VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2016 Tomáš Pola

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

NÁVRH A OVĚŘENÍ FUNKCE NÍZKOTEPLOTNÍCH ČÁSTÍ STOLKU UHV SEM/SPM MIKROSKOPU

DESIGN AND VERIFICATION OF LOW TEMPERATURE PARTS OF UHV SEM/SPM STAGE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Tomáš Pola**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. Pavel Urban, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2016

Tato bakalářská práce byla vypracována na

Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v.v.i.

Vedoucí práce:

Ing. Pavel Urban, Ph.D.

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav fyzikálního inženýrství
Student:	**Tomáš Pola**
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Fyzikální inženýrství a nanotechnologie
Vedoucí práce:	**Ing. Pavel Urban, Ph.D.**
Akademický rok:	2015/16

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 a ověření funkce nízkoteplotních částí stolku UHV SEM/SPM mikroskopu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Téma je zaměřeno na návrh a ověření funkce nízkoteplotních částí UHV SEM/SPM mikroskopu vyvíjeného v rámci projektu AMISPEC, Centra kompetence TAČR, který bude pracovat při proměnné teplotě vzorku v rozsahu 20 - 700 K. Pro dosažení proměnných nízkých teplot bude použit heliový průtokový systém chlazení s využitím kapalného He (~ 5 K) nebo N2 (~ 77 K) jako chladiva. Návrh bude založen na analýze tepelných toků, výběru vhodných materiálů (vysoká tepelná vodivost, odolnost vůči vysokým teplotám, UHV kompatibilita), zpracování výkresové dokumentace, výrobě a experimentálním ověření ve zkušební vakuové komoře. Téma bude řešeno ve spolupráci s Ústavem přístrojové techniky AV ČR, v.v.i. v Brně.

Cíle bakalářské práce:

Seznámit se s návrhy kryotechnických zařízení, tj. analýzou tepelných toků, volbou materiálů, pevnostními výpočty, technologiemi spojování materiálů, termometrií apod.
Navrhnout a ověřit nízkoteplotní části UHV SEM/SPM mikroskopu, který bude pracovat při proměnné teplotě vzorku v rozsahu 20 - 700 K.

Seznam literatury:

J. Voňka, Materials and their application in low temperature parts of STM microscope, bakalářská práce, FSI VUT Brno (2011).

J. Jelínek, Z. Málek, Kryogenní technika, SNTL (1982).

J. W. Ekin, Experimental Techniques for Low-Temperature Measurements, Oxford University Press (2006).

R. F. Barron, Cryogenic Heat Transfer, Taylor & Francis (1999).

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. RNDr. Tomáš Šikola, CSc. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá experimentálním ověřením navržených nízkoteplotních částí stolku UHV SEM/SPM mikroskopu, který pracuje za proměnných teplot $20\,\mathrm{K}$ až $700\,\mathrm{K}$, a jejich optmalizací na základě výsledků měření. Je ověřena zejména funkčnost tepleně izolační podložky (InBallPad), vliv délky a kontaktování braidu na dosažitelnou minimální teplotu. Dále je prověřena kvalita zrealizovaného uchycení paletky se vzorkem na braidem chlazeném držáku vzorku pomocí dvou přítlačných pružin a vliv kontaktních odporů na dosažitelnou minimální teplotu. Práce též obsahuje výpočetní model pro odhad časů prochlazování a dosažitelné teploty. V závěru práce jsou navrženy experimenty, které by pomohly objasnit některé z pozorovaných neočekávaných jevů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Heliový průtokový kryostat, stolek UHV SEM/SPM mikroskopu, tepelně izolační podložka, braid, chlazený držák vzorku, kontaktní tepelné odpory

ABSTRACT

This thesis focuses on experimental verification and experimental-based improvements of designed low temperature parts of stage of the UHV SEM/SPM microscope, which operates in temperature range from $20\,\mathrm{K}$ to $700\,\mathrm{K}$. The main focus is on the functionality verification of thermal insulation pad (InBallPad) as well as on the effect of length and contact quality of braid on minimal achievable temperature. The contact quality of sample holder with sample carrier realized with two springs is investigated together with influence of thermal contact resistances on achievable temperature. The thesis also contains a calculation model used for cooldown times and minimal temperature estimation. In the conclusion of this work several future experiments are suggested which could explain some of the observed, yet unexpected, phenomena.

KEYWORDS

Helium flow cryostat, UHV SEM/SPM stage, thermal insulation pad, braid, cooled sample holder, thermal contact resistance

POLA, Tomáš *Návrh a ověření funkce nízkoteplotních částí stolku UHV SEM/SPM mikroskopu*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav fyzikálního inženýrství, 2016. 37 s. Vedoucí práce Ing. Pavel Urban, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Návrh a ověření funkce nízkoteplotních částí stolku UHV SEM/SPM mikroskopu“ 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. Pavlu Urbanovi, Ph.D. za odborný dozor, pomoc a železné nervy při mém psaní této práce. Děkuji svým rodičům za neustávající lásku a podporu a celé své rodině za poskytnuté zázemí.

Tomáš Pola

OBSAH

Úvod **3**

1 Teoretický úvod **5**
1.1 Vlastnosti materiálů 5
1.1.1 Mechanické vlastnosti 5
1.1.2 Tepelná kapacita 5
1.1.3 Teplotní roztažnost 8
1.2 Mechanismy přenosu tepla 9
1.2.1 Přenos tepla zářením 9
1.2.2 Přenos tepla vedením 12
1.3 Kryogenní kapaliny 14

2 Chladicí aparatura UHV SEM/SPM mikroskopu **17**
2.1 Nízkoteplotní část stolku mikroskopu 17
2.2 Experimentální aparatura v ÚPT 19
2.2.1 Heat Flowmeter 19

3 Experimentální část **21**
3.1 Izolační podložka InBallPad 21
3.2 Braid 22
3.2.1 Úvod 22
3.2.2 Optimalizace braidu 23
3.3 Držák vzorku 25
3.3.1 Úvod 25
3.3.2 Optimalizace držáku vzorku 26
3.3.3 Model chlazení 27

Závěr **31**

Literatura **33**

Seznam symbolů, veličin a zkratek **35**

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1 Teplotní závislosti měrné tepelné kapacity 7
1.2 Lennard-Jonesův potenciál 8
1.3 Planckův vyzařovací zákon pro různé teploty 10
1.4 Tepelný tok pro koaxiální válce nebo koncentrické koule 12
1.5 Teplotní závislosti tepelné vodivosti 13
2.1 Schéma nízkoteplotní části stolku UHV SEM/SPM mikroskopu včetně odhadu teplot 17
2.2 Varianty chlazení v SPM 18
2.3 Zapojení měřicí aparatury 20
2.4 Heat Flowmeter foto, kalibrační křivka 20
3.1 Opěrné nohy kuličkových podpěr InBallPadu 21
3.2 Izolační podložka IBP 22
3.3 Srovnání prochlazení IBP verze 2 a 3 24
3.4 Test samostatného braidu 25
3.5 Ověření nastaveného braidu 26
3.6 Model poslední verze držáku vzorku 27
3.7 Ověření držáku vzorku 29
3.8 Schéma výpočetního modelu 30
3.9 Srovnání výpočtového modelu s korekcemi a bez nich 30

SEZNAM TABULEK

1.1 Debyeovy teploty materiálů 6
1.2 Vlastnosti kryogenních kapalin 15
2.1 Tepelné vlastnosti vybraných materiálů 19
3.1 Kusovník izolační podložky IBP 23
3.2 Tabulka výsledků testovaných variant braidu. 24

ÚVOD

Tato práce se zabývá ověřením funkčnosti a optimalizací již navržených nízkoteplotních částí UHV SEM/SPM[1] mikroskopu, který je vyvíjen v rámci projektu AMISPEC, Centra kompetence TA ČR. Mikroskop je vyvíjen za účelem studia povrchů a nanostruktur při teplotách 20 K až 700 K a je určený ke komerčnímu použití. Na vývoji se podílí Skupina kryogeniky a supravodivosti při Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky, v.v.i. (dále jen ÚPT), Ústav fyzikálního inženýrství na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně (ÚFI) a firma TESCAN ORSAY HOLDING, a.s.

Aby byl mikroskop schopen efektivně pracovat při proměnných teplotách, je využíván průtokový kryostat vyvinutý na ÚPT, který jako chladivo používá buď tekutého helia (LHe) nebo tekutého dusíku (LN_2). Pro dosažení teplot pod 80 K je nutné použít LHe. Chladicí kapalina je přečerpávána z Dewarovy nádoby nízkoztrátovým sifonem do dvou tepelných výměníků a dále už jako plyn opouští systém. První z výměníků ochlazuje držák vzorku, druhý může být připojen na radiační štít, který však v současnosti není implementován. Připojení obou výměníků je realizováno pomocí spleteného svazku jemných vysoce vodivých měděných vláken, tzv. braidu. Mezní dosažitelná teplota držáku vzorku, potažmo paletky se vzorkem umístěné do držáku, je dána tepelnou vodivostí použitých materiálů, kvalitou tepelného kontaktu, ztrátami a radiací z okolí (na pokojové teplotě). Rozbor použitelných materiálů provedl ve své bakalářské práci J. Voňka [17]. Tepelné oddělení držáku vzorku od piezoelektrického skeneru zajišťuje tepelně izolační podložka (taktéž vyvinutá na ÚPT) InBallPad (IBP), aktuálně její třetí verze. Protože v UHV komoře je velmi omezený prostor, je kompaktní velikost (výška 12 mm, průměr 30 mm) IBP velice elegantním řešením využívajícím k izolaci kuličkových podpěr vyrobených z taveného křemene, jejichž efektivita spočívá v malé tepelné vodivosti a malé teplosměnné ploše [7]. Podmínky ultravysokého vakua (angl. Ultra High Vacuum, UHV) zajišťují v mikroskopu déle trvající čistotu pozorovaných struktur a tím umožňují jejich pečlivější a kvalitnější studium.

Kapitola 1 práce vysvětluje principy přenosu tepla, vlastnosti materiálů důležité pro výzkum v kryogenních podmínkách, a také vlastnosti kryogenních kapalin komerčně používaných jako chladiva. Principy přenosu tepla jsou důležité k pochopení sledovaných jevů a hlavně k návrhu, konstrukci a optimalizaci funkčního chladicího systému. Nízkoteplotní část navrhovaného stolku UHV SEM/SPM je popsána v kapitole 2, a to včetně použitých materiálů a jejich vlastností. Dále je prezentována testovací aparatura včetně zařízení pro měření tepelných toků. Následující kapitola 3

[1] Scanning Electron Microscopy, rastrovací elektronová mikroskopie; Scanning Probe Microscopy, rastrovací sondová mikroskopie, např. STM, AFM, MFM, aj.

popisuje provedená ověření součástí aparatury: Zaprvé tepelně izolační podložku InBallPad, její optimalizaci a srovnání izolačních vlastností nové a starší verze. Poté je diskutována funkčnost a vývoj použitého braidu a důvody pro jeho úpravy. Na závěr v části 3.3 se zabývám požadavky na držák vzorku, jakož i jeho vývojem a výpočetním modelem sloužícím pro odhad doby prochlazování držáku vzorku a jeho dosažitelné teploty. Jsou zde také ukázány neočekávané jevy ztěžující teplotní stabilizaci držáku a tím i vzorku.

Tato práce byla vytvořena ve spolupráci se Skupinou kryogeniky a supravodivosti na Ústavu přístojové techniky Akademie věd ČR, v.v.i. v Brně, kde byly nízkoteplotní části aparatury vyvinuty a testovány za finanční podpory z projektu TA ČR, TE01020233.

1 TEORETICKÝ ÚVOD

1.1 Vlastnosti materiálů

Chceme-li provádět experimenty při kryogenních teplotách, je nutno vzít v úvahu specifika nízkých teplot. Vlastnosti materiálů při těchto podmínkých se často liší od vlastností za pokojových teplot, nezřídka i o několik řádů. Tyto vlastnosti můžeme rozdělit na dvě hlavní kategorie: mechanické a tepelné. Do první skupiny můžeme zahrnout mez pevnosti a kluzu, tvrdost, tažnost, modul pružnosti. Do tepelných vlastností patří teplotní roztažnost (část 1.1.3), tepelná kapacita (1.1.2), tepelná vodivost (1.2.2) a tepelně radiační vlastnosti, tzn. emisivita, absorptivita (1.2.1). Jako ve všech odvětvích, i v kryogenice se materiál s danými vlastnostmi vybírá podle konkrétního použití. Materiály použité v aparatuře jsou uvedeny v kapitole 2 i s hodnotami vybraných vlastností.

