

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

ŘÍZENÍ A DIAGNOSTIKA ELEKTRONOVÉHO SVAZKU PRO POKROČILÉ TECHNOLOGIE

ELECTRON BEAM CONTROL AND DIAGNOSTICS
FOR ADVANCED TECHNOLOGIES

DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

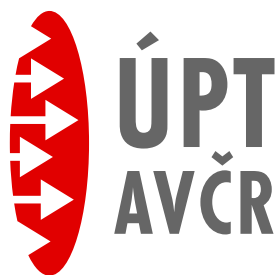
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. MARTIN ZOBAČ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. RNDr. BOHUMILA LENCOVÁ, CSc.

BRNO 2009



ÚSTAV PŘÍSTROJOVÉ TECHNIKY
AV ČR, V. V. I.,
INSTITUTE OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, AS CR

Tato disertační práce byla vypracována v Ústavu přístrojové techniky AV ČR, v. v. i. akreditovaném pro doktorský studijní program „Fyzikální a materiálové inženýrství“ rozhodnutím MŠMT ze dne 19. února 2008 pod vedením prof. RNDr. Bohumily Lencové, CSc.

Prohlašuji, že jsem disertační práci *Řízení a diagnostika elektronového svazku pro pokročilé technologie* vypracoval samostatně pod vedením prof. RNDr. Bohumily Lencové, CSc., s použitím materiálů uvedených v seznamu literatury.

Martin Zobač

Abstrakt

Práce se zabývá problematikou řízení a diagnostiky technologických zařízení využívajících elektronový svazek k lokalizovanému intenzivnímu ohřevu materiálu. Součástí práce je stručný popis elektronové svářečky MEBW-60/2, na jejíž konstrukci se autor v rámci své doktorské práce podílel. Hlavní důraz je kladen na analýzu vlastností vychylovacího systému elektronového svazku a měření rozložení proudové hustoty svazku – tzv. profilů svazku. Rozbor vlastností magnetického jednostupňového dvoosého vychylovacího systému se zabývá geometrickým zkreslením, hysterezí, stabilitou a dynamickým chováním. Jsou navrženy vhodné měřicí metody a případně i postupy ke korekci vad. Měření profilů přibližuje metodiku snímání příčných a podélných řezů svazkem pomocí postupného vzorkování lokální proudové hustoty svazku upravenou Faradayovou sondou. Je uvedeno následné zpracování naměřených dat a určení charakteristických parametrů svazku. Použitelnost uvedených metod pro praktické posouzení vlastností zařízení byla ověřena pomocí čtrnácti měření provedených na elektronové svářečce.

Summary

The thesis deals with problems of control and diagnostics of electron beam technological devices which use electron beam for localised intensive heating of a material. A brief description of the electron beam welder MEBW-60/2 is included; the author has participated on its development and implementation. Main topics are the analysis of deflection system properties and the measurement of current distribution of the beam (so-called beam profiles). Geometrical aberrations, hysteresis, stability and dynamics of a single-stage magnetic x-y deflection system are described. Suitable measurement procedures and correction methods are introduced. Methods of transverse and longitudinal beam profile acquisition is presented using successive sampling of the local current density of the beam by a modified Faraday cup. The data processing and evaluation of characteristic beam parameters are shown. The presented methods were verified by fourteen experiments using the electron beam welder. The methods have proven to be useful in practical evaluation of the device properties.

Klíčová slova

elektronový svazek; vychylování svazku; diagnostika svazku; profil svazku; elektronová svářečka

Keywords

electron beam; beam deflection; beam diagnostics; beam profile; electron beam welder

ZOBAČ, M. *Řízení a diagnostika elektronového svazku pro pokročilé technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 158 s. Vedoucí disertační práce prof. RNDr. Bohumila Lencová, CSc.

Obsah

Seznam obrázků	ix
Seznam tabulek	xiii
Seznam symbolů a zkratek	xv
1 Úvod	1
2 Přehled stavu problematiky	3
2.1 Elektronový svazek	3
2.2 Elektronová tryska	5
2.3 Technologické využití elektronového svazku	7
2.4 Vychylování svazku	11
2.5 Řízení a diagnostika svazku	14
3 Cíle disertační práce	19
4 Experimentální zařízení	21
4.1 Elektronová svářečka MEBW-60/2	21
4.2 Fyzikální část	22
4.3 Elektronická část	25
4.4 Software a komunikace	28
4.5 Faradayova sonda	37
4.6 Prototyp a experimentální verze svářečky	38
5 Vychylování svazku	41
5.1 Úvod	41
5.2 Model vychylovacího systému	41
5.3 Vyhodnocení polohy svazku	44
5.4 Geometrické zkreslení	47
5.5 Magnetická hystereze	50
5.6 Stabilita	52
5.7 Dynamika vychylovacího systému	54
5.8 Shrnutí kapitoly	59
6 Profily svazku	61
6.1 Úvod	61
6.2 Příčný profil svazku	62
6.3 Podélný profil	64
6.4 Transformace profilů měřených přeostržením čočky	67
6.5 Měření proudové a výkonové hustoty	68
6.6 Elektronické zpracování	75
6.7 Tepelné zatížení clony	76
6.8 Přehled studovaných metod a experimentů	80
7 Experimentální výsledky	81
7.1 Úvod	81

7.2	Určení středu vychylování	82
7.3	Zkreslení vychylovacího systému	84
7.4	Remanentní magnetismus vychylovacího systému	87
7.5	Dlouhodobá stabilita vychylovacího systému	88
7.6	Přenosové charakteristiky elektronové trysky	91
7.7	Voltampérové charakteristiky katody	94
7.8	Rozložení výkonové hustoty ve svazku	96
7.9	Srovnání profilu měřeného se stacionárním a pohyblivým detektorem	99
7.10	Příčný profil při změně předpětí Wehneltu	101
7.11	Příčný profil při změně teploty katody	102
7.12	Určení optimálního žhavicího proudu katody	106
7.13	Závislost optimálního žhavení katody na jejím stáří	108
7.14	Závislost kvality svazku na poloze vlákna katody	110
7.15	Fokusační křivky	114
7.16	Shrnutí experimentálních výsledků	116
8	Závěr	117
A	Lineární transformace a homogenní souřadnice	120
A.1	Lineární přenosová funkce	120
A.2	Příklady transformací	120
B	Vzorové funkce pro MatLab	122
B.1	Výpočet těžiště	122
B.2	Výpočet těžiště plošného útvaru	122
B.3	Výpočet šířky profilu dle kritéria $d_{4\sigma}$	122
B.4	Odstranění šumu a pozadí	123
B.5	Minimalizace funkce	123
B.6	Transformace polynomem prvního až pátého řádu	124
B.7	Ovládání svářečky z prostředí MatLab	125
C	Profily pro určení kvality svazku v závislosti na poloze katody	127
	Literatura	131

Seznam obrázků

2.1	Elektronová tryska	5
2.2	Tepelné zpracování povrchové vrstvy	9
2.3	Svařování elektronovým svazkem	9
2.4	Multikapilární svařování elektronovým svazkem	9
2.5	Vrtání otvorů elektronovým svazkem	10
2.6	Technologie Surfi-Sculpt™	12
2.7	3D-tisk elektronovým svazkem	12
2.8	Vychylování svazku elektrickým a magnetickým polem	12
2.9	Jedno a dvoustupňové vychylování	13
2.10	Princip měření profilu svazku	15
2.11	Příčný a podélný profil svazku	15
2.12	Různé tvary clon pro měření profilu	16
2.13	Senzor s rotujícím drátem pro in-situ snímání profilu svazku	17
2.14	Definice průměru svazku	17
4.1	Elektronová svářečka MEBW-60/2	21
4.2	Uspořádání fyzikální části a vakuového systému elektronové svářečky	22
4.3	Elektronová tryska a pracovní komora MEBW-60/2	23
4.4	Schéma optické soustavy trysky s vyznačením chodu svazku	23
4.5	Nastavení výšky vlákna katody	23
4.6	X-y manipulátor poháněný krokovými motory	24
4.7	Pracovní komora a vakuový systém MEBW-60/2	24
4.8	Blokové schéma řízení elektronové svářečky MEBW-60/2	25
4.9	Vzor mechanické konstrukce elektroniky svářečky MEBW-60/2	25
4.10	Zatěžovací charakteristika zdroje vysokého napětí HV-03	26
4.11	Fotografie zdroje vysokého napětí HV-03	26
4.12	Zobrazení v REM režimu	27
4.13	Snímek ovládacího pultu svářečky MEBW-60/2	28
4.14	Zobrazení údajů na displeji elektronové svářečky MEBW-60/2	28
4.15	Schéma datových toků hardwaru a softwaru svářečky MEBW-60/2	28
4.16	Snímek uživatelského rozhraní PC software svářečky MEBW-60/2	29
4.17	GUI modulů Imaging and Welding	30
4.18	Příklad vyznačených trajektorií svarů vytvořených pomocí nástroje Welding	31
4.19	GUI modulů BeamDiag and DeflDiag	31
4.20	Definice hlavní a vedlejší osy při snímání profilu svazku	32
4.21	Legenda ke snímku profilu uloženého nástrojem BeamDiag	33
4.22	Testovací obrazec vytvořený přetavením povrchu elektronovým svazkem	34
4.23	Modul pro kalibraci vychylovacího systému a odměřování vzdáleností (Measurements)	34
4.24	Modul pro přenos grafiky (Picture Transfer)	35
4.25	Příklad fotografie přenesené na povrch nerezového plechu přetavením elektronovým svazkem	36
4.26	GUI dálkového ovládání a simulátoru vychylování	36
4.27	Faradayovy sondy	37
4.28	Experimentální verze elektronové svářečky MEBW-60/2-E nainstalovaná v ÚPT	39

5.1	Model vychylovacího systému elektronového svazku	41
5.2	Hardwarová část vychylovacího systému	42
5.3	Vychýlení elektronového svazku homogenním magnetickým polem	42
5.4	Princip kvadrantového polohového detektoru	45
5.5	Princip vyhodnocení změn magnetického pole deflektoru pomocnou cívkou	45
5.6	Vyhodnocení polohy svazku	46
5.7	Příklad sejmutého obrazu clony Faradayovy sondy.	47
5.8	Systematická chyba snímání polohy způsobená úhlem dopadu svazku a nenu- lovou tloušťkou clony	47
5.9	Geometrická zkreslení prvního řádu	49
5.10	Geometrická zkreslení druhého řádu	49
5.11	Geometrická zkreslení třetího řádu	49
5.12	Síť kontrolních bodů pro určení zkreslení vychylovacího systému	50
5.13	Příklad ovlivnění polohy svazku hysterezí magnetického obvodu deflektorů	51
5.14	Objasnění vlivu hystereze magnetického obvodu deflektorů na reprodukovatel- nost nastavení polohy svazku	51
5.15	Demagnetizace tlumenými kmity (degauss)	52
5.16	Degradace REM obrazu způsobená rušením vychylovacího systému různými kmity	53
5.17	Náhradní schémata vychylovacích cívek se započtením vlivu vířivých proudů	55
5.18	Napětí na vychylovacích cívkách a efektivní vychylovací proud během rychlého rastrování zatíženého vířivými proudy (simulace)	56
5.19	Deformace REM obrazu způsobená „opožděním“ vychylování svazku	56
5.20	Zjednodušené schéma vychylovacích cívek s napájecím zdrojem a parazitní kapacitou	57
5.21	Vliv parazitní kapacity na napěťové a proudové průběhy	57
5.22	Projevy nenulové doby ustálení polohy svazku při gravírování	58
5.23	Doba ustálení výchylky svazku	59
6.1	Orientace řezů svazkem	61
6.2	Náčrtek k definici plošné a lineární proudové hustoty svazku	62
6.3	Odstranění stejnosměrné složky a šumu pozadí signálu z detektoru	63
6.4	Příčné profily svazku s vyznačenou obálkou	64
6.5	Princip narovnání osy podélného profilu svazku	65
6.6	Podélný profil svazku s nakloněnou a narovnanou osou	65
6.7	Integrační podélný profil zaostřeného svazku získaný přeostrněním čočky s vy- značenou obálkou	66
6.8	Aproximace podélné obálky svazku podle vztahu	66
6.9	Transformace polohy a měřítka profilů naměřených přeostrněním svazku	68
6.10	Podélný profil získaný přeostrněním čočky a jeho transformace	69
6.11	Normalizovaný průběh proudové hustoty svazku s normálním rozložením	69
6.12	Vzorkování proudové hustoty různě velkými clonami	70
6.13	Modelovaná odezva snímače proudové hustoty	71
6.14	Relativní chyba určení průměru svazku	72
6.15	Relativní chyba určení proudové hustoty svazku	72
6.16	Principiální schéma Faradayovy sondy	74
6.17	Vliv tvaru kolektoru na sběrovou účinnost detektoru	74
6.18	Vliv profilu otvoru na zachycení BSE či SE elektronů	74
6.19	Zvýšení detekční účinnosti elektrickým polem	75
6.20	Schéma signálního řetězce detektoru	75
6.21	Aktivní převodník proud/napětí s operačním zesilovačem	75
6.22	Model šíření tepla	76

