VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

MODERNIZACE UHV MANIPULÁTORU PRO METODY SIMS A LEIS

UPGRADE OF THE MANIPULATOR FOR SIMS AND LEIS METHODS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE TOMÁŠ DAO
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. PETR BÁBOR, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav fyzikálního inženýrství
Akademický rok: 2011/12

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Tomáš Dao

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Fyzikální inženýrství a nanotechnologie (3901R043)**

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:

Modernizace UHV manipulátoru pro metody SIMS a LEIS

v anglickém jazyce:

Upgrade of the UHV manipulator for SIMS and LEIS methods

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na Ústavu fyzikálního inženýrství je provozována ultravakuová (UHV) aparatura umožňující prvkovou analýzu pomocí hmotnostní spektroskopie sekundárních iontů (SIMS) a pomocí nízkoenergiového rozptylu iontů (LEIS). Tato aparatura je vybavena zastaralým manipulátorem vzorků se čtyřmi stupni volnosti. Cílem práce je nahradit tento manipulátor novým se šesti stupni volnosti, z nichž jeden bude realizován pomocí UHV krokového motorku řízeného počítačem. Práce navazuje na stávající konstrukční návrh manipulátoru, který bude řešitelem realizován jako prototyp a následně na základě zkušeností s prototypem budou navrhnuta a realizována jeho konstrukční zdokonalení. Funkce manipulátoru bude ověřena při strukturní analýze metodou LEIS a při hloubkovém profilování metodou SIMS.

Cíle bakalářské práce:

1. Realizujte stávající konstrukční návrh manipulátoru se šesti stupni volnosti.
2. Navrhněte a realizujte konstrukční zdokonalení tohoto manipulátoru vyplývající z jeho provozu.
3. Vypracujete provozní manuál manipulátoru včetně fotodokumentace a umístěte ho na webové stránky Wiki Ústavu fyzikálního inženýrství v české i anglické mutaci.
4. Ověřte funkčnost tohoto manipulátoru při analýze metodami SIMS a LEIS.

Seznam odborné literatury:

[1] L. Frank a J. Král: Metody analýzy povrchů: iontové, sondové a speciální techniky, Academia 2002.
[2] A. Beninghoven: Secondary ion mass spectrometry – basics concepts, instrumental aspects, applications and trends, John Wiley & Sons, NY, volume 86, 1987.
[3] R. G. Wilson, F. A. Stevie, and C. W. Magee: Secondary Ion Mass Spectrometry – a practical handbook for depth profiling and bulk analysis, John Wiley, 1989.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Bábor, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 24.11.2011

L.S.

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ DĚKANÁT

prof. RNDr. Tomáš Šikola, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

Abstrakt

Tato bakalářská práce pojednává o konstrukci manipulátoru pracujícího v podmínkách ultravysokého vakua. První část práce je věnována původnímu návrhu manipulátoru se šesti stupni volnosti, jeho provedení a realizaci. Druhá část se zabývá úpravami manipulátoru. Diskutovány jsou výhody a nevýhody konstrukčních řešení a na základě provozu jsou navrženy úpravy manipulátoru a příslušenství. Hlavní pozornost je věnována návrhu řešení rotace vzorku pomocí krokového motorku pracujícího přímo v ultravysokém vakuu. V rámci úprav je také navržena a testována nová Faradayova sonda pro použití na manipulátoru.

V poslední části je s využitím manipulátoru provedena strukturní analýza metodou LEIS ověřující funkčnost a spolehlivost komponent manipulátoru.

Klíčová slova

UHV manipulátor, SIMS, LEIS, strukturní analýza, azimutální rotace, Faradayova sonda, třecí kontakty.

Summary

This bachelor's thesis deals with the design and the construction of the manipulator, which operates under ultra high vacuum. In the first section, the original design and realization of the manipulator with six motion axis is introduced. Second section deals with the modifications of the manipulator. Advantages and disadvantages of the design are discussed and a new design of the manipulator, based on the experience from manipulator operation, is projected. Section is mainly focused on the design of the sample rotation using a stepper motor working in the ultra high vacuum. The new Faraday cup was also designed and tested.

The last section contains the LEIS structural analysis measurement using the manipulator.

Key words

UHV manipulator, SIMS, LEIS, structural analysis, azimuthal rotation, Faraday cup, frictional contacts.

Bibliografická citace

DAO, T. *Modernizace UHV manipulátoru pro metody SIMS a LEIS*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 33 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Bábor, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pouze za odborného vedení Ing. Petra Bábora, Ph.D. a veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Brně dne 25. května 2012 .....

Poděkování

Děkuji Ing. Petru Báborovi, Ph.D. za čas, který mi věnoval při konzultacích, a za rady, jimiž mi pomáhal při tvorbě práce. Děkuji také své rodině za podporu během celého studia.

Obsah

Úvod **3**

1. Realizace stávajícího návrhu manipulátoru 5

1.1. Představení původního návrhu 5

1.2. Sestavení manipulátoru dle původního návrhu 7

2. Konstrukční úpravy a nový návrh manipulátoru 11

2.1. Provoz stávajícího manipulátoru 11

2.2. Úpravy stávajícího manipulátoru. 13

2.3. Nový návrh Faradayovy sondy 14

2.4. Nový návrh manipulátoru. 19

3. Využití metody LEIS ke strukturní analýze 23

3.1. Interakce mezi iontem a atomem terče 23

3.2. Jevy zvyšující citlivost metody LEIS 24

3.3. Strukturní analýza Si(111) metodou LEIS 25

Závěr **29**

Literatura **31**

Seznam příloh **33**

Úvod

Moderní způsoby zkoumání tenkých vrstev, jakými jsou například metody SIMS a LEIS, vyžadují práci v ultravysokém vakuu. To je vytvářeno ve vakuových komorách, uvnitř kterých se na vzorcích provádí konkrétní měření. Se vzorkem je nutné manipulovat podle potřeby, k čemuž slouží různé manipulátory připojené ke komorám.

V laboratoři Ústavu fyzikálního inženýrství je vakuová aparatura pro metody SIMS a LEIS, která byla vybavena zastaralým typem manipulátoru. Ten byl nahrazen novým manipulátorem s více stupni volnosti, který byl navrhnut s využitím krokového motorku pro práci v UHV (z anglického *Ultra High Vacuum* – ultravysoké vakuum). Realizaci původního návrhu manipulátoru je věnována první část této práce.

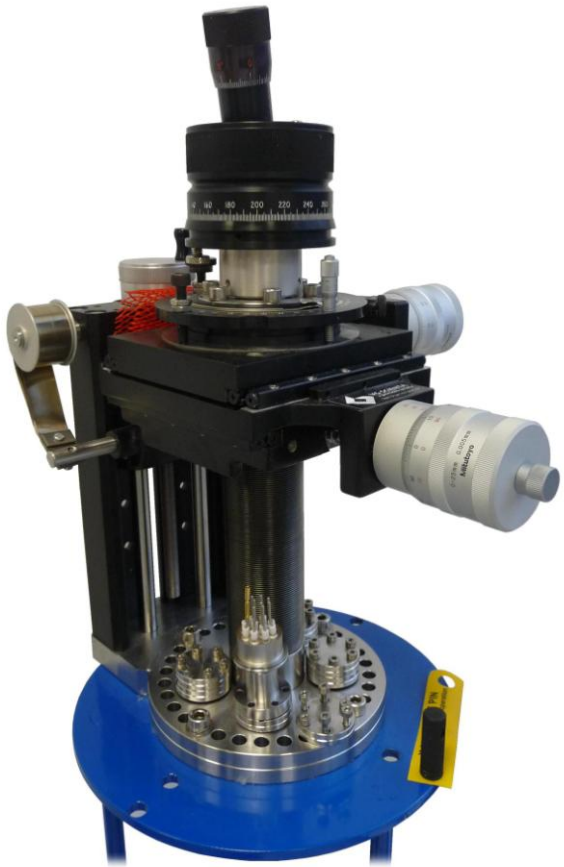
Po zavedení manipulátoru do provozu vznikla celá řada problémů, jež bylo nutné vyřešit. Práce s manipulátorem také odhalila různé konstrukční nedostatky, které byly z větší části odstraněny. Návrhům vylepšení stávajícího manipulátoru se věnuje druhá část této práce.

Třetí část práce se zabývá vlastním využitím manipulátoru k analýze vzorku metodou LEIS. V praxi se tak lze přesvědčit o funkčnosti manipulátoru a o tom, zda měla konstrukční zdokonalení na měření pozitivní vliv.

1. Realizace stávajícího návrhu manipulátoru

1.1. Představení původního návrhu

Stávající návrh využívá jako základ manipulátor od firmy VG SCIENTA. Jde o manipulátor zobrazený na obr. 1.1, který umožňuje manuálně ovládat posun v osách *x*, *y* a *z* a rotaci v horizontální rovině *xy*.



Obr. 1.1 Manipulátor od firmy VG SCIENTA disponující čtyřmi stupni volnosti.

Manipulátor zasahuje dovnitř do komory tyčí vedenou uvnitř vlnovce skrz otvor v přírubě, kterou je manipulátor připojen ke komoře. Podle návrhu by měl být konec tyče vybaven držákem paletek na vzorky a krokovým motorkem určeným pro práci v ultravysokém vakuu. Motorek by zajišťoval rotaci paletky ve svislé rovině a doplnil by tak chybějící dva stupně volnosti manipulátoru. Původní návrh byl proveden na základě následujících požadavků převzatých z [1]:

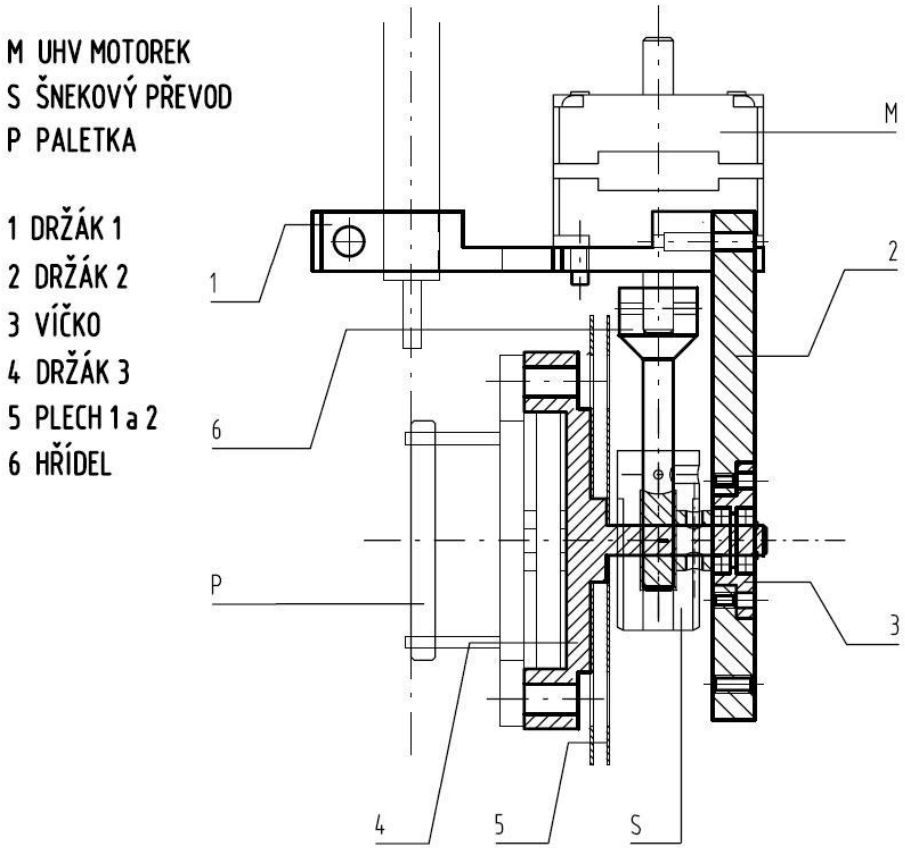
- Rozměry manipulátoru musí být vzhledem k omezenému prostoru uvnitř komory zvoleny tak, aby byla zajištěna pohodlná a přesná manipulace paletky se vzorkem. Manipulátor nesmí zasahovat víc jak 60 mm od svislé osy UHV komory.

