



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

ODPAŘOVÁNÍ TENKÝCH VRSTEV POMOCÍ INTENZIVNÍHO LASEROVÉHO SVĚTLA ZA SOUČASNÉHO POZOROVÁNÍ ELEKTRONOVÝM RASTROVACÍM MIKROSKOPEM

EVAPORATION OF THIN FILMS USING INTENSE LASER LIGHT OBSERVED OPERANDO IN A
SCANNING ELECTRON MICROSCOPE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ELIŠKA BOLELOUCKÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK NOVÁČEK, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství
Studentka: **Eliška Boleloucká**
Studijní program: Fyzikální inženýrství a nanotechnologie
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Zdeněk Nováček, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

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:

Odpařování tenkých vrstev pomocí intenzivního laserového světla za současného pozorování elektronovým rastrovacím mikroskopem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Bakalářská práce se zaměří na vývoj metody přímého ovlivňování povrchu vzorků v komoře mikroskopu využitím intenzivního laserového světla. Naváže na dosud získané výsledky v této oblasti, tedy k zavedení světla do komory SEM využije stávající mikromanipulátor s optickým vláknem, umožňující přesné nastavení konce hrotu vlákna vůči povrchu zkoumaného/opravovaného vzorku.

Cíle bakalářské práce:

Shrňte problematiku vedení světla optickými vlákny, včetně možnosti měření referenčních hodnot intenzity světla, dopadajícího na vstupní část vlákna.

Proveďte simulaci interakce světla s tenkými vrstvami na substrátu, vyberte nejvhodnější kombinaci materiálu, jeho tloušťky, jakož i typ substrátu, na který má být tenká vrstva nanесena.

Na základě získaných poznatků nadeponujte pomocí metody IBAD (depoziční komora Kaufman) zvolené vrstvy daných parametrů a porovnejte výsledky ovlivňování povrchu těchto vzorků světlem v komoře SEM s výsledky simulací.

Seznam doporučené literatury:

VŮJTEK, Milan; KUBÍNEK, Roman a MAŠLÁŇ, Miroslav. Nanoskopie. V Olomouci: Univerzita Palackého, 2012. ISBN 978-80-244-3102-4.

Advanced fiber sensing technologies. Editor Lei WEI. Progress in optical science and photonics. Singapore: Springer, 2020. ISBN 978-981-15-5506-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. RNDr. Tomáš Šikola, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na modifikaci povrchu vzorku pomocí intenzivního laserového světla, což je jedna z požadovaných vlastností vyvíjené multifunkční sondy SPM nové generace. Nejprve je představena samotná sonda SPM umožňující korelativní měření. Dále je rozebrána problematika zavedení intenzivního laserového světla do komory elektronového mikroskopu společně s provedenou úpravou v detekční větvi mikroskopu. Pro simulaci interakce laserového světla s povrchem vzorku je použito programového prostředí COMSOL Multiphysics. Následně jsou výsledky simulací teplotního pole ve vzorku srovnány s výsledky přímého ovlivňování povrchu vzorku v komoře elektronového mikroskopu.

Abstract

This work focuses on the modification of the sample surface using intense laser light. This is one of the desired features of the new generation of multifunctional SPM probes, which are under development. In the first chapter is introduced the SPM probe itself, which allows correlative measurements. Following section contains the implementation of the intense laser light into the electron microscope chamber, together with the modification made to the detection branch of the microscope. The COMSOL Multiphysics software environment is used to simulate the interaction of the laser light with the sample surface. The results of the simulations of the temperature field in the sample are then compared with the results of the direct interaction of the sample surface with the laser light in the electron microscope chamber.

Klíčová slova

SEM, SPM, COMSOL Multiphysics, mikromanipulátor s optickým vláknem, odpařování tenkých vrstev, modifikace laserem

Keywords

SEM, SPM, COMSOL Multiphysics, fiber optic micromanipulator, evaporation of thin films, modification via laser

BOLELOUCKÁ, E. *Odpařování tenkých vrstev pomocí intenzivního laserového světla za současného pozorování elektronovým rastrovacím mikroskopem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2024. 40 s. Vedoucí Ing. Zdeněk Nováček, Ph.D.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma *Odpařování tenkých vrstev pomocí intenzivního laserového světla za současného pozorování elektronovým rastrovacím mikroskopem* vypracovala samostatně pod odborným vedením Ing. Zdeňka Nováčka, Ph.D., a že veškerá použitá literatura je uvedena v seznamu citací.

Eliška Boleloucká

Tímto bych ráda poděkovala svému vedoucímu Ing. Zdeňku Nováčkovi, Ph.D., za vedení a podporu v průběhu této práce, cenné rady, lidský přístup a trpělivost. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Jakobovi Zlámalovi, Ph.D. za pomoc a trpělivost při vysvětlování simulací v prostředí COMSOL Multiphysics a Jirkovi Spoustovi za pomoc s přípravou vzorků. Velký dík také patří prof. RNDr. Jiřímu Spoustovi, Ph.D. za konzultace, vlídná slova a nespočet mouder. Nakonec bych chtěla poděkovat své rodině, přátelům a spoluobojovníkům v kafárně za podporu a společně strávené chvíle.

Tato práce byla z části podpořena projektem INCHAR (FW03010504 Vývoj in-situ technik pro charakterizaci materiálů a nanostruktur) se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci programu TREND.

Eliška Boleloucká

Obsah

Úvod	1
1 Cíle a motivace práce	3
1.1 Korelativní měření	3
1.2 Sondový mikroskop LiteScope	4
1.3 Multifunkční sonda SPM nové generace	4
1.4 Cíle	6
2 Zavedení světla do komory SEM a úprava detektoru	9
2.1 Mikromanipulátor s optickým vláknem	9
2.2 Detektor sekundárních elektronů a jeho úprava	10
3 Optická vlákna	11
3.1 Vlastnosti optických vláken	11
3.2 Porovnání jednomódového a vícemódového vlákna	12
3.3 Jednomódová vlákna	13
3.3.1 Zavedení světla do vlákna	14
3.3.2 Ztráty při šíření světla	15
4 Simulace v prostředí COMSOL Multiphysics	17
4.1 Metoda konečných prvků	17
4.2 Model a okrajové podmínky	17
4.2.1 Určení ovlivněné plochy vzorku	18
4.2.2 Výpočet teplotního pole	20
5 Ovlivňování povrchu vzorků v komoře mikroskopu	23
5.1 Určení výkonu laserového světla dopadajícího na vzorek	23
5.2 Proces tavení vrstev	25
5.3 Porovnání výsledků simulace s výsledky experimentů	25
5.4 Příprava na litografii	32
Závěr	35
Literatura	37
Seznam použitých zkratk a symbolů	40

Úvod

Vynalezení a sestavení prvního optického mikroskopu bylo pro lidstvo zcela zásadní protože umožnilo významné pokroky v nejrůznějších oblastech vědy a techniky a transformovalo naše chápání světa. Zároveň s rozvíjející se mikroskopií začala narůstat potřeba zkoumat svět kolem nás detailněji, což vedlo ke vzniku elektronové mikroskopie, která nám umožňuje analýzu až na atomární úrovni.

V současné době, se zvyšujícím se zájmem o komplexní a přesnější zobrazování vzorků, je v elektronové mikroskopii kladen čím dál větší důraz na vývoj nových technologií. Jednou z možných metod komplexního zobrazování představuje korelativní sondová a elektronová mikroskopie (CPEM), která spojuje rastrovací elektronovou mikroskopii (SEM) s mikroskopií skenovací sondou (SPM). Pro pozorování dynamických procesů v reálném čase v prostředí, ve kterém k nim dochází, lze využít in-situ mikroskopie. V rámci projektu INCHAR (za podpory Technologické agentury ČR), který je zaměřen na vývoj multifunkční sondy SPM, se spojením těchto dvou technik zabýváme.

Jedním z požadavků kladených na vyvíjenou sondu je možnost korelativního měření a charakterizace povrchu vzorků, a zároveň možnost jeho přímé modifikace pomocí přivedeného světla, pracovního plynu a napětí k povrchu vzorku v komoře elektronového mikroskopu.

Tato práce je zaměřena na jednu z výše požadovaných možností, a to na přímou modifikaci povrchu vzorku pomocí intenzivního laserového světla.

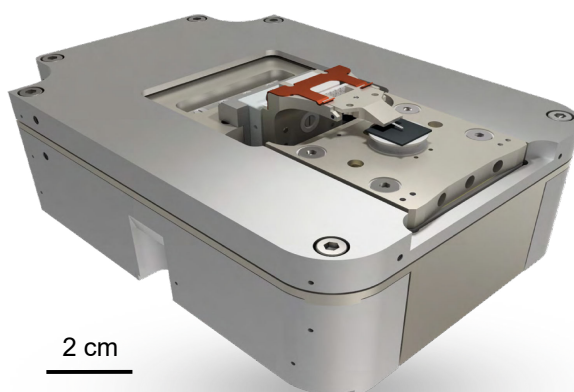
První kapitola je věnována stručnému popisu korelativního měření a vyvíjené multifunkční sondy SPM. Ve druhé kapitole je rozebrána problematika přivedení laserového světla do komory elektronového mikroskopu a stručně popsán použitý mikromanipulátor. V následující třetí kapitole jsou nastíněny základní vlastnosti optických vláken, která jsou důležitá pro přenos laserového světla. Ve čtvrté kapitole je popsána simulace interakce světla s povrchem vzorku v prostředí COMSOL Multiphysics společně s určením ovlivněné plochy vzorku při jeho modifikaci tímto intenzivním světlem. Nakonec je v páté kapitole popsána experimentální část a srovnány výsledky simulací s výsledky přímého ovlivňování povrchu vzorku v komoře elektronového mikroskopu laserovým světlem přivedeným optickým vláknem.

1. Cíle a motivace práce

V rámci své bakalářské práce se podílím na výzkumu jedné z požadovaných vlastností vyvíjené multifunkční sondy SPM nové generace. Vývoj a testování této sondy SPM se uskutečňuje v rámci projektu INCHAR¹, jehož cílem je vývoj nových technologií využitelných pro zařízení LiteScope firmy NenoVision (Obrázek 1.1).

Mezi požadavky kladenými na vyvíjenou sondu je možnost přivádět k povrchu vzorku elektrické napětí, intenzivní laserové světlo a pracovní plyn. Dále sonda umožňuje charakterizaci vzorku pomocí fotoluminiscenční a Ramanovy spektroskopie a pomocí detekce katodoluminiscenčního záření.

Vyvíjená multifunkční sonda SPM nové generace je navržena tak, aby byla kompatibilní s zařízením SPM LiteScope a je určena pro korelativní měření kombinující SPM (Scanning Probe Microscopy) a SEM (Scanning Electron Microscopy) (Obrázek 1.2). Multifunkční sonda SPM není určena pouze pro korelativní měření a charakterizaci povrchu, ale také pro modifikaci fyzických vlastností povrchu vzorku nebo ke tvorbě nanostruktur. Toho je docíleno pomocí intenzivního laserového světla, popřípadě současným připouštěním pracovního plynu. A právě na ovlivňování vlastností povrchu vzorku pomocí intenzivního laserového světla je zaměřena má bakalářská práce.



Obrázek 1.1: LiteScope, převzato z [4].

1.1. Korelativní měření

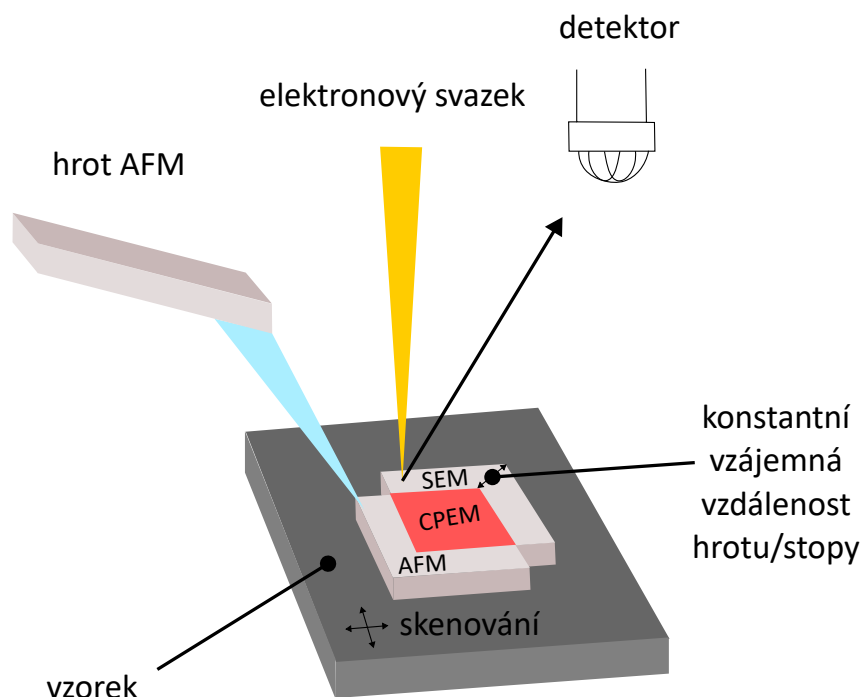
Korelativní mikroskopie kombinuje alespoň dvě rozdílné techniky zobrazování vzorku, příkladem může být CLEM (Correlative Light and Electron Microscopy) [12], SEM-Raman [26], AFM-Raman [1] a další. V případě získávání obrazů zkoumaného vzorku zvlášť, pomocí různých technik, je obtížné pokaždé lokalizovat oblast zájmu nebo může nastat problém s nekompatibilitou dat z jednotlivých přístrojů. Tento problém nevzniká, pokud se použijí při zobrazování vzorku dané techniky současně. Pro co nelepší výsledky je potřeba získat současně, za stejných podmínek, data z AFM a SEM. Toho lze dosáhnout

¹INCHAR - Vývoj in-situ technik pro charakterizaci materiálů a nanostruktur. Číslo projektu: FW 03010504. Projekt je spolufinancován za podpory Technologické agentury ČR v rámci Programu TREND.

1.2. SONDOVÝ MIKROSKOP LITESCOPE

například pomocí metody CPEM vyvinuté firmou NenoVision [3]. Korelativní sondová a elektronová mikroskopie — CPEM (Correlative Probe and Electron Microscopy) kombinuje mikroskopii atomárních sil – AFM (Atomic Force Microscopy) a rastrovací elektronovou mikroskopii – SEM (Scanning Electron Microscopy), čímž umožňuje současnou detekci signálů z obou technik (Obrázek 1.2).

Při metodě CPEM je během skenování elektronový svazek SEM fokusován blízko hrotu AFM a mají konstantní vzájemnou vzdálenost. Svazek SEM i svazek AFM zůstávají na místě, zatímco vzorek se pohybuje pomocí piezo skeneru LiteScopu (Obrázek 1.1). Takto lze získat současně data jak z AFM, tak ze SEM a to ze stejné oblasti vzorku za stejných podmínek a ve stejném souřadném systému [4].



Obrázek 1.2: Schéma korelativního měření AFM a SEM, motiv převzat z [4].

1.2. Sondový mikroskop LiteScope

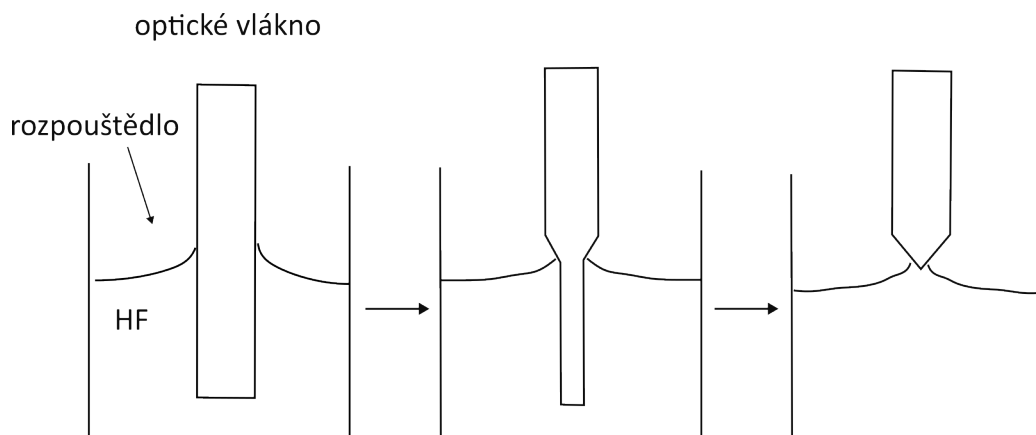
Zařízení LiteScope umožňuje techniku AFM v SEM, čímž rozšiřuje možnosti korelativní mikroskopie a in-situ analýzy. Pro výzkum je potřebná komplexní analýza vzorku, kterou provádíme pomocí různých zobrazovacích metod. Sondový mikroskop LiteScope díky multidimodálnímu zobrazování (CPEM) umožňuje korelaci dat získaných z AFM a SEM do 3D obrazů vzorku. Lze rovněž korelovat topografii vzorku a jeho mechanické, elektrické, chemické a magnetické vlastnosti. Další nespornou výhodou CPEM je možnost měření AFM a SEM zároveň. Obecně, pokud měření probíhají odděleně, je obtížné navést hrot AFM na stejné místo, které bylo dříve měřeno v SEM [24].