6.23	Průběh nárůstu teploty vypočtený numericky a podle odhadu	77
7.1	Náčrtek k experimentálnímu určení středu vychylovacího systému	83
7.2	Uspořádání měřicí aparatury pro určení zkreslení vychylovacího systému . .	84
7.3	Zkreslení vychylovacího pole	85
7.4	Posun svazku vlivem remanence magnetického obvodu vychylovacího systému	87
7.5	Poloha měřicích bodů při stanovení dlouhodobé stability vychylovacího systému	88
7.6	Fluktuace vychylování	89
7.7	Fluktuace vychylování	90
7.8	Závislost proudu svazku na předpětí Wehneltu a žhavicím proudu katody .	92
7.9	Závislost proudu svazku na předpětí Wehneltu a energii svazku	93
7.10	Závislost proudu svazku na předpětí Wehneltu pro tři polohy vlákna katody	93
7.11	Závislost napětí katody na žhavicím proudu v průběhu její životnosti	95
7.12	Závislost relativního jasu katody na žhavicím proudu v průběhu její životnosti	95
7.13	Závislost odporu katody na žhavicím proudu v průběhu její životnosti	95
7.14	Závislost relativního jasu katody na žhavicím napětí v průběhu její životnosti	95
7.15	Příčné profily svazku pro různé proudy fokusační čočky	97
7.16	Příčné řezy svazkem na ose fokusačního proudu	98
7.17	Srovnání podélných profilů měřených přeostršením čočky a pohyblivým detektorem	100
7.18	Příčné profily svazku v závislosti na předpětí Wehneltova válce	103
7.19	Příčné profily svazku pro různé žhavení katody při konstantním předpětí Wehneltova válce	104
7.20	Příčné profily svazku pro různé žhavení katody při konstantním proudu svazku	105
7.21	Příklad dvou profilů svazku pro stanovení optimálního žhavení katody . . .	107
7.22	Závislost BPP na žhavicím proudu katody I_C a proudu svazku I_B	107
7.23	Závislost optimálního žhavicím proudu katody I_C na proudu svazku I_B . . .	108
7.24	Závislost BPP na žhavicím proudu katody I_C a relativním stáří katody	109
7.25	Závislost optimálního žhavicím proudu katody I_C na relativním stáří katody	109
7.26	Závislost poloměru svazku v nejužším místě (pasu) na proudu svazku a poloze katody	111
7.27	Závislost divergence svazku θ na proudu svazku a poloze katody	111
7.28	Závislost fokusačního proudu I_F na proudu svazku a poloze katody	112
7.29	Závislost BPP na proudu svazku a poloze katody	112
7.30	Závislost maxima lineární výkonové hustoty Q_L na proudu svazku a poloze katody	113
7.31	Závislost odhadu maxima plošné výkonové hustoty Q_S na proudu svazku a poloze katody	113
7.32	Závislosti proudu čočky na proudu svazku a pracovní vzdálenosti	115
7.33	Závislosti polohy virtuálního zdroje na proudu svazku	115
C.1	Série profilů pro polohu katody 1,1 mm	127
C.2	Série profilů pro polohu katody 1,2 mm	128
C.3	Série profilů pro polohu katody 1,3 mm	128
C.4	Série profilů pro polohu katody 1,4 mm	129
C.5	Série profilů pro polohu katody 1,5 mm	129

Seznam tabulek

2.1	Hloubka vniku elektronů pro různé materiály a urychlovací napětí	4
2.2	Rozsah potřebné proudové hustoty elektronového svazku pro různé aplikace	5
5.1	Charakteristické typy geometrického zkreslení	48
6.1	Chyba vyhodnocení průměru svazku	71
6.2	Relativní chyba určení proudové hustoty svazku	73
6.3	Materiálové konstanty vybraných kovů	77
6.4	Doba potřebná k dosažení teploty tavení t_T a konstanta τ_1 pro vybrané materiály	79
6.5	Měrná tepelná dávka potřebná k dosažení teploty tavení povrchu a rychlost svazku	79
7.1	Naměřené hodnoty zdánlivého průměru mince pro určení středu vychylování	83
7.2	Vypočtené polohy středu vychylování	83
7.3	Podmínky při experimentálním určení zkreslení vychylovacího systému	85
7.4	Koeficienty přenosové funkce získané měřením	86
7.5	Statistické údaje zbytkových (neodstraněných) chyb Δp po korekci zkreslení vychylovacího systému	86
7.6	Podmínky při měření remanentního magnetismu	87
7.7	Podmínky při měření stability vychylovacího systému	88
7.8	Statistické hodnoty měření stability vychylovacího systému	89
7.9	Podmínky při měření závislosti přenosu trysky na žhavicím proudu katody	91
7.10	Koeficienty výrazu (7.4) pro různé žhavicí proudy I_C	92
7.11	Koeficienty výrazu (7.4) pro různé energie svazku E_K	92
7.12	Podmínky při měření závislosti přenosu trysky na energii svazku	92
7.13	Koeficienty výrazu (7.4) pro různé polohy vlákna katody	93
7.14	Podmínky při experimentálním určování volt-ampérových charakteristik katody	94
7.15	Podmínky při snímání příčných profilů v okolí pasu svazku	96
7.16	Příčné řezy svazkem podél optické osy – přehled hodnot	98
7.17	Podmínky při srovnávacím měření podélného profilu se stacionárním a pohyblivým detektorem	99
7.18	Srovnání parametrů svazku určených z profilů získaných se stacionárním a pohyblivým detektorem	99
7.19	Podmínky při měření rozložení výkonové hustoty v příčném profilu svazku při změně předpětí Wehneltu	101
7.20	Příčné profily svazku při různém předpětí Wehneltova válce – přehled hodnot	101
7.21	Příčné řezy svazkem pro různé žhavení katody při konstantním předpětí Wehneltu 525 V – přehled hodnot	102
7.22	Příčné řezy svazkem pro různé žhavení katody při konstantním proudu svazku 10 mA – přehled hodnot	102
7.23	Podmínky při experimentálním určování optimálního žhavicího proudu katody	106
7.24	Výsledky fitování výrazu (7.5)	107
7.25	Výsledky fitování výrazu (7.5) s $k_2 = 11,23$	107
7.26	Podmínky při experimentálním určení závislosti optimálního žhavení katody na jejím stáří	109

7.27	Podmínky při experimentálním určování závislosti kvality svazku na poloze vlákn katody	110
7.28	Podmínky při měření fokusačních křivek	114
B.1	Význam koeficientů vektoru $\mathbf{p}$ funkce transform	124
B.2	Řád transformace a odpovídající délka vektoru $\mathbf{p}$ funkce transform	124

Seznam symbolů a zkratek

Kurzívou je uvedeno číslo vztahu a strana prvního výskytu symbolu.

Fyzikální konstanty

m_e	Klidová hmotnost elektronu	$9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
μ_0	Permeabilita vakua	$1,2566 \cdot 10^{-6} \text{ H m}^{-1}$
q_e	Náboj elektronu	$-1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Symbols

A	Přenosová matice (5.15, str. 48)	
a	Poloha předmětu (6.9, str. 67)	mm
a_U, a_V	Koeficienty přenosové matice (5.15, str. 48)	
$A(x)$	Tvarová funkce clony (6.21, str. 70)	–
α	Teplotní vodivost (6.31, str. 76)	$\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$
B	Vektor indukce magnetického pole (2.1, str. 3)	T
B	Magnetická indukce (5.3, str. 42)	T
b	Poloha obrazu (6.9, str. 67)	mm
b	Počet bitů převodníku (5.8, str. 43)	–
b	Součinitel útlumu (5.18, str. 52)	s^{-1}
BPP_0	Minimální (základní) hodnota BPP (7.5, str. 106)	mm mrad
BPP	Beam Parameters Product (součin parametrů svazku) (6.8, str. 67)	mm mrad
BPP_a	Aproximace BPP (7.5, str. 106)	mm mrad
c_M	Měrná tepelná kapacita (6.31, str. 76)	$\text{J kg}^{-1} \text{ K}$
C_P	Parazitní kapacita (5.25, str. 58)	nF
d_A	Průměr/šířka měřicí clony (6.17, str. 69)	mm
d_S	Průměr svazku (6.23, str. 71)	mm
d_V	Hloubka vniku (2.4, str. 4)	μm
d_X, d_Y	Rozměry svazku ve směru os x a y (str. 96)	mm
d'	Zdánlivý průměr (7.1, str. 82)	mm
$d_{10/90}$	Průměr svazku pro změnu signálu z 10 % na 90 % (str. 18)	mm
$d_{4\sigma}$	Průměr svazku podle normy ISO 11 146 (2.5, str. 18)	mm
$d_{50\%}$	Průměr svazku pro pokles na 50 % maximální hodnoty (str. 18)	mm
d_{86}	Průměr svazku pro 86 % maximálního výkonu (str. 18)	mm
$d_{1/e}$	Průměr svazku pro pokles na $1/e$ maximální hodnoty (str. 18)	mm
d_{1/e^2}	Průměr svazku pro pokles na $1/e^2$ maximální hodnoty (str. 18)	mm
Δr	Chyba vyhodnocení polohy (5.14, str. 47)	mm
E	Vektor intenzity elektrického pole (2.1, str. 3)	V m^{-1}
e	Chybový vektor (5.16, str. 48)	μm
E_k	Kinetická energie elektronu (2.2, str. 3)	eV
ε	Emitance (str. 17)	mm mrad
η_D	Sběrová účinnost detektoru (6.16, str. 68)	–
f	Frekvence (5.18, str. 52)	Hz
f	Ohnisková délka (6.11, str. 68)	mm
f_0	Nominální ohnisková délka (6.14, str. 68)	mm
f_A	Nelineární přenosová funkce (5.13, str. 44)	
F_L	Lorentzova síla (2.1, str. 3)	N
f_L	Lineární přenosová funkce (5.9, str. 44)	

f_S	Vzorkovací kmitočet (6.30, str. 76)	Hz
φ	Úhel vychýlení (5.2, str. 42)	rad
g_{Du}, g_{Dv}	Transkonduktance U a V budičů deflektorů (5.6, str. 43)	A V ⁻¹
$\mathbf{i}$	Proudový vektor deflektorů (i_U, i_V) (5.1, str. 42)	A
I	Proud (5.3, str. 42)	A
i	Okamžitá velikost proudu (5.18, str. 52)	A
I_0	Počáteční amplituda proudu (5.18, str. 52)	A
I_A	Proud svazku prošlý clonou (6.24, str. 72)	mA
I_B	Proud pozadí (6.27, str. 73)	mA
I_C	Žhavicí proud (str. 91)	A
I_D	Proud detektoru (5.25, str. 58)	mA
I_E	Proudů uniklých elektronů z detektoru (6.27, str. 73)	mA
I_F	Budicí proud magnetické čočky (6.10, str. 67)	mA
I_S	Proud svazku (6.27, str. 73)	mA
J	Plošná proudová hustota (2.5, str. 18)	A mm ⁻²
J_0	Proudová hustota ve středu svazku (6.18, str. 70)	A mm ⁻²
J_A	Proudová hustota podle proudu prošlého clonou (6.25, str. 72)	A mm ⁻²
K	Lineární proudová hustota (2.7, str. 18)	A mm ⁻¹
k	Součinitel tvaru vinutí (5.3, str. 42)	
K_0	Lineární proudová hustota ve ose svazku (6.20, str. 70)	A mm ⁻¹
k_1, k_2	Koeficienty aproximace BPP (7.5, str. 106)	–
k_2	Koeficient závislosti $I_B(U_W)$ 2. řádu (7.4, str. 91)	mA V ⁻²
k_3	Koeficient závislosti $I_B(U_W)$ 3. řádu (7.4, str. 91)	mA V ⁻³
k_c	Činitel vazby (5.23, str. 55)	–
k_D	Citlivost deflektoru (5.5, str. 43)	mm A ⁻¹
k_{DAU}, k_{DAV}	Konstanta D/A převodníku (5.7, str. 43)	V
k_F	Konstanta čočky (6.10, str. 67)	m A ²
k_H	Strmost růstu teploty (6.37, str. 78)	K s ⁻¹
k_U, k_V	Citlivost U a V deflektoru (5.10, str. 44)	m
L	Délka (6.40, str. 78)	mm
l	Délka pole deflektoru (5.2, str. 42)	m
L_D	Indukčnost vychylovacích cívek (5.21, str. 54)	H
L_E	Indukčnost obvodu vířivých proudů (str. 55)	μH
l_F	Efektivní délka pole magnetické čočky (6.10, str. 67)	mm
λ	Tepelná vodivost (6.31, str. 76)	W m ⁻¹ K
M	Vzájemná indukčnost (str. 55)	H
M	Zvětšení (6.15, str. 68)	–
N	Počet závitů cívky (5.3, str. 42)	–
N_P	Počet bodů (6.30, str. 76)	–
$\mathbf{p}$	Polohový vektor (p_X, p_Y) (5.1, str. 42)	m
P	Výkon (6.45, str. 80)	W
$\mathbf{q}$	Polohový vektor nelineárního korektoru (q_X, q_Y) (5.13, str. 44)	m
Q_L	Lineární hustota výkonu (6.4, str. 62)	W mm ⁻¹
Q_S	Plošná hustota výkonu (6.3, str. 62)	W mm ⁻²
Q_V	Objemová hustota výkonu (6.32, str. 77)	W m ⁻³
q_V	Objemová hustota náboje (6.1, str. 61)	C mm ⁻³
$\mathbf{r}$	Polohový vektor v hrubém souřadném systému (r_U, r_V) (5.10, str. 44)	m
r	Poloměr svazku (6.7, str. 67)	mm
r	Radiální souřadnice (6.18, str. 70)	mm
r	Radiální výchylka svazku (5.14, str. 47)	mm
r_0	Poloměr pasu svazku (6.6, str. 66)	mm
r_a	Aproximovaný poloměr svazku (6.6, str. 66)	mm
R_D	Odpor převodníku proud/napětí (6.28, str. 75)	Ω

