u CNC strojů nebo čtecí hlavy HDD. [9]

3.1.1 Mercury M-110 1DG

Při realizaci této práce byly využity servomotory Mercury M-110 1DG od firmy Physik Instrumente (PI), které byly k dispozici v laboratoři FAI. Tyto servomotory mají následující hodnoty udávané výrobcem:

Pohybový rozsah	5 mm
Nejmenší garantovaný krok	500 nm
Maximální rychlost	1 mm·s ⁻¹



Obrázek 9.: Mercury M-110 1DG ve srovnání s 9 V baterií [9]

Servomotory M-110 jsou ovládány přes krokové ovladače Mercury C-862 Mercury Networkable Single-Axis DC-Motor Controller. Tyto krokové ovladače slouží k flexibilnímu řízení pohybů servomotorů. Každý ovladač může ovládat pouze jeden motor. Tyto ovladače se dají vzájemně propojovat, čímž je umožněno adresně ovládat až šestnáct servomotorů. Pohyb posuvů je realizován odesíláním a přijímáním textových řetězců

obsahujících identifikační a řídicí znaky přes port RS-232 mezi počítačem a krokovými ovladači C-862. [9]



Obrázek 10.: Mercury C-862 ve srovnání s mincemi 1\$ a 1€ [13]

3.2 Digitální multimetr

Pro automatizaci a zpřesnění celého procesu měření a softwarového algoritmu byl využit DMM HP 34401A. Tento DMM byl připojen k PC přes rozhraní GPIB (komunikační protokol Visa) a ovládán opět přes vývojové prostředí MatLab. [9]

3.2.1 Hewlett Packard 34401A

DMM 34401A od firmy HP má maximální rozlišení $6\frac{1}{2}$ digitů. Relativní nejistota měření je pro střídavé hodnoty 0,06% a pro hodnoty stejnosměrné 0,0015%. Přístroj umožňuje měření až do 1kV. Šířka měřicího pásma je 3 Hz až 300 kHz. Rychlost měření výrobce uvádí až $1000 \text{ měření} \cdot \text{s}^{-1}$ v závislosti na počtu použitých digitů při měření. [10,12]

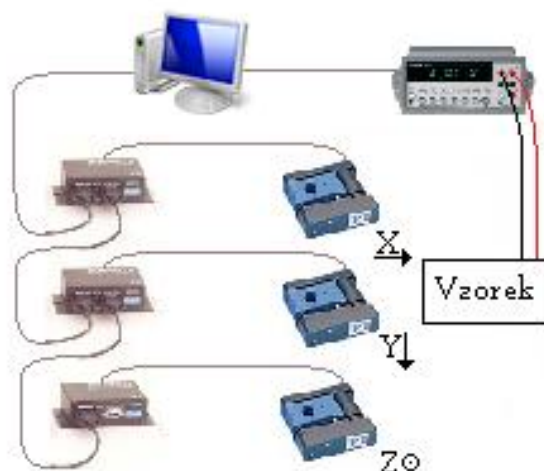


Obrázek 11.: Přední panel DMM HP 34401A [11]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 MĚŘÍCÍ APARATURA

V praktické části bylo prvním krokem propojit veškeré přístroje a měřící techniku k počítači a ověřit funkčnost zapojení.



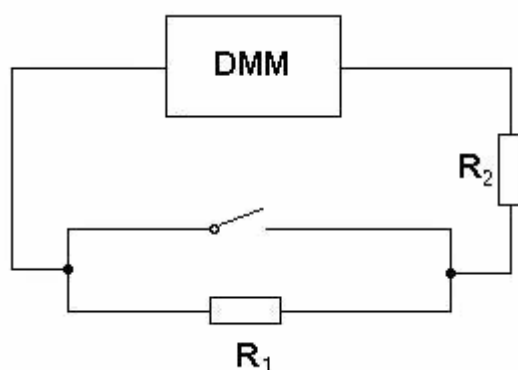
Obrázek 12.: Schéma zapojení

K počítači byly navzájem připojeny tři krokové ovladače C-862 přes rozhraní RS-232. Ke každému ovladači byl připojen servomotor M-110 1DG opět přes rozhraní RS-232. DMM 34401A byl připojen k počítači přes rozhraní GPIB.

5 SKENOVACÍ METODY

5.1 Kontaktní metoda

Při první kontaktní metodě DMM 34401A měřil odpor vedení podle obrázku č. 13, kde znázorněný spínač byl realizován skenovacím hrotem (tenký vodič) a samotným vodivým vzorkem. Při poklesu hodnoty odporu vedení na velikost rezistoru R_2 byl vyhodnocen kontakt.

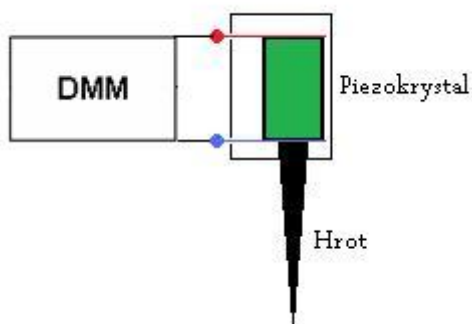


Obrázek 13.: Schéma měření na hrotu

Velikou nevýhodou této metody je omezení skenování pouze na vodivé struktury.

5.2 Piezoelektrická metoda

Druhá piezoelektrická metoda spočívala v měření napětí generovaného krystalovou hlavou gramofonové přenosky při působení síly mezi hrotem přenosky a vzorkem. Použitá přenoska byla starší, tudíž generovala šumové hodnoty napětí i bez působení síly. Bylo provedeno velké množství měření za použitím SW vytvořeného ve vývojovém prostředí MatLab R2009b. Mezní hodnota pro kontakt byla stanovena o něco větší (65 mV), než byla největší hodnota generovaná krystalovou přenoskou bez působení síly.



Obrázek 14.: Měření napětí generované piezokrystalem

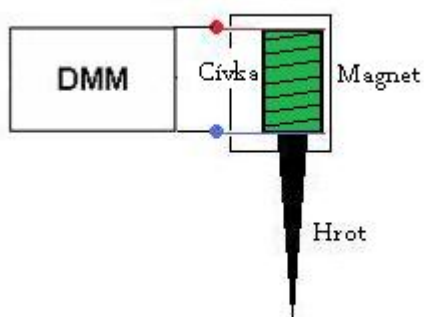


Obrázek 15.: Krystalová přenoska

Výhodou této metody byla možnost skenování i nevodivých struktur. Ovšem síla působící mezi hrotem a vzorkem mohla zničit vzorek, tudíž se dá tato metoda použít pouze na pevné struktury.

5.3 Metoda elektromagnetické indukce

Třetí metoda měla být obdobná metodě druhé. Byla použita rychlostní (magnetodynamická) hlava gramofonové přenosky využívající elektromagnetické indukce.



Obrázek 16.: Měření proudu indukovaného na cívce



Obrázek 17.: Rychlostní přenoska

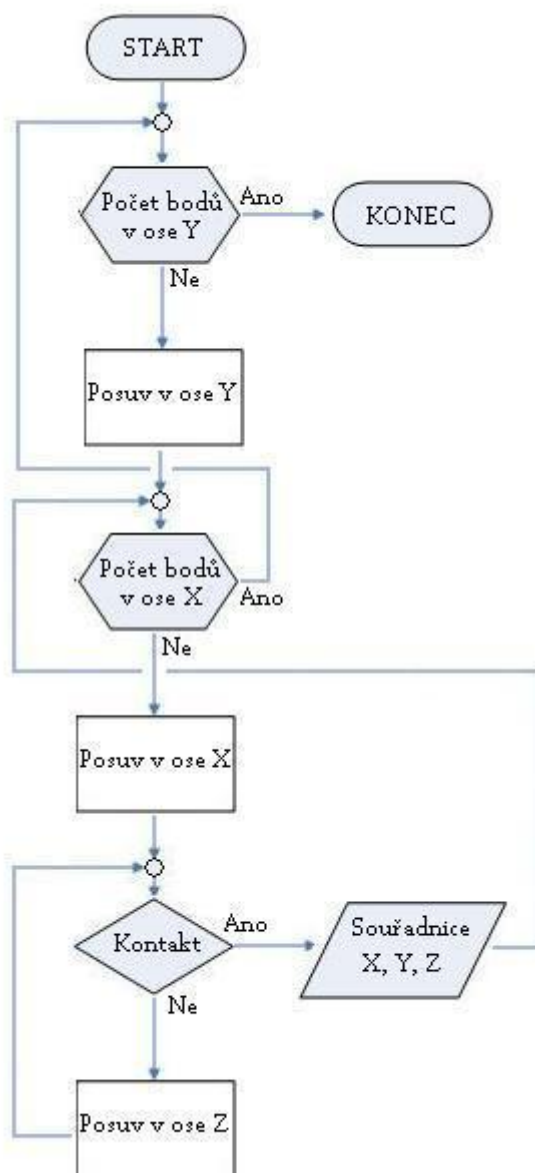
Tato metoda se ale neosvědčila. Indukovaný proud měl příliš malou leč měřitelnou hodnotu, ovšem tato hodnota byla skoková, tudíž ji DMM většinou nezaznamenal, proto byla tato metoda velmi nespolehlivá a proto nepoužitelná.