1.1.1 Mechanické vlastnosti

Ochlazení materiálu obecně zvýší jeho tvrdost, mez pevnosti a kluzu, ale je méně tažný a často křehne. Za pokojových teplot je většina polymerů pružná, tedy má nízký Youngův modul pružnosti, který se jim však za kryogenních podmínek rapidně zvýší a tuto vlastnost ztrácejí. Naproti tomu u kovů se s teplotou zvyšuje velmi mírně, kolem 0,03 % K^{-1} [8]. Protože systém má pracovat v podmínkách UHV, musíme také vzít v potaz odplyňování. Po uvážení všech těchto aspektů jsou běžně použitelnými materiály měď, hliník, nikl, jejich slitiny včetně nerezové oceli, safír, různá skla (PYREX, Quartz [1]) a další.

1.1.2 Tepelná kapacita

Tepelná kapacita C je měřítkem energie dodané (odebrané) objektu pro zvýšení (snížení) jeho teploty. Abychom mohli materiály snadno vzájemně porovnávat, zavádíme měrnou tepelnou kapacitu c:

$$c = \frac{C}{m}\,[\mathrm{J{\cdot}kg^{-1}{\cdot}K^{-1}}], \tag{1.1}$$

kde m je hmotnost daného objektu. Obecně definujeme dvě měrné tepelné kapacity: za konstantního tlaku c_p a za konstantního objemu c_V. U pevných látek je však rozdíl mezi nimi tak malý ($\leq 1\%$ pro $T \approx \Theta_D/2$, $\Theta_D/2$ je Debyeova teplota, bude definována dále), že jej zanedbáváme a bereme $c_p = c_V = c$. Abychom měrnou tepelnou kapacitu pro daný materiál mohli určit, musíme uvážit jaké různé energetické

[1] tavený křemen

stavy jsou excitovány při dodávání tepla materiálu. Ač pro mnohé materiály byl klasický Dulongův-Petitův model ($c = 3R/M$, kde R je plynová konstanta a M molární hmotnost, více např. v [11]) dostačující, další, ku příkladu křemík, grafit, diamant a jiné, velmi nadcenil. Einsteinův model [9] látky jako systému nezávislých kvantových harmonických oscilátorů (z roku 1907) byl kvalitativně správnější, avšak za kryogenních teplot se stále lišil od experimentálních dat. Upřesněním pak byl Debyeův model (1912), který kvantové harmonické oscilátory považoval za závislé.

Energie v látce je ukládána ve formě kmitů atomů krystalové mříže (fononů). Střední počet excitovných oscilátorů je [9]:

$$\langle n \rangle = f_{BE}(\omega) = \frac{1}{e^{\hbar\omega/k_B T} - 1}, \tag{1.2}$$

kde ω je frekvence oscilátoru a f_{BE} značí Boseho-Einsteinovo rozdělení tedy, že fonony se chovají jako bosony. Spektrum frekvencí je samozřejmě konečné. Pro látku obsahující N_0 částic existuje $3N_0$ frekvencí fononů, jejichž rozdělení, jak ukázal Debye, dává podmínku pro maximální frekvenci ω_D:

$$\int_0^{\omega_D} \frac{3V}{2\pi\overline{v}^3}\omega^2 d\omega = 3N_0, \tag{1.3}$$

V je objem látky, $\overline{v}$ průměrná rychlost zvuku v daném krystalu. Maximální frekvenci ω_D se říká Debyeova frekvence a odpovídající Debyeova teplota je $\Theta_D = \dfrac{\hbar\omega_D}{k_B}$. $\hbar$ je redukovaná Planckova konstanta, $\hbar = h/2\pi = 1,0546 \cdot 10^{-34}\,\mathrm{J{\cdot}s}$, k_B je Boltzmannova konstanta, $k_B = 1,3806 \cdot 10^{-23}\,\mathrm{J{\cdot}K^{-1}}$. V tabulce 1.1 jsou uvedeny Debyeovy teploty pro vybrané materiály. Vysoká hodnota Θ_D odpovídá látkám s nízkými atomovými hmotnostmi a silnými meziatomovými silami [14] a naopak.

Tab. 1.1: Debyeovy teploty vybraných materiálů, data převzata z [1].

Materiál	Diamant	Grafit	Křemík	Hliník	Nikl	Měď	Stříbro	Zlato	Indium
Θ_D / K	1850	1500	630	389	375	309	220	180	100

Využitím Debyeova modelu vypočítáme vnitřní energii látky, jejíž derivací podle teploty (za konstantního objemu) dostáváme tepelnou kapacitu fononů ve tvaru:

$$C_{ph}(T) = 9N_0 k_B \left(\frac{T}{\Theta_D}\right)^3 \int_0^{\Theta_D/T} \frac{x^4 e^x dx}{(e^x - 1)^2}, \tag{1.4}$$

přičemž $x = \dfrac{\hbar\omega}{k_B T}$. Spočteme-li tento integrál, dostáváme:

$$C_{ph} = 3N_0 k_B = 3R \qquad T > 2\Theta_D \tag{1.5a}$$

$$C_{ph} = \frac{12\pi^4 N_0 k_B}{5}\left(\frac{T}{\Theta_D}\right)^3 \qquad T < \Theta_D/10 \tag{1.5b}$$

Fononový model je dobrý pro izolanty, pro vodiče však musíme vzít v úvahu i tepelnou kapacitu volných elektronů. Ty mohou obsazovat stavy až po tzv. Fermiho energii E_F:

$$E_F = k_B T_F = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{3\pi^2 N_0}{V} \right)^{2/3}$$

Typickým hodnotám $E_F \approx 1\,\mathrm{eV}$ odpovídá $T_F \approx 10^4\,\mathrm{K}$. Počet obsazených stavů je popsán Fermiho-Diracovým rozdělením:

$$f_{FD}(E) = \frac{1}{e^{(E-\mu)/k_B T} + 1}. \tag{1.6}$$

Chemický potenciál $\mu = E_F$ pro $T = 0\,\mathrm{K}$. Abychom spočítali vnitřní energii elektronového plynu, musíme znát hustotu stavů. Zjednodušíme-li problém a použijeme-li model volných elektronů, pak hustota stavů $D(E)$ je rovna:

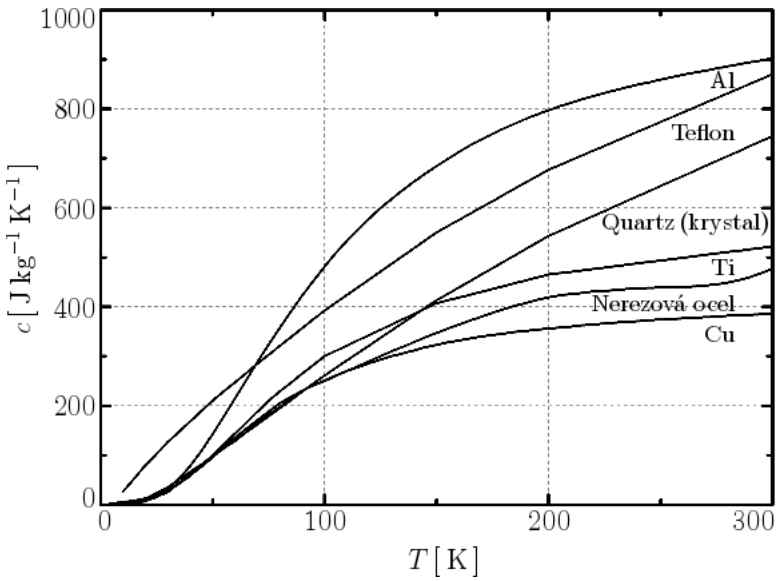
$$D_e(E) = \frac{V}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar} \right)^{3/2} E^{1/2} \tag{1.7}$$

Výpočtem vnitřní energie a z ní tepelné kapacity dostáváme:

$$C_e = \frac{\pi^2 N_0 k_B}{2} \frac{T}{T_F} \tag{1.8}$$

Celková tepelná kapacita vodičů je pak dána součtem C_{ph} a C_e.

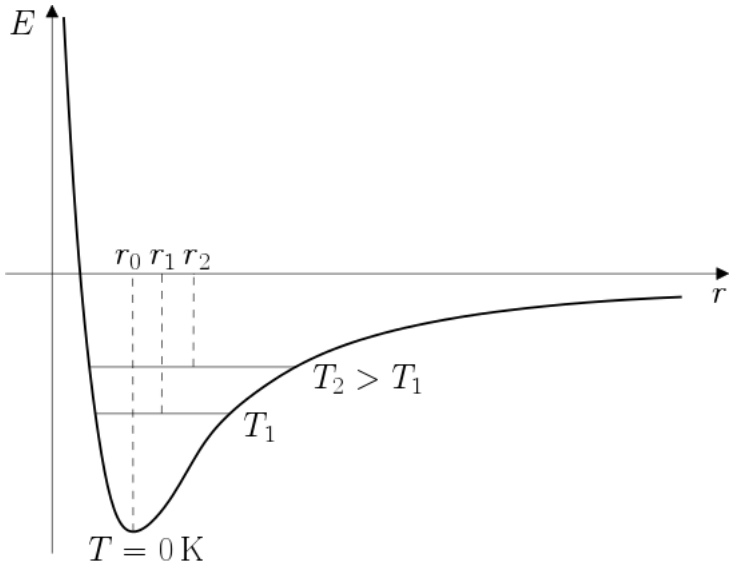
Teplotní závilosti tepelné kapacity některých v kryogenice používaných materiálů je vynesena v obrázku 1.1.



Obr. 1.1: Teplotní závislost měrné tepelné kapacity vybraných materiálů. Data vypočtena v programu Cryocomp [3].

1.1.3 Teplotní roztažnost

Pro popis procesu roztažnosti musíme uvážit nesymetričnost potenciálu mezi atomy. Pokud bychom stále používali aproximace kvadratického (symetrického) potenciálu, jako jsme si mohli dovolit v případě tepelných kapacit, teplotní roztažnost by nemohla existovat. Potenciál mezi atomy je důsledkem působení van der Waalsovových sil a odpuzování kvůli zachování Pauliho vylučovacího principu. Můžeme použít například aproximaci Lennard-Jonesova potenciálu, viz obr. 1.2. Pro absolutní nulu



Obr. 1.2: Vykreslení posunu průměrné vzdálenosti atomů v Lennard-Jonesově potenciálu.

($T = 0\,\mathrm{K}$) se atomy nacházejí v rovnovážné vzdálenosti r_0. Se zvyšováním teploty se projevují excitace vyšších energiových stavů a průměrná vzdálenost atomů se zvětšuje, atomy se vzdalují. To vede k efektu teplotní roztažnosti. V případě symetrického (např. kvadratického) potenciálu by toto nenastalo. Pro popis roztažnosti zavádíme (v jednorozměrném případě) koeficient teplotní roztažnosti α:

$$\alpha(T) = \frac{1}{l}\frac{\partial l}{\partial T}, \tag{1.9}$$

kde l je délka tělesa. Koeficient α se zvětšuje s narůstající teplotou.

V kryogenice je potřeba uvážit rozdílné roztažnosti materiálů z konstrukčního hlediska, zvláště v oblastech spojů, aby se předešlo přílišnému namáhání materiálu nebo naopak netěsnostem. Teplotní roztažnost je sice teplotně závislá, naštěstí při zchlazení z pokojové teploty na teplotu varu dusíku dojde k mnohem výraznější kontrakci než při dalším zchlazování. To velmi zjednodušuje testování pevnosti spojů do kryogenních zařízení, které se pak provadí cyklováním (opakovaným zanořením součástí do snadno dostupného kapalného dusíku a následnému samovolnému ohřevu).

Tepelně radiační vlastnosti

V kryogenních systémech se často snažíme o co nejnižší emisivitu a absorptivitu povrchů. Důvodem je co největší snížení tepelné zátěže zářením, aby se předešlo ohřevu buď nežádoucímu nebo, kvůli členitosti povrchu, špatně definovanému. Z toho důvodu jsou vyžadovány obzvláště nízké hodnoty emisivity a absorptivity pro radiační štíty. Často používaným materiálem štítů je hliník, popř. jeho slitiny. Je zde nutno poznamenat, že emisivita materiálu se velmi liší v závislosti na jeho povrchové úpravě.

Tepelná vodivost

Náhled do příčin tepelné vodivosti je v části 1.2.2. Obecně chceme materiály buď s vysokou tepelnou vodivostí pro rozvody a odvody tepla - tepelné výměníky, braidy, držák vzorku (v případě chlazeného vzorku) aj. Pro tento účel je v kryogenice velmi využívána například bezkyslíkatá měď (OFHC, oxygen-free high conductivity copper). Na druhou stranu chceme oddělit ohřívané (chlazené) části od zbytku aparatury, abychom měli co největší efektivnost a výrazně zkrátili dobu potřebnou k teplotnímu ustálení. K tomu je zapotřebí izolací, tedy materiálů s vodivostí co nejnižší. Používá se například nerezová ocel, různé typy skel a další.

1.2 Mechanismy přenosu tepla

Základní dělení procesů přenášení tepla (termální energie) je: přenos tepla vedením (kondukcí), zářením (radiací) a prouděním (konvekcí). Vzhledem k podmínkám zamýšleného použití (UHV, tj. ultravysoké vakuum, které označuje tlak plynů v evakuovaném prostoru v řádu 10^{-7} až $10^{-10}\,\mathrm{Pa}$ [5]) přispívá poslední uvedený typ výrazně méně než ostatní dva, proto jej zanedbáváme.