R_D	Vnitřní odpor vychylovacích cívek (5.21, str. 54)	Ω
R_E	Ekvivalentní odpor obvodu vířivých proudů (str. 55)	Ω
R_E^*	Přepočtený odpor obvodu vířivých proudů (str. 55)	Ω
r_o	Rozměr obrazu (6.14, str. 68)	mm
r_p	Rozměr virtuální zdroje (6.12, str. 68)	mm
$r_{1/e}$	Průměr svazku pro pokles na $1/e$ maximální hodnoty (6.18, str. 70)	mm
ρ	Hustota (2.4, str. 4)	kg m^{-3}
$\mathbf{s}$	Vstupní vektor vychylovacího systému (s_U, s_V) (5.10, str. 44)	–
s	Šířka zorného pole (7.1, str. 82)	mm
$\mathbf{s}_0$	Posun souřadného systému (s_{U_0}, s_{V_0}) (5.10, str. 44)	–
S_A	Efektivní plocha clony detektoru (6.16, str. 68)	mm^2
$S(x)$	Odezva snímače (6.22, str. 70)	–
t	Čas (5.18, str. 52)	s
t_A	Tloušťka clony (5.14, str. 47)	mm
t_D	Zpoždění (5.25, str. 58)	s
t_S	Doba snímání (6.30, str. 76)	s
t_T	Čas pro dosažení teploty tavení (6.41, str. 79)	μs
τ_1, τ_2	Časové konstanty (6.38, str. 78)	s
τ_{LR}	Časová konstanta vířivých proudů (5.24, str. 55)	s
θ	Divergence svazku (6.6, str. 66)	mrad
ϑ	Teplota (6.34, str. 78)	K
ϑ_T	Teplota tavení (str. 76)	$^{\circ}\text{C}$
$\mathbf{u}$	Řídící napěťový vektor proud. budiče (u_U, u_V) (5.6, str. 43)	V
u	Okamžitá velikost napětí (5.21, str. 54)	V
$\mathbf{u}_0$	Vektor napěťového posunu D/A převodníků (5.7, str. 43)	V
U_A	Urychlovací napětí (2.2, str. 3)	V
U_D	Napěťový signál detektoru (6.28, str. 75)	V
U_{max}	Maximální napětí (5.8, str. 43)	V
U_{min}	Minimální napětí (5.8, str. 43)	V
U_W	Předpětí Wehneltova válce (7.4, str. 91)	V
U_{W_0}	Závěrné napětí Wehneltova válce (7.4, str. 91)	V
$\mathbf{v}$	Vektor rychlosti (2.1, str. 3)	m s^{-1}
v	Rychlost (2.3, str. 4)	m s^{-1}
v_T	Minimální rychlost svazku (6.46, str. 80)	m s^{-1}
W_B	Plošná hustota energie dodané svazkem (6.42, str. 79)	J mm^{-2}
W_S	Plošná hustota energie pro roztavení materiálu (6.41, str. 79)	J mm^{-2}
x, y	Poloha v rovině kolmé k ose svazku (2.5, str. 18)	mm
z	Poloha v ose z (optické ose) (5.1, str. 42)	mm
z_0	Poloha pasu svazku (6.6, str. 66)	mm
z_A	Poloha clony (5.14, str. 47)	mm
Z_{AD}	Vstupní impedance AD převodníku (6.28, str. 75)	Ω
z_d	Poloha detektoru (6.11, str. 68)	mm
z_L	Poloha středu čočky (7.6, str. 114)	mm
z_o	Poloha obrazu (6.14, str. 68)	mm
z_p	Poloha virtuální zdroje (6.11, str. 68)	mm
z_V	Poloha středu vychylování (5.4, str. 43)	mm
z_Z	Poloha virtuálního zdroje elektronů (7.6, str. 114)	mm

Zkratky

ÚPT	Ústav přístrojové techniky AV ČR
A/D	Analogově-digitální (převod)
D/A	Digitálně-analogový (převod)
DAQ	Data Acquisition Card (zařízení pro sběr dat)
FWHM	Full Width at Half Maximum (pološířka)
GUI	Graphical User Interface (grafické uživatelské rozhraní)
MEBW-60/2	Micro Electron Beam Welder
REM	Rastrovací Elektronový Mikroskop
WD	Working Distance (pracovní vzdálenost)

Mé poděkování patří školitelce prof. RNDr. Bohumile Lencové, CSc. za vedení v průběhu studia a cenné připomínky k práci. Ing. Janu Dupákovi, CSc., který se v Ústavu přístrojové techniky mnoho let věnuje technologickému využití elektronového svazku, děkuji za odborné vedení a za poskytnuté konzultace. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Ivanu Vlčkovi, PhD., kterému vděčím za pečlivé přečtení rukopisu práce, za poznámky k jeho struktuře i za čas strávený diskusemi nad nejrůznějšími problémy souvisejícími s řešením práce. Nemohu opomenout jeho významný podíl na vývoji a realizaci prototypu elektronové svářečky MEBW-60/2. Současně patří můj dík i celému realizačnímu týmu, ve kterém svářečka vznikala a řediteli Ústavu přístrojové techniky RNDr. Lud'ku Frankovi, DrSc., který akci inicioval. Pracovníkům firmy Focus GmbH, a především řediteli Dr. Michaelu Merkelovi, děkuji za odvahu, se kterou se pustili do vzájemné spolupráce i za cenné připomínky k funkci zařízení. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svému otci, který mě k tématu technologického využití elektronového svazku přivedl a své manželce Jitce za vytvořené rodinné zázemí i za čtení rukopisu ve chvílích, kdy jí to péče o děti umožnila.

Martin Zobač

1 Úvod

Názvem elektronový svazek označujeme proud elektronů pohybující se ve vakuu přibližně stejným směrem a rychlostí. Na svazek můžeme působit pomocí elektronově-optických prvků. Pomocí elektronových čoček lze svazek soustředit na malou plochu a zkoncentrovat tak výkon na hodnoty i více než 10^6 W mm^{-2} . Srovnatelných hodnot dosahuje ze známých zdrojů tepla pouze laser. Výkon svazku můžeme regulovat spojitě v širokých mezích (od nuly do desítek kilowattů). Při interakci svazku s pevnou látkou elektrony předávají velkou část své kinetické energie materiálu ve formě tepla, což lze využít v technologických aplikacích k lokalizovanému intenzivnímu ohřevu materiálu (rychlost růstu teploty dosahuje až 10^9 K s^{-1}). Praktickým důsledkem je schopnost elektronového svazku protavit se velmi rychle (až několik set milimetrů za sekundu) jakýmkoliv materiálem včetně těch s vysokou teplotou tavení (molybden, wolfram). Při vhodném uspořádání je možno svazkem materiál i odpařovat [71, 98]. Místo působení elektronového svazku je možno měnit pomocí magnetického nebo elektrostatického pole, a to velmi rychle díky nízké setrvačnosti vychylovacího systému. Dosažitelná je rychlost v řádu tisíců metrů za sekundu a zrychlení přes 10^9 m s^{-2} .

Uvedené výhodné vlastnosti elektronového svazku se využívají v řadě zavedených technologií, především při svařování a obrábění. S rozvojem digitální a automatizační techniky vznikají nové aplikace, například 3D-tisk elektronovým svazkem, multikapilární svařování, tepelné zpracování povrchové vrstvy s řízeným rozložením výkonu v ploše nebo mikroobrábění. Všechny jmenované postupy vyžadují přesný a výkonný vychylovací systém a stabilní kvalitu elektronového svazku. Mají-li se z laboratorních podmínek přenést do výroby, je vyžadována spolehlivost a reprodukovatelnost, pokud možno nezávislá na zkušenostech obsluhy. Proto je třeba vyvíjet metody pro posuzování kvality generovaného svazku, pro stanovení pracovních charakteristik elektronové trysky a dalších procesních parametrů. Zjištěné hodnoty je nutné interpretovat a použít například k automatickému seřízení stroje.

Mé domovské pracoviště je Ústav přístrojové techniky v Brně, v.v.i. (dále jen ÚPT), instituce založená v roce 1957 za účelem vývoje vědeckých přístrojů, mimo jiné i elektronově-optických (elektronových mikroskopů). V šedesátých letech minulého století zde byl po prvotních pokusech s technologickým využitím svazku zahájen výzkum svařování elektronovým svazkem, který nadále pokračuje [125]. Tématem doktorského studia navazuji na téma své diplomové práce. Ta se zabývala vývojem zobrazovacího systému elektronové svářečky [119] a během jejího řešení jsem zkonstruoval elektronické zdroje pro magnetický vychylovací systém, které je možné řídit numericky z osobního počítače [31, str. 162]. V následujících letech jsem se věnoval konstrukci zdrojů vysokého napětí pro elektronové svařování. V průběhu doktorského studia proběhl vývoj nového zařízení pro svařování svazkem (*viz kapitola 4*). Tato skutečnost se stala zdrojem mnoha podnětů a témat k řešení. Většina problémů, kterými se zabývám v této práci, má přímou souvislost s řešením tohoto projektu.

Vzhledem k velké šíři tématu jsem se soustředil především na dvě hlavní oblasti: určení vlastností vychylovacího systému a měření rozložení výkonové hustoty v příčných a podélných řezech svazku. Stanovené cíle práce jsou uvedeny ve 3. kapitole.

Řešení vychylovacího systému je komplexní problém, zahrnující oblasti elektronové optiky, elektroniky a softwaru. Při vývoji elektronové svářečky a při experimentech

s novými aplikacemi elektronového svazku jsme narazili na řadu nedostatků stávajícího vychylovacího systému. Při mikro-svařování byla na závadu malá stabilita výchylky a nízká opakovatelnost nastavení polohy. Při vytváření tvarových svarů se negativně projevilo geometrické zkreslení. Při gravírování, které vyžaduje rychlé pohyby svazku, se ukázaly nedostatky v dynamice vychylování. Příčiny těchto nedostatků jsou rozebrány v 5. kapitole spolu s uvedením měřicích metod, které jsou ověřeny experimenty uvedenými v 7. kapitole.

Potřeba objektivního posouzení kvality elektronového svazku se ukázala jako nezbytná pro další vývoj zařízení. Rozložení výkonové hustoty v příčném, podélném nebo jinak vedeném řezu svazku (tzv. profilu svazku) poskytuje informace o vlastnostech svazku a o stavu elektronově-optického systému. Z profilu svazku můžeme například stanovit rozměry svazku nebo maximální výkonovou hustotu. Ze série profilů lze posoudit seřízení trysky, astigmatismus optické soustavy nebo najít rovinu nejmenšího průměru svazku. Při snímání profilu se používá nejčastěji vzorkování proudové hustoty ve svazku pomocí vhodného detektoru, například Faradayovy sondy se clonou vhodného tvaru. Vzájemný pohyb detektoru a svazku může být realizován mechanicky, ale měření je pomalé a vzhledem k vysoké intenzitě svazku i nebezpečné pro použitý detektor. Výhodné je využití vychylovacího systému svazku, které významně zkrátí dobu měření a zatížení detektoru. Rychlý a přesný vychylovací systém je proto nutnou podmínkou zvládnutí měření. Problematika měření profilů svazku, zpracování naměřených dat a jejich interpretace je popsána v 6. kapitole, ověření a praktické aplikace jsou v 7. kapitole.

Digitální řízení vychylování svazku a vybavení pro charakterizaci svazku se již staly součástmi moderních zařízení. Protože však jde o komerční výrobky, není jejich detailní technické řešení k dispozici odborné veřejnosti a jsou úzce svázané s konkrétním typem zařízení [21, 82]. Tyto důvody, vysoká pořizovací cena, uzavřenost řešení a další hlediska, vedly k vývoji vlastního systému.

V seznamu použité literatury se v omezené míře vyskytují odkazy na internetové zdroje. Jde ve většině případů o firemní stránky. V několika málo případech je použit odkaz na Wikipedii, který je však buďto doplněn o další zdroj nebo jde o informativní údaj, například historickou zajímavost.

Vzhledem k platné licenční smlouvě s firmou Focus GmbH jsou ve veřejné verzi práce některé části vypuštěny z důvodů utajení v nich obsažených informací. Jedná se o údaje, které těsněji souvisejí s konstrukcí elektronové svářečky MEBW-60/2.

2 Přehled stavu problematiky

2.1 Elektronový svazek

2.1.1 Úvod

Elektronový svazek se uplatňuje v řadě technických oblastí. Jedny z prvních a současně nejrozšířenějších aplikací byly vakuové elektronky a obrazovky (zkráceně CRT – z anglického Cathode Ray Tube). Princip byl znám již koncem 19. století, avšak k většímu rozšíření došlo až ve 20. letech minulého století. Zatímco elektronky již prakticky vymizely z běžného života, protože byly vytlačeny modernějšími elektronickými součástkami, vakuové obrazovky jsou stále poměrně běžné.

Elektronový svazek lze najít v řadě analytických přístrojů. Nejvýznamnější z nich je bezesporu elektronový mikroskop. O několik řádů vyšší rozlišení, které dosahuje ve srovnání s jeho světelným protějškem, souvisí se značně menší vlnovou délkou elektronů oproti viditelnému světlu [51, str. 113]. Elektronový svazek prošlý (u prořazovacích mikroskopů) vzorkem či odražený od vzorku nese informaci o jeho struktuře, topologii, chemickém složení a dalších vlastnostech. Při zbrzdění elektronů urychlených dostatečně velkým napětím vzniká kromě tepla též rentgenové záření. Vysoká pronikavost tohoto krátkovlnného elektromagnetického vlnění je využívána v lékařství, defektoskopii, krystalografii a dalších oborech.

