

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

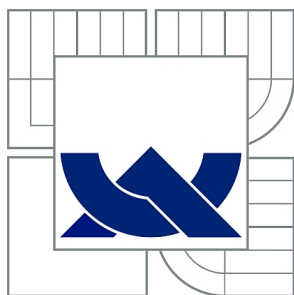
SESTAVENÍ A TESTOVÁNÍ NÍZKOTEPLITNÍHO MIKROSKOPU STM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

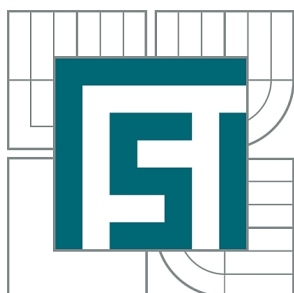
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ANTONÍN SOJKA

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



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

SESTAVENÍ A TESTOVÁNÍ NÍZKOTEPLTNÍHO MIKROSKOPU STM

ASSEMBLING AND TESTING OF LOW TEMPERATURE STM MICROSCOPE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ANTONÍN SOJKA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MICHAL PAVERA

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav fyzikálního inženýrství

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Antonín Sojka

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:

Sestavení a testování nízkoteplotního mikroskopu STM

v anglickém jazyce:

Assembling and testing of low temperature STM microscope

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bakalářská práce by měla navázat na diplomovou práci Ing. Tomáše Daa, která se zabývala konstrukcí nosné platformy STM mikroskopu. Cílem práce je kompletace navrženého mikroskopu a uvedení do provozu v prostředí ultravysokého vakua. Sestavený mikroskop bude připojen k řídicí jednotce a na vhodném vzorku otestován se softwarem GXSM. Zvláštní důraz bude kladen na způsob vkládání vzorků a hrotů do hlavy mikroskopu. Ve spolupráci s Ústavem přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. v Brně bude řešeno připojení nízkoteplotní části.

Cíle bakalářské práce:

1. Stručný popis principu STM a jeho konstrukce.
2. Sestavení mikroskopu STM a jeho uvedení do provozu.
3. Otestování funkčnosti v softwaru GXSM.

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá sestavením nízkoteplotního rastrovacího tunelového mikroskopu STM pracujícím v podmínkách ultravysokého vakua (UHV). Práce pojednává o propojení mikroskopu s elektronikou. Je popsán návrh teplotních stabilizátorů pro ustálení nízkých teplot po vychlazení mikroskopu spolu s konstrukcí rozšíření vakuové komory pro testování STM za nízkých teplot. Dále se zabývá o konstrukcí paletků pro transport vzorku a hrotu do mikroskopu. Na závěr tato práce podává stručný návod na ovládání softwaru GXSM a popisuje testování mikroskopu na vzduchu.

KLÍČOVÁ SLOVA

mikroskop STM , UHV, nízké teploty, transport vzorku, transport hrotu, teplotní stabilizátory, sestavení STM, GXSM, testování STM

ABSTRACT

This bachelor thesis addresses the problem of assembling the low temperature STM working in ultrahigh vacuum. The thesis deals with connecting the microscope and electronics. The desing of temperature stabilizers for fixing the low temperatures is described along with a construction of expanding the vacuum chamber to test STM in low temperatures. The thesis describes the construction of sample and tip holders to insert samples and tips into the STM. At the end there are brief instructions to use GXSM software and testing the microscope in atmospheric pressure.

KEYWORDS

STM, UHV, low temperatures, transport of sample, transport of tip, temperature stabilizers, assemble of STM, GXSM, STM testing

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Sestavení a testování nízkoteplotního mikroskopu STM“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Brno

.....
(podpis autora)

Poděkování

Děkuji svému vedoucímu Ing. Michalu Paverovi za trpělivost, vedení a rady při tvorbě této bakalářské práce. Dále děkuji Ing. Zdeňku Nováčkovi a Ing. Daliboru Šulcovi za cenné rady a pomoc při řešení dílčích problémů. Dále bych rád poděkoval své přítelkyni Dorce, která se mnou měla trpělivost a byla mi vždy velkou oporou. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině za jejich podporu a zázemí během studia.

Antonín Sojka

OBSAH

Úvod	1
1 Rastrovací tunelová mikroskopie	3
1.1 Vlnová funkce	3
1.2 Schrödingerova rovnice	3
1.3 Tunelový jev	4
1.4 Teorie STM	6
1.5 Srovnání STM s dalšími metodami	8
2 Konstrukce STM	11
2.1 Omezení přenosu vibrací	11
2.2 Konstrukční požadavky	13
2.3 Výběr materiálů vhodných do vakua	14
3 Popis nízkoteplotního UHV mikroskopu STM	15
4 Kompletace potřebných dílů pro použití STM v UHV	17
4.1 Paletka na vzorek	17
4.2 Vakuová pinzeta	18
4.3 Paletka na výměnu hrotu	20
4.4 Zásobník na paletky	21
4.5 Montážní stojan pro testování mikroskopu na vzduchu	22
4.6 Rozšíření vakuové komory pro odzkoušení STM při nízkých teplotách	23
5 Sestavení mikroskopu STM	25
5.1 Příprava mikroskopu pro použití za nízkých teplot	25
5.1.1 Stabilizace nízkých teplot	25
5.1.2 Snímače teploty	25
5.2 Montáž STM	26
5.3 Schéma zapojení STM	27
6 Testování funkčnosti STM	31
6.1 Přejezd hrotu ke vzorku pomocí makroposuvu	31
6.2 Seznámení s programem GXSM	31
6.3 Testování funkčnosti mikroskopu	33
6.4 Měření zlaté mřížky	33
6.5 Měření HOPG	34
Závěr	37
Literatura	39
Seznam zkratk	41
Seznam výkresů	43
Přílohy	45

ÚVOD

V roce 1972 Young a kol. sestrojili první mikroskop využívající tunelového jevu a rastrování. Jednalo se o tzv. topografiner [1], předchůdce tunelových rastrovacích mikroskopů. Ty využívají tunelového proudu, který se objevuje mezi kovovou sondou a vzorkem, jehož hodnota exponenciálně klesá se vzdáleností. Jejich topografiner mohl pracovat pouze v režimu autoemise. Kvůli nedostatečné odolnosti vůči vibracím byla vzdálenost sondy od vzorku od 10 do 100 nm [1]. V dalších letech Binnig a Rohrer v laboratořích IBM v Zurichu vylepšili tlumení vibrací. Díky tomu dokázali zredukovat vzdálenosti sondy od vzorku na přibližně 1 nm a tím měřit s rozlišením desetin nm [2]. Další inovace vedly ke zlepšení tvaru sondy, kdy na jejím konci měl být teoreticky jeden atom. Zúžením plochy vodivého kanálu dosáhli pomocí mikroskopu atomárního rozlišení. Díky vysokému rozlišení a možnosti naměřit topografii se stala tato metoda nejrychleji rozvíjenou technikou pro studium povrchů. V roce 1986 dostali Gerd Binnig a Heinrich Rohrer Nobelovu cenu za fyziku [3].

Rastrovací tunelový mikroskop (*Scanning Tunneling Microscopy* – STM) je označení pro typ mikroskopu, u kterého rozlišení není ovlivněno difrakčními limity [4]. To znamená, že rozlišení nezávisí na vlnové délce fyzikální sondy – světla nebo elektronu, ale na vzdálenosti sondy od povrchu vzorku.

Díky STM se brzy vyvinuly různé další rastrovací mikroskopie. Mezi nejznámější patří mikroskopie atomárních sil (*Atomic Force Microscopy* – AFM) [5]. Tato metoda umožňuje kvůli působení přitažlivých a odpuzivých sil v blízkosti sondy a vzorku naměřit topografii i nevodivých vzorků. To není u STM možné, protože mezi nevodivým vzorkem a hrotem nemůže téct proud. Další metody vyvinuté krátce po STM jsou například *Near-Field Scanning Optical microscopy* – NSOM, *Magnetic Force Microscopy* – MFM, *Electrostatic Force Microscopy* – EFM [5].

Cílem této bakalářské práce je navržení komponent pro použití STM ve vakuu. Jedná se zejména o problém přepravy vzorku a hrotu do měřicí hlavy mikroskopu uvnitř vakuové komory. Dále sestavení a testování nízkoteplotního ultravakuového STM spolu s navržením teplotních stabilizátorů.

Tato práce navazuje na diplomovou práci Ing. Tomáše Daa [6]. V první kapitole je stručně pojednáno o teorii tunelového jevu a je v ní také popsán základní princip měření STM spolu se srovnáním s ostatními rastrovacími metodami.

Ve druhé kapitole jsou popsány hlavní problémy konstrukce STM, mezi které patří tlumení přenosu vibrací, specifické požadavky na konstrukci a výběr materiálu do vakua.

Ve třetí kapitole je nízkoteplotní ultravakuový rastrovací tunelový mikroskop detailně popsán, zejména platforma pro tlumení kmitů a měřicí hlava mikroskopu.

Kapitola čtvrtá pojednává o návrhu dílů pro použití mikroskopu ve vakuu nebo pro usnadnění testování mikroskopu v atmosférických podmínkách. Jedná se o díly umožňující dopravu vzorku do mikroskopu, možnost výměny hrotu ve vakuu, manipulaci uvnitř komory s danými díly a o usnadnění montáže mikroskopu.

Další kapitola pojednává o sestavení mikroskopu STM. Řeší dílčí problémy, které se během montáže vyskytly a zabývá se nároky zařízení pro použití za nízkých teplot.

V poslední kapitole jsou shrnuty dosavadní výsledky testování mikroskopu a je představen software pro STM měření.

1 RASTROVACÍ TUNELOVÁ MIKROSKOPIE

Základem metod rastrování hrotem (Scanning Probe Microscopy – SPM) je hrot umístěný ve velmi malé vzdálenosti sondy od povrchu, kdy se začnou projevovat různé odpuzivé nebo přitažlivé síly či tunelování elektronů. Konkrétně u STM teče proud mezi hrotem a vzorkem, které jsou vzájemně vzdáleny několik nm nebo méně.

1.1 Vlnová funkce

Jev, ke kterému dochází mezi vzorkem a hrotem lze popsat pomocí kvantové mechaniky. V roce 1926 E. Schrödinger zveřejnil práci „Quantisierung als Eigenwertproblem“, se kterou položil základ vlnové kvantové mechaniky [7]. Vycházel z předpokladu Louise de Broglieho, který uvedl, že každé volné částici¹ je přiřazena funkce $\Psi(\vec{r}, t)$ ve tvaru rovinné monochromatické vlny [8]

$$\Psi(\vec{r}, t) = C \exp \left[-i \left(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} \right) \right], \quad (1.1)$$

kde C je amplituda vlny a $\vec{r}$ polohový vektor. Vztah úhlové frekvence ω a vlnového vektoru $\vec{k}$ mezi energií E a hybností $\vec{p}$ lze vyjádřit pomocí vztahů:

$$\omega = \frac{1}{\hbar} E, \quad (1.2)$$

$$\vec{k} = \frac{1}{\hbar} \vec{p}. \quad (1.3)$$

Tvrzení Luise de Broglieho říká, že se elektron (popř. částice) může chovat jako vlna. Toto tvrzení bylo dokázáno v roce 1927 tzv. Davisson-Gemmerovým experimentem [9].

Jelikož mluvíme o Ψ jako o vlnové funkci, musí Ψ splňovat typické vlastnosti vln jako je difrakce a interference. Davisson a Gemer pozorovali ve svém experimentu difrakci elektronů na krystalických rovinách monokrystalu niklu.

Vlnová funkce Ψ postrádá přímou fyzikální interpretaci. Významu nabude v Bornově pravděpodobnostní interpretaci, kde je kvadrát její absolutní hodnoty $|\Psi(\vec{r}, t)|^2$ úměrný pravděpodobnosti nalezení částice P v elementárním objemu $d\tau = dx dy dz$ v bodě $\vec{r}$ v čase t . Matematicky můžeme vztah vyjádřit jako

$$dP(\vec{r}, t) = |\Psi(\vec{r}, t)|^2 d\tau. \quad (1.4)$$

Pro pravděpodobnost nalezení částice v čase t v celém prostoru platí:

$$\iiint_{-\infty}^{\infty} |\Psi(\vec{r}, t)|^2 d\tau = 1, \quad (1.5)$$

částice se tedy zcela jistě někde nachází.

1.2 Schrödingerova rovnice

Jestliže se budeme zabývat hmotnými částicemi v silovém poli, musíme najít předpis, pomocí něhož jsme takovou vlnovou rovnici schopni nalézt. Vlnová funkce je řešením tzv. Schrödingerovy rovnice

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = \frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r}, t) \Psi(\vec{r}, t), \quad (1.6)$$

¹částice, na niž nepůsobí žádné vnější síly

kde m je hmotnost částice, V je potenciální energie a Δ je Laplaceův operátor.

Funkce Ψ popisuje stav částice za předpokladu, že vyhovuje nejen Schrödingerově rovnici, ale také musí splňovat následující podmínky [7]:

1. všude spojitá se všemi svými prvními derivacemi
2. jednoznačná
3. všude omezená

Za předpokladu, že potenciál V nezávisí na čase, lze nalézt řešení Schrödingerovy rovnice (1.6) pomocí separace proměnných

$$\Psi(\vec{r}, t) = f(t) \varphi(\vec{r}), \quad (1.7)$$

kde funkce f závisí pouze na čase t a φ na prostorových souřadnicích. Jestliže rovnici (1.7) dosadíme do rovnice (1.6), můžeme využít metodu separace proměnných. Pro funkci $f(t)$ vyjde rovnice

$$\frac{df(t)}{dt} = -\frac{i}{\hbar} E f(t), \quad (1.8)$$

a pro φ

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \varphi(\vec{r}) + V(\vec{r}) \varphi(\vec{r}) = E \varphi(\vec{r}). \quad (1.9)$$

Rovnice (1.9) pro prostorovou část $\varphi(\vec{r})$ vlnové funkce $\Psi(\vec{r}, t)$ je tzv. stacionární (bezčasová) Schrödingerova rovnice. Rovnice (1.8) má řešení

$$f(t) = \exp\left(-\frac{i}{\hbar} E t\right). \quad (1.10)$$

Přesné analytické řešení rovnice (1.9) je možné jen v pár případech, kde potenciál $V(\vec{r})$ má speciální tvar. V ostatních případech se musí rovnice řešit aproximativními metodami [7]. Úplné řešení časové rovnice je

$$\Psi(\vec{r}, t) = \varphi(\vec{r}) \exp\left(-\frac{i}{\hbar} E t\right). \quad (1.11)$$

1.3 Tunelový jev

Mikroskop STM je postaven na kvantovém tunelovém jevu, při kterém elektrony procházejí potenciálovou bariérou, která je vytvořena mezi velmi ostrým kovovým hrotem a vodivým povrchem vzorku. Uvažujme situaci, kdy elektron o energii E směřuje k potenciálové bariéře výšky V_0 a šířky a (obr. 1.1).

