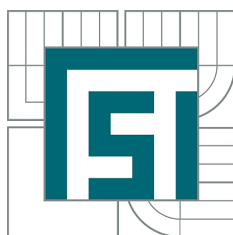


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



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

NÁVRH, VÝROBA A TESTOVÁNÍ ENVIRONMENTÁLNÍ KOMORY PRO MIKROSKOP ATOMÁRNÍCH SIL A PRO ELEKTRONICKÁ MĚŘENÍ NANOSENZORŮ

DESIGN, FABRICATION AND TESTING OF ENVIRONMENTAL CHAMBER FOR ATOMIC
FORCE MICROSCOPE AND FOR ELECTRONIC MEASUREMENTS OF NANOSENSORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ALEŠ CAHLÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MIROSLAV BARTOŠÍK, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav fyzikálního inženýrství
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Aleš Cahlík

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:

Návrh, výroba a testování environmentální komory pro mikroskop atomárních sil a pro elektronická měření nanosenzorů

v anglickém jazyce:

Design, Fabrication and Testing of Environmental Chamber for Atomic Force Microscope and for Electronic Measurements of Nanosensors

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V nanolitografických technikách prováděných pomocí hrotu AFM (DPN, LAO), jakož i při měření elektronických vlastností nanosenzorů, hraje zásadní roli koncentrace atmosférických, případně jiných plynů (N₂, H₂O, Ar, He, CO, CO₂, O₂) přítomných při měření. Cílem této bakalářské práce je navrhnout (včetně vyhotovení kompletní výkresové dokumentace) a testovat komoru, která umožňuje definovaně měnit koncentraci výše zmíněných plynů a lze ji čerpat až do podmínek nízkého vakua $p < 10^{-1}$ Pa, kterou lze použít při měření pomocí SPM NT-MDT Ntegra Prima a zároveň při samostatném elektrickém měření senzorů.

Cíle bakalářské práce:

Cíle, kterých má být dosaženo:

1. Proved'te návrh komory podle definovaných požadavků a vypracujte příslušnou výkresovou dokumentaci.
2. Po odborné stránce se podílejte na výrobě komory.
3. Otestujte komoru:
 - a) Při samostatném elektronickém měření senzoru.
 - b) Při provádění lokální anodické oxidace pomocí AFM (vakuum vs požadovaná relativní vlhkost).
 - c) Při současném elektronickém měření senzoru a jeho mapování pomocí AFM.

Seznam odborné literatury:

Základní literární prameny:

[1] Performing Measurements: AFM and STM measurements, Spectroscopy, Many-pass techniques, Lithography: Instruction Manual. 2007. vyd. Zelenograd: NT-MDT Co., 2007.

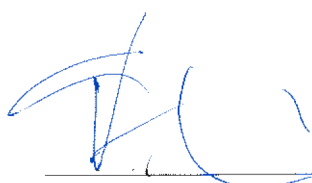
[2] BARTOŠÍK, Miroslav et. al., Role of humidity in local anodic oxidation: A study of water condensation and electric field distribution. Physical Review B. 2009, vol. 79, issue 19, s.

[3] SCHEDIN, F., et al.: Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene. Nature Materials, Vol. 9, 2007, p. 652-655. ISSN 1476-1122.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Miroslav Bartošík, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 3.12.2013



prof. RNDr. Tomáš Šikola, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem environmentální komory pro mikroskop atomárních sil NTegra Prima nebo alternativně pro samostatné měření nanosenzorů. Komora bude sloužit pro definovanou změnu složení atmosféry a čerpání vakua v prostoru okolo měřeného vzorku. Jsou diskutovány teoretické principy vlivu okolního prostředí na metody AFM a ukázány principy měření senzorů na bázi grafenu. Dále jsou v práci uvedeny důvody vedoucí k výrobě komory a požadavky na její konstrukci. Hlavní část práce se zabývá popisem konstrukčního návrhu. V závěru jsou prezentovány výsledky simulace průhybu stěn evakuované komory.

Summary

This thesis deals with the concept of the chamber for atomic force microscope device NTegra Prima or alternatively for stand-alone measurements of nanosensors. The chamber will be used for defined modification of ambient conditions in space around measured sample. In first part, the theoretical principles of influence of ambient conditions on AFM methods are discussed. In the second chapter, the principles of graphene sensors measurements are showed. Further the reasons and requirements for designing this chamber are introduced. Main part deals with description of design. At the end the results of stress analysis and wall deflection of evacuated chamber are presented.

Klíčová slova

mikroskopie atomárních sil, NTegra Prima, vodní meniskus, grafenové senzory, environmentální komora

Keywords

atomic force microscopy, NTegra Prima, water meniscus, graphene sensors, environmental chamber

CAHLÍK, Aleš. *Návrh, výroba a testování environmentální komory pro mikroskop atomárních sil a pro elektronická měření nanosenzorů*. Brno, 2014. 35 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Miroslav BARTOŠÍK.

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Miroslava Bartošíka, Ph.D., s použitím materiálů uvedených v seznamu literatury.

Aleš Čahlík

Děkuji svému vedoucímu Ing. Miroslavu Bartošíkovi, Ph.D. za svědomité vedení mé bakalářské práce a Ing. Miroslavu Florianovi za cenné rady při řešení konstrukčních problémů.

Aleš Čahlík

Obsah

Úvod	1
1. Vliv a využití vodního prostředí v mikroskopii atomárních sil	3
1.1. Mikroskopie atomárních sil (AFM)	3
1.1.1. Kontaktní mód	3
1.1.2. Bezkontaktní mód	4
1.1.3. Semi-kontaktní mód	5
1.2. Vodní meniskus a jeho vliv na AFM techniky	5
1.2.1. Tvorba menisku	6
1.2.2. Vliv menisku na přilnavost hrotu	7
1.2.3. Lokální anodická oxidace (LAO)	10
1.2.4. Dip-pen nanolitografie (DPN)	12
2. Elektrické měření nanosenzorů	13
2.1. Motivace	13
2.2. Aplikace	13
3. Požadavky a motivace pro výrobu environmentální komory	15
3.1. Konstrukční požadavky	15
3.2. NT-MDT NTegra Prima	16
3.3. Jiné komory	17
3.3.1. Stávající laboratorní komora	17
3.3.2. Komerčně prodávaná komora	17
4. Konstrukční řešení	19
4.1. Výběr materiálu	19
4.2. Komora	21
4.2.1. Optický průzor	21
4.2.2. Mechanické průchodky - manipulátory	22
4.2.3. Spojení komory s mikroskopem a dnem	23
4.2.4. Úpravy na mikroskopu NTegra Prima	24
4.3. Dno pro použití komory bez mikroskopu	24
4.3.1. Stolek pro senzory	25
4.3.2. Průchodky	25
4.4. Kompletní sestava komory a dna	26
4.5. Pevnostní výpočty	27
Závěr	29

Literatura	31
Seznam použitých zkratek a symbolů	33
Seznam příloh	35

Úvod

Vliv okolního prostředí na metody pracující na principu mikroskopie rastrovací sondou (SPM) je zkoumána již od jejich vynálezu na konci osmdesátých let dvacátého století. V běžných podmínkách totiž dochází ke kondenzaci vodních par mezi hrotem sondy a povrchem za vzniku vodního menisku, který může zásadním způsobem ovlivnit probíhající měření. Detailní znalost vzniku, tvaru a vlivu tohoto menisku na SPM techniky je esenciální pro zlepšení jejich rozlišovacích schopností a pro další vývoj technologií přípravy nanostruktur, které jsou na principu SPM založeny.

Hlavním cílem této práce je navrhnout, vyrobit a otestovat environmentální komoru pro mikroskop NTegra Prima od firmy NT-MDT, který se nachází v laboratořích ÚFI VUT Brno. Díky komoře bude možné přesně definovat vlhkost a složení atmosferického prostředí okolo mikroskopu a tím regulovat vliv vodního menisku na probíhající měření. V laboratořích ÚFI VUT Brno je dosud používaná jiná svépomocí vyrobená komora. Její funkční nedostatky, jako je například nemožnost čerpání komory do vakua však omezují její použití.

V současnosti je také snaha vyvinout elektronické senzory koncentrace částic s takovou citlivostí, že bude možné detekovat jedinou molekulu měřené entity. Proto je součástí práce i návrh samostatně stojícího dna pro tuto komoru, ve které bude možné takových senzory testovat.

ÚVOD

1. Vliv a využití vodního prostředí v mikroskopii atomárních sil

1.1. Mikroskopie atomárních sil (AFM)

Metoda mikroskopie atomárních sil, patřící do skupiny zobrazovacích technik pracujících na principu mikroskopie rastrovací sondou (SPM), byla vynalezena v roce 1986 Gerardem Binnigem, Calvinem F. Quatem a Christopherem Herberem [2]. Brzy se stala jednou z nejvýznamnějších zobrazovacích, manipulačních a měřících technik ve výzkumu a aplikaci nanotechnologií. Jedná se o rastrovací techniku – obraz je sestavován postupně bod po bodu. Používá se především k trojrozměrnému zobrazení povrchů a dosahuje velmi vysokého rozlišení.

Základem AFM je velmi ostrý hrot, který se nachází na volném konci pružného cantileveru (raménka) – obrázek 1.1. Princip činnosti je založen na existenci silové interakce mezi hrotem a vzorkem při jejich vzájemném přiblížení. Síly, které mezi hrotem a povrchem vznikají, svým působením pružný cantilever ohýbají. Hrot se během měření pohybuje v pravidelném rastru a řídicí systém pomocí zpětné vazby získává informace o povrchu. Podle vlivu interakčních sil na deformaci cantileveru a podle způsobu jeho pohybu nad vzorkem rozlišujeme tři základní pracovní módy:

- kontaktní nebo také statický mód, při kterém nedochází k oscilacím
- semi-kontaktní dynamický mód, při kterém dochází k částečnému kontaktu s povrchem
- bezkontaktní dynamický mód, při kterém nedochází ke kontaktu s povrchem

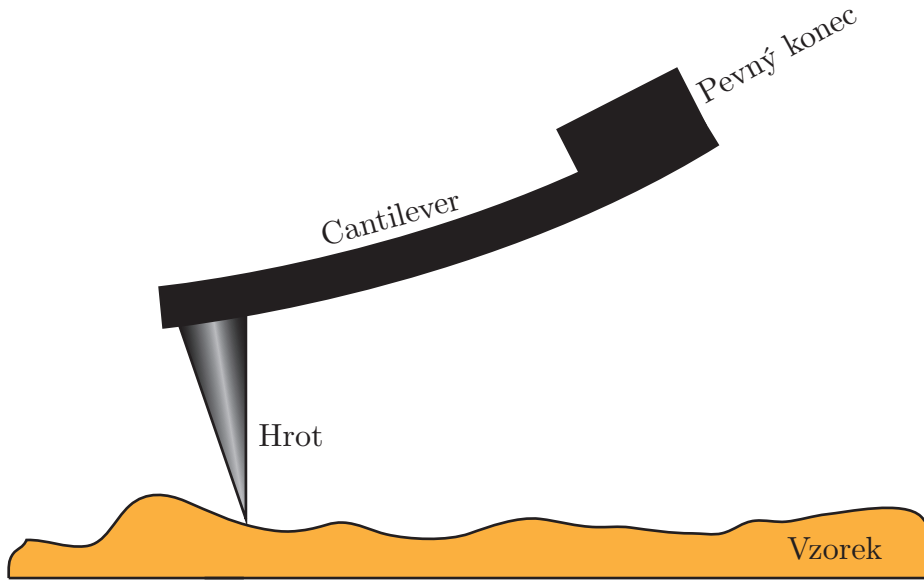
V praxi je většinou pevný konec cantileveru uchycen pevně a vzájemného pohybu je dosaženo skenováním vzorkem pomocí piezoelektrických manipulátorů.

1.1.1. Kontaktní mód

Při měření v kontaktním módu dochází k přímému styku mezi hrotem a povrchem. Působení interakčních sil mezi hrotem a povrchem je kompenzováno pružnou silou cantileveru generovanou jeho ohnutím podle Hookova zákona. Aby nedošlo k nechtěnému poškození vzorku a kvůli zvýšení citlivosti jsou cantilevery určené pro měření v kontaktním módu vyrobeny z materiálu s relativně velkou ohebností. Přesto kvůli přímému kontaktu často dochází k poškození hrotu nebo povrchu, a proto pro analýzu měkkých povrchů jako například organických molekul není tato metoda vhodná.

Měření může být provedeno dvěma způsoby: v módu *konstantní síly* nebo *konstantní výšky*. V módu konstantní síly udržuje systém pomocí zpětné vazby pevný konec cantile-

1. VLIV A VYUŽITÍ VODNÍHO PROSTŘEDÍ V MIKROSKOPII ATOMÁRNÍCH SIL



Obrázek 1.1: Schéma AFM v kontaktním módu.

veru v takové výšce nad povrchem, aby byla pružná síla a tedy i jeho ohnutí konstantní. Topografie povrchu je pak snímána přímo jako funkce výšky cantileveru.

Při měření v módu konstantní výšky se po celou dobu rastrování vzdálenost vzorku vůči pevnému konci cantileveru nemění. Ten se po celou dobu pohybuje v konstantní výšce bez ohledu na morfologii povrchu. Morfologie povrchu je pak sestavena jako funkce ohnutí cantileveru. Tato metoda je vhodná především pro vzorky s malými nerovnostmi (jednotky Angstromu), protože při větší nerovnosti může dojít ke zničení povrchu nebo hrotu.