- Návrh nového UHV manipulátoru musí počítat s využitím precizního krokového UHV motorku firmy Arun Microelectronic Ltd. Tento motorek je navrhnut pro práci v UHV prostředí za teplot v rozsahu -196° C až 175°C. Jeden krok motorku představuje rotaci o úhel 1,8° s přesností 5 %.

- Návrh nového UHV manipulátoru musí počítat s využitím šnekového převodu od firmy Arun Microelectronic Ltd., který díky převodu 1:18 zpřesňuje rotaci paletky se vzorkem na desetiny stupně.

- Manipulátor musí být plně kompatibilní s používaným systémem paletek.

Navržené původní schéma držáku splňující zmíněné požadavky je na obr. 1.2.



Obr. 1.2 Schéma původního návrhu držáku s krokovým motorkem. Převzato z [1].

Výkresová dokumentace jednotlivých dílů návrhu držáku z obr. 1.2 je součástí práce [1]. Díly byly vyrobeny ještě před započetím této práce a stejně tak už byl k dispozici krokový motorek a šroubový převod zmiňovaný výše.

1.2. Sestavení manipulátoru dle původního návrhu

Podle schématu (viz obr. 1.2) bylo potřeba sestavit jednotlivé díly manipulátoru dohromady. Nejprve však byly veškeré díly patřičným způsobem vyčištěny, aby mohly být použity v ultravysokém vakuu.

Jako první byl sestaven nosný rám, tj. díly na pozicích 1 a 2 obrázku 1.2. Díly byly spojeny vyčištěnými šrouby z korozivzdorné oceli a sestavený rám se opatřil krokovým motorkem a uchytil se k tyči manipulátoru pomocí prodlužovacího členu (viz obr. 1.3).

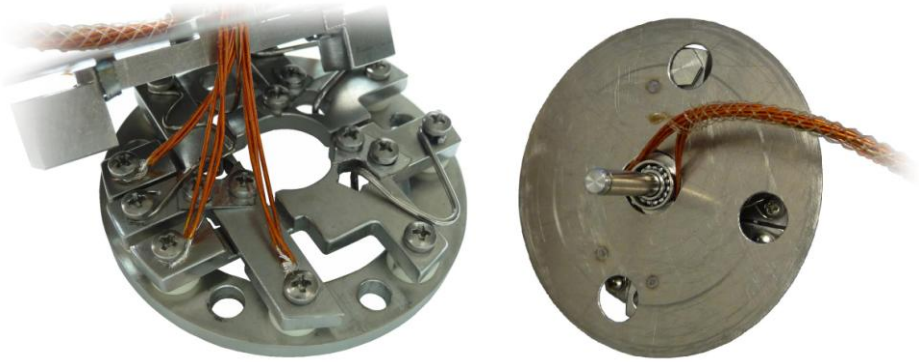
Obr. 1.3 Sestavený nosný rám držáku vybavený krokovým motorkem.

Držák paletky (přichycený k součásti na pozici 4 obrázku 1.2) je vybaven úchyty, které po vložení paletky slouží zároveň jako vodiče, jimiž je na paletku přivedeno napětí. Elektrický proud pak může procházet vzorkem a ten lze tímto způsobem ohřívat. Kvůli rotaci paletky bylo třeba vyřešit přivedení vodičů k držáku paletky. Původní návrh počítal s tím, že kabely budou namotány několika smyčkami mezi plechové přepážky (viz obr. 1.2, pozice 5) a motorek bude pracovat jen v rozsahu jedné otáčky, aby nedošlo k přílišnému utažení kabelu nebo naopak k jeho rozmotání mimo plechové přepážky.

Jako kabel pro ohřev vzorku byl zvolen speciální vakuově kompatibilní kabel složený z devíti drátů izolovaných kaptonovým obalem. Všechny dráty byly opleteny plastovou síťkou, která je držela pohromadě a vytvářela z nich jeden silný kabel. Do síťky byly k ostatním drátů navíc dodatečně vpleteny dva vodiče ze slitin chromel a alumel, díky nimž je přesně měřena teplota vzorku termočlánkem.

Protože proud ohřívající vzorek je poměrně vysoký, vytvořily se z devíti vodičů tři trojice, které se na konci zbavily izolace a spojily dohromady. Takovéto trojité vodiče měly být dostatečné pro přenos proudu, jaký se pro ohřev vzorku užívá. Kabel se pak provlekl otvorem v plechové přepážce a každá ze tří spojených trojic vodičů byla

připojena k jednomu úchytu paletky pomocí smyčky pod hlavou šroubu. Výsledné provedení připojení je patrné na obr. 1.4.

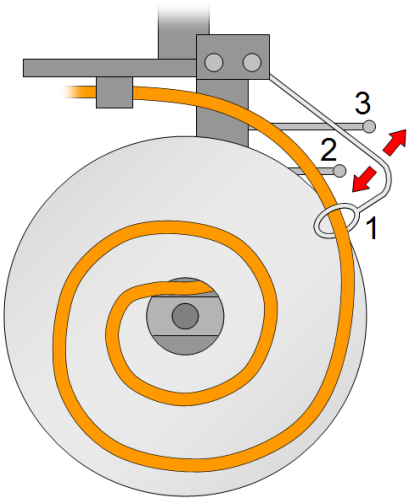


Obr. 1.4 Přivedení vodičů pro ohřev vzorku na paletce.

Obr. 1.4 však neznázorňuje dodatečnou úpravu vedení kabelu mezi plechovými přepážkami, která byla provedena až po pořízení fotografie na obr. 1.4. K jedné přepážce u hřídele (viz obr. 1.4 vpravo) byl bodovým svarem připojen ještě malý plechový úchyt. Ten měl sloužit k fixaci kabelu v blízkosti ostrých hran otvoru v přepážce, neboť se ukázalo, že při navíjení a odvíjení kabelu by třením o tyto hrany mohlo dojít k porušení kaptonové izolace a následnému zkratu.

Po přidání druhé plechové přepážky a nasunutí ozubeného kola, které bylo součástí šnekového převodu (viz obr. 1.2), se celek připojil k nosnému rámu (viz obr. 1.3) a konec osy byl zarážkou zajištěn proti axiálnímu posunu.

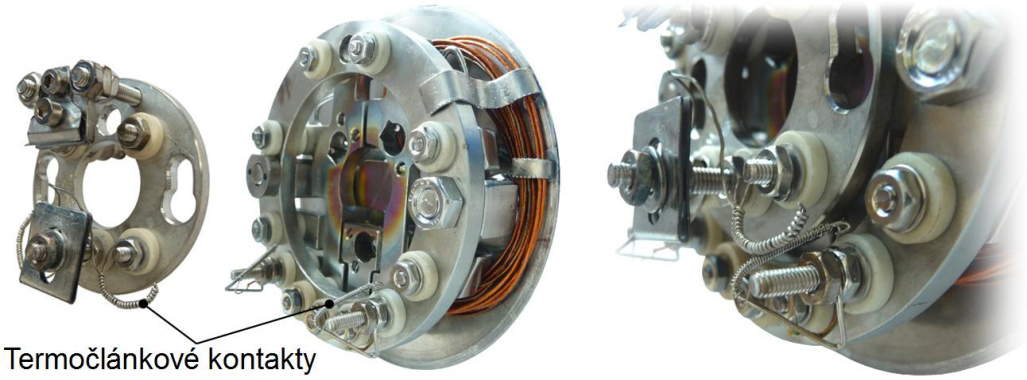
Posledním krokem bylo připravit manipulátor k provozu, což zahrnovalo několik úkonů, předně však zajistit, aby rotace motorku byla v rozmezí jedné otáčky. To bylo vyřešeno přidáním dvou elektrod na rám manipulátoru, mezi nimiž vedl pohyblivý kontakt připojený koncovou smyčkou ke kabelu zmiňovanému výše (viz pozice 1 na obr. 1.5).



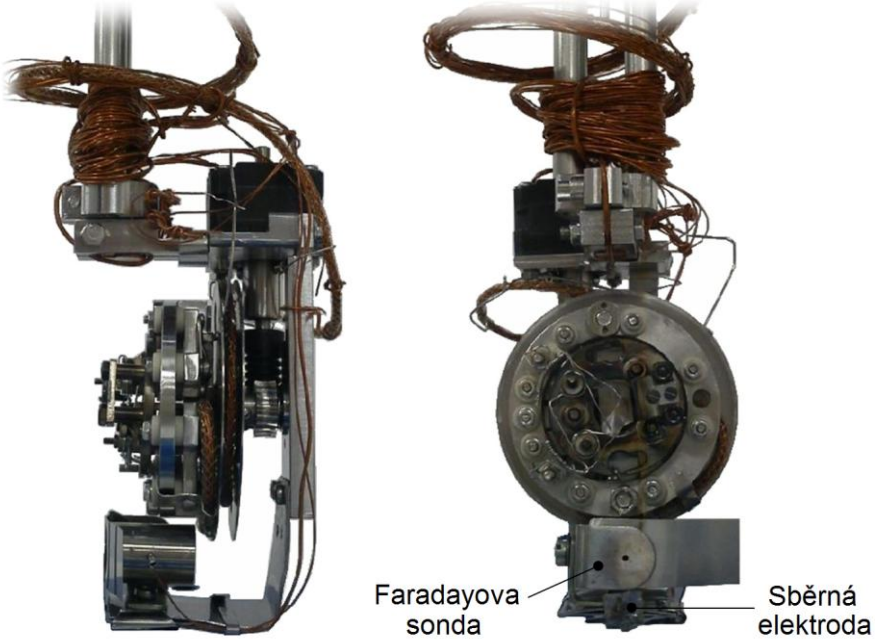
Obr. 1.5 Schéma provedení zarážek pro omezení rozsahu rotace vzorku.