6 SOFTWARE PRO ŘÍZENÍ A SBĚR DAT

Společnost PI dodává spolu se servomotory a krokovými ovladači i software, který ale nebyl pro potřeby této práce dostatečně flexibilní a hlavně zde nebyla zprostředkována zpětná vazba. Proto byl vytvořen software vlastní ve vývojovém prostředí MatLab R2009b.

MatLab je programové prostředí a skriptovací jazyk pro vědeckotechnické numerické výpočty, návrhy algoritmů, analýzu a prezentaci dat a pro měření a zpracování signálu. [8]

6.1 Vývojový diagram



Obrázek 18.: Zjednodušený vývojový diagram

6.2 Popis programu pro řízení a sběr dat

Největším problémem při psaní programu bylo zajištění komunikaci mezi PC a krokovým ovladačem C-862 přes rozhraním RS-232 a mezi PC a DMM 34401A přes rozhraní GPIB.

Potřebné informace a principy komunikace byly k nalezení jak v manuálech ke krokovým ovladačům a servomotorům, tak v nápovědě programu MatLab.

Princip programu je velice jednoduchý. Jde v podstatě o tři provázané cyklické funkce. První zajišťuje pohyb po řádcích (osa X), druhá po sloupcích (osa Y) a třetí zajišťuje kontakt mezi skenovacím hrotem a vzorkem (osa Z).

Vzorek se po krocích přibližuje k hrotu a vyhodnocení kontaktu program vypíše aktuální souřadnice ve formátu „{X,Y,Z},” na obrazovku kvůli pozdějšímu zpracování v programu Wolfram Mathematica 7.

Poté program pomocí servomotorů oddálí vzorek od hrotu a pokračuje na další bod v řádku rastru. Po dokončení všech bodů na řádku se vzorek přesune na jeho začátek a posune se na dalšího řádek rastru.

Po dokončení všech bodů skenování se hrot opět oddálí od vzorku a měření je ukončeno.

Doba měření je velice závislá na počtu měřených bodů, kroku přibližování vzorku ke hrotu a kroku mezi jednotlivými body. Při počtu 25x25 bodů (=625 bodů) se doba měření pohybuje okolo 30 hodin v závislosti na výchozí vzdálenosti mezi vzorkem a skenovacím hrotem. Při samotném měření se musí najít kompromis mezi dobou měření a rozlišovací schopností.

7 NAMĚŘENÉ HODNOTY A JEJICH VIZUALIZACE

Z hodnot získaných měřením pomocí programu byly vytvořeny trojrozměrné grafy pomocí programu Wolfram Mathematica 7. Stačilo zkopírovat naměřené hodnoty z výpisu měřicího a řídicího programu a napsat funkci na vytvoření grafu ve formátu:

$$\text{ListPlot3D}[\{\{X_{11}, Y_{11}, Z_{11}\}, \{X_{12}, Y_{12}, Z_{12}\}, \dots, \{X_{nm}, Y_{nm}, Z_{nm}\}\}]$$

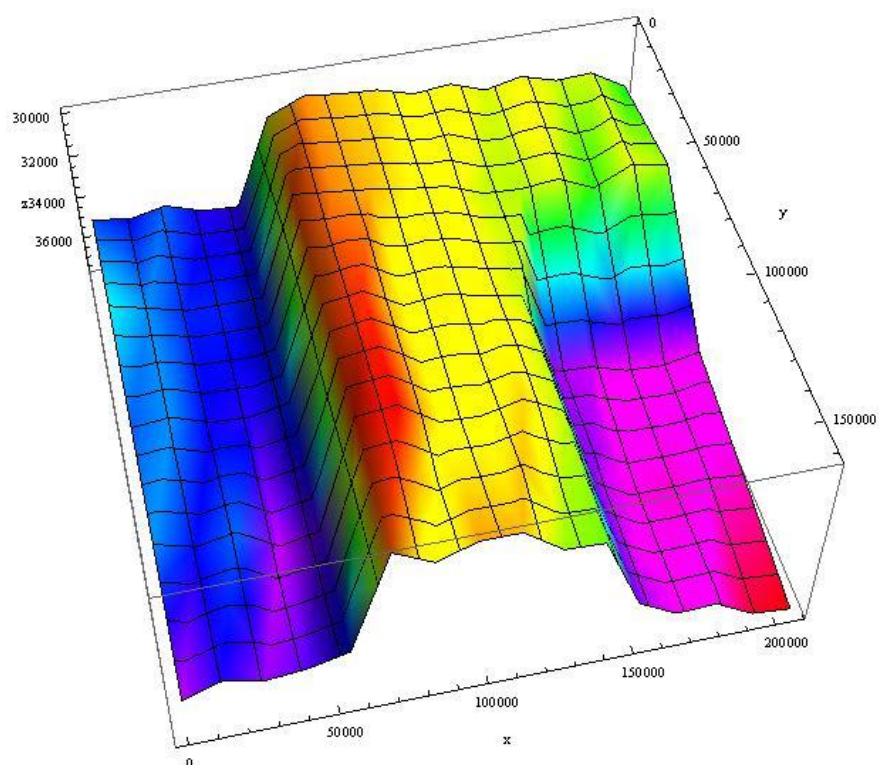
Kde X , Y a Z jsou naměřené souřadnice bodu, index n je pořadí bodu na řádku a m pořadí bod ve sloupci

7.1 Výsledky kontaktní metody

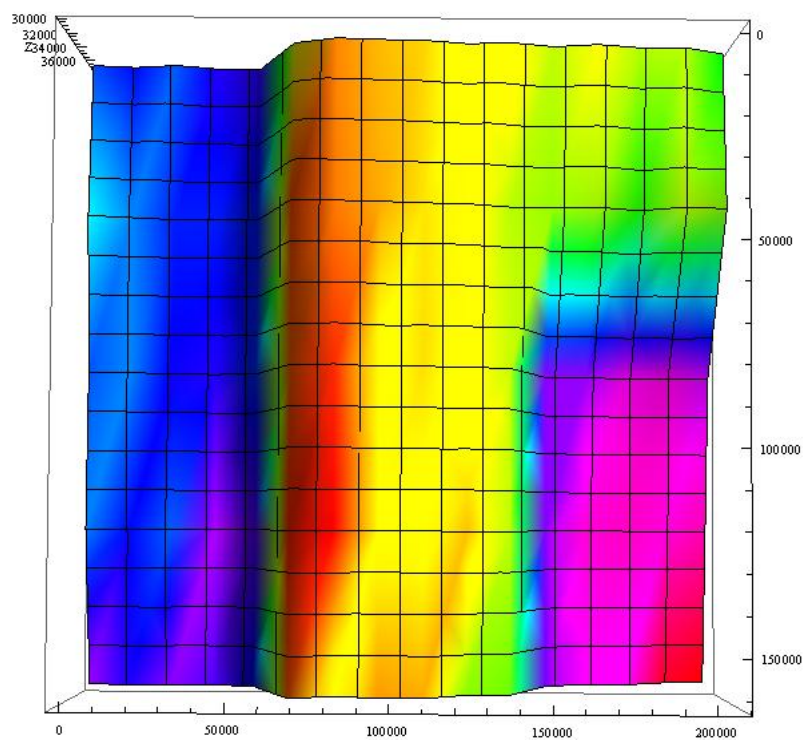
Pro měření kontaktní metodou byla vybrána jako vzorek mince 5 Kč.