1.2.1 Přenos tepla zářením

Každé těleso s teplotou větší než absolutní nula (tj. $T > 0\,\mathrm{K}$) vyzařuje energii v podobě elektromagnetických vln. Vyzařované spektrum vlnových délek je široké. Černé těleso je takové, které vyzařuje nejvíce energie při dané teplotě na jakékoliv vlnové délce. Z opačného pohledu černé těleso dokonale pohlcuje dopadající záření.

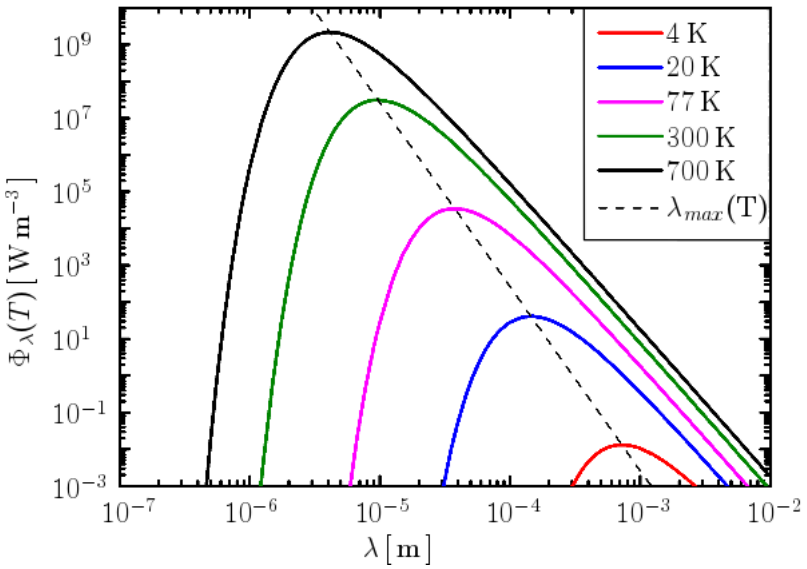
Záření černého tělesa můžeme vyjádřit ve tvaru tzv. Planckova vyzařovacího zákona [1] z roku 1920:

$$\Phi_\lambda(T) = \frac{C_1}{\lambda^5(e^{C_2/\lambda T} - 1)}. \tag{1.10}$$

C_1 a C_2 jsou nazývány radiační konstanty:

$$C_1 = 2\pi hc^2 = 3,7415 \cdot 10^{-16}\,\mathrm{W{\cdot}m^2}$$
$$C_2 = \frac{hc}{k_B} = 1,4388 \cdot 10^{-2}\,\mathrm{K{\cdot}m},$$

kde Φ_λ je spektrální hustota zářivého toku (energie vztažená na jednotkový objem při dané vlnové délce λ), T je absolutní teplota a c je rychlost světla, $c = 2,9979 \cdot 10^8\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$. Závislost spektrální hustoty zářivého toku na vlnové délce pro různé teploty je vynesena v grafu na obr. 1.3.



Obr. 1.3: Planckův vyzařovací zákon pro různé teploty

Z Planckova vyzařovacího zákona snadno dostaneme další výsledky klasických termodynamických úvah: Stefanův-Boltzmannův zákon (1879) a Wienův posunovací zákon (1893). Wienův posunovací zákon získáme derivací (1.10) podle vlnové délky a položením derivace rovno nule. Zákon určuje teplotní posuv vlnové délky, na níž černé těleso vyzařuje nejvíce [6]

$$\lambda_{max} T = b = 2,8978\,\mathrm{mm{\cdot}K}. \tag{1.11}$$

b se nazývá Wienova konstanta. λ_{max} je také naznačena v obr. 1.3. Integrací (1.10) přes všechny vlnové délky získáme celkový zářivý tok Φ vyzářený černým tělesem o dané teplotě T neboli Stefanův-Boltzmannův zákon [6]:

$$\Phi(T) = \sigma T^4, \tag{1.12}$$

σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta, $\sigma = \dfrac{2\pi^5 k_B^4}{15h^3c^2} = 5,6704 \cdot 10^{-8}\,\mathrm{W{\cdot}m^{-2}{\cdot}K^{-4}}$.

Většina těles není černými tělesy, popisujeme je tedy dalšími vlastnostmi: emisivitou ϵ, absorptivitou a, reflektivitou r a transmisivitou t. Emisivita je poměr skutečně

vyzářené energie z povrchu k energii vyzářené černým tělesem o stejné teplotě. Absorptivita (reflektivita, tj. odrazivost) je poměr povrchem pohlcené (odražené) energie k celkové energii dopadající na povrch. Transmisivita neboli propustnost je poměr energie propuštěné materiálem k energii dopadající na povrch daného tělesa [1]. Všechny tyto vlastnosti jsou závislé na vlnové délce [2], používá se označení monochromatická emisivita ϵ_λ, apod. Proto se zavádí tzv. totální emisivita (absorptivita, ...) jako vážený průměr monochromatických emisivit (absorptivit, ...), značená už bez indexu. Označením šedé těleso je myšleno těleso bez spektrální závislosti těchto vlastností.

Pro černé těleso platí $\epsilon = a = 1$ a tedy $r = t = 0$. Pro šedé těleso platí $\epsilon = a$ pouze v tepelné rovnováze s okolím. Celkově platí ze zákona zachování energie:

$$a + r + t = 1.$$

Tepelný tok [3] Q (teplo za jednotkový čas) mezi dvěma povrchy o teplotách T_1, T_2 dostaneme modifikací Stefanova-Boltzmannova zákona (1.12) [1]:

$$Q_{21} = E_{21} S_{21} \sigma (T_2^4 - T_1^4), \tag{1.13}$$

kde S_{21} je efektivní povrch absorbujícího tělesa a E_{21} je koeficient vzájemné emisivity zahrnující emisivitu zářícího povrchu, absorptivitu pohlcujícího a vzájemnou geometrii uspořádání.

Velmi častým případem jsou koncentrické koule či koaxiální válce, viz obr. 1.4. V tom případě dostáváme:

$$S_{21} = S_1 \tag{1.14a}$$

$$E_{21} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_2 + \epsilon_1 (1 - \epsilon_2) S_1 / S_2}. \tag{1.14b}$$

Uvažujeme dva případy: zářící těleso je (téměř) černé anebo uzavřené těleso je mnohem menší:

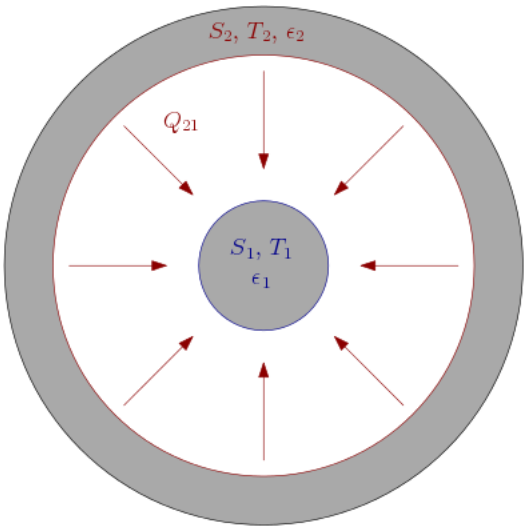
$$\left.\begin{aligned} \epsilon_2 &\sim 1 \\ S_1 &\ll S_2 \end{aligned}\right\} \; E_{21} = \epsilon_1 \tag{1.15}$$

Pak (1.13) je ve tvaru:

$$Q_{21} = \sigma \epsilon_1 S_1 (T_2^4 - T_1^4). \tag{1.16}$$

[2] a směru emitovaného/dopadajícího záření, což však přesahuje rámec této práce.

[3] V kryogenice se symbolem Q označuje tok tepla a ne teplo samotné, protože ve většině výpočtů není třeba celková tepelná energie, ale její časová změna (výkon)



Obr. 1.4: Tepelný tok pro koaxiální válce nebo koncentrické koule

1.2.2 Přenos tepla vedením

Uvnitř jakékoliv látky (nebo látek v kontaktu), jejíž části mají rozdílné teploty, dochází k přenosu tepla vedením. Vezmeme-li v úvahu pouze pevné látky (ač ke kondukci dochází ve všech fázích), je přenos energie způsoben fonony nebo vodivostními elektrony. V případě izolantů jde o první z příčin, v případě vodičů je to součtem obou. Nejde však o balistický transport, dochází k několika druhům rozptylů, které ovlivňují výsledný přenos (viz níže). K vedení tepla dochází proti směru gradientu teploty ∇T a popisujeme ho tzv. Fourierovým zákonem [1]

$$q = \frac{dQ}{dS} = -k(T)\nabla T, \tag{1.17}$$

q je tepelný tok jednotkovou plochou dS, k je tepelná vodivost. Pro jednorozměrný problém vztah (1.17) přepíšeme do integrálního tvaru jako:

$$Q = \frac{-1}{\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{S(x)}} \int_{T_1}^{T_2} k(T)dT \tag{1.18}$$

pro průřez $S(x)$ a $T_1 < T_2$. Geometrický faktor $G = \frac{1}{\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{S(x)}}$ může popisovat i spoj dvou těles. V nejběžnějším případě tyče konstatního průřezu S, délky L a izotropní tepelné vodivosti napříč průřezem pak $G = \frac{S}{L}$.

Vzhledem k silné teplotní závislosti tepelné vodivosti (viz obr. 1.5) není vhodné (a často rozumně možné) teplotní integrál řešit analyticky. Proto zavádíme tzv. integrální tepelnou vodivost:

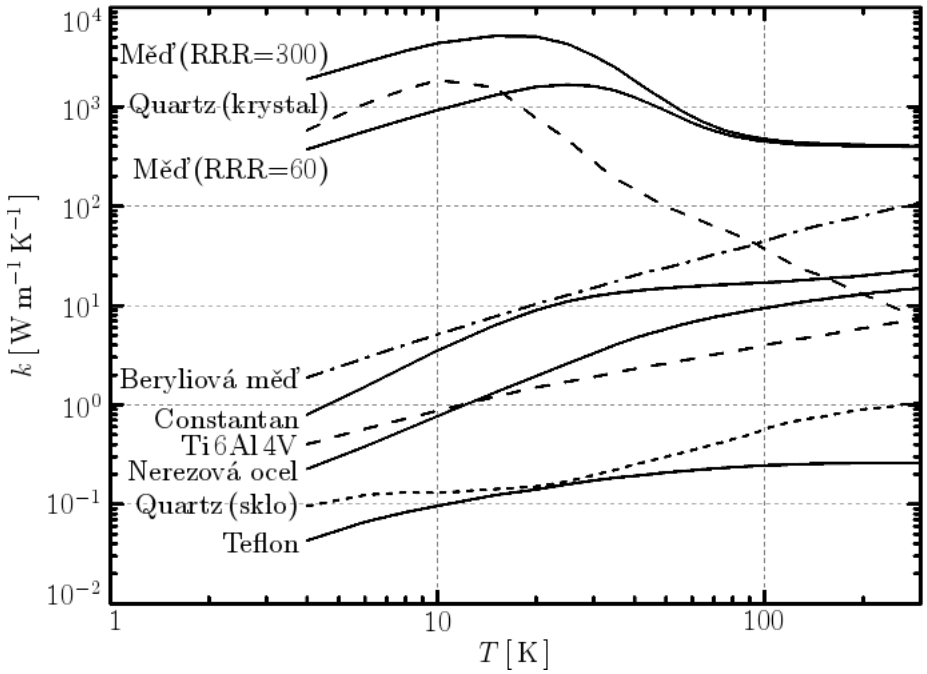
$$K(T_1, T_2) = \int_{T_1}^{T_2} k(T)dT, \tag{1.19}$$

která umožňuje určit hodnoty K vzhledem k libovolné referenční teplotě T_0:

$$\int_{T_1}^{T_2} k(T)dT = \int_{T_0}^{T_2} k(T)dT - \int_{T_0}^{T_1} k(T)dT \tag{1.20a}$$

$$K(T_1, T_2) = K(T_0, T_2) - K(T_0, T_1), \tag{1.20b}$$

pro $T_0 < T_1 < T_2$. Hodnoty K jsou tabelovány.



Obr. 1.5: Teplotní závislost tepelné vodivosti vybraných materiálů. Data převzata z [12]. RRR je „residual resistance ratio“, což je poměr elektrických odporů za pokojové a heliové teploty, vyjadřuje čistotu materiálů.

