

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

ING. ZDENĚK FORET

NÁVRH KONCEPCE A VÝVOJ JEDNOÚČELOVÉHO  
RASTROVACÍHO ELEKTRONOVÉHO MIKROSKOPU

CONCEPT AND DEVELOPMENT OF SINGLE-PURPOSE SCANNING ELECTRON MICROSCOPE

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

VEDOUCÍ PRÁCE

*prof. Ing. Jiří Švejcar, CSc.*

BRNO 2010

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

elektronová mikroskopie, magnetické čočky, sekundární elektrony, zpětně odražené elektrony, elektronový zdroj

## **KEY WORDS**

electron microscopy, magnetic lenses, secondary electrons, back scattered electrons, electron gun

## **ULOŽENÍ PRÁCE**

Disertační práce je uložena na oddělení vědy a výzkumu

Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, Technická 2, 616 69 Brno.

<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>5</b>
<b>2 VÝVOJ A SOUČASNÝ STAV ELEKTRONOVÉ MIKROSKOPIE .....</b>	<b>6</b>
<b>3 CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE.....</b>	<b>7</b>
<b>4 KONCEPCE ŘEŠENÉHO RASTROVACÍHO ELEKTRONOVÉHO MIKROSKOPU.....</b>	<b>8</b>
4.1 OPTICKÉ USPOŘÁDÁNÍ ELEKTRONOVÉHO MIKROSKOPU.....	8
4.2 ELEKTRONOVÁ TRYSKA .....	10
4.3 OBJEKTIV MIKROSKOPU .....	10
4.4 MANIPULÁTOR VZORKU.....	11
4.5 USPOŘÁDÁNÍ VAKUOVÉHO SYSTÉMU.....	11
4.6 ELEKTRONIKA A ŘÍDÍCÍ SYSTÉM .....	11
<b>5 TEORETICKÉ VÝPOČTY.....</b>	<b>13</b>
5.1 NÁVRH MAGNETICKÉHO OBVODU OBJEKTIVU .....	13
5.1.1 IMERZNÍ OBJEKTIV .....	14
5.1.2 UZAVŘENÝ OBJEKTIV.....	19
5.2 VYCHYLOVACÍ SOUSTAVA .....	20
<b>6 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ.....</b>	<b>21</b>
6.1 OBJEKTIV .....	22
6.2 MANIPULÁTOR S PIEZOELEKTRICKÝM POSUVEM .....	23
<b>7 DISKUSE VÝSLEDKŮ.....</b>	<b>26</b>
<b>8 ZÁVĚR.....</b>	<b>28</b>
<b>POUŽITÁ LITERATURA.....</b>	<b>29</b>
<b>AUTOROVY PUBLIKACE.....</b>	<b>30</b>
<b>CURRICULUM VITAE .....</b>	<b>31</b>
<b>ABSTRAKT.....</b>	<b>32</b>



# 1 ÚVOD

V dnešní době, žijící nanotechnologiemi, nachází elektronová mikroskopie stále větší uplatnění v různorodých odvětvích, jak v biologii, tak i v pozorování povrchových mikrostruktur materiálů, zejména při inspekci elektronických součástí, například čipů, waferů a podobně. Současně s rostoucím využitím se zvyšují i nároky na technickou realizaci elektronových mikroskopů tak, aby aplikace byla snadná a rychlá, přesto kvalita získaného zobrazení byla co nejvyšší.

Od sestavení prvního elektronového mikroskopu E. Ruskou a M. Knollem v roce 1931 zaznamenala elektronová mikroskopie značný rozvoj. Důvodem byl vývoj nových technik, podrobnější znalosti vlastností použitých materiálů i vývoj elektronových zdrojů s menším bodovým zdrojem. V posledních letech značně přispěl k pokroku v elektronové mikroskopii i rozmach výpočetní techniky. Přestože elektronová mikroskopie je ve své podstatě rozdělena na dva principy, na transmisní (TEM) a rastrovací elektronovou mikroskopii (SEM), její aplikace je mnohem rozsáhlejší. Odlišnost metod a pozorovaných vzorků vedla k vývoji mnoha směrů elektronové mikroskopie, například rastrovací transmisní elektronové mikroskopii (STEM) nebo k vývoji environmentálního rastrovacího elektronového mikroskopu (ESEM), v krystalografii se pak uplatnila elektronová difrakce. Získání lepšího kontrastu u biologických vzorků umožňuje nízkovoltový mikroskop (LVEM).

Vývojem a výrobou elektronových mikroskopů se zabývají například společnosti TESCAN, s.r.o., FEI, Carl Zeiss, JEOL, Hitachi nebo DeLong Instruments, a. s. Mikroskopy těchto firem jsou rozšířeny po celém světě a umožňují pozorování struktur s velkým rozlišením. Kvalita zobrazení a vhodná aplikace však záleží na uspořádání optického systému elektronového mikroskopu.

Tato disertační práce se zabývá návrhem elektronového rastrovacího mikroskopu (SEM), určeného pro pozorování Shottkyho katod v průběhu výroby. Je pojednáno o výrobě Shottkyho katod a zpracování jejich parametrů. Stěžejní částí práce je návrh optického systému, zejména kombinovaného imerzního objektivu s uzavřeným objektivem, které spolu tvoří jeden optický celek. Dále se práce zaměřuje na výpočet rozlišovací schopnosti mikroskopu. Je popsán návrh vypracovaného technického řešení mikroskopu, elektronové optiky, komory mikroskopu a manipulátoru vzorku poháněného piezoelektrickými motory.

## 2 VÝVOJ A SOUČASNÝ STAV ELEKTRONOVÉ MIKROSKOPIE

S objevem elektronu, který učinil roku 1897 J. J. Thomson, se pomalu začala rodit elektronová optika. Louis de Broglie v roce 1925 popisuje souvislost mezi vlnovou délkou a pohybujícím se elektronem [1]. V roce 1926 D. Gabor při svém experimentu s vysokovoltovým oscilografem zhotovil fokusující cívku v kovovém pouzdře. Nejprve byl použit dlouhý solenoid bez kovového pláště pro fokusaci elektronového svazku emitujícího ze zdroje do malé stopy na fluorescenčním stínítku. Toto řešení není shodné se zobrazením skleněné čočky, a nepřináší tak žádné zvětšení. Gabor ukázal, že krátká cívka je schopna fokusace elektronového svazku. Pro tento jev přináší vysvětlení H. Busch [2], který spočítal trajektorii elektronu pohybujícího se v magnetickém poli krátké cívky a zjistil, že působení cívky na svazek elektronů je stejné, jako působení skleněné čočky na světelný svazek. Na tyto výsledky navazují Max Knoll a Ernst Ruska, kteří staví testovací zařízení pro vyzkoušení této teorie. Z jejich pokusu se v roce 1931 zrodil na Berlínské Technické Universitě první elektronový mikroskop. Elektronový mikroskop, který sestrojili, měl pouze demonstrovat princip funkce elektronové mikroskopie [3]. Za tento objev obdržel Ernst Ruska v roce 1986 Nobelovu cenu. První komerčně produkováný elektronový mikroskop na světě sestrojili v roce 1939 Ernst Ruska a Bodo Von Borries ve společnosti Siemens.

Elektronový mikroskop se skládá z mechanické části, optiky, řídicí elektroniky a vakuového systému. Každá z těchto částí se vyvíjela a modernizovala podle nových trendů, které přišly s novými objevy. Z hlediska této práce je zajímavá elektronová optika, elektronové zdroje a mechanická část, jejichž zdokonalování i způsob navrhování vedly k vyššímu rozlišení pozorovaných preparátů. Vysokorozlišovací mikroskopy vyžadovaly vyšší vakuum, především v komoře elektronového zdroje, což vedlo k postupnému zdokonalování vakuového zařízení. Navrhování elektronové optiky bylo zpočátku intuitivní, s příchodem výpočetní techniky byly řešeny nové matematické modely, které umožnily rychlejší výpočet magnetického pole a počítačovou simulaci, pomocí níž je možné zobrazit trajektorie elektronu v magnetickém poli.

### **3 CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE**

Cílem disertační práce je návrh magnetického obvodu objektivu a výpočet optického systému elektronového mikroskopu, technické řešení a vyhotovení trojrozměrného modelu s technickou dokumentací.

Dílejší etapy disertační práce obsahují tyto body:

- návrh magnetického obvodu SEM podložený výpočtem;
- simulaci průchodu elektronového svazku optickou soustavou;
- vypracování modelu a technické dokumentace pro výrobu.