Pro náš případ si rozdělíme potenciál na tři základní oblasti, které budeme sledovat (obr. 1.1).

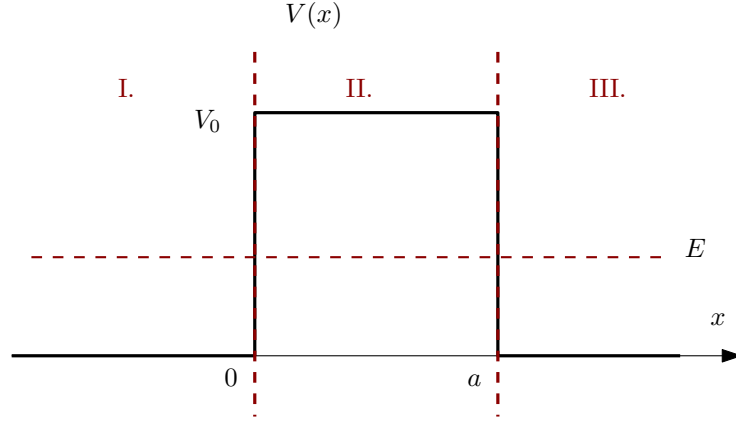
Elektron z oblasti I. se v důsledku tunelového jevu dostane přes potenciální bariéru v oblasti II. do oblasti III. Na hranicích oblastí musí platit spojitost vlnových funkcí a také jejich prvních derivací [7].

Nyní budeme hledat pro každou oblast řešení bezčasové Schrödingerovy rovnice. Pro zjednodušení budeme uvažovat situaci pouze v jenom směru, a tedy ve směru osy x . Z rovnice (1.9) jsme po úpravě získali

$$\frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} [E - V(x)] \varphi(x) = 0. \quad (1.12)$$

Pak lze nalézt řešení bezčasové rovnice pro v oblastech I., II. a III.

$$\Psi_I(x) = A \exp(ikx) + B \exp(-ikx), \quad (1.13)$$



Obrázek 1.1: Znázornění bariéry o potenciální energii V_0 v 2D prostoru a energii elektronu E . V oblasti II. dochází k tunelovému jevu.

$$\Psi_{\text{II}}(x) = C \exp(-\alpha x) + D \exp(\alpha x), \quad (1.14)$$

$$\Psi_{\text{III}}(x) = F \exp(ikx) + G \exp(-ikx). \quad (1.15)$$

Pro oblast I. a III. definujeme konstantu

$$k = \frac{\sqrt{2m(E - V_0)}}{\hbar} = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} > 0. \quad (1.16)$$

Jelikož je v daných oblastech hodnota potenciálu rovna nule, potenciál V_0 je v argumentu odmocniny redukován. Jiný případ nastává ve II. oblasti. Je-li energie elektronu E menší než potenciálová bariéra V_0 , pak $V_0 - E > 0$ a definujeme kladnou konstantu α :

$$\alpha = \frac{\sqrt{2m(V_0 - E)}}{\hbar} > 0. \quad (1.17)$$

V předchozích rovnicích se objevily konstanty A , B , C , D , a F . Ty se určí pomocí podmínek, které jsou kladeny na vlnovou funkci (strana 4):

$$\varphi_{\text{I}}(0) = \varphi_{\text{II}}(0) \quad \text{a} \quad \varphi_{\text{II}}(a) = \varphi_{\text{III}}(a), \quad (1.18)$$

$$\frac{d\varphi_{\text{I}}(x)}{dx}\bigg|_{x=0} = \frac{d\varphi_{\text{II}}(x)}{dx}\bigg|_{x=0} \quad \text{a} \quad \frac{d\varphi_{\text{II}}(x)}{dx}\bigg|_{x=a} = \frac{d\varphi_{\text{III}}(x)}{dx}\bigg|_{x=a}. \quad (1.19)$$

Dále ještě musíme uvážit podmínku omezenosti funkce φ . Jelikož uvažujeme vlnu přicházející zleva, dojde k jejímu průchodu a odrazu na rozhraní v poloze 0 a a (obr. č.1.1). V oblasti III. se již neodráží, proto je konstanta G rovna nule.

Dosazením rovnic (1.13), (1.14) a (1.15) do podmínky spojitosti (1.18) a podmínky spojitosti prvních derivací (1.19) plyne:

$$A + B = C + D, \quad (1.20)$$

$$ik(A - B) = -\alpha(C - D), \quad (1.21)$$

$$C \exp(-\alpha a) + D \exp(\alpha a) = F \exp(ika), \quad (1.22)$$

$$-\alpha(C \exp(-\alpha a) - D \exp(\alpha a)) = ikF \exp(ika). \quad (1.23)$$

Z těchto rovnic se mohou vyjádřit konstanty B , C , D , F pomocí konstanty A .
Pravděpodobnosti průchodu bariérou T je dána poměrem pravděpodobností

$$T = \frac{|\Psi_{\text{III}}(x)|^2}{|\Psi_{\text{I}}(x)|^2} = \frac{|F|^2}{|A|^2}. \quad (1.24)$$

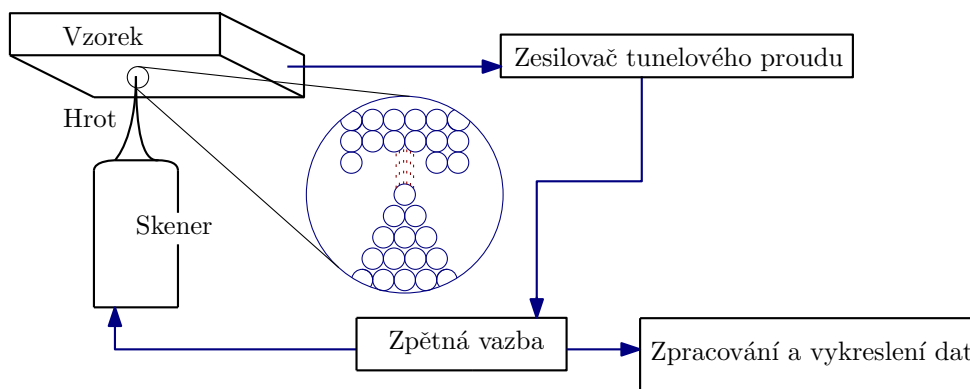
Po dosazení do rovnice (1.24) je pravděpodobnost průchodu bariérou T rovna [10].

$$T = \frac{16E}{V_0} \left(1 - \frac{E}{V_0}\right) \exp\left(-2\frac{\sqrt{2m(V_0 - E)}}{\hbar}a\right). \quad (1.25)$$

Z rovnice (1.25) plyne, že pravděpodobnost průchodu elektronu potenciálovou bariérou závisí exponenciálně na její šířce. Elektron je tak schopný s nenulovou pravděpodobností překonat bariéru s vyšším potenciálem než je jeho energie. To je podle klasické fyziky nemožné.

1.4 Teorie STM

Mikroskop je postaven na tzv. tunelovém jevu, kdy existuje nenulová pravděpodobnost, že se elektron dostane skrz potenciálovou bariéru. Tato bariéra vzniká mezi velmi ostrým hrotem a vzorkem, mezi které se přivede napětí. Díky tomu se usměrní tok elektronů jedním směrem. Přestože se jedná o volný nevodivý prostor, dokáže se elektron dostat ze sondy² na vzorek nebo obráceně. Další důležitou součástí mikroskopu STM je řídicí jednotka. Jedná se například o zesilovač tunelového proudu, díky kterému je možné tunelový proud vůbec zachytit. Jednotka zajišťující zpětnou vazbu dokáže kontrolovat polohu hrotu a vzorku. Všechna data jsou pak posílána a vyhodnocována pomocí počítače.

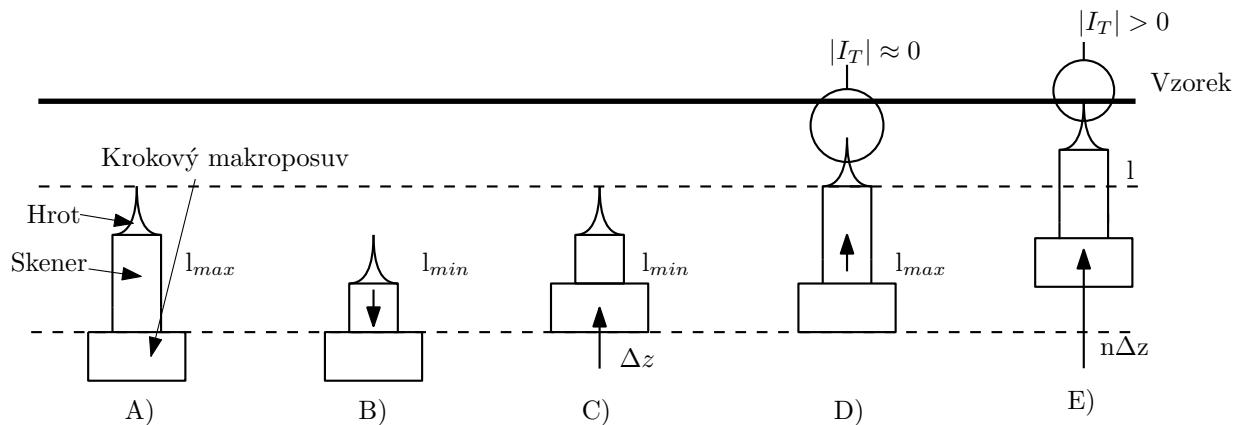


Obrázek 1.2: Schéma principu STM

Hroty se vyrábí například leptáním [11] nebo tzv. stříhem většinou z wolframu nebo slitin iridia a platiny. Vzorek musí být vodivý.

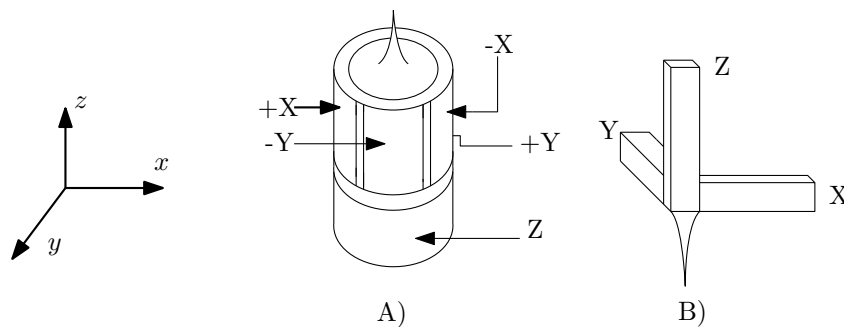
Hrot musí být přiblížen ke vzorku na několik desetin nm pro získání požadovaného tunelového proudu. Postup přiblížení je následovný. Nejprve se manuálně přijede hrotem ke vzorku na vzdálenost několika μm pomocí krokového makroposuvu. Další postup přibližování je automatizován (obr. 1.3). Skener, který je vysunutý na maximum (A), se stáhne na minim (B), potom udělá krokový makroposuv jeden krok Δz (C) a skener se pomalu vysouvá na maximum (D). Pokud nemáme mezi hrotem a vzorkem tunelovací proud, celý postup se n krát opakuje, dokud se na hrotu neměří požadovaný tunelový proud (E).

²V případě STM se sonda označuje jako hrot.



Obrázek 1.3: Znázornění automatického přiblížení hrotu ke vzorku

Skener je většinou vyroben z piezokeramického materiálu. Tyto materiály vykazují jev elektrostrikce. Při tomto jevu se kvůli napětí přivedenému na piezokeramiku mění její tvar. Proto je možné uskutečnit pohyb skeneru s přesností v řádech 10^{-3} nm. Existuje mnoho forem, jak uspořádat piezokeramické materiály pro vytvoření skeneru. Mezi nejznámější patří uspořádání ve tvaru trámečků, trubek a disků [5].



Obrázek 1.4: Znázornění dvou typů uspořádání piezoelektrických materiálů po vytvoření skeneru: A) trubkové uspořádání B) uspořádání pomocí trámečků do takzvané trojnožky.

Pravděpodobnost pohybu elektronu z hrotu na vzorek nebo obráceně je stejná. Po přiblížení bude probíhat tunelový jev oběma směry. Abychom usměrnili tok elektronů, přivádíme mezi hrot a vzorek napětí. Velikost hustoty tunelového proudu poté závisí na šířce tunelové bariéry a , na ostroti hrotu, použitém materiálu hrotu a vzorku. Důležitá je také obsazenost stavů v materiálech. Proudová hustota j je potom dána vztahem [12]:

$$j = K \frac{U_T}{a} \exp(-2\alpha a), \quad (1.26)$$

kde U_T je tunelovací napětí přivedené mezi hrot a vzorek a hodnota konstanty K je $6,30 \cdot 10^4 \text{ C}^2 \text{ s kg}^{-1} \text{ m}^{-3}$. Exponenciální funkce ve vztahu (1.26) udává pravděpodobnost průniku jednoho elektronu potenciálovou bariérou.

Výška potenciálové bariéry je při malých hodnotách napětí určena výstupní prací kovů. Pro vzdálenost několika desetin nm a vstupního napětí $U = 1 \text{ V}$ až 2 V je hodnota tunelového proudu

v řádech nA [5].

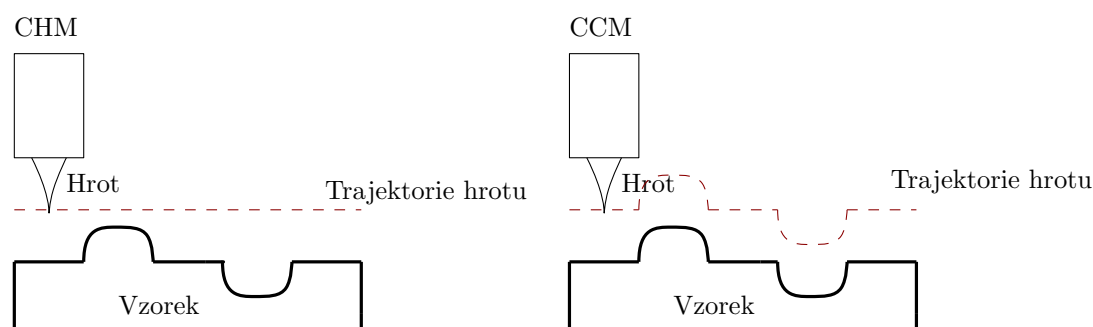
Pro měření topografie vzorku je potřeba ještě pohyb hrotu v rovině vzorku. Tento pohyb se uskutečňuje pomocí piezokeramických materiálů. Hodnota tunelového proudu je měřena v řádech nA. Tato hodnota se mění v závislosti na vzdálenosti hrotu od vzorku.