Rozptyly v látce ovlivňují tvar závislosti tepelné vodivosti na teplotě. Jde o rozptyl fononů na fononech, fononů na poruchách mřížky, elektronů na fononech, elektronů na poruchách mřížky a výjimečně elektronů na elektronech. Protože počet fononů se zvyšuje s rostoucí teplotou (jsou termálně vybuzeny), rozptyl na nich je teplotně závislý. Naproti tomu počet poruch mřížky zůstává s teplotou konstatní, tedy i rozptyl na těchto poruchách nezávisí na teplotě. Abychom určili tvar závislosti pokládejme rozptylované fonony a elektorony za difundující plyn. Pak z kinetické teorie plynů dostáváme [14] pro tepelnou vodivost:

$$k = \frac{1}{3}\frac{c}{V_m} v\lambda, \tag{1.21}$$

kde c je měrná tepelná kapacita, V_m molární objem, v rychlost částic a λ jejich střední volná dráha. Protože částice se pohybují ve třech rozměrech a nás zajímá

přenos tepla pouze v jednom směru, je zde faktor 1/3. Celková tepelná vodivost je součtem dílčích.

Vezměme nejdříve rozptyl fononů. Pro ně je rychlost šíření rovna rychlosti zvuku v látce v_S, typicky $(3-5) \cdot 10^3\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$, a jejich měrná tepelná kapacita c_f je úměrná třetí mocnině teploty za nízkých teplot, za vyšších se blíží klasické limitě, tzn. konstantě, viz (1.5b) a (1.5a). Dostáváme:

$$k_f = \frac{1}{3}\frac{c_f}{V_m} v_s \lambda_f(T) \propto T^3 \lambda_f(T). \tag{1.22}$$

Protože se zvyšující se teplotou roste počet fononů, na nichž dochází k rozptylu, snižuje se střední volná dráha a tedy tepelná vodivost s rostoucí teplotou klesá. V oblasti nízkých teplot ($T < \Theta_D/10$) však dochází k rozptylu převážně na poruchách, střední volná dráha je tedy teplotně nezávislá a teplotní závislost vodivosti plyne z tvaru tepelné kapacity a proto s klesající teplotou klesá. Z uvážení obou oblastí plyne, že tepelná vodivost má maximum. Zde nutno podotknout, že velikost vodivosti v maximu velmi závisí na čistotě a uspořádanosti materiálu. Velké a čisté krystaly mají v maximu vodivost o několik řádů vyšší, než v případě krystalů s defekty. Naopak neuspořádanost materiálu (např. u skla) zvyšuje rozptyl na defektech a tedy maximum není tak výrazné. Teplotní závislost vodivosti některých v kryogenice obvykle používaných materiálů je uvedena na obr. 1.5.

V případě elektronů se přenosu účastní pouze elektrony v okolí Fermiho meze, kterým můžeme přiřadit Fermiho rychlost v_F (z kinetické Fermiho energie E_F), řádově $10^5 - 10^6\,\mathrm{m{\cdot}s^{-1}}$. Tepelná kapacita c_e vodivostních elektronů je podle (1.8) úměrná T a tedy:

$$k_e = \frac{1}{3}\frac{c_e}{V_m} v_F \lambda_e(T) \propto T \lambda_e(T). \tag{1.23}$$

Ze stejného důvodu jako u fononů (rostoucí počet rozptylujících fononů) s rostoucí teplotou vodivost elektronů klesá. V oblasti nízkých teplot je opět závislá na tepelné kapacitě, proto s klesající teplotou klesá. Tedy i v případě rozptylu elektronů dostáváme maximum. V kovech, vzhledem k počtu vodivostních elektronů a jejich rychlosti ($v_F \gg v_s$), tepelná vodivost způsobená elektrony výrazně převažuje.

1.3 Kryogenní kapaliny

Kryogenní kapaliny jsou velice důležité k provádění nízkoteplotních experimentů, protože představují nejjednodušší způsob dosažení nízkých teplot. Obzvláště důležité je pak kapalné helium pro dosažení teplot menších než 20 K buď jako předchladivo nebo chladivo samotné. Z vlastností kryokapalin jsou nejdůležitější bod varu (dosažitelná teplota), měrné skupenské teplo varu zvané též výparné teplo společně s enthalpií

par(určující výkon chlazení) a také cena (tedy dostupnost). Nejběžnější kryokapaliny jsou kapalný vzduch, vodík, dusík (LN_2), kyslík (LOX) a vzácné plyny, zejména helium (LHe). Některé z vlastností jsou uvedeny v tabulce 1.2.

Tab. 1.2: Vlastnosti kryogenních kapalin. Všechny veličiny jsou uváděny při atmosferickém tlaku. T_v je teplota varu , l_v měrné skupenské teplo varu při teplotě T_v, zastoupení ve vzduchu je udáváno při teplotě 20 °C. Poměr objemů je pro plyn za normálních podmínek a kapalinu na bodu varu. Data převzata z [2].

chladivo	T_v/ K	l_v/ kJ·kg^{-1}	Poměr objemů plyn:kapalina	zastoupení ve vzduchu/ %
O_2	$90,2$	$214,0$	860	$20,9$
N_2	$77,3$	$200,0$	696	$78,1$
Ne	$27,2$	$86,1$	1445	$18,1 \cdot 10^{-4}$
H_2	$20,3$	$448,9$	851	$0,5 \cdot 10^{-4}$
^{4}He	$4,21$	$20,9$	757	$5,2 \cdot 10^{-4}$

Kapalný kyslík není příliš využíván kvůli velké reaktivnosti zejména s organickými materiály (olej v rotační pumpě) a s pevnými látkami s velkým povrchem (práškové kovy). Skladujeme-li v nádobě kapalný vzduch, odpaří se N_2 první, protože O_2 má vyšší bod varu a tedy dostáváme prostředí bohaté na kyslík, což opět vede k nebezpečí [14]. Proto se ani kapalný vzduch prakticky nepoužívá a místo toho je separován na LN_2 a LOX. Nebezpečí vodíku spočívá v exotermické reakci s kyslíkem za vzniku vody. Proto by měl vodík být využíván pouze v uzavřených systémech. Dnes už není tolik využíván, kvůli jiným možnostem dosažení teplot mezi LHe ($4,2$ K) a LN_2 ($77,3$ K), jako například chlazení plynným heliem.

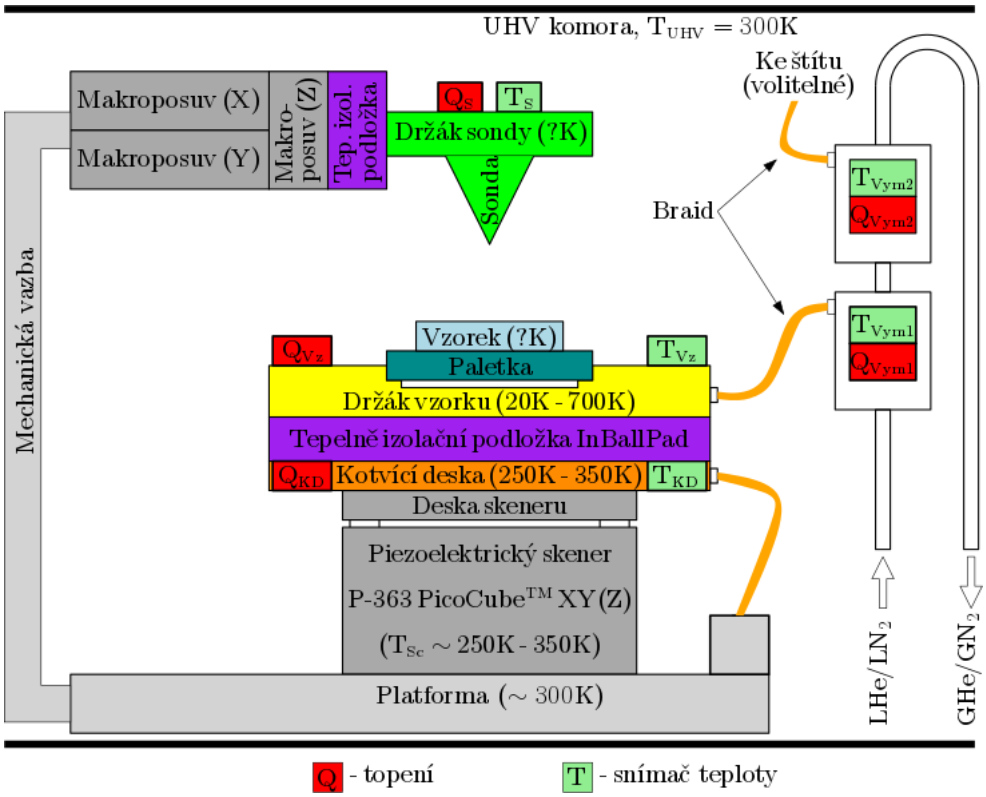
Nejvyužívanějšími kryokapalinami jsou tedy dusík a helium. Zvláště u helia je potřeba dbát na dobrou tepelnou izolaci při skladování kvůli jeho nízkému výparnému teplu. Ke skladování všech kryokapalin se používají Dewarovy nádoby, více informací k jejich problematice a konstrukci lze nalézt např. v [**?**].

2 CHLADICÍ APARATURA UHV SEM/SPM MIKROSKOPU

Nízkoteplotní část UHV SEM/SPM mikroskopu je chlazena chladicí aparaturou. Ta se skládá z LHe/LN_2 průtokového kryostatu s tepelnými výměníky a měděnými braidy. Dewarovy nádoby a přepouštěče. Průtokový kryostat je probírán v bakalářské a dipolomové práci J. Voňky [17], [16]. Tepelné výměníky jsou pomocí braidů napojeny na nízkoteplotní část stolku a případně radiační štít (v aktuální chvíli není využíván kvůli velkému množství měřicích technik). Celá aparatura je navržena tak, aby byla schopna pracovat za proměnnýc teplot mezi 20 a 700 K.

2.1 Nízkoteplotní část stolku mikroskopu

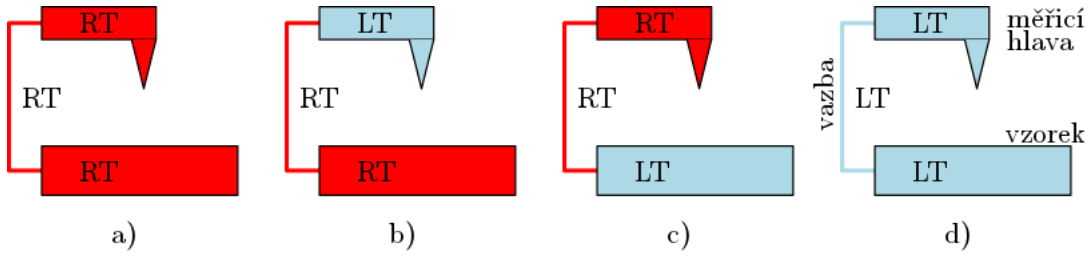
Nízkoteplotní část stolku je zachycena na schématu 2.1. Obsahuje braidy, které jsou připojeny na držák vzorku, paletku se vzorkem, která je k držáku uchycena pomocí dvou přítlačných pružin. Držák vzorku je od „teplého“ skeneru a platformy skeneru oddělen tepelně izolační podložkou InBallPad s kotvící deskou.



Obr. 2.1: Schéma nízkoteplotní části stolku UHV SEM/SPM mikroskopu včetně odhadu teplot

Přiváděním LHe (LN_2) do výměníků je ochlazujeme, čímž přes braid chladíme i držák vzorku a paletku se vzorkem k němu uchycenou. Braidy jsou navrženy tak, aby zajistily dostatečný tepelný tok mezi výměníkem a chlazenou částí, více v kapitole 3.2. Tepelné výměníky jsou stavěny na maximální zátěž $0,5\,\mathrm{W}$.

Uložení a chlazení v SPM je možné provést v několika variantách: žádné chlazení (měření při pokojové teplotě), chlazený vzorek, chlazená měřicí hlava SPM nebo chlazené obojí, možnosti jsou znázorněny na obr. 2.2. Vzhledem k tomu, že vzorek i měřící hlava jsou navzájem spojeny mechanickou vazbou, může docházet k vzájemnému teplotnímu ovlivňování. Z hlediska kvality měření jsou uložení, kde



Obr. 2.2: Varianty chlazení v SPM. Význam zkratek: RT - pokojová teplota, LT - nízká teplota.

je chlazena pouze jedna část, více problematická. Je to proto, že dochází k mnohem významějšímu tepelnému driftu, tzn. vzájemnému posuvu skenovací hlavy a měřeného místa na vzorku vlivem teplotně závislé mechanické vazby, která je na pokojové teplotě (projevuje se zde vliv teplotní roztažnosti materiálů, viz kapitola 1.1.3). Navíc může docházet k ovlivňování měřených struktur vzorku měřicí hlavou, která má rozdílnou teplotu. V našem případě není možné chlazení obou částí kvůli ostatním měřicím technikám, jež budou součástí mikroskopu, proto byla zvolena varianta chlazení vzorku, jak je patrné z obrázku 2.1. Zvolená varianta je na obrázku 2.2 c).