## 4 KONCEPCE ŘEŠENÉHO RASTROVACÍHO ELEKTRONOVÉHO MIKROSKOPU

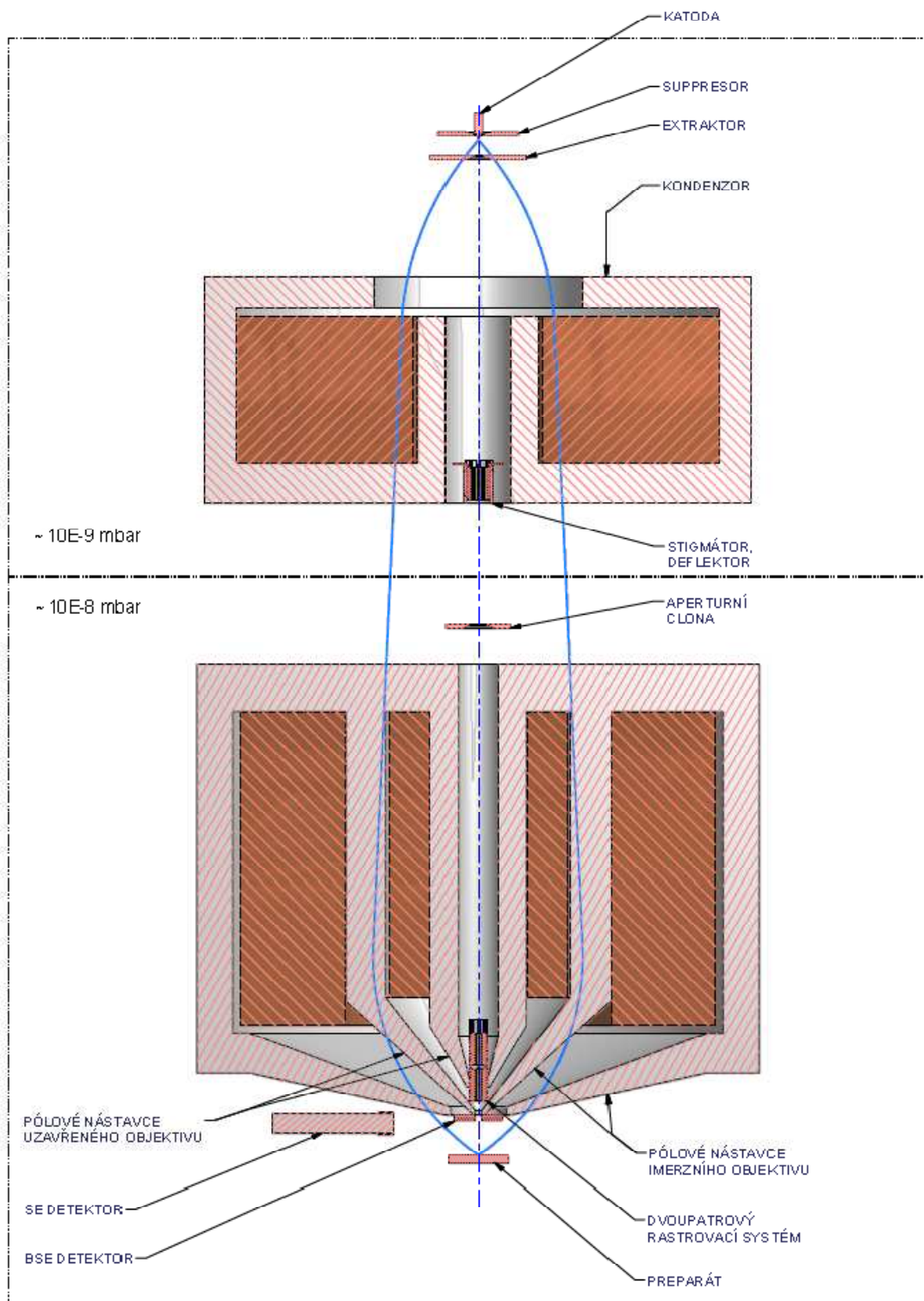
### 4.1 OPTICKÉ USPOŘÁDÁNÍ ELEKTRONOVÉHO MIKROSKOPU

Optické uspořádání je nezbytným základem pro výchozí výpočty a optimalizaci řešení optického systému. Volba elektronového zdroje je jedním z parametrů, který má značný vliv na to, v jakých hodnotách se bude pohybovat rozlišení mikroskopu. Velikost virtuálního zdroje Shottkyho katody, která bude použita v tomto systému, je přibližně 20 nm. Má-li být požadované rozlišení lepší než 10 nm, optimální zmenšení objektivu by mělo být větší než dvojnásobné. Tím jsou předběžně dány rozměry uspořádání zdroje a objektivu.

Koncepce optického návrhu SEM byla navržena jako jednoduchý optický přístroj sloužící především pro pozorování Shottkyho katod v průběhu výroby. Základními prvky sestavy mikroskopu je elektronová tryska, aperturní clona, objektiv s rastrovací soustavou a komora s manipulátorem vzorku. Cílem koncepce bylo dosáhnout vysokého rozlišení objektivu a aplikovat netradiční technické řešení v oblasti mikromanipulátorů. Vyšší požadované rozlišení bylo voleno z důvodů budoucích potřeb pozorovat také katody studené emise, jejichž poloměr hrotu je mnohem menší než u termoautoemisních katod. Vyššího rozlišení lze dosáhnout imerzním objektivem, v tomto případě se jeho rozlišovací schopnost blíží až ke 2 nm. Optické schéma je znázorněné na obr. 4.1, na kterém je ve zvětšeném měřítku naznačena trajektorie průchodu elektronového svazku optickou soustavou.

Jako zdroj elektronů bude sloužit autoemisní nízkovoltová elektronová tryska, která je zdrojem elektronového svazku o energii  $U_0 = 5$  kV, s využitím bodového zdroje Shottkyho katody. Elektronový svazek pak prochází elektrostatickou rastrovací soustavou a objektivem je fokusován na vzorek. Byl navržen magnetický imerzní objektiv kombinovaný se standardním uzavřeným objektivem. Při použití uzavřeného objektivu je rastrování svazku prováděno jednopatrovým elektrostatickým systémem. Při práci s imerzním objektivem bude rastrování řízeno dvoupatrovým elektrostatickým systémem.

Obraz bude získáván zpracováním signálu detekovaných sekundárních (SE) a zpětně odražených elektronů (BSE). V komoře bude umístěn manipulátor vzorku s možností uložení minimálně 4 ks pozorovaných katod. Manipulátor se vzorky bude ovládán za pomoci piezoelektrických pohonů.



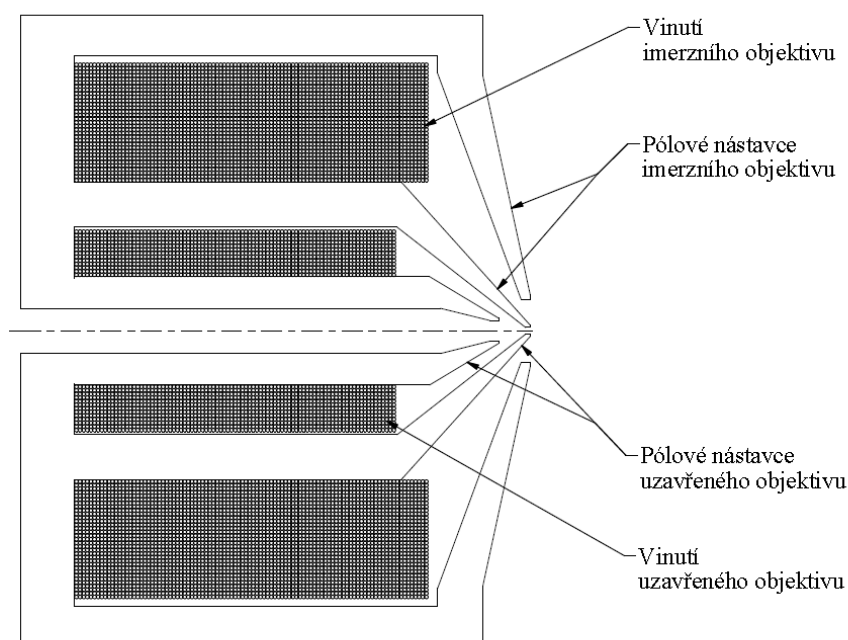
Obr. 4.1: Schéma mikroskopu s imerzním objektivem s naznačenou trajektorií elektronů ve zvětšeném měřítku.

## 4.2 ELEKTRONOVÁ TRYSKA

Zdrojem elektronového svazku bude standardní autoemisní nízkovoltová elektronová tryska společnosti Delong Instruments, a. s., která bude pracovat s urychlujícím napětím  $U_0 = 5$  kV. Bodovým zdrojem je zde Shottkyho katoda. Elektrony jsou urychlovány mezi katodou a extraktorem, elektronový svazek pak prochází anodovou clonou. Divergence svazku, tedy aperturní úhel, je formován kondenzorem, který zde představuje magnetická čočka. Změnou velikosti magnetomotorické síly, tedy velikosti proudu protékajícího cívkou, je možné měnit divergenci elektronového svazku. Centrování maximální intenzity svazku do optické osy je prováděno mechanicky změnou polohy katody. Za kondenzorem se nachází elektrostatický systém pro korekci optických vad, v tomto případě astigmatismu. Do aperturní clony tak vstupuje již korigovaný svazek.

## 4.3 OBJEKTIV MIKROSKOPU

Z důvodu získání vyššího rozlišení je aplikován imerzní objektiv v kombinaci s uzavřeným objektivem pro přehledové zvětšení s větším zorným polem a nižším rozlišením, než jakého je dosahováno s imerzním objektivem. Na obrázku 4.2 je schematicky zobrazeno uspořádání obou objektivů.



Obr. 4.2: Schematické uspořádání kombinace uzavřeného a imerzního objektivu.

Protéká-li proud menší cívkou, pracuje objektiv v režimu běžného uzavřeného objektivu. Tento režim bude využíván pro přehledové zvětšení s menším rozlišením obrazu. Při zapnutí cívce většího průměru je spuštěn imerzní objektiv, který bude využíván při menších pracovních vzdálenostech s vyšším rozlišením.

#### **4.4 MANIPULÁTOR VZORKU**

Manipulátor vzorku byl vyvíjen jak s ručním ovládním, tak i s automatizovaným ovládním za pomoci počítačem řízených piezoelektrických pohonů. Vzhledem k budoucímu vývoji mechanických komponentů byl pro testování v tomto mikroskopu vybrán návrh manipulátoru s piezoelektrickými posuvy. Ty jsou aplikovány pro pohyb v rovině kolmé k optické ose. Umístění vzorku v pracovní rovině bude zajištěno statickým přípravkem uchyceným na manipulátoru.

#### **4.5 USPOŘÁDÁNÍ VAKUOVÉHO SYSTÉMU**

Tubus mikroskopu je rozdělen oddělovacím ventilem na komoru trysky s katodou a pracovní komoru s manipulátorem vzorku. Uzavření komory trysky zabraňuje kontaminaci prostoru trysky a katody při otevření komory vzorku. Tubus mikroskopu bude čerpán turbomolekulární vývěvou s vývodem sání na dně komory s manipulátorem vzorku, komora katody bude navíc čerpána iontovými vývěvami. Získávání a udržování vakua popisuje Dubravcová [4] nebo Groszkowski [5]. Prostor komory trysky je rozdělen anodovou clonou na předkomoru a komoru s katodou, ve kterých je možné díky cloně udržovat rozdílný tlak. Dosahovaný tlak v komoře trysky se Shottkyho katodou bude přibližně  $7 \times 10^{-10}$  Torr ( $7 \times 10^{-8}$  Pa), v prostoru mezi clonou a uzavřeným ventilem  $\sim 5 \times 10^{-8}$  Torr ( $\sim 5 \times 10^{-6}$  Pa) a komora vzorku by měla být udržována na hodnotách tlaku  $\sim 1 \times 10^{-6}$  Torr ( $\sim 1 \times 10^{-4}$  Pa). Výhodou udržování vakua v trysce bude zkrácení doby čerpání komory na pracovní tlak po výměně vzorku. Bez zavzdušnění trysky není nutné opakovaně absolvovat vypěkáací proces během čerpání evakuovaného prostoru.