1.3. Multifunkční sonda SPM nové generace

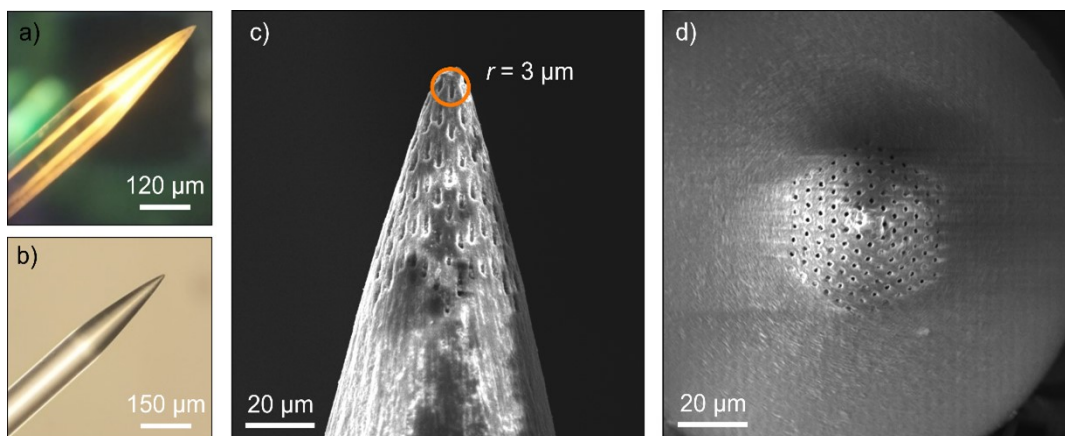
Základní částí multifunkční sondy je křemenná ladička, na niž je nalepeno optické vlákno na bázi fotonického krystalu [23], jehož jádrem vedou duté kapiláry. Tímto vláknem lze

nejen přivádět světlo ke a od vzorku, ale navíc lze ke vzorku přivést i pracovní plyn. Vláknem je zakončeno ostrým hrotem, aby bylo možné dosáhnout co nejlepšího zobrazovacího rozlišení. Existují tři technologické postupy, jak ostrého hrotu dosáhnout.

Prvním z nich je leptání vlákna v kyselině fluorovodíkové (Obrázek 1.3). Jde o běžně využívaný postup při výrobě SPM sond, nicméně ho nelze využít pro vlákna na bázi fotonického krystalu. U těchto vláken totiž dochází během leptání k vztlínání kyseliny do kapilár a tím dochází k leptání vlákna zevnitř. Alternativní metodou k leptání vlákna pomocí kyseliny je mechanické broušení konce optického vlákna do ostré špičky (viz Obrázek 1.4). Výhodou této metody je to, že ji lze bez problému použít i na vlákna s fotonickým krystalem.



Obrázek 1.3: Princip tvorby hrotu chemickým leptáním, „špička“ hrotu se získá pravidelným zmenšováním výšky menisku. Motiv převzat z [27].



Obrázek 1.4: Hrot vyrobený na ÚFI FSI mechanickým broušením optického vlákna: a) a b) fotografie zakončení optického vlákna ve tvaru hrotu, c) SEM snímek hrotu při pohledu z boku, d) SEM snímek hrotu při pohledu shora³.

Druhým postupem je výroba nástavců/elementů nasaditelných na konec vlákna. Jedna z možností, jak vyrobit zakončovací nástavec, je založena na oboustranném leptání křemíkového waferu pomocí hloubkového reaktivního iontového leptání (DRIE [30]). Tento způsob výroby nástavců je naneštěstí technologicky velmi náročný.

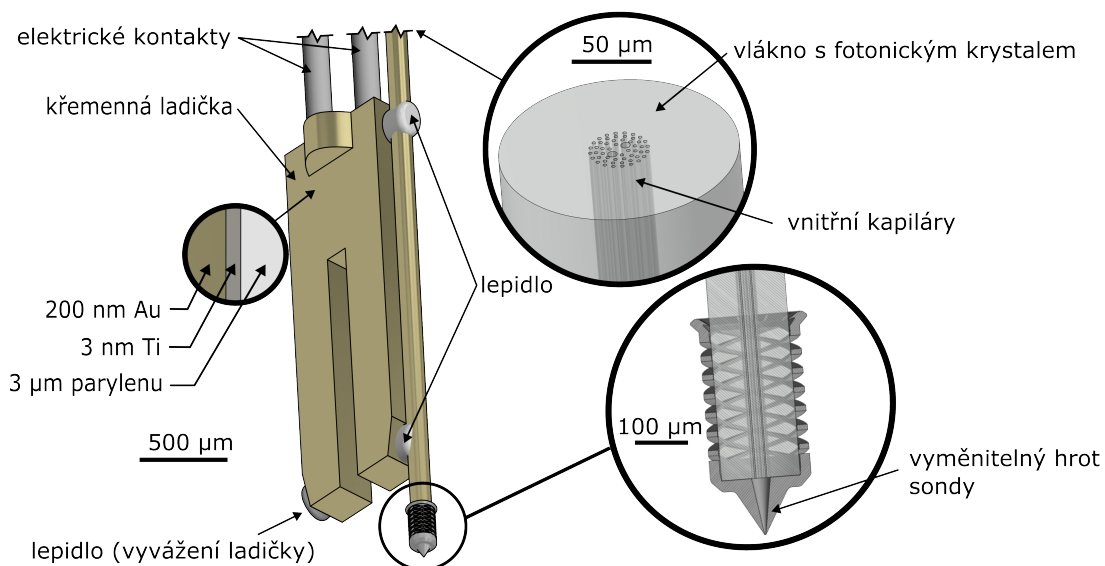
³Převzato z: Odborná zpráva za ÚFI FSI VUT o postupu prací a dosažených výsledcích za rok 2023. Projekt: INCHAR. Číslo projektu: FW 03010504.

1.4. CÍLE

Třetí možný postup výroby zakončení vlákna je výroba nástavců na vlákna pomocí dvoufotonového 3D tisku [30]. Oproti výrobě nástavců pomocí druhého zmíněného způsobu dvoufotonový 3D tisk umožňuje větší variabilitu zakončovacích nástavců a nevyžaduje složité výrobní kroky.

Křemenná ladička se v oblasti SPM mikroskopie využívá jako senzor působící síly. Jedná se o komerčně dostupnou elektronickou součástku, běžně se využívající jako frekvenční normál v obvodech reálného času. Ladička, pro AFM opatřena ostrým hrotem, je elektrickým signálem rozkmitávána na své rezonanční frekvenci, a díky silovému působení vzorku na hrot slouží změny v této rezonanční frekvenci pro zpětnou vazbu SPM. U multifunkční sondy SPM nové generace je vyměnitelný hrot nasazen na konec optického vlákna, které je nalepeno podél jednoho ramene ladičky. Sonda je nejprve izolována vrstvou parylenu a následně pokovena tenkou vrstvou zlata, za účelem zamezení nabíjení sondy a tím způsobené deformace obrazu. Navíc pokovení umožňuje přivedení elektrického napětí na hrot SPM a omezuje přívod a sběr světla pouze z oblasti hrotu.

Výhodou výroby multifunkční sondy zakončené nástavcem je možnost opětovného sejmutí nástavce a jeho výměna za nový, díky čemuž se nemusí vyrábět nová sonda v případě poškození nebo opotřebování hrotu.



Obrázek 1.5: Schéma multifunkční sondy SPM nové generace. Převzato z [30].

1.4. Cíle

Má bakalářská práce je zaměřena na vývoj metody přímého ovlivňování povrchu vzorků v komoře elektronového mikroskopu užitím intenzivního světla. Jedná se o kombinaci dvou technik, a to působení intenzivního laserového světla na vzorek a současného zobrazování tohoto povrchu v elektronovém mikroskopu. Intenzivní laserové světlo je přivedeno k povrchu vzorku v komoře mikroskopu pomocí optického vlákna a mikromanipulátoru [17]. Problematiku vlivu rozptýleného světla v komoře elektronového mikroskopu lze minima-

lizovat úpravou v detekční větvi a díky tomu lze vzorek pozorovat pomocí elektronového svazku.

Jedním z cílů práce je simulovat teplotní rozložení ve vzorku po interakci světla s tenkými vrstvami na daném substrátu, vybrat vhodné kombinace materiálu vrstvy a substrátu a následně porovnat s výsledky ovlivňování povrchu vzorků světlem v komoře SEM. Přivedením intenzivního světla k povrchu vzorku dochází k jeho ohřevu a vzniklé teplotní pole se simuluje v prostředí COMSOL Multiphysics [2]. Při osvětlení povrchu vzorku také dochází k jeho modifikaci a práci lze tedy považovat za přípravu na litografii, kterou se lze dále v budoucnu zabývat.

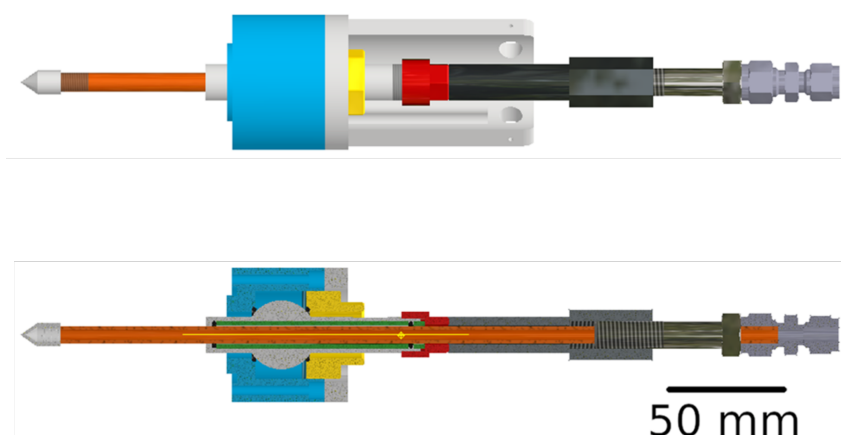
2. Zavedení světla do komory SEM a úprava detektoru

Pro modifikaci vzorku intenzivním laserovým světlem je potřeba nejprve zavést samotné světlo do komory mikroskopu. Pro zavedení bylo využito již stávajícího mikromanipulátoru s optickým vláknem (Obrázek 2.1) [17]. V případě přivedení světla do komory SEM nastává problém s vlivem rozptýleného světla, který lze minimalizovat jednoduchou úpravou v detekční větvi mikroskopu.

2.1. Mikromanipulátor s optickým vláknem

Pro přivedení intenzivního laserového světla do komory elektronového mikroskopu bylo použito mikromanipulátoru s optickým vláknem [17]. Pomocí zmíněného mikromanipulátoru lze do komory přivést konec optického vlákna s přesností $\pm 5 \mu\text{m}$ a dostatečně vysokou opakovatelností, a to „téměř“ na libovolné místo nad vzorkem. Mikromanipulátor i vlákno jsou od komory elektricky a vakuově odděleny.

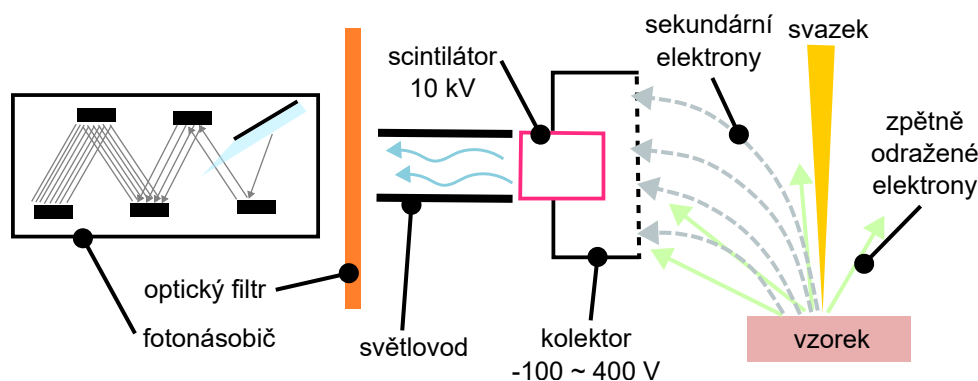
Hlavní částí mikromanipulátoru je pohyblivé kulové tělo, které je našroubováno do metrického závitu základny. Základna je připevněna pomocí příruby ke komoře mikroskopu. Těsnění mezi základnou a kulovitým tělem je zajištěno pomocí těsnících o-kroužků, které zároveň zajišťují polohu kulovitého těla, a díky jejich namazání vakuově kompatibilním mazivem lze kulovým tělem otáčet. Kulovitým tělem mikromanipulátoru prochází trubice s optickým vláknem, na níž jsou válcové části pro lepší držení a těsnění. Na horní válcové části se nachází závit pro matici trubice. Celá trubice je těsněna pomocí o-kroužků a přítlačných vložek přidávaných mezi o-kroužky. Na konci trubice v komoře mikroskopu je našroubován nástavec s dírou o průměru $300 \mu\text{m}$ pro nasměrování optického vlákna. Posun v osách X a Y je realizován pomocí mikrometrických hlavic, které jsou uchyceny vůči sobě v pravém úhlu v konstrukci přichycené na přírubě [17].



Obrázek 2.1: Model a řez modelem mikromanipulátoru. Zleva: nástavec s otvorem pro optické vlákno (šedá), trubice (oranžová), pohyblivé kulové tělo (šedá), příruba (modrá), přítlačné vložky (zelená), těsnící o-kroužky (černá), přítlačné matice (žlutá, červená), konstrukce pro uchycení mikrometrických hlavic (světle šedá), závit pro nastavení polohy v ose manipulátoru (tmavě šedá), vakuové těsnění vlákna (šedá). Vlákno je protaženo osou trubice (žlutá). Převzato z [17].

2.2. Detektor sekundárních elektronů a jeho úprava

K zobrazení povrchu vzorku v SEM se využívají sekundární (SE) nebo zpětně odražené elektrony (BSE). Tyto elektrony lze detekovat mnoha způsoby, v elektronových mikroskopech se nejčastěji používá Everhartův – Thornleyův detektor (Obrázek 2.2). Základními částmi tohoto detektoru jsou scintilátor a fotonásobič. Elektrony jsou pomocí elektrického pole mřížky kolektoru odvedeny z povrchu vzorku a následně dopadají na scintilátor. Mřížka, na potenciálu 300 V, je vyrobená z mědi a pro zvýšení její porozity je namočena do kyseliny. Elektrony dopadající na nevodivý scintilátor, který je pokryt tenkou vrstvou hliníku, zde způsobují luminiscenci a signál těchto fotonů je převeden na elektrický impuls ve fotonásobiči. Tento impuls je dále zesílen v elektrickém obvodu detektoru. Sekundární elektrony jsou před dopadem na scintilátor urychleny napětím přibližně 10 kV přivedeným na tenkou vrstvu hliníku. Zpětně odražené elektrony mají oproti sekundárním elektronům větší energii i rychlost, a tak musí být napětím přivedeným na scintilátor bržděny. Detekce sekundárních a zpětně odražených elektronů probíhá odděleně a lze si tedy vybrat, v jakém režimu chceme měřit [5, 29].



Obrázek 2.2: Schéma Everhartova-Thornleyova detektoru, motiv převzat z [29].