Kvůli tomu, že jednotlivé části aparatury plní rozdílné, často i opačné úkoly, je velmi důležité pečlivě vybrat materiály na jejich výrobu. Nejčastěji se vyskytující materiály v návrhu nízkoteplotní části jsou uvedeny v tabulce 2.1 i s hodnotami vybraných vlastností. Hodnoty jsou uváděny za pokojové teploty a při $20\,\mathrm{K}$. Této teploty sice mohou dosáhnout vyjma snímačů a průtokového systému pouze braidy (z mědi), držák vzorku (také z mědi) a paletka (různé materiály), ale uvedl jsem tak i ostatní materiály, aby byly na první pohled patrné rozdíly mezi nimi.

Tab. 2.1: Tabulka vlastností vybraných použitých materiálů. Hodnoty c a k jsou uvedeny při 300 K a při 20 K (v závorce). Koeficient teplotní roztažnosti je uváděn při pokojové teplotě. Data převzata z [4].

Materiál	Koef. teplotní roztažnosti α $10^{-6}\,\mathrm{K}^{-1}$	Měrná tepelná kapacita c $\mathrm{J{\cdot}kg^{-1}\,K^{-1}}$	Tepelná vodivost k $\mathrm{W{\cdot}m^{-1}{\cdot}K^{-1}}$
Měď (RRR= 60)	16,7	386 (7,27)	394 (1590)
Ti-6Al-4V	8,0	529 [1](7,00)	7,70 (1,50)
Nerezová ocel 304	15,1	477 (12,6)	14,90 (1,95)
Bronz (65% Cu, 35% Zn)	19,1	377 (11,0)	86,0 (12,0)
SiO_2 (tavený křemen)	3,0	745 (11,3)	1,02 (0,15)

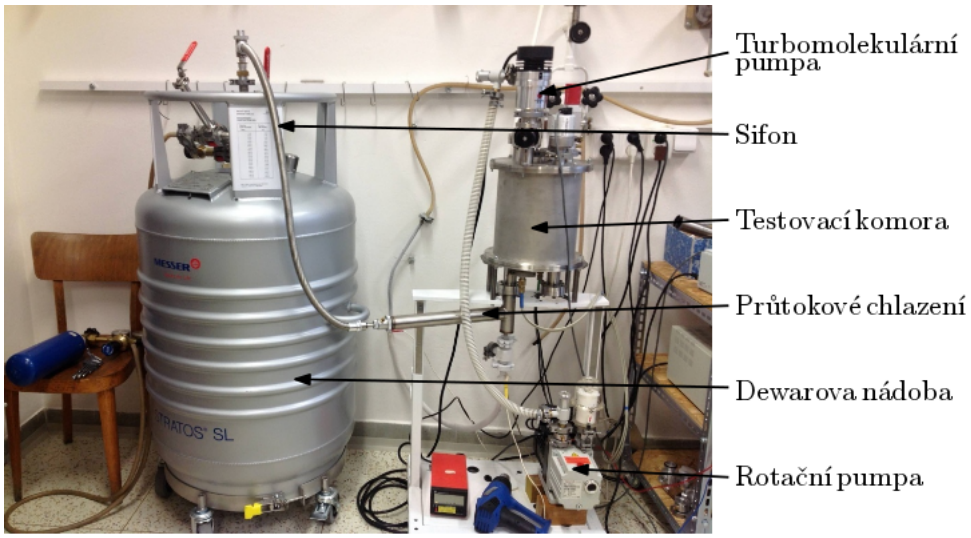
2.2 Experimentální aparatura v ÚPT

Aby jednotlivé části chladícího systému mohly být zkoušeny, byla již dříve navržena a postavena v ÚPT testovací aparatura. Skládá se z průtokového chladicího systému, vakuové testovací komory, zpětného zachytávacího systému na helium, dvou vakuových pump (olejové rotační a turbomolekulární), teplotního kontroléru LakeShore 350 [10] a počítače. Propojení součástí je viditelné na obrázku 2.3. Testovací komora je válcová, s výškou 280 mm, průměrem 220 mm a má dvě vakuové příruby CF40, tři příruby KF25 zespodu a tři shora, přičemž dolní slouží zejména jako elektrické průchodky. Nad to obsahuje po jedné přírubě KF16 na horní i dolní straně uprostřed.

2.2.1 Heat Flowmeter

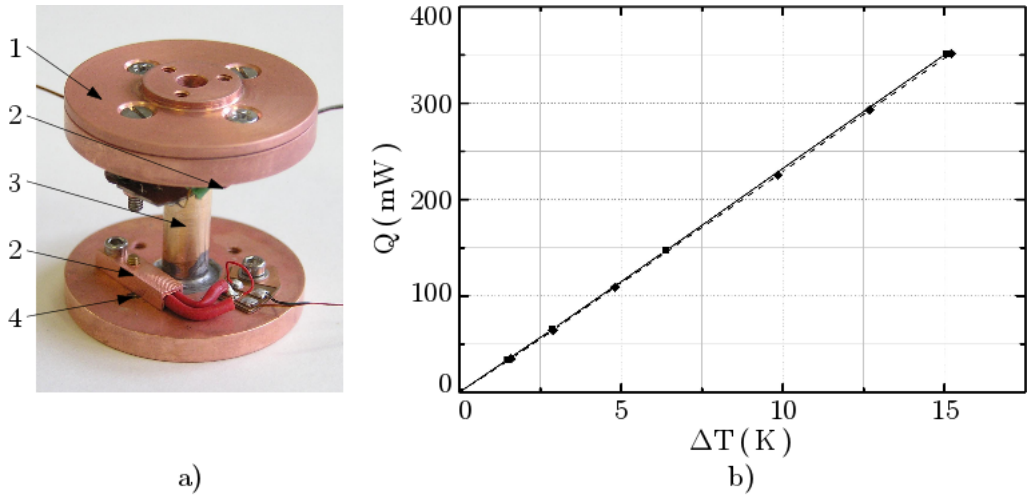
Při optimalizaci částí stolku, zvláště izolační podložky IBP, bylo potřeba ověřovat izolační vlastnosti nejen z hlediska dosažené teploty, ale také určit tepelný tok jí procházející. To pak zpětně umožnilo její návrh optimalizovat a také to posloužilo v modelu, který slouží k odhadům potřebných časů prochlazování a dosažitelných mezních teplot. Model je popsán v části 3.3.3. K určení tepelného toku byl na ÚPT vyroben Heat Flowmeter, což je kalibrovaný tepelný odpor, který umožňuje změřit tepelný tok součásti k němu připojené, viz obr. 2.4 a). Měří se rozdíl teplot na jeho horním a spodním konci, jenž se na tepelný tok přepočítá pomocí rovnice (1.18), což vzhledem ke známé vodivosti a geometrii dává lineární závislost v uvažovaném rozmezí teplot. Kalibrací, tedy určením závisosti tepelného toku na rozdílu teplot konců

[1]Hodnota v závorce je pro teplotu 30 K



Obr. 2.3: Zapojení měřicí aparatury. Počítač a LakeShore 350 nejsou zobrazeny.

odporu, byla určena směrnice přímky daná touto závislostí a tím získáno zařízení pro měření tepelných toků. Kalibrace Heat Flowmeteru je na obrázku 2.4. Odpor musel být navržen tak, aby pro předem odhadnutý tepelný tok izolační podložkou vytvořil měřitelný rozdíl teplot. Vzhledem k jeho rozměrům a stínění teplotních snímačů je tepelný tok vzniklý radiací na něj zanedbatelný, a proto uvažujeme, že měřený tepelný tok je tok připevněnou součástí.

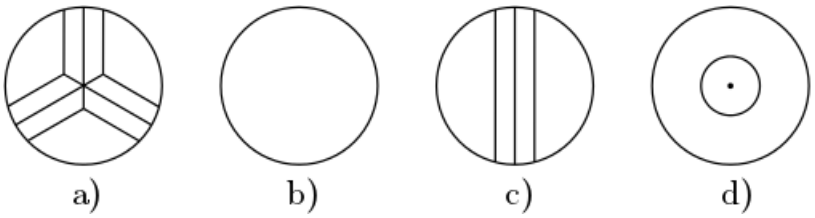


Obr. 2.4: Heat Flowmeter a) foto, b) kalibrační křivka. V a): 1-uchycení měřené součásti, 2-snímač teploty, 3-kalibrovaný odpor, 4-přichycení k podložce

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

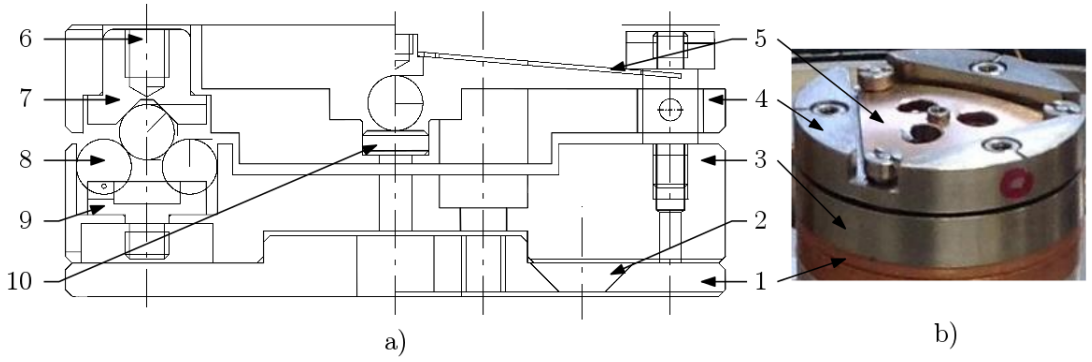
3.1 Izolační podložka InBallPad

Tepelně izolační podložka InBallPad slouží k oddělení chlazeného držáku vzorku od zbytku aparatury, zvláště od přímo navazujícího piezokeramického skeneru, který je na pokojové teplotě, viz obr. 2.1. Tím se vyhneme nutnosti chlazení celé aparatury. Podložka byla navržena tak, aby v omezeném prostoru (průměru 30 mm a výšky 12 mm) co nejlépe plnila tuto funkci. Toho bylo dosaženo izolací pomocí kuličkových podpěr, které kvůli malému styčnému povrchu a také použitého materiálu (tavený křemen), tvoří velký tepelný odpor [16], [7]. Podložka obsahuje tři kuličkové podpěry s úhlovým rozestupem 120°, které oddělují horní desku pro uložení vzorku s proměnnou teplotou 20 až 700 K od spodní desky, která je na pokojové teplotě. Kontakt kruhově rozmístěných podpěr se spodní deskou je zajištěn pomocí nohou se třemi drážkami, obr. 3.1 a), s horní deskou pak je pro každou z nich rozdílný, aby bylo dosaženo nula stupňů volnosti a byla též umožněna teplotní dilatace držáku vzorků bez vzniku mechanického pnutí. Za tímto účelem mají opěrné nohy po řadě hlavu plochou, s drážkou a s kuželovou dírou, jak je znázorněno na obrázku 3.1 b), c) a d). Nákres celé podložky a skutečný vzhled jsou na obrázku 3.2, popis částí pak v tabulce 3.1. Původ návrhu a analýza tepelných toků podložkou je v [16]. Pružina slouží k vytvoření předpětí na podpěrách.



Obr. 3.1: Opěrné nohy kuličkových podpěr v tepelně izolační podložce. a) spodní noha, b) horní plochá noha, c) horní noha s drážkou, d) horní noha s kuželovou dírou.

V současnosti je používána třetí verze izolační podložky, značená IBP-3. Od předchozí verze došlo k úpravě kuličkových podpěr. Izolační vlastnosti zůstaly zachovány, jak je patrné ze srovnání prochlazování na obr. 3.3. To bylo prováděno s maketou držáku vzorku, která měla stejné rozměry a hmotnost, jako v té době aktuální verze UHV SEM/SPM mikroskopu. Z prováděných experimentů byl zjištěn tepelný tok podložkou 125 mW při největší zátěži, tj. největším rozdílu teplot mezi držákem vzorku (21, 3 K) a kotevní deskou IBP ($\sim$ 295 K). Tento tok byl započítán do modelu chlazení, viz část 3.3.3.



Obr. 3.2: Izolační podložka InBallPad a) schéma, b) fotografie. Části 1 až 10 jsou popsány v kusovníku v tabulce 3.1. Celková výška podložky je 12 mm.

3.2 Braid

3.2.1 Úvod

Braidem se označuje spletený svazek tenkých měděných vláken, který slouží k přenosu tepla z držáku vzorku, popř. z radiačního štítu na tepelný výměník. Přenos tepla svazkem je limitován jeho průřezem, délkou a čistotou materiálu. Byly zvažovány různé varianty: Tyč, pásek, svazek vláken. Poslední varianta byla vybrána, protože je nejvíce přizpůsobitelná jak z hlediska průřezu (lze snadno přidat či ubrat vlákna), tak hlavně tvaru, který se mění v závislosti na zamýšlené poloze výměníků. Ten také hůře přenáší možné vibrace na vzorek než tuhá varianta.