Velikost rozlišení se pohybuje přibližně kolem 0,01 nm [13]. Rozlišení dále závisí na konstrukci celého přístroje, zejména na přenosu a utlumení okolních vibrací, teplotní stálosti a přesnosti pohybu skeneru.

U STM se rozlišují dva režimy.

Režim konstantní výšky (Constant Height Mode – CHM) – hrot se pohybuje v konstantní výšce nad vzorkem. Měří se tunelový proud v závislosti na vzdálenosti hrotu od povrchu. Tato metoda je vhodná převážně pro atomárně rovné povrchy. Jestliže jsou na povrchu vzorku nerovnosti, může se stát, že hrot narazí do vyvýšeniny. Tím se může ztupit a stává se nepoužitelným pro celé měření. Někdy se naopak může objevit pod hrotem velká prohlubeň vzorku, čímž se zvětší tunelová bariéra a tunelový jev se přestane projevovat. Výhodou tohoto režimu je vysoká rychlost rastrování a velká citlivost na výchylku v ose z skeneru.

Režim konstantního proudu (Constant Current Mode – CCM) – Při měření se mezi hrotem a vzorkem udržuje konstantní hodnota tunelového proudu. Hrot kopíruje povrch vzorku. Jeho pozice se mění pohybem skeneru v závislosti na zpětné vazbě. Výchylka skeneru v ose z se použije pro znázornění topografie vzorku. Tato metoda je relativně pomalá kvůli závislosti na zpětných vazbách, ale daleko bezpečnější pro hrot.



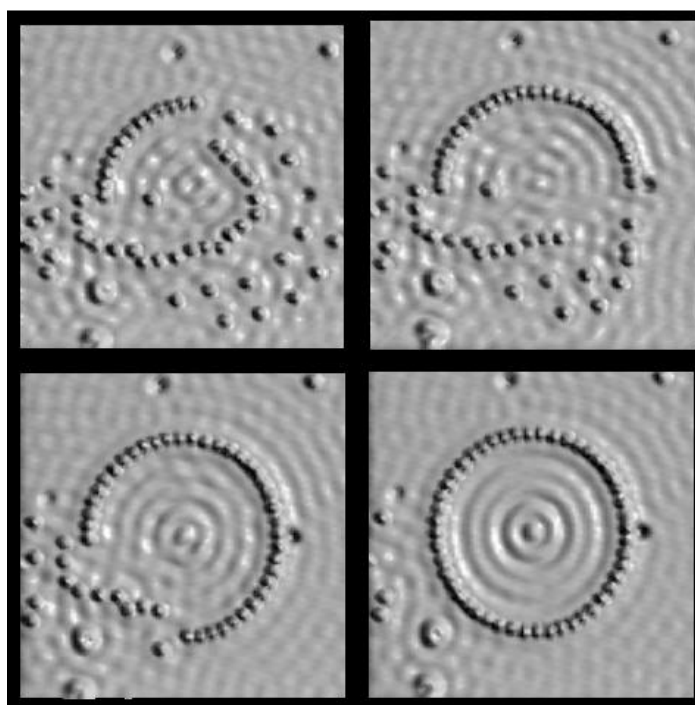
Obrázek 1.5: Znázornění režimů CHM a CCM.

1.5 Srovnání STM s dalšími metodami

Pro studium povrchů či tenkých vrstev existuje celá škála různých metod a zařízení, jak získat různé strukturní nebo chemické informace. Nejstarší metoda, která umožňovala se něco o struktuře tenkých vrstev dozvědět, se nazývá rentgenová difrakce [8].

I přes celou řadu jiných metod si STM uchovává svoji nezastupitelnost. Mezi nejznámější metody pro studium povrchů patří rastrovací elektronová mikroskopie (*Scanning Electron Microscope* – SEM), difrakce pomalých (*Low-Energy Electron Diffraction* – LEED) a rychlých (*High-Energy Electron Diffraction* – HEED) elektronů, mikroskopie atomárních sil (*Atomic Force Microscopy* – AFM) a další [14]. Mezi výhody STM patří například:

- STM je schopno zobrazit povrch s atomárním rozlišením, a to v reálném prostoru.
- STM dokáže pracovat v různých prostředích například ve vakuu, vzduchu, v kapalinách a za širokého rozsahu teplot. Vzorky navíc ve většině případů nejsou poškozeny a dají se znovu použít pro další měření.
- Jedinečnost STM spočívá v principu měření, kde se jedná o nedestruktivní metodu s atomární interakcí. Díky tomu je možné studovat jednotlivé atomy na povrchu, povrchové defekty a rekonstrukce.
- Pomocí STM lze studovat v reálném čase dynamiku řady procesů na povrchu vzorku.
- STM lze využít, díky interakci mezi hrotem a vzorkem, pro různé modifikace vzorku a pro manipulaci s atomy a molekulami. Díky vhodně zvolené hodnotě vstupních parametrů je potom možné dosáhnout přeskočení atomu ze vzorku na hrot a obráceně. Při využití hrotu jako manipulátoru je možné stavět atomovou strukturu atom po atomu (obr. 1.5).



Obrázek 1.6: Vytvoření kruhové „kvantové ohrady“ ze 48 atomů železa na povrchu mědi Cu(111) uspořádaných do kruhu o průměru 14,26 nm [15].

2 KONSTRUKCE STM

Pro dosažení atomárního rozlišení musí mikroskop splňovat přísné podmínky pro tlumení vibrací. Vzhledem k exponenciální závislosti tunelového proudu na vzdálenosti hrotu od vzorku (1.26 je možné dosáhnout vertikálního¹ rozlišení kolem 10^{-3} nm [5]. Tato hodnota je dána mechanickou stabilitou tunelové bariéry a také kvalitou hrotu. Stabilitu bariéry ovlivňuje celková mechanická tuhost konstrukce mikroskopu a míra tlumení vibrací.

Jedním z důvodů umístění mikroskopu do vakua je možnost měřit materiály, které by na vzduchu ihned zoxidovaly a na jejich povrchu by se vytvořila nevodivá vrstva. Čím lepší vakuum, tím méně částic se na vzorku usadí.

Nejčastěji využívaná vakua se dají rozdělit do tří skupin podle tlaku, který je ve vakuové komoře dosažen [16].

1. Nízké vakuum

Tlak ve vakuové komoře je $10^{-1} - 10^2$ Pa. Počet molekul v plynné fázi je větší než počet molekul ulpělých na součástech a stěnách komory.

2. Vysoké vakuum

Tlak ve vakuové komoře se pohybuje okolo $10^{-2} - 10^{-7}$ Pa. Molekuly plynu se většinou nacházejí na stěnách a součástech. Pro dosažení vakua se využívá vícestupňového čerpání pomocí vakuových vývěv [17].

3. Ultravysoké vakuum (*Ultra High Vacuum* – UHV)

K vytvoření se opět používá vícestupňové čerpání pomocí vakuových vývěv. Tlak se pohybuje v rozmezí $10^{-7} - 10^{-10}$ Pa. Pro uvolnění částic přilnutých na povrchu materiálů v komoře se pro dosažení UHV celá komora obvykle vypéká na 130 °C a více.

Mikroskop, kterým se tato práce zabývá, je navržen tak, aby byl schopný pracovat ve vakuu a při nízkých teplotách². Při nízkých teplotách by se měl například snížit teplotní drift³ na minimum. Bohužel nízké teploty a UHV vyžadují celou řadu nových konstrukčních přístupů.

Zejména se jedná o problémy spojené s přenosem tepla. Ve vakuu se teplo šíří zejména radiací nebo tepelným kontaktem. Z konstrukčního hlediska to znamená navrhnout mikroskop tak, aby chlazená část mikroskopu měla co nejmenší kontakt s okolím s výjimkou chladiče, který teplo z části odebírá. Další součástí konstrukce při nízkých teplotách by měl být radiační štít, který omezí příjem tepla měřicí hlavou. Další podmínky na konstrukci se týkají vakua. Musí se dbát hned na několik zásad, které zahrnují výběr materiálu a odlišné konstrukční postupy [18].

2.1 Omezení přenosu vibrací

Konstrukce mikroskopu zahrnuje návrh platformy, která by dokázala snížit přenos vnější vibrace. Tuto platformu navrhl v rámci své diplomové práce Ing. Tomáš Dao [6].

Hlavní zdroje vibrací, které mohou ovlivnit měření STM, jsou vibrace budov (1 – 25 Hz), otřesy způsobené chůzí (1 – 3 Hz) a pracujícími stroji (10 – 100 Hz) [13]. Na zařízení pracující na vzduchu

¹V ose skeneru z kolmo na vzorek.

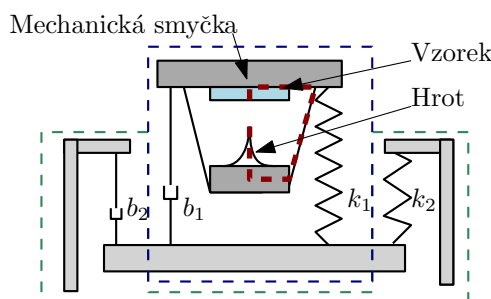
²Nízkou teplotou se zde myslí teplota kolem 20 K. Pro lepší přehlednost se v této práci budou udávat nízké teploty v Kelvinech.

³Vlivem teplotní roztažnosti se může hrot se vzorkem přibližovat (vzdalovat) a tím se zkreslí naměřené hodnoty.

mohou působit také akustické vibrace. Na ty jsou mikroskopy STM obzvláště citlivé, a proto se pro ně vyrábí speciální pláště nebo kryty, které mají přenosu tohoto typu vibrací zabránit.

Přenos vibrací z rámu mikroskopu na měřicí hlavu je příkladem tzv. nuceného kmitání, kdy rám kmitá na určité frekvenci a vibrace se přes různé vazby přenáší na hlavu mikroskopu. Přenosová funkce vibrací je definována jako podíl výstupní (vynucené) a vstupní (budící) amplitudy vibrací. U většiny přístrojů bývají předmětem zájmu vibrace v rozmezí 1 – 500 Hz [19]. Pro vibrace nižší než 1 Hz se chová materiál většinou jako pevné těleso a vliv vibrací je zanedbatelný. Při frekvenci vyšší než 500 Hz se jedná o velmi malé amplitudy. V případě mikroskopu se však projeví i tyto vibrace. Nízkofrekvenční vibrace se dají dobře tlumit pomocí pevného uložení hlavy se vzorkem. Pro tlumení vysokých frekvencí se využívá vícestupňová izolace.

Z hlediska funkce rastrovacího mikroskopu je kritický pohyb vzorku proti hrotu [33]. To může ovlivnit vertikální rozlišení mikroskopu. Proto se vyžaduje, aby mechanická smyčka mikroskopu byla co nejkratší. Mechanická smyčka je nejmenší mechanická vzdálenost, která vede od hrotu ke vzorku (obr. 2.1).



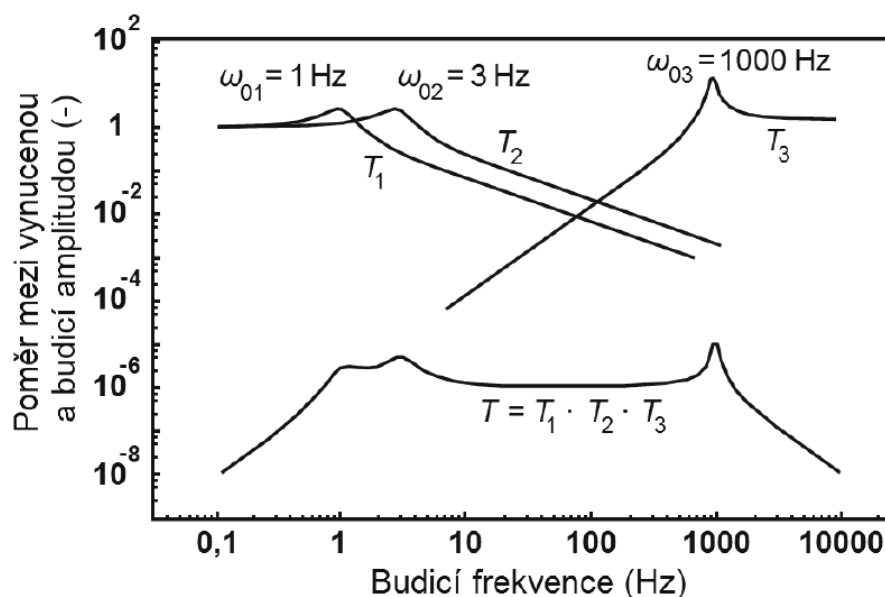
Obrázek 2.1: Model dvoustupňového tlumení přenosu vibrací (k – tlumení realizováno pomocí mechanických pružin, b – magnetické tlumení). První stupeň je znázorněn zeleně, druhý stupeň modře. Mechanická smyčka je znázorněna červeně.

Pokud je soustava (mechanická smyčka) dostatečně tuhá, bude hrot kmitat ve stejné fázi a se stejnou amplitudou jako vzorek. Problém nastane, pokud bude mít vzorek fázi posunutou vůči hrotu nebo jinou amplitudu. To může znemožnit měření nebo v extrémním případě vést ke zničení hrotu.

Obrázek 2.2 znázorňuje poměr přenosu vibrací z rámu mikroskopu na měřicí hlavu v závislosti na budící frekvenci rámu. Přenosová funkce T_3 znázorňuje situaci pevného spojení hlavy mikroskopu se vzorkem. Křivky T_1 a T_2 znázorňují přenosovou charakteristiku pasivního tlumení. Při kombinaci těchto tří funkcí vznikne celková funkce T . Obecně můžeme říct, že křivka pro funkci T znázorňuje ideální poměr mezi vynucenou a budící amplitudou. Takový poměr je dostačující pro získání atomárního rozlišení [33].

Konstrukčně je pasivní tlumení realizováno různými způsoby. Celý systém může být umístěn na gumových nebo nafukovacích podpěrách. Další možností jsou pneumatické pružiny jako například vzduchové válce [19]. Další typ pasivního tlumení může být realizován mechanickými pružinami nebo magnetickým tlumením pomocí vířivých proudů [20] (obr. 2.1).

Pasivní tlumení může být také součástí mikroskopu. Nejčastěji se používají tlačné nebo tažné pružiny. Výhodou pružin je jejich spolehlivost, snadná konstrukce a nízká pořizovací cena.