#### **4.6 ELEKTRONIKA A ŘÍDICÍ SYSTÉM**

Elektronická řídicí jednotka je s přístrojem vzájemně propojená pomocí počítače s ovládacím programem. Hlavní součástí elektroniky je soustava zdrojů vysokého napětí pro vytvoření elektronového svazku o maximální energii 6 keV. Dále obsahuje zdroje konstantního proudu pro vinutí kondenzoru a obou vinutí objektivu. Při poklesu tlaku v kterékoli části komory se díky vakuové ochraně uzavře pneumatický ventil, rozdělující komoru vzorku od komory trysky.

Poklesne-li tlak v komoře trysky, dojde navíc k vypnutí žhavení katody a všech vysokonapěťových zdrojů, čímž zanikne emise elektronového svazku, a zabrání se tak poškození katody. Elektronická jednotka zahrnuje ovládání stigmátoru a elektrostatickou rastrovací soustavu včetně elektroniky, zajišťující synchronizaci vychýlení svazku s akvizicí jasové informace v daném bodu. Obrazová data jsou následně zpracována softwarem, který zrekonstruuje obraz a znázorní jej na monitoru. Je zde k dispozici metoda sumačního průměrování (sumační filtrace), která spočívá v opakované akvizici každého bodu a vypočtení jeho aritmetického průměru. Šum obrazu je tím eliminován, přičemž hodnota signálu zůstane nezměněna. Tím obdržíme kvalitnější obraz, ovšem za cenu delší doby zpracování každého snímku. Ovládací software také umožňuje přepínání mezi SE a BSE detektory. V případě BSE detektoru je navíc možné volit mezi kompozitním, nebo topografickým kontrastem.

## 5 TEORETICKÉ VÝPOČTY

### 5.1 NÁVRH MAGNETICKÉHO OBVODU OBJEKTIVU

Návrh magnetického obvodu objektivu a výpočet rozlišení je nejnáročnější částí při návrhu elektronové optiky. Objektiv má největší vliv na získané rozlišení elektronového mikroskopu, proto mu byla při vývoji věnována značná pozornost. Magnetický obvod objektivu mikroskopu je předběžně stanoven zadáním, potřebnou pracovní vzdáleností a požadovaným rozlišením. Vrtání v pólových nástavcích bylo voleno s ohledem na umístění oktopólů v objektivu a vzdálenost mezi nimi byla vyvozena z výpočtů. Velikost užitečné pracovní vzdálenosti se pohybuje od 2 mm do 10 mm, tomu odpovídá daná hodnota magnetomotorické síly ve vinutí cívky, která je potřeba na zaostření elektronového svazku do dané pracovní roviny.

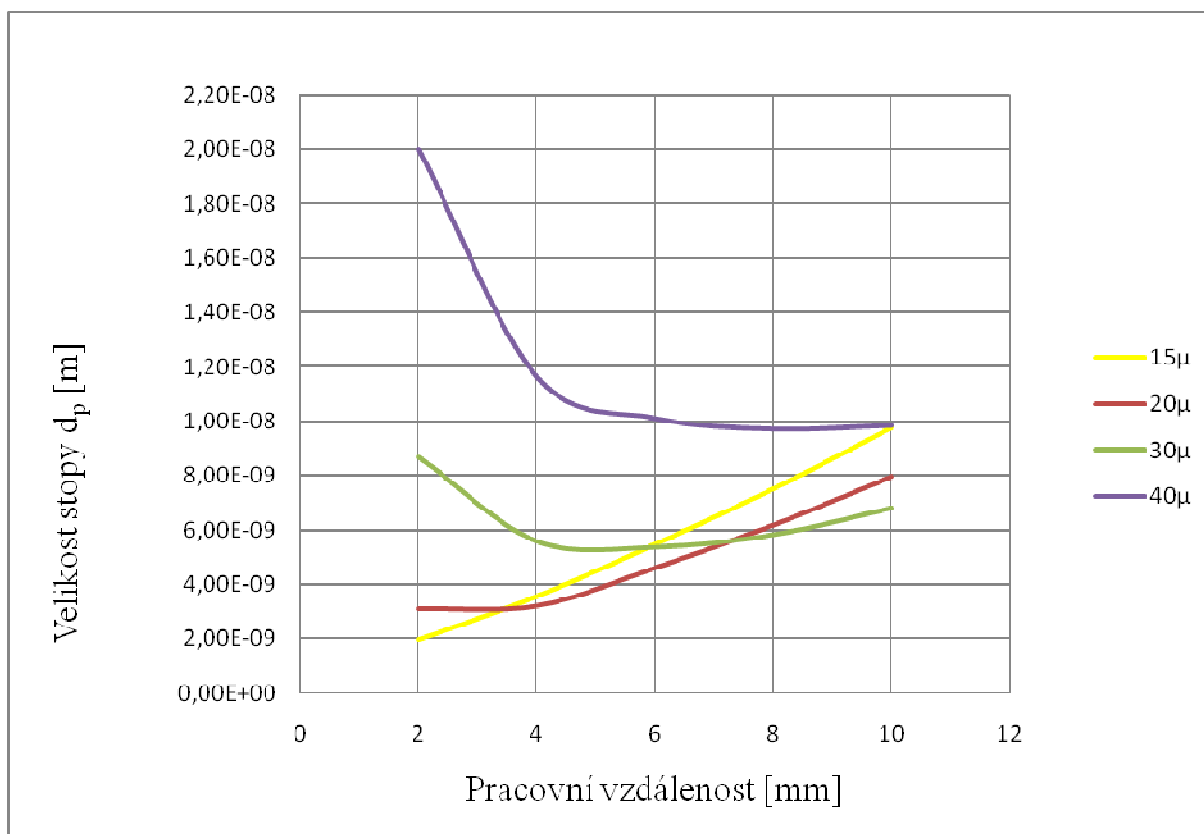
Navržení magnetického obvodu a výpočet optických vad byl proveden v programu MLD (Magnetic Lens Design) [6], založeném na principu metody konečných prvků. Data získaná v MLD byla exportována do programu ELTR (Electron Tracing) pro trasování elektronového svazku optickou soustavou. Tento program umožňuje při trasování elektronového svazku soustavou kombinovat magnetické pole s elektrostatickým. Záměrem kombinovaného návrhu objektivu bylo získat vyšší rozlišení díky vlastnostem imerzního objektivu a větší zorné pole pro přehledové zvětšení s nižším rozlišením uzavřeného objektivu pro stejnou pracovní vzdálenost. S imerzním objektivem sice získáme výhodu vyššího rozlišení, zároveň se však zkrátí pracovní vzdálenost, která nám omezuje velikost i pohyb vzorku pod objektivem. Z těchto důvodů je omezena velikost BSE detektoru, jehož tloušťka se nejčastěji pohybuje v rozmezí 0,6–1,5 mm. Další komplikace nastává při detekci elektronů. Jelikož z imerzního objektivu vystupuje magnetické pole, ve kterém se nachází vzorek, není možné použít SE detektor. Při práci imerzního objektivu bude signál získáván pouze BSE detektorem, což rovněž způsobuje komplikace. Nachází-li se vzorek v magnetickém poli, elektrony jsou odraženy zpět po stejné dráze a dochází k tomu, že většina elektronů detektor mine. Signál je tak získán pouze z elektronů odražených pod většími úhly, a má proto nižší kvalitu. Z důvodů kvalitnějšího signálu bývá užíván tzv. „in-lens“ SE detektor, umístěný uvnitř objektivu.

### 5.1.1 IMERZNÍ OBJEKTIV

Rozlišení, kterého může mikroskop dosáhnout, je ovlivněno především optickými vadami objektivu. Vady objektivu jsou závislé na konstantách sférické a chromatické vady, které jsou přibližně dány ohniskovou vzdáleností čočky. Optické vady čoček je tak možné měnit změnou ohniskové vzdálenosti, nebo vnořením vzorku do magnetického pole objektivu; takové objektivy jsou nazývány imerzními. U běžného objektivu je index lomu před objektivem a za objektivem stejný. Imerzní objektiv se liší právě tím, že indexy lomů před objektivem a za ním jsou různé. Vyšší index lomu na předmětové straně objektivu je způsoben magnetickým polem vystupujícím z pólových nástavců. Ekvivalentem ve světelné optice je použití imerzní kapaliny mezi sklíčkem preparátu a čočkou objektivu. Vzorek je umístěn v magnetickém poli imerzního objektivu a je pozorován v krátké pracovní vzdálenosti, čímž je dosaženo vyššího rozlišení mikroskopu. V případě elektronového mikroskopu s navrženým imerzním objektivem je podle teoretických výpočtů nejvyšší dosažené rozlišení  $d_p = 1,96 \text{ nm}$  pro  $15 \text{ }\mu\text{m}$  clonu a pracovní vzdálenost  $2 \text{ mm}$ . Přehled hodnot rozlišení v závislosti na pracovní vzdálenosti a při různých velikostech použitých clon je zaznamenán v tabulce 5.1 a grafické znázornění těchto hodnot ukazuje obrázek 5.3.

Pracovní vzdálenost	2 [mm]	4 [mm]	6 [mm]	8 [mm]	10 [mm]
Průměr clony					
15 $\mu\text{m}$	1,96E-09	3,56E-09	5,48E-09	7,52E-09	9,77E-09
20 $\mu\text{m}$	3,10E-09	3,22E-09	4,61E-09	6,18E-09	7,96E-09
30 $\mu\text{m}$	8,68E-09	5,59E-09	5,38E-09	5,83E-09	6,81E-09
40 $\mu\text{m}$	2,00E-08	1,16E-08	1,01E-08	9,73E-09	9,85E-09
50 $\mu\text{m}$	3,85E-08	2,17E-08	1,83E-08	1,70E-08	1,66E-08

Tab. 5.1: Rozlišení mikroskopu  $d_p$  [m] podle velikosti clony a pracovní vzdálenosti.