Obrázek 19.: Mince 5 Kč se znázorněnou skenovanou oblastí [23]



Obrázek 20.: Vizualizace skenované oblasti mince 5 Kč dle výšky vzorku



Obrázek 21.: Vizualizace skenované oblasti dle výšky vzorku – horní pohled

Toto měření sloužilo převážně k ověření funkčnosti měřicí soustavy a algoritmu. Měření bylo provedeno s následujícími parametry:

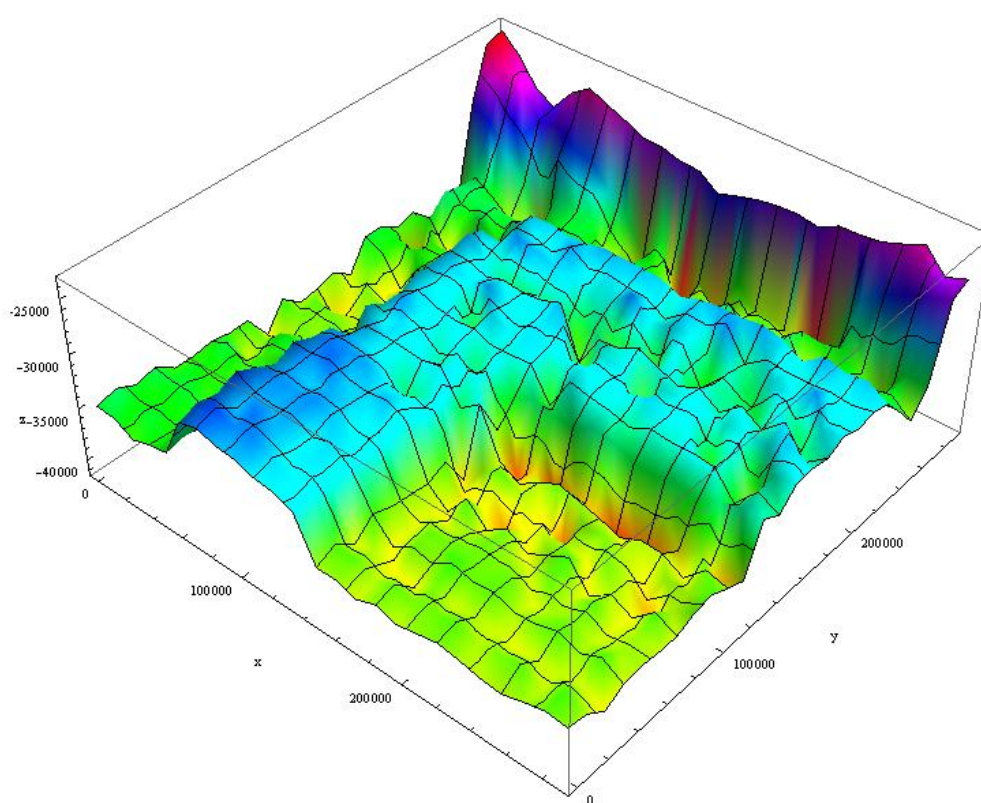
Velikost kroku rastru	13500 countů $\approx 270 \mu\text{m}$
Přibližovací krok	150 countů $\approx 3 \mu\text{m}$
Velikost rastru	17x17 bodů
Doba měření	10 hodin

Tabulka 1.: Parametry měření mince 5 Kč kontaktní metodou

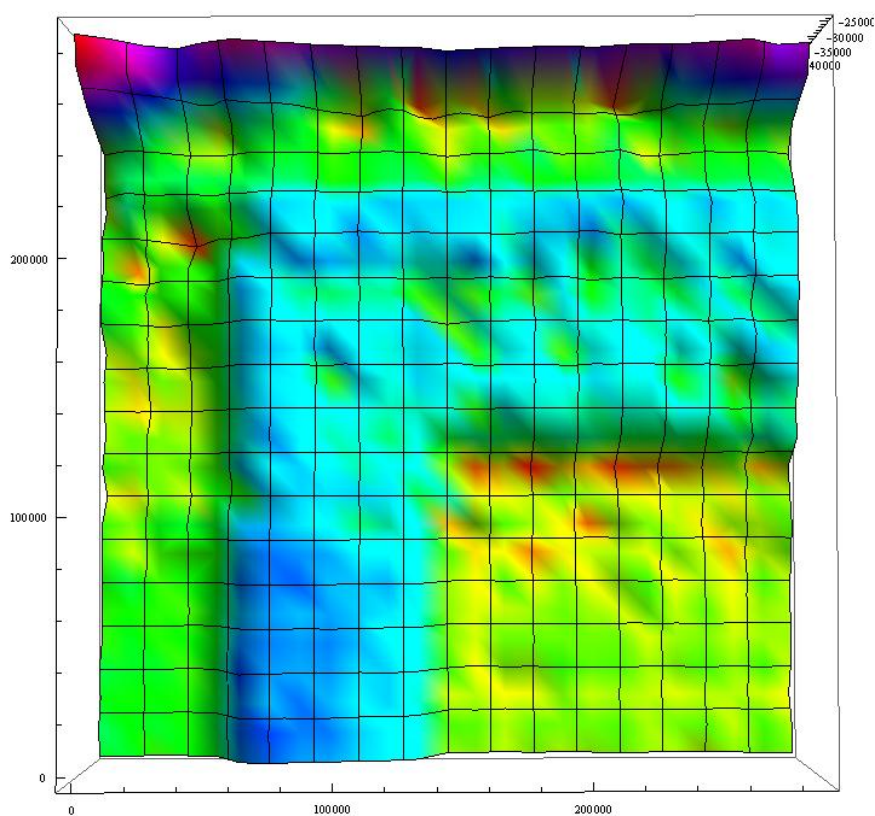
Vzhledem k výsledkům jsem se rozhodl zvolit menší krok rastru a přibližování a měření opakovat v obdobné oblasti.



Obrázek 22.: Mince 5 Kč se znázorněnou oblastí skenování [23]



Obrázek 23.: Vizualizace skenované oblasti mince 5 Kč – menší krok



Obrázek 24.: Vizualizace horního pohledu na skenovanou oblast – menší krok

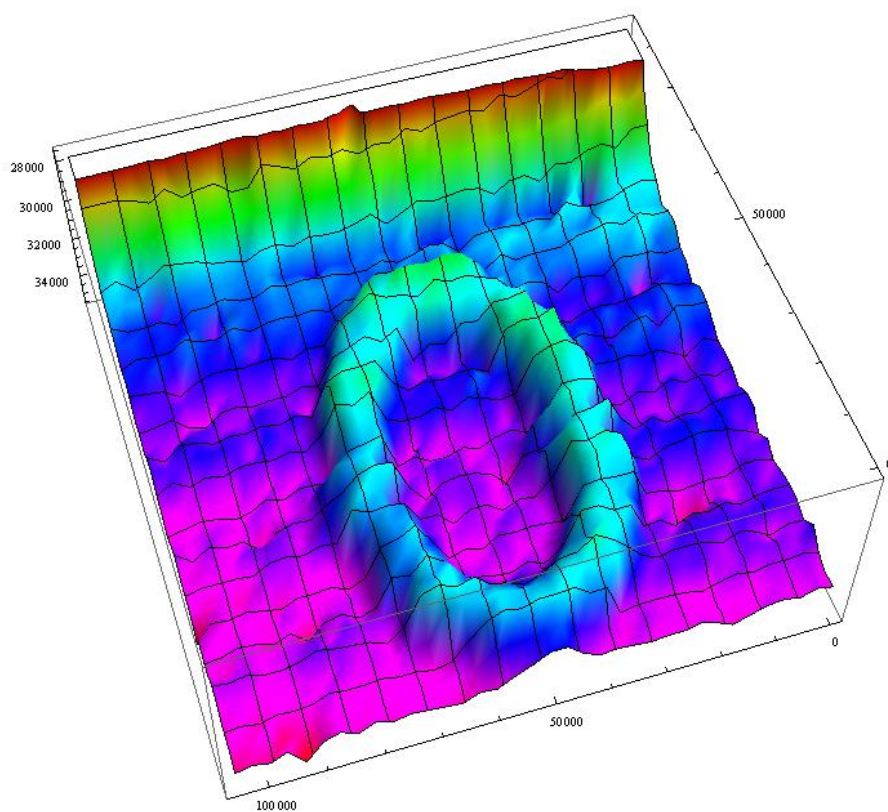
Velikost kroku rastru	12000 countů $\approx 240 \mu\text{m}$
Přibližovací krok	150 countů $\approx 3 \mu\text{m}$
Velikost rastru	25x25 bodů
Doba měření	20 hodin