Obrázek 2.2: Poměr mezi budící a vynucenou amplitudou. Přenosová funkce pro dvoustupňové tlumení T_1 a T_2 s funkcí pevného spojení měřicí hlavy se vzorkem T_3 . Výsledná funkce T je jejich kombinací. Převzato z [14].

2.2 Konstrukční požadavky

Mezi nejdůležitější požadavky na konstrukci součástí do UHV a nízkých teplot patří výběr vakuově kompatibilních materiálů, zamezení vzniku virtuálních netěsností a zamezení přenosu tepla kondukcí.

Virtuální netěsnosti

Při konstrukci součástí se musí zamezit vzniku vzduchových kapslí. Ty vznikají například pod šrouby v závitových dírách. Ze vzduchových kapslí při odčerpání vzduchu z komory začnou unikat částice. Tato situace se může jevit jako netěsnost celého vakuového systému a výrazně navýší dobu pro vytvoření vakua. Při návrhu součástí do vakua se musíme vyhnout uzavřeným prostorům, ve kterých by mohla vznikat vzduchová kapsle. Je-li potřeba umístit do vakua slepou díru⁴ pro šroub, dá se jednoduše problému vyhnout provrtáním celého šroubu. Tím vznikne kanálek, odkud může plyn unikat z díry. U polouzavřených součástí například u různých krytů atd., je potřeba pamatovat na čerpací otvory určené k odčerpání zbytkové atmosféry.

Tepelná izolace funkčních součástí

Ve vakuu se teplo šíří převážně radiací a vedením. Teplo může být povrchem tělesa vyzářeno nebo absorbováno. Přenos tepla prostřednictvím proudění je v podmínkách UHV díky nízkému počtu částic prakticky zanedbatelný. Z těchto důvodů se podmínky UHV hodí mimo jiné pro práci ve velmi nízkých teplotách. Proto pro konstrukci nízkoteplotních součástí stačí zamezit přenosu tepla zářením, tzv. radiací a kontaktem těles, tzv. kondukcí [21].

⁴Jedná se o díru končící v materiálu.

2.3 Výběr materiálů vhodných do vakua

Požadavky, kladené na vlastnosti materiálů používaných ve vakuové technice, se značně liší od požadavků kladených v běžné strojírenské výrobě. Především se jedná o výběr vakuově kompaktního materiálu.

Mezi hlavní kritéria výběru materiálu pro použití ve vakuu patří v první řadě schopnost materiálu propouštět, absorbovat nebo desorbovat plyny. Mezi další vlastnosti patří tepelná vodivost nebo mechanická odolnost.

Nízká desorpce plynů z materiálu

Porézní materiály⁵ nebo materiály s vysokým obsahem plynu se při nízkých tlacích stávají zdrojem plynů. To může výrazně prodloužit dobu pro vytvoření požadovaného vakua nebo dokonce zamezit jeho vytvoření. Takové materiály nejsou vhodné, a proto je dobré se jim při výběru vyhnout.

Tepelná odolnost

Součásti ve vakuu budou kvůli vypékání vakuové komory zahřívány na teplotu 130 °C a více. Použité materiály tak musí být vůči této teplotě natolik odolné, aby si zachovaly mechanické vlastnosti na požadované úrovni.

Při volbě materiálů je potřeba sledovat případně i jejich elektrické či magnetické vlastnosti. Nejčastěji užívané materiály jsou kovy⁶, sklo, vybrané keramické materiály a pouze pár zástupců polymerů jako jsou PEEK – *Polyether Ether Ketone* nebo Kapton⁷ [16]. Rozdělení z hlediska zásadních vlastností materiálu jsou uvedeny v tab. 2.1:

	Obrobitelnost Zpracování	Chemická odolnost	Teplotní roztlačnost	Tepelná vodivost	Elektrická vodivost	Teplotní odolnost
Ocel	+	–	0	0	0	–
Nerezová ocel	0	+	–	(+)	0	–
Hliník/dural	+	–	–	0	+	–
Měď	0	–	–	+	+	0
CuZrCr	+	–	–	0	0	0
Invar	0	0	+	0	0	0
Molybden	+	+	+	0	0	+
Tantal	0	0	+	0	0	+
Titan	–	+	+	0	0	0
Teflon	+	+	–	(+)	(+)	0
Macor	0	0	0	–	+	+
Safír	–	+	+	+	(+)	+

Tabulka 2.1: Přehled vlastností materiálů. „+“ - materiál vyniká v této oblasti, „0“ - materiál má v dané kategorii průměrné nebo nepodstatné vlastnosti, „–“ - materiál v dané oblasti vykazuje neuspokojivé vlastnosti, „(+“ - materiál se naopak využívá jako izolant. Převzato z [22]

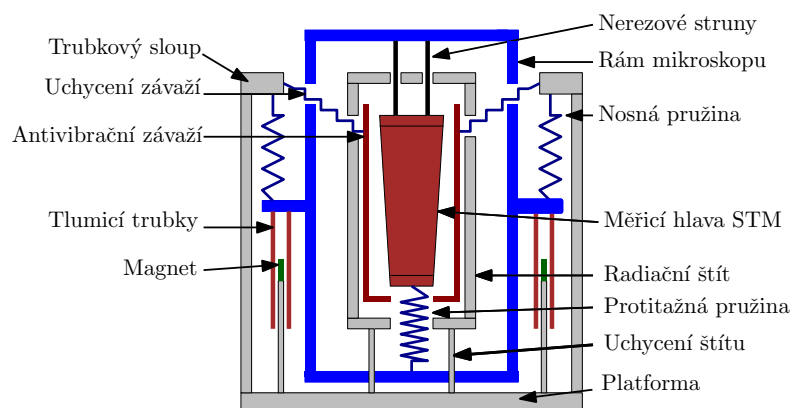
⁵Materiály mající póry, například kovové pěny

⁶ Díky povrchové úpravě jako je pozinkování lze umístit do vakua i kovy které by za normálních okolností nebylo možné použít.

⁷Kapton je obchodní název pro polyimid a Teflon pro polytetrafluorethylen firmy DuPont.

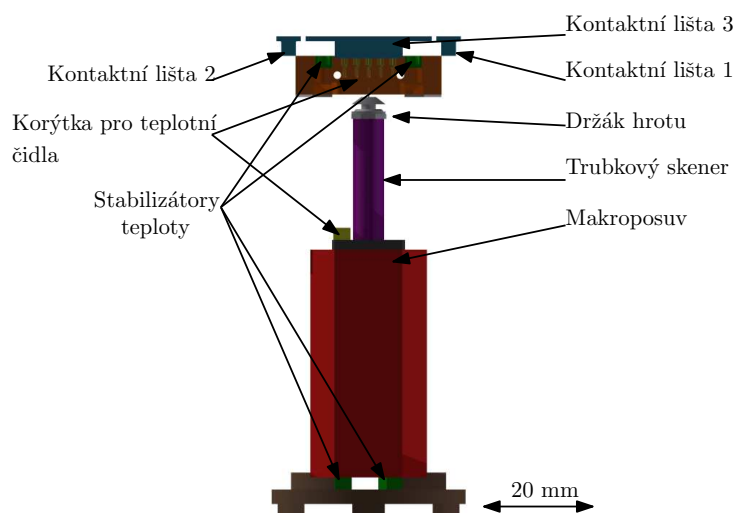
3 POPIS NÍZKOTEPLOTNÍHO UHV MIKROSKOPU STM

Platformu pro tlumení vibrací navrhl a nechal vyrobit ve své diplomové práci Ing. Tomáš Dao [6].



Obrázek 3.1: Schéma platformy pro tlumení kmitů pro STM spolu s radiačním štítem.

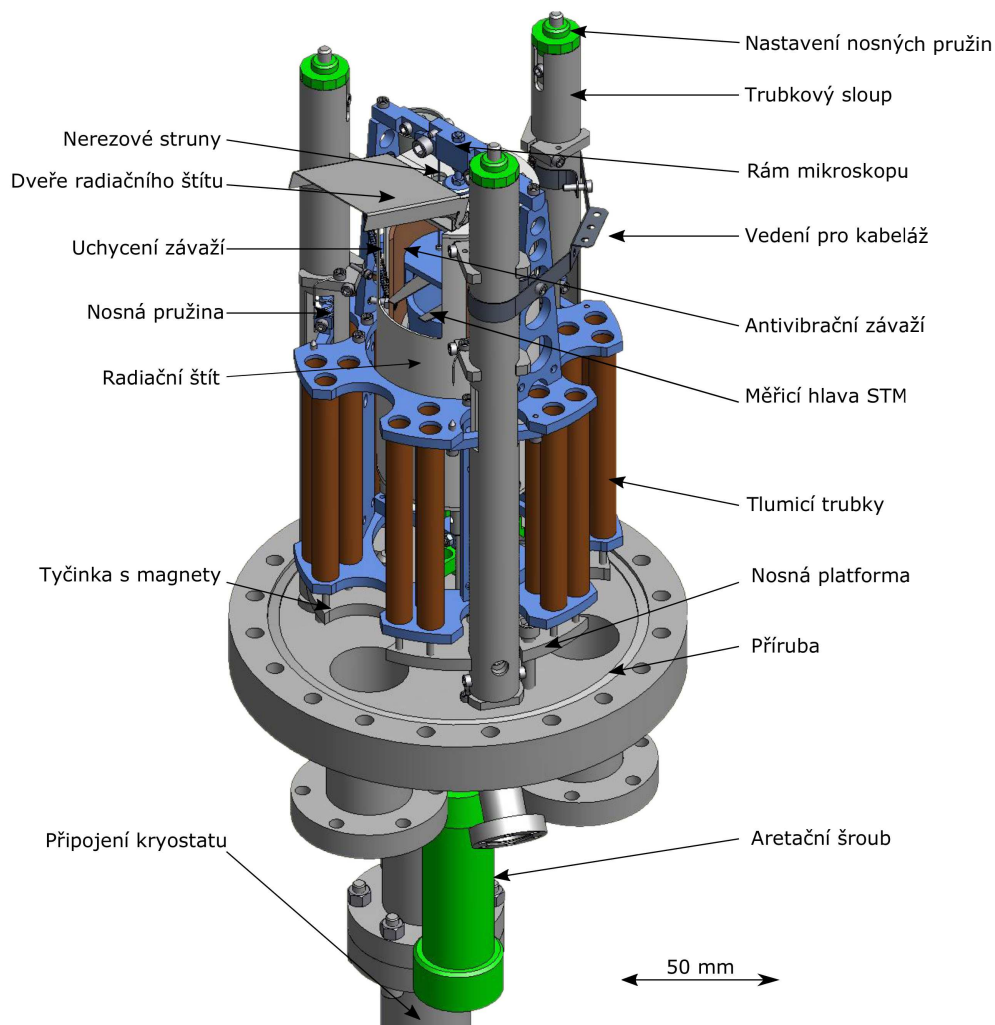
Mikroskop se skládá z několika částí. Měřicí hlava je zavěšena pomocí nerezových strun za rám mikroskopu a je předeprnuta pomocí tažné pružiny. Rám mikroskopu visí přes nosné pružiny připojené na trubkové sloupky stojící na platformě. Celá měřicí hlava je uzavřena do radiačního štítu, který je připevněn k platformě. Funkcí radiačního štítu je zamezit šíření tepla vyzářeného nebo absorbovaného měřicí hlavou a tím usnadnit vychlazení mikroskopu. Mezi měřicí hlavou a radiačním štítem je umístěno antivibrační závaží, které je zavěšeno na pružinách za trubkový sloup. Antivibrační závaží je součástí mikroskopu kvůli tlumení přenosu vibrací z braidů¹. Pro zlepšení tlumení vibrací jsou na rámu umístěny měděné trubky. Z platformy vedou do trubek nerezové tyčinky s magnety. Při pohybu proto v mědi vznikají vířivé proudy.



Obrázek 3.2: Měřicí hlava mikroskopu STM bez pláště.

¹Mikroskop bude prochlazován díky odběru tepla přes tepelný výměník za pomoci měděných drátů (braidů) připevněných na mikroskop.

Celá funkční část včetně vzorku, piezokeramických motorů, hrotu se nachází uvnitř měřicí hlavy mikroskopu. Skener, makroposuv a dva teplotní stabilizátory se nacházejí ve spodní části měřicí hlavy. V horní části se nachází držák pro nosič vzorku, kontaktní lišty, ke které je připojena kabeláž od vzorku, teplotních čidel a stabilizátorů teploty. Kontaktní lišta 3 je vybavena piny pro připojení elektrických kontaktů nosiče vzorku. Měřicí hlavu navrhl v rámci své dizertační práce Ing. Michal Pavera.



Obrázek 3.3: Model nosné platformy STM.

4 KOMPLETACE POTŘEBNÝCH DÍLŮ PRO POUŽITÍ STM V UHV

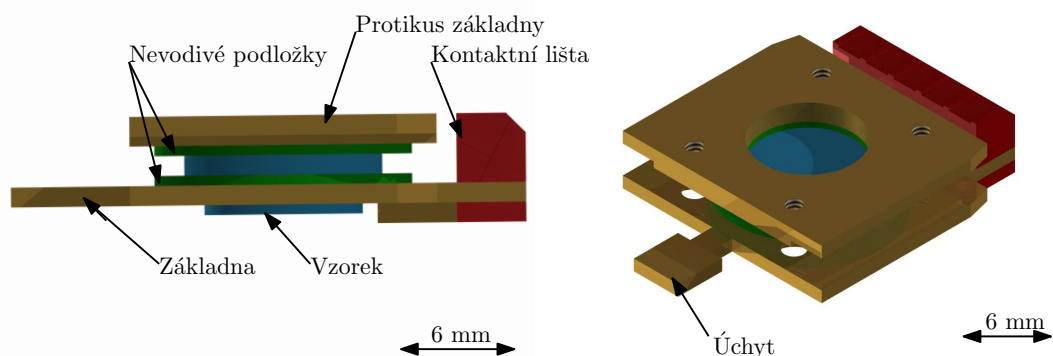
Pro praktické použití STM v UHV komoře bylo třeba zajistit možnost přesunu vzorku a hrotu do mikroskopu a opačně. Ve vakuové komoře se nalézal starý systém paletky spolu se zásobníkem a manipulátorem. Tento systém musel být přepracován kvůli velikosti stávajících paletek, které nejsou vhodné pro vkládání vzorku do mikroskopu, a kvůli složité výrobě paletek. Proto bylo zapotřebí navrhnout nový systém přepravy paletky s hrotem a vzorkem dovnitř mikroskopu, zásobník na tyto paletky a montážní stojan pro usnadnění měření. Nejdůležitější díly, které byly navrženy a vyrobeny, jsou v kapitole popsány. U každého dílu jsou zmíněny specifické požadavky a konstrukční řešení.