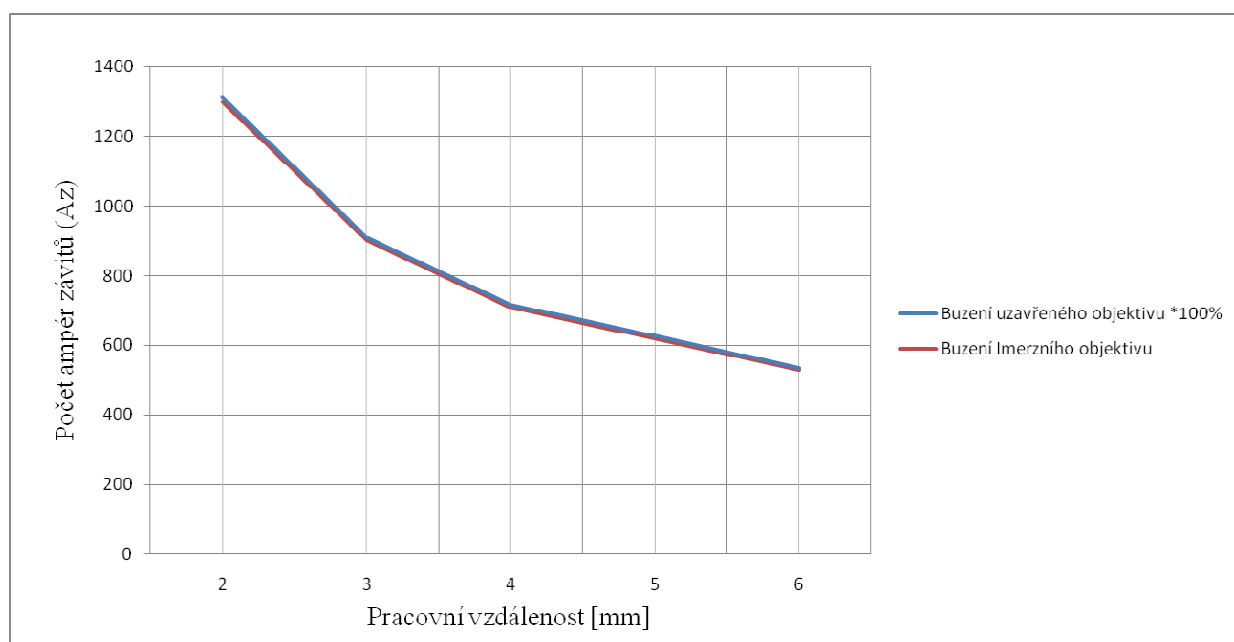
Obr. 5.3: Rozlišení mikroskopu  $d_p$  podle velikosti clony a pracovní vzdálenosti.

Pracovní vzdálenost 2 mm je nejkratší možnou vzdáleností vzorku od objektivu. Důvodem je umístění BSE detektoru mezi vzorkem a objektivem. Také zvyšováním hodnoty proudu v cívice objektivu při zaostření svazku na kratší ohniskovou vzdálenost dochází ke značnému přesycování materiálu pólových nástavců. Kratší pracovní vzdálenost by měla za následek zvýšení příkonu vinutí cívky, tím by se chlazení okolním vzduchem stalo nedostačujícím, což by vedlo k přehřátí cívky. Hodnoty koeficientů sférické a chromatické vady objektivu a přehled potřebných hodnot proudu ve vinutí pro dosažení pracovních vzdáleností je uvedeno v tabulce 5.2.

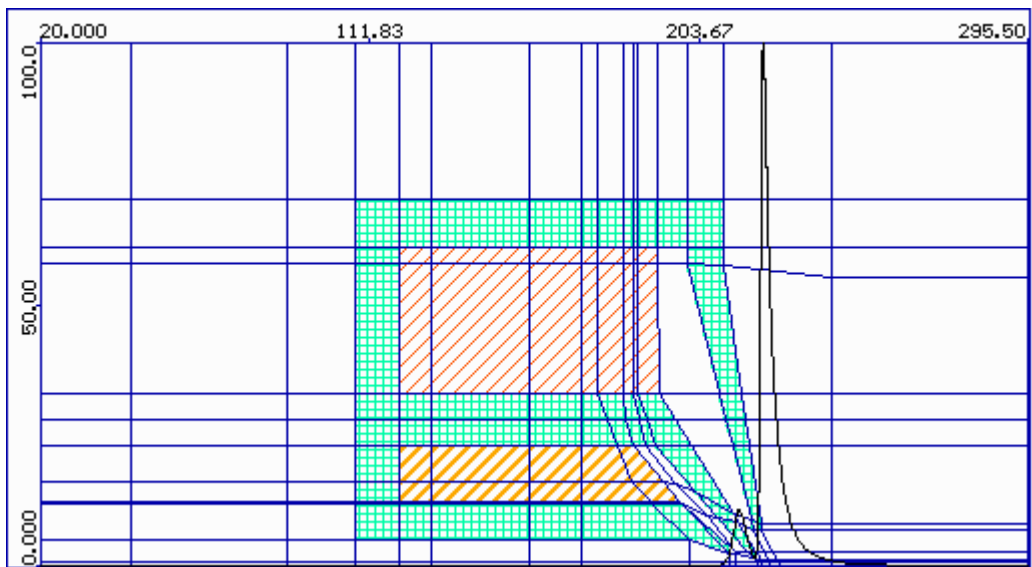
Pracovní vzdálenost [mm]	Cs [mm]	Cc [mm]	I [A]
2	1,82	1,08	0,65
4	11,1	2,64	0,45
6	36,6	4,4	0,36
8	87,3	6,3	0,31
10	183,5	8,5	0,27

Tab. 5.2: Hodnoty koeficientů sférické a chromatické vady objektivu pro dané pracovní vzdálenosti a proud protékající vinutím cívky.

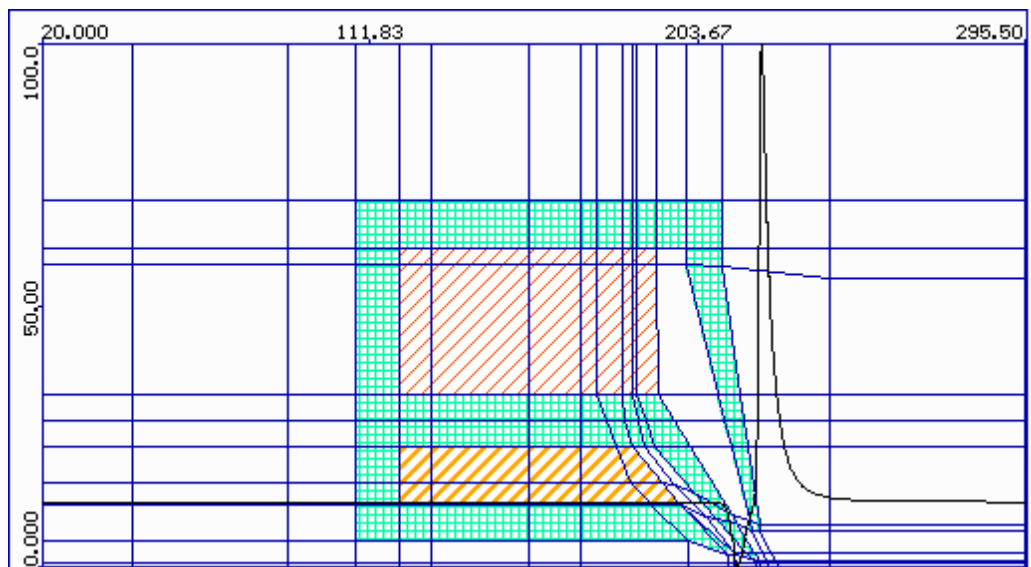
Nevýhodou kombinovaného objektivu je vznik parazitního magnetického pole na optické ose, které vzniká mezi pólovými nástavci uzavřeného objektivu při průchodu proudu ve vinutí imerzního objektivu. To je možné korigovat průchodem proudu opačné hodnoty vinutím uzavřeného objektivu, a dosáhnout tak odstranění parazitního pole. Průběh osového potenciálu je znázorněn na obrázcích 5.5, 5.6 a 5.7. V intervalu pracovních vzdáleností 2-6 mm je vyrovnávací proud v cívce uzavřeného objektivu roven přibližně 1% z hodnoty proudu protékajícího vinutím imerzního objektivu. Hodnoty obou buzení jsou vyneseny v grafu 5.4, kde je vyrovnávací proud násoben 100% pro zřetelnější srovnání obou křivek.



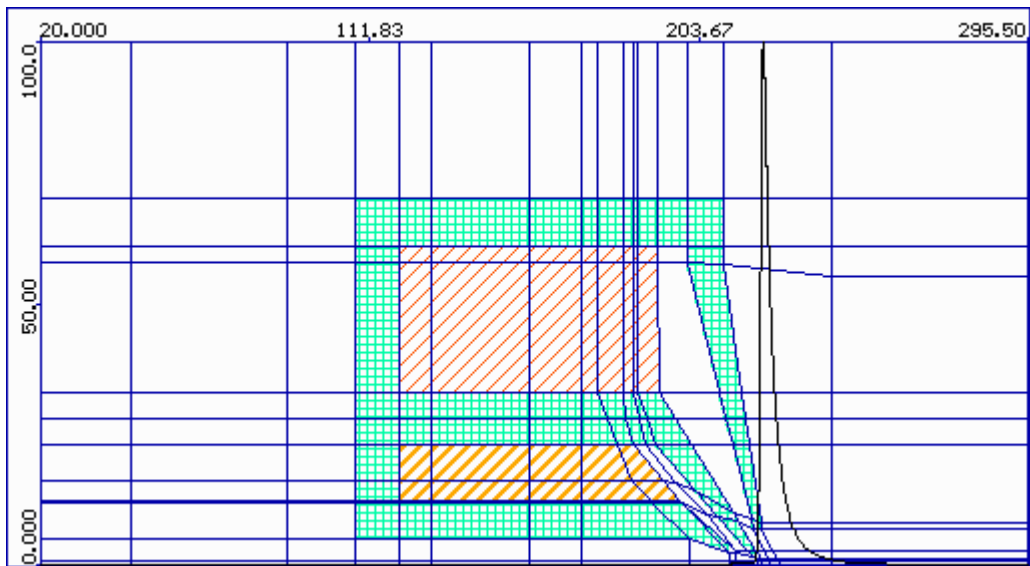
Obr. 5.4: Poměr hodnot ampéřzávitů v imerzním a uzavřeném objektivu pro dané pracovní vzdálenosti.



Obr. 5.5: Průběh potenciálu na optické ose při průtoku proudů stejných směrů cívkami.

