

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 179

ISSN 1213-418X

Bohumila Lencová

**OPTIKA NABITÝCH ČÁSTIC
- OKNO DO NANOSVĚTA**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství

Doc. RNDr. Bohumila Lencová, CSc.

**OPTIKA NABITÝCH ČÁSTIC
- OKNO DO NANOSVĚTA**

OPTICS OF CHARGED PARTICLES
– a WINDOW TO NANOWORLD

TEZE PŘEDNÁŠKY K PROFESORSKÉMU JMENOVACÍMU ŘÍZENÍ
V OBORU
„APLIKOVANÁ FYZIKA“



BRNO 2005

KLÍČOVÁ SLOVA

Optika nabitých částic, výpočet elektromagnetického pole, metoda konečných prvků, počítačový návrh přístrojů, elektronová a iontová mikroskopie a litografie

KEY WORDS

Optics of charged particles, computation of electromagnetic field, finite element method, computer aided design of instruments, electron and ion microscopy and lithography

© Bohumila Lencová, 2005

ISBN 80-214-3007-9

ISSN 1213-418X

OBSAH

1	Zobrazení pomocí svazků nabitých částic a technologické aplikace	5
2	Výpočty pro částicovou optiku	7
2.1	Výpočty elektromagnetických polí pro částicovou optiku.....	7
2.2	Výpočty optických vlastností	8
2.3	Započtení interakce ve svazku	9
2.4	Programy a uživatelské rozhraní	9
3	Návrhy mikroskopů a litografů	10
3.1	Starší návrhy v ÚPT	10
3.2	Přesnost výpočtu magnetického pole	10
3.3	Korektory	12
3.4	Elektrostatika.....	14
4	Výuka částicové optiky v oboru Fyzikální inženýrství FSI VUT	16
5	Závěr.....	17
	Literatura	18
	Poděkování	20
	Abstract	21

Bohumila Lencová je vedoucí vědeckou pracovnící na Ústavu přístrojové techniky AV ČR a docentkou na Ústavu fyzikálního inženýrství FSI VUT v Brně. Narodila se 22. ledna 1950 v Prostějově, po maturitě na SVVŠ ve speciální třídě s matematicko-fyzikálním zaměřením v Brně na Křenové 36 studovala v letech 1968-73 na Přírodovědecké fakultě University J. E. Purkyně v Brně (dnes Masarykova univerzita) obor fyzika pevných látek. Během studia pracovala půl roku jako pomocná vědecká síla na Ústavu fyzikální metalurgie ČSAV, dva roky na Přírodovědecké fakultě v konzultačním cvičení fyziky a tři roky na Ústavu přístrojové techniky ČSAV, kde také vypracovala diplomovou práci *Studium povrchů pevných látek pomocí Augerovy spektroskopie*. Po skončení vysokoškolského studia byla přijata ke studijnímu pobytu na ÚPT ČSAV, od roku 1976 zde byla zaměstnána jako odborný pracovník. V roce 1979 na UP v Olomouci získala titul doktor přírodních věd s dizertací *Uplatnění metody konečných prvků v elektronové optice*. Od roku 1982 byla přijata do aspirantury na FE VUT v Brně, kterou ukončila v roce 1988 obhájením dizertace na téma *Metody elektronové optiky pro elektronovou litografii*. V roce 1998 se habilitovala na FSI VUT v Brně v oboru *Fyzika* s habilitační prací *Electrostatic Lenses*. V letech 1988-1997 pobývala často v zahraničí, z toho 3,5 roku byla zaměstnána jako vědecká pracovnice na TU Delft.

Její odborná a vědecká činnost je zaměřena na problematiku optiky nabitých částic, publikovala 33 článků v recenzovaných časopisech a přes 40 příspěvků na mezinárodních konferencích. Práce nacházejí odezvu v mezinárodní vědecké komunitě, SCI uvádí více jak 130 citací. Byla pozvána k přednáškám na evropských konferencích elektronové mikroskopie (1988 York, 1992 Granada), světovém kongresu mikroskopie v roce 1994 v Paříži a na mezinárodních konferencích v roce 1995 ve Vysokých Tatrách a v roce 2001 v Barceloně. Získala dva zahraniční granty (cestovní grant Royal Society v letech 1996-1997 a Nano-FIB v letech 2002-4 v rámci 5. rámcového programu). Byla řešitelkou grantu GA AV v letech 1998-2000 a spoluřešitelkou grantů T. Šikoly z FSI VUT a M. Lence z PřF MU; v současnosti spolupracuje na 3 grantech řešitelů z ÚPT AV ČR. Po tři období je členkou vědecké rady ÚPT AV ČR (v letech 1994-7 jako její předsedkyně), od roku 2002 je členkou Sněmu AV, od roku 2005 členkou Rady AV ČR pro spolupráci s vysokými školami a přípravu doktorandů. Česky napsala, spolu s M. Lencem, dva přehledové články do série *Metody analýzy povrchů*, v roce 1996 pro díl *Elektronová mikroskopie a difrakce* a v roce 2002 pro díl *Iontové, sondové a speciální metody* (vydala Academia, Praha) s tematikou optiky nabitých částic. Práce *Electrostatic Lenses* vyšla v roce 1997 jako kapitola knihy *Handbook of Charged Particle Optics* v CRC Press v USA.

Pedagogické činnosti se mohla věnovat až na TU Delft, kde také vedla diplomovou práci G. Wisselinka (1990) a konzultovala práci M. van der Stama (1991). Od roku 1993 se podílela na zavedení interdisciplinárního studijního oboru Fyzikální inženýrství na FSI; v rámci programu TEMPUS následovaly studijní zahraniční pobyty na University of Aston, Salford University a TU Eindhoven. Pro tento obor zavedla a od roku 1994 přednáší předmět *Částicová optika* v základním kurzu oboru Fyzikální inženýrství. V letech 2000-2003 přednášela rovněž *Elektromagnetické pole a vlny* pro 3. ročník oboru Fyzikální inženýrství v rámci studia teoretické fyziky, a od roku 2003 doktorandský předmět *Mikroskopie a mikroanalýza pomocí nabitých částic*. Vedla diplomovou práci na FE VUT a 3 diplomové práce na ÚFI FSI. Je školitelkou doktorandů v oboru *Fyzikální inženýrství* na FMI VUT a *Vlnová a částicová optika* na MU, dizertace obhájili ing. Pavel Adamec, MU 1997 a ing. Jakub Zlámal, VUT 2004. Zúčastnila se projektu překladu vysokoškolské učebnice D. Resnick, R. Halliday, J. Walker: *Fyzika* (Nakladatelství VUTIUM, Brno – PROMETHEUS, Praha 2000 a 2003) jako překladatelka a editorka jednoho dílu učebnice.

1 Zobrazení pomocí svazků nabitých částic a technologické aplikace

Optika nabitých částic představuje vysoce zajímavý obor aplikované fyziky. V běžném životě se s jejím použitím v podobě televizních a počítačových obrazovek setkáváme denně, aniž bychom si tento fakt uvědomovali. Jiná aplikace optiky nabitých částic, elektronová mikroskopie, otevřela okno do světa miniaturních rozměrů, pro který používáme termín „nanosvět“. Definujeme-li nanosvět jako svět s lineárními rozměry menšími než 100 nm, okno do tohoto světa se pootevřelo už při použití prvních elektronových mikroskopů: Knoll a Ruska odhadli už v roce 1932 [1] rozlišení mikroskopu pod 1 nm (proto se také v němčině pro tato zařízení razil termín Übermikroskopie, dosud zachovaný v anglickém překladu v názvu časopisu Ultramicroscopy). Už první elektronové mikroskopy získaly unikátní postavení: dovolily zobrazení biologických vzorků i pevných látek s vyšším rozlišením než světelná optika. V roce 1936 prokázal Scherzer [2], že rotačně souměrná pole nejsou dokonalé čočky, protože mají vždy kladnou hodnotu otvorové vady 3. řádu a chromatické vady 1. řádu; o deset let později pak Scherzer ukázal několik možných způsobů, jak by bylo možné tyto vady odstranit [3]. Není příliš známo, že holografii „vynalezl“ Gabor [4] právě jako další metodu k odstranění vlivu otvorové vady objektivu elektronového mikroskopu (úspěch v elektronové optice se dostavil až po více než 40 letech práce)¹.