V kapitole se budou vyskytovat modely součástí vytvořené v programu Autodesk Inventor 2015 professional [23].

4.1 Paletka na vzorek

Paletka pro STM je kompatibilní s transportním systémem společnosti Specs, který bude použit ve vakuovém systému v laboratoři CEITEC. Paletka zajišťuje základní dopravu a manipulaci se vzorkem uvnitř komory.

Požadavky: Nejdůležitějším požadavkem bylo elektricky izolovat vzorek od zbytku základny. Dále musí být paletka teplotně odolná, protože je zásadní, aby vydržela žíhání o teplotě více jak 300°C a ochlazení na teplotu kolem 20 K. Důležitým aspektem návrhu byla volba vhodného materiálu, ten si musí zachovávat mechanické vlastnosti při teplotních extrémech a zároveň musí být výborným tepelným vodičem, aby bylo možné ochladit vzorek. Je nutné, aby paletka měla úchyt, který by umožňoval její snadné uchycení a manipulaci ve vakuu, dále musí být paletka kompatibilní s transportním systémem vakuové komory. Musí také obsahovat kontaktní lištu pro přivedení napětí na vzorek přes lištu s piny v měřicí hlavě mikroskopu (obr. 3.2).

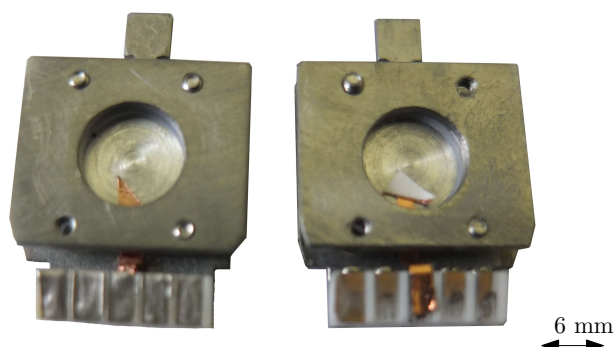


Obrázek 4.1: Model paletky se vzorkem a popisy jednotlivých částí.

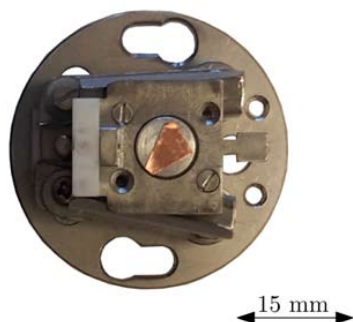
Řešení: Celá paletka byla vyrobena podle obrázku 4.1. Základna a její protikus jsou vyrobeny z molybdenu pro jeho tepelnou vodivost a mechanickou odolnost. Nevodivé podložky jsou vyrobeny

ze safíru kvůli výborné tepelné vodivosti. Kontaktní lišta byla vyrobena z Macoru jako elektrický izolant, pro teplotní odolnost a snadnou obrobitelnost.

Kontakty na kontaktní liště byly vyrobeny více způsoby (4.2). Nejdříve se pomocí zařízení Kaufman deponovala dvouvrstva titan zlato. Tato vrstva se ale po několika použití z lišty seškrábala. Druhým způsobem bylo připevnění měděných pásků. Ty byly po několika použití zdeformovány. Finální řešením bylo vytvoření kontaktů pomocí vodivého epoxidového lepidla H22 [29]. Díky lepidlu vznikly kontakty s výbornou vodivostí a tvrdostí.



Obrázek 4.2: Znázornění vyrobených paletek. Na paletce vpravo lze vidět neúspěšný pokus vytvořit kontakty na kontaktní liště deponováním a měděnými páskami. Na paletce vlevo jsou vytvořeny kontakty epoxidovým lepidlem E22.



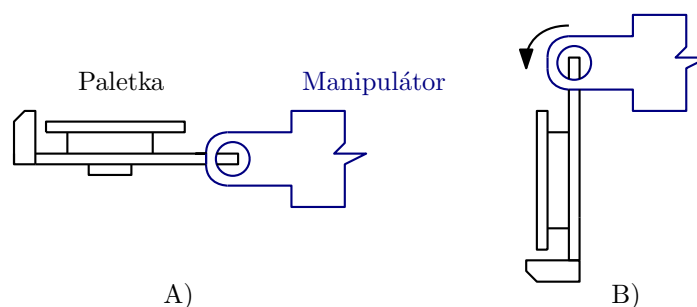
Obrázek 4.3: Paletka v transportní součásti vakuové komory.

4.2 Vakuová pinzeta

Hlavním důvodem pro návrh vakuové pinzety je možnost manipulovat bezpečně s paletkami ve vakuové komoře. Součástka by měla být připojena na manipulátor¹, který je součástí komory.

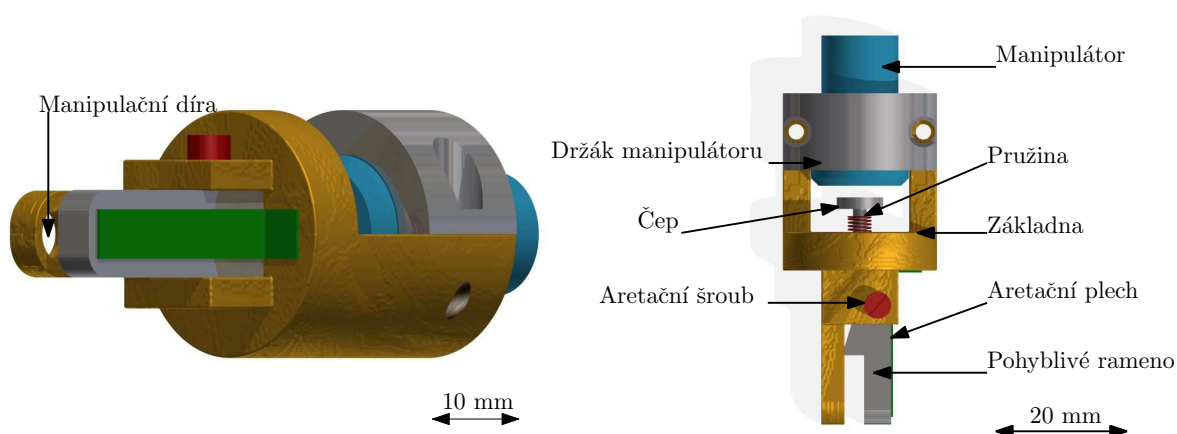
Požadavky: Na manipulátor jsou kladeny různé funkční a konstrukční nároky. Musí být schopen uchopit paletku ve vodorovné poloze a vložit ji do mikroskopu nebo zásobníku na paletky z polohy vertikální (obr. 4.4).

¹ Jedná se o komerčně zakoupenou součást, která umožňuje ruční manipulaci v komoře. [24]



Obrázek 4.4: Schema nabírání/zakládání paletky pomocí manipulátoru. A) Poloha nabírání paletky v mikroskopu, B) poloha paletky pro zakládání do mikroskopu nebo do transportního systému.

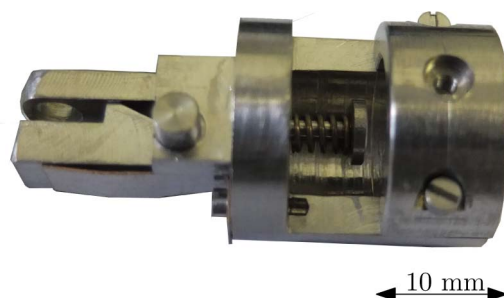
Dále by za pomoci manipulátoru měla jít zavírat dvířka radiačního štítu mikroskopu (obr 3.3).



Obrázek 4.5: Model manipulátoru

Řešení: Celý manipulátor je vyroben z nerezové oceli. Paletka bude pomocí ramen zajištěna proti vypadnutí, ale není zajištěna proti pohybu rotace kolem osy manipulační díry (obr. 4.4). To umožní její uchycení ve vodorovné a zakládání ve vertikální poloze. Manipulační díra slouží kromě zajištění paletky také k uzavření dveří radiačního štítu (obr. 3.3).

Postup vkládání a odejmutí paletky je následující. Při zmáčknutí tlačítka na vzduchové straně vakuové pinzety se z jeho konce ve vakuu (na obrázku (4.5) označeno jako vakuová pinzeta) vysune kolík ve tvaru válce. Ten zatlačí do vyrobeného čepu, který přes otvor v základně zatlačí na zkosenou plochu u pohyblivého ramena. Vznikne prostor pro založení nebo vysunutí manipulačního konce paletky (úchyty). Při puštění tlačítka na vzduchové straně se rameno uzavře, a tak se paletka zajistí pro bezpečnou manipulaci. Díky pružině se čep vrátí do původní polohy. Aretační plech z fosforbronzu zase zajistí, že se ramena neuvolní a zajistí tak paletku. Při vyjmutí paletky se celý proces opakuje.

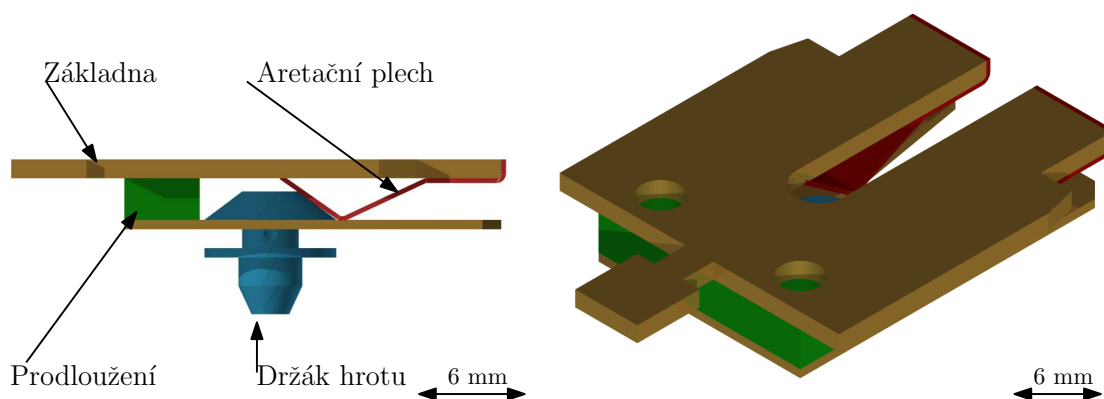


Obrázek 4.6: Vyrobený manipulátor

4.3 Paletka na výměnu hrotu

Mikroskop je pevně uzavřen ve vakuové komoře, a proto bylo potřeba zajistit také výměnu hrotu, aniž by se musela vakuová komora otevírat.

Požadavky: Jako nejdůležitější požadavek bylo potřeba zajistit bezpečnost hrotu při přepravě transportním systémem vakuové komory a při vkládání paletky do měřicí hlavy mikroskopu. Paletka musí být kompatibilní s vakuovou pinzetou a s přepravným systémem vakuového systému. Bylo potřeba zvolit univerzální tvar paletky tak, aby se jedním dílem dalo hrot vyjmout i vložit dovnitř mikroskopu.



Obrázek 4.7: Model paletky na hrotu se zasunutým hrotem.

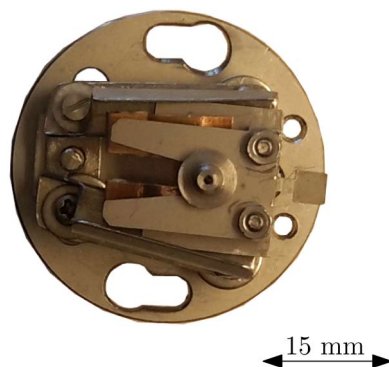
Řešení: Protože na materiály, kromě požadavků vakua, nebyly u této paletky (obr. 4.7) žádné nároky, všechny díly kromě aretačních plechů jsou vyrobeny z nerezové oceli. Aretační plechy jsou vyrobeny z fosforbronzu pro svou výbornou pružnost. Kvůli zabezpečení hrotu bylo rozhodnuto, že se bude z STM vytahovat celý držák hrotu spolu s hrotem. Pro ještě větší bezpečnost hrotu byla vypálena drážka v základně. Paletka na výměnu hrotu má stejný úchyt pro vakuovou pinzetu jako paletka se vzorkem (obr. 4.1).

Postup vytahování hrotu je následující. Díky makroposuvu vyjede skener spolu s držákem hrotu do nejvyšší polohy (obr. 3.2). Držák hrotu je zasunutý v pouzdře ve skeneru. Paletka na hroty se vloží do STM. Při vkládání se hrot zasune pod aretační plechy. Skenerem se stáhne, držák hrotu

zůstává v paletce a lze jej vyjmout z STM. Stejným způsobem ale v obráceném pořadí je možné hrot vkládat. Pro vkládání a odebrání paletky z STM je použita vakuová pinzeta připevněná na manipulátoru (obr. 4.5).



Obrázek 4.8: Znázornění modelu paletky na hrotu v poloze se zasunutým hrotem.



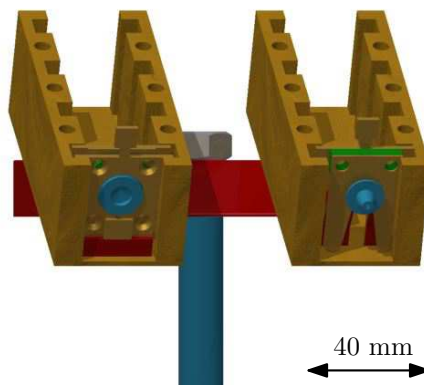
Obrázek 4.9: Paletka spolu s hrotem v transportní součásti.

4.4 Zásobník na paletky

Pro výměnu vzorku a hrotu byl pro paletky navrhnout zásobník. V komoře se vyskytuje zásobník (tzv. karusel) pro předešlý mikroskop, který v rámci své diplomové práce navrhl a nechal vyrobit Michal Geryk [25]. Nový typ paletek s ním ale není kompatibilní, a proto musí být vyměněna.

Požadavky: Zásobník musí zabírat co nejméně místa, aby neomezoval ostatní přístroje nacházející se v komoře. Musí být schopen uložit jak paletky se vzorkem, tak paletky s hrotem. Kapacita uložených paletek by měla být srovnatelná s původním karuselem. Zakládání a vyjmutí paletek se musí realizovat za pomoci manipulátoru.

Řešení: Součástka je navržena tak, aby velikost nových zásobníků a umístění bylo stejné jako u původního karuselu [25]. Díky tomu zásobník neomezuje funkčnost ostatních přístrojů v komoře. Upevněním v komoře bude zásobník mírně nakloněný pro pohodlnějšímu zakládání a vytahování paletek pomocí manipulátoru. Zásobník je schopný pojmout až osm paletek, přitom do každého místa je možné uložit jak paletu na hroty, tak paletku na vzorek.