Jak již bylo řečeno v úvodu, svazek při interakci s pevnou látkou předá velkou část své kinetické energie materiálu ve formě tepla. Toho si všimli již koncem 19. století badatelé (například Heinrich Geissler, William Crookes nebo Thomas A. Edison [108]) experimentující s tzv. katodovými paprsky ve zředěných plynech a dokázali tento jev již tehdy využít k tavení kovů. Dokonalejší technické prostředky pro tvorbu elektronových svazků byly vyvinuty nejprve pro jiné než technologické aplikace, totiž pro již zmíněné elektronové mikroskopy. Proto neudivuje, že také první pokusy s využitím tepelných účinků elektronového svazku byly provedeny v elektronových mikroskopech jejich konstruktéry (např. von Ardenem, von Borresem, Ruskou, Steigerwaldem). V druhé polovině dvacátého století se s rozvojem jaderného výzkumu a energetiky objevila naléhavá potřeba svařovat nové materiály (jako např. zirkon) klasickými metodami obtížně nebo vůbec nesvařitelné. Obdobím nejrychlejšího rozvoje elektronových svářeček byla šedesátá léta minulého století, kdy se vývoji a aplikaci těchto zařízení připojilo i Československo. Byl to začátek šedesátých let Výzkumný ústav zvaračský v Bratislavě a v roce 1963 mé pracoviště: Ústav přístrojové techniky v Brně (tehdy pod hlavičkou ČSAV – dnešní AV ČR).

2.1.2 Základní vztahy

Na elektrony – částice nesoucí elektrický náboj – je možno působit elektrickým a/nebo magnetickým polem. Časově neproměnné elektromagnetické pole působí na pohybující se elektron Lorentzovou silou:

$$\mathbf{F}_L = q_e (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \quad (2.1)$$

kde $q_e = -1,602 \cdot 10^{-19}$ C je náboj elektronu, $\mathbf{E}$ je vektor elektrické intenzity, $\mathbf{v}$ je vektor rychlosti elektronu a $\mathbf{B}$ je vektor magnetické indukce. Kinetická energie, kterou elektrony získají (případně ztratí) při pohybu v elektrostatickém poli je dána vztahem:

$$E_k = |U_A q_e|, \quad (2.2)$$

Tabulka 2.1: Hloubka vniku elektronů pro různé materiály a urychlovací napětí. Vypočteno podle vztahu (2.4) – v mikrometrech.

Materiál	Urychlovací napětí			
	30 kV	50 kV	60 kV	100 kV
Wolfram	1,0	2,7	3,9	10,9
Molybden	1,8	5,1	7,4	20,4
Tantal	1,1	3,2	4,5	12,6
Niob	2,2	6,1	8,8	24,5
Měď	2,1	5,9	8,4	23,4
Hliník	7,0	19,4	28,0	77,8
Nerez 17 240 (dle ČSN)	2,4	6,7	9,6	26,6

kde U_A je urychlovací napětí. Rychlost elektronů v urychlených z klidu je v nerelativistickém přiblížení rovna [51, str. 112]:

$$v = \sqrt{2 \frac{|U_A q_e|}{m_e}}, \quad (2.3)$$

kde m_e je klidová hmotnost elektronu $9,1 \cdot 10^{-31}$ kg. Jako jednotka kinetické energie se používá v oboru částicové fyziky jednotka eV odpovídající energii, kterou získá volný elektron urychlený elektrickým polem o rozdílu potenciálů 1 V ($1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}$ J).

2.1.3 Termoemise

Pro svazky s velikostí celkového proudu v řádu miliampérů vyhovují prakticky jenom termoemisní zdroje. Při termoemisi se z povrchu materiálu uvolňují do vakua elektrony, které měly dostatečnou (tepelnou) energii k překonání potenciálové bariéry. Výška potenciálové bariéry (tzv. výstupní práce) je materiálově závislá a pohybuje se v řádu jednotek eV. Z praktických důvodů se pro technologická zařízení používají (až na výjimky) pouze katody z čistých kovů, nejčastěji z wolframu (bod tavení 3422 °C, výstupní práce cca 4,8 eV) nebo tantalu (bod tavení 3017 °C, výstupní práce cca 4,4 eV). Pro dosažení dostatečně velké proudové hustoty je nutná relativně vysoká teplota katody (2500 K i více).

Poznámka: Jev jako první popsal Frederick Guthrie roku 1873, zabýval se jím mimo jiné Thomas A. Edison. Owen Willans Richardson získal za práci na tomto tématu v roce 1928 Nobelovu cenu [109].

2.1.4 Interakce s pevnou látkou

Problematika interakce elektronů s pevnou látkou je značně rozsáhlá. Meleka se v [71, kap. 3] věnuje tepelným účinkům svazku na materiál. Visser v [98, kap. 4] porovnává působení elektronového a laserového svazku na hmotu. Schultz v [89, kap. 3] studuje mechanismy pronikání elektronového svazku do hloubky. Voges et al. se v [103] simuluje interakci elektronového svazku s pevnou látkou pomocí metody Monte Carlo se zaměřením na mikroobrábění.

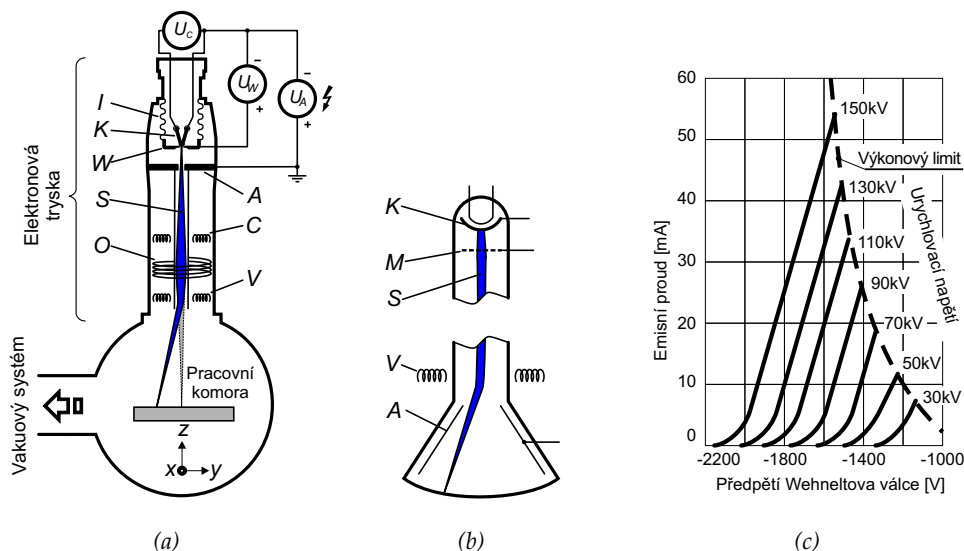
Pro účely této práce vystačíme s jednoduchým modelem. Elektrony po dopadu na pevnou látku pronikají pod povrch do poměrně malé hloubky, kterou je možno odhadnout podle empirického vztahu [98]:

$$d_V = 2,1 \cdot 10^{-5} \frac{U_A^2}{\rho} \quad [\mu\text{m}; \text{V}, \text{kg m}^{-3}], \quad (2.4)$$

kde U_A je urychlovací napětí a ρ je hustota materiálu. Hloubka vniku se podle vlastností látky a energie svazku pohybuje v mezích od tisícín do desetin milimetru (pro vybrané materiály jsou vypočtené hodnoty uvedeny v tabulce 2.1). Na této dráze předají elektrony

Tabulka 2.2: Rozsah potřebné proudové hustoty elektronového svazku pro různé aplikace (převzato z [71, str. 79]).

Výkonová hustota $W\ mm^{-2}$	Aplikace	Výkonová hustota $W\ mm^{-2}$	Aplikace
10^{-1} – 1	vytvrzování	1 – 10^1	žhánění
10^1 – 10^3	tavení	10^2 – 10^5	pokovování
10^4 – 10^6	svařování	10^5 – 10^7	obrábění



Obrázek 2.1: Elektronová tryska: (a) – uspořádání triodové elektronové trysky se základními elektronově-optickými prvky – svazek je zobrazen ve vychýleném a nevychýleném stavu (čárkovaně), (b) – srovnání s běžnou televizní obrazovkou, (c) – typická závislost proudu svazku na předpětí Wehneltova válce a urychlovacím napětí (převzato z [98]).

většinu své kinetické energie nepružnými srážkami částicím látky, což pozorujeme jako zvýšení teploty. Důsledkem zmíněných okolností je to, že dobře zaostřený svazek může zahřívat poměrně malý objem látky. Jinak řečeno, objemová hustota výkonu může dosáhnout hodnot řádu 10^5 až $10^8\ W\ mm^{-3}$. Energie dodaná svazkem se spotřebuje částečně na „povrchové jevy“, jako je emise světelného, tepelného i rentgenového záření, sekundárních elektronů, iontů apod. Větší část (z počátku asi 60 %, avšak později s postupující hloubkou vniku až 95 %) dodávaného výkonu látku zahřívá a v důsledku toho roste velmi rychle teplota zasaženého místa na hodnoty, při kterých látka změní skupenství na kapalné a pak plynné. Důležitý parametr, který do značné míry rozhoduje o tepelných účincích svazku na materiál, je plošná hustota výkonu. Její velikost se v praxi pohybuje ve značně širokém rozsahu od 10^{-1} do $10^7\ W\ mm^{-2}$, viz tabulka 2.2.

2.2 Elektronová tryska

V literatuře se pod pojmem elektronová tryska rozumí v některých případech zdroj elektronů a urychlovací elektrostatičká čočka. V tomto pojednání bude výrazem „tryska“ označován celý elektronově-optický systém. Na obr. 2.1a je schéma typické elektronové trysky triodového typu vhodné pro technologické účely vyžadující fokusovaný svazek. Její uspořádání je velmi podobné běžné televizní obrazovce, která je pro srovnání na obr. 2.1b.

Poznamenejme, že pro aplikace, kde jsou zapotřebí velké výkony s nevelkými nároky na fokusaci (například tavba kovů v pecích), se používají trysky v diodovém uspořádání s plošnou katodou Pierceova typu [71, str. 30].

2.2.1 Zdroj elektronů

Uvažovaná tryska má termoemisní katodu (K) přímo žhavenou průchodem elektrického proudu ze zdroje U_C . Katoda je nejčastěji z wolframového drátu ohnutého do tvaru písmene „V“, pro větší výkony pásková či složitějších tvarů. Pro vyšší tvárnost se někdy používá tantal. Na katodu je přiveden záporný potenciál ze zdroje vysokého napětí U_A , zatímco anoda (A) je na nulovém potenciálu. Mezi oběma elektrodami se vytvoří silné elektrické pole, které urychluje elektrony emitované z katody směrem k anodě. Anoda má ve svém středu otvor, kterým prochází vzniklý svazek. Množství elektronů opouštějících katodu lze ovlivňovat pomocí potenciálu na třetí elektrodě (W) nazývané Wehneltův válec. Jde o obdobu řídicí mřížky (M) obrazovky či elektronky. Potřebné předpětí dosahuje velikosti stovek až tisíců voltů [71, 98, 117].

Typická závislost proudu svazku na předpětí Wehneltova válce pro určitou geometrii trysky je na obr. 2.1c. Z elektronově-optického hlediska tvoří katoda, Wehneltova elektroda a anoda imersní elektrostatickou čočku. Změna potenciálu na Wehneltově válci pak má vliv nejen na celkový proud svazku, ale i na trajektorie jednotlivých elektronů. Tento způsob řízení výkonu však umožňuje velmi rychlou změnu proudu svazku díky poměrně malé setrvačnosti systému, dané především kapacitou Wehneltovy elektrody a přívodů (kabelu). Modulace výkonu je možná i jinými způsoby, například změnou urychlovacího napětí nebo žhavení katody, případně pomocí clon a vychylování svazku (blankování). Tyto způsoby se však pro své nevýhody v technologických aplikacích prakticky nepoužívají. Technické řešení zdroje předpětí Wehneltu je zkomplikováno faktem, že zdroj musí být plovoucí na potenciálu katody U_A .

2.2.2 Elektronová optika

Rozbíhavé trajektorie elektronů magnetické pole fokusační čočky (O) změni na sbíhavé tak, aby v místě dopadu měl svazek požadované rozměry. Účinky magnetické čočky [46, 47, 64] na elektronový svazek se podobají účinkům skleněné čočky na světelný svazek. Optická mohutnost magnetické čočky závisí na magnetické indukci pole uvnitř čočky a je ji tedy možno v určitém rozsahu měnit pomocí proudu v budící cívce. Každá magnetická čočka vykazuje určité principiální optické vady (sférickou a chromatickou), ale i nedokonalosti dané nepřesností výroby a seřazení.

Magnetická čočka bývá doplněna centrovacím systémem (C), který koriguje chod elektronového svazku čočkou tak, aby se minimalizovaly její optické vady a potlačil se nežádoucí efekt posunu svazku při změně zaostření. V některých případech je optický systém dvou i více čočkový [71, str. 57]. Zaostřovací systém se většinou provozuje v stacionárním režimu. Někdy je však nutné rovinu zaostření rychle měnit (například při zpracování členité součástky nebo při rozmítání svazku přes velkou plochu). Rychlé změně pole v magnetické čočce však brání její velká indukčnost a často i fakt, že její magnetický obvod není konstruovaný pro proměnlivá magnetická pole (vířivé proudy). Proto se někdy hlavní čočka doplňuje menší pomocnou čočkou pro dynamické přeostřování v menším rozsahu.