Tabulka 2.: Parametry měření mince 5 Kč – menší krok přiblížení a rastru

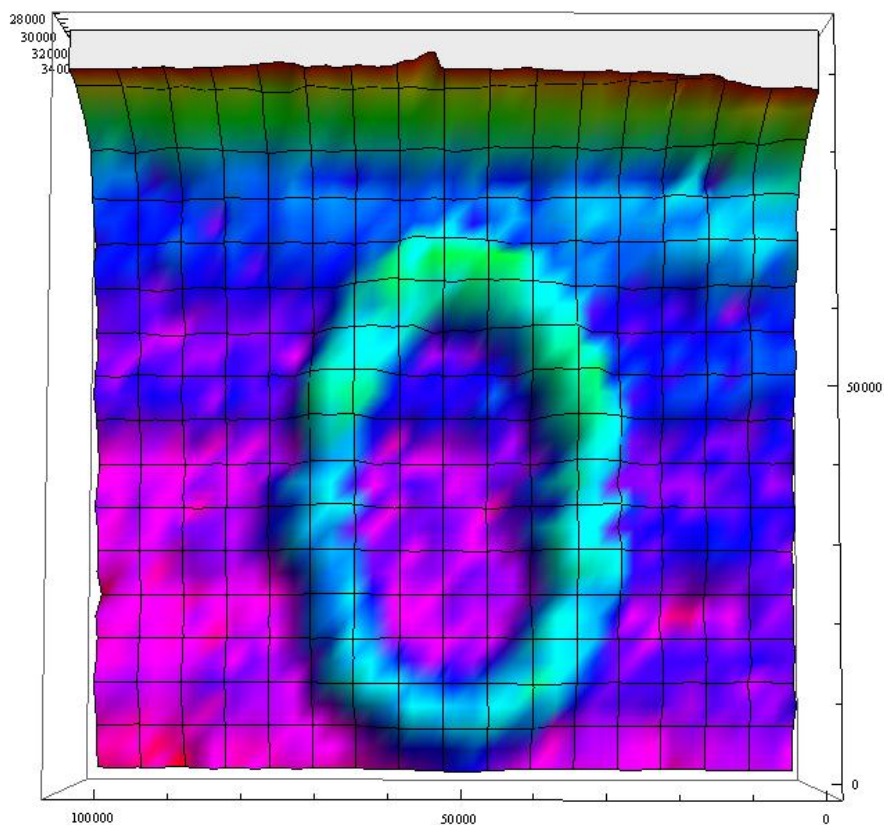
Vzhledem k tomu, že možnosti servomotorů M-110, co se přesnosti polohování týče, nebyly využity ani zdaleka, byla zvolena jemnější strukturu ke skenování. Pro další měření byla vybrána mince 1 Kč.



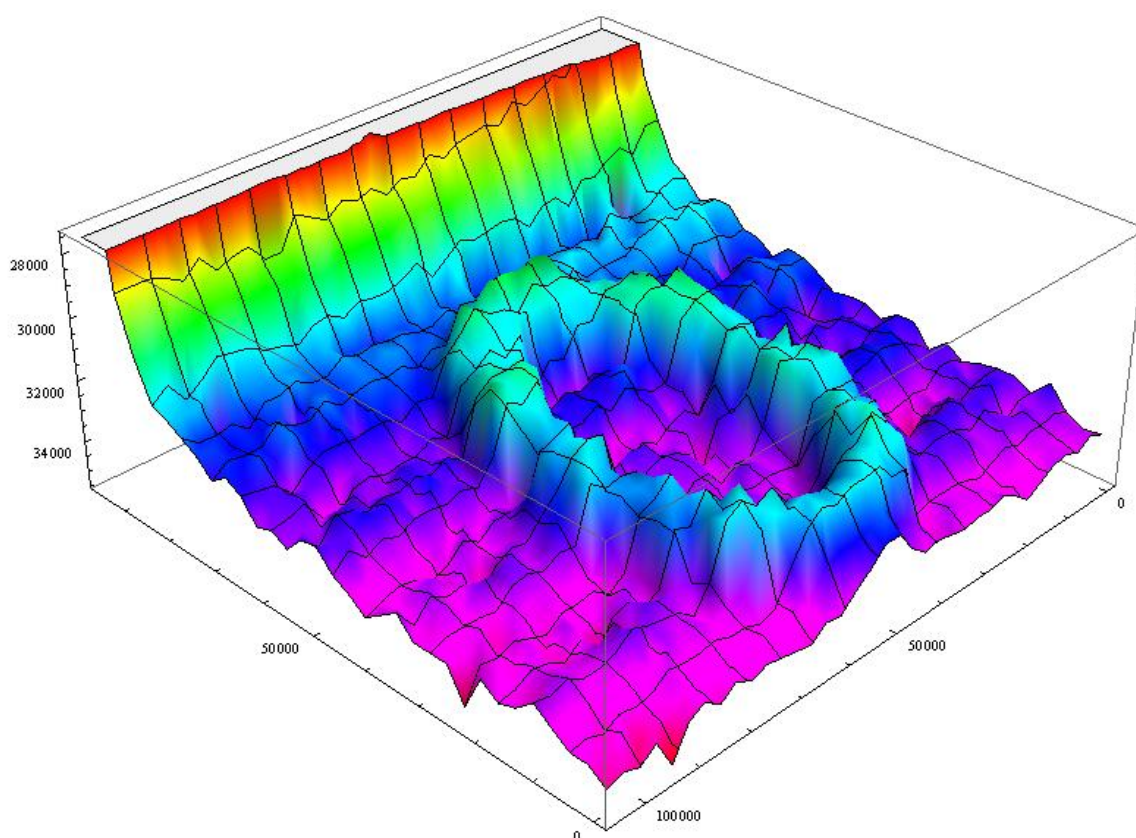
Obrázek 25.: Mince 1 Kč se znázorněnou skenovanou oblastí [23]



Obrázek 26.: Vizualizace skenované oblasti mince 1 Kč



Obrázek 27.: Vizualizace skenované oblasti mince 1 Kč – horní pohled



Obrázek 28.: Vizualizace skenované oblasti mince 1 Kč – boční pohled

Velikost kroku rastru	3000 countů $\approx 60 \mu\text{m}$
Přibližovací krok	100 countů $\approx 2 \mu\text{m}$
Velikost rastru	36x36 bodů
Doba měření	40 hodin

Tabulka 3.: Parametry měření mince 1 Kč kontaktní metodou

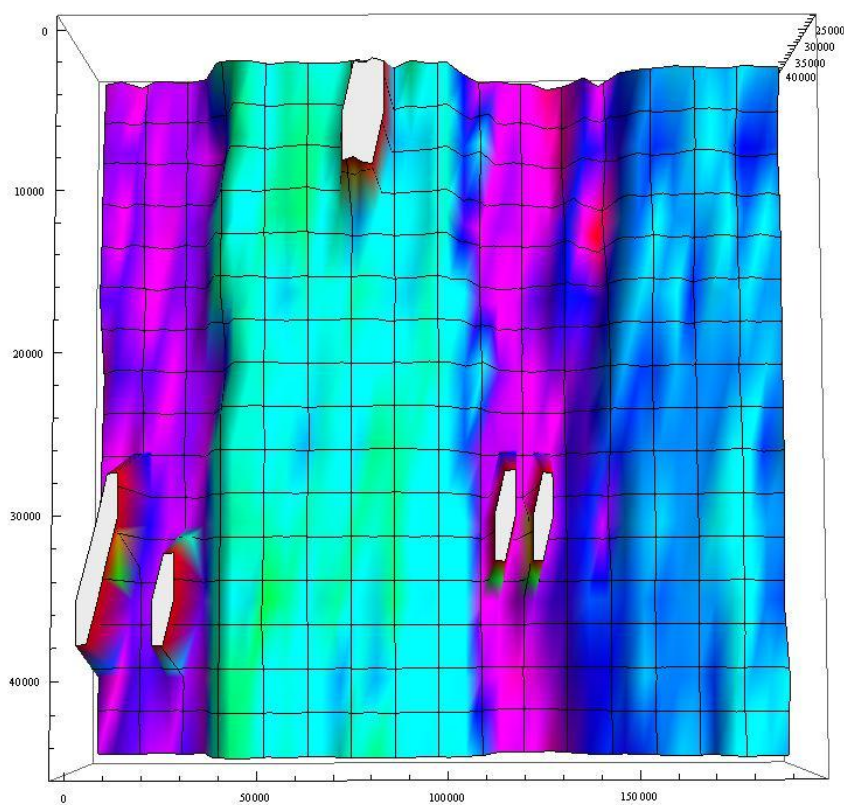
Výsledky při použití kontaktní metody jsou poměrně přesné. Dále by šel zmenšovat krok rastru, přibližovací krok i velikost rastru, čímž by se měření ještě zpřesnilo, ovšem doba měření by se úměrně prodloužila.