Nedokonalé technologické možnosti v počátcích mikroskopie (malá stabilita zdrojů proudu a vysokého napětí, nedostatečné metody přípravy tenkých vzorků pro prozáření elektronovým svazkem, nekvalitní magnetické materiály pro elektronové čočky a jejich zpracování, nízké vakuum, málo intenzivní zdroje elektronů) výrazně omezovaly dosažení předpokládaného rozlišení. V 50. letech byly provedeny první neúspěšné pokusy s elektronovou holografií a s použitím korektorů založených na multipólových polích; zde se prokázalo, že otvorová vada soustavy sice byla odstraněna, ale korekční systém se nedal seřídít. Teprve 60. léta pak, kromě toho, že přidala komerční výrobu rastrovacích elektronových mikroskopů, odstartovala také první slibné pokusy s elektronovou litografií; pokrok ve vakuové technice umožnil vznik fyziky povrchů. V 70. letech pak konečně přišly první pokusy o počítačový návrh čoček a vylepšily se technologie potřebné pro mikroskopii s vysokým rozlišením. Až v roce 1986 se elektronová mikroskopie dočkala uznání, když polovina Nobelovy ceny připadla Ruskovi a druhá polovina Binnigovi a Rohrerovi za rastrovací tunelový mikroskop. 90. léta pak přinesla fungující korektory (jako první „fungovaly“ korektory založené na použití hexapólových polí, které navrhl Rose, Scherzerův nástupce v Darmstadtu, a realizovali je jeho studenti [6]). S jistým zpožděním za elektronovou mikroskopii se rozvíjely i iontově-optické techniky, a to jak zobrazovací [7], tak rastrovací iontový mikroskop [8]. Iontové mikroskopy se přidávají k rastrovacím elektronovým

¹ Za „otce“ nanotechnologie je považován Richard Feynman, který koncem roku 1959 přednesl známou přednášku *There's plenty of room at the bottom* [5], kde předpovídal výrazný rozvoj „všeho“ směrem k malým rozměrům. Polovina této známé přednášky se přímo dotýkala částicové optiky. První aplikace se týká možnosti zapsání knihy s 25000-násobným zmenšením a možnostmi vytváření a čtení takových struktur (*Encyclopaedia Britannica*, všech 24 dílů, by se tak mohla zapsat na ploše špendlíkové hlavičky). Přitom se v této části dopustil několika zjednodušení, například psaní textu použitím iontů obrácením prozařovacího mikroskopu je nesmysl, vyžadovalo by to příliš silná magnetická pole a ionty by nebyly deponovány na povrchu, ale leptaly by jej. Druhý diskutovaný problém se pak týkal prozařovacího elektronového mikroskopu, který v té době měl rozlišení 1 nm, o němž Feynman předpokládal, že když se podaří zlepšit rozlišení stokrát, bude možné uvidět jednotlivé atomy a přečíst tak pořadí bází v DNA; to je ale nemožné pro nízký kontrast lehkých prvků a pro radiační poškození vzorku. I přesto, že je zde celá řada jeho výroků chybná, mají předpovědi formulované v této přednášce svůj význam.

mikroskopům, a mění je tak na sofistikované laboratoře, dovolující modifikaci vzorku, depozici nanoobjektů a přípravu vzorků pro prozařovací mikroskopy. Iontovou mikroskopii s rozlišením pod 10 nm ale můžeme provozovat pouze díky zdrojům s kapalnými kovy s vysokou směrovou proudovou hustotou; s tímto zdrojem lze například vyrábět úzké otvory ve čtecích hlavičkách počítačových disků nebo i provádět iontovou litografií. Rekordní rozlišení 4 nm jsme dosáhli v projektu NanoFIB [9] při proudu na vzorku 10 pA pro 30 keV ionty gallia.

V Brně se začaly mikroskopy vyrábět až ve druhé polovině padesátých let. V době, kdy jsem nastoupila jako studentka v ÚPT, však v centru pozornosti stála zejména iontová implantace, rozvoj fyziky povrchů a ultravakua, a emisní mikroskop (LEEM). Později ústav fungoval spíše jako vývojové oddělení Tesly pro ultravakuový rastrovací elektronový mikroskop s autoemisní tryskou Tesla BS350 a elektronový litograf Tesla BS600, kromě toho ale běžely ještě projekty prozařovacího mikroskopu, diagnostického rastrovacího mikroskopu a iontového mikroskopu. Ani porevoluční kolaps firmy Tesla Brno nezastavil výrobu elektronových mikroskopů, naopak, nikdy se v Brně nevyrábělo tolik mikroskopů jako nyní. Od počátku 90. let jako základní projekt v oboru elektronové optiky v ÚPT mohl začít návrat k mikroskopii s pomalými elektrony v rastrovacím mikroskopu, navazující na emisní mikroskopii a LEEM z konce 60. let a počátku 70. let a mnohaletou spoluprací s TU Clausthal na LEEMu E. Bauera koncem 80. let [10]. První velmi povzbudivé výsledky [11] ukázaly, že už poměrně jednoduchou adaptací rastrovacího mikroskopu přidáním katodové čočky, která zpomaluje svazek elektronů před dopadem na vzorek, lze dosáhnout dobré rozlišení obrazu a pozorovat nové typy kontrastu. Zároveň ale je jisté, že pro využití těch možností, které poskytuje LEEM, tedy kvalitní zobrazení na základě difrakčního kontrastu a pozorování difrakčního obrazce, je třeba výrazně zdokonalit detekci signálního svazku, který je třeba oddělit od primárního svazku a měřit energiové a úhlové rozložení jeho elektronů.

Stále důležitější jsou i technologické aplikace elektronových svazků – od svařování elektronovým svazkem přes mikroobrábění až po elektronovou litografii, používanou pro výrobu předloh pro hologramy a difrakčních jednovrstvých struktur.

Stejně jako v jiných oborech je v současnosti návrh a analýza zařízení na počítači jednodušší a snadnější než při standardním postupu konstrukce – výroba – testování. Dříve [12] ještě neexistovaly dostatečně přesné výpočetní metody pro návrh v částicové optice, nebyla dostatečně výkonná výpočetní technika a zároveň bylo pracné zadávat potřebné množství dat pro návrh do počítače a interpretovat získané výpočetní výsledky. Nyní je situace radikálně odlišná. Současné programy pro návrh v částicové optice běží na osobních počítačích, z metod pro výpočty polí se ukázala jako nejvhodnější a zároveň univerzálně použitelná metoda konečných prvků. V částicové optice máme zpravidla velmi vysoké požadavky na přesnost spočtených polí a optických vlastností. Pole, která potřebujeme pro fokusaci částic, jsou nejčastěji rotačně souměrná elektrostatická a magnetická pole čoček nebo jejich kombinací. Vychylovací a korekční prvky jsou zpravidla navrženy tak, že i jejich pole můžeme řešit jakou dvourozměrný problém. Optické chování čoček se také liší od toho, co známe ze světelné optiky. Ve světelné optice používáme zpravidla lámavé a odrazné plochy a velké aperturní úhly; kombinací čoček s různých materiálů a s různou ohniskovou délkou můžeme vynulovat některé vady zobrazení. V optice nabitých částic základní osově vady soustav rotačně souměrných čoček nedokážeme vynulovat, čočky jsou tlusté a mají přehozené polohy hlavních rovin. Protože vlnová délka elektronů je velmi malá, používáme malé úhly svazku vůči ose, a vliv interferenčních jevů na tvorbu zobrazení je velký. Navíc nabité částice na sebe mohou působit Coulombovou silou. Protože výpočty v částicové optice

jsou v centru mojí vědecké aktivity, budu se tomuto problému krátce v následující části věnovat. Nejprve se pokusím stručně shrnout naše nejdůležitější výsledky v optice nabitých částic v minulosti a současnosti. V následující části pak na několika příkladech ukážu několik typických problémů, kterými jsme se zabývali a které jsou v optice nabitých částic aktuální.

Vývoj programů není a nikdy nebyl hlavním cílem mého snažení, hlavní motivací byla vždy nutnost návrhu nějakého prvku nebo systému a zlepšení jeho optických vlastností. Bez ohledu na to jsme museli vyvinout řadu výpočetních metod a vyvinout vlastní programy. Programy jsme uvedli až do stavu, kdy na ně můžeme poskytovat licenci, jsou dostatečně zdokumentované a vybavené i uživatelskými interfejsy, jejichž autory jsou moji studenti G. Wisselink a J. Zlámal. Programy se starší verzí interfejsů byly použity při výuce na TU Delft, což umožnilo právě snadné použití grafického rozhraní. Tyto programy proto také používají i studenti FSI ve cvičení z částicové optiky. Při studiu oboru Fyzikální inženýrství se studenti setkávají jak se světelnou optikou a jejími nejmodernějšími oblastmi (optická holografie a interferometrie, konfokální a holografická mikroskopie), tak i s fyzikou povrchů, u níž se často používají svazky nabitých částic (LEED, depozice, analýza). Při koncipování výuky oboru byla zařazena jak elektronová mikroskopie (ÚMI), tak částicová optika, o které bude pojednávat poslední část tezí.

2 Výpočty pro částicovou optiku

2.1 Výpočty elektromagnetických polí

Stejně jako v případě počítačového návrhu při řešení řady stavebních, strojírenských a elektrotechnických úloh při výpočtu deformačních nebo elektromagnetických polí, je i v optice nabitých částic nejčastěji používanou výpočetní metodou metoda konečných prvků (MKP)², kterou řešíme časově nezávislý problém, Laplaceovu nebo Poissonovu rovnici se zadanými okrajovými podmínkami. Jen MKP dovoluje započtení magnetického sycení, je proto „univerzální“ metodou pro všechny dvourozměrné problémy v částicové optice. Používáme MKP prvního řádu s řadou vylepšení při výpočtu potenciálu u osy rotační symetrie a při volbě potenciálu a koeficientů pro magnetické čočky, deflektory a multipóly. Při výpočtech vyžadujeme velkou přesnost výsledků výpočtu.