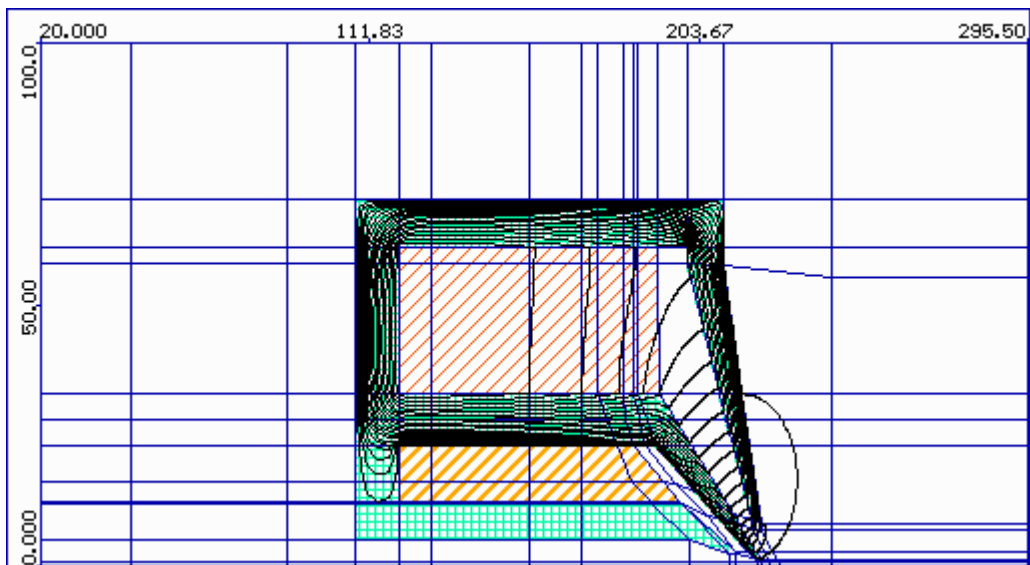


Obr. 5.6: Průběh osového potenciálu při průtoku proudů cívkami opačných směrů.



Obr. 5.7: Průběh potenciálu na optické ose při průtoku vyrovnávacího proudu cívkou.

Průběh siločar v zapnutém režimu imerzního objektivu je znázorněn na obrázku 5.8, který zachycuje vystupující magnetické pole z objektivu, které působí změnu indexu lomu před objektivem.



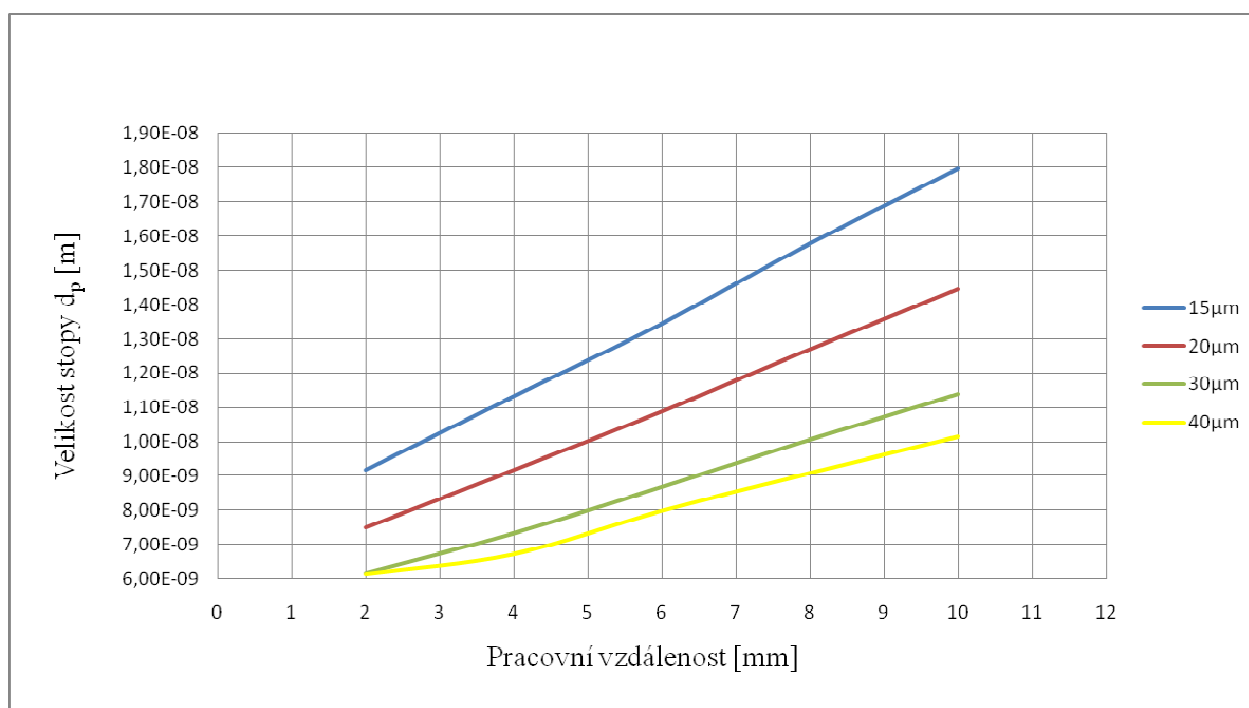
Obr. 5.8: Průběh siločar v zapnutém režimu imerzního objektivu.

### 5.1.2 UZAVŘENÝ OBJEKTIV

Navržený objektiv dosahuje nejlepšího rozlišení pro clonu o velikosti 40  $\mu\text{m}$ . Přehled hodnot rozlišení v závislosti na pracovní vzdálenosti pro různé velikosti aperturních clon je uveden v tabulce 5.3. Graficky znázorněné hodnoty tabulky zachycuje obr. 5.9. Nejvyšší získané rozlišení je dosaženo pro průměr aperturní clony 40  $\mu\text{m}$ , vyznačené žlutou křivkou.

Pracovní vzdálenost	2 [mm]	4 [mm]	6 [mm]	8 [mm]	10 [mm]
Průměr clony					
15 $\mu\text{m}$	9,18E-09	1,13E-08	1,35E-08	1,58E-08	1,80E-08
20 $\mu\text{m}$	7,48E-09	9,17E-09	1,09E-08	1,27E-08	1,45E-08
30 $\mu\text{m}$	6,17E-09	7,33E-09	8,68E-09	1,01E-08	1,14E-08
40 $\mu\text{m}$	6,15E-09	6,73E-09	7,98E-09	9,08E-09	1,01E-08
50 $\mu\text{m}$	7,94E-09	7,25E-09	8,93E-09	9,63E-09	1,03E-08

Tab. 5.3: Rozlišení mikroskopu  $d_p$  [m] podle velikosti clony a pracovní vzdálenosti.



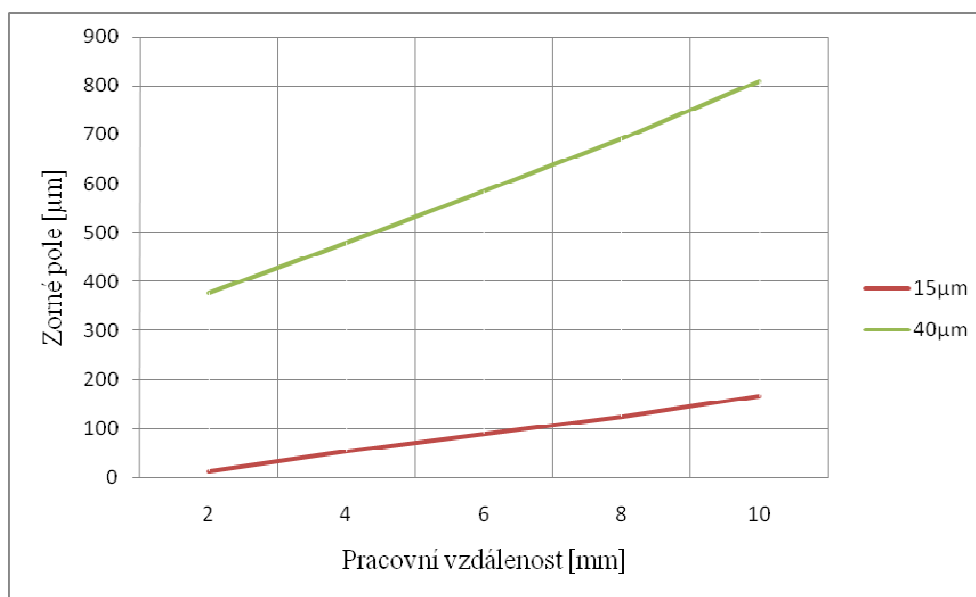
Obr. 5.9: Rozlišení mikroskopu  $d_p$  podle velikosti clony a pracovní vzdálenosti.

## 5.2 VYCHYLOVACÍ SOUSTAVA

Vychylování elektronového svazku bude prováděno elektrostatickými oktupóly. Jednopatrové rastrování bude použito pro uzavřený objektiv a dvoupatrové rastrování pro imerzní objektiv. Oktupóly dvoupatrového vychylování mají opačně orientované vychylovací pole a poměr vychylovacího napětí je určen tak, aby svazek procházel hlavní předmětovou rovinou objektivu. Teorie těchto principů je popsána například v Hawkes [7]. Velikost zorného pole se pro každý objektiv liší. Imerzní objektiv dosahuje vyššího rozlišení při malé pracovní vzdálenosti, zato zorné pole bude v porovnání s uzavřeným objektivem menší. Při energii elektronového svazku 5 kV a dosaženém rozlišení 2 nm s imerzním objektivem je očekávané zorné pole 15x15  $\mu\text{m}$ . Pro pozorování s uzavřeným objektivem bude zorné pole 850x850  $\mu\text{m}$  při dosaženém rozlišení 6 nm. Obě hodnoty zorného pole jsou platné pro 80% dopadajícího proudu ve stopě elektronového svazku. Přehled velikostí zorného pole pro další pracovní vzdálenosti je zaznamenán v tabulce 5.4 a graficky na obr. 5.10.

Pracovní vzdálenost [mm]	2	4	6	8	10
Zorné pole [ $\mu\text{m}$ ] imerzní objektiv	15	53	90	125	166
Zorné pole [ $\mu\text{m}$ ] uzavřený objektiv	378	480	585	693	810

Tab. 5.4: Velikost zorného pole pro různé pracovní vzdálenosti.