7.2 Výsledky piezoelektrické metody

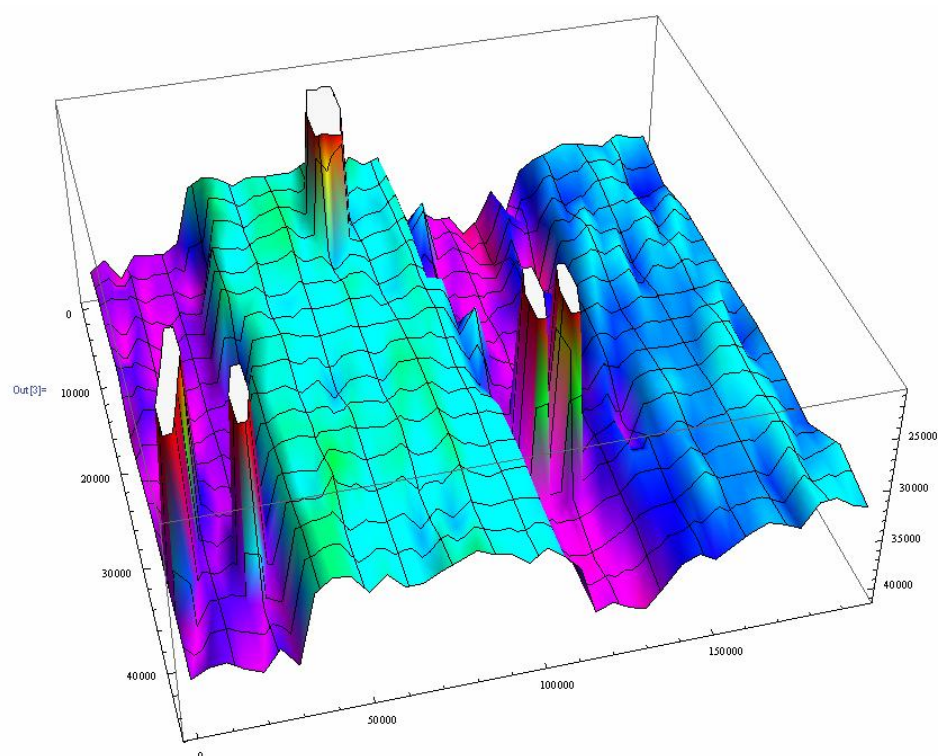
Pro měření piezoelektrickou metodou byla vybrána jako vzorek mince 5 Kč z důvodu srovnání obou metod.



Obrázek 29.: Mince 5 Kč se znázorněnou oblastí skenování [23]

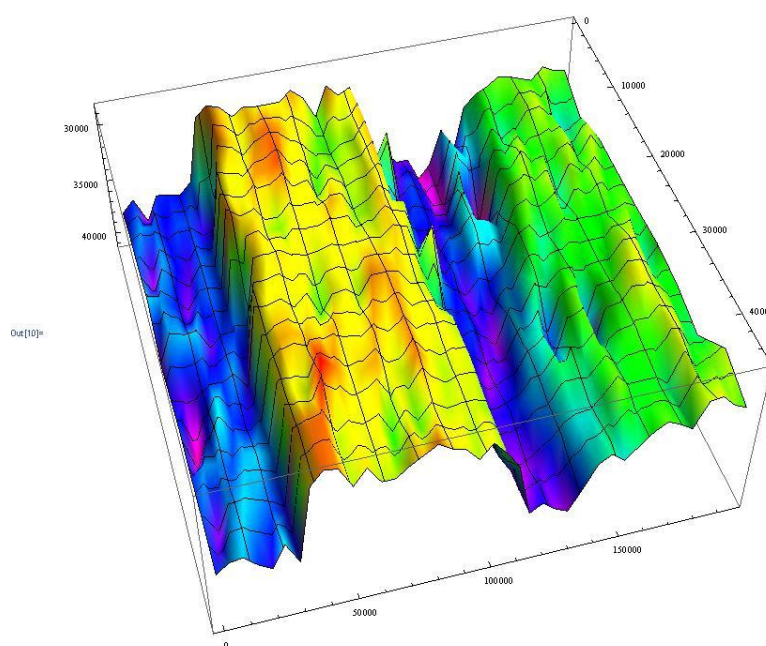


Obrázek 30.: Vizualizace skenované oblasti piezoelektrickou metodou



Obrázek 31.: Vizualizace skenované oblasti piezoelektrickou metodou – artefakty měření

Jak je z obrázků 30 a 31 patrné, během měření se vyskytlo několik artefaktů měření z neznámého důvodu. Tyto artefakty jsem odstranil vymazáním těchto bodů z grafu (obrázek 32). Tyto body měly souřadnici v ose Z rovnou nule.



Obrázek 32.: Vizualizace oblasti po odstranění fragmentů měření

Důvod vzniku těchto artefaktů je neznámý, objevovaly se i během ostatních měření. Při opakování stejného měření za stejných laboratorních podmínek se artefakty objevovali na různých místech rastru, nebo se neobjevovali vůbec. Z toho vyplývá, že důvodem vzniku těchto fragmentů je nějaká veličina proměnná v čase, jenž působí na celou měřicí soustavu.

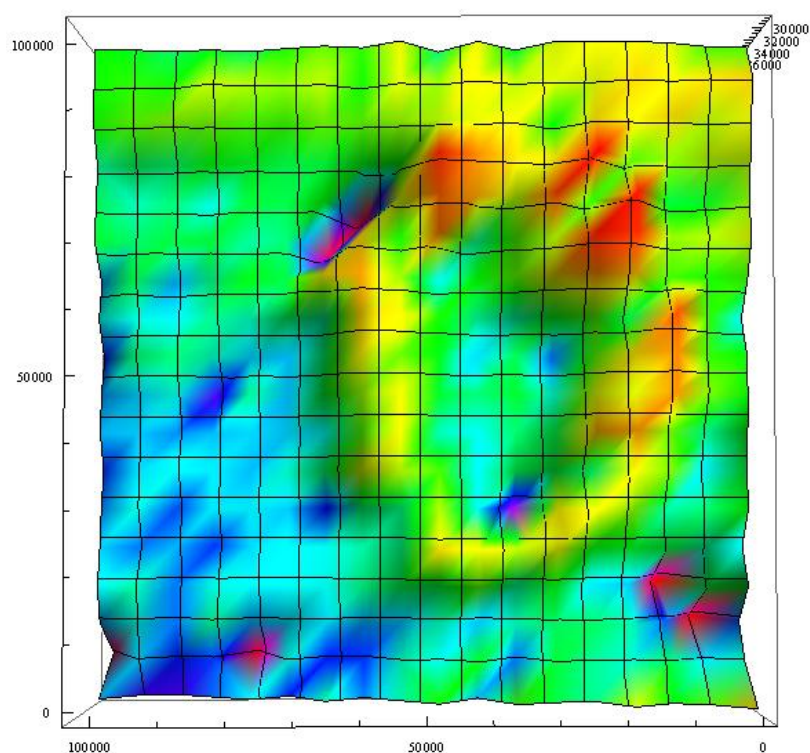
Velikost kroku rastru	7000 countů $\approx 140 \mu\text{m}$
Přibližovací krok	100 countů $\approx 2 \mu\text{m}$
Velikost rastru	17x17 bodů
Doba měření	10 hodin