Abychom co nejvíce zefektivnili přenos tepla mezi výměníkem a držákem vzorku, chtěli bychom mít braid s co největším průřezem, co nejkratší (v ideaálním případě mít přímé chlazení), jak vyplývá z rovnice (1.18), a také minimalizovat radiační povrch braidu. Zároveň však je nutno vzít v úvahu ostatní faktory, jako je možná poloha tepelných výměníků, přenos vibrací a vyhnutí se měřicím technikám v UHV SEM/SPM mikroskopu.

V současné verzi je braid složen ze dvou částí: svazek 651 tenkých vláken o celkovém průřezu $2,72\,\mathrm{mm}^2$ a délce 100 mm je nastaven širším obdélníkovým páskem s průřezem $17\,\mathrm{mm}^2$ a délkou taktéž 100 mm. Důvodem nastavení braidu je jak jeho prodloužení, tak dobře definovaný povrch vystavený radiaci. V případě svazku vláken se záření vystavený povrch mění v závislosti na poloze braidu, jeho ohnutí, kvalitě zapletení, aj. Navíc mezi vlákny mohou vznikat dutinky, které se chovají jako černé těleso (pohlcují veškeré záření), a tím výrazně zvětšovat přívod tepla na braid, tedy zhoršovat chladicí schopnosti.

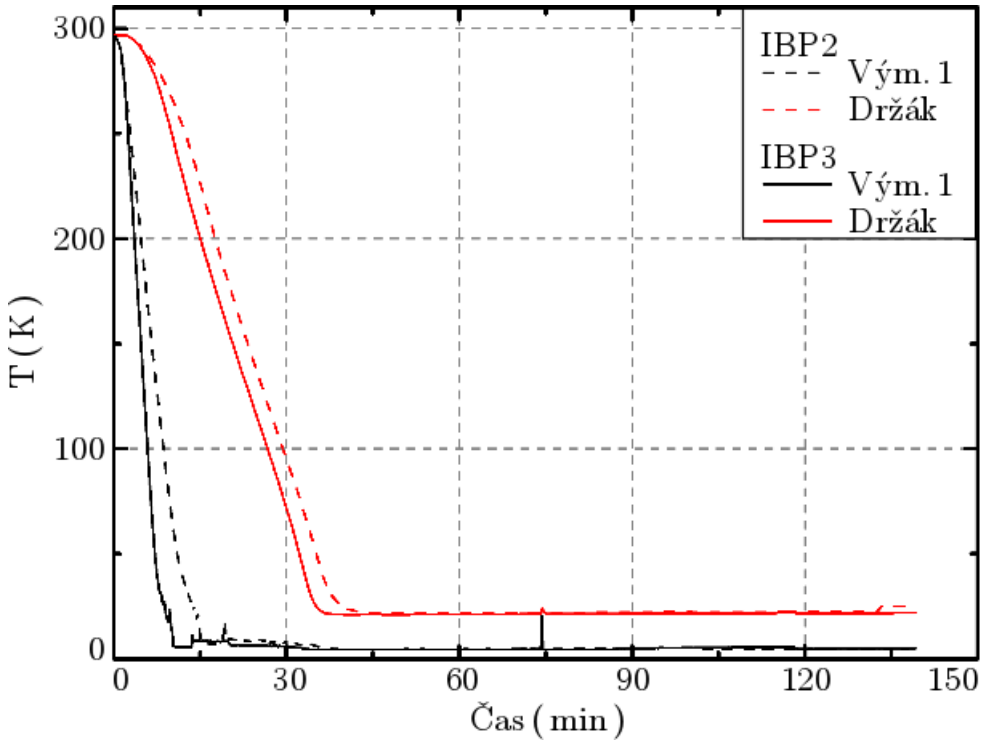
Tab. 3.1: Kusovník součástí izolační podložky InBallPad-3. Symboly rozměrů: D průměr, H výška, A strana, V_A výška trojúhelníku, MX normované značení závitu šroubů. Ti6Al4V je Ti Grade 5 (6Al-4V), W-Nr.37165

Číslo	Název	Materiál	Hmotnost g	Rozměr mm
1	Kotevní deska	Měď	9,8	D 30,H 2,75
2	Šroub k podložce	Nerezová ocel	0,10	M2
3	Deska dolní	Ti6Al4V	12,78	D 30, H 5,4
4	Deska horní	Ti6Al4V	9,04	D 30, H 4,9
5	Pružina	CuSn6/beryliová bronz	0,47	A 22,5, V_A 20,5
6	Šroub pružiny	Ti6Al4V	0,084	D 2,5, H 7,1, M1,6
7	Noha horní	Ti6Al4V	0,24	D 5,4, H 4,3
8	Kulička	Tavený křemen (SiO2)	0,018	D 2,5
9	Noha dolní	Ti6Al4V	0,12	D 5,4, H 3,5
10	Destička	Tavený křemen (SiO2)	0,018	D 2,98, H 1,1

3.2.2 Optimalizace braidu

Níže popsané výsledky a průběhy měření jsou shrnuty v tabulce 3.2 a na obrázcích 3.4 a 3.5.

Původní verze popsaná v [16] obsahuje pouze samotný svazek bez nastavení. Provedený experiment s braidem s parametry výše uvedenými (bez prodloužení), při chlazení LHe, ukázal, že na volném konci braidu (druhý konec připojen na první tepelný výměník) jsme schopni dosáhnout teploty 10,8 K za necelých 8 minut od začátku chladnutí výměníku. Celkový tepelný tok radiací na braid při této konfiguraci byl 114,8 mW. Velikost toku radiací byla zjištěna ze simulace provedené Ing. Pavlem Hanzelkou. Tyto tepelné toky byly zavedeny do modelu chlazení (část 3.3.3), aby co nejvíce odpovídal experimentu. Dále bylo vzhledem k výše diskutovaným potřebám zavedeno prodloužení v podobě pásku s délkou 75 mm a plochou průřezu 3,85 mm^2. Zde bylo dosaženo teploty 26,5 K po 20 minutách. Z výpočtu vychází tok zářením 138,9 mW. Provedená simulace se stejně dlouhým svazkem ukazuje, že samotné prodloužení nevysvětluje takový nárůst teploty (dle výpočtu Ing. Hanzelky). Domníváme se, že ten lze vysvětlit (stejně jako u držáku vzorku dále) tepelnými odpory vznikajícími v místech spojů, které jsme ve výpočtech neuvažovali. Abychom to ověřili, provedli jsme měření se snímačem umístěným na konci samotného prodloužení. Protože však v té době byl poškozen využívaný nízkoztrátový sifon, musel být nahrazen jiným typem, následkem čehož výsledky měření ukazují



Obr. 3.3: Srovnání časových záznamů prochlazování IBP2 a IBP3 v LHe. Je zjevné prakticky stejné zpoždění mezi prochlazením výměníku a držáku vzorku.

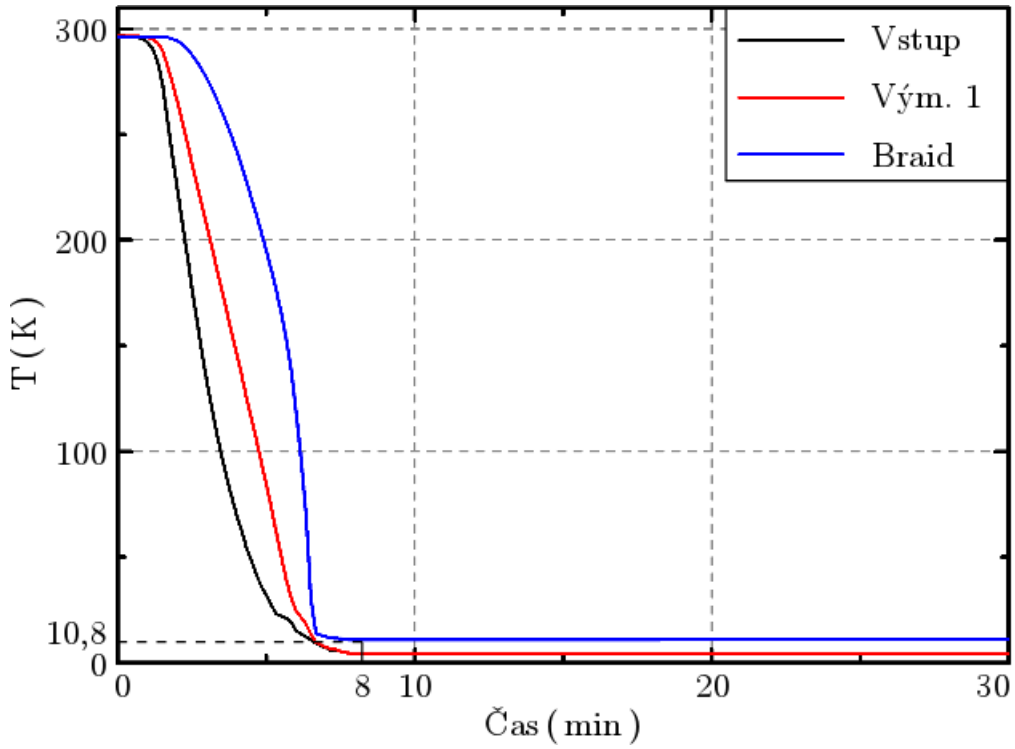
vyšší teploty na spoji než na konci série prodloužení s braidem. Také prochlazení trvalo výrazně déle. Z tohoto důvodu nejsou měření porovnatelná. Pro úplnost je však i toto měření uvedeno v tabulce 3.2 na posledním řádku.

Tab. 3.2: Tabulka výsledků testovaných variant braidu.

Varianta	T_{min} / K	Čas prochlazení / min	Tepelný tok radiací / mW
Braid (100 mm; 2, 72 mm^2)	10, 8	8	114, 8
Braid (100 mm; 2, 72 mm^2) + pásek (75 mm; 3, 85 mm^2)	26, 5	20	138, 9
Pásek (150 mm; 13, 5 mm^2)	27, 9	45	72, 3

V rámci ÚPT byl proveden experiment na ověření přenosu vibrací po braidu, který by měl být ideálně nulový, aby nenarušoval měření SPM. Měření bylo provedeno v SEM[1] VEGA3 SB [15] firmy TESCAN. Pořízené snímky bez a s chlazením nevykazovaly prakticky žádný rozdíl, který by vzniknul připojením chladicího

[1]scanning electron microscope, rastrovací elektronový mikroskop



Obr. 3.4: Výsledek měření samotného braidu. Dosažena $T_{min} = 10,8\,K$ za 8 minut. Rozměry braidu: délka 100 mm, průřez $2,72\,mm^2$.

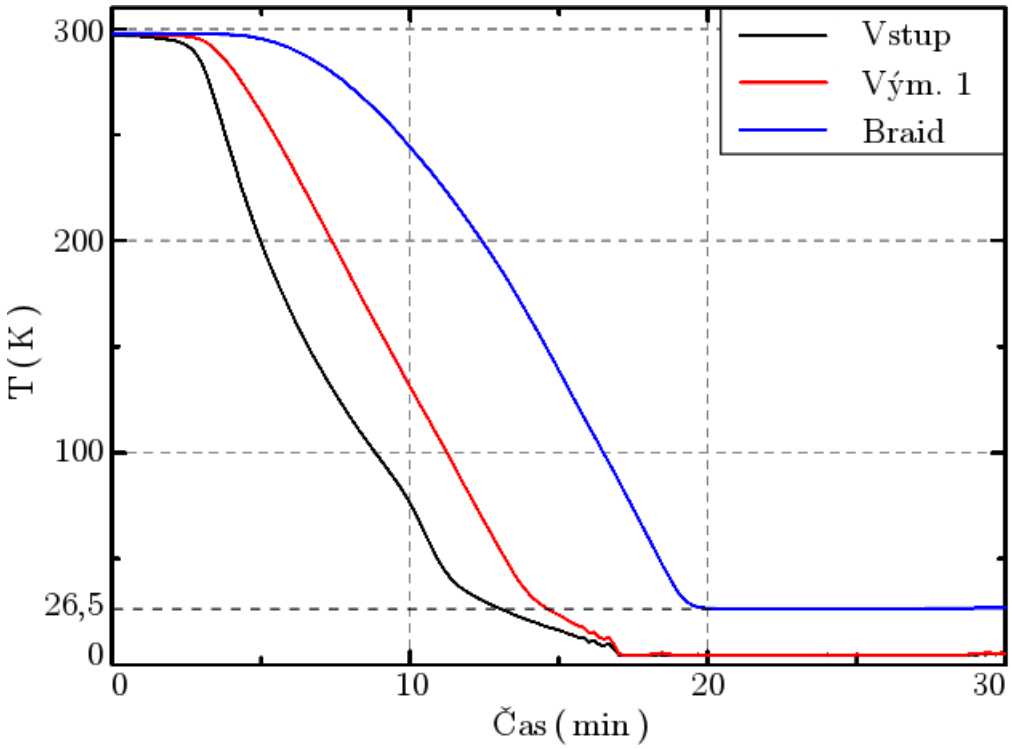
systému. Nutno však podotknout, že toto měření by ukázalo pouze velký přenos vibrací, ale menší, který na SEM snímcích nemusí být patrný, může stále výrazně ovlivnit měření SPM. Proto před uvedením do plného provozu bude ještě proveden test s SPM.