Při rotaci manipulátoru docházelo k odmotávání nebo namotávání kabelu na hřídel mezi přepážky a tím také k pohybu kontaktu. Jakmile se kabel dostatečně odmotal a kontakt se dotkl vnější elektrody (obr. 1.5, pozice 3), řídící jednotka motorku zastavila rotaci. Podobným způsobem došlo k zastavení po utažení vodiče při rotaci opačným směrem.

Pro měření teploty termočlánkem byl držák paletek na manipulátoru vybaven termočlánkovými kontakty. Kvůli malé pružnosti termočlánkových slitin byly kontakty vyztuženy ocelovým drátem, na který byly hustě navinuty příslušné vodiče termočlánku. Stejným způsobem byla kontakty vybavena paletka pro vzorky tak, aby se po vložení paletky do držáku kontakty spojily. Provedení je na obrázku 1.6.



Obr. 1.6 Řešení termočlánkových kontaktů na paletce a držáku pro měření teploty vzorku termočlánkem. Vpravo je detail spojení kontaktů po vložení paletky do držáku.



Obr. 1.7 Dokončené sestavení manipulátoru vybavené Faradayovou sondou.

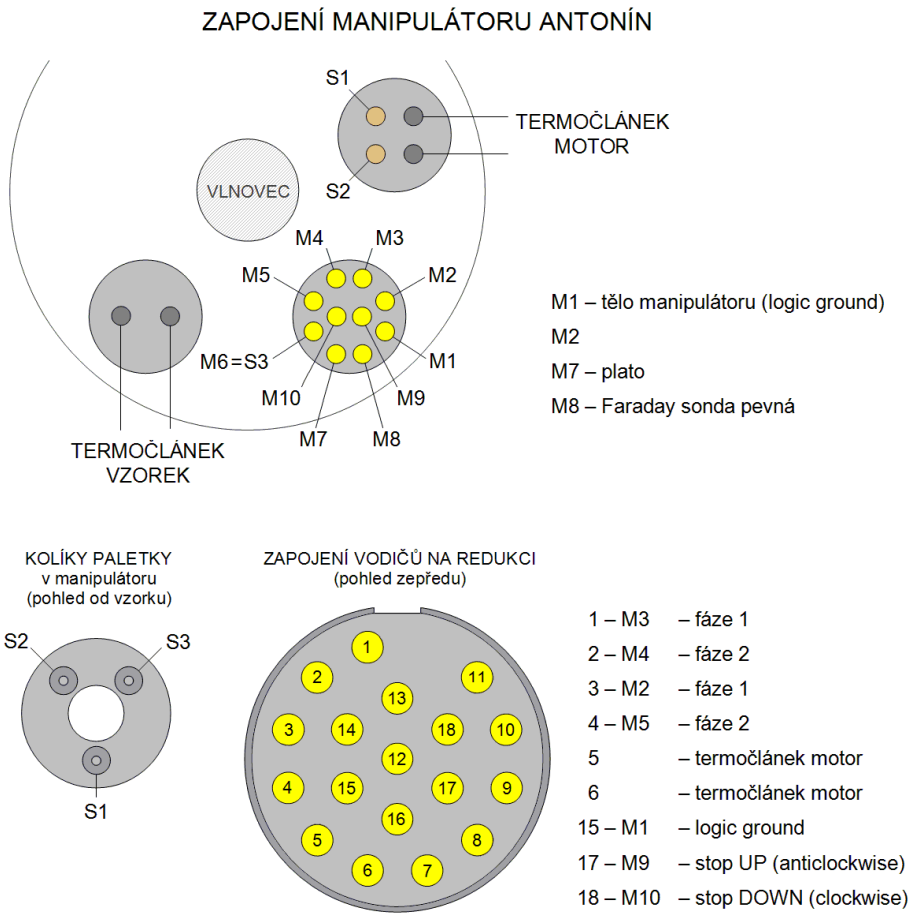
Pod manipulátor byla připojena Faradayova sonda, kterou potřebují někteří uživatelé například pro analýzu primárního iontového svazku. Sonda byla umístěna pod držák paletek do takové pozice, aby se vstupní otvor sondy nacházel pokud možno ve vertikální ose manipulátoru. Přesné souřadnice otvoru sondy vůči poloze středu vzorku byly zaznamenány na wiki stránkách používaných na Ústavu fyzikálního inženýrství pro sdílení informací o přístrojích, aby bylo možné nalézt sondou polohu největší intenzity iontového svazku a následně do tohoto místa přesunout vzorek.

Vodiče od motorku a od držáku paletky se omotaly kolem prodlužovacího členu, aby nepřekážely v komoře. Nakonec se připojily k průchodkám na přírubě manipulátoru (viz obr. 1.1) a celek tak byl připraven na připojení ke komoře (obr. 1.7).

2. Konstrukční úpravy a nový návrh manipulátoru

2.1. Provoz stávajícího manipulátoru

Sestavený manipulátor byl v provozu řadu týdnů. Aby jej mohli bezpečně používat všichni pracovníci v laboratoři, byl na wiki stránky Ústavu fyzikálního inženýrství vložen popis ovládání řídící jednotky krokového motorku a popis připojení manipulátoru na průchodku.



Obr. 2.1 Popis zapojení všech komponent manipulátoru na konektory vně komory.

Na obr. 2.1 je výše zmiňovaný popis zapojení motorku na průchodku. Ukazuje také zapojení vodičů termočlánku pro měření teploty vzorku i motorku a zapojení vodičů pro ohřev vzorku na paletce.

Redukcí zmiňovanou na obr. 2.1 dole je myšlena příruba vyobrazená na obr. 2.2. Ta byla určena pro připojení kabelu řídící jednotky motorku vybaveného speciálním konektorem (viz obr. 2.3). Redukce je vakuově kompatibilní a může být připojena přímo ke komoře, avšak v našem případě to nebylo možné. Proto se zvenku připevnila k tělu manipulátoru, aby mohl být motorek snadno odpojen při vypékání komory.

Obr. 2.2 Redukce pro kabel řídící jednotky motorku.

Obr. 2.3 Speciální konektor kabelu řídící jednotky motorku.

Komora, ke které je manipulátor připojen, je využívána pro mnohá měření. Během práce s manipulátorem se objevily konstrukční nedostatky a vyvstalo několik problémů.

Krokový motorek zajištující rotaci paletky pracoval správně, ale samotná rotace nebyla plynulá. Docházelo k nerovnoměrnému pohybu částečně kvůli tuhosti kabelu namotávajícího se mezi plechové přepážky (viz obr. 1.4 vpravo a schéma obr. 1.2). Především však docházelo k zadrhávání šroubového převodu motorku, což způsobovalo silné vibrace přenášející se na celý manipulátor. Asi po měsíci provozu přestala rotace fungovat úplně. Po vytažení manipulátoru z komory za účelem diagnostiky bylo zjištěno, že důvodem byl zadřený převod motorku. Ložisko hřídele v rámu manipulátoru bylo navíc značně poškozeno, proto bylo nahrazeno novým.

Zadírání převodu představovalo z hlediska používání manipulátoru největší problém. Přestože byl převod opatřen speciální povrchovou úpravou pro snížení tření, bylo zjištěno značné opotřebení stykový ploch převodu, které způsobovalo zadrhávání. Po zadření nebylo možné s manipulátorem točit, což mimo jiné znepříjemňovalo zakládání paletek se vzorky, zvláště zůstal-li manipulátor natočen v nevhodné poloze. Tento problém bylo možné odstranit aplikací speciálního UHV kompatibilního lubrikantu Krytox LVP na kontaktní plochy převodu. Samotná aplikace však musela být prováděna převážně během provozu za podmínek ultravysokého vakua, neboť nebylo možné při každém zadření zavzdušňovat komoru a manipulátor opravovat mimo ni. Celá operace tak byla velmi komplikovaná.

Při jednom experimentu s dlouhodobým ohřevem vzorku také došlo k poškození plastové síťky kolem vodičů mezi přepážkami (viz obr. 1.4 vpravo). Důvodem bylo zřejmě dlouhodobé zahřívání vzorku vysokým proudem. Protože ve vakuu dochází k přenosu tepla pouze zářením, nebyly součásti manipulátoru dostatečně rychle ochlazovány, zvláště část kabelu namotaná v prostoru mezi plechovými přepážkami. Vodiče tak dosáhly vysoké teploty, kterou plastová síťka nevydržela. Roztavená síťka po ochlazení ztuhla a pružnost kabelu se značně zhoršila (viz obr. 2.4).

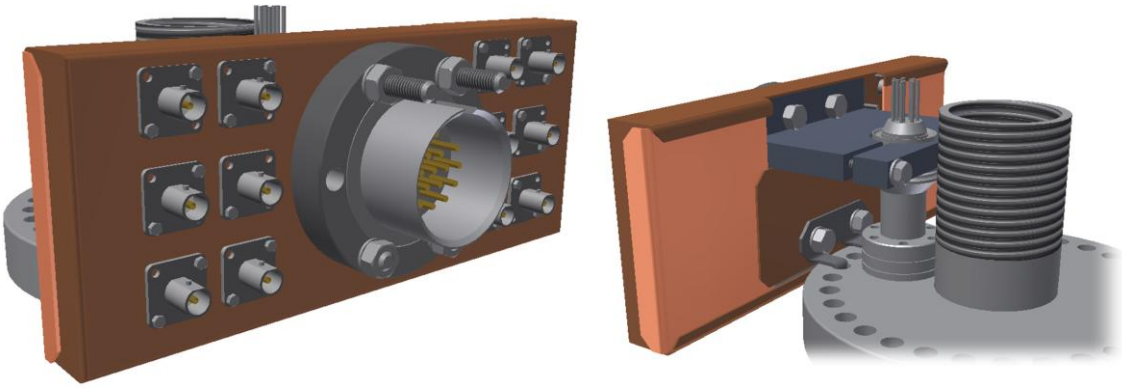
Obr. 2.4 Roztavená síťka chránící vodiče namotávající se mezi přepážky.

Jistý vliv na dosažení kritické teploty také mohlo mít teplo šířící se z ohřátého vzorku. Po odstranění zbytků roztavené síťky byly vodiče prozkoumány. Zjistilo se, že kaptonová izolace vodičů z prostoru mezi přepážkami zůstala navzdory změně barvy neporušená a stejně pružná. Kapton mimo plechové přepážky zůstal beze změn. Ukázalo se, že absence plastové síťky nemá žádný významný dopad na funkčnost manipulátoru. Proto byl znovu uveden do provozu bez síťky.