Tabulka 4.: Parametry měření mince 5 Kč piezoelektrickou metodou

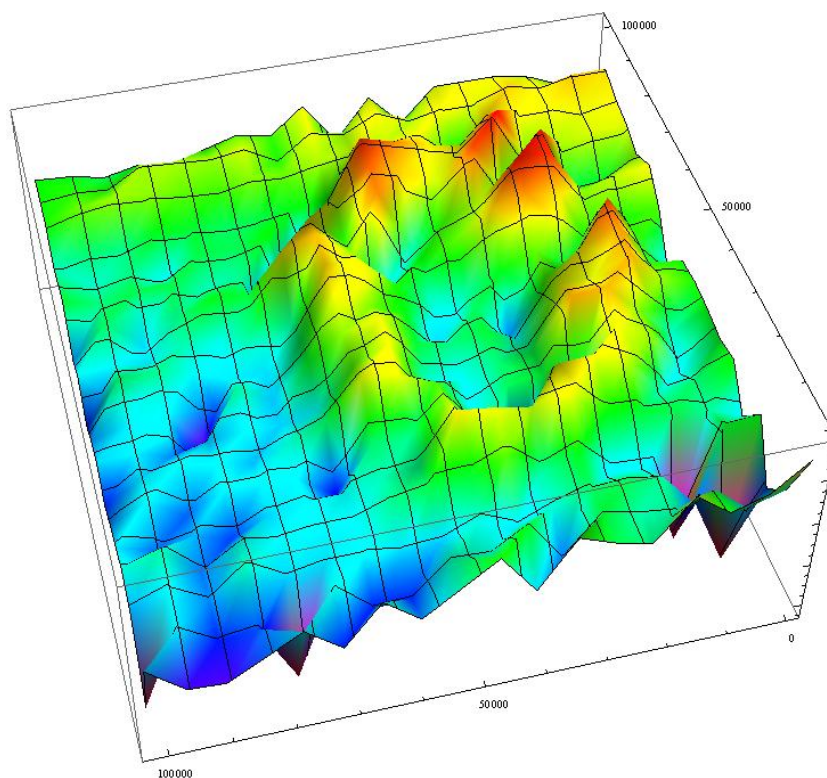
Při srovnání obou metod bylo doposud dosaženo obdobných výsledků při skenování stejné oblasti jako u metody kontaktní, proto byla vybrána jemnější strukturu na skenování. Opět mince 1 Kč.



Obrázek 33.: Mince 1 Kč se znázorněnou skenovanou oblastí [23]



Obrázek 34.: Vizualizace skenované oblasti mince 1 Kč – horní pohled



Obrázek 35.: Vizualizace skenované oblasti mince 1 Kč piezoelektrickou metodou

Velikost kroku rastru	7000 countů $\approx 140 \mu\text{m}$
Přibližovací krok	100 countů $\approx 2 \mu\text{m}$
Velikost rastru	17x17 bodů
Doba měření	10 hodin

Tabulka 5.: Parametry měření mince 1 Kč piezoelektrickou metodou

Při měření na minci 1 Kč pomocí piezoelektrické metody byly dosaženy nesrovnatelné výsledky oproti metodě kontaktní. Horší rozlišovací schopnost této metody je dána zejména nutností působení síly mezi skenovacím hrotem a vzorkem pro vyhodnocení kontaktu a stárí krystalové přenosky (obrázek 15). Druhé měření bylo limitem této metody, co se rozlišovací schopnosti týče. Na druhou stranu je plusem použití této metody i na dielektrické struktury. Při použití kvalitnější krystalové přenosky by se dalo dosáhnout lepších výsledků.

8 ZAMĚŘENÍ NA BEZPEČNOSTNÍ APLIKACE

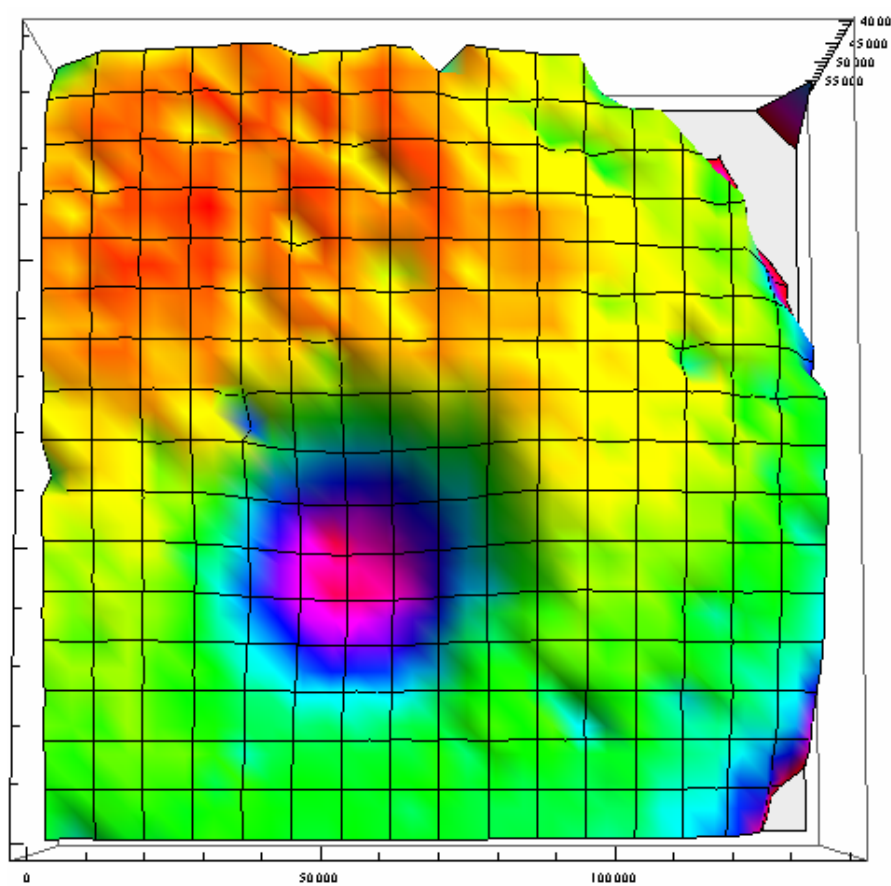
Veškeré prezentované metody mohou najít uplatnění v jakékoliv analyticko-bezpečnostní aplikaci. Příkladem může být kriminalistická balistická expertiza.

Kriminalistická balistika se zabývá mechanismem výstřelu, pohybem střely v hlavní zbraně, dráhou střely při letu na cíl a účinky střely v cíli. Objekty zkoumání kriminalistické balistiky jsou střelné zbraně, jejichž pomocí lze dopravit střelu na cíl. Druhou skupinu tvoří střelivo všech druhů a jeho jednotlivé části, především vystřelené střely a nábojnice. Třetí skupinu tvoří předměty zasažené střelou a povýstřelové zplodiny. Mezi základní otázky patří ztotožnění zbraně, kterou na místě události pachatel použil ke střelbě - individuální identifikace, založená na axiomu, že součástky zbraně, které jsou při výstřelu v kontaktu se střelou a nábojnicí, zanechávají na jejich povrchu markanty, které jsou jednoznačným odrazem mikronerovnosti kontaktovaného povrchu. [19]

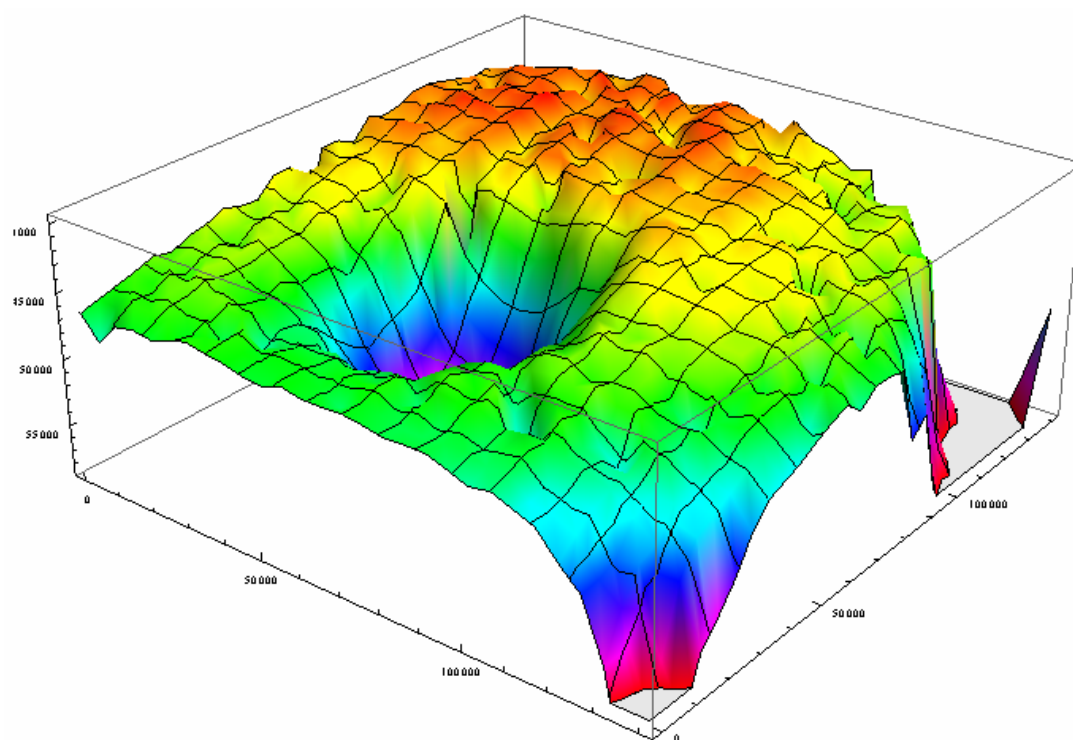
Pro názornou ukázkou bylo provedeno měření vystřelené nábojnice ráže 9x19 mm se středovým zápalem (vzor 48).