V rámci bakalářské práce byl připraven experiment pro ověření vlivu tepelného záření ($\sim 300\,K$) na teplotní snímače během výše popsaných testů měděných braidů, z časových důvodů však nebyl realizován.

3.3 Držák vzorku

3.3.1 Úvod

Na držák vzorku, jak napovídá název a je patrné z obrázku 2.1, je umístěna paletka se vzorkem. Ačkoliv je paletka elektricky kontaktovaná a měření teploty přímo na ní by z tohoto hlediska bylo možné, jsou na ní plánovány i jiné měřící techniky, navíc paletka musí být přenositelná, takže nebylo rozumně možné umístit uchycení braidu ani snímače teploty přímo na ní. Proto je obojí přiváděno na držák, který pak musí zajišťovat jak dobrý kontakt pro přenos tepla, tak zároveň elektrické kontaktování paletky izolované od zbytku aparatury. Pomineme-li připájení či svar, pak nejlepší



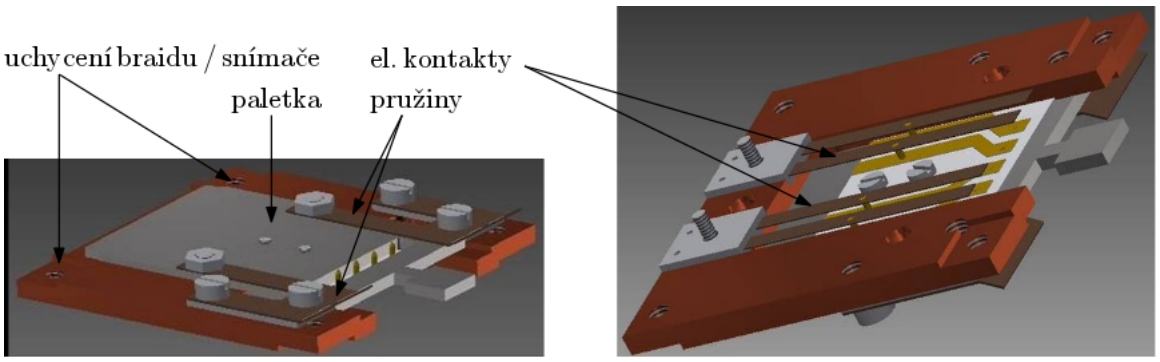
Obr. 3.5: Výsledky měření braidu s prodloužením měděným páskem. Dosažena $T_{min} = 26,5\,K$ za 20 minut. Rozměry braidu: délka 100 mm a průřez $2,72\,mm^2$, prodloužení délky 75 mm a průřezu $3,85\,mm^2$.

tepelný kontakt by byl pomocí šroubu nebo zámkového systému. Vzhledem k velmi omezenému prostoru v komoře UHV SEM/SPM a k požadavku snadné manipulace pomocí tzv. wobble stick (kleště na zakládání vzorku a jinou manipulaci v UHV komoře bez potřeby ji rozdělávat) však tyto systémy nejsou možné. Uchycení paletky v držáku je nakonec realizováno pomocí dvou listových pružin. Jejich velikost a tuhost byla přizpůsobena velikosti držáku vzorku a maximální síle, kterou může působit wobble stick, jejíž velikost je 10 N ve směru zakládání paletky (omezení způsobeno vlastnostmi skeneru).

3.3.2 Optimalizace držáku vzorku

Původní návrh zachovával válcový tvar podložky IBP, k níž je uchycen, nakonec však má čtvercový půdorys, jenž poskytuje větší plochu pro uchycení snímače a braidu. Nákres držáku vzorku je zachycen na obrázku 3.6. Zásadním problémem chlazení držáku bylo uchycení braidu zajišťující dobrý kontakt. Ve starší verzi (měření na obr. 3.7 a)) byl kontakt nekvalitní, což vedlo k vysoké minimální teplotě $104,7\,K$ při použití LHe. Vzhledem k cílové teplotě 20 K bylo potřeba návrh upravit. Obě verze, novější i starší, zkonstuoval Bc. Radek Řihák (ÚFI) včetně elektrického kon-

taktování paletky. Z měření, ve kterém byl instalován snímač i přímo na paletce, vyplývá mnohem pozitivnější výsledek: minimální teplota držáku $31,5\,\mathrm{K}$ a současně na paletce $64,5\,\mathrm{K}$, jak je zachyceno na obr. 3.7b. Nutno ještě dodat, že měření bylo prováděno v době opravy nízkoztrátového sifonu, tedy při jeho použití lze očekávat teplotu nosiče vzorku blíže cílovým $20\,\mathrm{K}$ (srv. 3.2.2). V grafu 3.9 b) je v levé části patrné nedostatečné prvotní prochlazení sifonu, což vedlo k přílišnému ohřevu helia a tím zhoršení efektivity chlazení.



Obr. 3.6: Model poslední verze držáku vzorku

V grafu 3.7 b) je patrných několik neočekávaných jevů, které můžeme pozorovat. Zaprvé je to výše zmiňovaný vliv teploty sifonu na efektivitu chlazení. Zadruhé je pozorovatelný pozvolný nárůst teploty, který je zapříčiněn zmenšením tlaku v Dewarově nádobě a tím snížení průtoku chladiva. Za další jsou při jistých tlacích a teplotách pozorovatelné oscilace teploty převážně v průtokovém systému, ale přes braid jsou přenášeny i na držák vzorku. To, jak je pozorováno a zmíněno již v [16], je způsobeno přechody helia (u LN_2 zatím nepozorováno) mezi kapalnou a plynnou fází, čímž dochází ke změnám tlaku a následně oscilacím proudící kryokapaliny$(4,21\,\mathrm{K})$. Dále je znatelný rozdíl mezi teplotou držáku vzorku a paletkou. Ten je zapříčiněn způsobem kontaktování paletky diskutovaným výše a také tepelnými odpory, které se projevily výrazněji, než bylo očekáváno (stejně jako v případě kontaku braid-prodloužení a braid-držák vzorku). Jevy jsou označeny písmeny A - D ve jmenovaném pořadí (obr. 3.7 b)).

3.3.3 Model chlazení

Abychom dopředu dokázali odhadnout dobu prochlazování a dosažitelnou teplotu, byl vytvořen výpočetní model pro držák vzorku. Jsou v něm zahrnuty tepelné toky braidem, izolační podložkou, radiací a případným topením, pokud by se chtělo udržovat držák na jisté teplotě jiné, než minimální. Nejsou v něm zahrnuty kontaktní odpory a radiace na IBP, která by měla být zanedbatelná, a výše uvedené

neočekávané jevy. Schéma použitého modelu je na obrázku 3.8. Model vychází z rovnice:

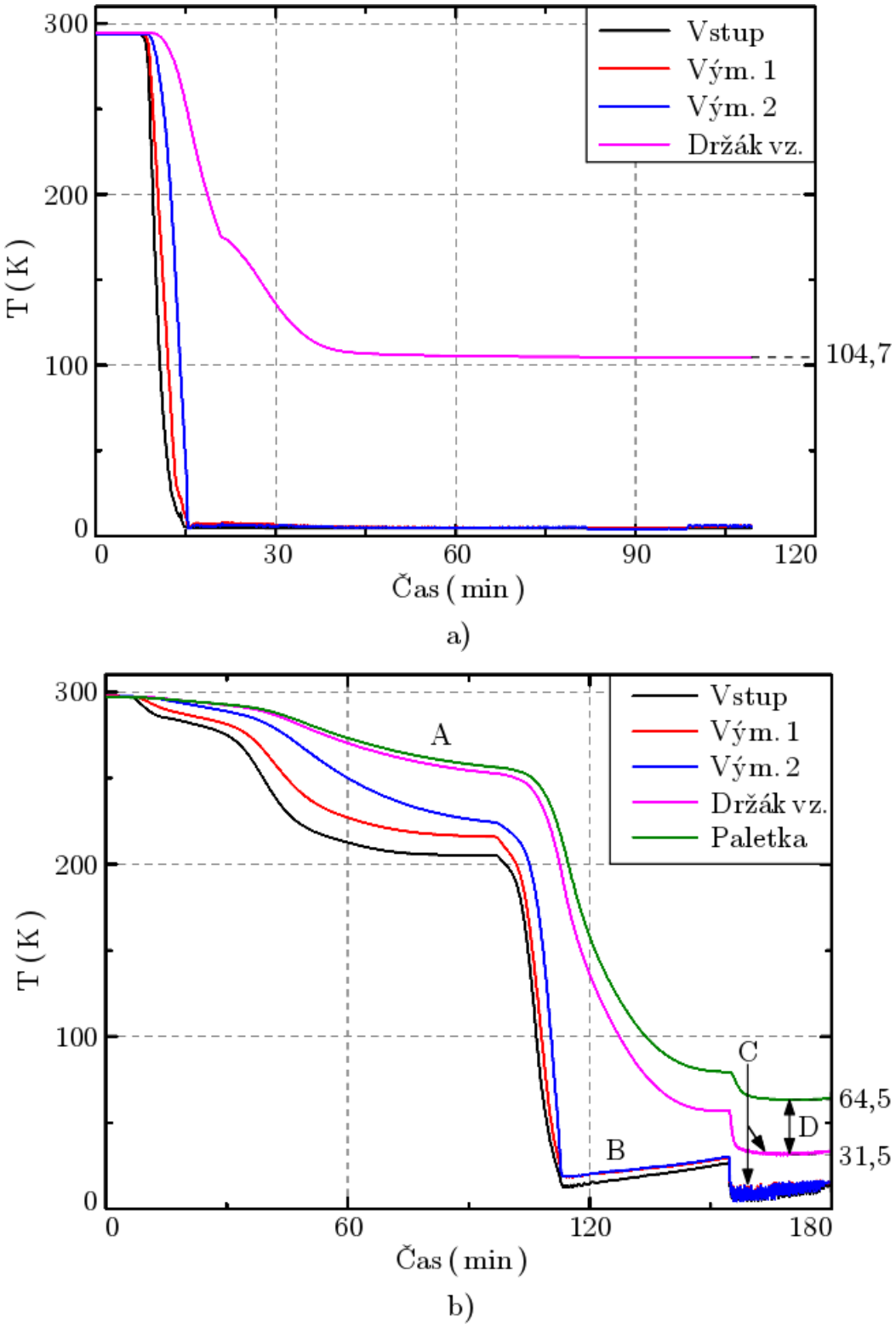
$$Q = m_D c_D \frac{dT}{dt}, \tag{3.1}$$

kde m_D je hmotnost držáku vzorku, jež činí 25 gramů, c_D jeho měrná tepelná kapacita, Q je výsledný tepelný tok k držáku. Tuto rovnici můžeme upravit do tvaru, který nám poskytne odhad doby prochlazování:

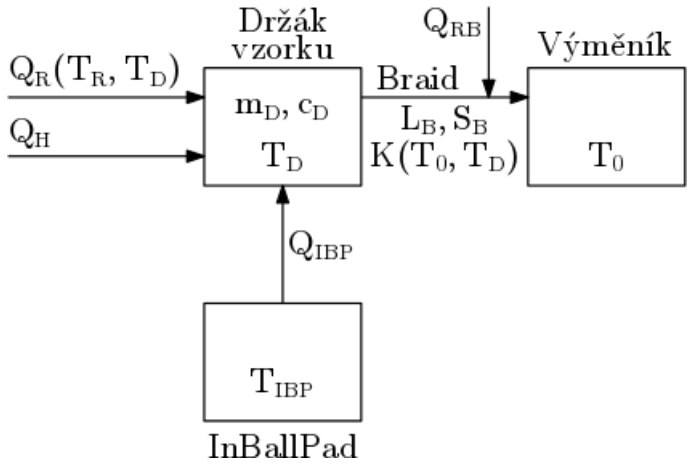
$$dt = \frac{m_D c_D}{Q_R + Q_H + Q_{IBP} + Q_{RB} - Q_B} dT \tag{3.2}$$

Významy indexů jsou zřejmé ze schématu na obr. 3.8, dT je krok výpočtu. Tepelné toky radiací a kondukcí jsou spočteny podle rovnic (1.13) a (1.18). Závislosti tepelných vodivostí a kapacit jsou vidět na obrázcích 1.5 a 1.1. Z pohledu na ně je jasné, že při výpočtu se snadno můžeme dopustit chyby, zvolíme-li krok příliš hrubý. Data pro výpočet byly získány z rozsáhlé databáze Skupiny kryogeniky a supravodivost, i tak bylo třeba často hodnoty získat interpolací. Právě kvůli nedostatku dat a zároveň složitému tvaru závislostí vyžaduje výpočetní model obezřetnost při užívání a následné interpretaci.