V případě potřeby pozorovat vzorek elektronovým mikroskopem, do kterého je přivedeno intenzivní laserové světlo, je potřeba provést jisté úpravy na detektoru. Je nutné toto intenzivní světlo, co nejvíce odfiltrovat, aby nedopadalo do detektoru sekundárních elektronů. Detektory převádí elektron, dopadený na scintilátor, na optický signál, a ten je veden do fotonásobiče, kde je dále zpracováván. V případě, že scintilátorem projde foton, bude fotonásobič tento foton detekovat stejně, jakoby na scintilátor dopadl elektron. Zavedeným světlem se tak mnohonásobně zvýší počet rozptýlených fotonů, které by způsobovaly přesycení detektoru sekundárních elektronů. Tento problém lze odstranit pomocí optického filtru, který byl umístěn mezi světlovod a fotonásobič. Pomocí tohoto optického filtru se omezilo laserové světlo na přijatelnou míru, a tak detektor mohl správně fungovat i v případě přítomnosti laserového světla. Jedinou nevýhodou použití optického filtru je snížení citlivosti detektoru, která je však k získání obrazu povrchu vzorku stále dostačující.

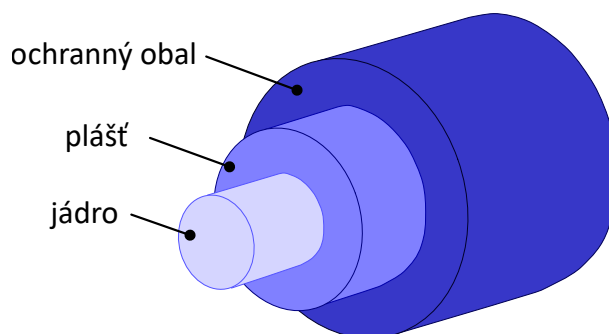
3. Optická vlákna

Optická vlákna se objevila koncem šedesátých let minulého století a objev nízko-ztrátových optických vláken začátkem sedmdesátých let byl důležitou událostí především pro oblast komunikace [16]. V současné době zařízení založená na optických vláknech hrají důležitou roli v běžném životě lidí, nalezneme je v mnoha oblastech, a to od přenosu dat až po operace v medicíně [6].

3.1. Vlastnosti optických vláken

Optická vlákna jsou typem vlnovodů, které jsou ve většině případů vyrobeny ze skla. Jejich hlavní výhodou oproti ostatním vlnovodům je jejich pružnost. Té je dosaženo především díky ochrannému obalu z polymeru. Na základě počtu vedených módů lze vlákna dělit na jednovidová a vícevidová (v anglické literatuře single-mode a multi-mode), dále budou vlákna označována jako jednomódová a vícemódová. Mód lze definovat jako distribuované elektrické pole, které se zachovává během šíření světla [19].

Vlákna se skládají ze tří částí: jádra, pláště a ochranného obalu (Obrázek 3.1). Rozměry jednotlivých částí se liší na základě toho, zda se jedná o jednomódové vlákno, nebo vícemódové vlákno. Jednomódové vlákno má typicky rozměry jádra $7\ \mu\text{m}$ až $10\ \mu\text{m}$, oproti tomu vícemódové vlákno mívá rozměr jádra $50\ \mu\text{m}$ až $100\ \mu\text{m}$. Plášť mívá u obou typů vláken průměr typicky $125\ \mu\text{m}$ [15, 22].



Obrázek 3.1: Schéma vlákna.

Nejpoužívanějším materiálem pro výrobu optických vláken je tavený oxid křemičitý, a to buď ve své čisté formě, nebo s příměsemi. Oxid křemičitý se používá pro své skvělé vlastnosti, jako jsou nízké ztráty při vedení nebo vysoká odolnost vůči mechanickému tahu a ohybu.

U vláken používaných pro vedení laseru má jádro vlákna většinou vyšší index lomu než plášť vlákna. Nejjednodušší případ vláken je takový, kde indexy lomu jsou konstantní. Rozdíl mezi indexy lomu jádra a pláště vlákna udávají numerickou aperturu (NA), ta je zpravidla velmi malá (rozdíl v indexech je velmi malý), a tedy optická vlákna řadíme mezi slabě vedoucí vlákna [18]. V slabě vedoucích vláknech se šíří jen málo módů a jsou tedy vhodná pro přenos informací ¹.

¹prof. RNDr. Jirí Petráček, Dr. – přednáška z předmětu Optoelektronika a integrovaná optika, prezentace: 1 Optical waveguide theory

3.2. POROVNÁNÍ JEDNOMÓDOVÉHO A VÍCEMÓDOVÉHO VLÁKNA

Vlastnosti vláken lze popsat pomocí dvou základních parametrů. Prvním z nich je numerická apertura, která nám udává rozdíl mezi indexem lomu jádra vlákna a pláště a lze ji definovat následovně:

$$NA = \sqrt{n_{\text{jádro}}^2 - n_{\text{plášť}}^2} = n \sin \theta_{\text{max}}, \quad (3.1)$$

kde n je index lomu okolního prostředí vně vlákna a θ_{max} udává maximální úhel, pod kterým lze navést světlo do vlákna. NA pro jednomódová vlákna je typicky řádově 0,1, pro vícemódová vlákna 0,3. Citlivost vlákna na ztráty způsobené ohybem vlákna klesá s rostoucí NA což je způsobeno silným omezením módového pole v jádru [18].

Druhým parametrem je „V číslo“, které můžeme chápat jako normalizovanou frekvenci

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a NA = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_{\text{jádro}}^2 - n_{\text{plášť}}^2}, \quad (3.2)$$

kde a je poloměr jádra. „V číslo“ u jednomódových vláken bývá menší než 2,405, vícemódová vlákna mohou mít mnohem vyšší hodnotu „V čísla“ [18].

3.2. Porovnání jednomódového a vícemódového vlákna

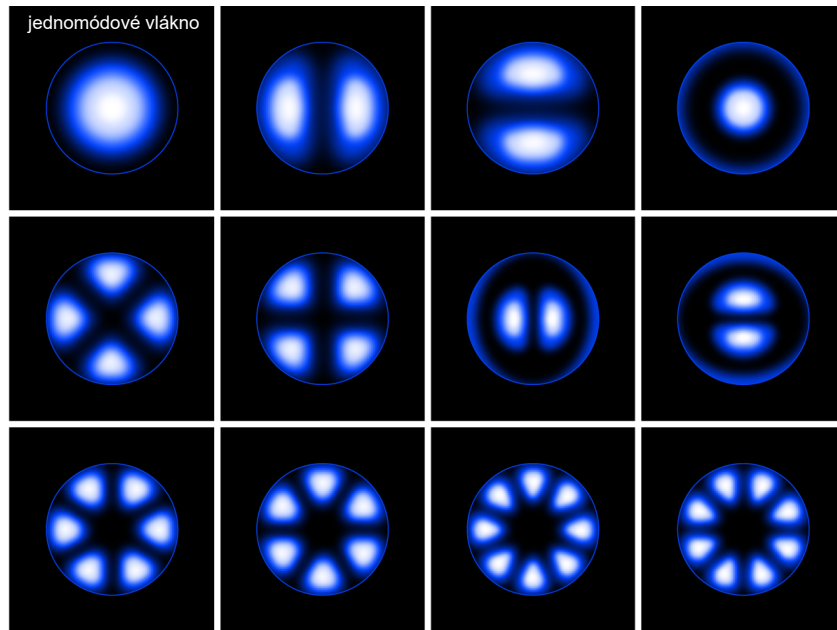
Světlo se v optických vláknech šíří na principu totálního odrazu. Optické vlákno může vést jeden nebo více módů, jejichž intenzita je zpravidla soustředěna uvnitř a v nejbližším okolí jádra [18]. Na základě toho, kolik módů světla vlákno vede, je lze dělit na jednomódová a vícemódová.

Jednomódová vlákna mívají malé jádro, vedou pouze jeden mód světla (které má dvě polarizace) a profil vystupujícího světla bývá většinou gaussovský svazek (Obrázek 3.2). Změněním podmínek zavedení světla do vlákna ovlivní pouze výkon, nikoliv prostorové rozložení světla na rozdíl od vícemódového vlákna.

Vícemódová vlákna mají (na rozdíl od jednomódových vláken) mnohem větší jádro, nebo rozdíl mezi indexem lomu jádra a pláště, díky čemuž mohou vést více módů světla. Profil vystupujícího světla a rozdělení výkonu mezi jednotlivé prostorové módy je závislý na podmínkách zavedení světla do vlákna. Obecně lze o světle vystupujícím z vícemódového vlákna říct, že bude složeno z několika módů a bude mít často komplikovaný tvar (viz Obrázek 3.2).

K přenosu informací na dlouhou vzdálenost se využívají jednomódová vlákna, neboť jednotlivé módy mají rozdílnou grupovou rychlost a došlo by k narušení přenášeného signálu. Na kratší vzdálenosti se používají vícemódová vlákna.

Vícemódová vlákna se taktéž používají k přenosu světla od laserového zdroje, zejména tehdy, pokud má generovaný svazek špatnou kvalitu [18]. V mnou provedených experimentech bylo použito k přivedení světla na povrch vzorku jednomódového vlákna, a to kvůli kvalitě světelné stopy na výstupu. Bylo potřeba soustředit světlo do malé plošky a k tomu je mnohem vhodnější použít jednomódové vlákno.



Obrázek 3.2: Obrázce příčného rozložení intenzity optického záření ve výstupním paprsku pro různé módy s vyznačením profilu jednomódového vlákna. Převzato a upraveno z [25].

3.3. Jednomódová vlákna

Světlo se šíří vláknem především v oblasti jádra, část, která pronikne za oblast jádra, tedy do pláště vlákna, se utlumí. Díky malým ztrátám je intenzita světla zachována podél celé délky [18]. Jak se světlo šíří vláknem, jeho svazek si zachovává v průřezu téměř gaussovský tvar. Šířku intenzity v profilu popisuje Mode Field Diameter (MFD) [10].

Při výpočtu maximálního úhlu, pod kterým lze světlo přivést do vlákna nebo pod kterým je světlo vyzařováno z vlákna, se zpravidla používá numerická apertura (NA). U jednomódových vláken nicméně může při výpočtu s použitím numerické apertury dojít ke značné chybě. Pro výpočet úhlu je tedy mnohem lepší použít model šíření gaussovského svazku. Díky tomu lze vypočítat úhel rozptylu pro jakoukoliv velikost stopy světla [10].

Přibližně 86 % energie svazku se nachází v MFD, proto lze použít definici velikosti stopy při kolimaci světla z vlákna a fokusování světla do vlákna. Pro tento případ pro první aproximaci měřenou ve vzdáleném poli je úhel rozptylu nebo úhel, pod kterým lze přivést světlo do vlákna roven:

$$\theta_{SM} = \frac{\lambda}{\pi(\text{MFD}/2)} . \quad (3.3)$$

Ačkoliv kužel světla, který vychází z konce vlákna, je rozbíhavý, světlo se nechová jako mnoho paprsků vycházejících pod různými úhly z vlákna. Místo toho světlo připomíná jednoduchý gaussovský svazek, který lze modelovat. Pro přesné modelování rozbíhavosti svazku, který je vyzařován z vlákna, lze použít následujícího vztahu 3.4 pro poloměr svazku ve vzdálenosti z :

$$w(z) = \frac{\text{MFD}}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} , \quad (3.4)$$

3.3. JEDNOMÓDOVÁ VLÁKNA

kde z_R je Rayleigho rozsah, pro který platí:

$$z_R = \frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{\text{MFD}}{2} \right)^2. \quad (3.5)$$

Míra rozbíhavosti svazku předpokládající velikost svazku definovanou $1/e^2$ poloměrem je nelineární pro vzdálenosti menší než z_R a přibližně lineární pro vzdálenosti mnohem větší než z_R [10].

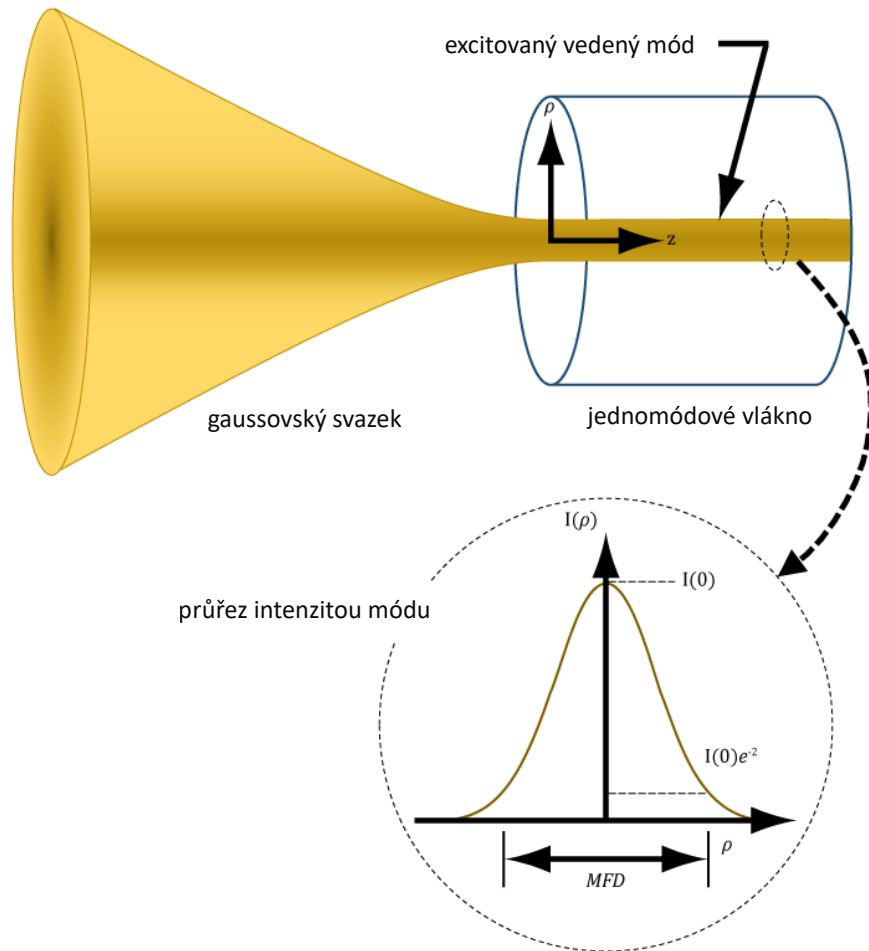
3.3.1. Zavedení světla do vlákna

Nespornou výhodou vedení světla v optických vláknech je fakt, že takto vedené světlo se nešíří radiálně a během šíření je minimálně tlumené [10]. Efektivní zavedení světla do vlákna je velmi náročné, je potřeba zdroj laserového svazku o vysoké kvalitě a precizní nastavení fokusační optiky [18]. Světlo, které není navedené do módu, se šíří pryč z vlákna a lze o něm říci, že uniká z vlákna [10].

Jediný mód, který mají jednomódová vlákna, lze popsat pomocí Besselových funkcí. Protože, ale profily amplitud Besselových a Gaussových funkcí se sobě navzájem velmi podobají, lze pro popis a modelování módu vlákna použít gaussovskou funkci, čímž vše značně zjednodušíme [11].

Na efektivitu zavedení světla do vlákna má vliv mnoho faktorů (Obrázek 3.3): od úhlu dopadu svazku na vlákno až po intenzitu profilu svazku. „Pas“ svazku lze definovat jako nejužší místo svazku ve směru jeho šíření, tedy místo kde má poloměr svazku své minimum [21]. Pro co nejefektivnější zavedení světla do vlákna je potřeba dodržet následující kritéria [10]:

- gaussovský profil svazku,
- kolmý dopad světla na plochu vlákna,
- „pas“ dopadajícího svazku se nachází v rovině konce vlákna,
- „pas“ dopadajícího svazku je vycentrován na jádro vlákna,
- poloměr „pasu“ dopadajícího svazku je roven MFD vlákna,
- čelo vlákna musí být velmi rovně zaštipnuté.



Obrázek 3.3: Schéma zavedení světla do vlákna, převzato a upraveno z [10].

3.3.2. Ztráty při šíření světla

Ztráty výkonu při šíření světla optickými vlákny jsou velmi malé, především u jednomódových vláken. Útlum je dán především Rayleighovým rozptylem pro krátké vlnové délky a multifononovou absorpcí na dlouhých vlnových délkách. Dále ke ztrátám přispívají neelastické rozptyly a to spontánní Brillouinův rozptyl a Ramanův rozptyl, nebo kolísání průměru vlákna.

Rayleighovo rozptyl je způsoben kolísáním indexu lomu, což do jisté míry je u skla nevyhnutelné, ale může být podpořeno kolísáním koncentrací u vláken s vysokou NA nebo jinými nedokonalostmi. Tento rozptyl lze snížit upraveným složením skla, nebo pomalým tažením vláken při výrobě [18].