1.1.2. Bezkontaktní mód

V bezkontaktním módu nedochází k přímému kontaktu mezi hrotem a vzorkem. V cantileveru jsou vybudeny oscilace s relativně malou amplitudou okolo 1 nm. Piezo vibrátor, který tyto oscilace budí, kmitá s frekvencí ω takto:

$$u = u_0 \cos(\omega t). \quad (1.1)$$

Pohybová rovnice má potom tvar:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = -k(z - u) - \nu \frac{dz}{dt} + F_0 + F_{PS}, \quad (1.2)$$

kde $-k(z - u)$ je pružná síla daná Hookovým zákonem, člen $\nu \frac{dz}{dt}$ zastupuje tlumení způsobené především viskozitou vzduchu, F_0 reprezentuje vliv gravitace a jiných možných konstantních sil a F_{PS} je přídatná síla daná především van der Waalsovou interakcí. Pro malé oscilace okolo rovnovážné polohy můžeme F_{PS} aproximovat prvním lineárním členem v Taylorově rozvoji:

$$F_{PS} = F_{PS}(z_0) + \frac{\partial F_{PS}(z_0)}{\partial z} z(t) = F_{PS0} + F'_{PS} z(t), \quad (1.3)$$

kde F'_{PS} je gradient interakce mezi hrotem a povrchem v rovnovážné poloze z_0 .

1.2. VODNÍ MENISKUS A JEHO VLIV NA AFM TECHNIKY

Konstantní síly dané F_0 a nultý člen rozvoje F_{PS0} pouze posunou rovnovážnou polohu a nijak neovlivní frekvenci, amplitudu ani fázi oscilací. Po substituci $z' = z + (F_0 + F_{\text{PS0}})/k$ se dá ukázat [1], že řešení pohybové rovnice pro kmitání hrotu je:

$$z' = A \sin(\omega_0 t + \varphi), \quad (1.4)$$

kde amplituda A , fáze φ i rezonanční frekvence ω_{rz} závisí na gradientu F'_{PS} .

Po přiblížení kmitajícího hrotu k povrchu dochází díky nárůstu gradientu ke změně všech tří výše zmíněných veličin. Systém pak pomocí zpětné vazby kontroluje střední vzdálenost z_0 hrotu od povrchu tak, aby byla zachována konstantní amplituda (amplitudová modulace) nebo frekvence oscilací (frekvenční modulace). Topografický obraz povrchu je vytvořen zaznamenáváním této vzdálenosti během rastrování.

Protože frekvence oscilací může být snímána velmi citlivě, umožňuje mód s frekvenční modulací použít velmi tuhé raménka, které poskytují stabilní měření blízko povrchu. Díky tomu bylo dosaženo atomárního rozlišení v ultravakuových podmínkách. [1]

1.1.3. Semi-kontaktní mód

V porovnání s kontaktní metodou představuje semi-kontaktní mód (nebo také „poklepový mód“) výhodu především při měření měkkých materiálů, u kterých může při tažení hrotu přes vzorek dojít k poškození. Navíc není v tomto módu vyžadována tak vysoká citlivost a stabilita systému jako u měření v bezkontaktním módu, a proto je více využíván.

Na rozdíl od kontaktního módu dosahují buzené oscilace cantileveru větších amplitud okolo 10–100 nm na frekvencích blízkých jeho rezonanční frekvenci. Interakční síla F_{PS} mezi hrotem a povrchem je tentokrát kromě van der Waalových sil dána i elastickými silami během kontaktu. V tomto případě ji však kvůli velkým amplitudám nemůže linearizovat jako v rovnici 1.3.

I tak se ale dá ukázat její vliv na amplitudu i fázi pohybu. Tato změna pak slouží jako zpětná vazba pro řídicí systém a následné zobrazení povrchu. [1]

V běžných podmínkách se vlivem vlhkosti vytvoří na vzorku tenká vrstva vody. Protože při měření v bezkontaktním a semi-kontaktním módu může tato vrstva značně ovlivnit měření změnou silové interakci mezi hrotem a povrchem, je důležité se těmito vlivy zabývat.

1.2. Vodní meniskus a jeho vliv na AFM techniky

Pokud jsou měření fungující na principu Scanning probe microscopy (SPM) prováděny v atmosferickém prostředí, jsou ovlivňovány existencí vodního menisku mezi hrotem a povrchem vzorku, který se v běžných podmínkách tvoří z vody přítomné ve vzduchu a na vzorku. Takováto vodní formace u většiny SPM technik snižuje jejich rozlišení. Například při měření mikroskopie laterálních sil (LFM) se interakce mezi hrotem a povrchem měří pomocí třecí síly, která je vzniklými kapilárními silami významným způsobem ovlivněna. [3]

Na druhou stranu je přítomnost vodního menisku nezbytná pro významné techniky přípravy nano-struktur. A to zejména pro dip-pen nanolitografii (DPN) a lokální anodickou oxidaci (LAO).

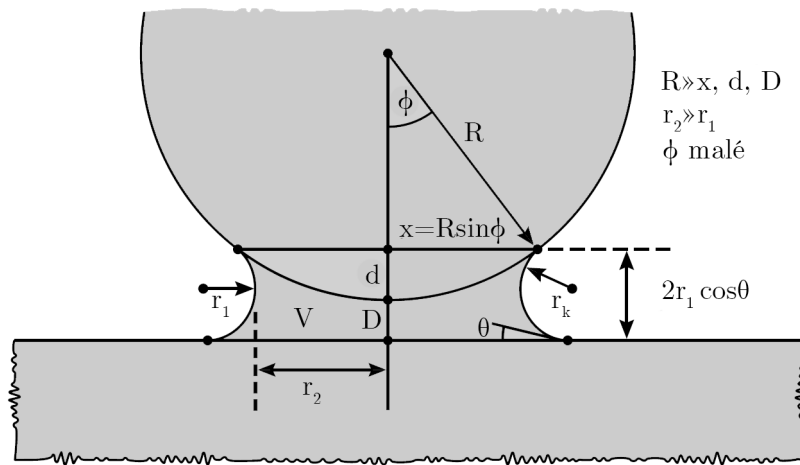
Abychom byli schopni zpřesnit rozlišení zobrazovacích metod na bázi SPM, vytvořit správné numerické modely interakčních sil nebo pomocí výše zmíněných vyvinout co nej-

1. VLIV A VYUŽITÍ VODNÍHO PROSTŘEDÍ V MIKROSKOPII ATOMÁRNÍCH SIL

přesnější nástroje pro tvorbu nanostruktur je nezbytné velmi dobře porozumět vzniku, vlastnostem a vlivu těchto vodních formací.

1.2.1. Tvorba menisku

Voda obsažená ve vzduchu kondenzuje přednostně na zakřiveném povrchu, a proto po přiblížení hydrofilního hrotu k povrchu hydrofilního vzorku vzniká vodní meniskus v místě jejich vzájemného kontaktu. Množství kondenzované vody je úměrné relativní vlhkosti (RH) okolního prostředí, které má zásadní vliv i na jeho velikost a tvar. Rozhok *et al.* dokázali existenci menisku pro hydrofilní hrot dokonce i při velmi nízké relativní vlhkosti. Experimenty ukázaly, že se voda sbírá v okolí kontaktu hrotu se vzorkem navzdory relativní vlhkosti i v absolutně suchém prostředí (RH 0 %). Ukázalo se tedy, že ke vzniku menisku nedochází pouze v přísných UHV podmínkách. [3]



Obrázek 1.2: Geometrie vodního můstku mezi koulí a rovinou v termodynamické rovnováze. Převzato a upraveno z [5].

Vhodný model pro popis tvaru a velikosti vodních formací mezi dvěma makroskopickými povrchy dává Youngova-Laplaceova rovnice:

$$\Delta P_L = \gamma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) = \frac{\gamma_L}{r_k}, \quad (1.5)$$

kde ΔP je makroskopický tlakový rozdíl na rozhraní voda–pára v rovnovážném stavu, známý jako Laplaceův tlak, r_1 a r_2 jsou hlavní poloměry zakřivení menisku (ve vertikální resp. horizontální rovině symetrie menisku), γ je povrchové napětí na rozhraní a r_k je efektivní poloměr zakřivení nebo také Kelvinův poloměr. Pro $r_2 \gg r_1$ můžeme v Young-Laplaceově rovnici psát $(1/r_1 + 1/r_2) \approx 1/r_1 = 1/r_k$. [5]

V termodynamické rovnováze je Kelvinův poloměr svázaný s relativní vlhkostí (RH) Kelvinovou rovnicí:

$$r_k = \frac{\gamma V}{RT \ln(RH)}, \quad (1.6)$$

kde V je molární objem kapaliny, R molární plynová konstanta a T termodynamická teplota. [5]

Závislost Kelvinova poloměru na relativní vlhkosti pro vodu o teplotě 20 °C, kde $\gamma V/RT = 0,54 \text{ nm}$ [5], je vyjádřena v tabulce 2.1

RH	r_k [nm]
0,0	0,00
0,1	-0,23
0,2	-0,34
0,3	-0,45
0,4	-0,59
0,5	-0,78
0,6	-1,06
0,7	-1,51
0,8	-2,42
0,9	-5,13
1,1	∞

Tabulka 1.1: Závislost Kelvinova poloměru na relativní vlhkosti v rovnovážném stavu

To znamená, že při nižších vlhkostech zapříčiní malé hodnoty Kelvinova poloměru, že ke kondenzaci vody dojde primárně v místech povrchových poruch s velkým zakřivením (praskliny, důlky apod.). [4]

Určitým problémem také je, že Kelvinova rovnice je odvozena pro makroskopické kontinuum. A protože je efektivní poloměr molekul vody 0,37 nm [6], musel by být počet molekul vody tvořících můstek ve vertikálním směru při nízkém RH v řádu jednotek. Proto nemůže Kelvinova rovnice s úplností popsat závislost proporcí můstku na relativní vlhkosti a tedy ani velikost adhezních sil. A přestože se při vyšší relativní vlhkosti velikost menisku dostatečně zvětšuje, nejde pro rozměry AFM hrotu (desítky nanometrů) o makroskopický problém. Model i vztahy odvozené pro vodní můstek tak, jak je zobrazen na obrázku 1.2 je proto nutné upravit a doplnit.

1.2.2. Vliv menisku na přilnavost hrotu

Popis přilnavých sil mezi hrotem a povrchem je obecně komplexní záležitostí. Skládají se především ze silových interakcí mezi atomy obou těles - van der Waalových sil (F_{vdW}), chemických vazeb (F_B) a elektrostatických sil (F_E), ale taky z kapilárních sil (F_C) a vodíkových můstků (F_H) [6]:

$$F_{ad} = F_{vdW} + F_E + F_B + F_C + F_H. \quad (1.7)$$

Pro běžné AFM aplikace uvažujeme, že hrot i vzorek má saturované všechny povrchové vazby a tedy $F_B = 0$. Vliv elektrostatických sil můžeme eliminovat připojením hrotu i vzorku na stejnou hladinu potenciálu a tedy $F_E = 0$.

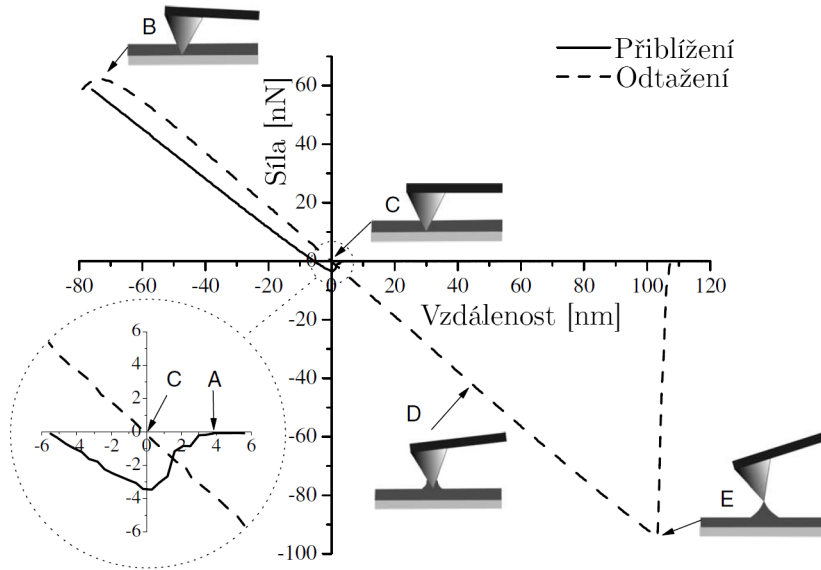
Následující text bude věnován vlivu třech zbývajících interakcí a jejich závislosti na vodním můstku. [8]

Měření adhezních sil

Informace o velikosti menisku a vlivu kapilárních sil na vzájemnou interakci může být získána měřením závislosti adhezních sil na vzdálenosti hrotu od povrchu (křivky síla-vzdálenost).

Během přibližování k povrchu začne na hrot působit přitažlivá síla F_{ad} , která kvůli působení kombinace van der Waalových interakcí a kapilárních sil vznikajícího menisku ohne cantilever směrem k povrchu (viz obrázek 1.3). Při dalším přibližování se vlivem

1. VLIV A VYUŽITÍ VODNÍHO PROSTŘEDÍ V MIKROSKOPII ATOMÁRNÍCH SIL



Obrázek 1.3: Příklad křivky síla-vzdálenost. Převzato a upraveno z [4].

přímého kontaktu začne měnit interakční síla působící na hrot z přitažlivé na odpudivou a cantilever se ohýbá směrem od povrchu. Během zpětného chodu dochází vlivem působících kapilárních sil k opětovnému ohnutí raménka směrem k povrchu až do vzdálenosti, kdy dojde k porušení menisku a odtržení hrotu. Tato vzdálenost a odpovídající síla je mírou velikosti menisku a vlivu kapilárních sil.