2.2. Úpravy stávajícího manipulátoru

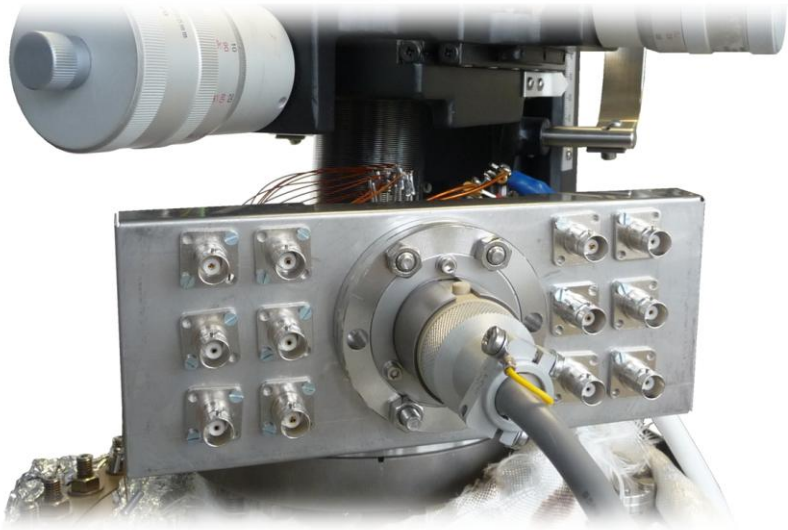
Aby mohl být krokový motorek ovládán řídící jednotkou, musel k ní být připojen pomocí speciálního kabelu přes redukci zmiňovanou v předchozí kapitole. Pro tuto redukci byl navržen speciální držák vyobrazený na obrázku 2.5. Účelem návrhu bylo připevnit přírubu kabelu řídící jednotky ke komoře tak, aby byla dobře přístupná a zároveň nebránila v používání manipulátoru. Proto byl držák navržen jako konektorový panel, aby mohl současně sloužit pro připojení vodičů ohřevu vzorku nebo Faradayovy sondy. Rozměry držáku byly zvoleny tak, aby držák splnil svou funkci a současně co nejméně omezil využitelný rozsah pohybu manipulátoru. Navržené přichycení držáku k přírubě vyobrazené na obr. 2.5 bezpečně vydrželo zatížení držáku i při manipulaci s vodiči, přičemž k omezení prostoru pro vlnovec manipulátoru došlo pouze minimálně.

Protože se při vypékání komory dosahuje teploty až 150°C, byl držák navržen tak, aby těmto teplotám odolal a nemusel být při vypékání od komory odpojován. Veškeré díly proto byly navrženy z kovu. Pro připojení ostatních kabelů byly zvoleny přírubové koaxiální konektory BNC, jejichž odolnost vůči teplotě při vypékání byla testována ohřevem na elektrické plotně. Konektory ohřáté na teplotu 170°C nejevily žádné známky poškození.



Obr. 2.5 Návrh držáku redukce a jeho uchycení na přírubu manipulátoru.

Ke všem součástem držáku redukce byly vyhotoveny výrobní výkresy a po jejich schválení byl držák zadán do výroby. Hotové díly držáku byly složeny dohromady a vybaveny redukcí a zmiňovanými koaxiálními konektory. Pro propojení redukce a konektorů k průchodce manipulátoru byly použity vodiče s kaptonovou izolací, která odolá i teplotám při vypékání. Výsledek je na obr. 2.6.



Obr. 2.6 Hotový držák redukce v provozu.

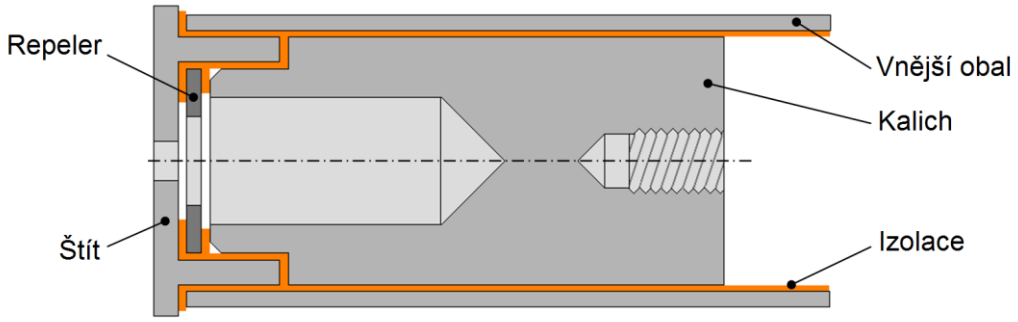
2.3. Nový návrh Faradayovy sondy

V rámci úprav manipulátoru byla navržena nová Faradayova sonda, která oproti stávající sondě připojené pod držák paletek (viz obr. 1.7) měla menší rozměry z důvodu omezeného prostoru uvnitř komory. Nová sonda měla navíc splňovat specifický konstrukční požadavek, aby přední štít sondy měl plochu přibližně 1 cm^2 a mohl být celý využit ke sběru iontů. Šlo o speciální požadavek některých pracovníků

využívajících manipulátor, kteří za tímto účelem dosud používali sběrnou elektrodu umístěnou pod stávající Faradayovu sondou (viz obr. 1.7). Nová sonda by tak měla tuto sběrnou elektrodu integrovánu v konstrukci a její dodatečné připojení k manipulátoru by nebylo zapotřebí.

Zřejmě nejdůležitějším požadavkem na sondu byla bezpečná vzájemná izolace jednotlivých částí, aby nedošlo ke zkratu a sonda pracovala spolehlivě. Veškerá izolace, která by se mohla při dopadu iontů nabíjet a negativně pak ovlivňovat trajektorie dalších iontů, měla být proti dopadu iontů co nejvíce chráněna.

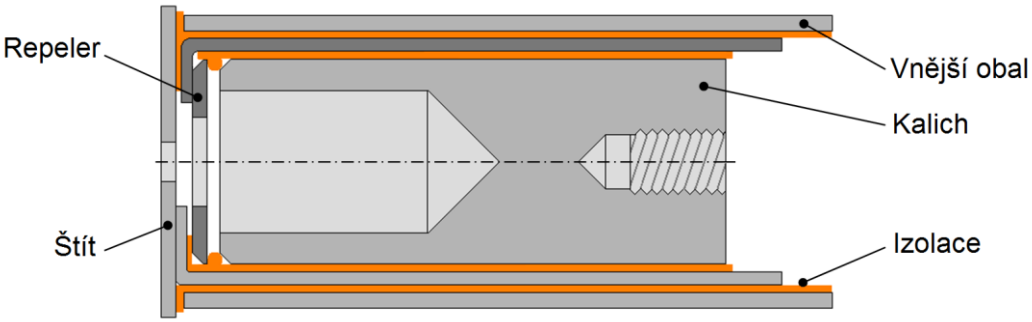
Z důvodů uvedených výše byla po úvaze zvolena válcově symetrická konstrukce sondy s průměrem čelního štítu 10 mm. První návrh sondy je vyobrazen na obrázku 2.7. Sonda se měla skládat z kalichu pro sběr iontů uzavřeného ve vnějším samonosném obalu. Přední štít by byl přes izolační vrstvu nalisován na kalich. Navržená konstrukce sondy také zahrnovala použití repeleru, což je součást s otvorem těsně za čelním štítem v ose sondy. Na repeler by v případě potřeby bylo možné přivést záporné napětí a vzniklé elektrostatické pole by bránilo úniku sekundárních elektronů, které se mohou uvolnit po dopadu iontů na kalich sondy, čímž vzniká zkreslení měřeného proudu svazku iontů.



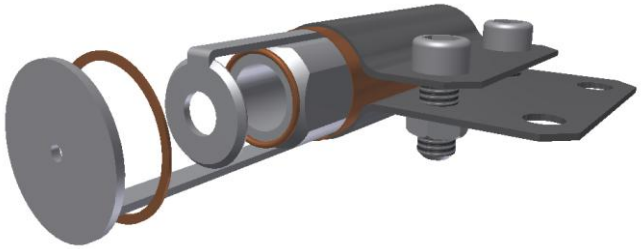
Obr. 2.7 První návrh konstrukce nové Faradayovy sondy.

První návrh však byl nevhodný z důvodu složitosti výroby. Vzhledem ke zvoleným rozměrům (průměr štítu 10 mm viz požadavky výše) by zhotovení čelního štítu za dodržení potřebných tolerancí pro funkčnost bylo dostupnými prostředky obtížné. Proto byl návrh pozměněn do podoby na obrázku 2.8. Úprava spočívala v jiném způsobu přichycení čelního štítu a repeleru k tělu sondy. Čelní štít i repeler byly opatřeny nožičkou sevřenou mezi vnější obal a kalich sondy. Na opačném konci sondy nožička zároveň sloužila jako vodivé propojení mezi štítem (popř. repelerem) a vodičem přivedeným k sondě. Aby sonda držela pohromadě, byl navržen plechový vnější obal (viz obr. 2.9), kde stavitelné sevření obstarávala dvojice šroubů.

Protože se jednalo o kusovou výrobu, byly vytvořeny výrobní výkresy pouze k některým součástem sondy (konkrétně kalichu, čelního štítu a vnějšího obalu). Zbylé části byly zhotoveny ručně. Výroba izolace z kaptonové folie tloušťky 0,125 mm se z důvodu složitosti tvarů a nepřesnosti výroby jednotlivých dílů sondy provedla až při samotné montáži sondy s přihlédnutím k vůlím a vzájemné pozici dílů. Proto je tvar a velikost izolací na obrázcích 2.8 a 2.9 spíše orientační.



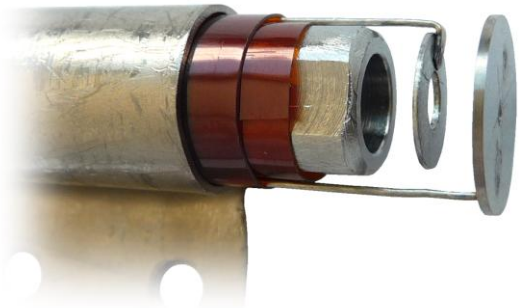
Obr. 2.8 Upravený návrh nové Faradayovy sondy.



Obr. 2.9 3D model návrhu nové Faradayovy sondy pro použití na manipulátoru.

Veškeré části sondy kromě izolace byly vytvořeny z korozivzdorné oceli vhodné pro použití v ultravysokém vakuu. Připojení nožičky k čelnímu štítu a k repeleru bylo v obou případech provedeno bodovým svarem (viz obr. 2.10).

Při montáži bylo zjištěno, že vnější obal sondy má z daného materiálu dostatečnou pružnost a pevnost k tomu, aby udržel součásti sondy pohromadě i bez použití svěrných šroubů (viz obr. 2.9). Návrh obalu tak byl dodatečně upraven na samosvornou konstrukci. Ta navíc postrádala podélnou štěrbinu odhalující kaptonovou izolaci, čímž odpadla nutnost jejího zakrytí.



Obr. 2.10 Detail sestavení a vzájemné izolace součástí Faradayovy sondy.