Obrázek 4.10: Model dvou zásobníků na paletky připevněný na závitové tyči spolu s paletkami.



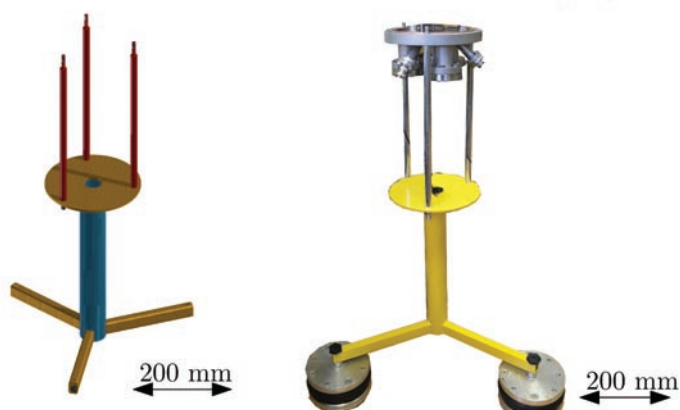
Obrázek 4.11: Model vyrobeného zásobníku s vloženými paletkami se vzorkem a držákem hrotu.

4.5 Montážní stojan pro testování mikroskopu na vzduchu

Pro testování mikroskopu na vzduchu se musel navrhnout systém, který by umožňoval připojení vakuových průchodek spolu s lineárním posuvem a zároveň umožňoval testování mikroskopu.

Požadavky: Na stojan byla kladena podmínka dostatečné nosnosti a stability. Pro lepší tlumení vibrací by měl stojan obsahovat pasivní tlumení.

Řešení: Stabilita je zajištěna postavením stojanu na třech nohách. Svařením součástí je zaručena dostatečná nosnost. Stojan se vyráběl z běžně dostupné svařitelné oceli s označením 11 373 [26]. Celý systém stojí na vzduchových podložkách pro tlumení vibrací. Tělo stojanu je opatřeno trubkou, do které by se v budoucnu mohl umístit pneumatický systém pro snadné namontování mikroskopu do vakuové komory.

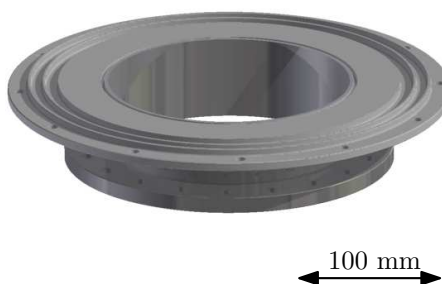


Obrázek 4.12: Vlevo model montážního stojanu a vpravo vyrobený stojan spolu s přírubou mikroskopu postavený na vzduchových vacích.

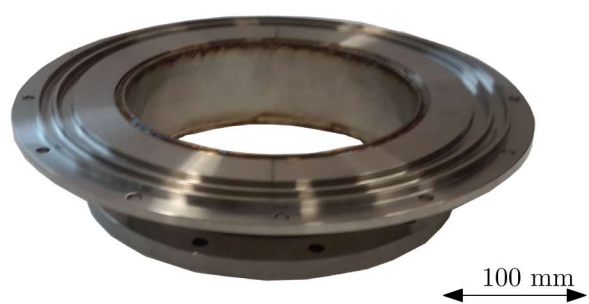
4.6 Rozšíření vakuové komory pro odzkoušení STM při nízkých teplotách

Jedná se o prodloužení zkoušecí komory, kterou v rámci své diplomové práce navrhl Ing. Jakub Voňka [17]. Testovací komora byla určena pro jiný mikroskop, a tak ji není možné připojit na přírubu STM mikroskopu. Proto bylo zapotřebí vytvořit přechodovou část, která by spojovala přírubu mikroskopu se zkušební komorou.

Tato součást neměla žádné speciální požadavky, kromě požadavků vakuových systémů, jako je spojení dvou vakuových částí, možnosti těsnění komory a výběr materiálu. Proto byla komora vyrobená z kompatibilní nerezové oceli, na obou stranách byla vyrobena drážka pro těsnění gumovými o-kroužky.



Obrázek 4.13: Model součásti pro rozšíření vakuové komory.



Obrázek 4.14: Vyrobená součást pro rozšíření vakuové komory.

5 SESTAVENÍ MIKROSKOPU STM

Většina částí mikroskopu na obr. 3.3 byla vyrobena Ing. Tomášem Daem. Zbývající části byly vyrobeny a celý STM mikroskop byl zkompleťován. Při kompletaci měřicí hlavy se musely navrhnout a vytvořit teplotní stabilizátory pro snadnou regulaci nízkých teplot. Dalším krokem bylo elektricky propojit měřicí hlavu mikroskopu s elektronikou přes vakuové průchody.

Při kompletaci mikroskopu bylo přepracováno mnoho různých částí mikroskopu, které nesplňovaly potřebnou funkci, a proto musely být upraveny. Dílů bylo velké množství, proto není relevantní je zde uvádět.

5.1 Příprava mikroskopu pro použití za nízkých teplot

Za nízké teploty jsou považovány teploty blízké bodu varu dusíku či hélia. Takové teploty se dá dosáhnout ve vakuu pomocí zařízení zvaných kryostaty [17]. Pro dosažení nízké teploty na mikroskopu za rozumnou dobu je třeba omezit kontakt mezi částí mikroskopu, která má být ochlazena, a okolím. V případě našeho STM je hlava mikroskopu zavěšena na dvou tenkých nerezových strunách a kolem celé hlavy je navíc umístěn radiační štít (obr. 3.1).

Pro použití STM v nízkých teplotách (~ 20 K) bylo potřeba vyřešit několik dílčích problémů. Mezi tyto problémy patří účinná stabilizace teploty při nízkých teplotách, rozšíření komory pro testování vychlazení mikroskopu (obr. 4.14), výběr teplotních senzorů pro měření v UHV. Tato část vznikala převážně ve spolupráci s Ing. Pavlem Urbanem, Ph.D..

5.1.1 Stabilizace nízkých teplot

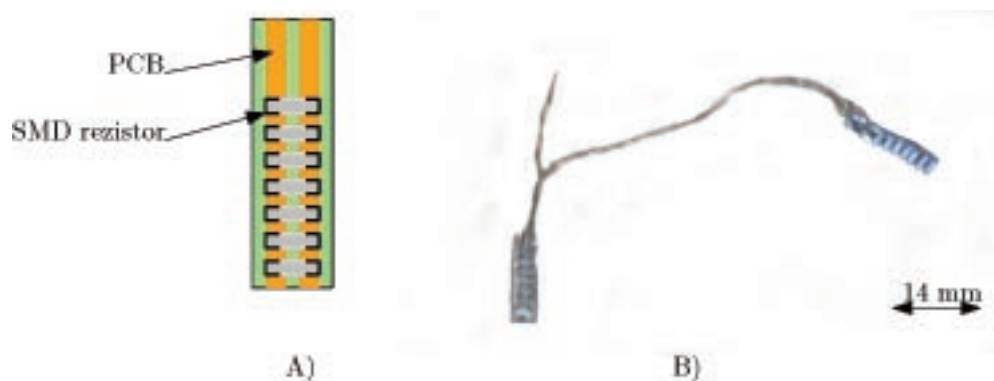
Z důvodu použití proudění kapalného hélia nebo dusíku na prochlazení bylo potřeba vymyslet účinnou a rychlou regulaci teploty. Regulace proudění je nevýhodná z důvodu špatné přesnosti a dlouhé odezvy i při malých změnách toku. Proto se využívá stabilizátorů teploty.

Výpočty provedené Ing. Pavlem Urbanem, Ph.D. ukázaly, že pro vhodnou stabilizaci teplot je zapotřebí topení o výkonu minimálně 5 W.

Z důvodů malého prostoru pro stabilizátory bylo rozhodnuto použití SMD (*Surface Mount Device* – SMD) rezistorů, konkrétně typ SMD 2K70 s výkonem 0,25 W a tolerancí 5 % [27]. Pro dosažení požadovaného výkonu je jeden teplotní stabilizátor vyroben ze sedmi paralelně zapájených rezistorů připájených na desku plošných spojů (*Printed Circuit Board* – PCB) (5.1.1). Takto vyrobené čtyři stabilizátory budou paralelně propojeny, umístěny do připravených měděných korýtek a zality tepelně vodivým epoxidovým lepidlem H77 [28] pro lepší přenos tepla. To dává celkový minimální topný výkon stabilizátorů 7 W. Umístění stabilizátorů na mikroskopu je znázorněno na obrázku 3.2.

5.1.2 Snímače teploty

Pro správné zjištění teploty a zpětnou vazbu pro teplotní stabilizátory se musí do STM zabudovat snímače teploty, které dokáží určit teplotu v dostatečném rozsahu a přesností. Byly vybrány čidla společnosti LakeShore. Jedná se o odporové teplotní snímače typu CERNOX provedení CX-1050-SD-HT, které spolehlivě pokryjí požadovaný rozsah měřených teplot od 5 K (teplota tepelného výměníku) až 150 °C (vypékání aparatury) [30].



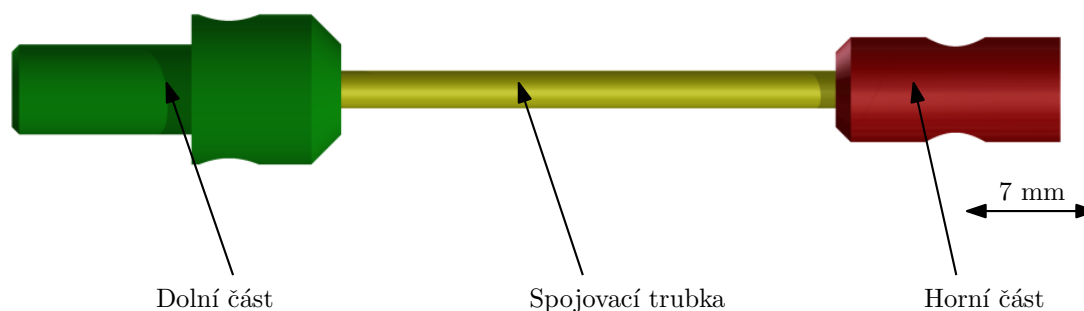
Obrázek 5.1: A) Schéma připájených sedmi SMD rezistorů na PCB, B) Výsledný produkt - na obrázku jsou zobrazeny rezistory umístěné ve spodní části měřicí hlavy.

5.2 Montáž STM

Z celé kompletace STM zde budou popsány vybrané postupy při montáži některých součástí.

Sestavení tyčinek s magnety: Celkem 18 tyčinek s magnety, které budou uvnitř měděných trubek, pomáhá tlumit vibrace pomocí vířivých proudů (obr. 3.1). Každá součástka se skládá z nerezové tyčinky a na ní přilepených tří magnetů. Ty jsou slepeny k sobě pomocí epoxidového lepidla H77 [28].

Sestavení noh na uchycení štítu: Radiální štít je spojený s přírubou pomocí součástky na obrázku 5.2. Spojovací trubka je tenkostěnná z důvodu minimálního přenosu tepla. Pro přichycení spojovací trubky k horní a dolní části bylo využito epoxidové lepidlo H22.



Obrázek 5.2: Model nohy pro uchycení štítu

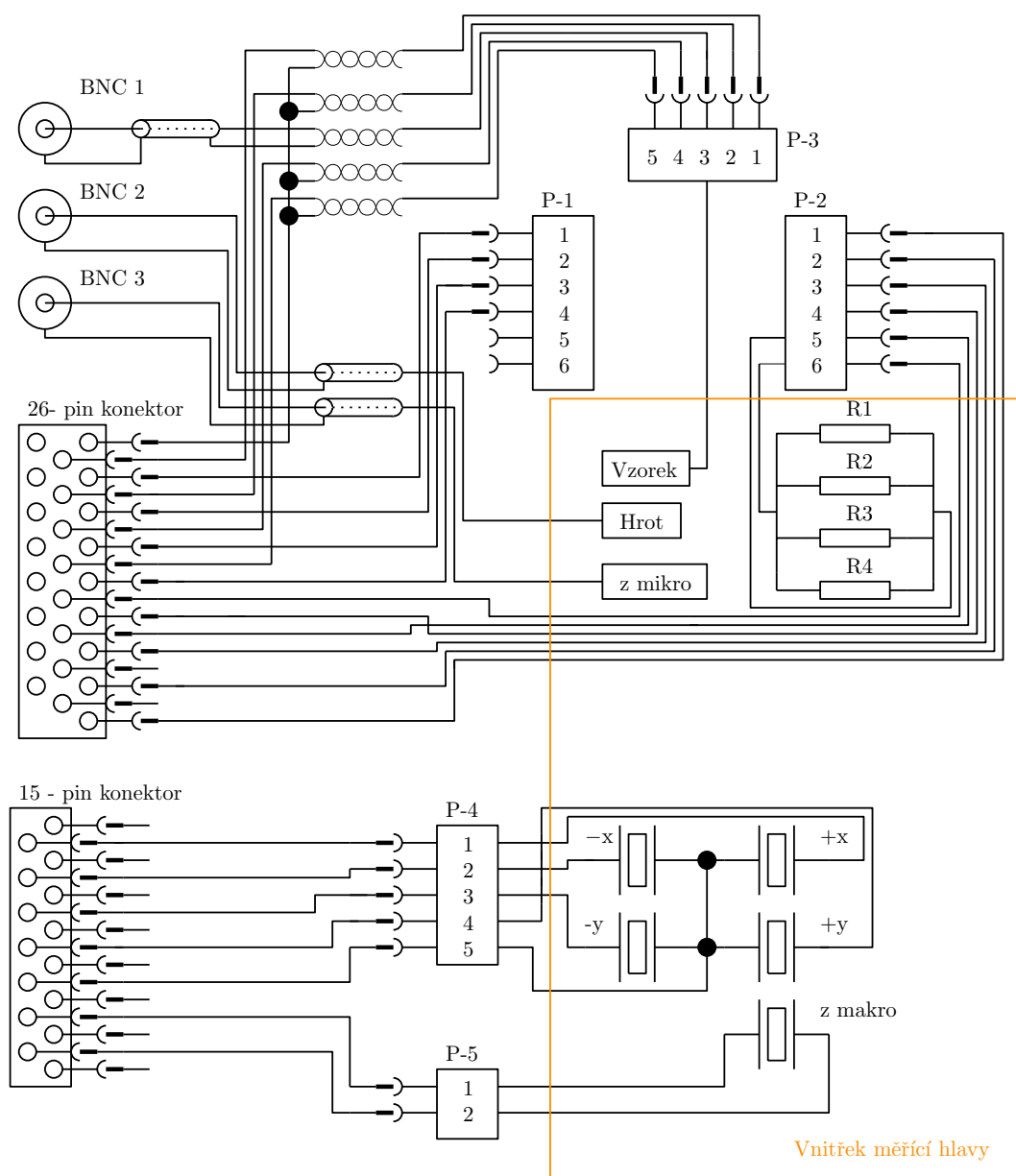
Nerezové struny: Při řešení tohoto problému bylo zapotřebí zjistit, jak pevně uchytit strunou měřicí hlavu přes díru ve šroubu M3. Od původního návrhu zapájet drát do šroubu se upustilo hlavně kvůli ceně, časové náročnosti a zhoršení mechanických vlastností strun. Nakonec byl drát do šroubu vlepen pomocí epoxidového lepidla H77. To se jeví jako výhodné mechanicky stabilní řešení.