Kapilární síly

Při vzniku vodního můstku mezi hrotem a vzorkem, začnou kapilární síly přitahovat povrchy k sobě. Tyto síly jsou vyvolány Laplaceovým tlakem působícím na danou část obou povrchů. Pro kontakt kulového a plochého povrchu můžeme v makroskopickém měřítku velikost síly vyjádřit jako [5]:

$$F_C = A\Delta P_L \approx -2\pi R d \Delta P_L = -2\pi R d \gamma_L / r_k. \quad (1.8)$$

Pro malé ϕ je $(d + D) \approx 2r_k \cos \theta$ (viz obrázek 1.2) a pro velikost kapilární síly v závislosti na vzdálenosti povrchů platí [5]:

$$F_C(D) = \frac{-4\pi R \gamma_L \cos \theta}{(1 + D/d)}. \quad (1.9)$$

Protože je ale poloměr AFM hrotu řádově stovky nanometrů nemůže výše uvedený model popisovat reálnou situaci. Je tomu tak proto, že při nízké vlhkosti je r_2 srovnatelný s r_1 a naopak při velkých vlhkostech roste kvůli malému poloměru hrotu významně úhel ϕ . Pro korektní popis je proto potřeba tuto aproximaci doplnit. Pokud uvažujeme kulové zakřivení špičky hrotu, pochází kapilární síla působící na hrot od Laplaceova kapilárního tlaku i od povrchového napětí: $F_C = F_p + F_S$ [16], kde

$$F_p = \pi \gamma R \left(-\sin \phi + \frac{\cos(\theta_1 + \phi) + \cos \theta_2}{\frac{D}{R} + 1 - \cos \phi} \sin \phi \right), \quad (1.10)$$

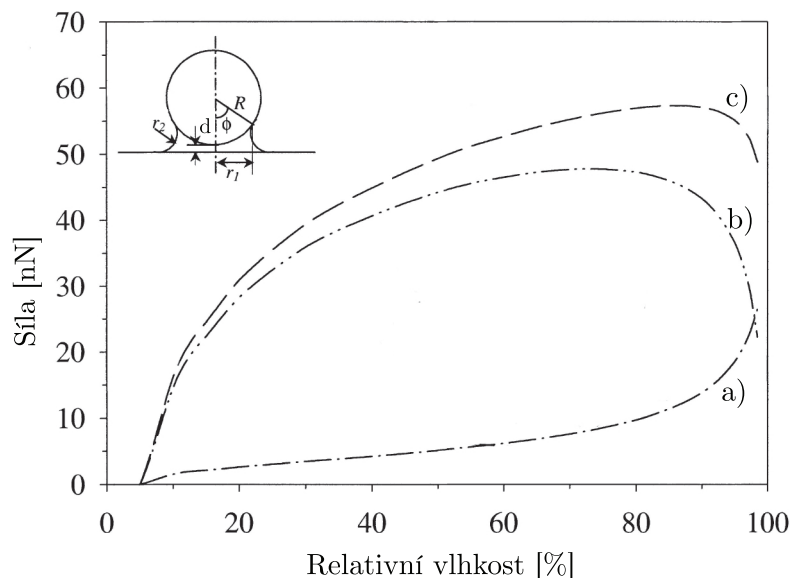
$$F_S = 2\pi R \sin \phi \sin(\theta_1 + \phi) \quad (1.11)$$

a θ_1 a θ_2 jsou úhly kontaktu kapaliny s hrotem, respektive povrchem.

1.2. VODNÍ MENISKUS A JEHO VLIV NA AFM TECHNIKY

Xiao *et al.* [8] simulovali celkovou kapilární sílu F_C užitím Kelvinovy rovnice a rovnic 1.10 a 1.11. Výsledek je možné vidět na obrázku 1.4. Pozorujeme, že příspěvek od povrchového napětí roste významně až nad $\sim 80\%$ RH, zatímco příspěvek od Laplaceova kapilárního tlaku hned zpočátku velmi rychle s vlhkostí narůstá až do jisté hodnoty a okolo $\sim 80\%$ naopak klesá. Díky nárůstu síly od povrchového napětí tak celková kapilární síla klesá až při $RH > 90\%$. Takový pokles byl experimentálně skutečně pozorován [8][4].

V rozmezí nízkých relativních vlhkostí ($> 10\%$) jsou ale kapilární síly daleko nižší než skutečná změřená adhezní síla, protože stabilní meniskus teprve vzniká [8]. Pro nízkou relativní vlhkost je proto nutné vzít v úvahu i další vlivy vodního prostředí.



Obrázek 1.4: Kapilární síla jako funkce RH podle rovnic 1.10, 1.11 a jejich součet. a) F_S síla od povrchového napětí, b) F_p síla od Laplaceova kapilárního tlaku, c) F_C celková kapilární síla. Převzato a upraveno z [8].

Vodíkové můstky

Pro popis interakcí mezi hrotem a substrátem při nízkých relativních vlhkostech můžeme použít vodíkové můstky mezi adsorbovanými molekulami vody [7]. Síť vodíkových můstků, která může vytvořit přilnavý most mezi dva povrchy v blízkém kontaktu, vzniká propojením molekul vody adsorbovaných na povrchu vzorku. Takováto interakce vodíkovými můstky může výrazně zvětšit velikost van der Waalsových sil [6].

Bylo zjištěno, že na povrchu oxidu křemičitého vznikají vrstvy adsorbované vody ve stavu podobném ledu. Tyto vrstvy rostou do tloušťky přibližně 3 molekul (0,8 nm) při $RH 30\%$ a ovlivňují orientaci navazujících molekul až do $RH 60\%$, kdy už se voda v ledu podobném stavu nevyskytuje. Takováto adhezní síla mezi AFM hrotem a oxidem křemičitým dosahuje svého maxima mezi 20% a 50% vlhkostí. Zarate *et al.* [6] došli k závěru, že v tomto rozmezí RH nebylo možné dostatečně popsat adhezní síly pomocí povrchového napětí, a proto nemůžeme tyto síly považovat za zanedbatelné.

Vliv na van der Waalsovou interakci

Vodní prostředí ovlivňuje i van der Waalsovou interakci. Pro geometrii koule a desky je van der Waalsova síla dána jako [5]

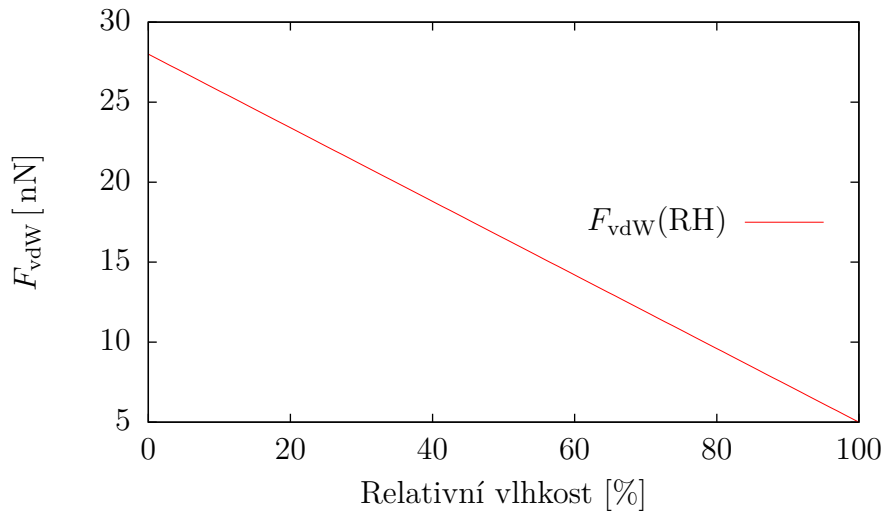
1. VLIV A VYUŽITÍ VODNÍHO PROSTŘEDÍ V MIKROSKOPII ATOMÁRNÍCH SIL

$$F_{\text{vdW}} = \frac{\kappa R}{6D^2}, \quad (1.12)$$

kde κ je Hamakerova konstanta, která záleží na médiu vyplňujícím prostor mezi objekty a jejich materiálu. Pro vodu má zpravidla nižší hodnotu a proto jsou ve vodním prostředí van der Waalsovy síly oslabeny. Proto, když se bude měnit relativní vlhkost od nuly do RH 100 %, poroste i množství kondenzované vody a předpokládáme, že hodnota van der Waalsových sil se bude pohybovat mezi dvěma extrémy: $F_{\text{vdW}}^{\text{vzduch}}$ (pro 0% RH) a $F_{\text{vdW}}^{\text{voda}}$ (pro 100% RH). Pro hrubou představu můžeme takovou závislost linearizovat takto:

$$F_{\text{vdW}}(RH) = \frac{RH}{99\%} F_{\text{vdW}}^{\text{voda}} + \left(1 - \frac{RH}{99\%}\right) F_{\text{vdW}}^{\text{vzduch}}. \quad (1.13)$$

Například pro kontakt hrotu Si_3N_4 s povrchem SiO_2 je v případě vodního média $\kappa = 1,9 \cdot 10^{-20}$ J a v případě vzduchu $\kappa = 10,38 \cdot 10^{-20}$ J [8]. Pokud uvažujeme rádius hrotu $R \approx 100$ nm a vzdálenost mezi hrotem a povrchem $D = 2,5$ Å, vypočteme podle rovnice 1.12, že v tomto případě pro van der Waalsovou interakci platí: $F_{\text{vdW}}^{\text{voda}} \approx 5$ nN a $F_{\text{vdW}}^{\text{vzduch}} \approx 28$ nN. Průběh závislosti pro tyto hodnoty je vyneseno na obrázku 1.5.



Obrázek 1.5: Aproximace závislosti van der Waalsových sil na relativní vlhkosti podle rovnice 1.13.

1.2.3. Lokální anodická oxidace (LAO)

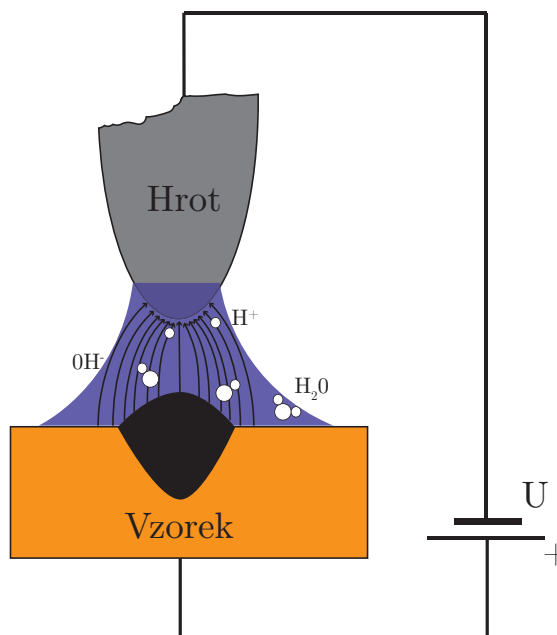
Tato technika využívající hrotu AFM se stala oblíbenou metodou pro přípravu nanostruktur díky své relativně nízké ceně. Navzdory její experimentální jednoduchosti nebyly její teoretické principy doposud plně objasněny. [4]

Princip

Jedná se o řízený růst oxidů na chemicky reaktivním substrátu, kterého je dosaženo přiložením elektrického napětí mezi vodivý hrot a substrát. Ty potom fungují jako katoda, resp. anoda. Stievenard *et al.* [11] ukázali, že k oxidaci začíná docházet až po dosažení jistého prahového napětí. Díky malé vzdálenosti mezi hrotem a povrchem vzniká v jejich

1.2. VODNÍ MENISKUS A JEHO VLIV NA AFM TECHNIKY

blízkém okolí velmi silné elektrické pole ($E > 10^9$ V/m) a to i pro relativně nízké hodnoty napětí na hrotu. Takto silné pole zachycuje ionty vzniklé disociací vody (H^+ , OH^- , O_2^-) a zabraňuje jejich přirozené rekombinaci, což vede ke zvýšené koncentraci těchto iontů a z vody se stává elektrolyt. Záporné ionty jsou následně přitahovány směrem k substrátu, kde reagují s jeho molekulami za vzniku povrchových oxidů. Elektrické pole navíc zesiluje difuzi aniontů skrz povrchovou vrstvu, takže k oxidaci dochází i do hloubky pod povrchem (viz obrázek 1.6). Tato polem indukovaná oxidace byla poprvé popsána Cabrerou a Mottem [10]. výhodou také je, že díky své nižší hustotě vystupují oxidové struktury nad povrch vzorku a proto jsou detekovatelné pomocí AFM bez dalšího leptání. [9]



Obrázek 1.6: Schéma principu lokální anodické oxidace.

Dosažení požadovaných výsledků závisí na mnoha parametrech. Na přiloženém napětí, rychlosti pohybu hrotu, použitém AFM módu nebo přitlačné síle, kterou je hrot řídicím systémem přitlačen k povrchu. Závisí ale také na proudu iontů mezi hrotem a povrchem vzorku, který prochází skrz přítomný vodní můstek.

Podle Bartošíka *et al.* [4] neovlivňuje lokální anodickou oxidaci pouze samotná velikost menisku. Ukázali totiž, že i při nízkých hodnotách RH ($< 50\%$) dochází k tvorbě struktur, které jsou svou velikostí srovnatelné se strukturami, připravenými při vysoké RH ($> 90\%$), ačkoliv jejich rozměry vykazují daleko větší variabilitu. Bližší simulace elektrického pole toto chování částečně vysvětlily a naznačily, že při nižších vlhkostech dochází lokálně ke zvýšení elektrické intenzity v oxidové vrstvě pod hrotem, a tím i ke zvýšené difuzi iontů skrz povrch.