Multifononová absorpce je proces, při kterém během absorpce jediného fotonu vznikne několik dalších fononů. Pro ještě delší vlnové délky může docházet ke vzniku pouze jednoho fononu za absorpce jednoho fotonu [20].

4. Simulace v prostředí COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics je software, díky němuž lze simulovat návrhy zařízení a procesů v mnoha oblastech inženýrství, výroby nebo ve vědeckém výzkumu. Pro numerické řešení různých fyzikálních a technických problémů využívá metody konečných prvků. Výhodou tohoto programu je možnost spojení různých oblastí fyziky přidáním produktů z produktové sady COMSOL [2].

4.1. Metoda konečných prvků

Většinu fyzikálních problémů popisujeme pomocí parciálních diferenciálních rovnic, které ale nelze vyřešit analyticky. Pro jejich vyřešení zavádíme nejrůznější aproximace, zpravidla založené na diskretizaci, které nahrazují dané rovnice numerickými modely. Tyto numerické modely, které jsou aproximacemi reálných řešení parciálních diferenciálních rovnic, můžeme vyřešit pomocí metody konečných prvků.

Při užití metody konečných prvků se oblast řešení rozdělí na menší podoblasti - elementy, tento proces nazýváme diskretizace. Elementy mohou mít nejrůznější tvary: od nezákladnějších trojúhelníků až po šestiúhelníky ve 2D a jejich analogii pro 3D. Chování jednotlivých elementů je popsáno pomocí matematických funkcí a jejich následnou kombinací lze aproximovat chování celého systému.

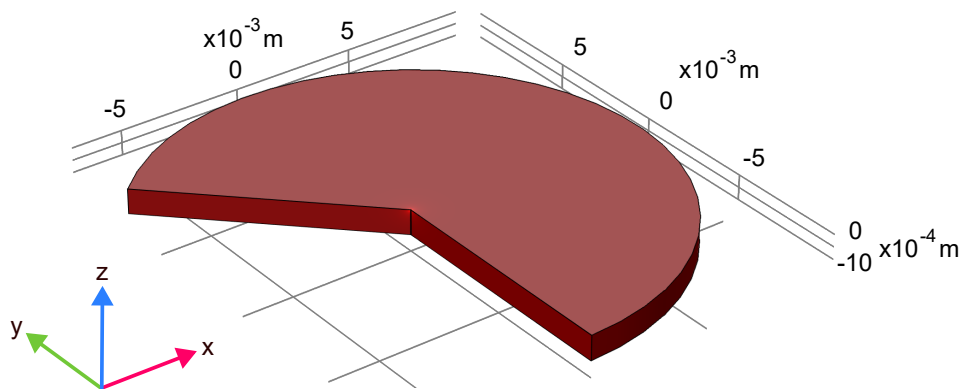
Poté co je systém diskretizován se určí počet stupňů volnosti pro jednotlivé elementy, které nám popisují stav systému. Následně se definuje vztah mezi počtem stupňů volnosti a fyzikálními veličinami a je určena matice tuhosti elementů a rovnice popisující daný problém. Matice tuhosti elementů popisuje vztah mezi stupni volnosti a silami/posuny působícími mezi jednotlivými elementy. Rovnice jsou poté sestavy tak, aby popisovaly chování celého systému. Nakonec je tento systém rovnic vyřešen a jsou určeny stupně volnosti a to pomocí numerických metod. Řešení rovnic popisujících celý systém je aproximací řešení pro jednotlivé parciální diferenciální rovnice, díky čemuž lze předvídat řešení celého systému pro nejrůznější podmínky [8, 28].

4.2. Model a okrajové podmínky

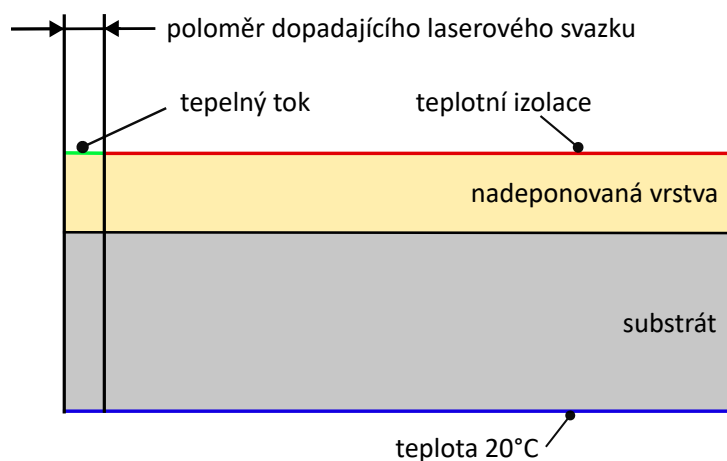
Pro simulaci ohřevu vzorku pomocí světla z laseru (vlnová délka 532 nm) v programovém prostředí COMSOL je potřeba nejprve vytvořit model vzorku, tedy definovat jeho geometrii. Vzorek pro zjednodušení byl modelován jako disk s poloměrem 10 mm a výškou 1 mm. Na tento válec, který představuje substrát, byla přidána tenká vrstva o tloušťce 100 nm, jejíž materiál, stejně jako materiál substrátu, lze měnit (Obrázek 4.1).

Do středu modelu vzorku dopadá kolmo laserový svazek, jehož průměr i výkon lze měnit. V simulaci má dopadající svazek kruhovou stopu, v reálném experimentu toto však neplatí. Světlo je přivedeno pomocí optického vlákna nad vzorek pod úhlem přibližně 45°, navíc konec vlákna – tedy místo odkud svazek vychází se nachází v určité výšce nad vzorkem. Díky tomu stopa dopadajícího laserového svazku není ideálně kruhová, ale elipsoidní, a je tedy potřeba přepočítat pomocí obsahu ovlivněné elipsoidní plochy průměr dopadajícího laserového svazku (viz podkapitola 4.2.1).

4.2. MODEL A OKRAJOVÉ PODMÍNKY



Obrázek 4.1: Řez modelem vzorku v programu COMSOL Multiphysics.



Obrázek 4.2: Schéma aplikovaných okrajových podmínek zobrazující polovinu průřezu vzorkem (není v měřítku).

Pro modelování byl zvolen modul přenosu tepla v pevných látkách a stacionární studie, kterou získáme teplotní pole při tepelné rovnováze. Následně byly aplikovány okrajové podmínky (Obrázek 4.2):

- u spodní strany vzorku byla zadefinována teplota 20 °C,
- na bok a vrchní část vně dopadajícího světla z laseru byla aplikována teplotní izolace,
- na oblast, kam dopadá světlo z laseru byl aplikován tepelný tok.

4.2.1. Určení ovlivněné plochy vzorku

Samotné určení výkonu laserového svazku na výstupu z vlákna je velmi přibližné (viz podkapitola 5.1), proto při výpočtu ovlivněné plochy vzorku pomocí laserového světla lze použít jednoduchou geometrii.

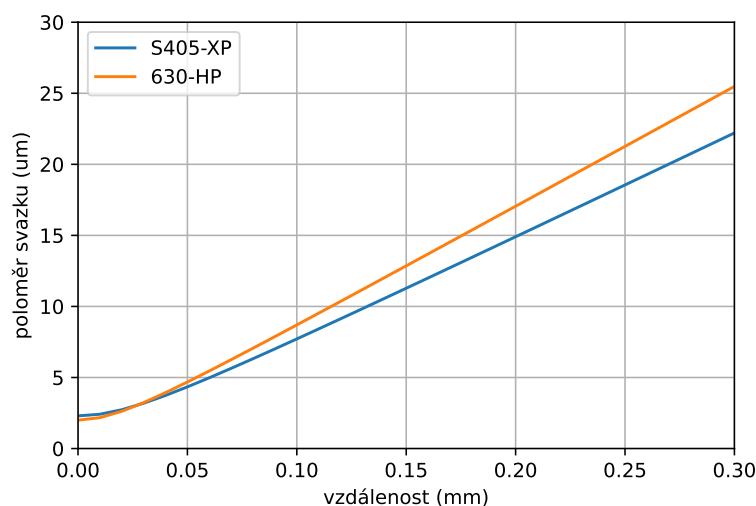
Při výpočtu ovlivněné plochy vzorku hraje důležitou roli výška nad povrchem vzorku, ve které se vlákno nachází. Při jednotlivých experimentech se přijíždí pomocí stolku mikroskopu se vzorkem k vláknu tak, aby došlo k „tukuť“ do vlákna a následně se od vlákna popojede (uspořádání experimentu lze vidět na Obrázku 5.3). Zajistit konzistentní výšku vlákna nad vzorkem pro všechny experimenty bylo velmi problematické, například díky

„tuknutí“ může dojít k lehkému zasunutí vlákna do mikromanipulátoru. Proto ve výpočtu ovlivněné plochy byl použitodus pro 36 měření vzdálenosti mezi vláknem a vzorkem.

Roli ve výpočtu taktéž hraje použité vlákno, přesněji průměr jeho jádra a MFD. Při provedených experimentech byla užitá vlákna dvě a to od firmy THORLABS:

- S405-XP s průměrem jádra $3 \mu\text{m}$ a $\text{MFD} = (4,5 \pm 0,5) \mu\text{m}$,
- 630-HP s průměrem jádra $3,5 \mu\text{m}$ a $\text{MFD} = (4,0 \pm 0,5) \mu\text{m}$.

Poloměr svazku závisí na vzdálenosti od konce vlákna a lze ho určit pomocí vztahu (3.4). Jak ze zmíněného vztahu vyplývá, bude se poloměr svazku v určité, ale stejné vzdálenosti pro obě vlákna lišit (viz Obrázek 4.3). Vzhledem k tomu, že vzdálenost mezi koncem vlákna a vzorkem nepřesáhla při experimentech $52 \mu\text{m}$, není tento rozdíl nijak markantní (řádově v setinách μm , viz Tabulka 4.1) a lze nakonec v simulacích počítat pouze s obsahem ovlivněné plochy od jednoho vlákna – bylo vybráno vlákno S405-XP.



Obrázek 4.3: Vykreslená závislost poloměru svazku na vzdálenosti od konce vlákna pro obě použitá vlákna v experimentu.

Při výpočtu ovlivněné plochy vzorku bylo využito jednoduché geometrie, kterou lze vidět na Obrázku 4.4. Výpočty byly provedeny pro vlákno S405-XP, které má šířku $125 \mu\text{m}$ a průměr jádra $3 \mu\text{m}$. Vzdálenost z byla určena jakoodus 36 měření ($z = 35 \mu\text{m}$), s pomocí goniometrických funkcí byla vypočtena velikost h_1, h_2 a z těchto velikostí x_1, x_2 . Ve vzdálenostech x_1, x_2 od konce vlákna byl pomocí vztahů 3.4, 3.5 určen poloměr stopy laserového světla (w_1, w_2) a ze sinu úhlu 45° velikost y . Nakonec byly vypočtené hodnoty dosazeny do vztahu pro výpočet obsahu elipsy (4.1) a byl určen obsah ovlivněné plochy.

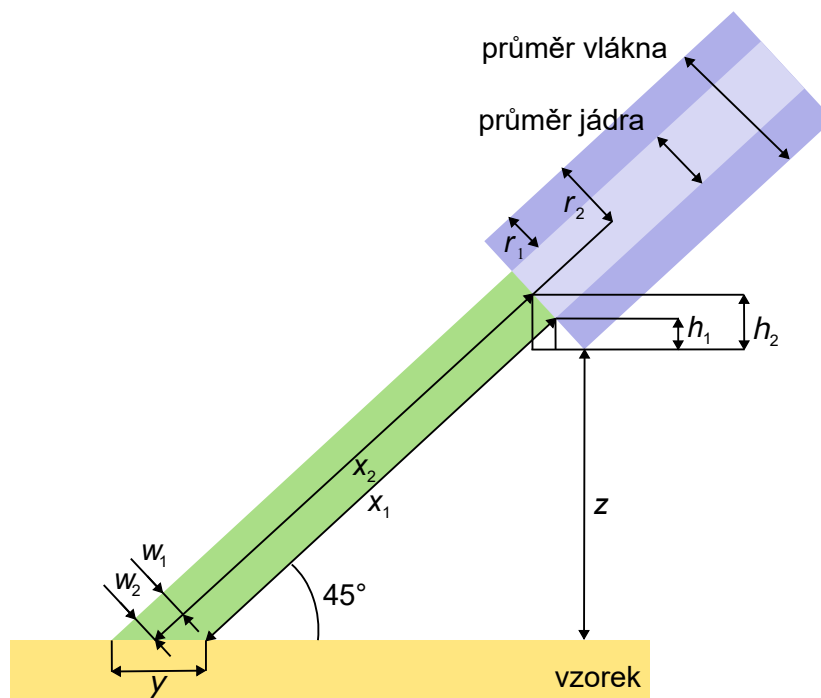
$$S_{\text{elipsy}} = \pi \cdot a \cdot b = \pi \cdot \frac{y}{2} \cdot \frac{\text{MFD}}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{x_2}{z_R}\right)^2} \quad (4.1)$$

4.2. MODEL A OKRAJOVÉ PODMÍNKY

S405-XP				
	z (μm)	S elipsy (μm^2)	r kruhu (μm)	d kruhu (μm)
min	5	423,17	11,61	23,22
max	52	942,01	17,32	34,64
modus	35	729,78	15,24	30,48

630-HP				
	z (μm)	S elipsy (μm^2)	r kruhu (μm)	d kruhu (μm)
min	5	422,39	11,60	23,20
max	52	940,83	17,31	34,62
modus	35	728,74	15,23	30,46

Tabulka 4.1: Tabulky s vypočtenými obsahy ovlivněných elipsoidních ploch pro použítá vlákna a následným přepočtem na odpovídající průměr dopadajícího laserového svazku použitého v simulacích. Vzdálenost z je mezi koncem vlákna a povrchem vzorku a jsou zde uvedeny 3 hodnoty: minimální a maximální naměřená hodnota a modus pro 36 naměřených hodnot.



Obrázek 4.4: Schéma geometrie pro výpočet ovlivněné plochy, průměr použitého vlákna S405-XP je $125\ \mu\text{m}$, průměr jádra $3\ \mu\text{m}$ a vzdálenost z $35\ \mu\text{m}$.

4.2.2. Výpočet teplotního pole

Pro ovlivnění zvolené nadeponované vrstvy je potřeba ji zahřát na teplotu tání pro daný materiál, které se dosáhne při určitém výkonu. Tento výkon byl určen z teplotního pole, které bylo vypočteno pro jednotlivé materiály na zvolených substrátech.

Jako substráty byly zvoleny dva materiály, a to sklo N-BK7 a křemík Si<100>. Na substrátech se nachází tenká vrstva, pro kterou bylo vybráno celkem 12 prvků: Al, Ag,

Au, Cr, Cu, Pt, Ni, Sn, Ti, V, Mo, W. Pro všechny prvky bylo simulováno teplotní pole a to nejprve pro substrát N-BK7 a následně pro Si substrát.

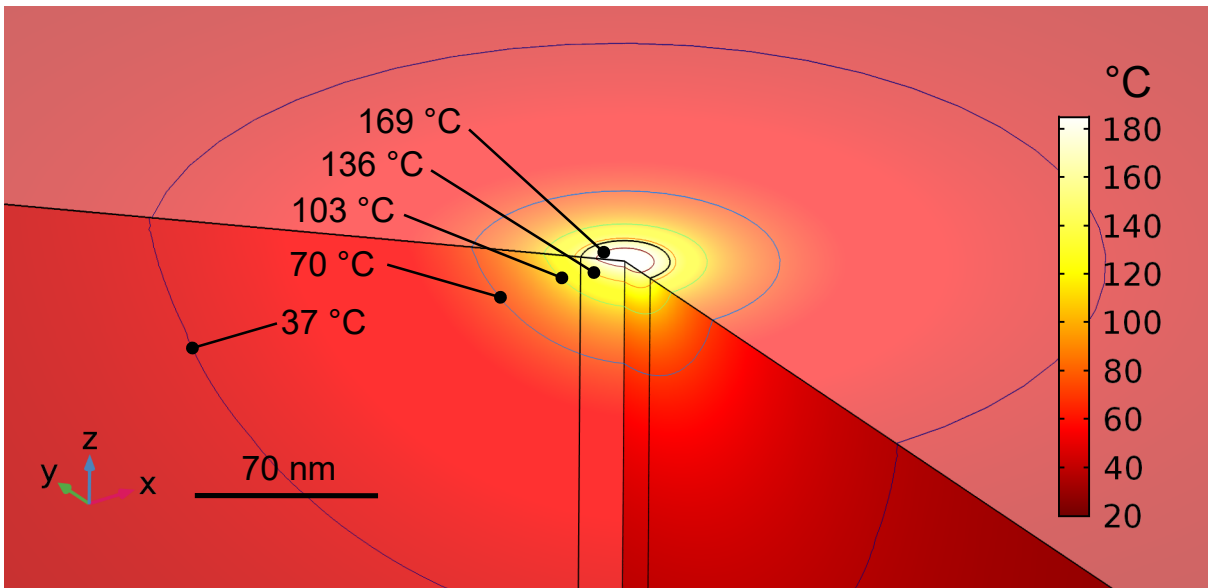
V simulaci bylo propočítáváno teplotní pole pro definovaný interval výkonů. Ve chvíli, kdy bylo dosaženo na povrchu vzorku teploty tání, byl určen odpovídající výkon. V simulacích nejsou zahrnuty odraz a propustnost intenzity laserového světla pro jednotlivé materiály nadeponované vrstvy, tedy veškerý výkon laserového světla, který dopadne na vzorek, do něho také projde. Proto byl určený výkon dále přepočítáván pomocí Fresnelových rovnic [7] tak, aby odpovídal skutečnému výkonu potřebnému na zahřátí vrstvy. Výkony, kdy došlo k zahřátí povrchu vzorku na teplotu tání pro jednotlivé kombinace vrstva/substrát, lze vidět v Tabulce 4.2.