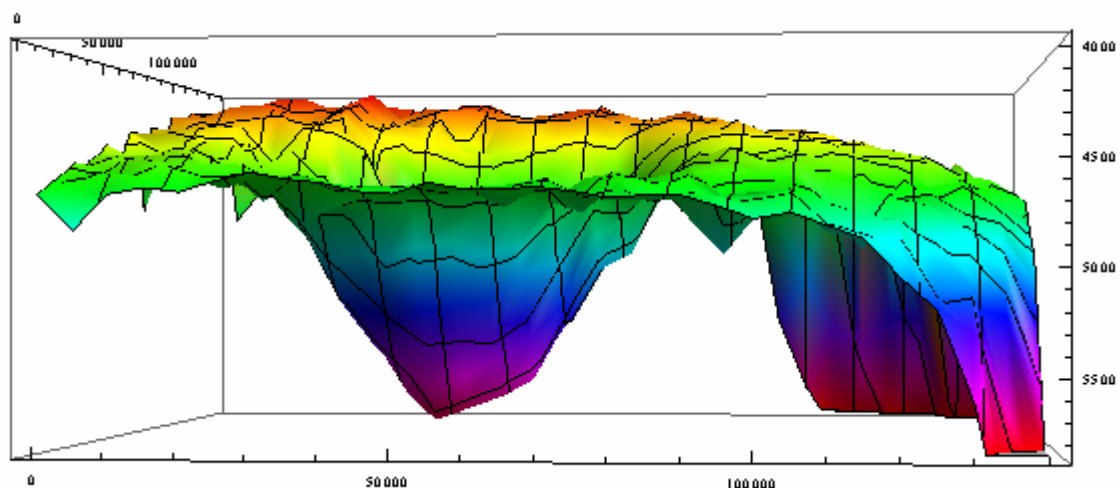
Obrázek 36.: Analyzovaná nábojnice 9x19 mm



Obrázek 37.: Nábojnice – horní pohled



Obrázek 38.: Nábojnice – šikmý pohled



Obrázek 39.: Nábojnice – profil

Velikost kroku rastru	5000 countů $\approx 100 \mu\text{m}$
Přibližovací krok	100 countů $\approx 2 \mu\text{m}$
Velikost rastru	30x30 bodů
Doba měření	25 hodin

Tabulka 6.: Parametry měření nábojnice kontaktní metodou

Nesmírnou výhodou této metody, oproti klasickému srovnávání optickým komparačním mikroskopem, je vytvoření matematického modelu nábojnice a možnost tyto modely mezi sebou navzájem softwarově srovnávat. Další výhodou je možnost zobrazení nábojnice v řezu pro lepší srovnání tvaru a hloubky deformace vytvořené úderníkem, čímž získáme další markanty potřebné k identifikaci zbraně.

ZÁVĚR

Tato práce prezentuje metody zobrazování morfologie povrchů a pokus o sestavení aparatury – skenovacího mikroskopu, jenž bude schopen pomocí měření na hrotu získávat data pro následnou vizualizaci těchto povrchů.

Veškeré měření proběhlo na Fakultě aplikované informatiky při Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně.

V praktické části byla představena měřicí aparatura, vybrané metody skenování, zjednodušený vývojový diagram programu sloužícího k řízení a sběru dat z měřicí aparatury a jeho popis a hlavně výsledky měření a jejich vizualizace. Také zde byla ukázána jedna z možností, kde by tento skenovací mikroskop našel uplatnění v bezpečnostně-analytickém zkoumání – balistická kriminalistická expertiza.

Vlastní měření bylo prováděno na českých mincích. První měření na pětikoruně sloužilo převážně k ověření možností kontaktní metody, správnosti programu na řízení a sběr dat a k optimalizaci celého chodu. Dále následovaly dvě další měření k zjištění rozlišovací schopnosti této metody.

Piezoelektrická metoda skenování probíhala obdobně jako metoda kontaktní, ovšem nebylo dosaženo tak přesných výsledků. Výhodou ovšem zůstala možnost použití této metody i na dielektrické struktury.

Poslední měření nábojnice ukázalo možnosti aplikace těchto metod v bezpečnostně-analytickém zkoumání. Výhodou této metody, oproti klasickému srovnávání optickým komparačním mikroskopem, je vytvoření matematického modelu nábojnice a možnost tyto modely mezi sebou navzájem softwarově srovnávat.

V této práci by se dalo pokračovat a najít lepší a přesnější metodu pro skenování dielektrických struktur nebo vyzkoušet další možné metody.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

This thesis presents methods of visualization of surface morphology and attempt at forming apparatus – scanning microscope, which will be able, by measuring on tip, to get data for visualization of these surfaces.

All measurements were made at Faculty of Applied informatics at Tomas Baťa University in Zlín.

The practical part introduced measuring apparatus, selected scanning methods, simplified flowchart of the program used to control and collect data from the measuring apparatus and especially measurement results and their visualization. There was also shown one of the options, where the scanning microscope could be used, in safety-analytic examination – forensic ballistics.

The measurement was carried out on the Czech coins. The first measurement on the five crown coin was used mainly to verify the possibility of contact method, the accuracy of program and optimize. Followed by two other measurements to identify distinctive capabilities of this method.

Piezoelectric scanning method proceeded similarly to the contact method, but there was not achieved such precise results. The advantage is the possibility of using this method on dielectric structures.

Last measurement on cartridges showed possible applications of these methods in safety-analytic examination. The advantage of this method compared with conventional optical comparative microscope is a creation of mathematical model of the cartridge and the possibility to compare using programs.

It is possible to continue in this thesis and find better and more accurate method for scanning dielectric structures or try other methods.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HAWKES, Peter W.; SPENCE, John C. H. *Science of Microscopy : Volume I*. 1st ed. New York : Springer, c2007, 747 s.
- [2] HAWKES, Peter W.; SPENCE, John C. H. *Science of Microscopy : Volume II*. 1st ed. New York : Springer, c2007, 751-1265 s.
- [3] *Laboratoř mikroskopie atomárních sil* [online]. 2003 [cit. 2011-02-08]. Jiné metody - srovnání s SPM. Dostupné z WWW: <<http://atmilab.upol.cz/vys/JineMet.html>>.
- [4] MALACHA, Libor, et al. *Mikroskopie skenující sondou* [online]. Olomouc : Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra experimentální fyziky, 2003 [cit. 2011-02-08]. Dostupné z WWW: <<http://atmilab.upol.cz/mss/index.html>>.
- [5] MIKŠ, Antonín. Zobrazovací metody v optické mikroskopii. In *Mikroskopické metody* [online]. Praha : České vysoké učení technické, Fakulta stavební, Katedra fyziky, c2008-2011 [cit. 2011-02-08]. Dostupné z WWW: <<http://www.mikroskop-mikroskopy.cz/mikroskopicke-metody/>>.
- [6] PLACHÝ, Radek. *Metody mikroskopie* [online]. Olomouc : Univerzita Palackého v Olomouci, Fakulta lékařská, Ústav lékařské biologie, 22.2.2004 [cit. 2011-02-08]. Dostupné z WWW: <<http://biologie.upol.cz/mikroskopie/>>.
- [7] *Theory and Simulation of SPM* [online]. 2010 [cit. 2011-02-08]. Dostupné z WWW: <<http://invsee.asu.edu/nmodules/spmmod/intro.html>>.
- [8] KUBÍNEK, Roman. *Rastrovací sondová mikroskopie* [online]. Olomouc : Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Katedra experimentální fyziky, 2000 [cit. 2011-02-08]. Dostupné z WWW: <<http://atmilab.upol.cz/texty.html>>.
- [9] KUDĚLKA, Josef; MARTÍNEK, Tomáš. *Studium a vytváření struktur v submikrometrové oblasti*. Studentská tvůrčí a odborná činnost. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky, 2010. s. 14.