Před složením byly veškeré díly vyčištěny pro použití v ultravysokém vakuu. Hotová Faradayova sonda je na obrázku 2.11. Při sestavování se ukázal nedostatek upravené konstrukce, týkající se polohy jednotlivých dílů. Vzhledem k možnostem výrobních tolerancí dílů nebylo možné dosáhnout po sestavení přesné pozice součástí tak, aby

všechny ležely přesně v ose sondy. Z tohoto pohledu by byla vhodnější prvotní konstrukce na obr. 2.7, avšak vyšší tolerance neměly na provoz sondy zásadní vliv.

Obr. 2.11 Sestavená Faradayova sonda s upraveným vnějším obalem.

Nožičky od repeleru a čelního štítu vyčnívaly po montáži ze zadní části sondy a byly připraveny pro připojení vodičů. K přichycení třetího vodiče na kalich sondy sloužil šroub ve středu zadní části sondy. Sonda byla testována digitálním multimetrem a nebyl zjištěn žádný zkrat součástí.

Pro stínění odkryté kaptonové izolace na zadní straně bylo dodatečně vytvořeno stínění (viz obr. 2.12), jež bylo na sondu zezadu nasazeno a zabránilo přístupu iontů k izolaci.

Obr. 2.12 Přídavné stínění odkryté izolace na zadní části Faradayovy sondy.

Sonda byla připojena k manipulátoru stejným způsobem jako původní model a výsledkem bylo zmenšení vertikálního rozměru manipulátoru přibližně o 10 mm.

Pro kontrolu funkce sondy bylo provedeno její otestování. Manipulátor byl natočen tak, aby sonda stála čelním štítem kolmo proti trysce iontového zdroje. Součásti sondy byly postupně připojovány k zemi přes citlivý ampérmetr, zatímco iontový zdroj rastroval celou oblast čelního štítu sondy. Výsledky jsou na obrázku 2.13.

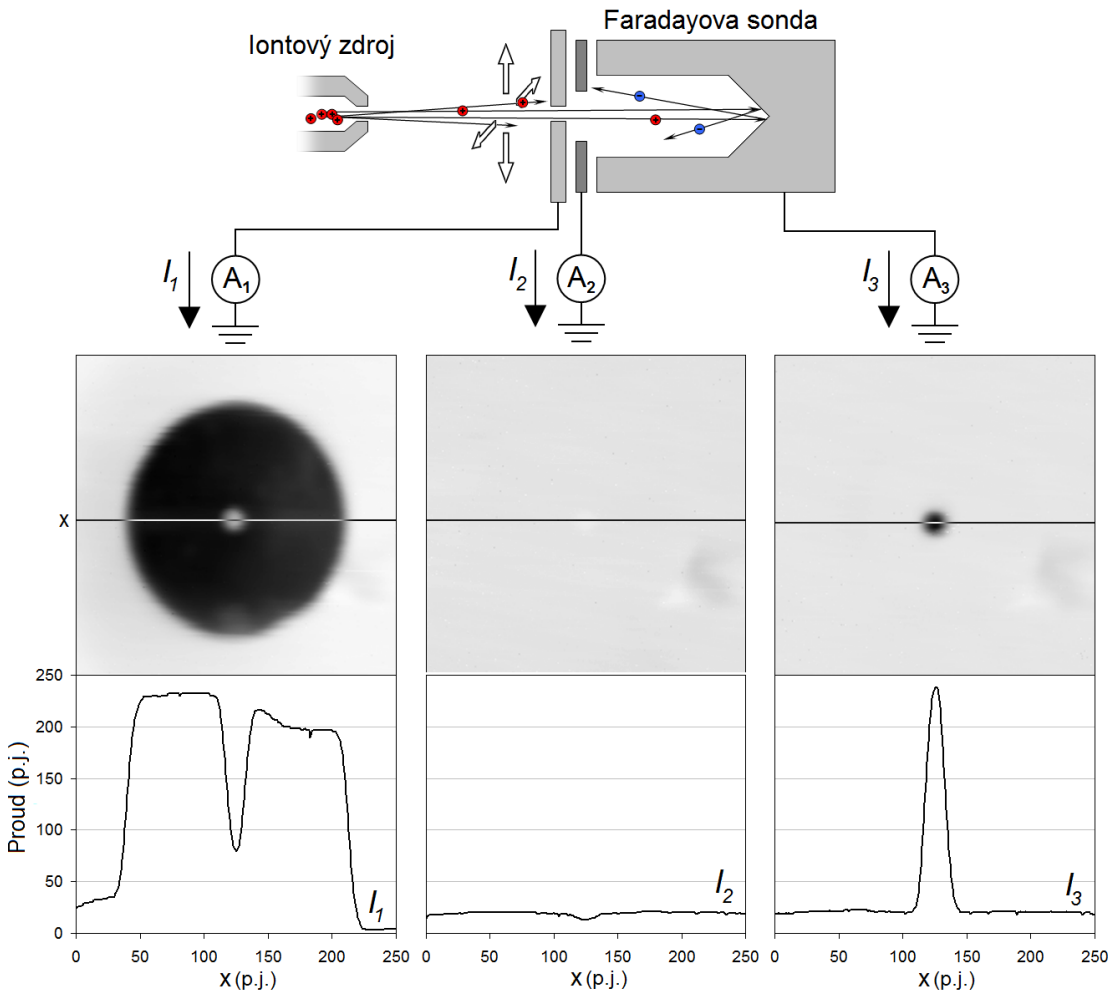
Při detekci proudu čelním štítem sondy byl naměřen zřetelný propad v oblasti otvoru ve středu štítu (viz obr. 2.13 vlevo). Průběh na obrázku zároveň ukazuje rozdíl v detekovaném proudu v závislosti na poloze dopadu iontů na čelní štít. To způsobovala rozdílná emisivita sekundárních elektronů povrchu čelního štítu. Při emisi sekundárního elektronu po dopadu iontu byl detekován dvojnásobný proud, neboť únik elektronu se záporným nábojem je proudově ekvivalentní s dopadem kladného iontu. Ve výsledku tak byl detekován zdánlivý dopad dvou kladných iontů. Jiná emisivita některých míst

povrchu mohla být způsobena například bodovým svarem, který spojoval čelní štít s nožičkou (viz obr. 2.10).

Proud detekovaný repelerem je na obr. 2.13 uprostřed. Šlo o proud sekundárních elektronů vznikajících po dopadu iontů na kalich sondy. Tento proud měl díky zápornému náboji elektronů opačné znaménko, proto se otvor v čelním štítu na obrázku zobrazil jako světlejší místo.

Detekce proudu kalichem sondy vykazovala očekávané maximum v oblasti otvoru v čelním štítu. Tento proud byl navýšen o proud vzniklý emisí sekundárních elektronů způsobem popsaným výše. Proud sekundárních elektronů však při použité energii iontů 1500 eV tvořil pouze asi 3% proudu iontů dopadajících na kalich. Po přidání záporného napětí na repeler bylo možné vliv proudu sekundárních elektronů na měřený proud svazku eliminovat.

Testování sondy prokázalo, že při montáži nedošlo ke zkratu součástí. Sonda pracovala správně.



Obr. 2.13 Proud detekovaný na různých částech sondy při dopadu iontů o energii 1500 eV. Pod každým obrázkem je vyznačený osový řez průběhu detekovaného proudu. Všechny tři průběhy mají stejná měřítka.

2.4. Nový návrh manipulátoru

Nový návrh manipulátoru měl pokud možno zachovat výhody stávající konstrukce a odstranit co nejvíce jejích nedostatků. Vlastnosti současného manipulátoru jsou především:

Výhody:

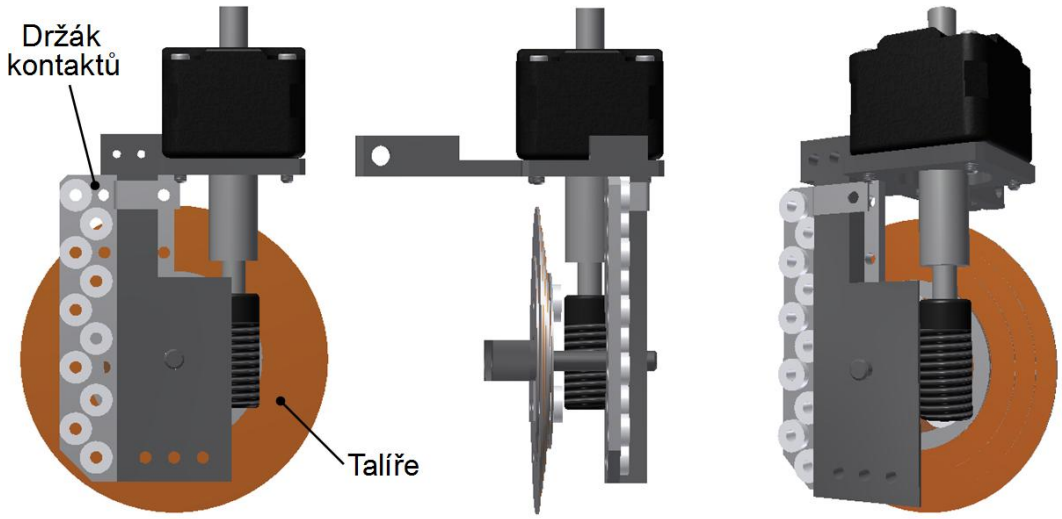
- Samosvornost šroubového převodu rotace.
- Menší krok rotace díky převodu motorku.

Nedostatky:

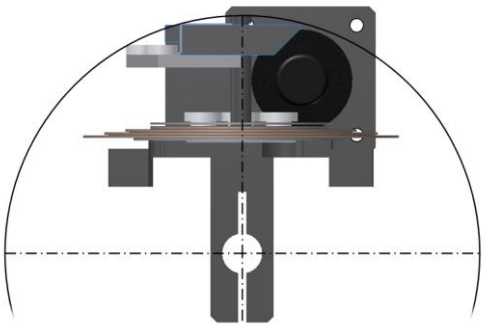
- Omezený rozsah rotace (pod 360°) daný konstrukčním řešením.
- Velké rozměry manipulátoru zejména v horizontálním směru omezující bezpečný pohyb v komoře.

Zmiňovaná samosvornost převodu byla výhodná při zakládání paletky se vzorkem pomocí magnetické tyče, neboť se díky ní držák paletek neprotáčel a zakládání bylo mnohem snazší.

Podstata nového návrhu manipulátoru spočívala ve změně přívodu vodičů z rámu manipulátoru na otočný držák paletek. Nové řešení se zakládalo na použití třecích kontaktů. Při návrhu byl kladen důraz na zachování rozměrů manipulátoru především v horizontálním směru, neboť současné rozměry byly v omezeném prostoru komory na hranici použitelnosti. Zvolená konstrukce vyobrazená na obrázku 2.14 zachovala veškeré charakteristiky rotace prostřednictvím převodu motorku, ale odstranila omezení rozsahu rotace.



Obr. 2.14 Návrh třecích kontaktů pro neomezený rozsah rotace manipulátoru.