Zejména v počátcích použití MKP, kdy bylo důležité získat z co nejmenších výpočetních sítí co nejlepší výsledky, se v ÚPT podařilo získat některé původní výsledky, zejména odvození metod pro správné sestavování rovnic pro jednotlivé typy problémů – rotačně souměrné čočky [13, 14], deflektory a multipóly [15]. V poslední době jsme se věnovali především studiu přesnosti výpočtů [16-19]. Výrazné zrychlení řešení soustav rovnic pro velké sítě jsme získali zavedením předpokládané metody sdružených gradientů, která je i úsporná na paměť počítače, což byla velmi důležitá vlastnost v počátcích použití osobních počítačů. Proto stále používáme síť pravidelné topologie s proměnným krokem. Nyní je (bohužel) řešení rozložení potenciálu velmi rychlé a netvoří prakticky žádné omezení, pro síť s 300000 body získáme řešení za minutu, přesto námi odvozená vylepšení MKP jsou stále důležitým základem našich programů.

² MKP má v Brně velmi dobrou tradici, zásadní práce v oblasti MKP jsou spojeny se jmény profesora M. Zlámala a profesorů F. Melkese a L. Dědka v oboru výpočtu v elektromagnetismu, s nimiž jsem mohla o své práci diskutovat.

2.2 Výpočty optických vlastností

Nalezení optických vlastností elektromagnetických polí je úloha zdánlivě jednoduchá ve srovnání s vlastním výpočtem polí. Jedná se „pouze“ o numerický problém řešení obyčejných diferenciálních rovnic (pro paraxiální vlastnosti lineárních) 2. řádu – buď jako rovnic trajektorie (souřadnice a směrnice v rovinách kolmých na optickou osu v závislosti na souřadnici podél osy - u soustav s přímkou osou na souřadnici z válcové soustavy souřadnic) nebo jako pohybových rovnic (raytracing, časová závislost polohy a rychlosti částic). Rovnice trajektorie je výhodné rozdělit na část paraxiální (lineární) a část obsahující aberace (nelineární).

V optice nabitých částic je obvyklé volit znaménko a konstantu u elektrostatického potenciálu Φ tak, aby byl roven kinetické energii. Zavedeme-li označení $\Phi^* = \Phi(1 + \varepsilon\Phi)$, $\gamma = 1 + 2\varepsilon\Phi$, $\varepsilon = e/(2mc^2)$ a $\eta = [e/(2m)]^{1/2}$, kde c je rychlost světla ve vakuu, e a m náboj a klidová hmotnost částice, můžeme pomocí komplexních proměnné $w(z) = x(z) + iy(z)$ zapsat rovnici trajektorie v kompaktním a relativisticky korektním tvaru jako

$$\frac{d}{dz} \left[\left(\frac{\Phi^*}{1 + w' \bar{w}'} \right)^{1/2} w' \right] = -\frac{1}{2} \gamma \left(\frac{1 + w' \bar{w}'}{\Phi^*} \right)^{1/2} E_w - i\eta (B_w - w' B_z) .$$

Čárka značí derivaci podle z , $E_w(w, \bar{w}, z) = E_x + iE_y$, obdobně $B_w(w, \bar{w}, z)$. Pro systémy s přímkou osou dosadíme za potenciál a pole v mimoosových bodech jejich rozvoj z osového průběhu; pak můžeme rovnici trajektorie rozdělit na paraxiální část, kde se zachovávají jen lineární členy rozvoje potenciálu a trajektorie, a na členy určující vady.

Výpočet vycházející z rovnice trajektorie dovoluje rychle získat výsledky paraxiálních optických vlastností a určit koeficienty vad při použití aberační teorie vhodného řádu; ze získaných polí použijeme pouze znalost rozložení potenciálu a pole na ose. Pro většinu problémů máme vhodné vztahy i numericky stabilní metody výpočtu.

Náš příspěvek v této oblasti je v zavedení vhodných numerických metod výpočtů paraxiální trajektorie, například pro elektrostatické čočky byly odvozeny vhodné aproximativní vztahy jak pro paraxiální vlastnosti, tak i pro koeficienty optických vad [20]. Při výpočtech přesných vychylovacích systémů pro elektronovou litografii jsme se zabývali studiem koeficientů vad vícestupňových vychylovacích systémů a systémů složených z magnetických čoček a dvoupatrových vychylovacích systémů. V článku [21] jsme ukázali, jak závisí koeficienty vad vychylovacích systémů na koeficientech vad jednotlivých vychylovacích pater. Dále jsme odvodili jednoduché algebraické výrazy, které ukazují, jak se vady systému mění při změně natočení a buzení jednotlivých pater. Tyto vztahy obsahují kromě koeficientů vad jednotlivých pater jen několik dalších pomocných koeficientů. V [22] jsem pak odvodila řadu vztahů, které vyjadřují koeficienty vad vychýlení jednotlivých pater a ukazují, jak se kombinují vady vychylovacích polí vzájemně a s vadami magnetické čočky v případě, že se pole nepřekrývají. Tyto výsledky jsou důležité pro pochopení chování vad vychylovacích systémů v rastrovacích mikroskopech a v litograftech; zároveň můžeme pomocí těchto vztahů otestovat správnou funkci programů při výpočtu vad vychýlení.

Raytracing (trasování) je více univerzální výpočetní metoda, podávající názorný pohled na to, jak se částice v daném systému pohybují. Proti rovnici trajektorie jsou tyto výpočty pomalé, protože trasování vyžaduje přesné určení pole z numericky spočtených

potenciálů pomocí vhodné a přesné interpolační metody v každém bodě trajektorie. Trasování je nutno použít při návrhu zdrojů (katod) a detektorů a také při výpočtu prostorového náboje nebo coulombovské interakce. Teprve v poslední době je možné trasovat tak přesně, že můžeme odvodit koeficienty vad z výsledků trasování [20].

2.3 Započtení vzájemné interakce částic ve svazku

Většinou jsou v mikroskopech proudové hustoty svazků dostatečně malé, abychom mohli zanedbat coulombovské interakce vznikající při náhodném přiblížení dvou částic. U elektronových termoemisioních trysek je to jinak, zde se uplatňuje Boerschův jev (rozšíření energie svazku) už pro běžně používané proudy. Když se pak pokoušíme vytvářet intenzivními svazky malé stopy, například v elektronové litografii, můžeme pozorovat i tzv. Loefflerův jev (náhodné odklonění částic). Tyto stochastické interakce modelujeme pomocí Monte Carlo metod [23]. V poslední době se zájem o modelování coulombovských interakcí výrazně zvýšil. Vzájemné interakce elektronů je nutné započítat například při návrhu rastrovacích elektronových mikroskopů s nízkou energií elektronů, které se používají při studiu polovodičů (při energiích 500 – 1000 eV se významně snižuje poškození vzorků a nabíjení izolačních vrstev). Extrémní příklad je chování iontového svazku, vytvořeného pomocí autoemise z kapalných kovů – nejčastěji jde o gallium. Zdroj iontů má velmi malé vlastní rozměry, pod 1 nm. Přestože jeho teplota T je pouze 310 až 350 K (tj. $kT \sim 0,03$ eV), je už při malých emisních proudech kolem 1 μ A energiová šířka svazku zhruba 5 eV a virtuální zdroj i se započtením chromatické vady má pak rozměr kolem 10 nm. U autoemisioních zdrojů elektronů je virtuální zdroj vždy menší než reálný a energiová šířka svazku je převážně dána počáteční šířkou při emisi. U iontových zdrojů se tedy jedná zejména o vliv coulombovských interakcí, a ty se pokoušíme určit [24].

V ještě intenzivnějších svazcích elektronů se vliv okolních nábojů ve svazku projeví jako „prostorový náboj“. V důsledku nižší rychlosti iontů se vliv prostorového náboje vyskytuje už u velmi malých proudů [25]. Důležitou aplikací, návrhem trysky pro svařování elektronovým svazkem, se v současnosti intenzivně zabýváme [26]. Výpočet vyžaduje trasování velkého množství částic pro určení prostorového náboje, se kterým pak několikrát opakujeme výpočty potenciálu. Oba typy výpočtů jsou časově velmi náročné.

2.4 Programy a uživatelské rozhraní

Při vývoji vlastních programů jsme museli vyvinout řadu původních výpočetních metod. Následující další krok je také obtížný – poskytnutí programů dalším uživatelům, zejména mimo vlastní pracoviště autora, tedy i nutnost připravit jejich dokumentaci a testovací příklady. Před téměř 20 lety, díky profesorovi Mulveymu, byly moje programy pro výpočet magnetických čoček propašovány do Anglie a na jejich základě pak byly vypracovány dvě doktorské dizertace na Astonské univerzitě [27-28], v Cambridge s jejich pomocí Tsuno výrazně zrychlil své výpočty sycených objektivů [29], a kopii programů dostali i ve skupině částicové optiky na TU Delft.