Prvek	Teplota tavení (°C)	Potřebný výkon (W)	
		N-BK7	Si(100)
Al	660	0,890	46,129
Ag	961	8,268	340,745
Au	1063	0,433	21,316
Cr	1860	0,293	24,350
Cu	1084	0,397	16,129
Pt	1770	1,873	140,111
Ni	1453	0,728	56,729
Sn	232	0,088	7,278
Ti	1670	0,270	25,659
V	1900	0,275	23,933
Mo	2620	4,994	366,718
W	3400	1,412	102,863

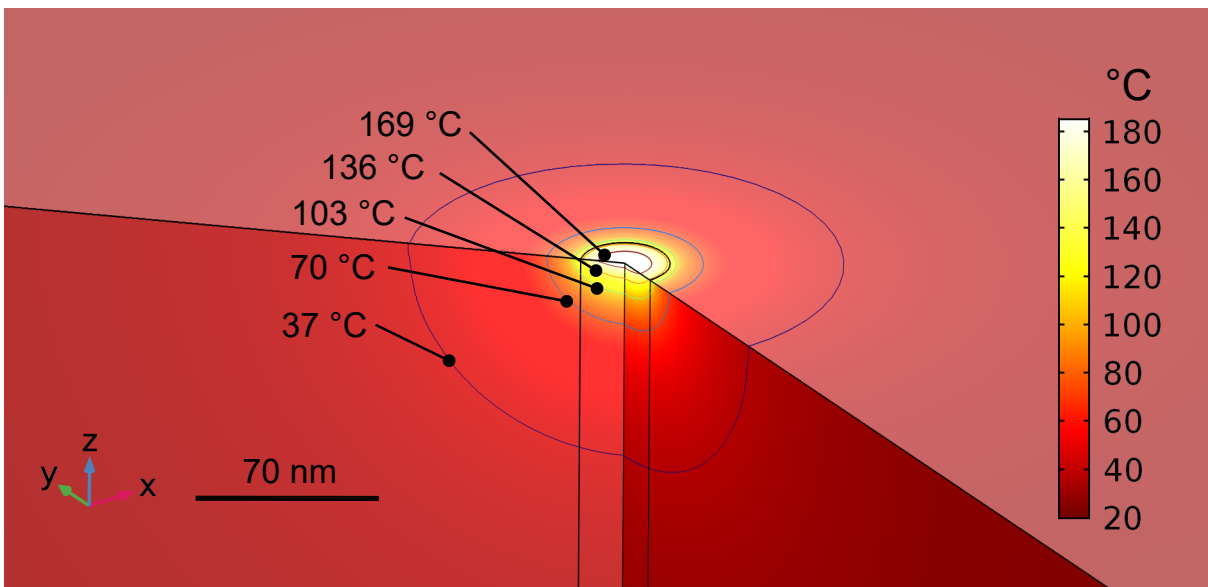
Tabulka 4.2: Tabulka zobrazující potřebný výkon pro laser 532 nm na zahřátí povrchu vzorku na teplotu tání (hodnoty teplot tání převzaty z [14]) pro různé kombinace vrstva/substrát.

Laserový svazek kolmo dopadající do středu vzorku způsobí jeho ohřátí, které se značně liší pro použité substráty (viz Obrázek 4.5, 4.6). To je dáno především rozdílnou tepelnou vodivostí substrátů, která je pro použité sklo N-BK7 přibližně $1,11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. V případě křemíku se teplotní vodivost mění s teplotou, což značně znesnadňuje výpočet, a tak pro zjednodušení byla použita teplotní vodivost $124 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ [13]. Kvůli rozdílné tepelné vodivosti substrátů taktéž výkon potřebný pro zahřátí vzorku na teplotu tání nadeponované vrstvy se značně liší, jak lze vidět v Tabulce 4.2.

4.2. MODEL A OKRAJOVÉ PODMÍNKY



Obrázek 4.5: Simulované teplotní pole výřezem vzorku 100 nm Al na N-BK7, dopadající výkon laserového světla je 73 mW. Pro přehlednost je vyobrazena pouze část vzorku.



Obrázek 4.6: Simulované teplotní pole výřezem vzorku 100 nm Al na Si<100>, dopadající výkon laserového světla je 3,38 W. Pro přehlednost je vyobrazena pouze část vzorku.

5. Ovlivňování povrchu vzorků v komoře mikroskopu

Hlavním cílem této práce je porovnat výsledky simulací zahřátí vzorku pomocí intenzivního laserového světla s výsledky ovlivňování povrchu vzorků světlem přímo v komoře SEM. Simulace byly provedeny pro celkem 12 různých prvků tvořících nadeponovanou vrstvu na 2 různých substrátech. Na základě výsledků simulací, a taktéž na základě dostupnosti materiálů, byly vybrány 4 prvky, které byly následně pomocí metody IBAD [9] (depoziční komora Kaufman) nadeponovány na zvolené substráty. Na substrát N-BK7 byly nadeponovány prvky Au, Cr, Cu a V, na substrát Si<100> pouze Au a V. To, že na křemíkový substrát byly nadeponovány pouze 2 z vybraných prvků, bylo rozhodnuto na základě výsledků simulací, ze kterých vychází, že na křemíkovém substrátu nejsme schopni žádnou z těchto vrstev dostatečně zahřát, a tedy docílit její modifikace (viz Tabulka 4.2).

5.1. Určení výkonu laserového světla dopadajícího na vzorek

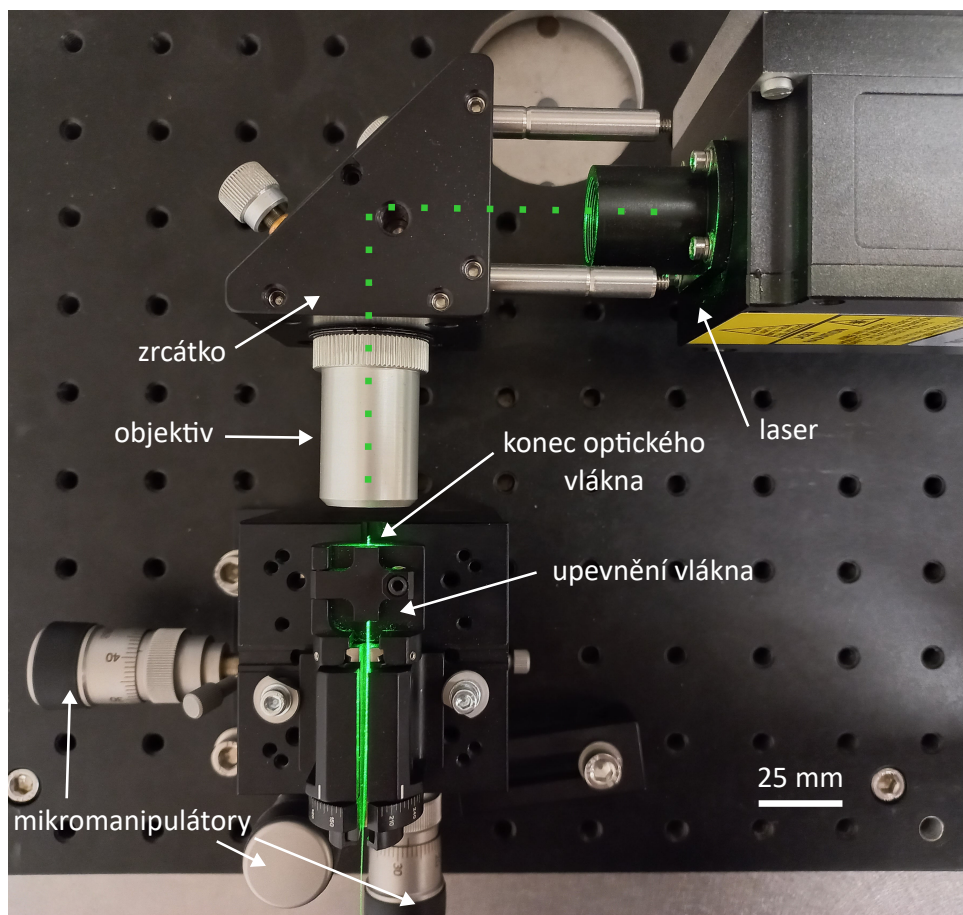
Během vedení laserového světla na povrch vzorku dochází ke ztrátám v celé optické sestavě, proto není možné dosáhnout toho, aby 100 % výkonu světla z laseru dopadlo na povrch vzorku.

Pro určení výkonu světla dopadajícího na vzorek během odpařování vrstev je potřeba nejprve určit, kolik procent výkonu světla se „ztratí“ v optické soustavě během vedení světla k povrchu vzorku. Toho je docíleno tak, že se laserové světlo o malém výkonu (do 6 mW) fokusuje do jádra vlákna. Laserový svazek je naveden do jádra vlákna pomocí optické sestavy skládající se ze zrcátka a mikromanipulátorů (Obrázek 5.1). Je potřeba velmi precizní manipulace, neboť pro co nejvyšší výkon je nutné laserové světlo fokusovat do velmi malého jádra vlákna. Poté je změřen pomocí výkonometru (Thorlabs PM100D) výkon světla vycházejícího přímo z laseru a světla vycházejícího z konce vlákna. Porovnáním těchto výkonů lze určit, kolik procent výkonu světla se „ztratí“ v celé optické sestavě. Toto popsané měření se provádí na vzduchu mimo komoru mikroskopu před samotným experimentem.

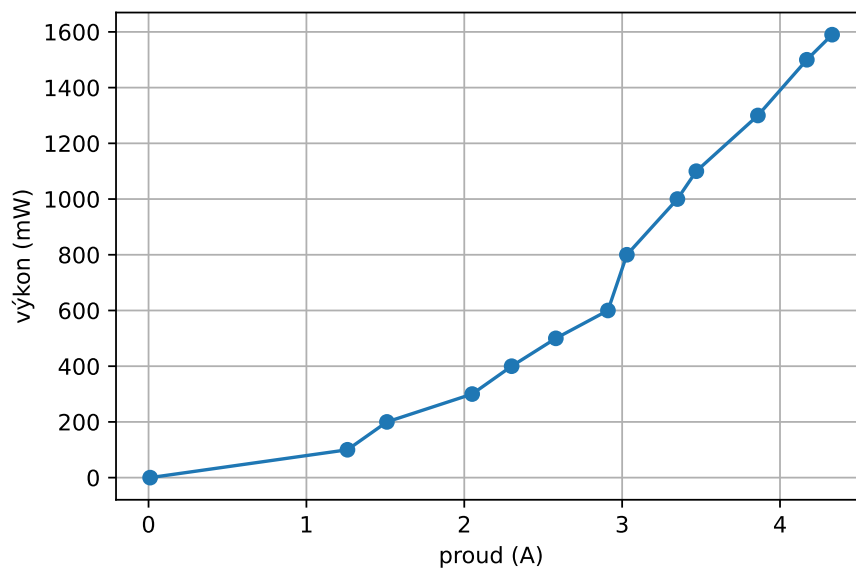
Při zahřívání povrchu vzorku v komoře mikroskopu nelze přímo změřit výkon světla vycházejícího z konce vlákna. Pro určení výkonu je tedy použita změřená watt-ampérová charakteristika používaného zdroje (Obrázek 5.2). Při jednotlivých experimentech je tedy konkrétní výkon dopadající na vzorek určen z konkrétního proudu na zdroji, který je následně přepočten pomocí watt-ampérové charakteristiky. Nakonec od přepočteného výkonu je odečten „ztrátový výkon“ (tedy kolik procent výkonu světla se „ztratilo“ v optické sestavě), který byl změřen před samotným experimentem.

Jak lze vidět, samotné určení výkonu dopadajícího na vzorek je přibližné.

5.1. URČENÍ VÝKONU LASEROVÉHO SVĚTLA DOPADAJÍCÍHO NA VZOREK



Obrázek 5.1: Sestava pro navedení laserového světla do jádra vlákna.



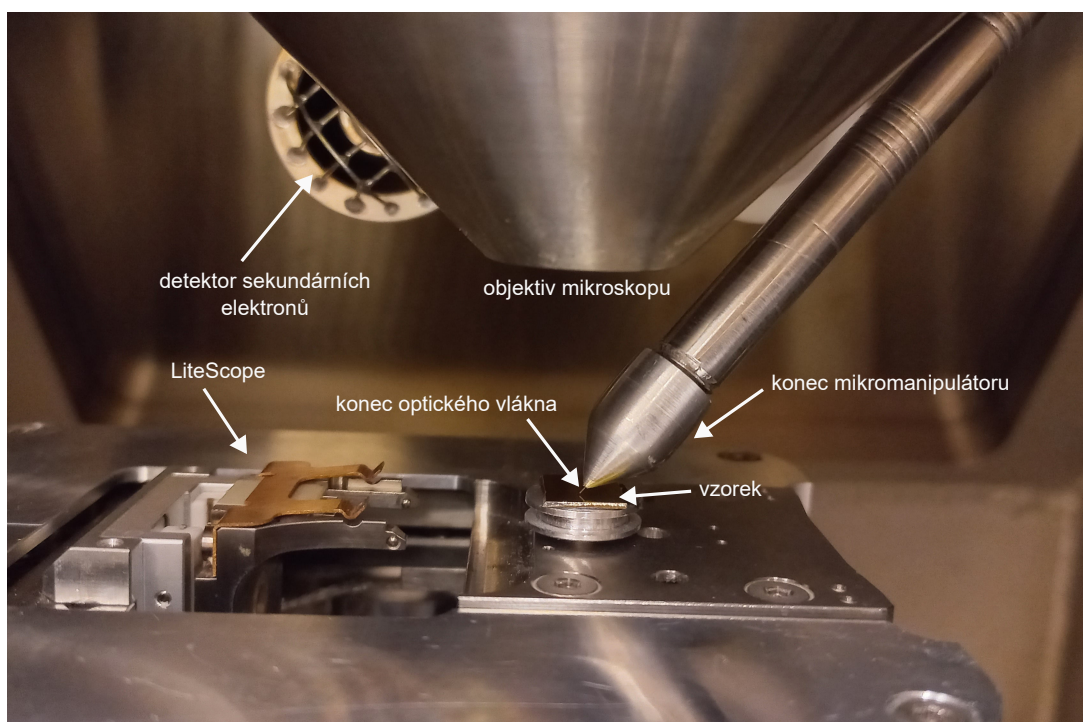
Obrázek 5.2: Přepočítání výkonu laserového světla z proudu.

5.2. Proces tavení vrstev

Po určení výkonu laserového světla vystupujícího z konce vlákna je vlákno pomocí mikromanipulátoru zavedeno do SEMu. Před umístěním vzorku na stolek mikroskopu byl naposledy změřen výkon laserového světla vycházejícího z konce vlákna v komoře mikroskopu. Po umístění vzorku, evakuaci komory a zapnutí urychlovacího napětí je konec vlákna pomocí mikromanipulátoru umístěn na potřebné místo nad vzorkem. Uspořádání celého experimentu uvnitř komory elektronového mikroskopu lze vidět na Obrázku 5.3.