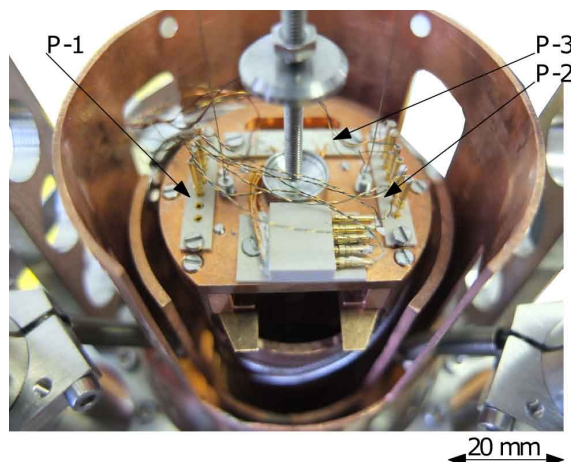
Obrázek 5.3: Sestavený nízkoteplotní UHV STM.

5.3 Schéma zapojení STM

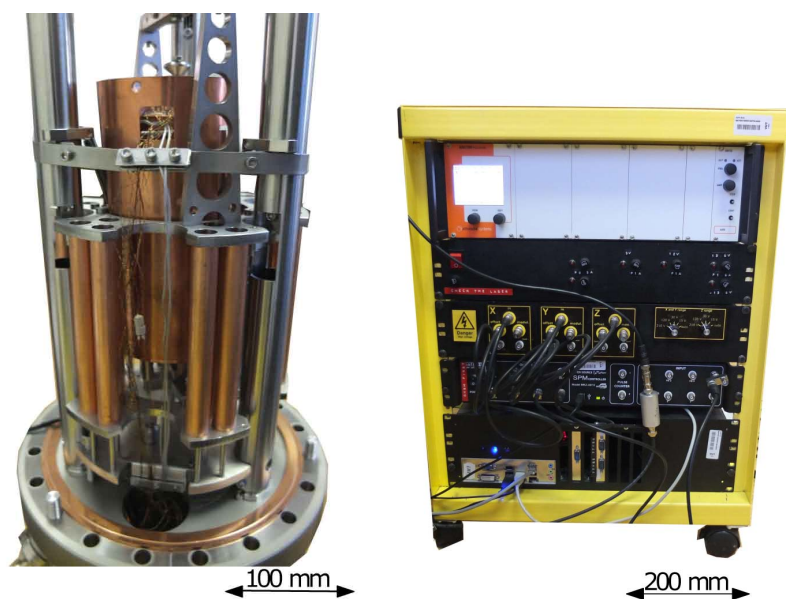
Kvůli snadné rozebíratelnosti se kabely pro elektrické připojení měřicí hlavy s vakuovými průchodkami vedly přes pinové lišty (na obr. 5.4 značené jako P-1, P-2, P-3, P-4 a P-5). Do těchto lišt byly z vnitřní strany měřicí hlavy vlepeny konce drátů pomocí elektricky vodivého epoxidového lepidla H22 [29]. Tam, kde bylo potřeba získat čistý signál a omezit tak příjem elektrického šumu kabelem, se využily vakuové koaxiální kabely LakeShore typu *SS* [31]. Ty zahrnují kabel pro přenos signálu ze vzorku a hrotu, který se pohybuje v řádech nA, a také od skeneru konkrétně piezokeramiky osy z (obr. 1.4). Díky použití stíněných kabelů se omezí velké množství zachyceného elektrického šumu z okolí. Ostatní elektrické připojení bylo vedeno v kabelech LakeShore typu *Dual Twist 36 AWG*. Připojení snímačů teploty (kontakty 1-4 na pinových lištách P-1 a P-2) bylo vedeno v kabelech LakeShore typu *Dual Twist 72 AWG* [32]. Tyto kabely byly zvolené záměrně kvůli omezení přenosu vibrací díky jejich malému průměru. Signály vedené pomocí dvojlinky z kontaktní lišty P-3 se přivedly vždy pouze na jeden drát z dvojlinky, druhý sloužil jako stínění kabelu vedeného v komoře na vakuovou průchodku, kde byl připojen společně s ostatními stínícími dráty na společný kontakt.



Obrázek 5.4: Schematické znázornění připojení hlavy mikroskopu s vakuovými 26, 15 pinovými a BNC průchodkami.



Obrázek 5.5: Připojení pinů k pinovým lištám P-1, P-2 a P-3 na měřicí hlavě.



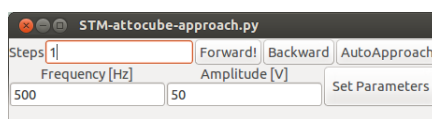
Obrázek 5.6: Vlevo znázornění vedení kabelů z měřicí hlavy k průchodkám v přírubě. Vpravo znázornění elektroniky pro měření s STM, shora attocube pro ovládání krokového makroposuvu, zdroj vysokého napětí, vysokonapěťový zesilovač pro řízení skeneru, controller zpětné vazby a počítač.

6 TESTOVÁNÍ FUNKČNOSTI STM

V této kapitole je popsán program pro komunikaci s elektronikou ovládající makroposuv mikroskopu a programu GXSM [34]. Ten byl zvolen pro ovládání a komunikaci elektroniky mikroskopu. V závěru kapitoly jsou uvedeny výsledky z testování.

6.1 Příjezd hrotu ke vzorku pomocí makroposuvu

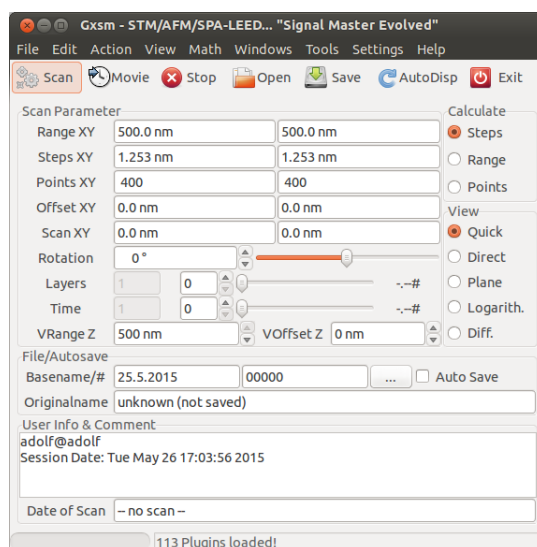
Pro testování funkčnosti a prvotní měření s STM byl vytvořen program pro komunikaci s elektronikou ovládající piezokeramický krokový posuv attocube. Tento program vytvořil Ing. Zdeněk Nováček a Ing. Dalibor Šulc a lze v něm volit počet, amplitudu a frekvenci kroků (obr. 6.1).



Obrázek 6.1: Základní okno programu GXSM.

6.2 Seznámení s programem GXSM

Opensource¹ GXSM byl vyvinut primárně pro STM, dokáže ale ovládat různé typy rastrovacích mikroskopů. Autor programu P. Zahl pracuje na obdobném systému v Brookhaven National Laboratory.



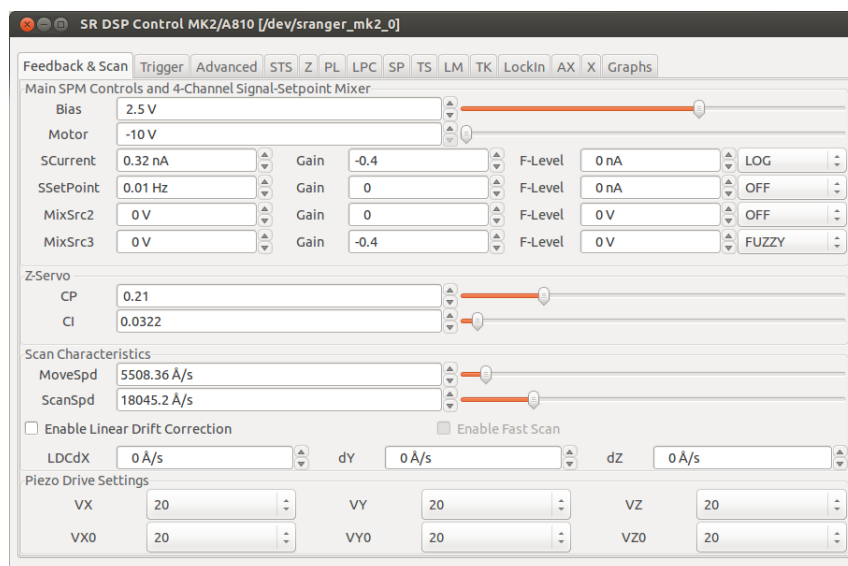
Obrázek 6.2: Základní okno programu GXSM.

Základní rozhraní systému je zobrazeno na obr. 6.2. V základním okně lze spustit rastrování (Scan), volit velikost (Range XY) a polohu rastrovací oblasti (Offset XY) na vzorku, je možné

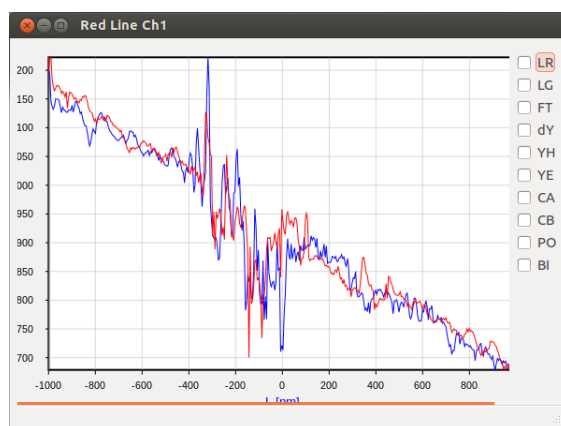
¹Volně stažitelný software.

určit počet snímaných bodů na rastrovací pole (Points XY) nebo zvolit směr rastrování (Rotation). Pomocí záložky Windows lze volit reálné zobrazení rastrování nebo vstupní hodnoty pro měření.

Z hlavního okna GXSM přes záložku Windows se lze dostat do okna SR DSP (obr. 6.4). Okno slouží pro volbu vstupních parametrů měření, jako je napětí mezi hrotem a vzorkem (Bias) a hodnot požadovaného tunelovacího proudu (SCurrent). Mezi další možnosti tohoto okna patří možnost vysunutí skeneru (Motor), možnost volit rastrovací rychlost (ScanSpd) a rychlost pohybu hrotu nad vzorkem (MoveSpd) nebo proporcionální a integrační složka zpětné vazby (CI,CP).



Obrázek 6.3: Okno SR DSP Control v softwaru GXSM pro volby vstupních parametrů pro měření.



Obrázek 6.4: Znázornění průběhu měření v softwaru GXSM u modu konstantního proudu. Modrá křivka znázorňuje cestu hrotu z jedné strany rastrovacího pole na druhou a červená tu stejnou cestu zpátky.

6.3 Testování funkčnosti mikroskopu

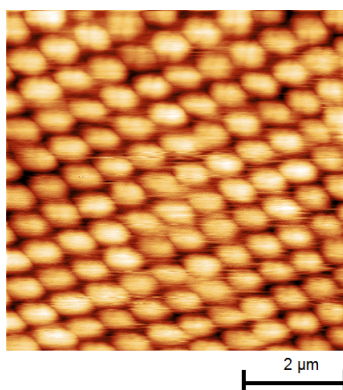
Postup měření s STM je následující. Držák hrotu s vyrobeným hrotem se vloží do pouzdra ve skeneru (obr. 3.2). Založí se paletka se vzorkem. Pomocí piezoelektrického makroposuvu je hrot přiblížen na vzdálenost několik μm od vzorku. V programu GXSM se nastaví požadované napětí, hodnota požadovaného tunelového proudu a spustí se automatické přiblížení hrotu k vzorku (obr. 1.3). Po naměření tunelového proudu se přibližování zastaví. Dalším krokem je volba správných parametrů pro měření v programu GXSM (obr. 6.4). Tyto hodnoty se liší v závislosti na hrotu a vzorku zejména pak na materiálu. Poté se spustí měření.

Jako zkušební vzorky byly použity grafit (*Highly Oriented Pyrolytic Graphite* – HOPG) a zlatá mřížka. Jedná se o typické kalibrační² materiály. V osách x a y se mikroskop může kalibrovat na mřížce se známou periodou. V ose z by se kalibrace provedla za pomoci vzorku HOPG. Na obrázcích by měly být vidět schodky atomárních rovin.

Mikroskop se nachází stále ve stádiu testování, ladění a upravování různých jeho částí. Proto se přes veškerou snahu nepodařilo získat dostatečně kvalitní obrázek vhodný ke kalibraci. Funkčnost však prokázána byla.

6.4 Měření zlaté mřížky

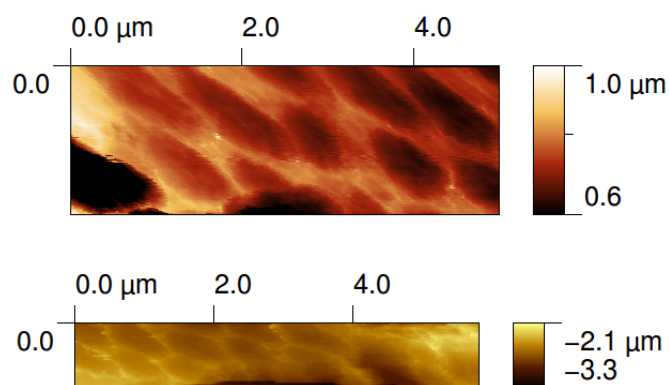
Prvním testovaným vzorkem byla pozlacená mřížka. Na povrchu mřížky jsou šachovnicově uspořádané objekty s periodou 160 nm. Na obr. 6.5 je zobrazeno měření této mřížky z tunelovacího rastrovacího mikroskopu. STM by mělo být schopno zobrazit povrch s informací o výšce zmiňovaných objektů.