Existuje ještě jeden poslední krok – vytvoření uživatelského grafického interfejsu, který dovoluje nejen snadný vstup dat a jejich kontrolu, ale také prezentaci výsledků výpočtů pole i následné výpočty optických vlastností a jejich grafickou znázornění. Při vývoji výpočetních metod je otázka interfejsu často zanedbávána, pro uživatele programů se však

jedná o zásadní záležitost. Pro vlastní programování interfejsů je už ale zapotřebí mladší generace, tyto programy vytvářeli moji studenti G. Wisselink [30] a J. Zlámal [31]. Získání správných výsledků samozřejmě vyžaduje vždy kvalifikovanou obsluhu a jisté počáteční znalosti. Samotnou optiku nabitých částic se samozřejmě nemůžeme naučit jen klikáním myši v sebelepším programu pro Windows a nesystematickým nahlížením do dokumentace programu nebo do Help souboru.

3 Návrhy mikroskopů a litografů

3.1 Starší návrhy v ÚPT

První úspěšné použití našich programů představovaly výpočty magnetických čoček, a to studium sycení objektivů prozařovacích mikroskopů Tesla BS500 a 540 [32]. Obvykle totiž platí, že při zvyšování buzení objektivu se snižuje jeho ohnisková délka a zmenšují se koeficienty osových vad – tento trend se obrátí, když se magnetický materiál nevhodně sytí. Podařilo se nám pomocí malých úprav geometrie pólových nástavců tyto jevy odstranit. Další návrhy sycených objektivů pro mikroskopy s vysokým rozlišením a návrh optické soustavy mikroskopu už nebyly realizovány, protože se pozornost soustředila na rastrovací mikroskopy a elektronový litograf. Díky tomu, že nás navštěvoval profesor Mulvey, jsme se také zabývali problémy výpočtu čoček s „netradičními“ tvary – tzv. jednopólové a „snorkel“ čočky; přiměl nás také, abychom určili pro kontrolu, zda v našem výpočtu platí Amperův zákon [13].

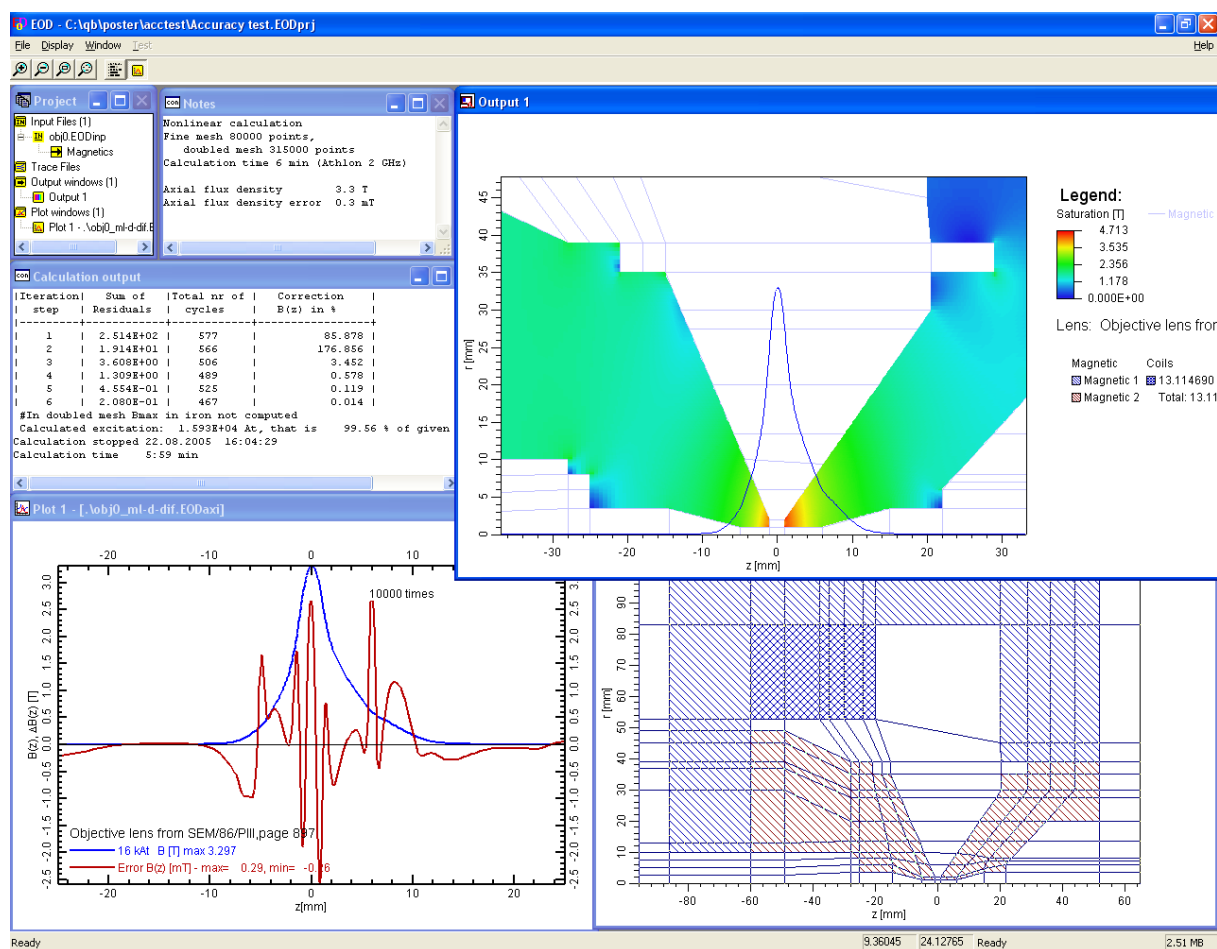
Výpočty výrazně pomohly při návrhu celé řady rastrovacích mikroskopů a litografů. Elektronový litograf byl navržen s použitím tehdy nového typu zdroje, Schottkyho katody [33], jako systém s proměnným průřezem svazku vymezeným projekcí mezi dvěma clonami; tvar svazku byl formován elektrostatickým vychylovacím systémem. Rozlišení staršího typu litografu se pokoušíme vylepšit: ukazuje se, že budeme moci zlepšit rozlišení třikrát bez zásahu do konstrukce přístroje [34]. Velmi originální byl nejen výpočet a celý návrh optické soustavy, ale i vychylovacího systému litografu s dvojitým vinutím pro potlačení vířivých proudů v magnetickém obvodu čočky.

3.2 Přesnost výpočtu magnetického pole

Přestože zpočátku přesnost určení magnetického pole na ose v malých výpočetních sítích nebyla příliš dobrá, zpravidla jsme ji mohli určit s chybou zhruba 1 %, výpočty optických vlastností (ohnisková délka, sférická a chromatická vada) měly přesnost zhruba stejnou, pokud spočtená pole byla dostatečně hladká. V případě magneticky sycených čoček [19, 29] se zpravidla osově rozložení pole rozšiřuje a optické vlastnosti se zlepšují, v některých případech ale vlivy nesprávně volené sítě zvyšovaly získané hodnoty otvorové vady i o více než 10 %. Pro řídké sítě v místech, kde se krok sítě výrazně mění, vznikají numerické chyby, které se projeví na nesprávném rozložení pole na ose [29].

Obr. 1 ukazuje, jaké přesnosti výpočtu můžeme dosáhnout u sycených čoček na příkladu objektivu 200 keV prozařovacího mikroskopu, který studoval a optimalizoval Tsuno [29]. Síť použitou pro definici geometrie ukazuje editační okno, část obrázku vpravo dole; před 20 lety mohl Tsuno používat sítě s nejvýše 7000 body a výpočet pro jedno buzení trval celou noc na minipočítači PDP 11 v Cambridge [13, 29]. Horní okno vpravo pak ukazuje rozložení magnetické indukce v oblasti pólových nástavců a osový průběh magnetické

indukce. Barevně zakódované hodnoty indukce v magnetickém obvodu byly snadno dostupné jen v našich interfejsích a vypadají velmi efektně ve srovnání s dříve používaným šrafováním. Dovolují jednoduché určení míst v magnetickém obvodu, kde dochází k sycení materiálu. Tento výpočet v síti zhruba 80000 bodů trvá na běžném rychlém osobním počítači pouhou minutu. Chceme-li určit, jak je daný výpočet přesný, provedeme další výpočet s dvojnásobně hustou sítí v každém směru, kterou vytvoříme tak, že mezi každé dvě síťové čáry předchozí sítě vložíme jednu další čáru. Nová síť obsahuje tedy i body předchozí sítě, a porovnáním více a méně přesné hodnoty potenciálu v těchto bodech získáme odhad chyby výpočtu. Průběh chyby na ose ukazuje okno vlevo nahoře, odhad chyby je vynásoben 10000-krát. Z takových výpočtů můžeme usuzovat, že přesnost našeho výpočtu je kolem 0,01 %, a uplatňují se zhruba stejně vlivy diskretizační chyby dané velikostí kroku sítě, chyby v důsledku změny kroku sítě a v důsledku nutnosti používat šikmé čáry při definici geometrie čočky. Numerická chyba je tak vlastně menší než chyba metody, daná nepřesnou znalostí materiálových vlastností, tedy magnetizační křivky magnetického materiálu.