Další částí trysky obvykle bývá vychylovací systém (V), který umožňuje svazek odklonit od přímé dráhy a změnit místo dopadu. Většinou je vychylovací systém magnetický, protože elektrostatické vychylování se stává nevýhodné při velkých energiích svazku z důvodu neprakticky velkých napěťových rozkmitů na vychylovacích deskách. Blíže bude vychylování svazku zmíněno v části 2.4 – *Vychylování svazku*.

2.2.3 Vakuum

Ve vzduchu atmosférického tlaku je volná dráha elektronů velice krátká (typicky stovky nanometrů). Aby nedocházelo k rozptylu svazku kolizemi s molekulami vzduchu, je nutné

dosáhnout dostatečného vakua v prostoru, kterým má procházet. Zatímco v pracovní komoře postačuje tlak pod 0,1 Pa, v prostoru katody je nutné lepší vakuum, zejména z důvodu zamezení nežádoucích reakcí rozžhavené katody se zbytkovým plynem, a pro velmi dobré elektroizolační vlastnosti vysokého vakua [116, str. 258–270]. Zde je nutné udržovat tlak pod 0,001 Pa. Vytváření a udržování vakua je sice technická komplikace, která odpadá například při použití laseru, ale na druhou stranu jsou zpracovávány materiály chráněny před reakcemi s okolní atmosférou [71, str. 113].

2.2.4 Manipulace s polotovarem

Součástky zpracovávány v níže uvedených zařízeních jsou často velmi komplikovaných tvarů. Během výrobní operace je nutné směřovat elektronový svazek na požadované místo, případně i pod požadovaným úhlem. Proto je téměř vždy třeba kombinovat vychylování svazku a přestřování s mechanickým polohováním. Uspořádání mechanického manipulátoru je dáno konkrétní aplikací. Často jde o x-y stolek doplněný o další pohyby (z-posun, rotaci s naklápěním a podobně). Pro rotační součástky pak kombinace rotace se z-posuvem. Pro pohon manipulátorů se často používají stejnosměrné motory s permanentními magnety, případně krokové motory. Motory je vhodné umístit mimo pracovní komoru s ohledem na jejich chlazení a na možnost ovlivnění svazku rozptylovým magnetickým polem motorů. K odměřování polohy se používají běžné prostředky (například optická inkrementální čidla, indukční snímače a podobně). Konstrukce manipulátoru musí brát ohled na vakuová hlediska, musí být dostatečně tepelně odolná a nesmí obsahovat nevodivé části, které by se mohly nabíjet, a zmagnetizované části, které by mohly ovlivňovat trajektorii svazku.

2.3 Technologické využití elektronového svazku

2.3.1 Tavení, vakuové přetavení a čištění kovů ve velkém objemu

Princip tavení kovů pomocí elektronového svazku patentoval Marcello von Pirani roku 1905 v Německu, když pracoval u firmy Siemens & Halske [83]. Zařízení je obvykle diodového typu, kdy anodu tvoří tavený kov. Jako zdroj elektronů slouží nejčastěji tryska v Pierceově uspořádání. Materiály zpracovávány touto technologií jsou ze skupiny obtížně tavitelných či vysoce reaktivních, mezi jinými například titan a jeho slitiny, tantal, niob, molybden, wolfram, zirkon, hafnium, vanad, uran, křemík, platina nebo iridium. Též lze tímto způsobem zpracovávat některé keramické materiály [6]. Přetavením ve vakuu lze získat velice čisté kovy či slitiny pro chemický nebo elektrotechnický průmysl. Dosahované výkony jsou stovky až tisíce kW, ale existují i malé pece pro laboratorní použití. Zpracovávány objemy jsou v celosvětovém měřítku značné, největší zařízení jsou instalované v USA (odhad instalovaného výkonu v současnosti asi 28 MW) a Rusku.

2.3.2 Tepelné zpracování povrchové vrstvy

Schopnost intenzivního elektronového svazku vysokou rychlostí zahřát malý objem materiálu spolu s rychlým vychylováním svazku a velmi dobrou regulovatelností a reprodukovatelností celého procesu přináší nové možnosti v tepelném zpracování kovů [111]. Počítačové řízení umožňuje pomocí vychylování svazku dosáhnout téměř libovolného rozložení tepelného příkonu v ploše a tepelně ovlivnit přesně definovanou oblast zpracováváné součástky. Kontrolou procesních parametrů lze zajistit požadovaný teplotní profil. Zpětnou vazbu poskytují pyrometrická měření nebo kamera pracující v oblasti infračerveného spektra. Podle toho, dochází-li v procesu k roztavení materiálu či ne, lze zavést dělení na technologie tekuté a pevné fáze.

Do skupiny tepelného zpracování v tuhé fázi patří tvrzení a žíhání. Při povrchovém tvrzení se využívá toho, že po velmi krátkou dobu trvajícím ohřevu tenké vrstvy na teplotu

nižší, než je teplota tavení, dochází k rychlému odvodu tepla z horké zóny do hloubky materiálu a tím k zakalení povrchové vrstvy materiálu (obr. 2.2c). Pokles teploty dosahuje rychlosti až 10^4 K s^{-1} . Žhání se uplatní zejména při lokální povrchové rekrystalizaci.

Mezi tepelné zpracování v tekuté fázi lze zařadit přetavení, legování, plátování a disperzi. Přetavení povrchové vrstvy se uplatní např. pro zhutnění litiny či hliníkových licích slitin, případně ke „slití“ porézních povlaků získaných například šopováním (obr. 2.2a). Při legování je roztavena tenká vrstva materiálu spolu s deponovanou vrstvou vhodné příměsi. Difúzním procesem v tekuté fázi dojde ke vzniku požadované slitiny. Při plátování/nařování dojde k celoplošnému přitavení přidané vrstvy materiálu. Disperzním přetavením se dosáhne rozptýlení drobných částic v tavenině (obr. 2.2b). Tímto způsobem můžeme obohatit houževnatý, ale málo otěruvzdorný materiál o tvrdá zrna, která zajistí zvýšení tvrdosti povrchu i bez kalení.

Zatímco u technologií pevné fáze zůstává povrch součástky neporušený, při přetavení dochází ke zdrsnění povrchu a je nutné počítat s přídavkem na obrobení. Více informací o těchto procesech je možno nalézt v [13, 16, 58, 111–113].

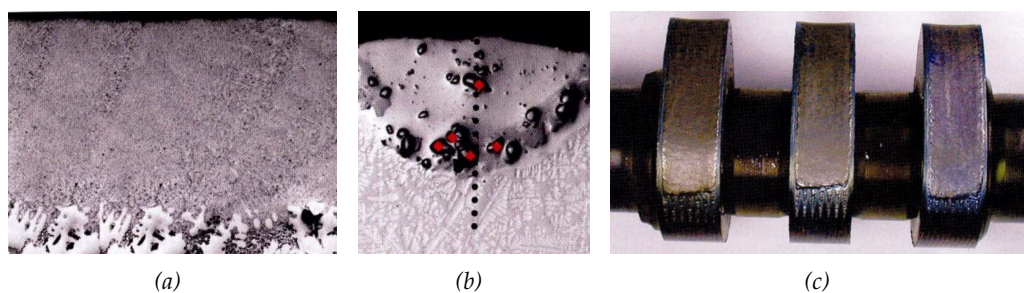
2.3.3 Svařování a pájení

Svařování elektronovým svazkem je zřejmě nejznámější technologie ze všech uvedených. Zaostřený svazek zahřívá materiál spojovaných součástek na teplotu vyšší, než je teplota tavení. Při dobře sesazených komponentech dojde k promísení taveniny na rozhraní (většinou bez přídavku materiálu) a po vychladnutí vzniká pevný spoj. Svazek má díky tzv. hloubkovému efektu schopnost pronikat do značně větší hloubky, než by vyplývalo ze základní teorie interakce elektronového svazku s pevnou látkou (viz [71, str. 85]). To umožňuje vytvářet velmi hluboké průvary, které navíc vynikají minimální šířkou tepelně ovlivněné oblasti (viz obr. 2.3a); dosahovaný poměr šířka:hloubka průvaru je až 1:30.

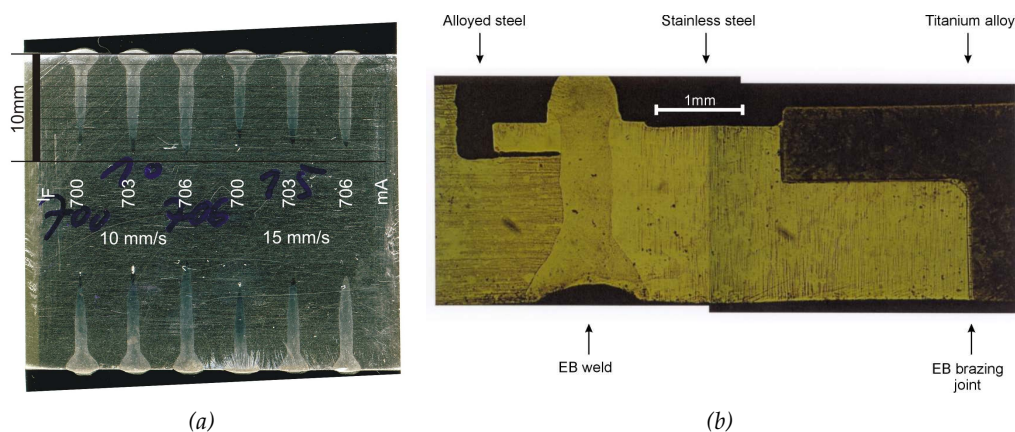
Ačkoliv uvedená schopnost elektronového svazku zahřát materiál na vysokou teplotu byla známa již dlouho před druhou světovou válkou, historie elektronového svařování začala až v padesátých letech 20. století. První publikovaná práce na toto téma byla od Dr. J. A. Stohra z roku 1957, ačkoliv Steigerwald měl v té době k dispozici vrtací zařízení (viz. § 2.3.4 – *Obrábění elektronovým svazkem*), které bylo jistě schopno i svařovat, ale zřejmě chyběla potřeba. V dalších letech vznikají obdobná zařízení jako Stohrovo (spolupracujícího s firmou Sciaky [90]) i v Německu, Velké Británii, Spojených státech a Rusku. První elektronová svářečka v bývalém Československu vznikla kolem roku 1963 v Ústavu přístrojové techniky v Brně [115].

Dnešní komerčně dostupná zařízení disponují pracovními komorami nejrůznějších rozměrů, od miniaturních s objemem několika litrů [31] až po obří zařízení s objemem 630 m^3 [8]. Používaná urychlovací napětí se pohybují v rozsahu 30 až 200 kV, běžné jsou svářečky s urychlovacím napětím 60 kV a 150 kV. Průvary dosahované v současnosti špičkovými zařízeními jsou až 150 mm v hliníku [27], ale současně existuje jako protipól oblast svarů se sub-milimetrovými [114] až mikrometrovými rozměry [19, 23, 91]. V současné době vznikají nové metody svařování elektronovým svazkem, například multikapilární svařování (viz obr. 2.4). Další informace je možno nalézt na internetových prezentacích výrobců elektronových svářeček [14, 84, 92]. Schultz v monografii [89] podává velmi ucelený přehled o svařování svazkem. Hrabovský et al. [50] uvádí použití elektronového svařování v přístrojové technice. Bärtele et al. [8] se zabývá mikrosvařováním pro MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems). Von Dobeneck v publikacích [26–28] přináší rozsáhlý přehled aplikací elektronového svařování v průmyslu. Dillthey et al. [24] se soustředil na nejnovější trendy v oboru.

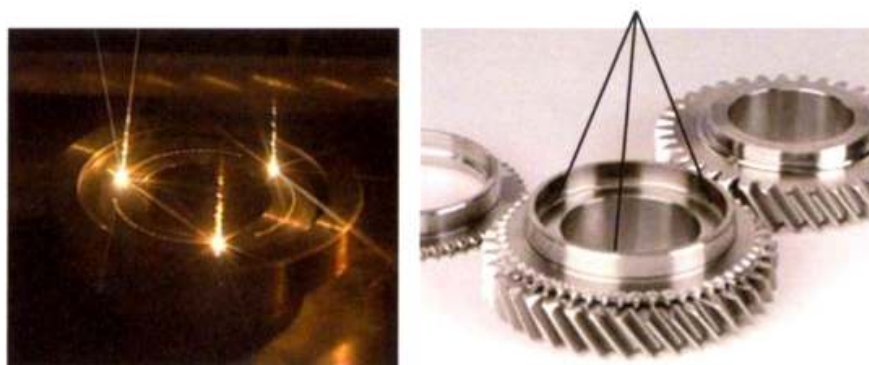
Zvláštní pozici má svařování elektronovým svazkem v oblasti spojování kovů s rozdílnými vlastnostmi. V určitých aplikacích je nezbytné použít materiály s výjimečnými



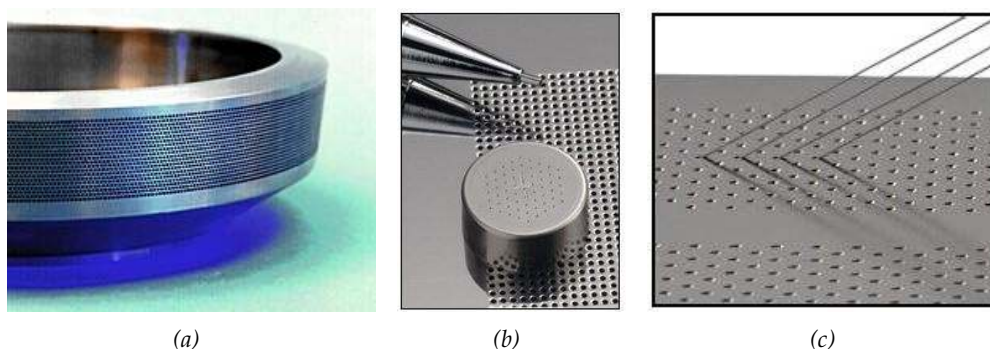
Obrázek 2.2: Tepelné zpracování povrchové vrstvy: (a) – zhutnění porézní slitiny, (b) – disperze tvrdých zrn v houževnatém materiálu, (c) – vačkové hřídele tvrzené přetavením. Převzato z [113].