Následně se pomocí stolku mikroskopu přijíždí ke konci vlákna dokud nedojde k „tuknutí“ a poté se se vzorkem od vlákna popojede. Ve chvíli, kdy je vzorek umístěn v co nejmenší vzdálenosti od konce vlákna je provedeno finální zaostření obrazu. Při samotném tavení vrstvy je potřeba zajistit co nejplynulejší pohyb vzorkem, který je z velké míry automatizován. Toho bylo dosaženo pomocí sondového mikroskopu LiteScope.

Na pohybující se vzorek dopadá laserové světlo, jehož výkon je postupně zvyšován dokud není pozorována změna na povrchu vzorku. Vlnová délka použitého laserového světla je 532 nm, kontinuální výkon na výstupu z laseru je až 1500 mW. Jedná se o laser firmy CNI Laser typu: MGL-FN-532-1.5W. Následně s předem určeným krokem je snižován výkon laserového světla a pro jednotlivé výkony je na vzorku modifikována vrstva v podobě čáry. Takto je výkon snižován dokud již nelze vidět ovlivněnou oblast.



Obrázek 5.3: Uspořádání experimentu uvnitř komory elektronového mikroskopu.

5.3. Porovnání výsledků simulace s výsledky experimentů

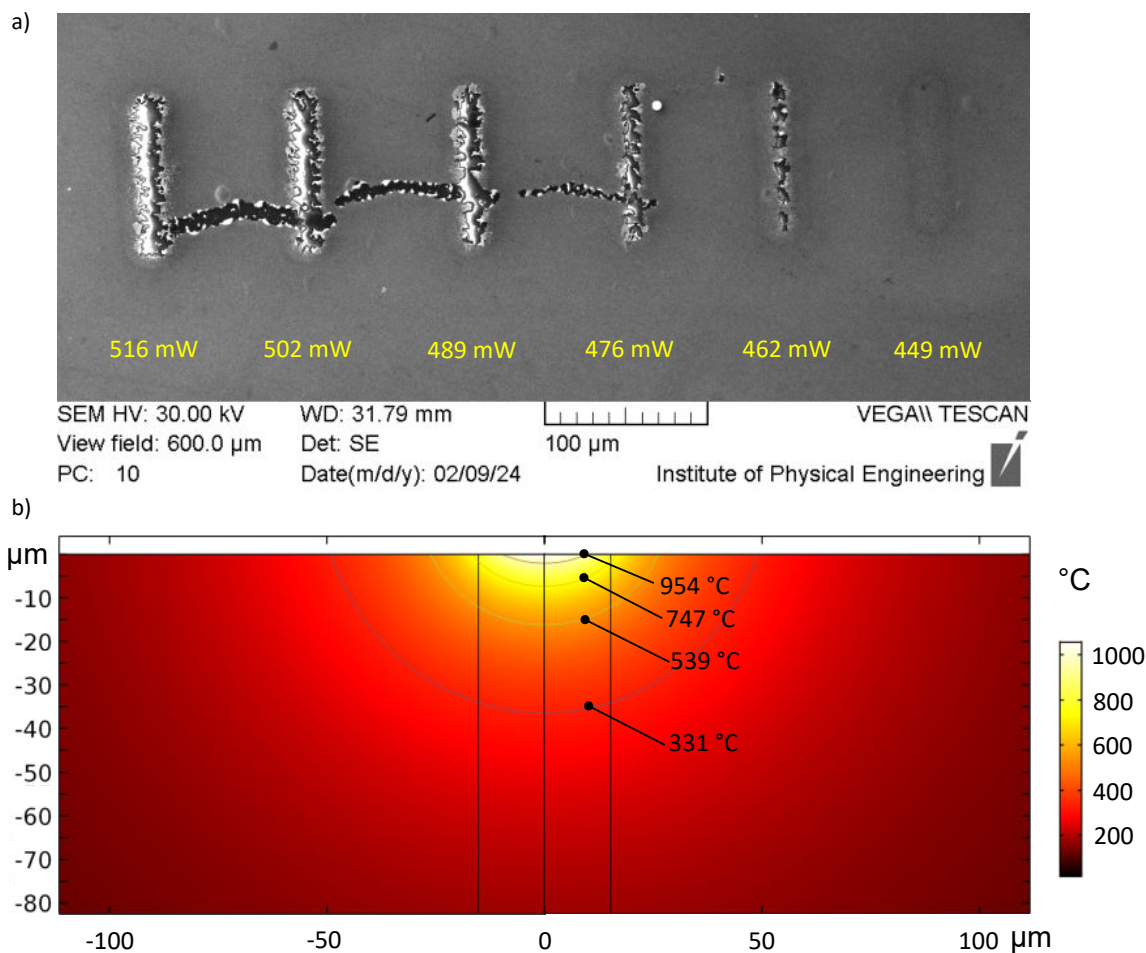
Pomocí metody IBAD (depoziční komora Kaufman) bylo vytvořeno celkem 6 kombinací vrstva/substrát. Na substrát N-BK7 byla nadeponována vrstva Au, Cr, Cu a V, a na sub-

5.3. POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE S VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ

strát Si<100> vrstva Au a V. Tloušťka deponované vrstvy byla u všech prvků stanovena na cca 100 nm, a to z důvodu absorpce laserového světla ve vrstvě, které je prakticky zcela pohlceno a nedochází tak k interferenci na tenké vrstvě. Reálná tloušťka nadeponované vrstvy se nicméně mohla od požadované tloušťky lišit. V dočasné laboratoři nebylo totiž možné tloušťku nadeponované vrstvy změřit a jedná se tedy pouze o odhad operátora na základě již získaných zkušeností.

Au/N-BK7

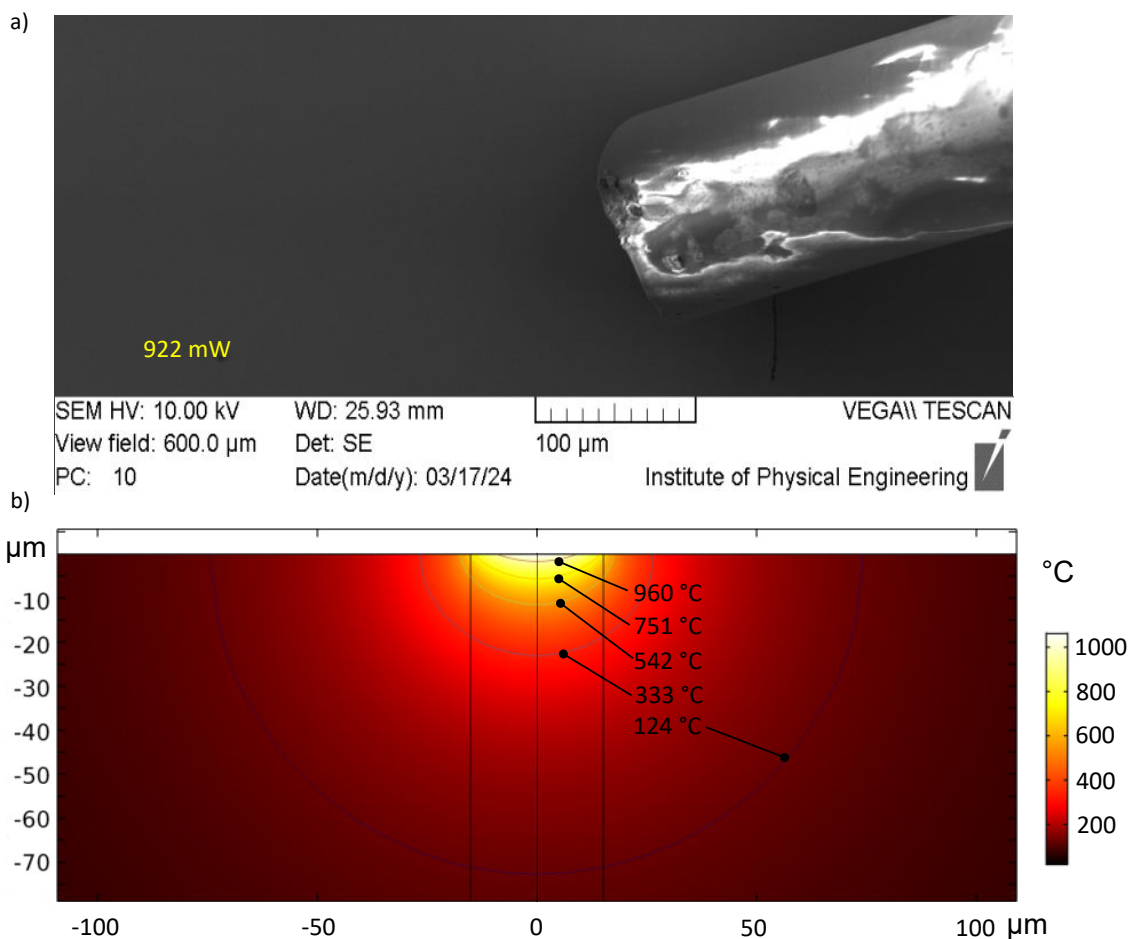
Zlato je kov žluté barvy, chemicky velmi odolný prvek, který dobře vede teplo i elektrický proud a jeho teplota tání je 1063 °C [13]. V případě nadeponování zlata na substrát N-BK7 se teploty tavení dle simulace dosáhne, při výkonu dopadajícího laserového světla 433 mW (Tabulka 4.2). V porovnání s experimentem se při výkonu laserového světla 433 mW neprojevuje žádná změna na vzorku. Viditelné známky ovlivnění povrchu vzorku lze pozorovat při výkonu 449 mW a k tavení nadeponované vrstvy dochází při výkonu přibližně 460 mW (viz Obrázek 5.4). Hodnoty výkonů ze simulace a experimentu se liší rámcově v desítkách mW (cca 6 %), což lze považovat ze velmi dobrý výsledek.



Obrázek 5.4: Porovnání výsledků experimentu a simulace pro tenkou vrstvu Au na N-BK7: a) série čar „vypálených“ do povrchu s odpovídajícími výkony dopadajícího laserového světla, b) řez vzorkem zobrazující simulované teplotní pole při výkonu 433 mW pro 100 nm vrstvu Au na N-BK7 s izotermami a jejich příslušnou teplotou (pro přehlednost je vyobrazena pouze část vzorku).

Au/Si<100>

V případě nadeponování zlata na substrát Si<100> by dle simulace nemělo dojít k jeho roztavení použitým laserem. Minimální výkon dopadajícího laserového světla potřebný na zahřátí vrstvy na teplotu tání vychází dle simulace 21 W (Tabulka 4.2). Maximální výkon používaného laserového světla je 1,5 W, tedy zahřátí povrchu vzorku na 1063 °C je nereálné. Výsledky simulace se shodují s výsledky experimentu, kdy povrch vzorku byl ovlivňován dopadajícím laserovým světlem o výkonu 922 mW a jak lze pozorovat na Obrázku 5.5 nedošlo k žádnému ovlivnění povrchu.

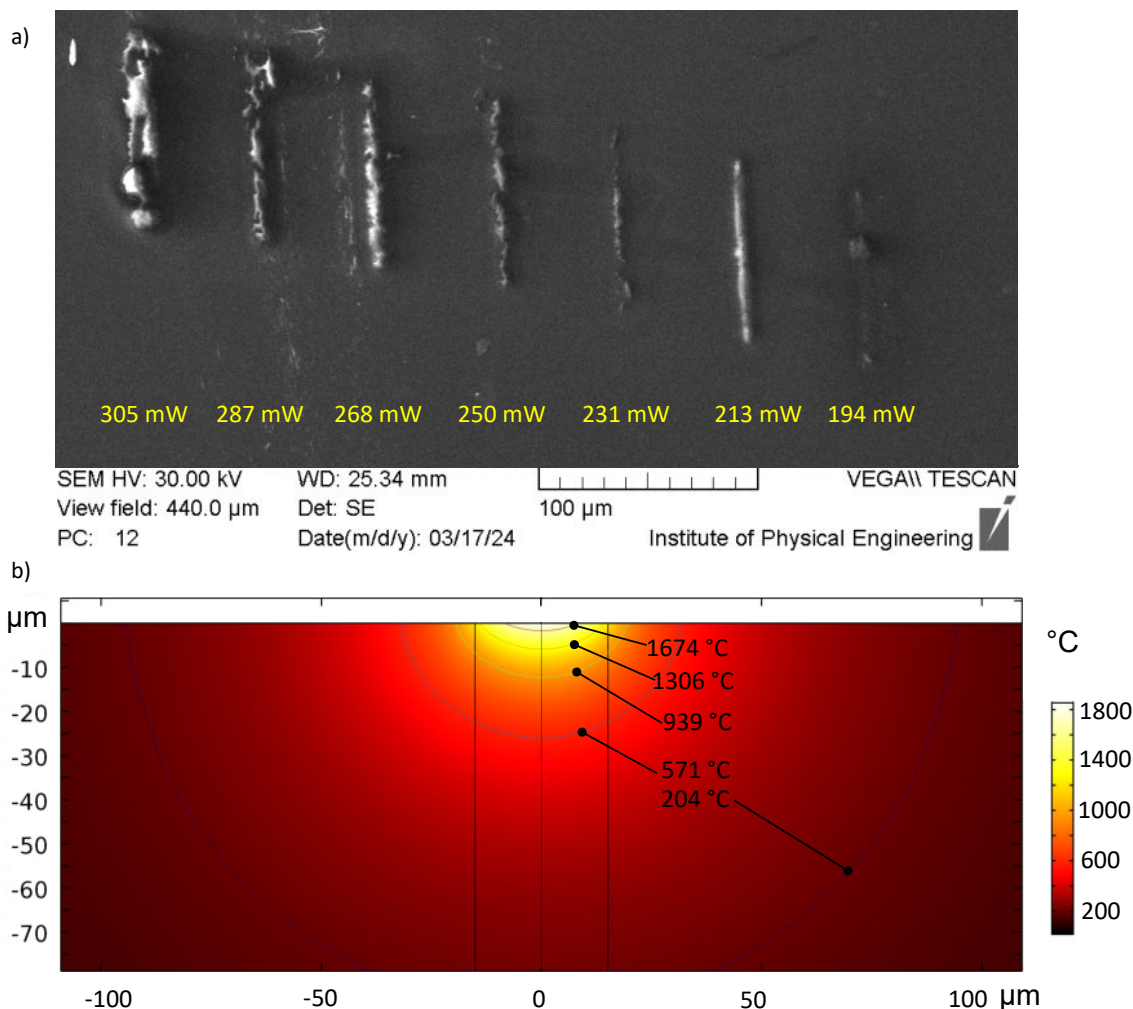


Obrázek 5.5: Porovnání výsledků experimentu a simulace pro tenkou vrstvu Au na Si<100>: a) snímek neovlivněného povrchu vzorku při výkonu dopadajícího laserového světla 922 mW (lze vidět i konec optického vlákna), b) řez vzorkem zobrazující simulované teplotní pole při výkonu 21 W pro 100 nm vrstvu Au na Si<100> s izotermami a jejich příslušnou teplotou (pro přehlednost je vyobrazena pouze část vzorku).