Obrázek 6.5: Pozlacená mřížka zobrazená jiným STM mikroskopem. Převzato z [22]

Lze vidět že se obr. 6.6 a obr. 6.5 podobají. Na obou jsou zřetelné podobné objekty. Při měření (obr. 6.6) se vyskytl problém, který způsobil, že během měření se hrot pomalu přibližoval ke vzorku, dokud nedošlo ke kolizi. Tato situace se opakovala při téměř každém měření na tomto vzorku. Jedná se zřejmě o teplotní drift pozlaceného vzorku.

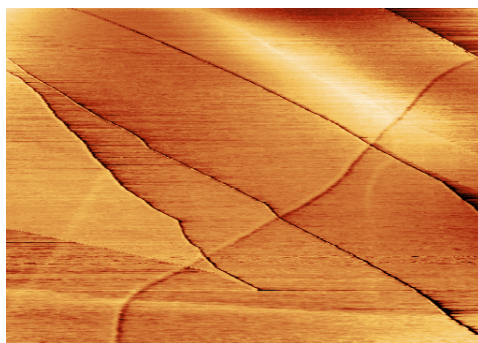
²Pro určení rozlišení mikroskopu se nejprve měří vzorky s přesně definovanými a známými tvary, díky tomu lze určit rozlišení mikroskopu a zjistit parametry skeneru



Obrázek 6.6: Pozlacená mřížka měřená STM v softwaru GXSM. Parametry měření: $V_{Bias} = 0,65 \text{ V}$, $I_s = 1 \text{ nA}$.

6.5 Měření HOPG

Druhým vzorkem pro měření bylo HOPG. Na vzorku by v nejlepším případě mělo být vidět atomární rozložení nebo aspoň terasy na povrchu vzorku, jejichž výškový rozdíl odpovídá jedné nebo několika vzdálenostem jednotlivých roviny, tzv. „schodky“ (obr. 6.7)



Obrázek 6.7: Měření vzorku HOPG jiným mikroskopem STM. Převzato z [35]

Při měření HOPG se nepodařilo naměřit atomární schodky jako na obr. 6.7. Nicméně lze na obr. 6.8 vidět čáru táhnoucí se přes měřenou oblast. V tomto případě se jevil jako největší problém šum okolí, způsobený jednak vibracemi mikroskopu, jednak elektrickým vedením. Šum byl dokonce tak velký, že se v něm tento pravděpodobný schodek téměř ztratil, dobře vidět lze pouze vady vzorku.



Obrázek 6.8: Měření vzorku HOPG STM v softwaru GXSM. Parametry měření: $V_{Bias} = 0,1 \text{ V}$, $I_s = 2,5 \text{ nA}$.

ZÁVĚR

V bakalářské práci byla diskutována problematika sestavení a otestování funkce nízkoteplotního ultravakuového tunelovacího rastrovacího mikroskopu. Je v ní obsažen teoretický základ pro pochopení základních funkcí mikroskopu STM jako je tunelový jev, popis základních částí mikroskopu a srovnání STM s dalšími metodami. Dále je v práci uvedena problematika konstrukce STM včetně podmínek konstrukce v ultravakuu a při nízkých teplotách. Obsah je především zaměřen na problémy spjaté s přenosem vibrací a jejich tlumením, výběr vhodných materiálů a základní zásady konstrukce.

V práci se řeší použitelnost STM v uzavřené vakuové komoře a z toho vyplývající problémy. Jedná se především o přesun vzorku a hrotu do měřicí hlavy mikroskopu a z ní. Tento problém byl vyřešen konstrukcí dvou typů paletek spolu se zásobníkem na tyto paletky. Paletka přepravující vzorek je opatřena kontaktní lištou, která umožňuje propojit vzorek s elektronikou, její nosná část je vyrobena a vzorek je elektricky oddělen od paletky pomocí safírových podložek. Paletka pro transport hrotu je konstrukčně řešena tak, aby co nejvíce zajišťovala bezpečnost hrotu při pohybu komorou. Na obě paletky byl navíc kladen nárok kompaktnosti s transportním systémem komory. Pro manipulaci s novým typem paletek byl vyroben manipulátor, který je umístěn na vakuové pinzetě.

Mezi další vyrobené díly patří montážní stojan pro testování STM na vzduchu a rozšíření vakuové komory pro testování nízkých teplot. Stojan stojí na třech nohách a na každou nohu je možné namontovat tlumení ve formě vzduchových vaků nebo pryžových stavěcích šroubů. Stojan má navíc v těle díru, která by v budoucnu mohla umožnit rozšíření funkce stojanu. Do díry by se mohl nainstalovat mechanický nebo hydraulický systém umožňující snadnou montáž nebo demontáž mikroskopu do vakuové komory.

V hlavní části této práce je popsáno sestavení mikroskopu včetně dílčích problémů a připojení elektroniky k měřicí hlavě STM. Do této části také patří přichystání STM pro nízké teploty. To znamená, že se do měřicí hlavy mikroskopu navrhnuté a nainstalované teplotní stabilizátory a vybrány snímače teploty. Stabilizátory byly kvůli vyžadovanému výkonu vyrobeny z SMD odporů připájených na PCB. Takto čtyři vyrobené a paralelně propojené stabilizátory dávají minimální topný výkon 7 W.

Po sestavení se mikroskop testoval. Celé měření a testování probíhalo v programu GXSM. I přes všechnu snahu se nepodařilo naměřit dostatečně kvalitní obrázek, ale ověřila se funkčnost mikroskopu. Jako vzorky pro měření byly vybrány pozlacená mřížka a HOPG. Při měření zlaté mřížky se často stávalo, že během měření hrot narazil do vzorku. To mohlo být způsobené teplotní roztažností nebo málo vodivým vzorkem. Dalším měřením HOPG se zase naměřené hodnoty atomárních schodů nejspíše ztrácely v šumu.

Obě měření prokázaly, že STM je funkční, ale také že nějaká část mikroskopu neplní svoji funkci tak, jak má. Jedná se zejména o problém s vibracemi. Mezi hlavní problémy nejspíše patří připojení skeneru a hrotu koaxiálními kabely. Ty jsou daleko větší a tužší než ostatní kabely vedoucí k měřicí hlavě a můžou tedy být zdrojem vibrací. Dalším problémem se zdá vibrační závaží, které hlavně díky málo napnutým pružinám neplní svoji funkci. Při budoucí změně těchto dvou faktorů může být celý mikroskop výrazně vylepšen.

LITERATURA

- [1] YOUNG, Russell, John WARD a Fredric SCIRE. The Topografiner: An Instrument for Measuring Surface Microtopography. *Review of Scientific Instruments*. 1972, roč. 43, č. 999.
- [2] BINNIG, Gerd, Heinrich ROHRER, Ch GERBER a Eric WEIBEL. Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy. *Physical Review Letters*. 1982, roč. 49, č. 57.
- [3] The Nobel Prize in Physics 1986. In: *Nobelprize.org* [online]. ©2014 [cit. 2015-06-03]. Dostupné z: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1986/
- [4] FUKA, Josef a Bedřich HAVELKA. *Optika a atomová fyzika I. Optika*. Praha: SPN, 1963. ISBN 20460563.
- [5] FRANK, Luděk a Jaroslav KRÁL. *Metody analýzy povrchů: iontové, sondové a speciální metody*. Praha: Academia, 2002. ISBN 8020005943.
- [6] DAO, Tomáš. *Návrh nosné platformy pro nízkoteplotní UHV STM mikroskop* [online]. Brno, 2014 [cit. 2015-05-05]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?zp_id=72534. Diplomová práce. VUT v Brně.
- [7] GRIFFITHS, David Jeffrey. *Introduction to Quantum Mechanics*. New Jersey: Prentice Hall, 1994. ISBN 0131244051.
- [8] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. V Brně: Prometheus, 2006. ISBN 8021418680.
- [9] The Nobel Prize in Physics 1937. In: *Nobelprize.org* [online]. ©2014 [cit. 2015-06-03]. Dostupné z: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1937/
- [10] ZETTILI, Nouredine. *Quantum mechanics: concepts and applications*. Chichester: John Wiley & Sons, 2001. ISBN 0471489441.
- [11] Nagahara, L. A., T. Thundat, and S. M. Lindsay. *Preparation and characterization of STM tips for electrochemical studies*. Review of scientific instruments. 1989, roč. 60, č. 3128.
- [12] LÜTH, Hans. *Surfaces and interfaces of solids*. Berlin: Springer-Verlag, 1993. ISBN 3540568409.
- [13] VŮJTEK, Milan, Roman KUBÍNEK a Miroslav MAŠLÁŇ. *Nanoskopie*. Univerzita Palackého v Olomouci: Papírtisk, 2012. ISBN 9788024431024.
- [14] MEYER, Ernst, Hans J HUG a Roland BENNEWITS. *Scanning probe microscopy: the lab on a tip*. Berlin: Springer, 2004. ISBN 3540431802.
- [15] STROSCIO, J. A. Controlling the Dynamics of a Single Atom in Lateral Atom Manipulation. *Science*. 2004, roč. 306, č. 5694.
- [16] GROSZKOWSKI, Janusz. *Technika vysokého vakua*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1981. ISBN 000251437.
- [17] VOŇKA, Jakub. *DESIGN AND VERIFICATION OF LOW TEMPERATURE PART OF UHV – STM MICROSCOPE*. Brno, 2013. Diplomová práce. VUT Brno.

- [18] DUBRAVCOVÁ, Viera. *Vákuová a ultravákuová technika*. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1992. ISBN 8005010907.
- [19] CRAWFORD, Richard. *Vibration isolation of large masses and vacuum chambers*. 1970. Dostupné z: <http://www.researchgate.net/>
- [20] SCHMID, M. a P. VARGA. Analysis of vibration-isolating systems for scanning tunneling microscopes. *Ultramicroscopy*. 1992, roč. 42-44, č. 1610-1615.
- [21] ČEŠPÍRO, Zdeněk. *Vakuová technika*. 1973. Praha: České vysoké učení v Praze, 1973. ISBN 59-609-73.
- [22] NOVÁČEK, Zdeněk. *Vývoj instrumentálního zařízení pro výzkum nanostruktur*. Brno, 2014. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [23] Autodesk Inventor Professional 2015. *Autodesk* [online]. ©2015 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: <http://www.autodesk.cz/products/inventor>
- [24] Coaxial Pincer Grip Wobble Sticks. *Vgscienta* [online]. ©2014 [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: <http://www.vgscienta.com/productlist.aspx?MID=376&IID=564>
- [25] GERYK, Michal. *Konstrukce ultravakuové komory pro sledování struktury povrchů pevných látek metodou LEED a STM/AFM*. Brno, 2001. Diplomová práce. VUT Brno.
- [26] KRÍŽ, Rudolf. *Tabulky materiálů a předvýrobků pro strojírenství*. Ostrava: Montanex, 2001. ISBN 8072250442.
- [27] GES. *GES* [online]. ©1991-2015 [cit. 2015-05-23]. Dostupné z: <http://www.ges.cz/cz/cr1206-2k70-5-GES05300097.html>
- [28] EPO-TEK H77. *Epotek* [online]. ©2014-2015 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.epotek.com/site/component/products/productdetail.html?cid%5B0%5D=133>
- [29] EPO-TEK H22. *Epotek* [online]. ©2014-2015 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z: <http://www.epotek.com/site/component/products/productdetail.html?cid%5B0%5D=95>
- [30] Cernox. *Lakeshore* [online]. ©2014 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: http://www.lakeshore.com/Documents/LSTC_Cernox_1.pdf
- [31] Ultra miniature coaxial cable SS. *Lakeshore* [online]. ©2015 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: <http://www.lakeshore.com/products/cryogenic-accessories/cable/pages/overview.aspx>
- [32] Wire. *Lakeshore* [online]. ©2015 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: http://www.lakeshore.com/Documents/LSTC_wire_1.pdf
- [33] VARGA, M. a P. VARGA. Analysis of vibration-isolating systems for scanning tunneling microscopes. *Ultramicroscopy*. 1992, 42-44, 1610-1615
- [34] GXSM, *Gxsm.sourceforge* [online]. ©2000-2014 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://gxsm.sourceforge.net/>
- [35] HOPG. *Dberard* [online]. ©2015 [cit. 2015-05-31]. Dostupné z: <http://dberard.com/home-built-stm/image-gallery/>

SEZNAM ZKRATEK

SPM	Scanning Probe Microscopy
STM	Scanning Tunneling Microscopy
AFM	Atomic Force Microscopy
NSOM	Near-Field Scanning Optical microscopy
MFM	Magnetic Force Microscopy
EFM	Electrostatic Force Microscopy
CHM	Constant Height Mode
CCM	Constant Current Mode
SEM	Scanning Electron Microscope
HEED	Hight-Energy Electron Diffraction
UHV	Ultra Hight Vacuum
SMD	Surface Mount Device
PCB	Printed cirtuit board
HOPG	Highly Oriented Pyrolytic Graphite
PEEK	Polyether ether ketone

SEZNAM VÝKRESŮ

Číslo výkresu	Název součásti/sestvy
1.01	PALETKA NA VZOREK
1.01.01	KONTAKTNÍ LIŠTA
1.01.02	ZÁKLADNA
1.01.03	PROTIKUS ZÁKLADNY
1.01.04	PODLOŽKA
1.02	VAKUOVÁ PINZETA
1.02.01	ZÁKLADNA
1.02.02	DRŽÁK MANIPULÁTORU
1.02.03	POHYBLIVÉ RAMENO
1.02.04	ARETAČNÍ PLECH
1.02.05	ARETAČNÍ ŠROUB
1.02.06	ČEP
1.03	STOJAN
1.03.01	NOSNÁ TYČ
1.03.02	ZÁKLADNA
1.03.03	TRUBKA
1.03.04	NOHA
1.04	PALETKA NA HROTY
1.04.01	ZÁKLADNA
1.04.02	NÁJEZD
1.04.03	ARETAČNÍ PLECH
1.04.04	MEZISTUPENĚ
1.05	ZÁSOBNÍK NA PALETKY
1.05.01	ZÁSOBNÍK L
1.05.02	PLECH 1
1.06	ROZŠÍŘENÍ VAKUOVÉ KOMORY
1.06.01	PŘÍPOJ STM
1.06.02	PRODLOŽENÍ
1.06.03	PŘÍPOJ KOMORA
1.07	VEDENÍ KABELŮ
1.08	KRYT

PŘÍLOHY

Přílohy na CD-ROM:

Složka - Konstrukce

- Modely součástí a sestav v programu Autodesk Inventor Professional 2015
- Modely sestav ve formátu STP
- Výkresová dokumentace ve formátu PDF