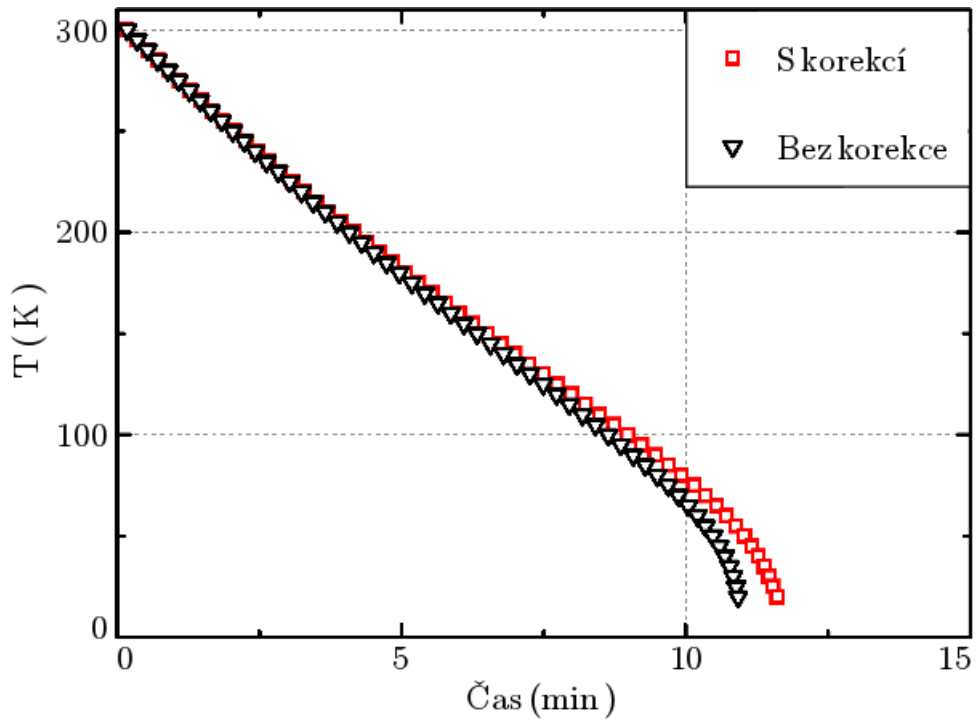
V případě modelu byla uvažována konstantní teplota prvního výměníku, v případě přesnějších odhadů ji lze též simulovat na základě měření. Jak bylo již dříve zmíněno, do modelu bylo dodatečně zavedeno z výsledků měření a výpočtů tepelný tok radiací na braid a tok IBP, což by obojí mělo pomoci dosáhnout věrohodnějších výsledků. Srovnání výpočtu s těmito korekcemi a bez nich je na obr. 3.9. Z posledních výpočtů vychází, že bychom měli být schopni dosáhnout cílové teploty 20 K již za 12 minut po prochlazení výměníku (předpoklad jeho konst. teploty), což v realitě zatím nejsme schopni dosáhnout. Kromě už výše zmíněných důvodů (zejména kontaktních odporů) je příčinou také nehomogennost povrchu vzorku: jsou v něm různé otvory, hrany, jsou k němu připevněny pružiny a paletka, což společně může stejně jako u braidu způsobovat mnohem větší pohlcování radiačního tepla, než jsme uvažovali.



Obr. 3.7: Srovnání měření a) staré a b) nové verze držáku vzorku. V případě b) nebyl použit nízkoztrátový sifon, což je důvodem dlouhé doby prochlazení. Písmena A - D označují některé neočekávané pozorované jevy: A vliv teploty sifonu na efektivitu chlazení, B nárůst teploty se snížením tlaku v Dewarově nádobě (snížení průtoku chladiva), C teplotní oscilace v průtokovém systému, D znatelný rozdíl mezi teplotou paletky a držáku vzorku zapříčiněný kontaktními tepelnými odpory a způsobem kontaktování.



Obr. 3.8: Schéma výpočetního modelu. Význam indexů: 0 první výměník, D držák vzorku, R radiace, H topení, B braid, IBP izolační podložka.



Obr. 3.9: Srovnání výsledků výpočtu pro dobu prochlazování a) bez korekcí, b) s korekcemi, tj. zahrnutím radiace na braid a tepelného toku IBP. Tepelný výměník je v obou případech na teplotě 5 K.

ZÁVĚR

Ve své práci jsem se zabýval experimentálním ověřením funkčnosti již navržených a zkonstruovaných součástí nízkoteplotní části stolku UHV SEM/SPM mikroskopu, což je tepelně izolační podložka InBallPad, držák vzorku a svazek tenkých vysoce vodivých měděných vláken (braid). K porozumění probíhajících jevů jsem nejprve nastudoval mechanismy přenosu tepla a vlastnosti materiálů, zvláště v kryogenní oblasti. Dále jsem se zabýval pochopením funkcí a konstrukcí SPM mikroskopu, včetně jeho různých variací (LT SPM, VT SPM [2]).

V experimentální části jsem prochlazoval jednotlivé součásti ve zkušební komoře a na základě výsledků měření se podílel na optimalizaci jednotlivých částí. Také jsem zpracoval výpočetní model pro odhad doby prochlazování nízkoteplotní části a implementoval do něj upřesnění na základě měření. Model je uveden v části 3.3.3. K výraznému zlepšení a přiblížení cíli projektu (teplotě 20 K) došlo s výrobou nové verze držáku vzorku, viz 3.3.2. Stále se v měření vyskytují námi dosud neprověřené vlivy, jako například vliv kontaktních odporů, který je zvláště patrný u prodloužení braidu měděným páskem, viz graf 3.5, stejně jako u kontaktu braid-držák vzorku a držák vzorku-paletka, který je zajištěn přítlačnými pružinami, obojí na obr. 3.7.

Do budoucna je potřeba ještě dokončit optimalizaci držáku vzorku, zvláště pak jeho kontaktu s paletkou, aby se zajistila co nejnižší teplota vzorku. Dále by bylo užitečné ověřit vliv rozpletení vláken braidu na mezní teplotu a na přenos vibrací. Též by bylo vhodné ověřit vliv teplotního kotvení samotných teplotních snímačů na jejich měřicí schopnost a ovlivňování radiací.

[2] Low Temperature - nízkoteplotní, Variable Temperature - pracující za proměnných teplot.

LITERATURA

[1] BARRON, Randall F. *Cryogenic heat transfer*. Philadelphia, PA: Taylor and Francis, c1999. ISBN 15-603-2551-8.

[2] COMPRESSED GAS ASSOCIATION. *Handbook of compressed gases*. 4th ed. New York: Springer, 1999. ISBN 9781461552857.

[3] *The CryoComp package (Version 3.0)* [Software]. (1997). Eckels Engineering Inc. Florence, SC, USA. URl: http://www.eckelsengineering.com

[4] EKIN, Jack W. a George O. ZIMMERMAN. Experimental Techniques for Low-Temperature Measurements: Cryostat Design, Material Properties, and Superconductor Critical-Current Testing. *Physics Today* [online]. 2007, **60**(5), 67-68 [cit. 2016-05-27]. DOI: 10.1063/1.2743130. ISSN 00319228. Dostupné z: http://scitation.aip.org/content/aip/magazine/physicstoday/article/60/5/10.1063/1.2743130

[5] ERBEN, Milan. *Vakuová technika: Získávání a měření vakua, využití vakuových technologií* [online]. In: . s. 28 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: http://www.upce.cz/fcht/koanch/soubory/vakuum-erben.pdf

[6] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER, DUB, Petr (ed.). *Fyzika*. 2., přeprac. vyd. Překlad Miroslav Černý. Brno: VUTIUM, c2013. Překlady vysokoškolských učebnic, sv. 4. ISBN 9788021441231.

[7] Pavel Hanzelka, Jakub Vonka, and Vera Musilova, Low conductive support for thermal insulation of a sample holder of a variable temperature scanning tunneling microscope, REV. SCI. INSTRUM. 84, 085103 (2013).

[8] JELÍNEK, J. a Z. MÁLEK. *Kryogenní technika*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1982.

[9] KITTEL, Charles a Paul MCEUEN. *Introduction to solid state physics*. 8th ed. New York: Wiley, c2005. ISBN 04-716-8057-5.

[10] *Lake Shore Cryotronics, Inc.: Cryogenic Temperature Controllers - Model 350 - Product Overview* [online]. c2016 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: http://www.lakeshore.com/products/cryogenic-temperature-controllers/model-350/pages/Overview.aspx

[11] LANDAU, Lev Davidovič a Jevgenij Michajlovič LIFŠIC. *Statistical physics: Part 1*. 3rd ed., rev. and enlarged. Překlad J. B. Sykes, M. J. Kearsley. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1980. Course of theoretical physics, vol. 5. ISBN 9780750633727.

[12] MARQUARDT, E. D., J. P. LE a Ray RADEBAUGH. Cryogenic Material Properties Database. *Cryocoolers 11* [online]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002, s. 681 [cit. 2016-05-27]. DOI: 10.1007/0-306-47112-4-84. ISBN 0306465671. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/0-306-47112-4-84

[13] NEKULA, Jan. *Návrh rastrovacího tunelovacího mikroskopu STM*. Brno, 2004, 59 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství.

[14] POBELL, Frank. *Matter and methods at low temperatures*. 3rd, rev. and expanded ed. New York: Springer, c2007. ISBN 978-354-0463-566.

[15] *TESCAN ORSAY HOLDING, a.s.: VEGA SEM Product line* [online]. c2016 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: http://www.tescan.com/en/products/vega-sem/vega3-sb

[16] VOŇKA, Jakub. *Návrh a ověření nízkoteplotní části UHV - STM mikroskopu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2013, 63 s. Diplomová práce. Vedoucí práce Ing. Pavel Urban, Ph.D.

[17] VOŇKA, Jakub. *Materiály a jejich aplikace v nízkoteplotních částech STM mikroskopu*. Brno, 2011, 39 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Pavel Urban, Ph.D.

[18] WEISEND, J. G. *Handbook of cryogenic engineering*. Philadelphia, PA: Taylor and Francis, c1998. ISBN 1560323329.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

a *absorptivita* [-]

A *délka strany trojúhelníku* [m]

b *Wienova konstanta* [m·K]

c *rychlost světla* [m·s^{-1}]

c_p *měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku* [J·kg^{-1}·K^{-1}]

c_V *měrná tepelná kapacita za konstantního objemu* [J·kg^{-1}·K^{-1}]

C_{ph} *tepelná kapacita fononů* [J·K^{-1}]

C_e *tepelná kapacita elektronů* [J·K^{-1}]

D *průměr* [m]

E *energie* [J]

E_F *Fermiho energie* [J]

E_{21} *vzájemná emisivita* [-]

f_{BE} *Boseho-Einsteinovo rozdělení* [-]

h *Planckova konstanta* [J·s]

$\hbar$ *redukovaná Planckova konstanta* [J·s]

H *výška* [m]

k *tepelná vodivost* [W·m^{-1}·K^{-1}]

k_B *Boltzmannova konstanta* [J·K^{-1}]

k_e *tepelná vodivost elektronu* [W·m^{-1}·K^{-1}]

k_f *tepelná vodivost fononu* [W·m^{-1}·K^{-1}]

K *integrální tepelná vodivost* [W·m^{-1}]

l *délka* [m]

l_v *měrné skupenské teplo varu* [J·kg^{-1}]

m *hmotnost* [kg]

M *molární hmotnost* [$\mathrm{kg \cdot mol^{-1}}$]

N_0 *počet částic* [-]

q *tepelný tok jednotkovou plochou* [$\mathrm{J \cdot s^{-1} m^{-2}}$]

Q *tepelný tok* [$\mathrm{J \cdot s^{-1}}$]

r *reflektivita* [-]

R *plynová konstanta* [$\mathrm{J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}}$]

S *povrch* [$\mathrm{m^2}$]

t *transmisivita* [-]

T *teplota* [K]

T_F *Fermiho teplota* [K]

v_s *rychlost zvuku* [$\mathrm{m \cdot s^{-1}}$]

$\overline{v}$ *průměrná rychlost* [$\mathrm{m \cdot s^{-1}}$]

v_F *Fermiho rychlost* [$\mathrm{m \cdot s^{-1}}$]

V *objem* [$\mathrm{m^3}$]

$\mathrm{V_A}$ *výška trojúhelníku* [m]

V_m *molární objem* [$\mathrm{m^3 \cdot mol^{-1}}$]

α *koeficient teplotní roztažnosti* [$\mathrm{K^{-1}}$]

ϵ *emisivita* [-]

Θ_D *Debyeova teplota* [K]

λ *vlnová délka* [m]

λ_e *střední volná dráha elektronu* [m]

λ_f *střední volná dráha fononu* [m]

σ *Stefanova-Boltzmannova konstanta* [$\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}}$]

Φ *zářivý tok* [$\mathrm{W \cdot m^{-2}}$]

Φ_λ *spektrální hustota zářivého toku* [$\mathrm{W \cdot m^{-3}}$]

ω *frekvence* $[\mathrm{s}^{-1}]$

ω_D *Debyeova frekvence* $[\mathrm{s}^{-1}]$