5.3. POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE S VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ

Cr/N-BK7

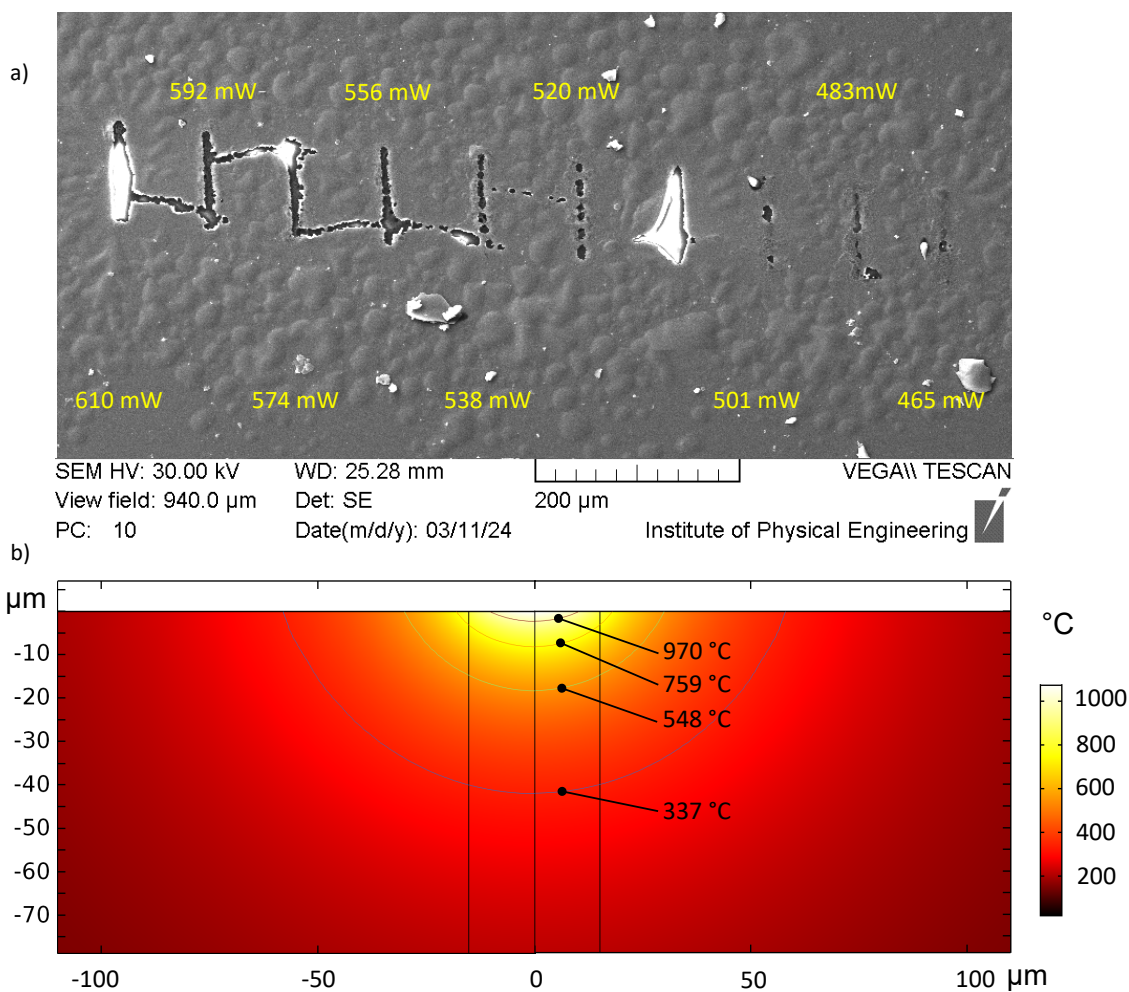
Druhým vybraným prvkem je prvek stříbřité barvy – chrom. Jedná se opět o chemicky stabilní prvek, jehož teplota tání je $1860\text{ }^{\circ}\text{C}$ [13]. V případě nadeponování na skleněný substrát N-BK7 vychází ze simulace minimální výkon dopadajícího laserového světla na zahřátí vrstvy 293 mW (Tabulka 4.2). V porovnání s experimentem při tomto výkonu opravdu dochází k tavení nadeponované vrstvy. Z Obrázku (5.6) lze vidět, že k tavení dochází již při nižším výkonu – 213 mW .



Obrázek 5.6: Porovnání výsledků experimentu a simulace pro tenkou vrstvu Cr na N-BK7: a) série čar „vypálených“ do povrchu s odpovídajícími výkony dopadajícího laserového světla, b) řez vzorkem zobrazující simulované teplotní pole při výkonu 293 mW pro 100 nm vrstvu Cr na N-BK7 s izotermami a jejich příslušnou teplotou (pro přehlednost je vyobrazena pouze část vzorku).

Cu/N-BK7

Měď je kov načervenalé barvy o velmi dobré tepelné a elektrické vodivosti a teplotě tání 1084 °C. Elektrická vodivost čisté mědi je natolik vysoká, že se používá pro porovnání vodivosti jiných kovů (International Annealed Copper Standard (IACS)) [13]. Měď byla, stejně jako chrom, nadeponována pouze na skleněný substrát N-BK7. Minimální potřebný výkon laserového světla na zahřátí nadeponované vrstvy vychází dle simulace přibližně 400 mW (Tabulka 4.2). Při tomto výkonu se v provedeném experimentu měď netavila, viditelné známky tavení byly pozorovány při výkonu dopadajícího laserového světla 483 mW (Obrázek 5.7).

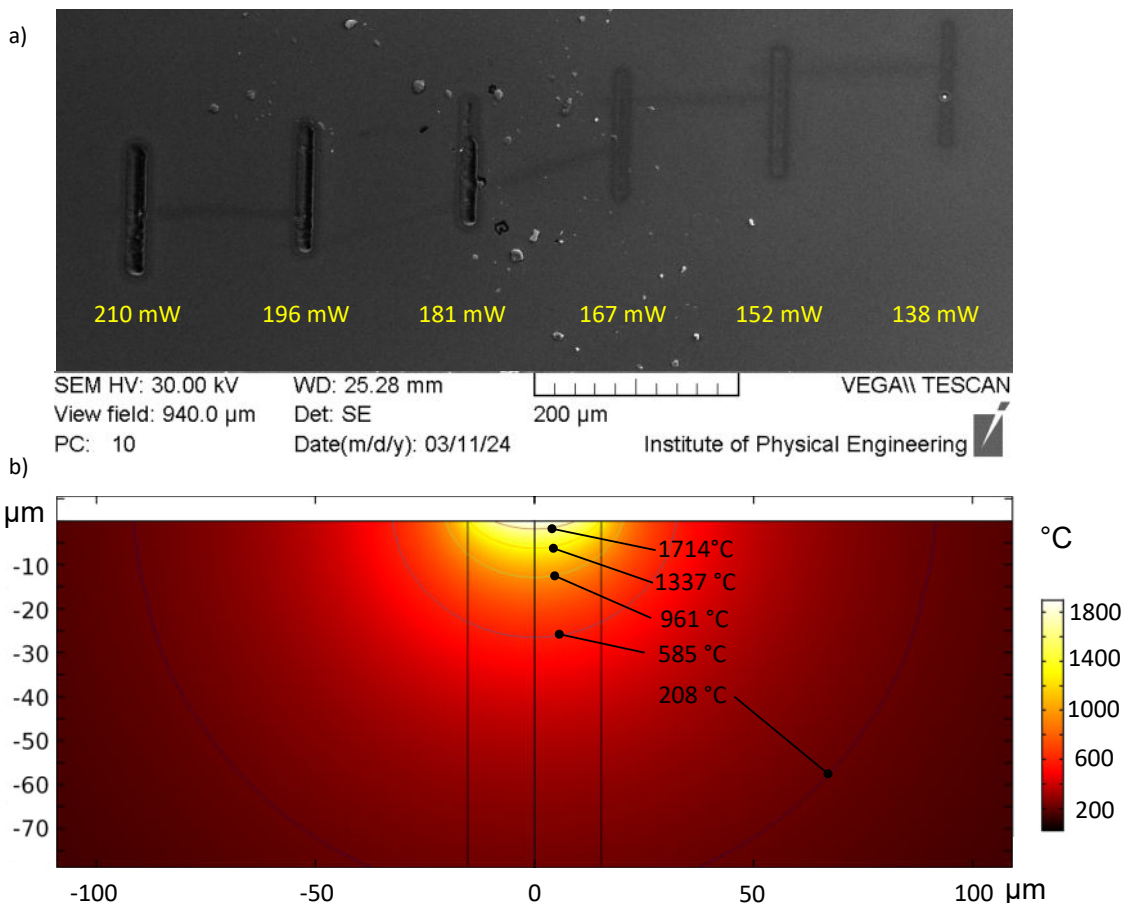


Obrázek 5.7: Porovnání výsledků experimentu a simulace pro tenkou vrstvu Cu na N-BK7: a) série čar „vypálených“ do povrchu s odpovídajícími výkony dopadajícího laserového světla, b) řez vzorkem zobrazující simulované teplotní pole při výkonu 400 mW pro 100 nm vrstvu Cu na N-BK7 s izotermami a jejich příslušnou teplotou (pro přehlednost je vyobrazena pouze část vzorku).

5.3. POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ SIMULACE S VÝSLEDKY EXPERIMENTŮ

V/N-BK7

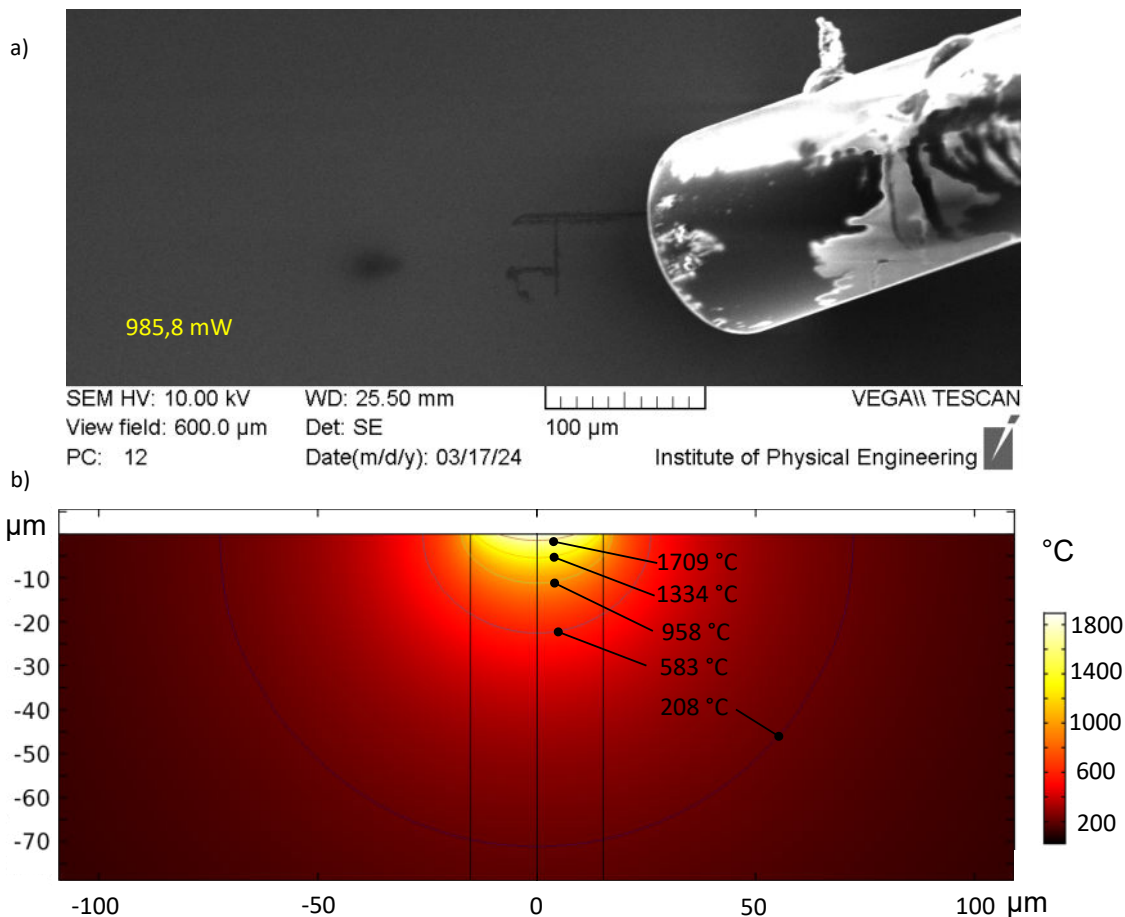
Posledním nadeponovaným prvkem je vanad, kov šedé barvy, jehož teplota tání je z vybraných prvků nejvyšší, a to 1900 °C (Tabulka 4.2). Vanad byl nadeponován, podobně jako zlato, na oba použité substráty – sklo N-BK7 a Si<100>. Ze simulace vychází potřebný výkon laserového světla na roztavení nadeponované vrstvy vanadu na skle N-BK7 275 mW (Tabulka 4.2). Oproti simulaci se nadeponovaná vrstva vanadu v provedeném experimentu tavila již při výkonu, dopadajícího laserového světla, 181 mW. Taktéž bylo pozorováno ovlivnění povrchu vzorku při nižších výkonech (Obrázek 5.8).



Obrázek 5.8: Porovnání výsledků experimentu a simulace pro tenkou vrstvu V na N-BK7: a) série čar „vypálených“ do povrchu s odpovídajícími výkony dopadajícího laserového světla, b) řez vzorkem zobrazující simulované teplotní pole při výkonu 275 mW pro 100 nm vrstvu V na N-BK7 s izotermami a jejich příslušnou teplotou (pro přehlednost je vyobrazena pouze část vzorku).

V/Si<100>

V případě nadeponování vanadu na substrát Si<100>, simulace dává minimální výkon na zahřátí vrstvy na teplotu tání 23 W. Nadeponovaná vrstva vanadu by tedy neměla být ovlivněna, což potvrzují i výsledky experimentu (Obrázek 5.9), při kterém byl povrch vzorku zahříván laserovým světlem o výkonu až 985,8 mW.



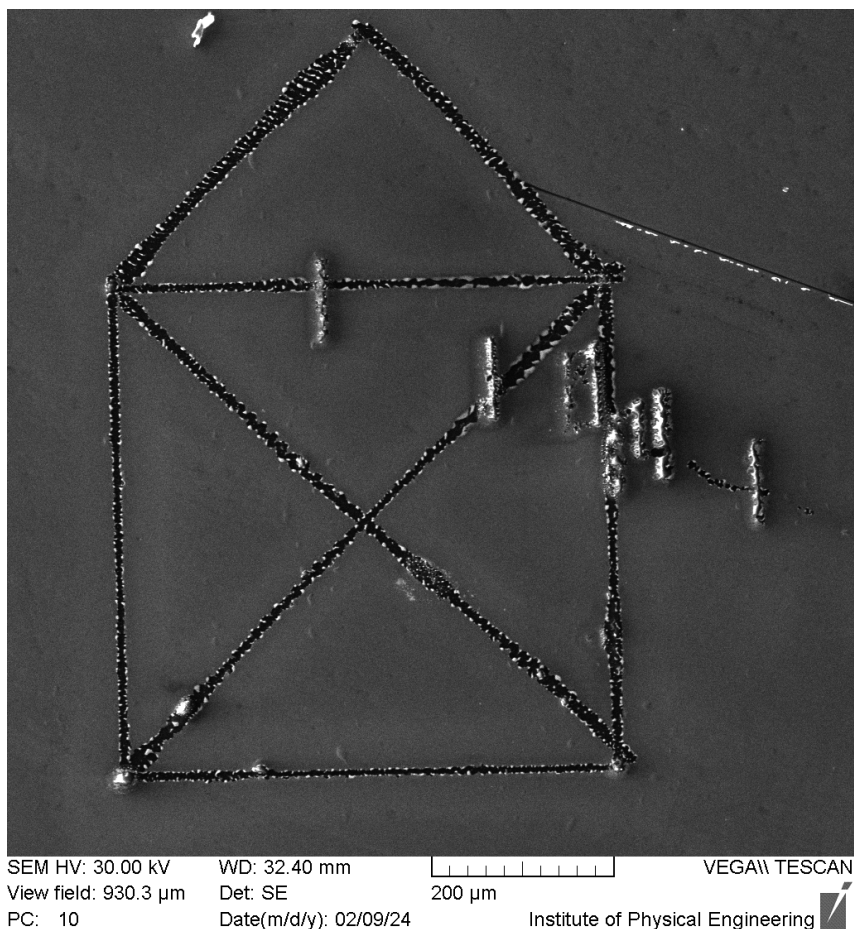
Obrázek 5.9: Porovnání výsledků experimentu a simulace pro tenkou vrstvu V na Si<100>: a) snímek neovlivněného povrchu vzorku při výkonu dopadajícího laserového světla 985,8 mW (lze vidět i konec optického vlákna), b) řez vzorkem zobrazující simulované teplotní pole při výkonu 23 W pro 100 nm vrstvu V na Si<100> s izotermami a jejich příslušnou teplotou (pro přehlednost je vyobrazena pouze část vzorku).