Použití

Jak už bylo zmíněno, tato technika se využívá pro vytváření nanostruktur z oxidů daného substrátu. Díky odlišným vlastnostem oxidů lze takovýchto struktur využít nejen jako izolační bariéry v nanoelektronice, ale také pro vytváření složitějších vzorů na tenkých vrstvách, které po vhodném selektivním odleptání mohou sloužit jako nanolitografické masky. [9]

1. VLIV A VYUŽITÍ VODNÍHO PROSTŘEDÍ V MIKROSKOPII ATOMÁRNÍCH SIL

V neposlední řadě se vzory vytvořené lokální anodickou oxidací na substrátech dají použít pro selektivní růst atomů kovů pomocí epitaxe molekulárním svazkem (MBA). A to zejména proto, že:

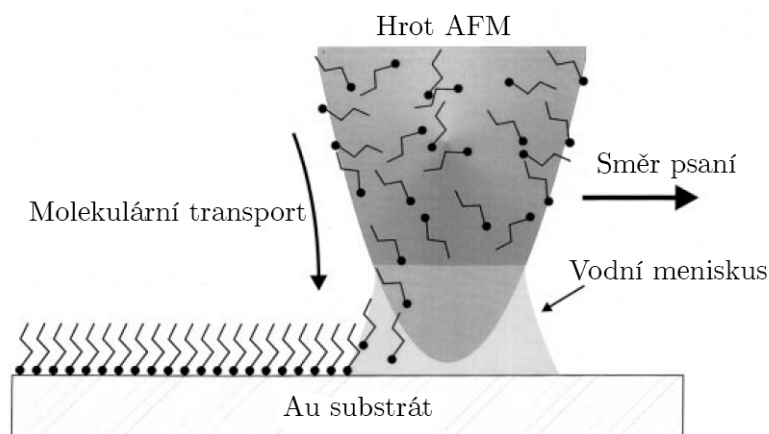
- substrát a jeho oxid mají rozdílné koeficienty ulpění pro vypařovaný kov
- přednostní desorpci z oxidu nebo substrátu během ochlazování substrátu
- rozdílné difúzní délky přidaných železných atomů na křemíku nebo jeho oxidu

Bartošík *et al.* [12] ukázali, že v principu se dá této techniky použít pro růst jakýchkoliv kovů, které mají rozdílné koeficienty ulpění pro daný oxid. Ten může být připraven pomocí LAO i na jiných substrátech než křemík (např. GaAs).

1.2.4. Dip-pen nanolitografie (DPN)

Tato metoda, při které je z ostrého hrotu (pero) díky kapiárním silám transportován inkoust na substrát (papír) je známá už 4 000 let a byla v historii široce používaná k transportu molekul na makroskopické úrovni. Na nanoskopické úrovni využívá DPN (podobně jako LAO) hrotu AFM a vodního menisku mezi hrotem a substrátem. Kapilární transport molekul z AFM hrotu na substrát slouží k přímému „psaní“ požadovaných vzorů skládajících se z relativně malého množství molekul.

Ačkoliv není DPN jedinou litografickou metodou využívající přímý přenos molekul, spočívá její výhoda v možnosti selektivně umístit rozdílné druhy molekul na přesně dané místa v rámci konkrétní nanostruktury a to relativně jednoduchým a levným způsobem. Navíc při použití inkoustů různých typů umožňuje DPN vytvořit požadovanou nanostrukturu a poté vyplnit oblast, kterou je obklopena, druhým typem inkoustu.



Obrázek 1.7: Schéma principu Dip-pen litografie. Převzato a upraveno z [13].

Jak už bylo řečeno, transport molekul z hrotu je umožněn skrz vodní meniskus. Aby bylo dosaženo preferovaného směru transportu molekul z hrotu na substrát, musí být použity inkousty, které jsou reaktivní se substrátem. Tím vzniká chemická síla, která napomáhá pohybu molekul ve správném směru skrz vodní můstek (viz obrázek 1.7). Navíc, pokud se transportované molekuly dokážou zachytit díky chemisorpci na substrátu, dojde k vytvoření stabilní nanostruktury. Relativní vlhkost tak může být použita jako regulátor míry přenosu inkoustu a rozměrů stopy. [13]

2. Elektrické měření nanosenzorů

2.1. Motivace

Ve vývoji detekčních technologií pro průmyslové, vojenské a environmentální monitorování je hlavním cílem dosáhnout takové citlivosti, že je možné zjistit individuální kvantum dané měřené entity. V případě chemických senzorů je tímto kvantem jeden atom nebo molekula. Základním problémem, který takovému rozlišení brání, jsou fluktuace způsobené tepelným pohybem nábojů a defektů vedoucí ke vzniku přirozeného šumu. Tento šum zastíní signál od individuální molekuly obvykle o mnoho řádů.

V současné době se pracuje na vývoji nanosenzorů vyrobených z grafenu, který je díky svým poměrně unikátním elektrickým vlastnostem vhodným kandidátem nejen v oblasti chemických senzorů, ale také pro ostatní aplikace s požadavkem na detekci externího náboje, magnetického pole nebo mechanického namáhání. Princip činnosti takových nanosenzorů vychází ze změny jejich elektrické vodivosti, σ , v závislosti na molekulách adsorbovaných na povrchu grafenu, kde působí jako donory nebo akceptory. Požadovanou citlivost umožňují těmto nanosenzorům následující charakteristiky grafenu:

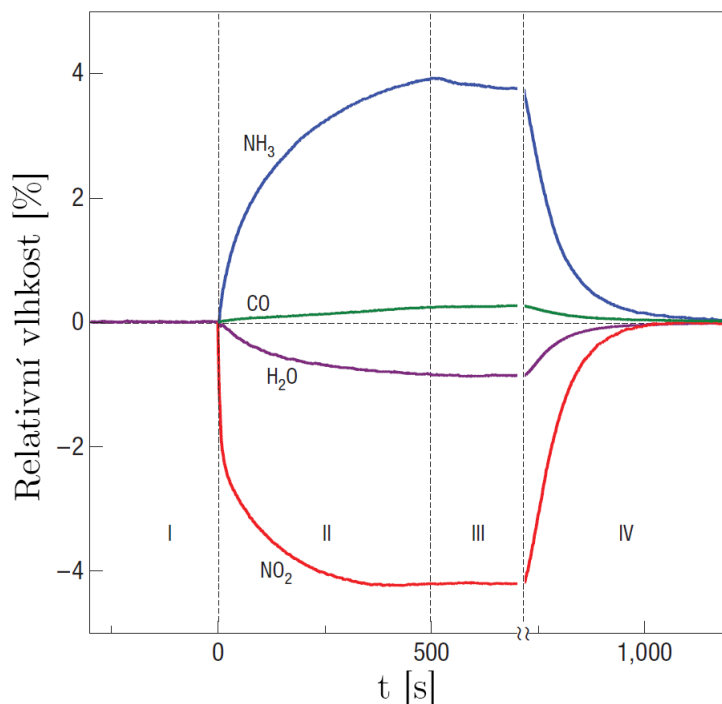
- grafen je vždy dvoudimenzionální materiál a tedy má celý svůj objem vystaven povrchovým adsorbátům.
- grafen vykazuje elektrickou vodivost jako kovy, a tudíž i nízký Johnsonův šum i při limitně nízké koncentraci nosičů náboje, kdy může pár elektronů zásadně změnit koncentraci
- má minimum krystalových poruch a tedy i nízkou hodnotu šumu vzniklého jejich tepelným přesunem
- umožňuje čtyřbodové měření na zařízeních tvořených monokrystalech s ohmickými kontakty s nízkým odporem.

Kombinace všech těchto vlastností maximalizuje poměr signálu a šumu tak, že jsme schopni detekovat změnu lokální koncentrace nosičů náboje o méně než jeden elektron. [14]

2.2. Aplikace

Schedin *et al.* [14] ukázal vliv plynných chemikálií silně rozpuštěných v čistém heliu nebo dusíku na grafenový nanosenzor při atomsférickém tlaku. Na Obrázku 2.1 můžeme vidět časovou odezvu rezistivity na NO_2 , NH_3 , H_2O a CO v koncentracích 1 p.p.m. (jedna částice na milion). Lze jednoduše pozorovat změny, které se objevily velmi krátce (jednotky minut) po vystavení nanosenzoru plynům. K uvedení do původního stavu bylo zapotřebí zařízení

2. ELEKTRICKÉ MĚŘENÍ NANOSENZORŮ



Obrázek 2.1: Změny relativní rezistivity grafenového nanosenzoru po vystavení atmosféře čtyřech různých plynů. Kladné, resp. záporné, znaménko rezistivity indikuje dopování elektronem, resp. dírou. Převzato a upraveno z [14].

zahřát nad 150 °C nebo je vystavit krátkému působení ultrafialového záření. Dosažení původního stavu bylo potvrzeno opakováním pokusu, které nevykazovala žádné změny.

Zhang *et al.* [15] navíc ukázal, že dopováním grafenu vhodnými molekulami nebo vytvořením defektů je možné výrazně zvýšit citlivost grafenových nanosenzorů, protože molekuly při adsorpci na grafenové ploše volné vazby a defekty preferují. Schedin *et al.* také ukázal, že koncentrace defektů nijak neovlivňuje mobilitu náboje a tedy nemá vliv na citlivost nanosenzorů.

Velké pole takovýchto nanosenzorů by zvětšily funkční plochu a tím i citlivosti na krátkodobé expozice. Stejně tak by vzrostla schopnost detekce nepatrných koncentrací.

3. Požadavky a motivace pro výrobu environmentální komory

Cílem této práce bylo navrhnout a dohlížet na výrobu environmentální komory pro mikroskop atomárních sil od firmy NT-MDT používaný v laboratoři ÚFI VUT v Brně.

Komora bude sloužit k regulaci vlhkosti během měření SPM metod. Díky tomu bude možné ovlivnit tvar a velikost vodního můstku mezi hrotem a povrchem vzorku. Dále komora umožní provádět měření v podmínkách nízkého vakua a zvyšovat tak citlivost a přesnost měření. Podle firmy NT-MDT dochází k nejvyššímu navýšení citlivosti v podmínkách okolo 10^{-2} Torr, dále se už citlivost a stabilita měření významně nezvyšuje. Použití nízko-vakuové komory proto představuje optimální poměr mezi cenou a kvalitou, neboť v porovnání s ultravakuovými mikroskopy trvá vyčerpání mikroskopového prostoru podstatně kratší dobu (jednotky minut) a systém je daleko kompaktnější, lehce ovladatelný a udržovatelný [17].

Alternativně bude možné komoru použít pro definované změny koncentrace plynů určených k detekci při měření grafenových nanosenzorů nebo pro kombinaci měření AFM na grafenovém nanosenzoru v atmosféře požadovaného plynu.

3.1. Konstrukční požadavky

Komora pro mikroskop atomárních sil NTegra Prima byla navrhována tak, aby splňovala především tyto požadavky:

1. Použití kovového materiálu.
2. Optický průhled skrz víko sloužící k přímé kontrole procesu měření a nastavení hrotu SPM vzhledem k měřenému povrchu.
3. Mechanické ovládání čtyř polohovacích šroubů AFM modulu a dvou polohovacích šroubů pohyblivého stolku na vzorky.
4. Možnost čerpání do podmínek nízkého vakua $P < 10^1$.
5. Elektrické průchodky pro vedení elektrické kabeláž od senzorů.
6. Hmotnost do 4 kg.
7. Snadná a rychlá montáž.
8. Zahrnutí senzorů pro měření vakua a relativní vlhkosti.
9. Návrh a výroba samostatně stojícího dna kompatibilního s komorou, které umožní používat komoru pro samostatné měření nanosenzorů.
10. Ventily pro zavádění plynů.

3. POŽADAVKY A MOTIVACE PRO VÝROBU ENVIRONMENTÁLNÍ KOMORY

3.2. NT-MDT NTegra Prima

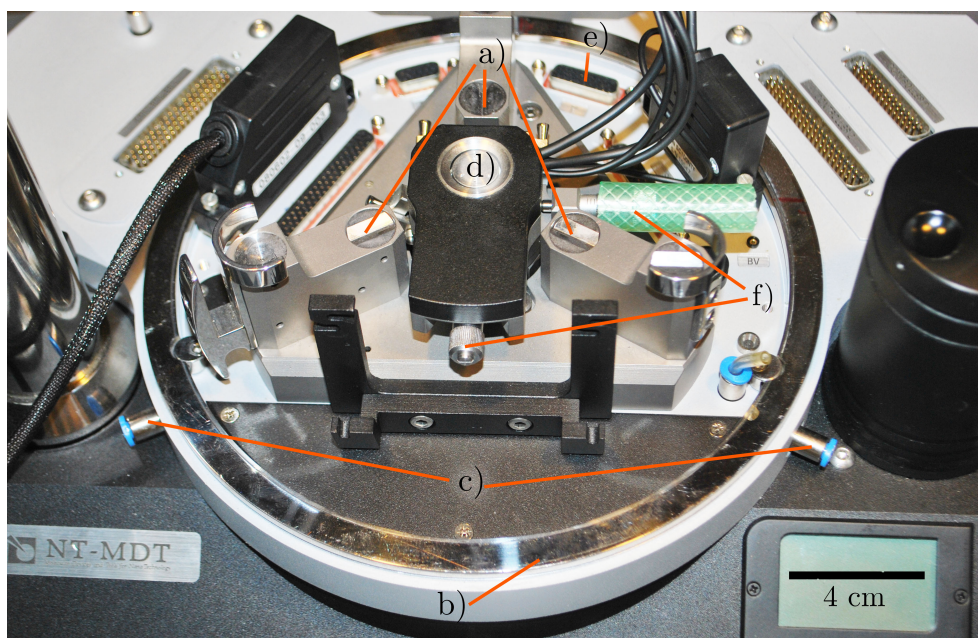
Mikroskop NTegra Prima od ruské firmy NT-MDT je multifunkční zařízení, umožňující aplikaci většiny SPM metod. Toho je dosaženo otevřenou architekturou. Ta se vyznačuje možností snadné výměny měřicího modulu podle požadované SPM technologie na základní kostře mikroskopu. Zařízení je svou konstrukcí pro instalaci environmentální komory uzpůsobeno, popis tohoto řešení je uveden v sekci 3.3).