Obrázek 2.3: Svařování elektronovým svazkem: (a) – výbrus svarů v nerezí, (b) – svařovaný a pájený spoj (snímek poskytl J. Dupák, ÚPT).



Obrázek 2.4: Multikapilární svařování elektronovým svazkem (převzato z [28]).



Obrázek 2.5: Vrtání otvorů elektronovým svazkem: (a) – nerezový buben pro výrobu umělých vláken (převzato z [92]), (b) – otvory o průměru 25 μm (ve válečku), (c) – otvory o průměru 0,5 mm pod úhlem 30° k povrchu v nerezí (převzato z [79]).

vlastnostmi. Například tam, kde se vyžaduje vysoká tepelná zatížitelnost je možné použít wolfram, molybden nebo tantal. Z ekonomických důvodů, pro lepší obrobiteľnost nebo z jiných příčin, je někdy vhodné z těchto materiálů vyrobit jen nezbytnou část daného zařízení a zbytek nahradit levnějším nebo jinak výhodnějším materiálem. Určité kombinace kovů však nelze klasickými metodami svařit, mimo jiné kombinace hliníku s titanem, niklem nebo stříbrem, mědi s nerezí nebo titanu s ocelí (viz obr. 2.3b). Dupák et al. [32] představuje svary nerezí s wolframem, tantalem a molybdenem. Von Dobeneck v [26, str. 66] uvádí svary hliníku s ocelí.

2.3.4 Obrábění elektronovým svazkem

Prvním známým použitím elektronového svazku k obrábění bylo vytváření clon s miniaturními otvory pro použití v elektronových mikroskopech, a to přímo svazkem v mikroskopu samém (práce von Ardeneho okolo roku 1938). V roce 1942 von Borries obdržel patent na elektronově-optický vrtací přístroj. V roce 1949 německý fyzik Karl-Heinz Steigerwald, který se zabýval mimo jiné výrobou saffírových ložisek do hodin, zahájil se svými spolupracovníky výzkum tepelného působení svazku. Ty v roce 1952 vyústily v konstrukci prvních průmyslově použitelných vrtacích zařízení.

Ze všech uvedených technologií vyžaduje obrábění nejvyšší výkonovou hustotu svazku. V závislosti na vlastnostech obráběného materiálu (zejména tepelné vodivosti a kapacitě) se potřebná intenzita pohybuje v řádu 10^5 – 10^7 W mm^{-2} . Materiály s malou tepelnou vodivostí (keramiky, plasty) se odpařují snadněji [33, 37], naopak velká tepelná vodivost (kovy jako měď apod.) je na překážku. Zařízení pracují často v pulzním režimu, což snižuje střední příkon trysky a zmenšuje tepelné ovlivnění obrobku díky rozvedení tepla do okolí mezi jednotlivými pulsy. Velice hodnotnou publikací z této oblasti, kde lze navíc najít přehledné srovnání s vrtáním laserem, je práce Vissera [98].

Moderní zařízení pracují většinou s urychlovacím napětím 150 kV a dosahují produktivity až 3000 děr za sekundu. Takto vysoké rychlosti dosahují především díky značnému pulsnímu výkonu generátoru svazku (řádově desítky kW) a výkonové hustotě ve stopě 10^6 W mm^{-2} [92]. Metoda vrtání „za letu“ (z anglického on-the-fly) umožňuje vrtání děr do rotačních součástí, jako například do bubnu na obr. 2.5a. Při této metodě se obráběná součástka točí stálou rychlostí, svazek během vytváření otvoru sleduje její pohyb a odpařuje materiál a po dokončení otvoru se přesune na další místo. Tím odpadají časy potřebné pro mechanické pozicování obrobku. Dosahované nejmenší průměry děr jsou řádově 25 μm (obr. 2.5b). Lze vrtat i díry, které nejsou kolmé k povrchu součástky (obr. 2.5c). Více informací lze nalézt na internetových prezentacích výrobců [79, 92].

Dupák v [34] uvádí aplikaci obrábění elektronovým svazkem při výrobě plošného topného tělesa. Svazkem je vytvořen meandr v titanové vrstvě vytvořené magnetronovým

naprašování na keramické podložce. Vzniklá odporová dráha má vhodnější elektrické parametry než původní spojitá vrstva. V [36] stejný autor popisuje vytváření malých otvorů do součástek z křemenného skla.

2.3.5 Gravírování a texturování

Dynamickým řízením místa dopadu svazku lze vytvářet obecné textury na povrchu materiálu. Parametry procesu a vlastnosti materiálu pak rozhodují, dojde-li k odpaření (a tím vzniku depresí) nebo jen k přetavení materiálu. Tímto postupem je možno vytvářet značky či nápisy na povrchu součástek [25, 31, 117, 119].

Rüthrich et al. [88] popisuje zdrsňování povrchu součástek pomocí depresí vytvořených elektronovým svazkem. Postup se používá v automobilovém průmyslu pro hybridní odlitky motorových bloků, u kterých jsou namáhané části jinak hliníkové skříně vyrobeny z oceli. Důlky rozmístěné v pravidelných rastroch zvětšují povrch ocelové vložky. Hliníková slitina zateče do těchto nerovností, čímž selepší vzájemné propojení a přestup tepla.

Dance a Buxton [17] uvádí technologii s obchodním názvem Surfi-Sculpt™, která nevyužívá odpařování materiálu intenzivním svazkem, ale transport vznikající taveniny pomocí povrchového napětí. Promyšleným vedením svazku lze vyzdvihnout materiál až do výšky několika milimetrů (obr. 2.6a). Technologie se (podobně jako v předchozím případě) uplatní při zlepšování vlastností kompozitních materiálů upravením místa styku rozdílných materiálů.

2.3.6 Aditivní postupy pro rychlou prototypovou výrobu

Tato technika využívající elektronový svazek umožňuje vytvořit trojrozměrný objekt na základě virtuálního modelu v počítači. Jeden používaný postup spočívá v natavování kovového prášku umístěného v nádobě s pohyblivým dnem. Svazek je vychylován tak, aby na povrchu vytvořil tenkou vrstvu přetaveného kovu odpovídající řezu vytvářené součástky v určité rovině (obr. 2.7a). Poté je dno nádoby sníženo, na povrch nanese další vrstva prášku a proces se opakuje. Tloušťka jedné vrstvy je 0,05 až 0,2 mm v závislosti na vlastnostech materiálu, dosahovaná laterální přesnost $\pm 0,4$ mm. Rychlost přetavování je 60 cm³ materiálu za hodinu při výkonu svazku okolo 4 kW. Používané materiály jsou čistý titan (lékařství, letectví), slitiny titanu (např. Ti6Al4V) nebo slitina kobaltu, chromu a molybdenu (pro použití v lékařství či pro výrobu forem pro vstřikování plastů).

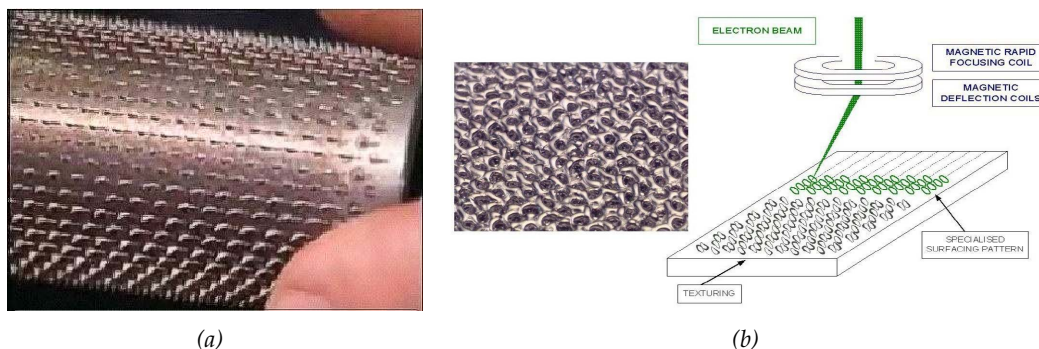
Druhá metoda pracuje s materiálem ve formě drátu (případně prášku), který je kontinuálně dodáván před elektronovou trysku, kde jej svazek roztaví. Celé soustrojí je umístěné na robotickém manipulátoru a nanáší kov vrstvu po vrstvě na podložku podle požadovaného tvaru. Výhoda je vyšší depoziční rychlosti (7,5 až 20 kg h⁻¹), nevýhoda v menší přesnosti depozice [90, Free form fabrication].

Obdobná a patrně známější laserová technika je založena na vytvrzování polymeru UV zářením. Takto získaný výrobek však svými mechanickými vlastnostmi nemůže konkurovat kovovým tělesům získaným 3D-tiskem elektronovým svazkem. Ty svými mechanickými vlastnostmi často předčí, alespoň podle tvrzení firmy, výrobky získané konvenčním obráběním. Další informace možno nalézt v [2, 93].

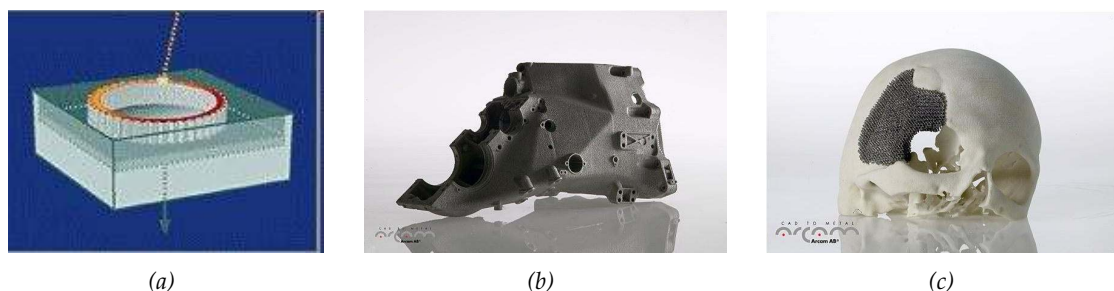
2.4 Vychylování svazku

2.4.1 Typy vychylovacích systémů

Elektronový svazek je možno vychylovat elektrickým nebo magnetickým polem. Elektrostatické vychylování (viz obr. 2.8a) se vyskytuje v zařízeních s nižšími energiemi svazku nebo tam, kde jsou potřeba pouze malé výchylky. Při vysokých energiích je realizace elektrostatického vychylování obtížná, protože potřebné napětí na vychylovacích



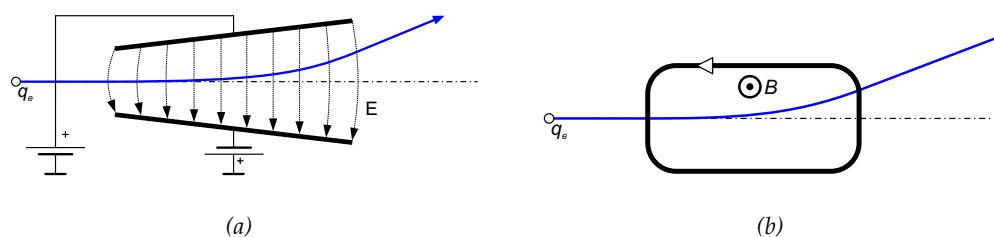
Obrázek 2.6: Technologie Surfi-Sculpt™: (a) – kovový válec pokrytý texturou; (b) – princip metody (převzato z [95]).



Obrázek 2.7: 3D-tisk elektronovým svazkem: (a) – vytváření trojrozměrných objektů aditivním procesem s pomocí elektronového svazku; Příklady výrobků: (b) – převodová skříň; (c) – lebeční implantát (zdroj: [2]).

deskách roste úměrně urychlovacímu napětí svazku [64] a konstrukce napájecích zdrojů se komplikuje. Příkladem může být impulsní zdroj, který popisuje Baker – Johnson [5]. Proto se tyto systémy více rozšířily pouze u osciloskopických obrazovek, okrajově se používají u elektronových mikroskopů pracujících s poměrně nízkou energií částic, v elektronové litografii, při velmi rychlém zatmívání svazku či pro pomocné rychlé vychylování v sub-poli (hlavní vychylování je magnetické) a ve speciálních přístrojích, například bleskových kamerách (streak camera – zařízení pro záznam časových průběhů se šířkou pásma v řádu gigahertzů).

Běžnější způsob vychylování svazku je magnetickým polem (viz obr. 2.8b), které se vytváří vhodně tvarovanými budícími cívkami, v některých případech doplněných o jádro z magneticky měkkého materiálu. Magnetické pole odchyluje elektronový svazek směrem od optické osy v míře závislé na intenzitě pole a ve směru daném orientací pole. Dobře konstruované vychylovací cívky jsou lineární v celém pracovním rozsahu (tj. výchylka svazku je úměrná budicímu proudu) a mají velkou citlivost.