5.4. Příprava na litografii

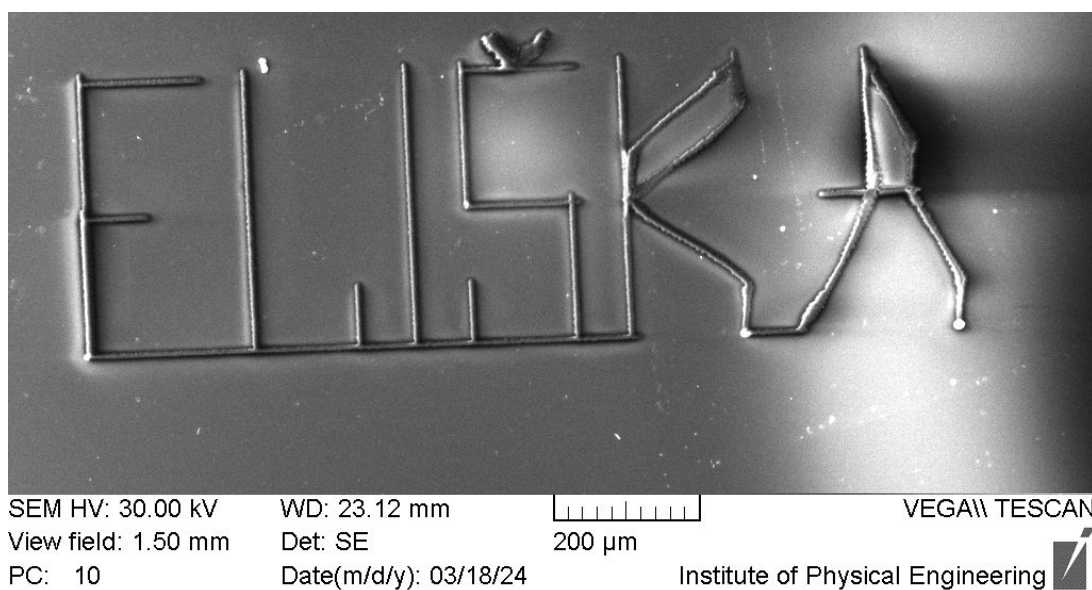
Při osvětlení povrchu vzorku intenzivním laserovým světlem dochází k jeho modifikaci a to v poměrně malé oblasti – šířka „vypálených“ čar se pohybovala mezi 6 μm až 15 μm . Tuto modifikaci povrchu lze považovat za přípravu na litografii.

V litografii je požadováno ovlivnění oblasti na konkrétně určeném místě. Toho bylo v této práci dosaženo sepsáním scriptu ovládajícím manipulační stolek mikroskopu. Tento jednoduchý script sestávající ze souřadnic bodů udává, na jakou pozici se má posunout manipulační stolek mikroskopu. Jelikož optické vlákno přivádějící laserové světlo zůstává během celého procesu na stejné, předem nastavené pozici, je potřeba zapsat souřadnice v požadovaném pořadí. Pro příklad lze uvést souřadnice na „vypálení“ domečku jedním tahem (Obrázek 5.10): (0, 0), (0, 1), (1, 1), (1, 0), (0, 0), (1, 1), (0.5, 1.5), (0, 1), (1, 0). Velikost takto vzniklé struktury je cca 545 μm a lze ji měnit přeškálováním.

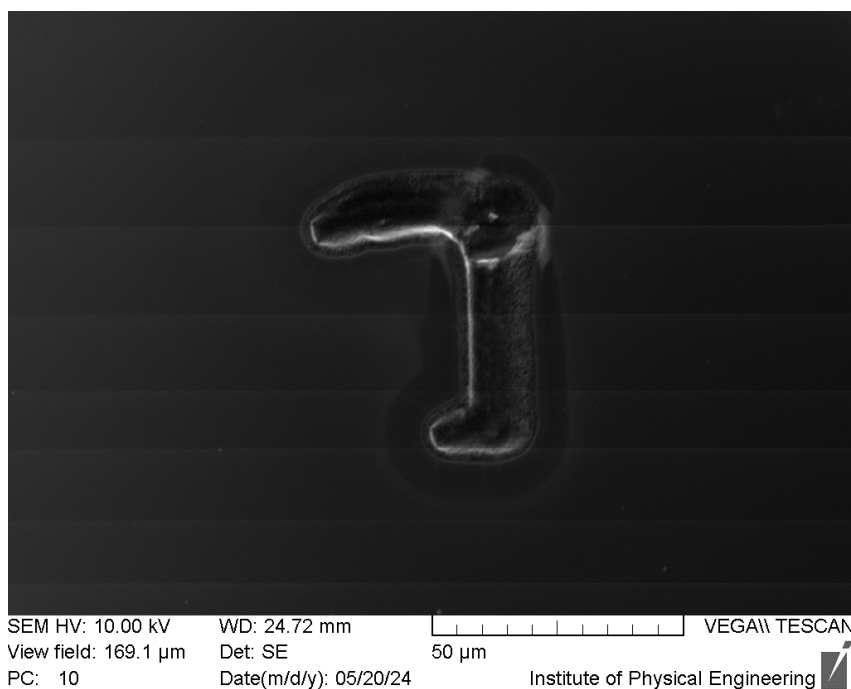
Struktury vyrobené tímto postupem lze vidět na Obrázku 5.10, 5.11. Jak lze vidět velikost těchto struktur je v stovkách mikrometrů, neboť byly vytvořeny pomocí manipulace se stolcem mikroskopu. Velmi podobným scriptem lze ovládat sondový mikroskop LiteScope, kde lze docílit i menších struktur (Obrázek 5.12). Všechny struktury byly vytvořeny jedním tahem, neboť v současné době laserové světlo lze zapnout/vypnout jen manuálně.



Obrázek 5.10: SEM snímek domečku jedním tahem, který vznikl pohybem stolku elektro- nového mikroskopu na vzorku Au/N-BK7.



Obrázek 5.11: SEM snímek jména, které vzniklo pohybem stolku elektronového mikroskopu na vzorku Cr/N-BK7.



Obrázek 5.12: SEM snímek struktury, která abstraktně připomíná siluetu klančího sebači, vznikla pohybem sondového mikroskopu LiteScope na vzorku V/N-BK7.

Závěr

Tato bakalářská práce je zaměřena na výzkum jedné z požadovaných vlastností vyvíjené multifunkční sondy SPM nové generace, a to na modifikaci fyzických vlastností povrchu vzorku pomocí intenzivního laserového světla. Cílem této práce bylo simulovat teplotní pole ve vzorku po interakci laserového světla s tenkými vrstvami na substrátu a porovnat výsledky simulací s výsledky ovlivňování vzorků intenzivním laserovým světlem přímo v komoře mikroskopu.

Pro současné zobrazování povrchu vzorku, na který působí intenzivní laserové světlo, v elektronovém mikroskopu je potřeba provést jednoduchou úpravu v detekční větvi mikroskopu. V rámci této úpravy je umístěn mezi světlovod a fotonásobič optický filtr. Tato úprava, společně s popisem přivedení laserového světla optickým vláknem do komory mikroskopu pomocí mikromanipulátoru, je blíže popsána ve třetí kapitole. Čtvrtá kapitola se věnuje optickým vláknům, která lze dělit na jednomódová a vícemódová. V provedených experimentech bylo použito jednomódové optické vlákno z důvodu kvality světelné stopy. Pro co nejúčinnější zahřátí povrchu vzorku je potřeba, aby laserové světlo bylo soustředěno do co nejmenší plochy. Určení ovlivněné plochy vzorku je, společně s popisem simulace v prostředí COMSOL Multiphysics, blíže rozebráno v páté kapitole.

Samotný experiment, při kterém je povrch vzorku zahříván intenzivním laserovým světlem a dochází tak k modifikaci povrchu, je popsán v šesté kapitole. Taktéž je zde rozebráno určení výkonu laserového světla dopadajícího na povrch vzorku. Zde je prostor k možnému vylepšení, kdy by bylo pro zjednodušení celého experimentu ideální měřit výkon světla vycházejícího z optického vlákna přímo v komoře mikroskopu. Toho by mohlo být docíleno umístěním detektoru výkonu poblíž vzorku. Tak by bylo možné velmi pohodlně změřit výkon světla „najatím“ koncem optického vlákna nad detektor, podobně jako je tomu při měření proudu elektronového svazku pomocí Faradayovy cely.

Z porovnání výsledků simulací a experimentů je vidět, že shoda je v řádu jednotek až desítek procent, což je velmi dobrý výsledek. Pro nadeponovanou tenkou vrstvu V a Cr na skle N-BK7 se výsledky simulací a experimentů liší nejvíce. Rozdíl mezi výsledky simulací a experimentů byl nejpravděpodobněji způsoben odlišnou tloušťkou nadeponované vrstvy. Simulace byly provedeny pro tloušťku vrstvy 100 nm, nicméně tloušťka nadeponované vrstvy pomocí metody IBAD byla odhadnuta na základě zkušeností operátora, a tedy se mohla od zvolených 100 nm lišit.

V této práci byla úspěšně ověřena možnost modifikace povrchu vzorku pomocí intenzivního laserového světla, což je jedna z požadovaných vlastností vyvíjené multifunkční sondy SPM nové generace. Dále bylo provedeno porovnání výsledků simulací a experimentů provedených v komoře elektronového mikroskopu. Obecně lze z výsledků porovnání konstatovat, že na navržený model simulace teplotního pole ve vzorku se dá před prováděním experimentem spolehnout, a tedy požadovaného cíle práce bylo dosaženo.

Literatura

- [1] *Alpha300 RA – Raman-AFM Microscope* [online]. ©2024. [cit. 2024-05-04]. Dostupné z: https://raman.oxinst.com/products/correlative-microscopes/raman-afm-alpha300ra?gad_source=1%5C&gclid=Cj0KCQjwudexBhDKARIsAI-GWYW0rLiadiqNLVD25VHrwbje2x9d1t5haXBRk4q1FNHDJWzAfapfbfkaAswwEALw_wcB.
- [2] *COMSOL Multiphysics® Simulation Software* [online]. ©2024. [cit. 2024-04-18]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>.
- [3] *Correlative microscopy* [online]. ©2024. [cit. 2024-04-14]. Dostupné z: <https://www.nenovision.com/technology/correlative-microscopy>.
- [4] *CPEM - Correlative Probe & Electron Microscopy* [online]. ©2024. [cit. 2024-04-14]. Dostupné z: <https://www.nenovision.com/technology/cpem>.
- [5] EVERHART, T E; THORNLEY, R F M. Wide-band detector for micro-microampere low-energy electron currents. *Journal of Scientific Instruments*. 1960, roč. 37, č. 7, s. 246. Dostupné z DOI: 10.1088/0950-7671/37/7/307.
- [6] FERREIRA, Mário F S; PAUL, Mukul Chandra. *Optical Fiber Technology and Applications*. 1. vyd. IOP Publishing, ©2021. ISBN 978-0-7503-3241-5.
- [7] FUJIWARA, Hiroyuki. *Spectroscopic Ellipsometry Principles and Applications*. 1. vyd. John Wiley & Sons, Ltd, 2007. ISBN 978-0-470-01608-4.
- [8] HARISH, Ajay. *Finite Element Method – What Is It? FEM and FEA Explained* [online]. 2024. [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://www.simscale.com/blog/what-is-finite-element-method/>.
- [9] HUGHES, Matt. *What is Ion Beam Assisted Deposition (IBAD)?* [online]. 2022. [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <https://www.semicore.com/news/what-is-ion-beam-assisted-deposition-ibad>.
- [10] *Insights into Fiber Optics* [online]. 2020. [cit. 2024-04-07]. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=12211%5C&tabname=Fiber%5C%20Optics%5C#FiberTop.
- [11] KOWALEVICZ, Andrew M.; BUCHOLTZ, Frank. *Beam Divergence from an SMF-28 Optical Fiber*. Washington, DC, 2006. Memorandum Report. Naval Research Laboratory Washington, DC 20375-5320.
- [12] MARSH, Aleksandra. *What is Correlative Light and Electron Microscopy?* [online]. 2020. [cit. 2024-05-04]. Dostupné z: <https://andor.oxinst.com/learning/view/article/what-is-correlative-light-and-electron-microscopy>.
- [13] *MatWeb : Material property data* [online]. c1996-2024. [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.matweb.com/index.aspx>.
- [14] *Melting Points of Metals* [online]. 2024. [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://fractory.com/melting-point-of-metals-chart/>.
- [15] MITSCHKE, Fedor. Fiber Optics, Physics and Technology. In: *Fiber Optics, Physics and Technology*. 2. vyd. Springer, 2016, s. 8. ISBN 978-3-662-52762-7.
- [16] OKOSHI, Takanori. *Optical Fibers*. 1. vyd. New York : Academic Press, 1982. ISBN 0-12-525260-9.

- [17] PALOUDA, Adam. *Vývoj mikromanipulátoru pro rastrovací elektronový mikroskop*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/149915>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav fyzikálního inženýrství.
- [18] PASCHOTTA, R. *Fibers* [RP Photonics Encyclopedia]. RP Photonics AG, 2006. Available online at <https://www.rp-photonics.com/fibers.html>, url = <https://www.rp-photonics.com/fibers.html>, doi = 10.61835/11k, urldate = 2024-04-01, keywords = fibers, applications, fiber optics, single-mode and multimode, polarization, cables, NA, V number, glass optical fibers.
- [19] PASCHOTTA, R. *Modes* [RP Photonics Encyclopedia]. RP Photonics AG, 2006. Available online at <https://www.rp-photonics.com/modes.html>, url = <https://www.rp-photonics.com/modes.html>, doi = 10.61835/tiz, urldate = 2024-04-01, keywords = modes, waveguide, propagation modes, optical fiber, resonator, resonator, field distribution.
- [20] PASCHOTTA, R. Multiphonon Absorption - an encyclopedia article. In: *RP Photonics Encyclopedia*. RP Photonics AG, 2016. Dostupné z DOI: 10.61835/uva.
- [21] PASCHOTTA, R. *Beam Waist* [RP Photonics Encyclopedia]. RP Photonics AG, [b.r.] [cit. 2024-05-21]. Dostupné z DOI: 10.61835/95r.
- [22] PASCHOTTA, R. *Multimode Fibers* [RP Photonics Encyclopedia]. RP Photonics AG, [b.r.] [cit. 2024-05-21]. Dostupné z DOI: 10.61835/irf.
- [23] PASCHOTTA, R. *Photonic Crystal Fibers* [RP Photonics Encyclopedia]. RP Photonics AG, [b.r.] [cit. 2024-05-22]. Dostupné z DOI: 10.61835/m68.
- [24] *Principal benefits of AFM-in-SEM* [online]. ©2024. [cit. 2024-04-14]. Dostupné z: <https://www.nenovision.com/technology/principal-benefits%5C#in-situ>.
- [25] *Researchers develop a novel type of optical fiber that preserves the properties of light* [online]. c2003-2024. [cit. 2024-05-24]. Dostupné z: <https://phys.org/news/2017-07-optical-fiber-properties.html>.
- [26] *RISE – Raman-SEM Microscopes* [online]. ©2024. [cit. 2024-05-04]. Dostupné z: <https://raman.oxinst.com/products/correlative-microscopes/raman-semicolon-rise>.
- [27] SAYAH, Abdeljalil; PHILIPONA, C; LAMBELET, Patrick; PFEFFER, M; MARQUIS-WEIBLE, F. Fiber tips for scanning near-field optical microscopy fabricated by normal and reverse etching. *Ultramicroscopy*. 1998, roč. 71. Dostupné z DOI: 10.1016/S0304-3991(97)00106-X.
- [28] *The Finite Element Method (FEM)* [online]. 2016. [cit. 2024-04-19]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method?parent=physics-pdes-numerical-042-62%5C#discret1>.
- [29] VŮJTEK, Milan; KUBÍNEK, Roman; MAŠLÁŇ, Miroslav. *Nanoskopie*. 1. vyd. V Olomouci : Univerzita Palackého, 2012. ISBN 978-80-244-3102-4.
- [30] ZEZULKA, Lukáš. *Multifunctional SPM Probes: Development, Preparation And Testing Of Exchangeable Caplike Tips Of The Probes*. Brno, 2023. Master's Thesis. Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Physical Engineering.

Seznam použitých zkratek a symbolů

SPM	Scanning Probe Microscopy (mikroskopie skenovací sondou)
SEM	Scanning Electron Microscopy (rastrovací elektronová mikroskopie)
CLEM	Correlative Light and Electron Microscopy (korelativní světelná a elektronová mikroskopie)
AFM	Atomic force microscopy (mikroskopie atomárních sil)
CPEM	Correlative Probe and Electron Microscopy (korelativní sondová a elektronová mikroskopie)
DRIE	Deep Reactive Ion Etching (hloubkové reaktivní iontové leptání)
ÚFI	Ústav Fyzikálního Inženýrství
FSI	Fakulta Strojního Inženýrství
SE	Secondary Electrons (sekundární elektrony)
BSE	BackScattered Electrons (zpětně odražené elektrony)
NA	Numerical Aperture (numerická apertura)
MFD	Mode Field Diameter (Průměr módového pole)
IBAD	Ion Beam-Assisted Deposition (depozice za pomoci iontového svazku)
IACS	International Annealed Copper Standard (mezinárodní standart žíhané mědi)