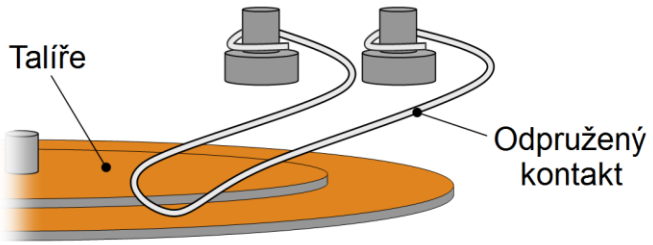


Obr. 2.15 Při návrhu byl kladen důraz na zachování rozsahu manipulátoru.

Konstrukce kontaktů byla navržena tak, aby mohla být připojena ke stávajícímu manipulátoru pokud možno bez nutnosti dodatečných úprav rámu. To bylo vhodné z důvodu rychlé montáže, aby zařízení nebylo dlouho mimo provoz. Tento požadavek však omezil možnosti návrhu, neboť bylo třeba dodržet rozměry rámu a pozici jeho dílů. Nejkritičtějším rozměrem byla tloušťka talířové části, která se musela podřídit mezeře mezi šroubovým převodem motorku a osazením hřídele držáku paletek (viz obr. 2.14 uprostřed).

Protože manipulátor byl během prací neustále v provozu, byl vytvořen počítačový model stávajícího rámu podle původních výrobních výkresů. Model při navrhování nahrazoval skutečný manipulátor a podle rozměrů modelu byl vytvářen nový návrh tak, aby nově vytvořené součásti byly kompatibilní se stávající konstrukcí rámu.

Samotný třecí kontakt byl navržen jako odpružený vodič z drátu z korozivzdorné oceli (viz obr. 2.16). Ten by byl přichycen k držáku kontaktů na těle manipulátoru přes izolační keramické podložky pomocí šroubů, k nimž by byly přivedeny vodiče od průchodky na přírubě manipulátoru. Odpružený kontakt by se dotýkal vodivých talířů na držáku paletek, jenž by se tak mohl otáčet v neomezeném rozsahu, aniž by došlo k přerušení vodivého spojení. Aby se při rotaci kontakt vlivem třecí síly nevychyloval do stran a nemohl se dotknout sousedních talířů, což by následně způsobilo zkrat, byl kontakt navržen s uchycení na dvou místech, aby se pod vlivem radiálních sil co nejméně deformoval.

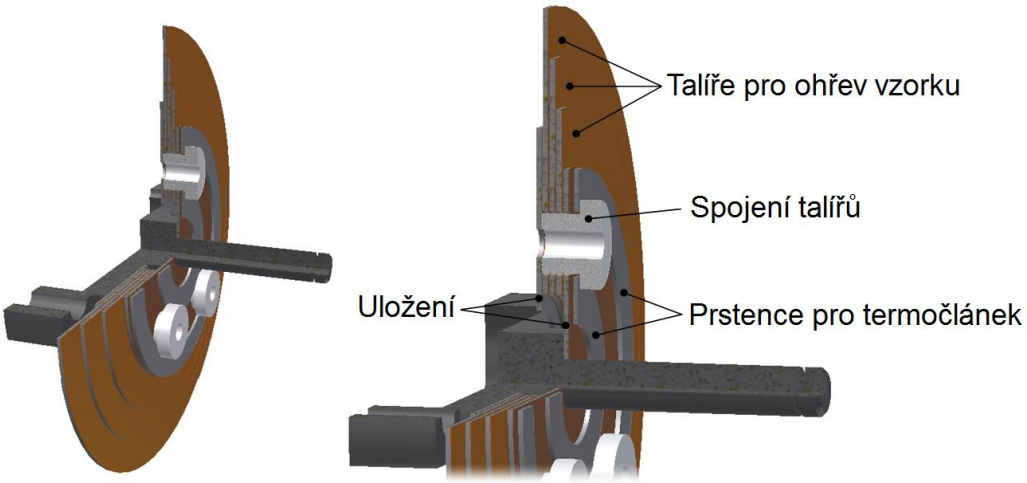


Obr. 2.16 Schematické znázornění návrhu třecího kontaktu.

Návrh takovéto podoby kontaktů však s sebou nesl možná rizika, která by mohla vyvstat po samotné realizaci:

- Nadměrné zhoršení vakua v důsledku velkého tření v místě kontaktu.
- Velké zahřívání místa kontaktu proudem ohřívajícím vzorek (malá styková plocha).
- Nadměrné zatížení ložisek hřídele tlakem kontaktů na talíře.
- Nedostatečný výkon krokového motorku pro překonání třecí síly kontaktů.

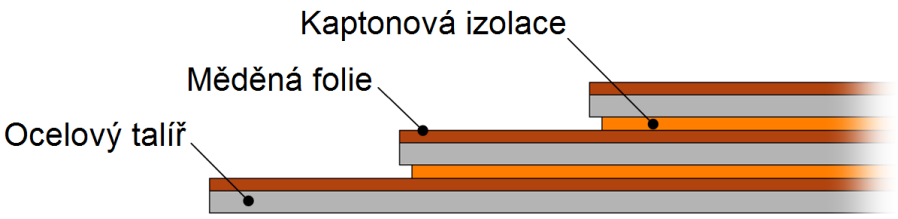
Zmíněné problémy by mohly znemožnit reálné využití tohoto návrhu. Odolnost návrhu vůči vysokým teplotám, kterým mohou být součásti vystaveny, zajišťovalo použití kovových a keramických materiálů. Nejslabším článkem z tohoto pohledu byla vzájemná izolace součástí, aby nedošlo ke zkratu a manipulátor pracoval správně. K tomuto účelu byla zvolena kaptonová folie vložená mezi talíře. Díky malé tloušťce folie pouhých 0,125 mm a vakuové kompatibilitě byla vhodnou volbou. Zkušenosti z provozu (viz kapitola 2.1) navíc ukázaly, že kapton zůstane bez funkčních změn i po vystavení vysokým teplotám, takže jeho použití bylo zvoleno i z hlediska teplotní odolnosti.



Obr. 2.17 Detail řešení talířů třecích kontaktů a jejich uložení na hřídel.

Sestavení talířů je na obrázku 2.17. Pro spojení talířů byly zvoleny izolační keramické podložky, které by při montáži byly spolu s krajními talíři uložení staženy šrouby. Talíře uložení také sloužily k přesnému vymezení polohy talířů na hřídeli.

Za účelem zlepšení vodivosti talířů byla zvolena sendvičová konstrukce využívající měděné folie. Struktura je schematicky znázorněná na obr. 2.18. Měděný povrch talířů by měl díky vyšší vodivosti mědi snížit náchylnost stykového místa k zahřívání procházejícím proudem.



Obr. 2.18 Schéma návrhu sendvičové stavby talířů.

Velkým problémem při návrhu třecích kontaktů bylo vyřešit přivedení vodičů termočlánku, který se využívá k měření teploty vzorku. Termočlánkové vodiče musí být přivedeny od průchodky až k místu měření a není možné, aby část vedení byla realizována jiným materiálem, neboť v místě spoje by vznikal elektrochemický potenciál zkreslující měření.

V laboratořích Ústavu Fyzikálního inženýrství se využívají termočlánky s vodiči ze slitin chromel a alumel. Pro konstrukci třecích kontaktů by bylo nejvhodnější užít ke třem talířům pro ohřev vzorku (viz obr. 2.17) ještě dva talíře z příslušných slitin, aby pro termočlánek mohlo být použito stejné konstrukce třecího kontaktu. Problémem však byl materiál – slitiny chromel a alumel nejsou běžně dostupné v podobě plechu, ale pouze ve formě tenkých vodičů. Pro třecí kontakty termočlánku tak bylo navrženo jiné řešení částečně znázorněné rovněž na obr. 2.17 a využívající stejného principu, jaký byl použit u termočlánkových kontaktů paletky (viz obr. 1.6). Základem byl nosný prstenec z ocelového plechu, kolem něhož by byl v těsných smyčkách navinut vždy příslušný vodič termočlánku. Z důvodu nedostatečné pružnosti slitin chromel a alumel by byl i odpružený kontakt vytvořen nejprve z nosného ocelového drátu formou odpruženého kontaktu a až v místě dotyku by se na nosný drát opět hustě navinul vodič z příslušné slitiny. Celá konstrukce by navíc měla takové uspořádání, aby se smyčky vinutí na odpruženém kontaktu a na prstenci vzájemně křížily. Křížení vinutí kontaktu a prstence by mělo snížit náchylnost k vibracím, které budou vlivem nerovností vinutí při rotaci vznikat. Přichycení prstenců k talířům s využitím keramických podložek je patrné na obr. 2.17.

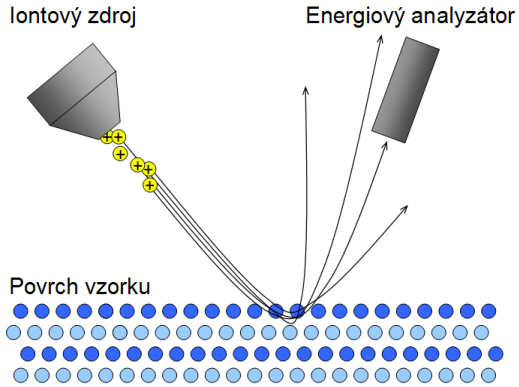
K návrhu třecích kontaktů byly vytvořeny výrobní výkresy a ty zadány do výroby. Během odevzdání této práce byly díly stále ve výrobě.

3. Využití metody LEIS ke strukturní analýze

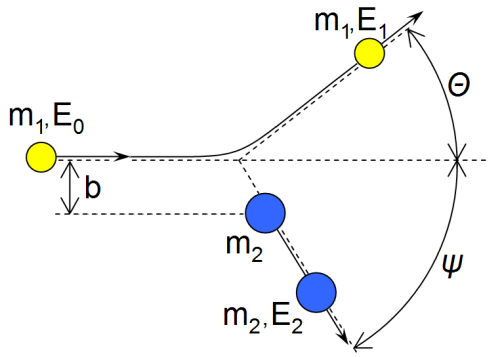
3.1. Interakce mezi iontem a atomem terče

Metoda LEIS (z anglického *Low Energy Ion Scattering* – Spektroskopie iontů nízkých energií) využívá k analýze povrchu vzorku ionty o energii stovek eV až jednotek keV. Nejčastěji se užívají ionty helia, lithia, draslíku či argonu [2].

Ionty (tzv. projektily) jsou urychleny na patřičnou energii a směřovány na vzorek. Iont se přiblíží k povrchu vzorku a v důsledku jaderné interakce mezi iontem a povrchovým atomem vzorku (terče) dojde ke srážce, kterou lze popsat jako klasickou binární srážku dvou těles tvaru koule (obr. 3.1 a 3.2).



Obr. 3.1 Princip metody LEIS. Dopadající ionty se rozptylují na vzorku a některé dopadnou do analyzátoru.