Obr. 1. Kopie okna programu EOD při studiu přesnosti výpočtu pole pro testovací příklad – sycený objektiv 200 keV mikroskopu. V levé horní části je umístěno okno projektu, které obsahuje informaci o všech vstupních souborech a grafických výstupních souborech, okno s poznámkami a okno s textovým výstupem o průběhu a výsledku výpočtu. V pravé části nahoře je barevně kódované rozložení indukce v kritické části magnetického obvodu a osové rozložení indukce, dole je okno, ze kterého editujeme návrh. Zobrazení přesnosti provedeného výpočtu je v levé dolní části obrázku: modře je znovu zakresleno osové rozložení indukce a červeně odhad chyby, vynásobený (ve směru vertikální osy) 10000-krát.

Podrobněji jsme se zabývali zejména odhadem chování elektrostatického potenciálu rotačně souměrných čoček [18]. V případě deflektorů a multipólů takového odhadu nemusíme provádět, protože výsledné osově rozložené pole je dostatečně přesné a hladké. Obr. 1 je současně příklad použití programu EOD [31].

3.3 Korektory

Svatým Grálem každé mikroskopické metody je mezní rozlišení. V případě prozařovacích mikroskopů tvoří největší překážku na cestě k jeho nalezení současné působení otvorové a difrakční vady, u iontové optiky musíme uvažovat zejména vliv chromatické vady. Ukažme si vznik otvorové vady na triviálním příkladu. V homogenním magnetickém poli indukce B orientovaném podél osy z válcové soustavy souřadnic (ρ, φ, z) se elektron pohybuje po spirále, která je pro elektron vycházející z počátku souřadné soustavy dána rovnicí

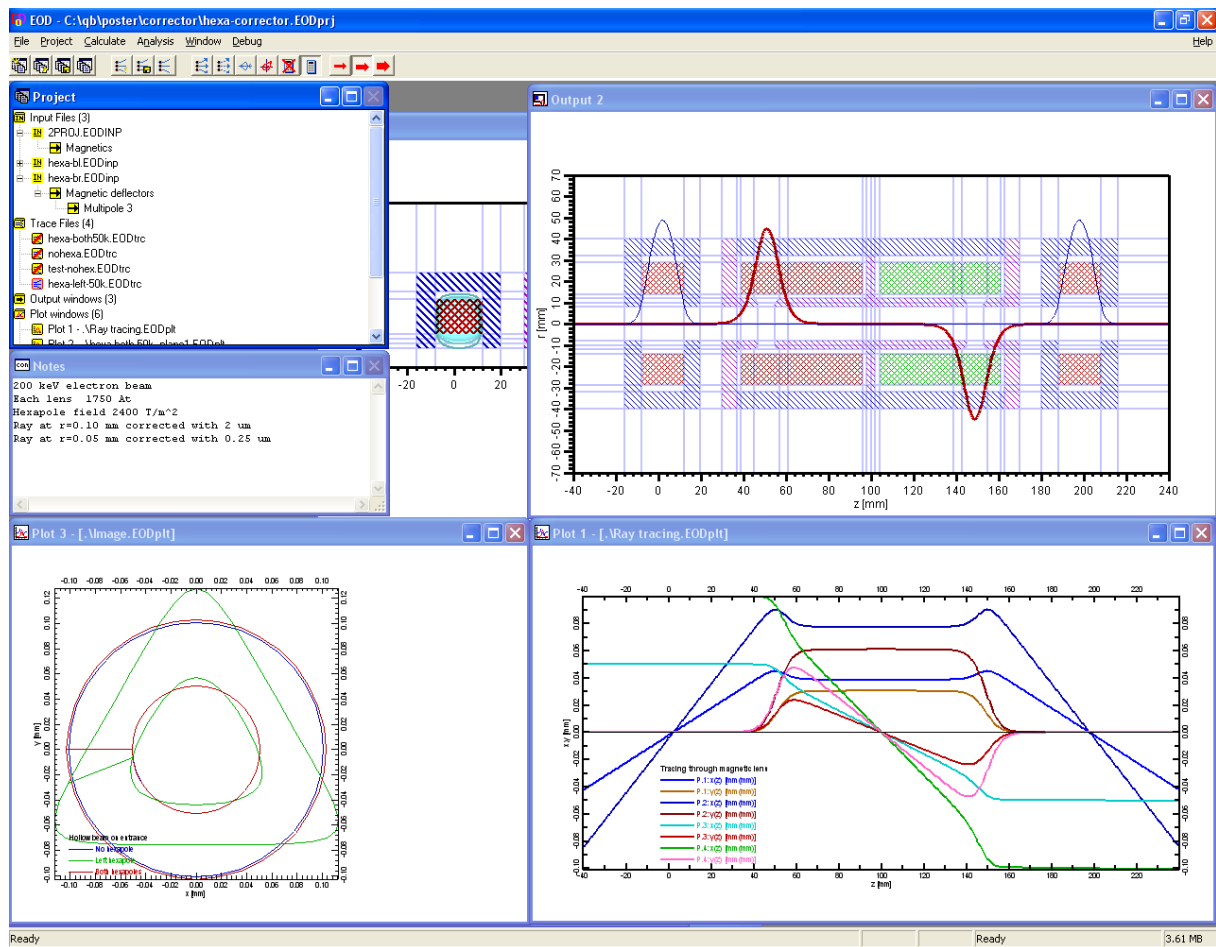
$$\rho = |2C \sin\alpha \sin\varphi| \quad , \quad \varphi = \frac{z}{2C \cos\alpha} \quad , \quad C = \frac{p}{eB} \quad .$$

Zde p je velikost hybnosti, C je cyklotronový poloměr a α je počáteční úhel s osou z . Elektrony, které se pohybují v paraxiální oblasti (tj. $\alpha \rightarrow 0$) jsou v rovině $z=2\pi C$ opět soustředěny do jediného bodu na ose. Při malých, ale konečných hodnotách úhlu α vyplňují elektrony kružnici o poloměru

$$\rho_s = S\alpha^3 \quad , \quad S = |\pi C| \quad .$$

Koeficient otvorové vady S je u homogenního magnetického pole vyjádřen velmi jednoduše pomocí základních charakteristik pohybu, tj. Velikosti hybnosti elektronu a velikosti magnetické indukce.

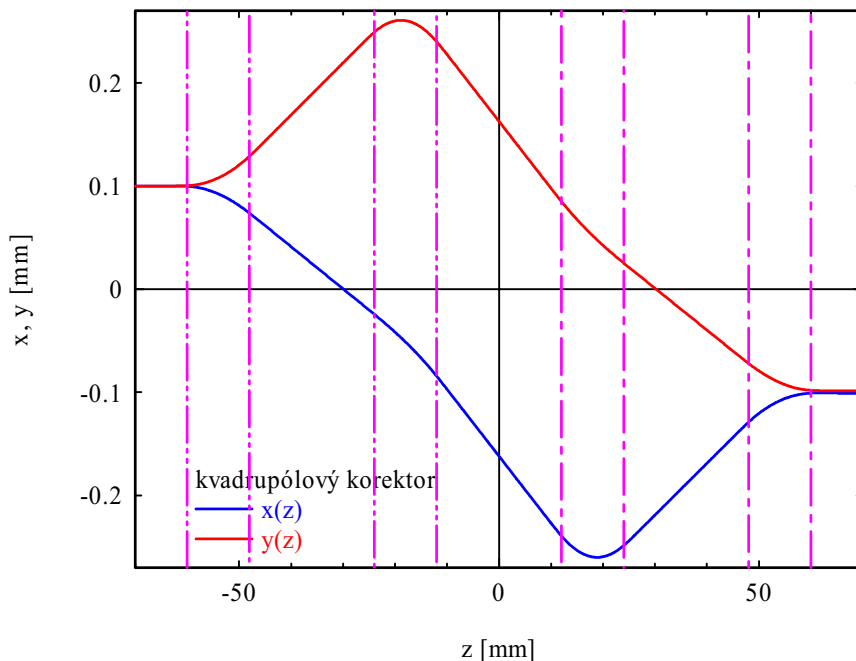
Jak potom můžeme zkorigovat otvorovou vadu? Pokud se podaří vytvořit takový systém, který by měl koeficient vady záporný, lze jej zkombinovat s čočkou s kladnou hodnotou S a vytvořit tak systém s nulovou vadou. Poprvé se takovýto systém podařilo vytvořit pomocí hexapólového korektoru [6], který ukazuje obr. 2. Korektor sestává ze dvou magnetických čoček s opačným buzením takovým, aby zobrazoval předmět v $z=0$ mm do obrazu v $z=200$ mm bez natočení a aby vstupní svazek rovnoběžný s osou vystupoval ze systému čoček paralelně. Pravé dolní okno na obrázku ukazuje x a y souřadnice dvou zobrazovacích a dvou paralelních vstupních trajektorií. Do předmětu i obrazu umístíme hexapólový prvek, sestávající z 6 magnetických pólů, každý z nich je buzený proudem stejné velikosti a opačného orientace než jeho soused. Pokud bychom zapojili pouze první hexapól v $z=0$ mm, získali bychom na výstupu z korektoru výrazně trojúhelníkový průřez svazku. Když ale budíme oba hexapóly současně, dostaneme opět kruhový rovnoběžný svazek, který má na výstupu místo 100 μm poloměr 102 μm , svazek o poloměru 50 μm má ale poloměr jen 50.25 μm . Máme tedy správný korektor, jehož působení je úměrné třetí mocnině vzdálenosti od osy a má zápornou otvorovou vadu, protože výstupní poloměr je větší. Všechny výpočty trajektorií byly získány přesným trasováním v programu EOD.