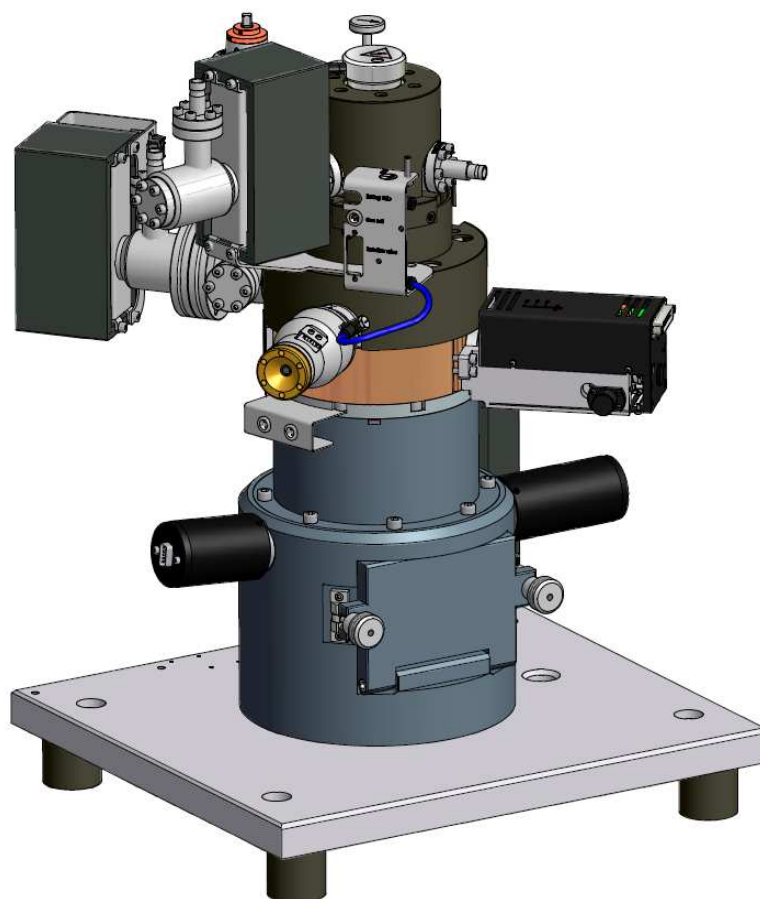


Obr. 5.10: Hodnoty vypočteného zorného pole pro dané pracovní vzdálenosti.

## 6 TECHNICKÉ ŘEŠENÍ

Technické řešení mikroskopu se odvíjí od teoretického návrhu magnetického obvodu. Z výpočtů jsou dány polohy optických komponent, jako je katoda, clona a objektiv s vychylovací soustavou. Nejzákladnějším rozměrem pro výchozí návrh konstrukce je velikost objektivu. Od samotného počátku byl při výpočtu brán ohled na připojovací rozměry elektronové trysky a objektiv byl koncipován tak, aby byl kompatibilní pro připojení těchto dílů. Dalším členem je aperturní clona, umístěná v poloze s neoptimálnějším rozlišením. Jako aperturní clona bude používána pásková clona s několika velikostmi otvorů, které umožní změny aperturního úhlu. Protože by poloha clony nebyla technicky řešitelná, v navržené vzdálenosti od katody byl mezi trysku a objektiv vložen chladicí měděný člen. Tím bude umožněno použití pohyblivé clony a z cívky bude lépe odváděno nežádoucí teplo, aby nedocházelo k přehřívání objektivu. Na rozměry objektivu navazovalo řešení komory, umístění manipulátoru vzorku a detektorů. Manipulátor je pohyblivý pouze v rovině kolmé (x, y) k optické ose. Nelze tedy měnit polohu manipulátorem vzorku v optické ose (v ose z) kontinuálně během provozu mikroskopu. Pracovní rovinu lze měnit během pozorování pouze přeastřováním objektivu. Polohu vzorku v optické ose je možné nastavit pomocí přípravku, do kterého je vzorek upnut. Vodorovný pohyb manipulátoru bude prováděn piezoelektrickými pohony. Přístup k manipulátoru a výměna vzorků je umožněna otvorem na válcové straně komory mikroskopu. Víko je opatřeno drážkou pro těsnění, které na těsnící plochy víka a komory dotlačují dvě odklopné matice, uchycené na komoře mikroskopu. Prostor komory bude čerpán turbomolekulární vývěvou skrze otvor na dně komory. Pro dosažení potřebného vakua bude k udržení pracovního tlaku využíváno iontových vývěv.

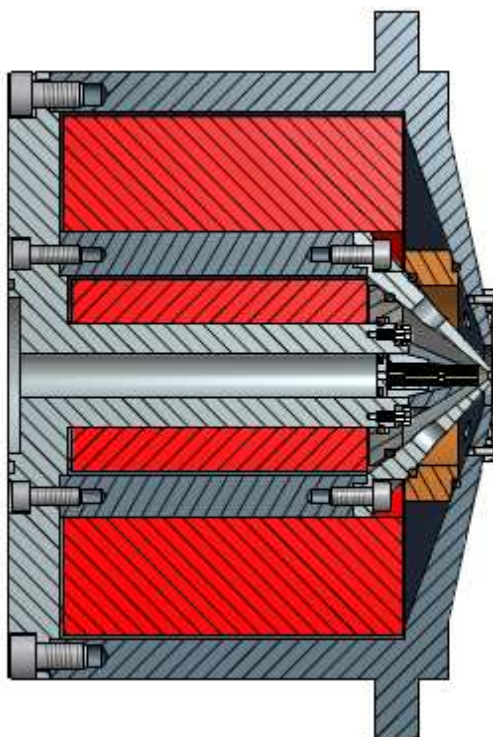
Na obrázku 6.11 je zobrazen model sestavy kompletního mikroskopu, kde jsou viditelné čtyři základní části, z nichž se mikroskop skládá. Nejvýše polohovaná část je tryska s iontovými vývěvami, uložená na chladícím bloku, na jehož pravé straně se nachází ovladač aperturní clony. Objektiv je usazený na komoře, na níž lze z bočních stran pozorovat výstupy SE a BSE detektorů. Přístroj je uchycen k nosné desce s otvorem pro připojovací přírubu turbomolekulární vývěvy. Deska bude usazena na stole, na čtyřech nohách. Ty jsou tvořeny silentbloky, které slouží k utlumení vibrací okolního prostředí. Na stole s mikroskopem bude umístěna i řídicí elektronika, která bude připojena k počítači s instalovaným ovládacím softwarem.



Obr. 6.11: Sestava rastrovacího elektronového mikroskopu.

## 6.1 OBJEKTIV

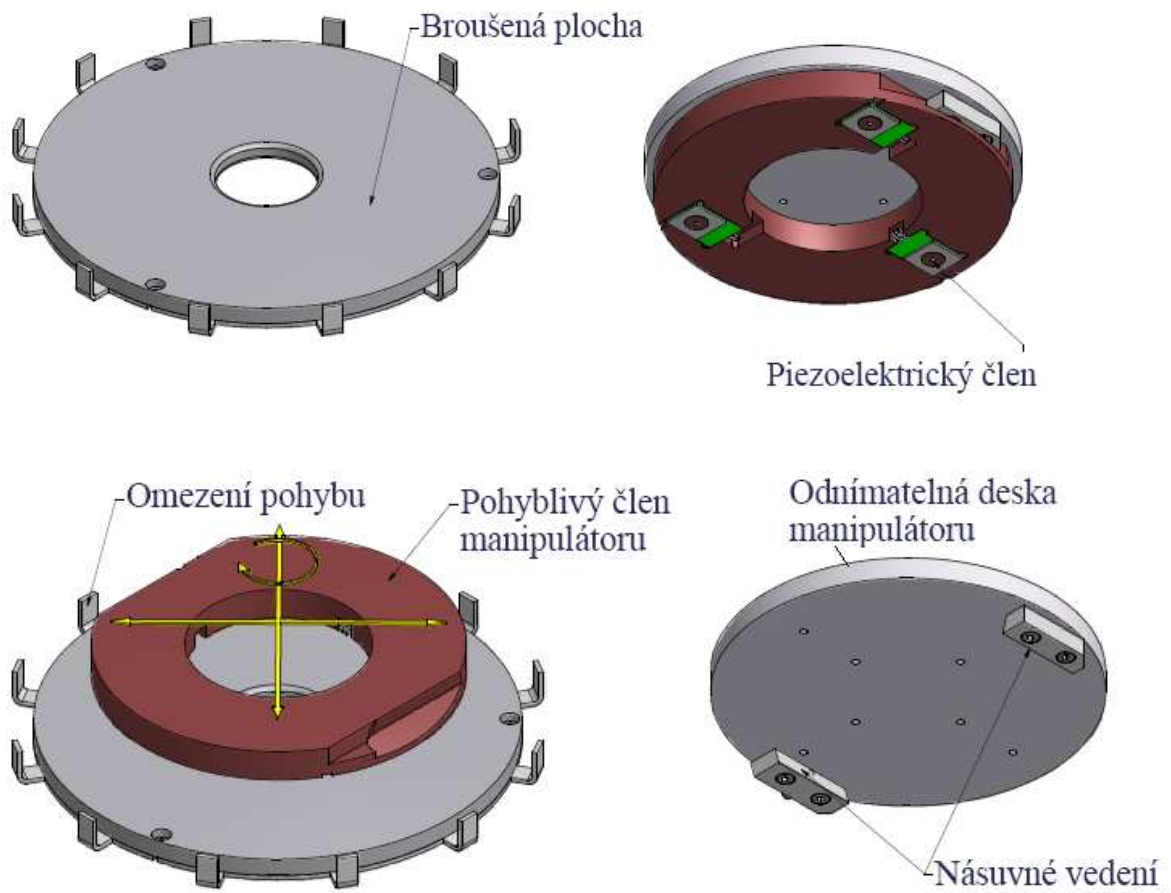
Většina objektivů je složena ze dvou kusů, z vnitřního a vnějšího pólového nástavce. Kombinovaný objektiv má poměrně složitý tvar a je nutné vyrobit jej z více dílů. Celkem je objektiv složený z pěti kusů, navzájem spojených šrouby. Rotační optické díly vyžadují vysokou přesnost výroby, aby byla zaručena souosost všech optických hran s optickou osou. Každá nepřesnost optických prvků a centrovacích ploch se odráží v kvalitě homogenity magnetického pole, což se projeví na vlastnostech získaného obrazu. Složený objektiv znázorňuje obrázek 6.12, kde lze vidět, jakým způsobem je objektiv rozdělen. Vnější pólový nástavec je vyroben z jednoho kusu a oba vnitřní pólové nástavce jsou rozděleny na jednodušší válcovou část a zužující se nástavce. Na válcových plochách je nasunuto vinutí cívek uzavřeného i merzního objektivu. Cívky budou samonosné, zalité epoxidem. Stykové plochy mezi magnetickým obvodem a vinutím budou natřeny tepelně vodivou látkou, která slouží k lepšímu odvodu tepla při průchodu proudu cívkami. Vinutí cívek bude od vakuové části izolováno těsněním a přívod proudu vyveden válcovou stranou objektivu s konektory.