Hlavní částí mikroskopu tvoří základní nosná kostra, která obsahuje většinu elektrického ovládání mikroskopu. V její centrální části se nachází hlavní segment mikroskopu – obrázek 3.1. Ten tvoří pevný stolek, na který se pokládá modul pro měření podle použité SPM technologie. V jeho středu je umístěn pohyblivý stolek sloužící k upevnění vzorku pro měření. Jeho součástí jsou dva mechanické polohovací šrouby a také piezo elementy, které umožňují skenování vzorkem během měření.

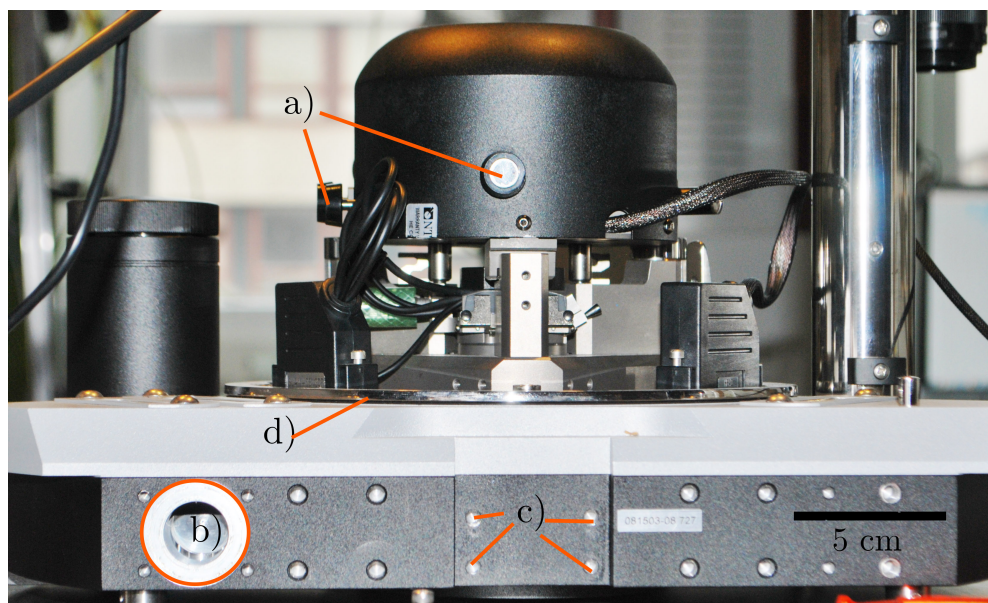
Pevný stolek leží uvnitř nerezového kruhu. Ten je připraven pro dosednutí komory a po její instalaci rozděluje mikroskop na vnitřní a vnější část. Mezi dosedacím kruhem a stolem se nachází elektrické průchodky pro vedení signálu z měřicího modulu ven z komory. Kromě elektrických průchodek jsou zde také situovány malé ventily pro napouštění plynů a průchodka pro evakuaci komory.

V kostře je zabudována nosná polohovací tyč držící optický systém. Ten dovoluje sledovat proces měření v reálném čase. Do zadní strany nosné kostry jsou vyvrtány závity, které neslouží žádnému přímému účelu. Proto jsou v návrhu použity pro uchycení nosné konzoly, která zajistí připojení komory (viz sekce 4.2.4).

Komora bude sloužit především pro měření s modulem pro mikroskop atomárních sil. Jedním z požadavků proto byla možnost ovládat všechny čtyři polohovací šrouby. Pomocí šroubů je možné seřadit diferenční signál ($A-B$) a ($A+B$) z optického detekčního systému, který se během měření nejčastěji rozostřuje.



Obrázek 3.1: Pohled na centrální část mikroskopu. a) stolek pro umístění měřicích modulů, b) dosedací nerezový kruh pro instalaci komory, c) ventily pro napouštění plynů, d) držák na měřené vzorky, e) 25 pinový HD D-sub konektor, f) polohovací šrouby pohyblivého stolku na vzorky.



Obrázek 3.2: Zadní pohled na mikroskop NT-MDT NTegra Prima s AFM modulem. a) polohovací šrouby, b) zabudovaná příruba pro čerpání komory, c) závity pro připevnění montážní konzoly, d) dosedací kruh.

3.3. Jiné komory

Motivací pro výrobu požadované komory byly především nedostatky stávající laboratorní komory a komerčně prodáváného výrobku.

3.3.1. Stávající laboratorní komora

V současné době se v laboratoři ÚFI pro mikroskop NTegra Prima používá jiná svépomocí vyrobená komora z plexiskla. Její podobu ukazuje obrázek 3.3. Tato komora slouží především k regulaci relativní vlhkosti. Její součástí jsou dva mechanické manipulátory (pro seřízení signálu A–B) a senzor vlhkosti, který díky zpětné vazbě spolu s regulačním systémem dokáže udržovat v komoře požadovanou vlhkost. Aby se nemusel celý systém přívodu a regulace plynů zásadním způsobem měnit, návrh nové komory počítá s použitím stejného senzoru vlhkosti.

Nedostatky a důvody vedoucí k navržení nové komory je především absence elektrických průchodek, manipulátorů pro všechny čtyři šrouby (tedy i pro seřízení signálu A+B) a nemožnost čerpání komory do vakua.

3.3.2. Komerčně prodáváná komora

Firma NT-MDT vyrábí pro svůj mikroskop komerční komoru, vyrobenou ze slitiny hliníku. Ta je určena především pro čerpání vnitřního prostoru do vakua. Jejími nedostatky jsou absence mechanických manipulátorů, malý optický průzor ve víku a absence přírub pro připojení senzoru vlhkosti a vakuové měřky.

3. POŽADAVKY A MOTIVACE PRO VÝROBU ENVIRONMENTÁLNÍ KOMORY



Obrázek 3.3: Stávající komora v ústavní laboratoři.



Obrázek 3.4: Mikroskop NTegra od firmy NT-MDT s měřicí komorou.

4. Konstrukční řešení

V této kapitole je popsáno konstrukční řešení zadaného problému. Vzhledem ke skutečnosti, že se jedná o specifické zadání spojené s konkrétním typem mikroskopu, nebylo ve většině případů možné použít normované díly nebo nevyužité součásti z ústavní laboratoře a většina dílu musela být nově navržena. Celý návrh byl vypracován v program Adobe Inventor 2014.

4.1. Výběr materiálu

Protože se komora bude využívat pro regulaci vlhkosti při měření AFM nebo pro měření signálu elektrických nanosenzorů v atmosférách různých plynů, bylo především nutné vybrat materiál odolný vůči působení vodních par, jakož i organických a anorganických plynů.

Aby bylo možné vytvořit konstrukci schopnou odolat působení tlaku jedné atmosféry (101,3 kPa) při zachování rozumné váhy a mobility celého zařízení, bylo potřeba vybrat materiál s vhodným poměrem pevnost–hmotnost. V neposlední řadě byla limitujícím faktorem pro výběr materiálu i jeho cena.

S ohledem na tyto požadavky byly pro prvotní návrh vybrány dva materiály – nerezová ocel a hliník. Základní výhody a nevýhody těchto materiálů jsou srovnány v tabulce 4.1.

Hliník	Nerezová ocel
Výhody Nízká hmotnost (2700 kg/m ³). Velmi dobrá obrobitelnost (5-10 krát rychlejší než nerezová ocel). Nižší cena v porovnání s nerezovou ocelí.	Výhody Velký modul pružnosti ($E = 200$ GPa). Vysoká odolnost vůči působení plynů a korozi. Dobrá svařitelnost a funkčnost svarů pro vakuové technologie.
Nevýhody Nízký modul pružnosti ($E = 70$ GPa). Obtížné svařování pro vakuové technologie.	Nevýhody Velká hmotnost (8000 kg/m ³). Vyšší cena v porovnání s hliníkem.

Tabulka 4.1: Srovnání konstrukčních materiálů pro výroby komory

První návrh komory z nerezové oceli splňoval zadání kromě požadavku na hmotnost (8 kg). To byl však zásadní nedostatek, protože s komorou takové hmotnosti by nebylo možné pohodlně manipulovat, a proto byl tento návrh zamítnut a zaměřili jsme se na návrh hliníkové konstrukce.

4. KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

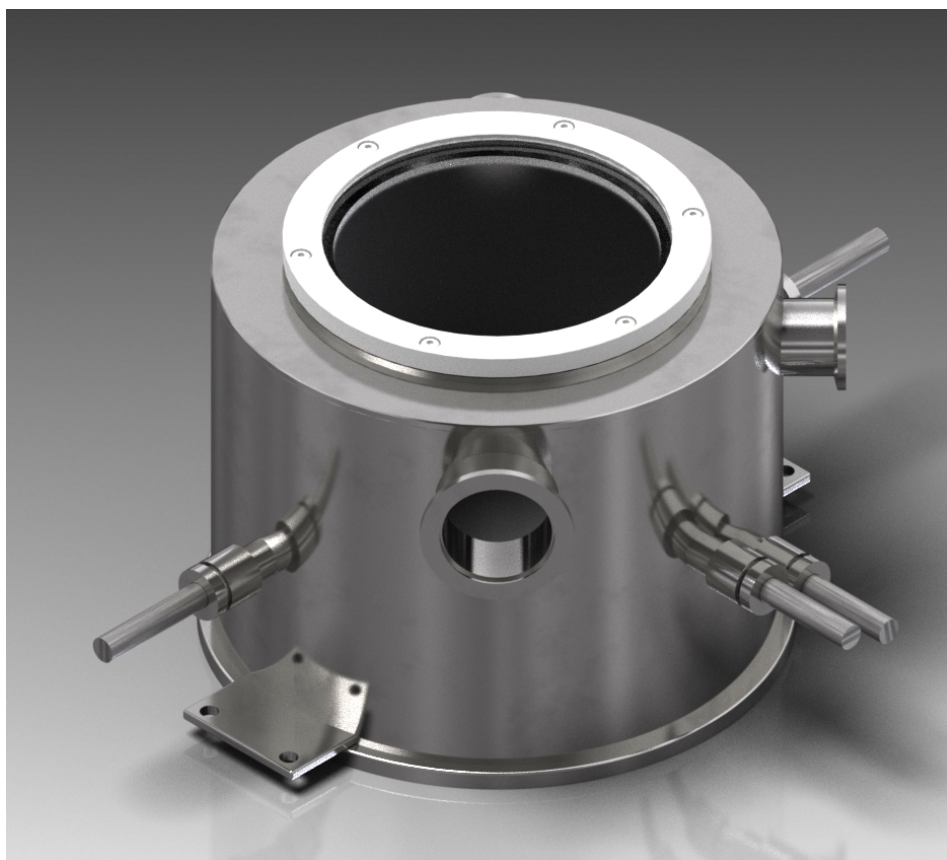
Kvůli relativně nízkému modulu pružnosti hliníku v tahu vyžadoval tento druhý návrh komory daleko robustnější konstrukci, aby při působení tlaku nedošlo k velkým průhybům víka a namáhání svarových spojů. I přesto byla hmotnost hliníkové komory daleko menší (2,5 kg) než hmotnost prvního návrhu komory z nerezové oceli. Použití hliníku podporoval i fakt, že komerčně prodávaná komora od firmy NT-MDT je také vyrobena z hliníku.

Při hledání výrobních možností byla zjištěna významná nevýhoda hliníkové konstrukce. V České republice je technologie hliníkového svařování pro vakuovou techniku poměrně málo zastoupena a nepodařilo se najít firmu, která by byla schopna svary s námi požadovanou přesností realizovat. Proto bylo nutné se vrátit k návrhu z nerezové oceli. Přepřepočítání zahrnovalo především:

1. Ztenčení stěny válce ze 4 mm na 2 mm.
2. Zvětšení optického průzoru – větší část víka pak byla tvořena sklem, které je lehčí než ocel.
3. Snížení výšky komory na minimum.

Díky úpravám se nakonec podařilo požadované hmotnosti (3,5 kg) dosáhnout. Proto byla pro výrobu vybrána nerezová ocel.

Kromě nerezové oceli byl pro některé díly použit i Teflon a Delrin a to především pro pohyblivé mechanické spoje, u kterých je požadováno co nejnižší tření. Protože se komora bude čerpat pouze do podmínek nízkého vakua a mikroskop sám o sobě obsahuje velký počet plastových součástí, je riziko kontaminace vakua vlivem množství uvolněných částic z povrchu součástí vyrobených z těchto materiálů zanedbatelné.



Obrázek 4.1: Celkový pohled na komoru.

4.2. Komora

Plášť komory tvoří válcová trubka o vnějším průměru 204 mm na spodním konci zakončená dosedací přírubou o vnějším průměru 210 mm. Horní konec je zaslepen přivařeným víkem, ve kterém se nachází optický průzor o světlosti 90 mm. Celá komora měří na výšku 170 mm.