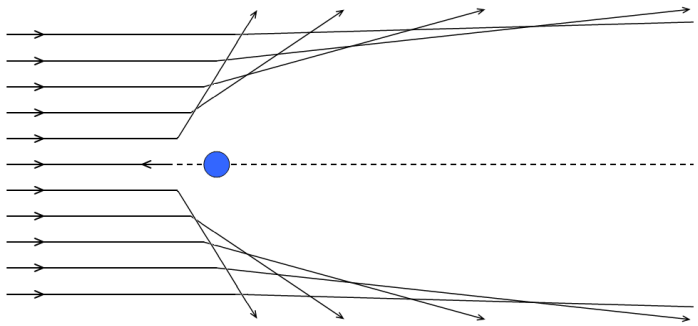
Obr. 3.2 Schéma binární srážky projektilu a terče s vyznačením geometrie srážky.

O výsledku srážky rozhoduje energie a hmotnost iontu, hmotnost atomu terče a geometrie srážky. Tyto parametry jednoznačně udávají výsledek srážky, což je pro metodu LEIS podstatné. Energie dopadajících iontů a jejich hmotnost záleží na nastavení iontového zdroje a použité látce, z níž se ionty generují. Úhel dopadu na vzorek je dán postavením vzorku vůči iontovému zdroji a i když se ionty rozptylují do různých směrů, pozice energiového analyzátoru určí, v jakém směru budou rozptýlené ionty zachytávány, čímž je dán i rozptylový úhel. Z těchto vstupních hodnot lze dopočítat hmotnost atomu, na němž se daný iont rozptýlil.

Ionty rozptýlené na povrchových vrstvách zůstávají převážně ionizované a jejich energii tak lze určit elektrostatickými analyzátory nebo Wienovými filtry. Ionty rozptýlené na hlubších vrstvách však ztrácejí svůj náboj a pro malý tok primárních iontů by tak byl signál detekovaný analyzátorem nízký. V tomto případě lze energie rozptýlených částic určit metodou ToF (z anglického *Time-of-Flight* – doba letu). Tímto způsobem lze analyzovat energie jak iontů, tak neutrálů.

3.2. Jevy zvyšující citlivost metody LEIS

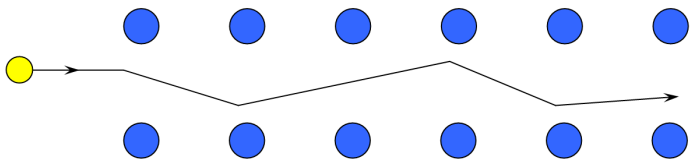
Každou srážku iontu s atomem terče lze kromě hmotností obou částic a energie dopadajícího iontu charakterizovat tzv. srážkovým parametrem b (viz obr. 3.2). Pro malé hodnoty srážkového parametru dochází k velkému vychýlení iontů z původních směrů. Za atomem terče tak vzniká oblast zvaná stínící kužel, do níž se iont po interakci s atomem nemůže dostat (obr. 3.3). Při teoretické hodnotě $b = 0$ lze srážku označit jako „čelní“ – rozptylový úhel Θ je v takovém případě 180°.



Obr. 3.3 Schéma vzniku stínícího kužele za atomem terče.

Rozměr stínícího kužele silně závisí na energii dopadajících iontů. Pro vyšší energie iontů je kužel užší. Z obrázku 3.3 je také vidět, že vlivem stínícího kužele dochází k fokusaci iontů podél pomyslného povrchu stínícího kužele.

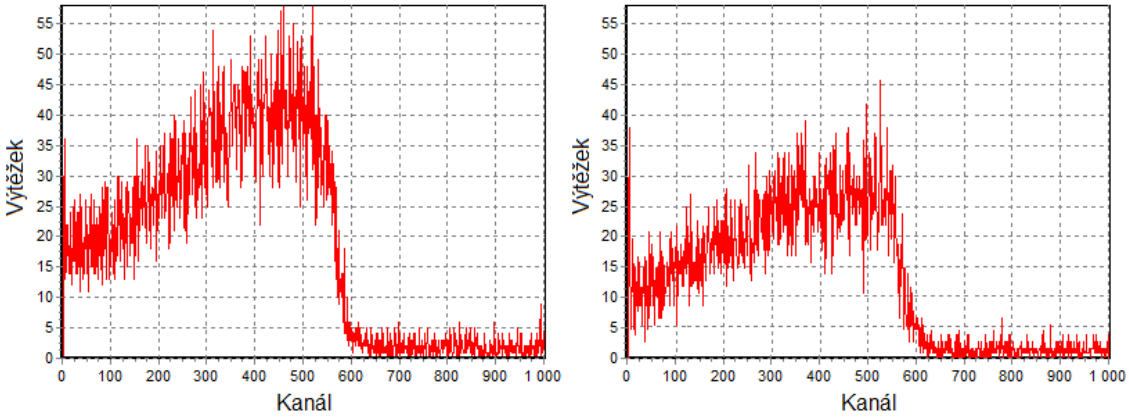
V případě, že se v zákrytu za prvním atomem nachází další atomy terče, nemůžou s nimi dopadající ionty vlivem stínícího kužele prvního atomu interagovat. V případě terče s pravidelně uspořádanými atomy pak může nastat efekt zvaný iontové kanálování, jehož schematické znázornění je na obrázku 3.4. Iont vychýlený na prvním atomu může být vlivem stínícího kužele nasměrován do mezery mezi pravidelnými řadami atomů. Při následných interakcích je pak vychylován od jedné řady atomů zpět ke druhé a proniká tak hlouběji do terče.



Obr. 3.4 Schéma iontového kanálování při průchodu iontu mezi uspořádanými atomy.

Jevů stínění a kanálování lze využít při strukturní analýze metodou LEIS. Při azimutální rotaci krystalického vzorku dochází v detekovaném signálu k poklesům a nárůstům intenzity podle okamžité orientace krystalové struktury povrchu vzorku dané jeho natočením vůči primárnímu svazku. Při jistých pozicích vzorku vůči iontovému svazku může dojít k silnému kanálování, což se projeví poklesem intenzity detekovaných zpětně rozptýlených iontů. Naopak při jiných natočeních může být uspořádání atomů krystalu takové, že se ionty vlivem stínících kuželů atomů prvních vrstev fokusují na

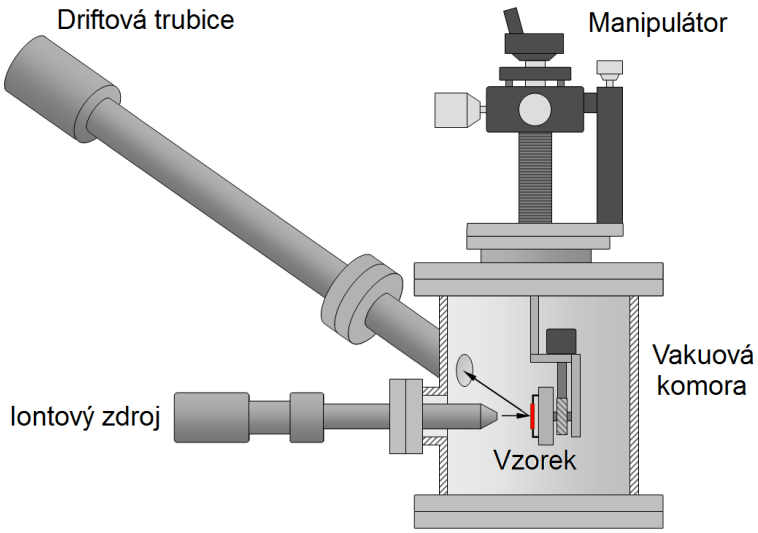
atomy vrstev hlubších a počet detekovaných částic bude mnohem větší, jak je uvedeno v příkladu na obr. 3.5.



Obr. 3.5 Porovnání intenzity rozptýlených iontů při různém natočení vzorku Si(111) při dopadu iontů He^{+}.

3.3. Strukturní analýza Si(111) metodou LEIS

Uspořádání aparatury k analýze metodou ToF-LEIS, tak jak je provedeno v laboratořích Ústavu fyzikálního inženýrství, je na obrázku 3.6. Iontový zdroj generuje ionty helia a urychluje je na zadanou energii. Driftová trubice sloužící k analýze doby letu je ke komoře připojena tak, že detekovaný rozptylový úhel je 152°. Součástí komory, v níž se měření provádí, je manipulátor probíraný v kapitolách 1 a 2.



Obr. 3.6 Experimentální sestava pro analýzu metodou LEIS.

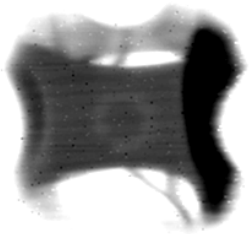
Ke strukturní analýze byl zvolen vzorek křemíku (111) o rozměrech (10 x 15) mm. Parametry provedeného experimentu jsou uvedeny v tabulce 3.1.

Energie iontového svazku:	3 keV (ionty He^+)
Doba měření jednoho spektra:	20 s
Rozptylový úhel iontů:	152°
Provedená azimutální rotace:	200° s krokem 1°
Tlak v komoře během měření:	$1{,}7 \cdot 10^{-5}$ Pa

Tab. 3.1 Parametry experimentu strukturní analýzy vzorku Si(111) při azimutální rotaci.

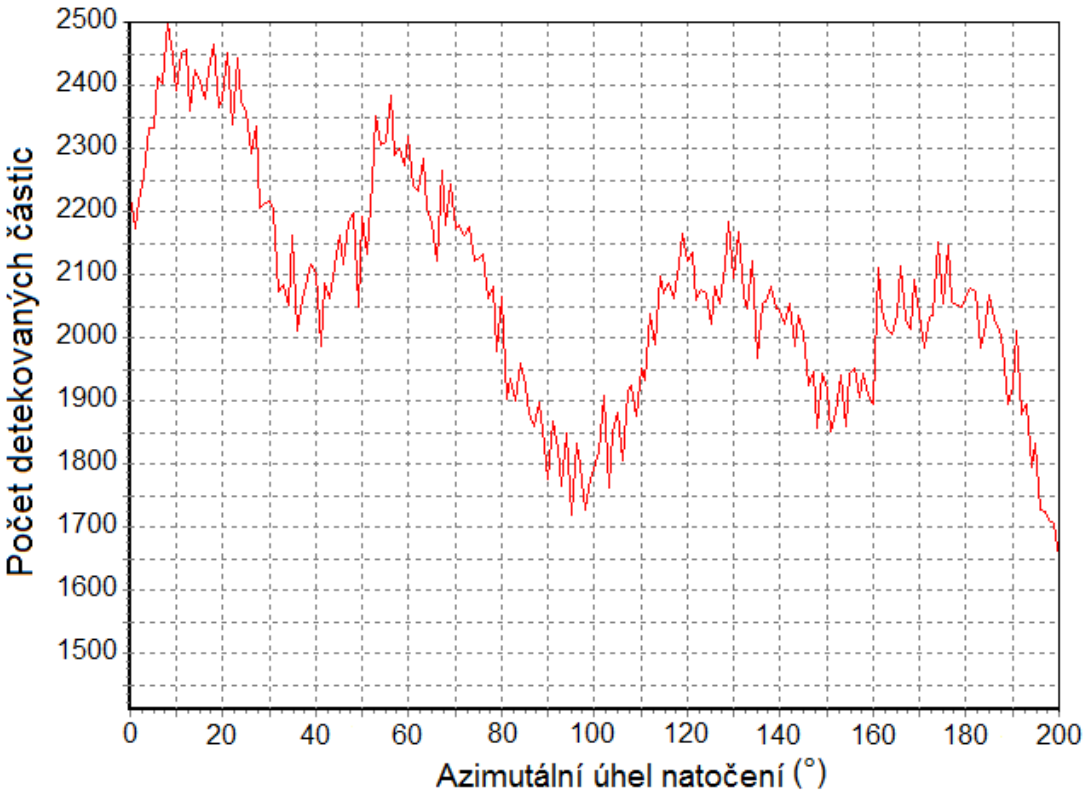
Pro měření bylo třeba připravit aparaturu. Na iontovém zdroji generujícím ionty helia byla zadána hodnota energie iontů (viz tab. 3.1) a nastaveny parametry iontového svazku. K iontovému zdroji byl navíc připojen generátor pulzů sloužící k přerušování iontového svazku [3].