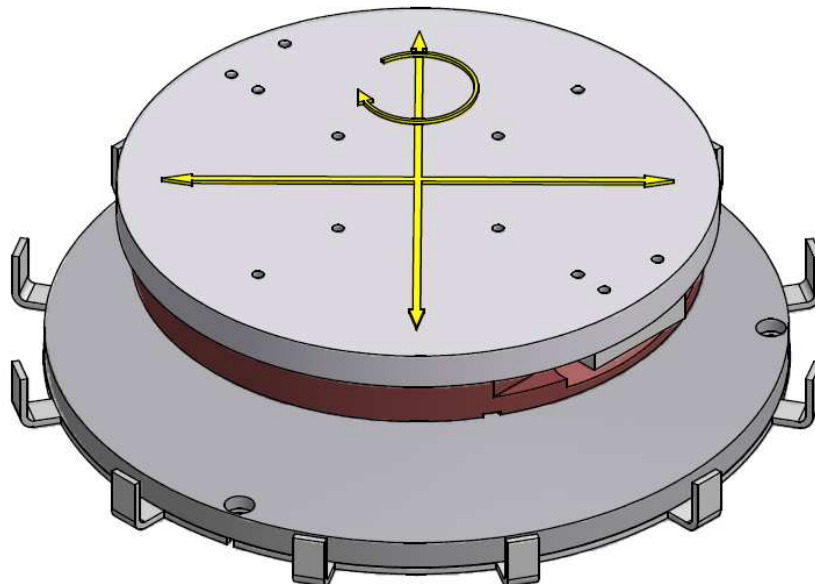
Obr. 6.12: Řez složeným objektivem mikroskopu.

## 6.2 MANIPULÁTOR S PIEZOELEKTRICKÝM POSUVEM

Manipulátor se skládá z pohyblivé a statické části. Statická část je umístěna v ose mikroskopu v dostatečné vzdálenosti nad čerpacím otvorem. Jedná se o broušenou kruhovou desku s dorazem posuvu (obr. 6.13 vlevo nahoře). Broušená deska slouží jako základna, po které jezdí manipulátor, hnaný piezoelektrickými posuvy, s odnímatelnou upínací deskou pro vzorek (obr. 6.13 vpravo nahoře). Elektrické připojení piezoelektrických pohonů je vedeno středem broušené desky, což způsobuje omezení rotace se vzorkem kolem optické osy. Naznačení pohybů ukazuje obrázek 6.14, kde je znázorněn složený manipulátor. Přestože byl navržen manipulátor s možností pohybu i v optické ose a v rovině k ní kolmé, byl zvolen popsany systém z důvodu snížení nežádoucích vibrací, které by mohly být znatelné obzvláště při práci ve vysokorozlišovacím módu. Také z hlediska budoucích vývojových trendů se získané zkušenosti s tímto typem pohonu jeví jako velmi užitečné.



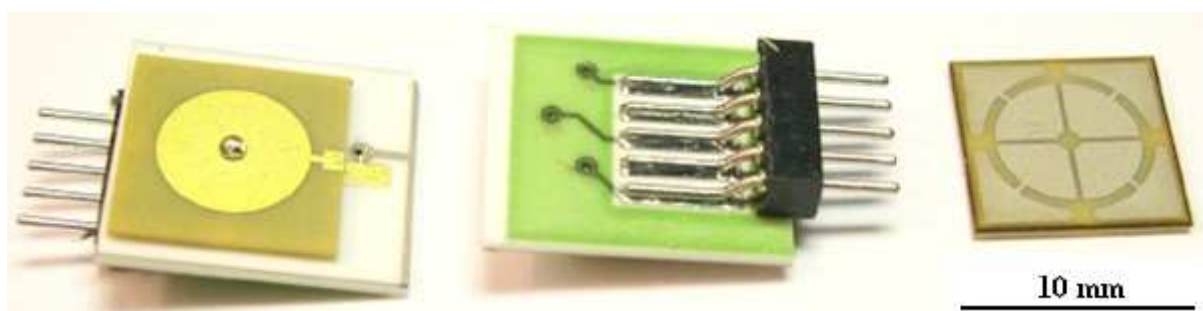
Obr. 6.13: Manipulátor vzorku s piezoelektrickými pohony typu „push-pull“.



Obr. 6.14: Pohled na složený manipulátor s naznačenými pohyby.

Na obrázku 6.15 je ukázán akční člen pohonů nazývaný MPA (Monolithic Piezoactuators). Pohony jsou složeny ze tří prvků MPA. Substrát těchto prvků je piezokeramický materiál polarizovaný ve svislém směru, jehož spodní strana je uzemněna. Na horní ploše je nanášena kruhová elektroda, rozdělená do čtyř kvadrantů. Uprostřed těchto kvadrantů je nalepena safírová kulička, která má funkci stykového členu s podložkou, po níž dochází k pohybu. Vývoji těchto pohonů je věnován evropský projekt Golem [8]. O principech těchto pohonů je detailněji pojednáno například v [9, 10].

Popsané uspořádání umožňuje pohyb založený jak na principu „stick-slip“, tak i na principu „push-pull“. Při pohonu typu „push-pull“ jsou na elektrody přiváděny sinusové signály, které jsou vzájemně posunuty o  $90^\circ$ . Safírové kuličky tak opisují při pohybu dráhu elipsy a pohon je díky tomu schopen (v závislosti na amplitudě a frekvenci přivedených napětí na elektrody) pohybovat deskou se vzorkem vysokou rychlostí, nebo naopak generovat extrémně malé kroky. Pohony využívají principu tření na stykových plochách safírové kuličky a kluzné plochy, čímž je samozřejmě ovlivněna opakovatelnost přesného polohování na základě přivedených signálů. Nerovnost i opotřebení materiálu, stejně jako velikost zatěžující hmotnosti, má vliv na práci pohonů. Z hlediska přesnosti opakování polohy je vhodnější volbou sledování reálné polohy preparátu. Testováním pohonů, které budou využívány pro řešení mikroskop, byla určena optimální váha hybného členu přibližně 200g. Hmotnost má vliv na setrvačnost pohybu, na jeho rychlost a velikost kroku. Rychlost je v tomto případě přibližně 3 mm/s a velikost kroku v jednotkách nanometrů.



Obr. 6.15: Piezoelektrické pohony typu „push-pull“[9].

## 7 DISKUSE VÝSLEDKŮ

Pro výpočet rozlišení byly aplikovány algoritmy popsané v Barthovi [11]. Hodnoty rozlišení byly získány pro 80% dopadajícího svazku v elektronové stopě. Rozlišení přístroje bylo nejvíce ovlivněno volbou elektronového zdroje, polohou a velikostí clony a návrhem objektivu. Jako elektronový zdroj byla zvolena autoemisní tryska pracující s urychlujícím napětím do 6 kV. Výhodou trysky je možnost regulace divergence elektronového svazku magnetickou cívkou, která slouží jako kondenzorová čočka. Z velikosti virtuálního zdroje osvětlení (15-20 nm) vyplývá, že výsledné rozmezí rozlišení se bude pohybovat v jednotkách nanometrů. Výsledné hodnoty rozlišení v tabulce 5.1 a 5.3 potvrzují předpokládané výsledky výpočtů u obou objektivů pro daný rozsah pracovních vzdáleností. Dosažené rozlišení s rezervou splňuje požadované rozlišení, které mělo být menší než 10 nm.

Je zřejmé, že návrh magnetického obvodu uzavřeného objektivu je standardně používaný objektiv, který popisuje například Delong [12]. Objektiv v imerzním módu by měl dosáhnout nejvyššího rozlišení  $d_p = 1,96$  nm pro 15  $\mu$ m clonu v pracovní vzdálenosti 2 mm. Zaostření do menší pracovní vzdálenosti by vedlo k přesycení pólových nástavců a ke zvýšení příkonu vinutí, což by mělo nežádoucí vliv na funkci mikroskopu. Předností kombinovaného objektivu může být také možnost volby přehledového a vysokorozlišovacího módu pozorování pro stejnou pracovní vzdálenost. Hustota proudu v elektronovém svazku je ovlivněna velikostí aperturní clony. Omezení svazku menším průměrem clony logicky vede ke snížení hustoty proudu v elektronové stopě. Ne vždy je prioritou získat jen nejvyšší rozlišení, v některých případech záleží více na vyšší hustotě proudu v elektronovém svazku. Výhodou je schopnost změny velikosti aperturního úhlu za provozu, a to díky aplikaci páskové clony s několika různými průměry apertur.

Díky magnetickému poli před objektivem je detekce signálu u imerzních objektivů mnohem komplikovanější než u běžných objektivů. Elektronky se od vzorku pohybují zpět do objektivu po stejné trajektorii (Tssuno [13]). Implementací „in-lens“ detektorů je možné získat kvalitnější signál. V tomto případě bude pro funkci imerzního objektivu použit pouze BSE detektor, umístěný na konci pólových nástavců, a to z důvodů usnadnění výroby. Simulace trajektorie elektronů prokázala, že detekce BSE detektorem bude možná, i když za cenu nižší kvality získaného signálu. Konstrukční návrh sestavy mikroskopu a jednotlivých dílů byl podmíněn především nízkými náklady na výrobu. Jednoduchý design a nenáročné konstrukční prvky jsou v souladu se záměrem funkčnosti mikroskopu jako jednoúčelového přístroje. Nabízí se jistě více možností konstrukčního řešení mikroskopu i technicky dokonalejších systémů, které jsou uplatňovány u sériově

vyráběných mikroskopů. Mezi nové trendy bezpochyby patří řešení manipulátoru s piezoelektrickými posuvy typu „push-pull“ [9]. Manipulátor zajišťuje pohyb v rovině kolmé na optickou osu a částečnou rotaci kolem optické osy. Rozsah posuvů je omezen pouze velikostí komory. Piezoelektrické pohony je možné řídit softwarově, což bude jistě přínosem při automatizovaném řízení. U manipulátoru není možný posuv v optické ose. Tento zdánlivý nedostatek bude řešen různou výškou podstavců vzorků uložených na desce manipulátoru. Zaostření pozorované roviny tak bude řízeno buzením objektivu. Z inovativního hlediska je jistě implementace piezoelektrických posuvů a jejich další vývoj v elektronové mikroskopii přínosem.