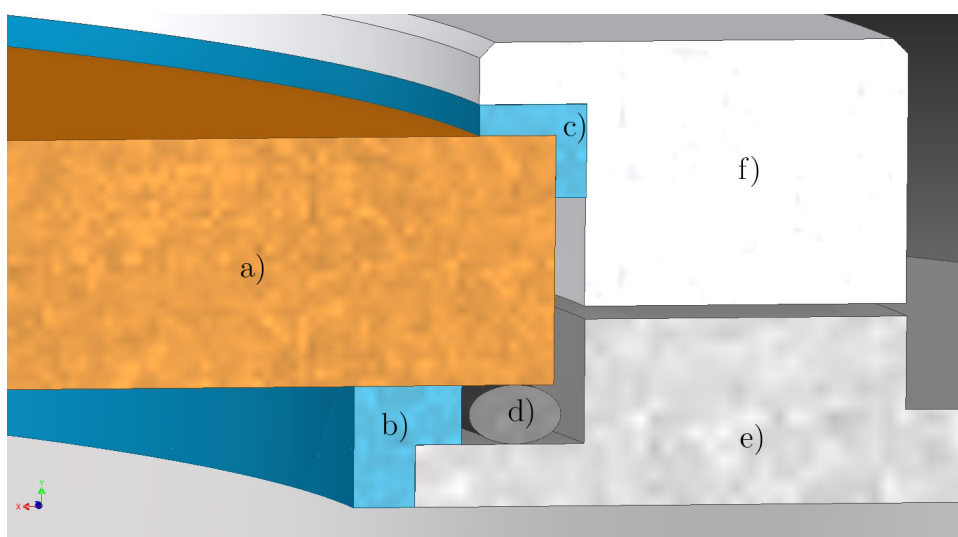
Do pláště jsou připojeny svarem dvě příruby KF-25, které budou sloužit pro připojení vakuové měřky a senzoru vlhkosti. Jedna příruba KF-40 je navržena jako rezervní, pro případ potřeby zapojení elektrických průchodek nebo dalších senzorů. Dále plášť nese čtyři průchodky pro mechanické manipulátory. Ve spodní části se nachází dvě madla pro připojení komory k mikroskopu nebo externímu dnu.

Z důvodu nepraktického zapojování nebude pro vedení signálů od senzorů při instalaci komory na mikroskopu využita žádná z průchodek ve stěně komory. K zapojení bude využit 25 pinový HD D-sub konektor zabudovaný ve dně mikroskopu (viz obrázek 3.1). Výše zmíněná příruba KF-40 je pouze rezervní pro případ, že by zabudovaný konektor nestačil.

Příruba pro připojení hadice z rotační vývěvy bude připojena k otvoru zabudovanému v zadní části nosné kostry mikroskopu (viz obrázek 3.2) nebo k přírubě, která je součástí dna (pro instalaci na externím dnu).

4.2.1. Optický průzor

Pro optický průzor bylo použito křemenné sklo o tloušťce 8 mm a průměru 130 mm (viz obrázek 4.2). Těsnění je zajištěno O-kroužkem, na který je sklo přitlačeno duralovou přírubou. Dural byl zvolen pro celkové odlehčení konstrukce, neboť je příruba připojena šroubovým spojem a umožňuje použít i materiál s problematickou svařitelností. Aby nedocházelo k přímému kontaktu skla s kovem a tedy i k riziku vzniku praskliny na povrchovém defektu kovu, jsou mezi sklo a víko i duralovou přírubu vloženy teflonové dosedací kroužky. Spodní teflonový kroužek navíc zajišťuje správné uložení těsnícího O-kroužku.

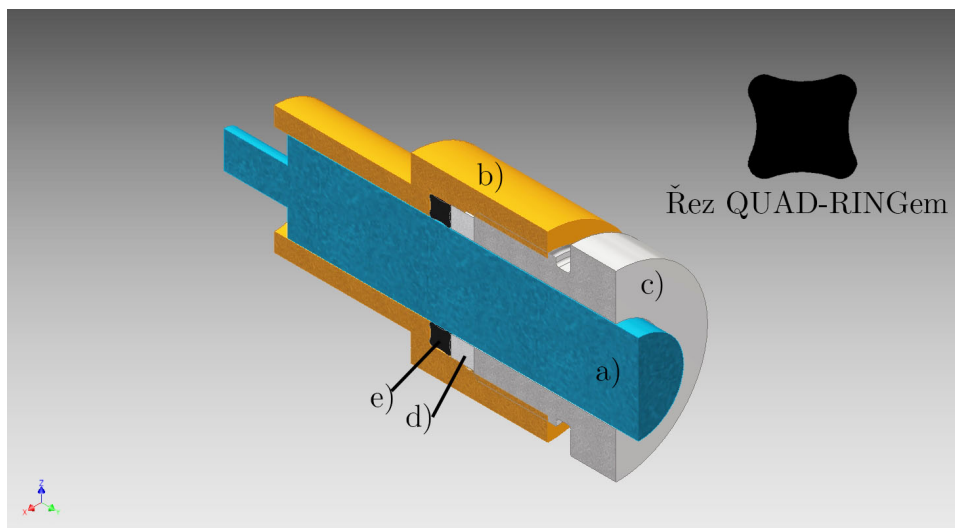


Obrázek 4.2: Řez komorou. Řešení optického průzoru. a) sklo, b) a c) teflonové dosedací kroužky, d) O-kroužek, e) víko komory, f) duralová příruba.

4. KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

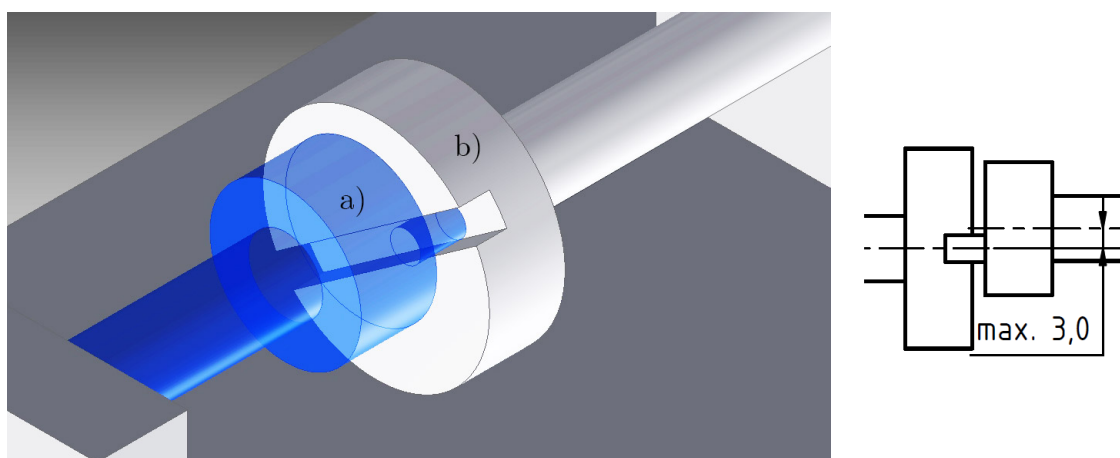
4.2.2. Mechanické průchodky - manipulátory

Mechanické manipulátory slouží k přenosu točivého momentu na polohovací šrouby mikroskopu. Princip těsnění mechanické průchodky umožňující použití manipulátoru i během měření ve vakuových podmínkách je znázorněna na obrázku 4.3.



Obrázek 4.3: Řez mechanickou průchodkou. Schéma principu těsnění mechanické průchodky. a) tyč manipulátoru zakončená hlavou s kolíkem nebo ozubeným kolem, b) matka, c) šroubová hlava, d) přítlačný kroužek, e) QUAD-RING.

Dotazením šroubové hlavy do matky vznikne přes přítlačný kroužek tlak na těsnění, které se roztáhne a utěsní prostor okolo tyče manipulátoru. Těsnící funkci zajišťuje dvojčinné čtyřbřité těsnění QUAD-RING®, které má oproti klasickým O-kroužkům nižší tření a díky své stavbě zajišťuje vyšší těsnící efekt. Přítlačný kroužek je vyroben z teflonu, aby bylo sníženo tření během utahování.



Obrázek 4.4: Schéma principu mechanického spojení s vůlí souososti až 3 mm pro přenos točivého momentu z manipulátoru na polohovací šroub. a) hlava manipulátoru s kolíkem, b) hlava polohovacího šroubu s drážkou.

Pro co nejvyšší těsnost, musí být tyč manipulátoru uložena přesně s malou radiální vůlí. Protože v našich laboratorních podmínkách nebylo možno změřit polohy šroubů na mikroskopu s větší přesností než 1 mm, je systém spojení hlavy manipulátoru a polohovacího šroubu navržen tak, aby přenášel moment i v případě rovnoběžné odchylky os a to

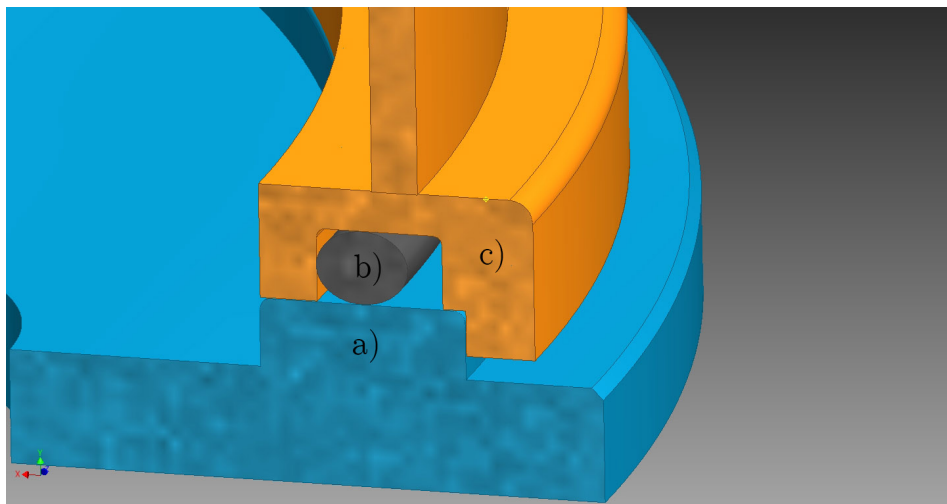
až do vzdálenosti 3 mm. Vůle je zajištěna pohyblivým spojením kolík–drážka (viz obrázek 4.4). Toto spojení v případě nesouososti sice nepřenáší pohyb s konstantní úhlovou rychlostí, vzhledem k povaze funkce to však nepředstavuje její omezení.

Jedna z průchodek nemohla být kvůli nedostatku prostoru umístěna naproti polohovacímu šroubu a proto musí být přenos točivého momentu namísto výše popsaného spojení zajištěn čelním ozubeným soukolím. Bude použit převod složený ze dvou plastových ozubených kol s modulem 1,0 a průměrem roztečné kružnice $d_0 = 12$ mm.

Během navrhování bylo zjištěno, že polohovací šrouby na pohyblivém stolku na vzorky (viz obrázek 3.1) mění během měření společně se stolkem svou vertikální polohu. Konstrukční řešení mechanické spojky s proměnou vzdáleností os v intervalu cca 15 mm by vyžadovalo složité převody na které není v komoře dostatek prostoru. Proto bylo rozhodnuto, že ovládání těchto šroubů bude zajištěno elektrickými krokovými motorky. Řešení tohoto problému bude předmětem další práce na tomto projektu mimo rámec bakalářské práce.

4.2.3. Spojení komory s mikroskopem a dnem

Průměr dosedací příruby odpovídá svou velikostí dosedacímu kruhu (viz sekce 3.2). O-kroužek pro statické axiální těsnění je uložen v normované drážce (viz obrázek 4.5). Příruba je zevnitř vybrána do hloubky 2 mm tak, aby po stranách zůstal 3 mm silný středící kroužek, který zajistí požadovanou osovou polohu komory na dosedacím kruhu. To je důležité pro zajištění co nejpřesnější polohy mechanických průchodek vůči polohovacím šroubům.



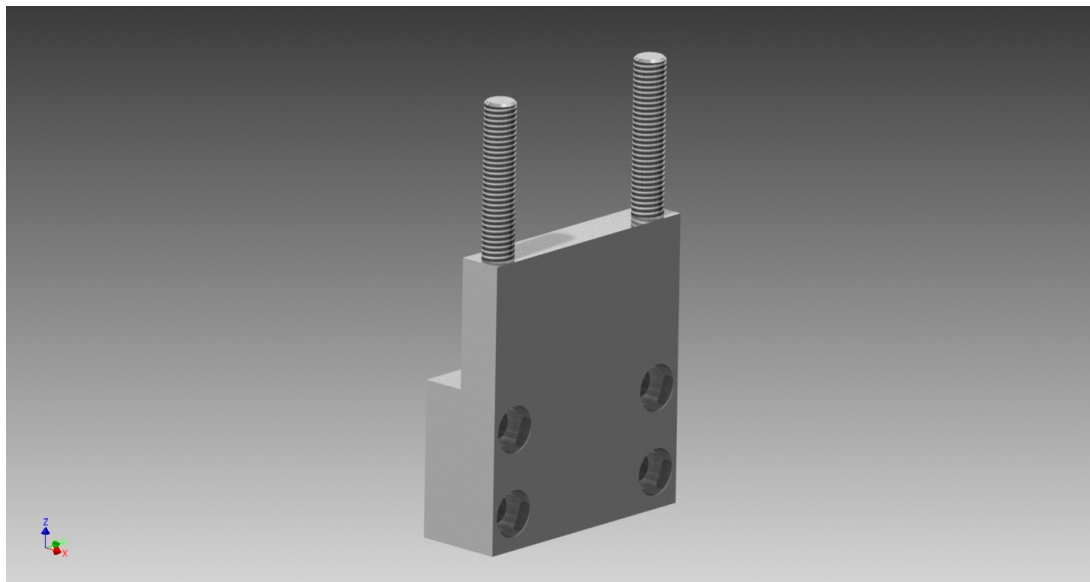
Obrázek 4.5: Řez komorou. Schéma dosednutí komory na mikroskop nebo externí dno. a) dosedací kruh na mikroskopu nebo externím dnu, b) O-kroužek, c) komora s dosedací přírubou a vybráním na středící kroužek.