- [10] User's Guide. Agilent Technologies. *Agilent 34401A 6½ Digit Multimeter* [online]. Seventh edition. Santa Clara, 2007 [cit. 2011-02-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.home.agilent.com/agilent/product.jsx?cc=CZ&lc=end&nid=-536902435.536880933&pageMode=PL>>.
- [11] Product Overview. Agilent Technologies. *Agilent 34401A Multimeter* [online]. 2007 [cit. 2011-02-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.home.agilent.com/agilent/product.jsx?cc=CZ&lc=end&nid=-536902435.536880933&pageMode=PL>>.
- [12] Service Guide. Agilent Technologies. *Agilent 34401A 6½ Digit Multimeter* [online]. Seventh edition. Santa Clara, 2007 [cit. 2011-02-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.home.agilent.com/agilent/product.jsx?cc=CZ&lc=end&nid=-536902435.536880933&pageMode=PL>>.
- [13] MS 74E User Manual. Physik Instrumente. *Mercury C-862 Networkable Single-Axis DC-Motor Controller*. Release 8.41. Karlsruhe, 2004
- [14] MS 41E User Manual. Physik Instrumente. *M-110, M-111, M-112 Micro Translation Stages*. Release 3.1.2. Karlsruhe, 2004
- [15] SEDLÁK, Bedřich; ŠTOLL, Ivan. *Elektřina a magnetismus*. Praha : ACADEMIA, 2002. 632 s. ISBN 80-200-1004-1.
- [16] HEINZ, Roman. *Návrh detekčního uzlu pro mikrovlnný mikroskop*. Zlín, 2005. 72 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáš Bati ve Zlíně, Fakulta technologická.
- [17] TROCHTA, Ondřej. *Zpracování signálu z mikrovlnného koaxiálního rezonátoru*. Zlín, 2005. 74 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáš Bati ve Zlíně, Fakulta technologická.
- [18] KUDĚLKA, Josef. *Metrologické zabezpečení mikronových a submikronových posuvů*. Zlín, 2011. 57 s. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky.
- [19] *Policie České republiky* [online]. c2010 [cit. 2011-04-10]. Kriminalistické identifikace - Policie České republiky. Dostupné z WWW: <<http://www.policie.cz/clanek/kriminalisticke-identifikace-618304.aspx?q=Y2hudW09NQ%3d%3d>>.

- [20] MEMS-based fast scanning probe microscopes. *Ultramicroscopy*. 2010, volume 110, s. 599-604.
- [21] Charge drives for scanning probe microscope positioning stages. *Ultramicroscopy*. 2008, volume 108, s. 1551-1557.
- [22] KUDĚLKA, Josef; MARTÍNEK, Tomáš. Skenovací mikroskopie. In *Sborník STOČ 2011*. Ostrava : Vysoká škola Báňská - Technické univerzita Ostrava, 2011. s. 19.
- [23] International Catalog of World Coins [online]. c2011 [cit. 2011-05-16]. Dostupné z WWW: <<http://en.ucoin.net/>>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

SPM	Scanning probe microscopy
STM	Scanning tunneling microscopy
AFM	Atomic force microscopy
MFM	Magnetic force microscopy
LFM	Lateral force microscopy
FMM	Force modulation microscopy
PDM	Phase detection microscopy
EFM	Electrostatic force microscopy
SCM	Scanning capacitance microscopy
SThM	Scanning thermal microscopy
NFSOM	Near field scanning optical microscopy
EM	Electron microscopy
TEM	Transmission electron microscopy
HRTEM	High-resolution transmission electron microscopy
SEM	Scanning electron microscopy
STEM	Scanning transmission electron microscopy
EEM	Environmental electron microscopy
DMM	Digitální multimetr
AT	Agilent Technologies
HDD	Hard disk drive
SW	Software
PI	Physik Instrumente
GPIO	General purpose interface bus
CNC	Computer numeric control

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1.: Obecné schéma Mikroskopu se skenující sondou [4]</i>	13
<i>Obrázek 2.: Rozložení průtoku proudu [7]</i>	15
<i>Obrázek 3.: Příklad skenovacího hrotu [7]</i>	15
<i>Obrázek 4.: Působení přitažlivé a odpuzivé síly v závislosti na vzdálenosti vzorku a hrotu [7]</i>	16
<i>Obrázek 5.: Princip metody AFM [7]</i>	17
<i>Obrázek 6.: Magnetické síly působící na hrot [8]</i>	18
<i>Obrázek 7.: Znázornění příčin vzniku laterální síly [8]</i>	19
<i>Obrázek 8.: Vlevo je krystal elektricky neutrální, vpravo je znázorněna polarizace způsobená deformační silou</i>	22
<i>Obrázek 9.: Mercury M-110 1DG ve srovnání s 9 V baterií [9]</i>	24
<i>Obrázek 10.: Mercury C-862 ve srovnání s mincemi 1\$ a 1€ [13]</i>	25
<i>Obrázek 11.: Přední panel DMM HP 34401A [11]</i>	25
<i>Obrázek 12.: Schéma zapojení</i>	27
<i>Obrázek 13.: Schéma měření na hrotu</i>	28
<i>Obrázek 14.: Měření napětí generované piezokrystalem</i>	29
<i>Obrázek 15.: Krystalová přenoska</i>	29
<i>Obrázek 16.: Měření proudu indukovaného na cívice</i>	30
<i>Obrázek 17.: Rychlostní přenoska</i>	30
<i>Obrázek 18.: Zjednodušený vývojový diagram</i>	31
<i>Obrázek 19.: Mince 5 Kč se znázorněnou skenovanou oblastí [23]</i>	33
<i>Obrázek 20.: Vizualizace skenované oblasti mince 5 Kč dle výšky vzorku</i>	34
<i>Obrázek 21.: Vizualizace skenované oblasti dle výšky vzorku – horní pohled</i>	34
<i>Obrázek 22.: Mince 5 Kč se znázorněnou oblastí skenování [23]</i>	35
<i>Obrázek 23.: Vizualizace skenované oblasti mince 5 Kč – menší krok</i>	36
<i>Obrázek 24.: Vizualizace horního pohledu na skenovanou oblast – menší krok</i>	36
<i>Obrázek 25.: Mince 1 Kč se znázorněnou skenovanou oblastí [23]</i>	37
<i>Obrázek 26.: Vizualizace skenované oblasti mince 1 Kč</i>	38
<i>Obrázek 27.: Vizualizace skenované oblasti mince 1 Kč – horní pohled</i>	38
<i>Obrázek 28.: Vizualizace skenované oblasti mince 1 Kč – boční pohled</i>	39
<i>Obrázek 29.: Mince 5 Kč se znázorněnou oblastí skenování [23]</i>	40

<i>Obrázek 30.: Vizualizace skenované oblasti piezoelektrickou metodou</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 31.: Vizualizace skenované oblasti piezoelektrickou metodou – artefakty měření</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 32.: Vizualizace oblasti po odstranění fragmentů měření</i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 33.: Mince 1 Kč se znázorněnou skenovanou oblastí [23]</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 34.: Vizualizace skenované oblasti mince 1 Kč – horní pohled</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 35.: Vizualizace skenované oblasti mince 1 Kč piezoelektrickou metodou</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 36.: Analyzovaná nábojnice 9x19 mm</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 37.: Nábojnice – horní pohled</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 38.: Nábojnice – šikmý pohled</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 39.: Nábojnice – profil</i>	<i>47</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1.: Parametry měření mince 5 Kč kontaktní metodou</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 2.: Parametry měření mince 5 Kč – menší krok přiblížení a rastru</i>	<i>37</i>
<i>Tabulka 3.: Parametry měření mince 1 Kč kontaktní metodou</i>	<i>39</i>
<i>Tabulka 4.: Parametry měření mince 5 Kč piezoelektrickou metodou</i>	<i>42</i>
<i>Tabulka 5.: Parametry měření mince 1 Kč piezoelektrickou metodou</i>	<i>44</i>
<i>Tabulka 6.: Parametry měření nábojnice kontaktní metodou</i>	<i>47</i>

SEZNAM PŘÍLOH

Programy:

openCOM.m

merak.m

vychozipozice.m

mereninapeti.m

kontakt.m

kontaktcyklus.m

mince.m

prenoskacyklus.m

rychlostniprenoskakontakt.m

rychlostniprenoskacyklus.m