## 8 ZÁVĚR

Disertační práce se věnuje vývoji rastrovacího elektronového mikroskopu od návrhu magnetického obvodu objektivu a simulací trajektorie elektronu v soustavě až po konstrukční řešení kompletního přístroje. Mikroskop je vyvíjen především pro pozorování Shottkyho katod během procesu výroby. Zcela původním řešením této práce je návrh magnetického obvodu objektivu. Magnetický objektiv je kombinací dvou vinutí a tří pólových nástavců. Objektiv tak může pracovat ve dvou režimech, a to jako imerzní a standardní uzavřený. Návrh byl proveden za pomoci programů MLD (Magnetic Lens Design) a ELTR (Electron Tracing). Podle simulací trajektorie elektronu optickou soustavou a popsáných výpočtů rozlišení elektronového mikroskopu byl proveden optimalizovaný návrh objektivu. K rastrování elektronovým svazkem byl zvolen elektrostatický rastrovací systém. Rastrování touto soustavou poskytuje dostatečně velké zorné pole pro pozorování v celém rozsahu pracovních vzdáleností.

Magnetický obvod a optické schéma se staly předlohou pro vypracování koncepce konstrukčního řešení elektronového mikroskopu. V programu Autodesk Inventor byla detailně vymodelována sestava mikroskopu a vyhotovena kompletní technická dokumentace, která je podkladem pro výrobu. Pro pohyb manipulátoru vzorku budou využívány piezoelektrické pohony typu „push-pull“, a polohování tak bude řízeno za pomoci softwaru. Manipulátor poskytuje pohyb vzorku pouze v jedné rovině a umožňuje částečnou rotaci kolem optické osy. Detekce elektronů bude prováděna BSE a SE detektorem podle použitého pracovního módu mikroskopu. Obraz bude následně zpracován softwarem, který je součástí řídicí jednotky.

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] LOUIS, B.: Sur la fréquence propre de l'électron, Électro-optique, Note de M. Louis de Broglie, présentée par M. M. de Broglie, (duben 2009), (<http://home.tiscali.nl/physics/>).
- [2] H. Busch: Über die Wirkungsweise der Konzentrierungsspule bei der Braunschen Röhre. Arch. Elektrotech. 18 (1927) 583-594 (Jena, Physikalisches Institut März 1927).
- [3] RUSKA, E.: The Development of the electron microscope and of electron microscopy, Nobel lecture, Max-Eyth-Strasse 20, D-1000 Berlin 33, December 8, 1986.
- [4] DUBRAVCOVÁ, V.: Vákuová a ultravákuová technika, vydavateľstvo ALFA, Bratislava 1992.
- [5] GROSZKOWSKI, J.: Technika vysokého vákua. SNTL, Praha 1981.
- [6] LENCOVÁ, B.: Software for particle optics computations, Program packages MLD and ELD, User manual, Institute of Scientific Instrument Academy of Sciences of the Czech republic, Brno 2002.
- [7] HAWKES, P. W.; KASPER, E.: Principles of electron optics: Applied Geometrical Optics, Academic press, London 1996.
- [8] <http://www.golem-project.eu>
- [9] [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=33904](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=33904)
- [10] HOLUB, O., CIMPRICH, T., Ferreira, A., Hurák, Z., Breguet, J., M.: Dynamical Modelling and Position Control of Ultrasonic Piezoelectric Positioning Stage. In: 2006 IEEE International Ultrasonics Symposium, 2006.
- [11] BARTH J. E., KRUIT P.: Additon of different contributions to the charged partikcle probe size. Delft University of Technology, Department of Applied Physics, Delft, The Netherlands. 101. No. 3 (1996) 101-109, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart.
- [12] DELONG, A.; DRAHOŠ, V.: Praktická elektronová mikroskopie, Nakladatelství Československé akademie věd, Praha 1958.
- [13] TSUNO, K., HANDA, H., MATSUMOTO, S., MOGAMI, A.: Optical properties of immersion objective lenses and collimation of secondary electrons in low voltage SEM, JEOL Ltd., 1-2, Musashino 3-chome, Akishima, Tokyo 196. Japan.

## AUTOROVY PUBLIKACE

[1] CHMELÍK, R.; LOVICAR, L.; KOLMAN, P.; SPOUSTA, J.; FORET, Z.: Polychromatic coherent transfer function for a low-coherence interference microscope with achromatic fringes, Focus on Microscopy 2005 - Jena, Germany. March 20-23, 2005. Appendix to the abstract book., pp. 120-120, (2005).

[2] FORET, Z.: Návrh konstrukčně zdokonalené verze reflexního holografického konfokálního mikroskopu, FSI Junior Konference 2005, FSI VUT v Brně, ISBN 80-214-3365-6, s. 63-66, 2005.

[3] FORET, Z.: A New set-up of a Reflective Holographic Confocal Microscope}, Junior scientist Conference 2006, Vienna University of Technology, Vienna, Austria, ISBN 3-902463-05-8, April 2006.

[4] JANEČKOVÁ, H.; KOLMAN, P.; VESELÝ, P.; CHMELÍK, R.; LOVICAR, L.; FORET, Z. Low-coherence holographic microscopic imaging: characteristics and time lapse recording, infocus Magazine, Vol. 42, ISSN 1750-4740, Royal Microscopical Society.

[5] KOLMAN, P.; JANEČKOVÁ, H.; CHMELÍK, R.; VESELÝ, P.; LOVICAR, L.; FORET, Z.: In vitro Dynamic Observations in a Low-Coherence Holographic Microscope, 15th Czech-Polish-Slovak Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics, pp. 66090 M-66096, ISBN 978-08-1946-748-5, (2007), SPIE-The International Society for Optical Engineering.

[6] LOVICAR, L.; CHMELÍK, R.; KOMRSKA, J.; MATOUŠKOVÁ, V.; KOLMAN, P.; FORET, Z.: Some factors that affect the surface measurement accuracy of a low-coherence interference microscope, 15th Czech-Polish-Slovak Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics, pp. 660913-660919, ISBN 978-08-1946-748-5, (2007), SPIE-The International Society for Optical Engineering.

## CURRICULUM VITAE

### Osobní údaje

Jméno a příjmení, titul: Zdeněk Foret, Ing.  
Datum a místo narození: 24. července 1977 v Brně  
E-mail: zdenek.foret@post.cz

### Pracovní zkušenosti

2006 - *Delong Instruments a. s.*, vývojový pracovník elektronové optiky  
a vakuové techniky  
[www.dicomps.com](http://www.dicomps.com)

### Vzdělání

2003 - Postgraduální studium na FSI VUT v Brně  
obor: Fyzikální a materiálové inženýrství

1997 – 2003 Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně  
obor: Přesná mechanika a optika

1994 – 1997 SPŠ strojnická, Sokolská 1, Brno

1991 – 1994 SOU strojnické, Příční 1, Brno  
obor: obráběč kovů – frézař

### JAZYKOVÉ ZNALOSTI

angličtina, francouzština – aktivně  
němčina, ruština, španělština – pasivně

### PRAXE A STÁŽE, CERTIFIKÁTY

2009 (leden – březen): Manažerská akademie I. - certifikát  
2003 (srpen – září): Pracovní stáž ve Švýcarsku, kanton Bern.

### ZNALOSTI

Uživatelská znalost PC + AutoCAD, Inventor – aktivně (CATIA, Solidworks, Pro/Engineer)  
Znalosti ELD a MLD programů pro výpočet elektrostatických a magnetických čoček.

## ABSTRAKT

Elektronová mikroskopie se stala nepostradatelnou složkou v mnoha vědních oborech, kde napomáhá k novým objevům. Samotná mikroskopie je stále rozvíjena a jsou překonávány limity, jež se zdály být nepřekonatelné. Přístroje se stávají uživatelsky pohodlnější a jejich mobilita umožňuje flexibilní použití v terénu.

**Předmětem této práce je návrh rastrovacího elektronového mikroskopu, výpočet magnetického obvodu imerzního objektivu kombinovaného s uzavřeným objektivem, teoretický výpočet rozlišení mikroskopu a konstrukční návrh řešení mechanické části mikroskopu s manipulátorem vzorku.**

Disertační práce pojednává o rozvoji elektronové mikroskopie a stručně shrnuje vývoj od samého počátku až do současnosti. Dále se také zabývá elektronovými zdroji, zvláště pak Shottkyho katodou, která má být hlavním předmětem pozorování navrženým přístrojem. Práce obsahuje popis výpočtu rozlišení mikroskopu. Je popsán výpočet rozlišení jako funkce rozložení hustoty proudu. Neméně zajímavou oblastí, které se dotýká teoretická část, je detekce signálu, popis několika druhů detektorů a možné zpracování signálu.

Řešení disertační práce zahrnuje popis koncepce navrženého skenovacího elektronového mikroskopu s vysvětlením rozdělení funkce kombinovaného objektivu. Optické schéma ukazuje uspořádání elektronové optiky a rozdělení tlaku v komoře mikroskopu. Teoretická část se věnuje návrhu magnetického obvodu objektivu a výpočtu rozlišení mikroskopu pro daný rozsah pracovních vzdáleností. Objektiv byl navržen s možností práce ve dvou módech, jako imerzní a uzavřený objektiv. Vychylovací systém je rozdělen též do dvou módů, a to jako jednopatrové vychylování pro uzavřený objektiv a dvoupatrové pro imerzní. K detekci signálu bude využito detektorů pro sekundární elektrony (SE) a zpětně odražené elektrony (BSE).

Konstrukční ztvárnění mikroskopu je další obsáhlou částí, která zachycuje nejdůležitější konstrukční části mikroskopu. Obsahem technického řešení je trojrozměrný počítačový model, vytvořený v programu Autodesk Inventor, který zahrnuje i manipulátor vzorku poháněný piezoelektrickými posuvy.