Pro nastavení správné úhlové polohy na dosedacím kruhu (opět hlavně kvůli poloze mechanických průchodek) a pro mechanické přitlačení dosedací příruby slouží dvě postranní madla. V každém z nich se nachází pár děr pro šrouby, které jsou součástí mikroskopu i dna. Při instalaci se komora k dosedacímu kruhu přes madla dotáhne křídlovými maticemi (viz obrázek 4.8).

4. KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

4.2.4. Úpravy na mikroskopu NTegra Prima

Kvůli důvodům popsaným v sekci 4.2.2, musely být provedeny úpravy i na hlavách polohovacích šroubů modulu AFM. Jak už bylo zmíněno, tři z manipulátorů budou zakončeny speciální hlavou s drážkou (viz obrázek 4.4) a jeden plastovým kolem s čelním ozubem.



Obrázek 4.6: Konzola pro připojení k mikroskopu do závitů na zadní straně mikroskopu.

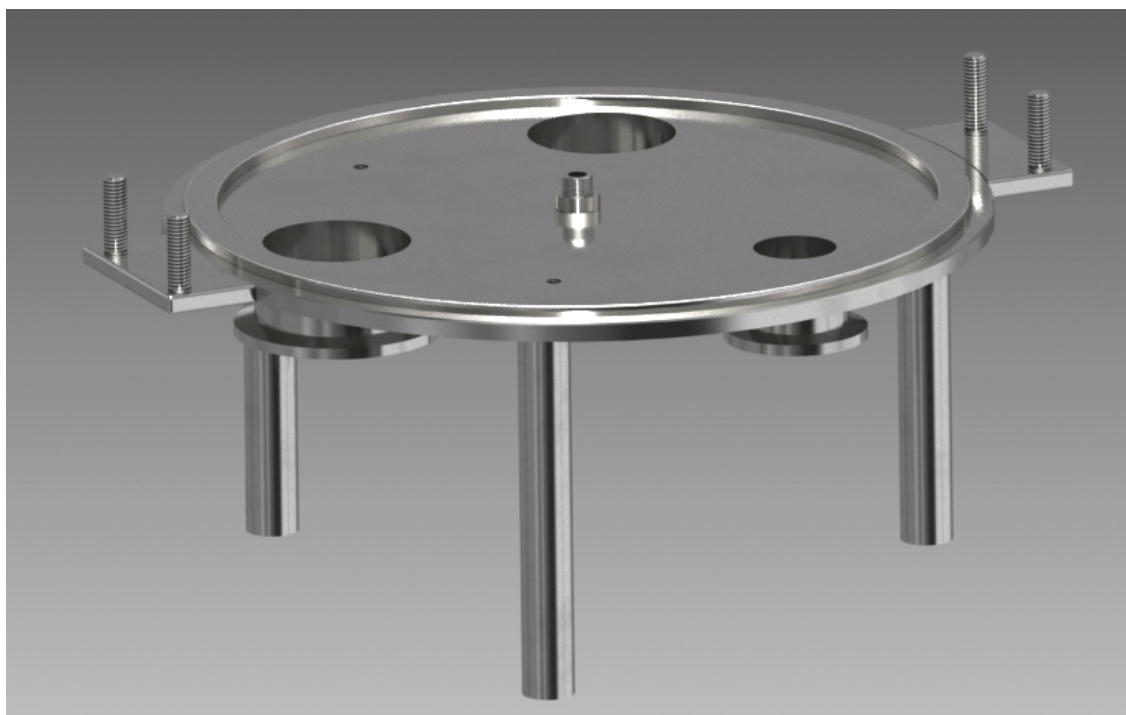
Dále bylo pro mechanické přitažení komory přes madla potřeba vyrobít i speciální konzoli se závitů, která bude ze zadní strany připojena ke kostře mikroskopu (viz obrázek 3.2). Z přední strany se podobná konzola k mikroskopu kvůli absenci závitů připevnit nedá a proto bude dotažení realizováno pomocí závitových tyčí ukončených pravouhlejším háčkem, který bude zachycen zesponu za kostru mikroskopu.

4.3. Dno pro použití komory bez mikroskopu

Jedním z hlavních požadavků bylo navrhnout a vyrobit samostatně stojící dno, aby bylo možné komoru používat pro měření odezvy nanosenzorů v atmosférách různých plynů bez AFM. Při návrhu bylo dbáno, aby se svou konstrukcí a funkcí dno co nejvíce podobalo centrální části mikroskopu. Díky tomu bude pro obě instalace možné používat stejné nebo podobné komponenty a tím se celý proces měření co možná nejvíce usnadní a urychlí. Hmotnost dna bez připojených součástí je 2 kg.

Hlavní část tvoří plochý disk o síle 5 mm s vyvýšeným dosedacím kruhem stejných rozměrů jako dosedací kruh na mikroskopu. Ze spodní strany jsou ke dnu přivařeny válcové nohy s vnitřními závitů, do kterých se zašroubují komerčně prodávané polohovací nohy s protiskluzovou základnou. Tím se zvýší stabilita a v závislosti na délce zašroubování bude možné upravovat výšku dna podle nároku na prostor až o 8 cm.

Po stranách ze dna vystupují dva páry závitů zajišťujících připojení ke komoře. Připojení bude realizováno stejným způsobem jak bylo popsáno v sekci 4.2.3 a je zobrazeno na obrázku 4.8.



Obrázek 4.7: Celkový pohled na externí dno.

4.3.1. Stolek pro senzory

Uprostřed dna se nachází závit, který bude sloužit pro připojení stolků na nanosenzory. Stolek bude vždy navržen a vyroben podle architektury plošného spoje, na kterém bude nanosenzor umístěn a podle dalších požadavků – například ohřívání a chlazení nanosenzorů během měření nebo přítomnosti proměnného magnetického pole. Protože se do této chvíle nepovedlo navrhnout a vyrobit plošný spoj, který by vyhovoval a tedy nejsou dány přesné požadavky na parametry stolu, bude návrh a výroba stolků požadovaných rozměrů a funkce předmětem další práce na tomto projektu nad rámec bakalářské práce.

4.3.2. Průchodky

Dno obsahuje dvě příruby KF-40 a jednu KF-25. Aby bylo vedení kabeláže od senzorů identické při instalaci komory na mikroskopu i instalaci s externím dnem, bude jedna z KF-40 přírub použita pro připojení 25 pinové HD D-sub průchodky, tedy stejného konektoru, který je zabudován v mikroskopu. Díky tomu nebude třeba měnit zapojení nanosenzoru v případě, že se bude měřit nejprve samostatně a následně na AFM. Druhá příruba KF-40 je rezervní pro další aplikace (ohřívání nebo chlazení stolku se vzorkem) a KF-25 bude použita pro čerpání vakua.

Ve dně se také nachází dvě průchozí díry se závity. Jejich funkcí je připojení ventilů sloužících k napouštění plynů. Tyto ventily budou opět shodné s ventily na mikroskopu (viz obrázek 3.1). Pokud bude komora čerpána do vakua, budou tyto díry zaslepeny šrouby s gumovým těsněním.

4. KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

4.4. Kompletní sestava komory a dna

Na obrázku 4.8 je návrh kompletní sestavy komory s externím dnem. Celkově bez polohovacích noh a ostatních přídatných komponentů do průchodek měří sestava na výšku 271 mm a váží 5,5 kg.

Snadná a rychlá montáž komory bude zahrnovat pouze nasazení komory na dosedací kruh, dotažení šroubů v postranních madlech pomocí křídlových matic, zapojení požadovaných komponent do KF přírub a případné zašroubování ventilů pro napouštění plynů a připojení hadic z regulačního zařízení. Nepoužité KF průchodky budou uzavřeny slepou přírubou.

Přítomnost mechanických manipulátorů pro ovládání polohovacích šroubů na mikroskopu by neměla představovat problém, protože při maximálním vytažení manipulátoru by jeho hlavy měly zabírat pouze nepatrnou část vnitřního prostoru. Pokud by někdy v budoucnosti představovaly prostorové omezení, bude možné vyrobit speciální zátky pro jejich zaslepení.



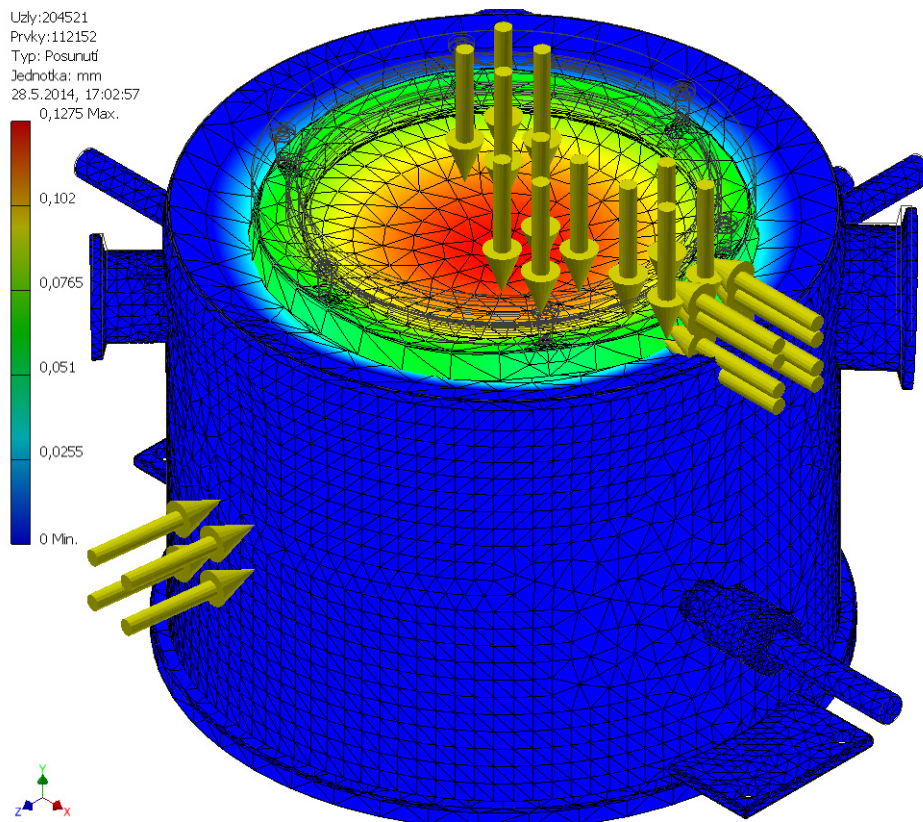
Obrázek 4.8: Celkový pohled. Instalace komory na externím dně.

4.5. Pevnostní výpočty

Při čerpání komory do tlaku 10^0 Pa dochází působením vnějšího atmosferického tlaku k zatížení stěn komory. Kvůli požadavku na nízkou hmotnost bylo potřeba odebrat co nejvíce materiálu, proto bylo nutné spočítat výsledné prohnutí jejich stěn a součinitel bezpečnosti této deformace.

Pevnostní výpočty byly provedeny v programu Adobe Inventor 2014, pomocí nástroje Pevnostní analýza, který využívá k modelování metodu konečných prvků. Před výpočtem bylo zapotřebí přiřadit všem komponentům odpovídající materiálové charakteristiky. Zadanými parametry byl tlak 101 kPa (odpovídá tlaku v komoře řádově 10^0 Pa) působící na víko a stěny komory – znázorněn žlutými šipkami. Jako pevná vazba byla zvolena dosedací příruba. Výsledek výpočtu je zachycen na obrázku 4.9 – zobrazení deformace a 4.10 – zobrazení koeficientu bezpečnosti.