Aby iontový svazek dopadal při rotaci vzorku pořád na stejné místo, byla nejprve provedena testovací rotace vzorku při dopadu iontového svazku do míst na okraji vzorku. Následně se vzorek zobrazil v ovládacím programu iontového zdroje pomocí rastrovacího módu. Náboj iontů ze svazku dopadajícího na povrch vzorku byl odváděn přes citlivý ampérmetr do země. Ampérmetrem detekovaný proud se měnil v závislosti na emisivitě sekundárních elektronů daného povrchu, na který ionty dopadaly. Řídící počítač následným zpracováním signálu zrekonstruoval obraz vzorku, na němž byl patrný kroužek jiné emisivity sekundárních elektronů, vzniklý v důsledku dopadu iontů (viz obr. 3.7). Pro vlastní měření se pak iontový svazek namířil do středu kroužku, čímž bylo zaručeno, že bude při rotaci neustále dopadat na vzorek a navíc do téhož místa nezávisle na úhlu natočení vzorku.



Obr. 3.7 Vzorek zobrazený iontovým svazkem. Je patrný kroužek jiné emisivity sekundárních elektronů, vzniklý v důsledku dopadu iontů při testovací rotaci.

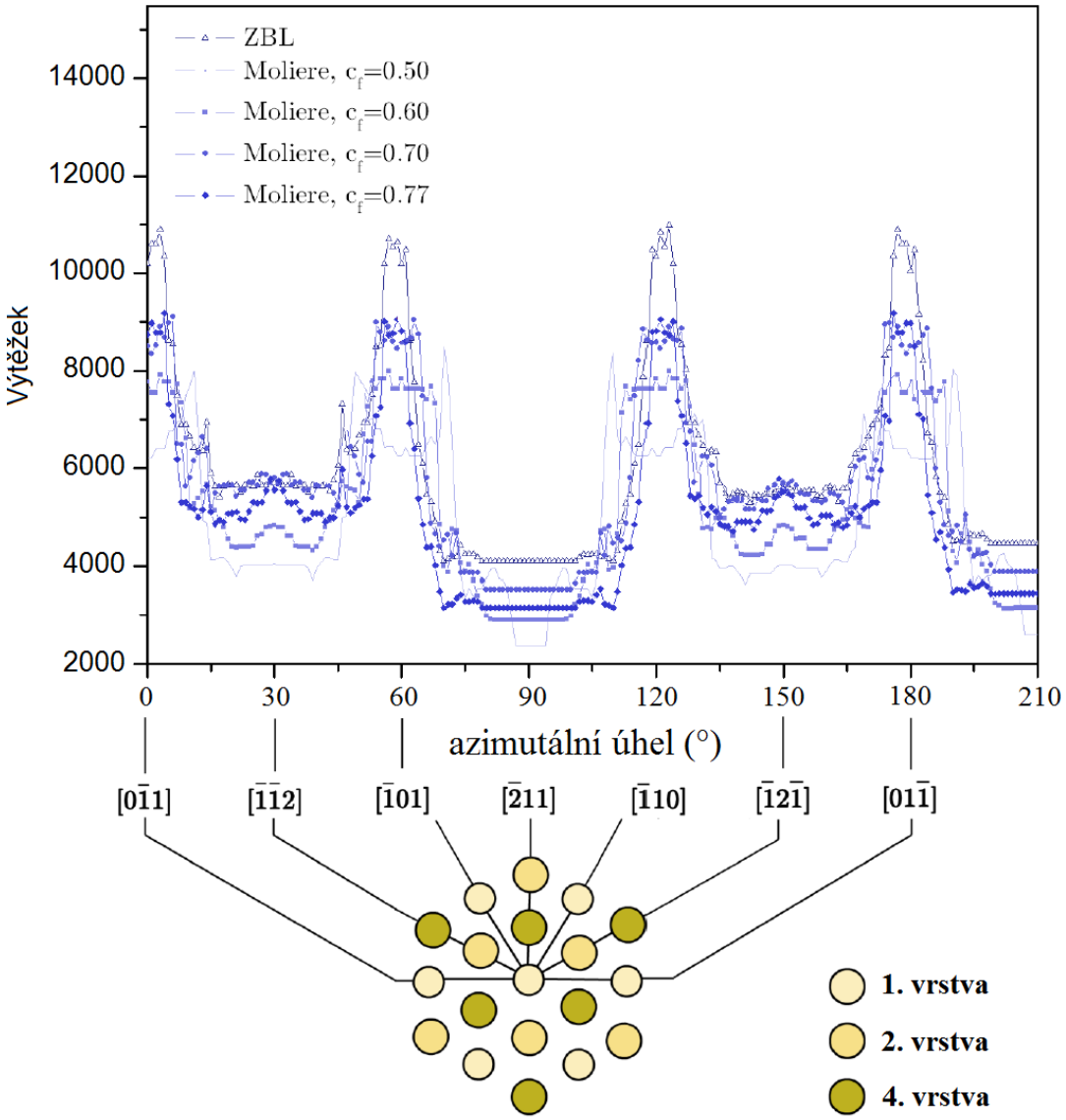
Pro provedení experimentu byl měřící program nastaven tak, aby vždy po 20 sekund detekoval zpětně rozptýlené ionty, poté vzorkem pootočil o 1° a celý proces zopakoval. Po každém otočení o 360° měl být navíc vzorek postupně ohříván až na teplotu 700°C. Ovládací program však byl bohužel přerušen chybou a měření proběhlo pouze do otočení o 200° bez ohřevu. U vzorku se tak nepovedlo odstranit vrstvu nativního oxidu křemíku. Naměřená data byla zpracována do podoby průběhu signálu na obrázku 3.8.



Obr. 3.8 Průběh signálu detekovaných zpětně rozptýlených iontů na vzorku Si(111) v závislosti na azimutálním úhlu natočení. Rozptyl iontů He^+ o energii 3 keV, rozptylový úhel 152°.

Přestože vrstva nativního oxidu nebyla odstraněna, je možné pozorovat značnou shodu s výpočtem na obr. 3.9. Tento obrázek ukazuje průběhy simulovaného rozptylu iontů He^+ o energii 2 keV na krystalu Si(111) obsahujícím 249 atomů. Z obrázku je patrné střídání nárůstů a poklesů zpětného signálu v závislosti na azimutálním úhlu natočení vzorku. Nárůsty (resp. poklesy) se opakují s periodou 60° azimutálního úhlu. Stejný charakter má naměřený výsledek na obrázku 3.8.

Naměřený průběh však navíc s rostoucím úhlem vykazuje průběžný pokles detekovaného signálu, který simulace neobsahuje. To mohlo být způsobeno nepřesným nastavením kolmého úhlu mezi povrchem vzorku a dopadajícím iontovým svazkem. Také poloha paletky po vložení do držáku není přesně vymezena. Během rotace tak mohlo docházet k naklápění roviny vzorku vůči iontovému svazku, což měnilo postavení krystalické struktury vůči dopadajícím iontům. To mohlo zapříčinit změnu signálu detekovaných rozptýlených iontů. Pro ověření této teorie by bylo vhodné provést strukturní analýzu při rotaci o celých 360°. Celý průběh signálu by se pak měl opakovat právě s periodou 360°.



Obr. 3.9 Simulace rozptylu iontů He^+ o energii 2 keV na krystalu Si(111) při azimutální rotaci. Simulace provedená na krystalu obsahujícím 249 atomů. Znázorněny jsou příslušné krystalografické směry při daných úhlech natočení. Převzato z [4].

Závěr

V této bakalářské práci byl představen původní návrh manipulátoru s šesti stupni volnosti, určený pro práci v ultravysokém vakuu. Byla provedena jeho realizace a na základě zkušeností z provozu navrženy úpravy manipulátoru, jež měly odstranit nedostatky původního návrhu. Úpravy se týkaly jak samotné konstrukce manipulátoru, tak i jeho příslušenství. V rámci úprav byla podle specifických požadavků navržena a do provozu uvedena nová Faradayova sonda pro použití na manipulátoru. Funkčnost sondy byla otestována pomocí iontového zdroje.

Hlavní pozornost byla věnována konstrukci manipulátoru, především řešení rotace vzorku pomocí krokového motorku, který pracoval uvnitř komory v podmínkách UHV. Pozorovány byly provozní charakteristiky původního řešení rotace a následně byla navržena nová stavba využívající třecích kontaktů. K návrhu byly vytvořeny výrobní výkresy jednotlivých součástí a ty zadány do výroby.

Pro ověření funkce a vlastností manipulátoru byla provedena strukturní analýza vzorku Si(111) metodou ToF-LEIS při azimutální rotaci. Výsledky byly porovnány s teoretickou simulací a posloužily jako ukazatele charakteristik manipulátoru.

Z důvodu poruchy zařízení SIMS nebylo možné provést hloubkové profilování s rotací vzorku, proto v textu této práce není metoda SIMS zmíněna.

Literatura

[1] JONNER, Jakub. *Analýza a modifikace tenkých vrstev pomocí iontových svazků*. Brno, 2010. 78 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Petr Bábor, Ph.D.

[2] FRANK, Luděk. *Metody analýzy povrchů: iontové, sondové a speciální metody*. Praha: Academia, 2002, 489 s. ISBN 80-200-0594-3.

[3] KOLÍBAL, Miroslav. *Analýza povrchů metodou LEIS*. Brno, 2002. 44 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Stanislav Průša.

[4] KOLÍBAL, Miroslav. *ToF-LEIS analysis of ultrathin films*. Brno, 2007. 86 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta Strojního inženýrství. Vedoucí práce doc. RNDr. Jiří Spousta, Ph.D.

Seznam příloh

Příloha na CD-ROM:

- Výkresová dokumentace ve formátu DWG
- Výkresová dokumentace ve formátu PDF