Obrázek 2.8: Vychylování svazku (a) elektrickým a (b) magnetickým polem.

2.4.2 Jedno a vícestupňové vychylování

Vychylovací systémy se konstruují jako jedno, dvou i vícestupňové. Na obrázku 2.9a je jednostupňový systém, který svazek odchýlí od optické osy a ten dále pokračuje přímočaře. Prodloužením přímkové části trajektorie směrem zpět k optické ose určíme (zdánlivý) střed vychylování, který v případě jednostupňového systému leží uvnitř vychylovacích cívek.

V některých případech se vychylování doplňuje o další stupně. U dvoustupňového (viz obr. 2.9b) je přídavný deflektor buzen v opačném smyslu. Díky tomu je možné střed vychylování (tzv. pivotní bod) posunout do prakticky libovolného místa na optické ose. To je výhodné v případech, kdy vychýlený svazek musí procházet například clonou nebo čočkou. Leží-li pivotní bod v rovině clony, není maximální výchylka touto clonou omezena. Při vhodné volbě polohy pivotního bodu vzhledem k čočce se zamezí nežádoucí změně zvětšení při přeostrévání. Jiná aplikace dvoustupňového vychylování využívá možnosti nezávislého nastavení místa a úhlu dopadu svazku. Vychylovací systémy jsou nejčastěji dvouosé, umožňující vychylovat svazek ve dvou kolmých směrech.

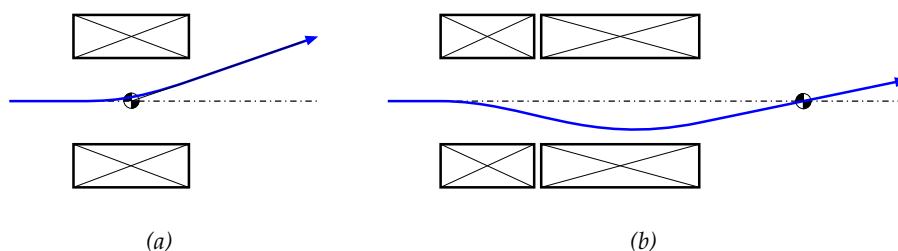
2.4.3 Využití vychylování svazku

Numericky řízené vychylování

Vychylovací systém lze využít v nejjednodušším případě k ručnímu nastavení místa dopadu svazku. Možnosti dynamického vychylování svazku ve spojení s moderní elektronikou jsou však daleko širší a vznikají tak podmínky pro nové metody (viz podkapitola 2.3 – *Technologické využití elektronového svazku*). Počítačem generované trajektorie místa dopadu svazku mohou být libovolného tvaru. V kombinaci s REM režimem (viz níže) je možno velmi přesně zvolit místo dopadu svazku, protože existuje jednoznačný vztah mezi místem v obraze a polohou (vychýlením) svazku. Rychlost pohybu svazku lze měnit ve velkém rozsahu, což lze využít například při gravírování (viz odstavec 2.3.5 – *Gravírování a texturování*), které lze realizovat různými postupy naznačenými například v [117]. Jedním z nich je modulace rychlosti vychylování v závislosti na požadované „tepelné dávce“, což odstraňuje nutnost měnit rychle okamžitý výkon svazku. Numerické řízení také přináší možnost redukce vad zobrazení zavedením korekčních (softwarových) členů, které „předzkreslí“ budící proudy deflektorů v opačném smyslu, než činí vady. Korekční vztahy mohou být realizovány pomocí analytických funkcí nebo look-up tabulek [18].

Zobrazování v rastrovacím režimu

Elektronový svazek lze využít k zobrazování předmětů v pracovní komoře podobně jako v rastrovacím elektronovém mikroskopu (REM) [119]. Svazkem se řádkuje po vymezené oblasti a pomocí vhodného detektoru se synchronně snímá signál odpovídající množství zpětně odražených a/nebo sekundárních elektronů. Z tohoto signálu lze vytvořit



Obrázek 2.9: Vychylování svazku (a) jednostupňovým a (b) dvoustupňovým vychylovacím systémem.

obraz na monitoru vykazující kontrast podle typu použitého detektoru [39, 40, 51]. Prostorové rozlišení obrazu je dané především velikostí stopy svazku. Ta je u technologických zařízení sice výrazně vyšší než u elektronového mikroskopu, nicméně dosažitelné rozlišení je v řadě případů postačující. Vlček [100] analyzuje zobrazovací vlastnosti technologické elektronové trysky a navrhuje možné úpravy zlepšující rozlišení přístroje. Světelnou optiku předčí zobrazení v REM režimu vyšší hloubkou ostroty, absencí rušivých odlesků a často i vyšším kontrastem [69]. Mezi nevýhody patří nemožnost svazkem zobrazovat během technologické operace. Tento nedostatek lze v některých případech odstranit rychlým střídáním zobrazování a (například) svařování [119, str. 11].

Navádění na spáru

Při elektronovém svařování je nutné svazek velmi přesně polohovat vzhledem ke spáře mezi svařovanými součástkami. Přesnost by měla být lepší než cca 1/5 šířky svaru, aby byl svar proveden v celé tloušťce (svar se směrem ke kořeni zužuje). V některých případech je obtížné dosáhnout tohoto požadavku po celé délce svaru, je-li součást nepřesně vyrobena nebo při upnutí tzv. „hází“. Řešení uvedeného problému je několik a mají společné to, že využívají vychylování svazku. Tzv. off-line systémy nejprve pomocí svazku s malým výkonem nasnímají oblast svařované spáry a automaticky nebo ručně určí trajektorii budoucího svaru. V druhém kroku je pak proveden svar již patřičně vysokým výkonem.

On-line systémy provádějí lokalizaci spáry během svařování, opět pomocí svazku. Ten je vždy na velmi krátkou dobu vychýlen před místo probíhajícího svařování a velmi rychle překmitne přes spáru. Z odezvy detektoru je určena poloha spáry a pokračuje svařování po zjištěné trajektorii [11].

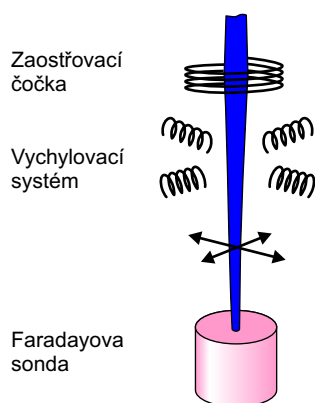
2.5 Řízení a diagnostika svazku

2.5.1 Úvod

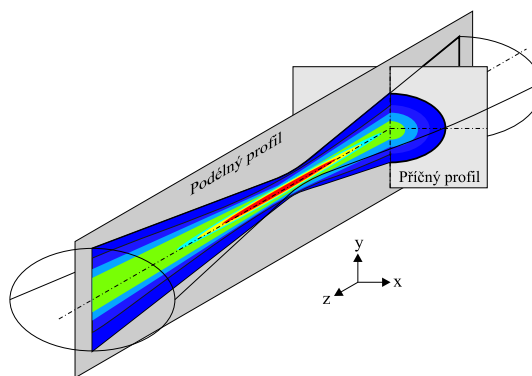
Řízení svazku označuje postupy sloužící k ovlivnění vybraných parametrů elektronového svazku, například jeho výkonu, zaostření, místa působení a podobně. K získání a formování svazku se využívá elektronová tryska a většinu parametrů svazku tak lze ovlivnit změnou nastavení trysky (viz § 2.2). Pojem *diagnostika svazku* označuje soubor měřicích metod vedoucích ke stanovení charakteristik svazku a elektronové trysky. Tyto informace jsou potřebné k seřízení přístroje, ke stanovení jeho vlastností, výkonnosti a k zajištění reprodukovatelného provozu.

Oba uvedené obory spolu úzce souvisejí, protože výsledky diagnostiky se využívají při řízení. Řada měřicích metod naproti tomu vyžaduje aktivní řízení určitých veličin. Příkladem může být určení přenosové charakteristiky elektronové trysky: je třeba nastavit zvolený žhavicí proud katody a měnit v určitém rozsahu předpětí Wehneltova válce za současného měření emisního proudu. S ohledem na skutečnost, že poměry v elektronově-optických zařízeních jsou poměrně složité a určitá charakteristika závisí na velkém počtu parametrů, je „ruční“ měření zdlouhavé a nepřesné. Pro běžnou praxi jsou navíc laboratorní postupy nevhodné. Cílem je automatizace měření a následného vyhodnocení. Obsluha zařízení, případně servisní technik, dostane k dispozici již zpracované údaje, případně jsou výsledky měření použity k automatickému seřízení přístroje.

Většina moderních zařízení disponuje základními prostředky pro seřízení elektronové trysky doplněné kontrolu jakosti prováděných operací. Protože jde většinou o komerční výrobky, nelze v této oblasti příliš čerpat z odborné literatury. Nemnoho technických informací najdeme ve firemních prezentacích a prospektech. O principu lze často jen spekulovat.



Obrázek 2.10: Princip měření profilu svazku Faradayovou sondou.



Obrázek 2.11: Příčný a podélný profil svazku. Definice rovin řezů na příkladu fokusovaného svazku.

Diagnostikou a měřením se zabývá Meleka [71] v publikaci z roku 1971. Uvedené principy zůstávají v platnosti, nicméně technická realizace je v řadě případů již překonaná. Podobně Schultz [89] zmiňuje některé principy měření, ale bez bližších technických detailů. Fath a Löwer [40] uvádí automatizované seřizování elektronové trysky (centrování a stigmování svazku) využívající měření rozložení proudové hustoty svazku, opět bez bližších detailů. Löwer [69] se zabývá analýzou a charakterizací elektronového svazku za účelem zvýšení opakovatelnosti v průmyslové výrobě. Von Dobeneck v [25] obecně rozebírá problematiku reprodukovatelnosti sériové výroby. Dora et al. [29] zmiňuje řízení zdroje vysokého napětí pro elektronovou trysku. Horáček a Dupák [49] popisují řízení žhavení katody trysky vedoucí k prodloužení její životnosti.

S ohledem na širší tématu se v práci soustředím na jednu vybranou problematiku diagnostiky, kterou je měření profilů svazku. Řízení elektronově-optického zařízení je součástí 4. kapitoly.

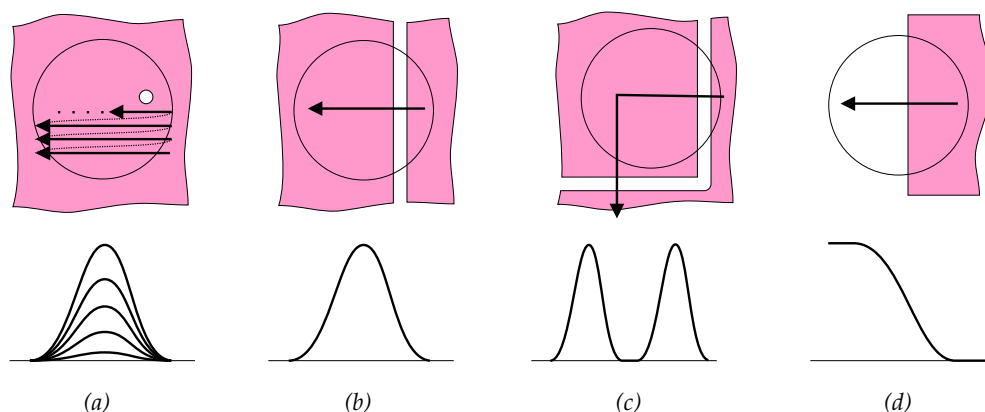
2.5.2 Profily svazku

Profilem svazku je nazýváno rozložení výkonové (případně proudové) hustoty na zvolené linii nebo rovině (řezu) svazku. Profily reálného svazku závisí na geometrii trysky, jejím seřízení, optických vadách systému a dalších vlivech. Z profilu je možno určit řadu charakteristických parametrů, například průměr a kruhovitost svazku, maximální výkonovou hustotu svazku, míru seřízení trysky, astigmatismus optické soustavy, rovinu nejmenšího průměru svazku a další [60, 69, 72]. Tyto údaje ve fázi návrhu zařízení vytváří zpětnou vazbu pro návrháře elektronové optiky. Za provozu dávají možnost posoudit seřízení přístroje a předpovědět úspěšnost následující technologické operace.

2.5.3 Používané principy měření

K měření profilu svazku byly vyvinuty různé postupy. Plošné detektory, obvyklé pro laserové svazky [81, 106, str. 35], se pro intenzivní elektronové svazky obvykle nepoužívají. Výjimkou je paralelní snímač sestavený z řady Faradayových sond určený pro měření pulsních svazků s vysokými celkovými proudy řádu stovek ampér, který popisuje Hayashi et al. [48]. Buble et al. [12] uvádí měření profilu intenzivních svazků netradiční metodou snímání intenzity světelného záření, které vydává tenký drát rozžhavený elektronovým svazkem. Bach et al. [4] uvádí měření profilů u svazků vyvedených do atmosféry.

Práce se zabývá metodou postupného snímání rozložení proudové hustoty pomocí Faradayovy sondy s tvarovanou vstupní clonou (viz obr. 2.10) [71, str. 64–71]. Svazek může být během měření nehybný a sonda se mechanicky pohybuje nebo je nehybná sonda



Obrázek 2.12: Různé tvary clon pro měření profilu, způsob postupného snímání a příklady signálové odezvy detektoru: (a) bodová clona, (b) štěrbinová clona, (c) L-štěrbinová clona a (d) hrana. Šípky vyznačují směr relativního pohybu sondy a svazku.

a svazek je vychylován. Druhá možnost je častější, protože umožňuje dosáhnout značně vyšší vzájemné rychlosti sondy a svazku. To je zvláště důležité při měření intenzivních svazků v ohnisku a jeho blízkosti, kde dosahuje hustota výkonu vysokých hodnot a roste riziko poškození clony. Problematika snímání profilů touto metodou je proto vázána na rychlé vychylování svazku.