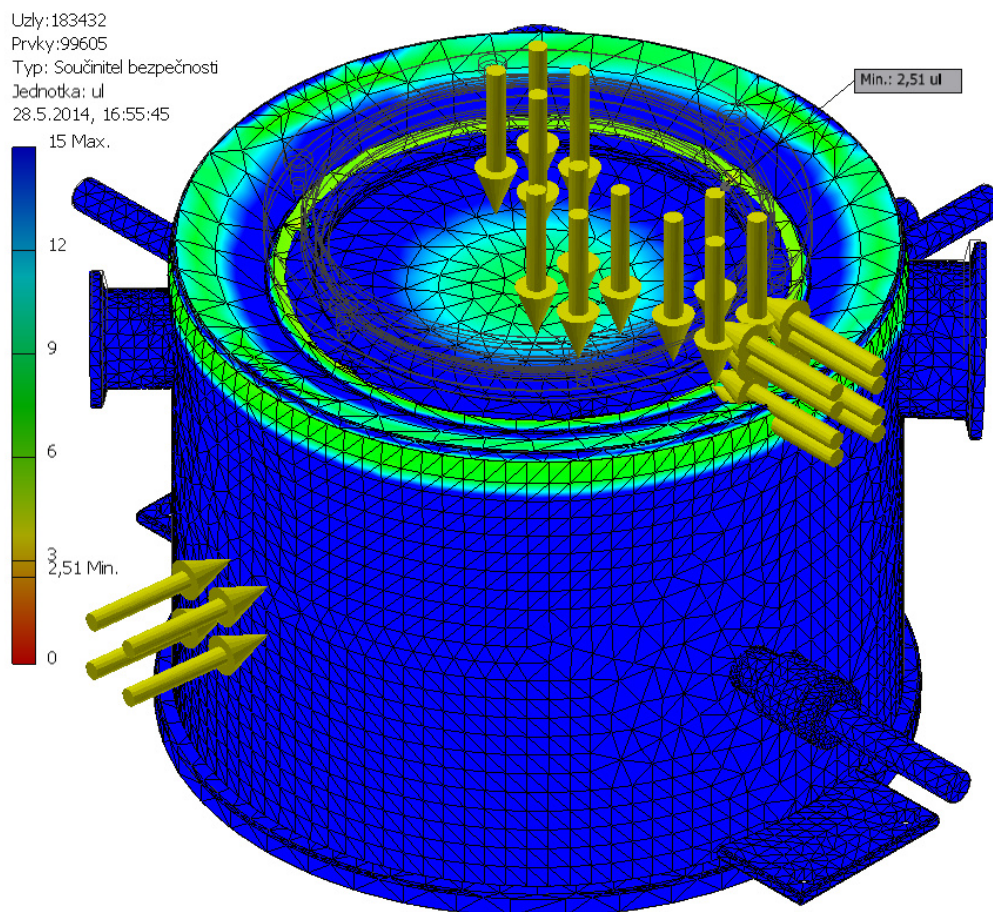
Simulace ukázala, že podle předpokladu dochází k největšímu průhybu ve středu optického průzoru. Hodnota prohnutí v tomto bodě oproti nezatíženému stavu byla vypočtena na $127,5 \mu\text{m}$. Prohnutí je navíc částečně způsobeno deformací teflonových dosedacích kroužků. Z obrázku pro koeficient bezpečnosti je patrné, že součinitel bezpečnosti této deformace je větší než 6. To znamená, že by součást měla teoreticky vydržet 6 krát větší zatížení, a proto je možné tuto deformaci považovat za bezpečnou. Jak je vidět, nejmenší hodnota součinitele bezpečnosti je 2,51. Po bližším zkoumání bylo zjištěno, že tato hodnota platí pro jednu z drážek závitů šroubů v přírubě, kterou je dotaženo sklo v optickém průzoru. Protože se jedná o statické zatížení je tato hodnota pro požadovanou funkci dostatečná. Deformace válcového pláště je vzhledem k průhybu víka se sklem zanedbatelná.



Obrázek 4.9: Simulace prohnutí stěn komory při působení atmosférického tlaku 101 kPa – tlak na jednotlivé plochy je znázorněn žlutými šipkami.

4. KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Na základě těchto výsledků bylo rozhodnuto, že vzhledem k velikosti komory a požadované funkci, je její deformace bezpečná a přijatelná. Výpočet byl proveden pro tlak 10^0 Pa, při dalším čerpání se už tlakový rozdíl zásadním způsobem nezvyšuje, proto by ani případné čerpání do nižších tlaků nemělo pevnost ohrozit.



Obrázek 4.10: Součinitel bezpečnosti při zatížení stěn komory atmosferickým tlakem.

Závěr

Výsledkem této práce je návrh nerezové environmentální komory pro mikroskop atomárních sil NTegra Prima, který se nachází v laboratořích ÚFI VUT Brno. Součástí návrhu je samostatné dno, díky kterému bude možné komoru použít i pro elektronické měření nanosenzorů. Ve spojení se stávajícím systémem pro regulaci plynů umožní zařízení definovaně měnit složení atmosféry uvnitř komory. Alternativně bude možné komoru vyčerpat do podmínek nízkého vakua. Zařízení odstraňuje funkční nedostatky stávající komory a komerčně prodávaného výrobku.

Návrh se značně liší od návrhu stávající komory a při řešení většiny konstrukčních problémů bylo potřeba přijít s originálním řešením. Proto než bylo nalezeno nejlepší řešení, bylo zpracováno několik návrhů. Výsledný návrh se svým řešením snaží o co největší jednoduchost montáže a manipulace s komorou.

Prvotní řešení počítalo s výrobou komory z nerezové oceli, tento návrh však nesplňoval podmínku maximální hmotnosti celého výrobku, proto byl pro druhý návrh zvolen hliník. Kvůli problémům s jeho svařitelností však bylo nakonec třeba vytvořit návrh s použitím nerezové oceli tak, aby celková váha nebránila pohodlné manipulaci.

Protože nejsou k dispozici přesné rozměry cílového mikroskopu a v laboratorních podmínkách nebylo možné změřit s dostatečnou přesností pozice některých komponent, řešení počítá s možnými montážními nepřesnostmi tak, aby byl jejich vliv eliminován.

Během vytváření návrhu bylo zjištěno, že splnění dvou požadavků bude vyžadovat složitější řešení než se původně předpokládalo. Toto řešení bude předmětem další práce a zlepšování návrhu nad rámec této bakalářské práce. Jedná se o instalaci krokových motorků na dva polohovací šrouby stolku na vzorky a návrh stolku pro nanosenzory, který je součástí samostatného dna.

Při zadávání komory do výroby se vyskytly problémy v komunikaci s poptávanou firmou, která v průběhu zadávání neúměrně navýšila cenu oproti původní domluvě. Proto bylo potřeba udělat nové výběrové řízení na výrobce a realizace návrhu se tím pádem asi o měsíc zdržela. Z těchto důvodů byl návrh v době odevzdání práce stále ve výrobě a proto nebylo možné provést původně zamýšlené testování funkce komory.

Nedílnou součástí práce bylo i pochopení základních principů vlivu prostředí na mikroskopii atomárních sil a to nejen na měření, ale i pro významné metody přípravy nanostruktur LAO a DPN. Stejně tak byly objasněny základní principy funkce měření nanosenzorů. Díky realizaci návrhu komory bude možné tyto principy obsáhleji zkoumat a poznatky využívat ke zlepšení zmíněných technologií a postupů.

ZÁVĚR

Literatura

- [1] MIRONOV, V. L. *Fundamentals of the scanning probe microscopy*. Nizhniy Novgorod: Russian Academy of Science, 2004.
- [2] BINNIG, G., C. F. QUATE a Ch. GERBER. Atomic Force Microscope. *Phys. Rev. Lett.* 1986, vol. 56, s. 930–933. Dostupné z: doi: 10.1103/PhysRevLett.56.930.
- [3] ROZHOK, Sergey, Peng SUN, Richard PINER, Marya LIEBERMAN a Chad A. MIRKIN. AFM Study of Water Meniscus Formation between an AFM Tip and NaCl Substrate. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2004, vol. 108, no. 23, s. 7814–7819. Dostupné z: doi: 10.1021/jp0401269.
- [4] BARTOŠÍK, Miroslav, David ŠKODA, Ondřej TOMANEC, Radek KALOUSEK, Pavel JÁNSKÝ, Jakub ZLÁMAL, Jiří SPOUSTA, Petr DUB a Tomáš ŠIKOLA. Role of humidity in local anodic oxidation: A study of water condensation and electric field distribution. *Phys. Rev. B*. 2009, vol. 79, s. 195406. Dostupné z: doi: 10.1103/PhysRevB.79.195406.
- [5] ISRAELACHVILI, Jacob N. 17 - Adhesion and Wetting Phenomena. In: *Intermolecular and Surface Forces*. Third Edition. San Diego: Academic Press, 2011, s. 415–467. ISBN 978-0-12-375182-9.
- [6] ZARATE, Nyah V., Aaron J. HARRISON, James D. LITSTER a Stephen P. BEAUDOIN. Effect of relative humidity on onset of capillary forces for rough surfaces. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2013, vol. 411, s. 265–272. Dostupné z: doi: 10.1016/j.jcis.2013.05.048. ISSN 0021-9797.
- [7] ASAY, David B. a Seong H. KIM. Effects of adsorbed water layer structure on adhesion force of silicon oxide nanoasperity contact in humid ambient. *The Journal of Chemical Physics*. 2006, vol. 124, no. 17, s. 174712–. Dostupné z: doi: 10.1063/1.2192510. ISSN 00219606.
- [8] XIAO, Xudong a Linmao QIAN. Investigation of Humidity-Dependent Capillary Force. *Langmuir*. 2000, vol. 16, no. 21, s. 8153–8158. Dostupné z: doi: 10.1021/la000770o.
- [9] ČERVENKA, Jiří, Radek KALOUSEK, Miroslav BARTOŠÍK, David ŠKODA, Ondřej TOMANEC a Tomáš ŠIKOLA. Fabrication of nanostructures on Si(100) and GaAs(100) by local anodic oxidation. *Applied Surface Science*. 2006, vol. 253, no. 5, s. 2373–2378. Dostupné z: doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.03.095>. ISSN 0169-4332.
- [10] CABRERA, N a N F MOTT. Theory of the oxidation of metals. *Reports on Progress in Physics*. 1949, vol. 12, no. 1, s. 163. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/0034-4885/12/i=1/a=308>.

LITERATURA

- [11] STIEVENARD, D. a P.A. FONTAINE. Nanooxidation using a scanning probe microscope: An analytical model based on field induced oxidation. *Applied Physics Letters*. 1997, vol. 70, no. 24, s. 3272. Dostupné z: doi: 10.1063/1.118425. ISSN 00036951.
- [12] BARTOŠÍK, Miroslav, Miroslav KOLÍBAL, Jan ČECHAL, Jindřich MACH a Tomáš ŠIKOLA. Selective Growth of Metallic Nanostructures on Surfaces Patterned by AFM Local Anodic Oxidation. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2009, vol. 9, no. 10, s. 5887–5890. Dostupné z: doi: 10.1166/jnn.2009.1251.
- [13] PINER, Richard D., Jin ZHU, Feng XU, Seunghun HONG a Chad A. MIRKIN. "Dip-Pen" Nanolithography. *Science*. 1999, vol. 283, no. 5402, s. 661–663. Dostupné z: doi: 10.1126/science.283.5402.661.
- [14] SCHEDIN, F., A. K. GEIM, S. V. MOROZOV, E. W. HILL, P. BLAKE, M. I. KATSNELSON, K. S. NOVOSELOV a A. TERENIN. Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene. *Nature Materials*. 2007, vol. 6, no. 9, s. 227–284. Dostupné z: doi: 10.1038/nmat1967.
- [15] ZHANG, Yong-Hui, Ya-Bin CHEN, Kai-Ge ZHOU, Cai-Hong LIU, Jing ZENG, Hao-Li ZHANG a Yong PENG. Improving gas sensing properties of graphene by introducing dopants and defects: a first-principles study. *Nanotechnology*. 2009, vol. 20, no. 18, s. 185504. Dostupné z: doi: 10.1088/0957-4484/20/18/185504.
- [16] ORR, F. M., L. E. SCRIVEN a A. P. RIVAS. Pendular rings between solids: meniscus properties and capillary force. *Journal of Fluid Mechanics*. 1975, vol. 67, s. 723–742. Dostupné z: doi: 10.1017/S0022112075000572. ISSN 1469-7645.
- [17] *NT-MDT*. 2014. Dostupné z: <http://www.ntmdt.com/modular-afm/aura>.

Seznam použitých zkratek a symbolů

AFM	atomic force microscopy (mikroskopie atomárních sil)
SPM	scanning probe microscopy (mikroskopie rastrovací sondou)
ω	frekvence [s^{-1}]
k	tuhost cantileveru [$N \cdot m^{-1}$]
m	hmotnost [kg]
ν	koeficient útlumu [$N \cdot s \cdot m^{-1}$]
F	síla [N]
z	výchylka [m]
A	amplituda [m]
φ	fáze [rad]
RH	relativní vlhkost [%]
UHV	ultra high vacuum (ultra vysoké vakuum)
γ	povrchové napětí [$N \cdot m^{-1}$]
P	tlak [Pa]
ϕ	úhel smočení tělesa [°]
θ	kontaktní úhel smáčení [°]
V	molární objem [$m^3 \cdot mol^{-1}$]
R	molární plynová konstanta [$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$]
T	termodynamická teplota [K]
E	intenzita elektrického pole [$V \cdot m^{-1}$]
κ	hamakerova konstanta [J]
DPN	dip pen nanolithography
LAO	lokální anodická oxidace
ÚFI	ústav fyzikálního inženýrství

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Seznam příloh

- Bakalářská práce ve formátu PDF
 - Hlavni_dokument
- Výrobní výkresy
 - K_komora – jednotlivé výkresy KOMORY
 - D_dno – jednotlivé výrobní výkresy DNA
 - M_manipulator – jednotlivé výrobní výkresy MECHANICKÉ PRŮCHODKY
 - O_ostatni – jednotlivé výrobní výkresy KOMPONENT PRO MIKROSKOP
- 3D modely
 - K_komora_3d – jednotlivé 3D modely KOMORY
 - D_dno_3d – jednotlivé 3D modely DNA
 - M_manipulator_3d – jednotlivé 3D modely MECHANICKÉ PRŮCHODKY
 - O_ostatni_3d – jednotlivé 3D modely KOMPONENT PRO MIKROSKOP

Součástí příloh je i složka s 3D modely postupných návrhů, které předcházely finální verzi.

Veškeré 3D modely jsou ve formátu Autodesk Inventor 2014 (*.ipt) i ve formátu STEP (*.stp). Výkresy jsou také ve formátu Autodesk Inventor 2014 (*.idw) a formátu PDF.