Obr. 2. Výpočet hexapólového korektoru otvorové vady objektivu prozařovacího mikroskopu. Pravé horní okno ukazuje geometrii systému a červeně osové rozložení magnetické indukce na ose a modře osový průběh pole hexapólu. Průměty trajektorie elektronů do osy x a y ukazuje pravé dolní okno; svazek v čočkách rotuje, ale v důsledku stejného buzení a opačné orientace fokusačních polí je na výstupu celková rotace nulová. Výsledné působení korektoru na kruhový svazek rovnoběžný s osou ukazuje okno vlevo dole; zeleně znázorněný průřez bychom získali, pokud by byl zapojen jen první hexapól.

Pro rastrovací systémy se používá jiný typ korektoru, pro který potřebujeme nejméně 4 stejně buzené kvadrupóly a 2 oktupóly pro vytvoření kruhového svazku se zápornou otvorovou vadou (obr. 3). Kvadrupóly zobrazují různě ve dvou navzájem kolmých směrech a vytvářejí astigmatický obraz; ideální tenký kvadrupól má ohniskovou délku ve dvou kolmých směrech stejné velikosti a opačného znaménka. Působení oktupólů je pak úměrné třetí mocnině vzdálenosti svazku od osy, a pokud je umístíme v meziobrazech kvadrupólového systému, zkorigujeme otvorovou vadu pro každý směr zobrazení. Výhoda kvadrupólového systému je, že by se mohlo dosáhnout i korekce chromatické vady. U rastrovacího elektronového mikroskopu se podařilo dosáhnout stopy o průměru 0,8 nm pro 1 keV svazek [35] (mikroskop komerčně vyrábí firma JEOL), pro rastrovací prozařovací mikroskop je cílem dosáhnout rozlišení 0,05 nm pro 200 keV [36].

Dosažení subatomového rozlišení v korigovaných mikroskopech jistě povede k dalšímu rozvoji oboru [37, 38]. Na projekt TEAM (Transmission Electron Aberration-corrected Microscope) jsou v USA věnovány dosti velké prostředky, kolem 100 milionů dolarů, s cílem dostat více proudu s větší aperturou svazku do menší stopy a získat co nejlepší rozlišení, zároveň i zdokonalit existující přístrojové techniky, elektronovou tomografii a zpracování obrazu, a umožnit techniky nové, jako je konfokální rastrovací prozařovací mikroskopie [39]. Korigované mikroskopy jsou zcela unikátní zařízení, a to proto, že dovolují získat zcela nové poznatky o uspořádání atomů v pevných látkách. Stojí za to si uvědomit, že kvalita elektronových čoček byla i před korekcí srovnatelná s nejdokonalejším optickým zařízením, které existuje; vezmeme-li jako měřítko (figure of merit) podíl průměru svazku a používané vlnové délky, pak pro Hubbleův teleskop máme 2,5 m/400 nm, zatímco pro 100 keV korigovaný elektronový mikroskop máme tento podíl 100 μm /4 pm dokonce lepší [36].



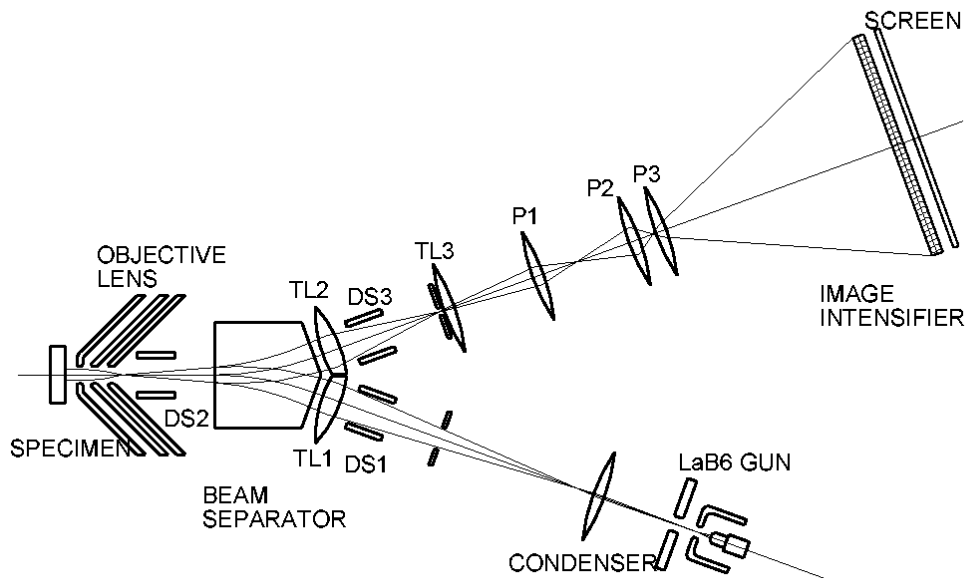
Obr. 3. Chod svazku elektronů v systému čtyř kvadrupólů v jiném typu korektoru. Vlastní korekci otvorové vady provádí dva oktupóly umístěné blízko obou středních kvadrupólů.

3.4 Elektrostatický rastrovací LEEM

Výpočty elektrostatických čoček se zabýváme až od začátku 90. let, kdy jsme začali studovat chování katodové čočky v rastrovacím mikroskopu a kdy byl také proveden návrh elektrostatické soustavy pro LEEM (Low Energy Electron Microscope) na Arizonské státní univerzitě v Tempe [40]; teprve tehdy počítače dovolily výpočty v dostatečně velkých sítích nutné pro návrh elektrostatické optiky se složitější geometrií čoček.

LEEM [10] dovoluje zobrazení povrchu s vysokým rozlišením kolem 7 nm, které je v podstatě dáno velikostí elektrostatického pole katodové čočky na vzorku; zároveň pomocí vhodně umístěné kontrastní apertury vybereme pro zobrazení jen elektrony odchýlené do určitého rozsahu úhlů, tak vzniká difrakční kontrast. Naopak použitím selekční clony v meziobrazce můžeme pozorovat difrakční obrazec pomalých elektronů jen ze zvolené oblasti. Obr. 4 ukazuje optické schéma tohoto mikroskopu. Důležitým optickým prvkem

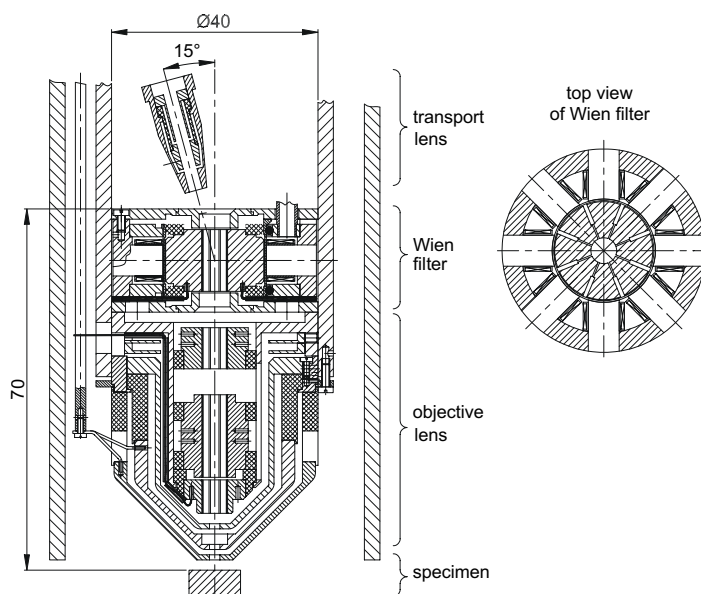
LEEMu je separátor, magnetický hranol, tvořený polem kolmým k rovině obrázku. Typicky se primární i zobrazovací svazek odklání o 90° , v tomto návrhu však úhel mezi primárním a zobrazovacím svazkem tvoří pouze 20° , což snižuje vady zobrazení, ale vyžaduje, aby přenosové čočky TL1 v osvětlovací soustavě a TL2 v zobrazovacím systému byly velmi blízko u sebe. V zobrazovací větvi je šest elektrostatických čoček, objektiv, dvě přenášecí čočky a tři projektivy. V ultravakuu funguje elektrostatická optika spolehlivě.



Obr. 4. Schematické uspořádání LEEMu [40].

Primární a signální svazek musíme od sebe oddělit přirozeně i v rastrovací verzi tohoto mikroskopu [41]. V tomto případě jsme jako vhodný prvek zvolili Wienův filtr [42], tvořený navzájem kolmými elektrostatickými a magnetickými poli. Protože magnetické pole vytváříme pomocí pólových nástavců, které současně slouží jako elektrody formující elektrostatické pole, jsou tvary obou polí shodné. Wienův filtr musí být navržen tak, aby primární svazek byl při průchodu filtrem ovlivněn jen minimálně, zatímco vychýlení svazku signálních elektronů po průchodu filtrem by mělo být co největší. Pro odchylku signálního svazku jsme zvolili úhel 15° , minimálního ovlivnění primárního svazku dosáhneme vhodnou polohou filtru vzhledem k dalším optickým prvkům. Obr. 5 ukazuje kompaktní uspořádání objektivu, filtru a transportní čočky v navrhovaném rastrovacím LEEMu.

Dosáhnout uspokojivých vlastností soustavy pro svazek signálních elektronů je mnohem obtížnější úloha. Tento svazek obsahuje jak sekundární elektrony, urychlené průchodem katodovou čočkou, tak pružně nebo jen s minimální ztrátou energie odražené primární elektrony. Možnost zachování informace o energiovém a úhlovém rozlišení je jednou z velkých předností navrhovaného rastrovacího LEEMu. Pro detekci a zpracování těchto informací musíme použít plošný detektor [43], na který bude odchýlený svazek signálních elektronů zobrazován vhodnou optikou. Standardní rastrovací elektronový mikroskop je tedy ve srovnání s LEEMem opticky „primitivní“ zařízení. Předběžné výsledky výpočtů ukazují, že pomocí vhodné transportní optiky by se nám mělo podařit signální svazek na tento detektor zobrazit [44].



Obr. 5. Návrh konstrukce části rastrovacího LEEMu. Wienův filtr je blízko objektivu (řez filtrem je vpravo). Transportní čočka obsahuje centrovací systém a přenáší svazek signálních elektronů po výchylení svazku ve filtru.

4 Výuka částicové optiky v oboru Fyzikální inženýrství FSI VUT

Obor *Fyzikální inženýrství* byl zaveden na FSI s podporou programu TEMPUS a ve spolupráci s PřF MU. Hned od počátku byla výuka částicové optiky zařazena jako povinný předmět a probíhala od roku 1994 v závěru magisterského studia. Podobně je koncipován i kurz pro doktorandy, nazvaný *Mikroskopie a mikroanalýza pomocí nabitých částic*.

Studenti při absolvování předmětu

- získají přehled elektronově a iontově optických přístrojů a zařízení, jejich možností a použití (doplněno exkurzí do ÚPT AV ČR – laboratoře elektronové mikroskopie a litografie a k zařízení pro elektronové svařování),
- seznámí se s vlnovými a relativistickými vlastnostmi nabitých částic (ve cvičení jsou prováděny výpočty vlnové délky, hmotnosti a rychlosti elektronů a protonů)
- zjistí, jaké vlastnosti lze odvodit řešením pohybové rovnice (řešení pohybu v homogenních polích, modely rotačně souměrné elektrostatické a magnetické čočky, deflektoru a spektrometru)
- odvodí relativisticky korektní rovnice trajektorie, rozvoje pole v blízkosti osy a rozdělení rovnice trajektorie na paraxiální rovnici a rovnici popisující vady
- seznámí se s numerickými metodami řešení rozložení pole a výpočtem optických vlastností
- při cvičení u počítače provedou návrh jednoduché elektrostatické a magnetické čočky a určí její optické vlastnosti
- proberou vlastnosti zdrojů elektronů a iontů a jejich důsledky pro vytváření sond
- diskutují rozlišovací schopnost mikroskopů
- proberou spektrometry nabitých částic jako problém použití částicové optiky

Materiály ke kurzu částicové optiky jsou k dispozici na internetu [45]. Studenti si zopakují některé pasáže z matematiky (řešení parciálních a obyčejných diferenciálních rovnic), fyziky (vlny, relativita, elektromagnetické pole, optika) a fyziky povrchů a materiálů. Musí být v každém případě schopni zodpovědět základní otázku, jaký je rozdíl mezi světelnou a elektronovou optikou.

5 Závěr

Bez elektronových mikroskopů nemůžeme nahlédnout do nanosvěta a většina lidí jistě souhlasí s klasickým „*Seeing is believing*“. Bez elektronových a iontových litografií pak nelze v mnoha případech nanosvět vytvářet. Částicová optika tak zůstává i dnes zajímavou oblastí aplikované fyziky, která dává možnost realizace unikátních přístrojů a vývoje unikátních metod. Částicová optika vedla přímo či nepřímo i k vývoji holografie, počítačového zpracování obrazu, ultravakua i kryotechniky, nebo k vytvoření vysoce stabilních zdrojů proudu a vysokého napětí.

Základní otázkou částicové (a tedy především elektronové) optiky vždy bylo dosažení co nejlepšího rozlišení. Jaké jsou tedy současné meze? U prozařovacího elektronového mikroskopu se konečně podařilo prorazit bariéru 1 \AA , a rozlišení dosahuje $0,07\text{--}0,08 \text{ nm}$ jak pro mikroskopy s korigovanou otvorovou vadou objektivu, tak i v elektronové holografii. Korigovaný rastrovací mikroskop dosahuje průměr stopy $0,8 \text{ nm}$ při 1 keV a rastrovací prozařovací mikroskop bude moci pracovat s průměrem stopy lepším než $0,05 \text{ nm}$. Běžné komerční mikroskopy dosahují rozlišení $3\text{--}4 \text{ nm}$ při 30 keV a pod 10 nm pro 1 keV elektrony a kolem 10 nm pro 30 keV ionty gallia. Rekordního výsledku pokud jde o velikost stopy jsme dosáhli v evropském projektu NanoFIB – 4 nm . V nejnovějších rastrovacích elektronových mikroskopech jsou často používány duální svazky, tj. elektrony a ionty. Takové mikroskopy vyrábí např. firma FEI v Brně; představují vlastně malé laboratoře a jsou velmi drahé. Mají ovšem pozoruhodné technologické aplikace, dovolují exponování rezistu elektrony nebo ionty, depozici z organometalických plynů, iontové odprašování, přípravu vzorků pro prozařovací mikroskopy. Nejenom tyto mikroskopy, ale obecně optická zařízení jsou stále dražší, i když jejich provoz je díky sofistikovanému počítačovému řízení a zabudovaným metodám zpracování obrazu jednodušší.

I v našich podmínkách můžeme jistým způsobem přispět k rozvoji elektronové mikroskopie. Máme k dispozici velmi přesné programy pro výpočty většiny potřebných prvků pro návrh mikroskopů, zejména jako důležitá se ukazuje možnost přesného trasování částic, kterou jsme ilustrovali na příkladu výpočtu korektorů. Také návrh rastrovacího LEEMu vyžaduje podrobné studium elektronově optických vlastností primárního i signálního svazku, který opět můžeme prostudovat jen použitím velmi přesného trasování částic.

Literatura

- [1] M. Knoll, E. Ruska: „Das Elektronenmikroskop“. Z. für Physik **78** (1932), 318-339.
- [2] O. Scherzer: „Über einige Fehler von Elektronenlinsen“. Z. für Physik **101** (1936), 23-26.
- [3] O. Scherzer: „Sphärische und chromatische Korrektur von Elektronen-Linsen“. Optik **2** (1947), 114-132.
- [4] D. Gabor: „A new microscopic principle“. Nature **161** (1948), 777-778.
- [5] R. P. Feynman: There's Plenty of Room at the Bottom. Engineering and Science (Caltech, February 1960). Český překlad v R.P. Feynman: Radost z poznání. Aurora, Praha 2003.
- [6] M. Haider, H. Rose, S. Uhlemann, E. Schwan, B. Kabius and K. Urban: „A spherical-aberration-corrected 200 keV transmission electron microscope“. Ultramicroscopy **75** (1998), 53-60.
- [7] G. Slodzian: „Microanalyzers using secondary ion emission“. Adv. Electr. Electron Phys., Suppl. **13B** (1980), 1-44.
- [8] J. Orloff, M. Utlaut and L. Swanson, High Resolution Focused Ion Beams. Kluwer, New York, 2003.
- [9] J. Gierak, E. Bourhis, M. N. M. Combes, et al.: „Exploration of the ultimate patterning potential achievable with focused ion beams“. Microelectr. Eng. **78-79** (2005), 266-278.
- [10] E. Bauer: „Low energy electron microscopy“. Rep. Progr. Phys. **57** (1994), 895-938.
- [11] M. Lenc and I. Müllerová: „Optical properties and axial aberration coefficients of the cathode lens in combination with a focusing lens“. Ultramicroscopy **45** (1992), 159-162.
- [12] T. Mulvey and M. J. Wallington: „Electron Lenses“. Rep. Progr. Phys. **36** (1973), 347-411.
- [13] B. Lencová and M. Lenc: „A finite element method for the computation of magnetic electron lenses. Scanning Electron Microscopy 86, Part III (1986), 897-915.
- [14] B. Lencová: Accurate computation of magnetic lenses with FOFEM“. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A427** (1999), 329-337.
- [15] M. Lenc and B. Lencová: „Analytical and numerical computation of the multipole components of magnetic deflectors“. Rev. Sci. Instruments **68** (1997), 4409-4414.
- [16] D. Cubric, B. Lencová, F. H. Read and J. Zlámal: „Comparison of FDM, FEM and BEM for electrostatic charged particle optics“. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A427** (1999), 357-362.
- [17] B. Lencová: „Accuracy of electrostatic lens computations with FOFEM.“ Ultramicroscopy **93** (2002), 263-270.
- [18] B. Lencová and M. Lenc: „The sources of errors in first-order FEM for electrostatic lenses“. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A519** (2004), 141-148.
- [19] B. Lencová: „Accuracy estimate for magnetic electron lenses computed by first-order FEM“. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A519** (2004), 149-153.
- [20] B. Lencová: „Electrostatic Lenses“. In: Handbook of Charged Particle Optics (ed. J. Orloff), pp. 177-222. CRC Press, 1997.
- [21] B. Lencová: „Deflection aberrations of multistage deflection systems“. Optik **58** (1981), 25-35.
- [22] B. Lencová : „On the design of electron beam deflection systems“. Optik **79** (1988) 1-12.
- [23] P. Kruit and G. H. Jansen: „Space charge and statistical Coulomb effects“. In: Handbook of Charged Particle Optics (ed. J. Orloff), pp. 275-318. CRC Press, 1997.
- [24] T. Radlička: „Boersch effect in the vicinity of LMIS“. Připraveno k tisku, 12 str.
- [25] J. Zlámal: Simulace elektrostatických iontově optických systémů. Dizertace FSI VUT, listopad 2003, 64 str.
- [26] P. Jánský, B. Lencová a J. Zlámal: „Optimalizace optiky elektronové svářečky“. Jemná mechanika a optika **50** (2005), 46-48.

- [27] K. Tahir: a critical assesment of the FEM for calculating magnetic fields in electron optics. Dizertace, U. Aston, Nov. 1985, 254 str.
- [28] A. S. Al-Nakeshli: Computer-aided-design of saturated magnetic lenses for electron microscopes. Dizertace, U. Aston, Feb. 1986, 229 str.
- [29] K. Tsuno: „Magnetic lenses for electron microscopy“. In: Handbook of Charged Particle Optics(ed. J. Orloff), pp. 143-176. CRC Press, 1997.
- [30] B. Lencová and G. Wisselink: „Program package for the computation of lenses and deflectors“. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research **A298** (1990), 56-66.
- [31] B. Lencová and J. Zlámal: „EOD (Electron Optical Design) program for computation for electron microscopy“. Proc. MC2005, Davos, p. 8.
- [32] B. Lencová, Příklady použití MKP při výpočtech elektronových čoček. Dílčí výzkumná zpráva ÚPT ČSAV, březen 1978, 65 str.
- [33] A. Delong and V. Kolařík: „Field-emission gun for microengineering application“. J. Phy. E-Scientific Instruments **22** (1989), 612-614.
- [34] B. Lencová, Výpočty optické soustavy ELG a návrh pro zmenšení velikosti exponovaného razítka. Interní zpráva GAČR 102/05/2325, červen 2005, 25 str.
- [35] S. Uno, K. Honda, N. Nakamura, M. Matsuya and J.Zach: „Aberration correction and its automatic control in scanning electron microscopes“. Optik **116** (2005), 438-448.
- [36] O. L. Krivanek, P. D. Nellist, N. Dellby, M. F. Murfitt and Z. Szilagyí: „Towards sub-0.5 Å electron beams“. Ultramicroscopy **96** (2003), 229-237.
- [37] H. Poppa: „High resolution, high speed ultrahigh vacuum microscopy“. J. Vac. Sci. Technol. **A22** (2004), 1931-1947.
- [38] <http://ncem.lbl.gov/team3.htm>.
- [39] S. P. Frigo, Z. H. Levine and N. J. Zaluzec: „Submicron imaging of buried integrated circuit structures using scanning confocal electron microscopy“. Appl. Phys. Lett. **81** (2002), 2112-2114.
- [40] P. Adamec, E. Bauer and B. Lencová: „Compact low-energy electron microscope for surface imaging“. Rev. Sci. Instruments **69** (1998), 3583-3587.
- [41] I. Müllerová, L. Frank: „Scanning low energy electron microscopy“. Adv. Imag. Electron Phys. **128** (2003), 309-443.
- [42] I. Vlček a B. Lencová: „Rastrovací elektronový mikroskop s velmi nízkou energií elektronů“. Jemná mechanika a optika **45** (2000), 276-280.
- [43] M. Horáček: „Charge-coupled device area detector for low energy electrons“. Rev. Sci. Instruments **74** (2003), 3379-3384.
- [44] I. Vlček, B. Lencová and M. Horáček: „Design of detector optics for a low energy SEM“. Proc. MC2005, Davos, p.59.
- [45] <http://www.isibrno.cz/~bohunka/vut.html>.

Poděkování

Děkuji prof. A. Delongovi, který vedl moji diplomovou práci a kandidátskou dizertaci v ÚPT ČSAV. Na počátku mé vědecké kariéry jsem byla velmi silně ovlivněna spoluprací s prof. J. Komrskou, nyní na ÚFI FSI VUT v Brně, a s prof. V. Drahošem, na jehož jemný humor dodnes vzpomínám a jehož nenásilné a pevné vedení na mně zanechaly stopy, i když už s námi téměř 30 let není. Díky pravidelným návštěvám profesora Thomase Mulveyho jsem mohla nejen udržovat kontakt se zahraničím, ale dokonce i protunelovat železnou oponou. Nikdy nezapomenu na přátelskou pomoc Prof. K. D. van der Masta, který inicioval můj dlouhodobý pobyt v Delftu. Velmi zajímavá byla i spolupráce s jeho nástupcem prof. P. Kruitem, prof. F. H. Readem na U. Manchester, dr. E. Munroem v Londýně a dr. P. W. Hawkesem na projektu NanoFIB. Tvůrčí a kolegiální spolupráce s kolegy a studenty na FSI VUT, s prof. M. Liškou, prof. T. Šikolou a s prof. P. Dubem, mi přinesla mnoho nových podnětů. Bez ing. J. Zlámala, Ph.D., by neexistoval nový interfejs programů pro Windows. Nejtěsnější spolupráce byla samozřejmě s M. Lencem, který po celou dobu musel vykazovat zejména vysoký stupeň trpělivosti a tolerance.

Abstract

Most information about the outside world we acquire with our eyes, and the optics of charged particles allows to look into the world with smaller dimensions than the wavelength of light allows, into the *nanoworld*. The wavelength of 100 eV electrons is around 1 Å, i.e. 0.1 nm, and for 100 keV electrons it is only around 4 pm. From the broad scope of applications covered with the charged particle optics we concentrate on electron microscopy, and only in smaller extent we mention the application in technology or the use of ion beams. High-resolution transmission electron microscopes with energy in the range of 100-300 keV achieve resolution approaching 1 Å and, if we are able to correct the spherical aberration, even below 1 Å. Scanning electron microscopes routinely achieve spot sizes with 3-4 nm diameter at 30 keV, and much interest from the semiconductor industry is in the smallest possible spots with high current at low beam energy 0.5-1 keV. We can generate beams of charged particles in a large range of energies, currents and current densities, and so we can with them observe objects, analyze their composition, modify them, sputter them away or deposit on them thin films, expose resists, melt or weld. Computer-aided design in optics of charged particles is based on highly accurate computations of fields with the finite element method and on the determination of its optical properties or on ray tracing of a large number of particles. The lecture briefly mentions historical milestones in this area of research. A short summary of interesting projects, on which I participated, is followed with an illustrative example showing the accuracy of the computed field, a basic problem for a reliable use of every computational method. Very topical is the design of correctors of spherical aberration, and we show that with our software we can easily analyze them without having to study the secrets of quite a complicated aberration theory. The most interesting project running currently in the Laboratory of electron optics is an UHV scanning electron microscope with low energy electrons, often also called a scanning LEEM, which should produce complex information and similar images as a LEEM of the studied surface, provided we correctly manage to analyze and process the signal beam. The course *Particle optics* introduced at FME BUT is a part of curriculum of MSc study of *physical engineering* (applied physics), and individual subject areas are briefly listed together with an expected contribution to the knowledge of students.