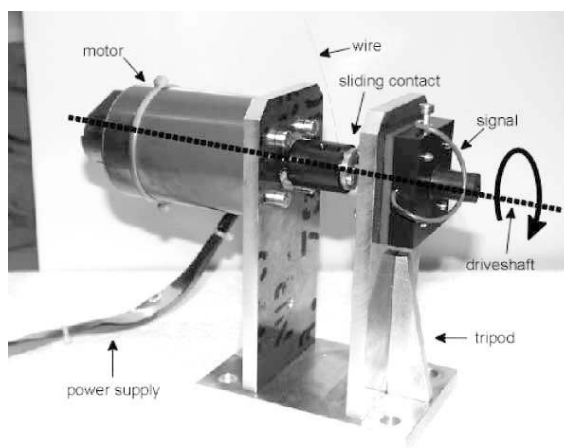
Podle orientace roviny měření profilu vzhledem k ose svazku mluvíme o příčném nebo podélném profilu (viz obr. 2.11). Příčný profil poskytuje informaci o rozložení plošné hustoty výkonu svazku. Slouží k posouzení příčných rozměrů svazku, určení mezních hodnot výkonové hustoty a tvaru stopy svazku. Podélný profil zachycuje vývoj svazku podél jeho osy. S jeho pomocí lze určit místo nejmenšího průměru, hloubku ostroty, divergenci svazku a další parametry.

2.5.4 Vzorkování

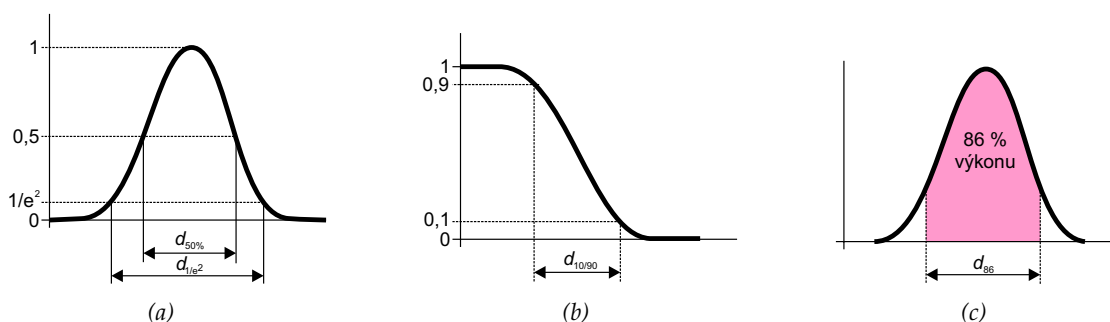
Při vzorkování profilu je část svazku, která projde k vlastnímu snímači, vymezena tvarovou clonou. Běžně používané jsou clony ve tvaru štěrbiny, ostré hrany nebo ve formě malého kruhového otvoru (viz obr. 2.12) [21]. V případě bodové sondy (obr. 2.12a) odpovídají naměřená data lokální proudové hustotě svazku. Snímání se provádí řádek po řádku, výsledný profil je dvourozměrný. Měření je pomalejší ve srovnání s ostatními způsoby, ale poskytuje více informací. Při měření se štěrbinovou clonou (obr. 2.12b) nebo při použití hrany (obr. 2.12d) je snímání uskutečněno jedním průchodem svazku přes snímač. Tím se sníží tepelné zatížení sondy, ale získáme pouze jednorozměrný integrální profil. V případě rotačně nesymetrických svazků je vhodné měření alespoň ve dvou kolmých směrech (obr. 2.12c). Belyaev et al. [9] popisuje rekonstrukci profilu svazku z příčných řezů tomografickými metodami.

2.5.5 In-situ měření profilu

Většina metod měření neumožňuje měřit profil během technologické operace. Pro in-situ měření příčného profilu byl vyvinut systém využívající rychle rotující tenký kovový drát, který se pohybuje těsně nad povrchem zpracovávaného vzorku (viz obr. 2.13). Rovina rotace je zvolena kolmo k ose svazku. Drát vždy jednou za otáčku protne svazek a během této krátké doby je snímán profil. Měření odpovídá snímání se štěrbinovou clonou. Jednoduchý sběrač ve formě drátu má oproti Faradayově sondě nevýhodu v signálu zeslabeném o odražené a sekundární elektrony. To není obvykle na závadu, pokud je poměr dopadlých a odražených elektronů v čase stálý. Zařízení bylo vyvinuto pro studium vlivu par odpařovaného kovu na svazek [20–22].



Obrázek 2.13: Senzor s rotujícím drátem pro in-situ snímání profilu svazku (převzato z [21]).



Obrázek 2.14: Definice průměru svazku: (a) kanonické definice $d_{50\%}$ a d_{1/e^2} pro normalizovaný profil; (b) definice $d_{10/90}$ pro integrální profil sejmутý hranou; (c) definice D_{86} pro 86% obsaženého výkonu. Na obrázcích (a) a (b) je na svislé ose normalizovaný signál z detektoru, na obrázku (c) je to hustota výkonu.

2.5.6 Měření emitančních diagramů

Určí-li se úhlové rozložení výkonové hustoty, je možné sestavit emitanční diagram svazku [42]. Z něj lze stanovit emitanci svazku ε , která citlivě odráží stav a seřízení trysky [62, str. 156]. Způsob měření emitančních diagramů uvádí Humphries [52, kap. 3]. Optimalizací trysky pomocí měření emitance se zabývá Felba et al. [41]. Přímé měření emitančního diagramu se v některých případech nahrazuje výpočtem ze série příčných profilů, jak popisuje Koleva et al. [59]. Získávání a vyhodnocení emitančních diagramů přesahuje rámec této práce.

2.5.7 Průměr svazku

Průměr (nebo také šířka) svazku je přibližný údaj vzhledem k charakteru většiny reálných svazků, které nevykazují žádné ostré ohraničení. Vždy je nutné současně uvést i použité kritérium. Jednotlivé definice šířky svazku vykazují značně rozdílné výsledky lišící se až pětkrát [1, 89].

Kanonická definice

Kanonická definice vychází z odečtení šířky průběhu proudové hustoty v místě poklesu intenzity na zvolenou mez oproti maximu. Často používané kritérium je takzvaná pološířka $d_{50\%}$ neboli FWHM (z anglického Full Width at Half Maximum). Jiné kritérium d_{1/e^2} stanovuje pokles na hodnotu $1/e^2$ (asi 13,5 %) a má zvláštní význam pro svazky s normálním rozložením (viz obr. 2.14a). Obdobně kritérium $d_{1/e}$ je definováno pro pokles

na hodnotu $1/e$, tedy asi 36,8 %. Kanonická definice je jednoduchá, ale může selhat pro svazky se složitějším profilem, například pro dutý svazek.

2.5.8 Ostří nože

Definice „ostří nože“ vznikla pro integrální měření profilu s pomocí clony ve formě hrany. Šířka svazku $d_{10/90}$ je odečtena mezi 10 % a 90 % (případně jinými symetricky zvolenými hodnotami) signálu (viz obr. 2.14b).

Výkonové kritérium

Výkonové kritérium stanovuje průměr svazku podle průměru kružnice se středem v těžišti svazku vymezující plochu, která obsahuje zvolenou část z celkového výkonu svazku. Často se volí hodnoty 10, 30, 50, 70 nebo 90 %. Zvláštní postavení má šířka stanovená pro 86 % výkonu (viz obr. 2.14c), označovaná jako d_{86} , která pro gaussovske svazky odpovídá kanonické definici $1/e^2$.

Kritérium $d_{4\sigma}$

Pro hodnocení částicových svazků lze využít i kritéria normy ISO 11 146 [53], původně určené pro laserové svazky. Norma zavádí pro průměru svazku měřený ve směru osy x vztah:

$$d_{4\sigma} = 4 \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} J(x, y)(x - x_0)^2 dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} J(x, y) dx dy}}, \quad (2.5)$$

kde $J(x, y)$ je funkce intenzity svazku definovaná v kartézských souřadnicích, například lokální proudová hustota svazku [72, 52, str. 98]. Analogicky je možno určit průměr ve směru osy y . Souřadnice těžiště svazku x_0 je dána vztahem:

$$x_0 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} J(x, y)x dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} J(x, y) dx dy}. \quad (2.6)$$

Vztah (2.5) je citlivější na příspěvky vzdálenější od osy, proto je nutno dbát na pečlivé odstranění pozadí signálu, které může v opačném případě zkreslit výsledek. Je zvláště výhodný při měření se šterbinovými clonami, kdy se redukuje na:

$$d_{4\sigma} = 4 \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} K(x)(x - \bar{x})^2 dx}{\int_{-\infty}^{\infty} K(x) dx}}, \quad (2.7)$$

kde $K(x)$ je lineární hustota proudu nebo výkonu, měřená podél osy x .

3 Cíle disertační práce

Z předchozí kapitoly vyplývá, že pro další rozvoj pokročilých technologií využívajících elektronový svazek je nezbytné zdokonalovat zařízení, jeho diagnostiku i diagnostiku produkovaného elektronového svazku. Hlavními cíli práce je zejména:

- návrh a výstavba experimentálního zařízení umožňující realizaci níže uvedených bodů,
- analýza vlastností jednostupňového magnetického vychylovacího systému,
- vypracování a ověření metodiky měření vlastností vychylovacího systému,
- měření charakteristik elektronově-optického zařízení,
- snímání profilů intenzivních svazků s využitím rychlého vychylování svazku a
- vyhodnocení charakteristických parametrů svazku z těchto profilů.

Výsledky budou sloužit k dalšímu vývoji trysky s ohledem na plánovaný rozvoj technologií elektronového svazku (mikroobrábění, pokročilé svařování a podobně) [33–37, 120–122], pro posouzení vlivu nastavení trysky na parametry svazku, k reprodukovatelnému seřízení elektronové trysky a pro srovnání s matematickými modely trysky, jejichž výpočty v ÚPT souběžně probíhají [54–56].

4 Experimentální zařízení

4.1 Elektronová svářečka MEBW-60/2

Ústav přístrojové techniky má dlouholetou tradici ve svařování elektronovým svazkem, která započala v polovině šedesátých let minulého století. Během této doby zde bylo vybudováno několik svářeček různých velikostí a určení [96, 115, 125]. S přihlédnutím na požadavky experimentů, které vyžaduje předkládaná práce, však bylo nutno vybudovat nové zařízení, protože existující nemělo vyhovující vlastnosti. Nejproblematictější se ukázala stávající elektronika, která neumožnila některá měření realizovat.

Ve stejné době, kdy probíhalo mé doktorské studium, byla uzavřena smlouva s německou firmou Focus o návrhu a realizaci prototypu nové elektronové svářečky týmem pracovníků v ÚPT. Firma Focus, která se zaměřuje na vývoj a výrobou elektronově-optických vědeckých přístrojů, měla zájem zařadit tuto svářečku do svého výrobního programu. Jako vzor byla zvolena stolní elektronová svářečka SES-1 [31] vyvinutá v devadesátých letech týmem Ing. Dupáka. Bez větších změn byla převzata pracovní komora a manipulátor. Elektronová tryska byla doplněna o prvky zvyšující bezpečnost obsluhy před úrazem elektrickým proudem a před ionizujícím zářením. Vakuový systém byl rozšířen o přídatnou turbomolekulární vývěvu čerpající prostor trysky. Stojan a pracovní plocha, pod kterou se nachází kompletní elektronika, byly zcela přepracovány (viz obr. 4.1). Nové zařízení dostalo označení MEBW-60/2, což je zkratka z *Micro Electron Beam Welder*. Název napovídá, že zařízení je určeno zejména pro svařování v oblasti menších výkonů, například v přístrojové, vakuové a kryogenní technice.



Obrázek 4.1: Elektronová svářečka MEBW-60/2

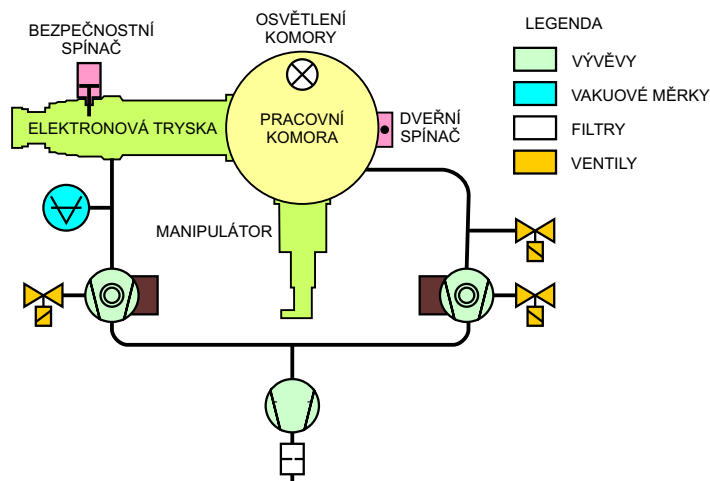
Současný trend digitalizace umožněný plošným rozšířením dostupné počítačové techniky přináší výhody v pružnosti, s jakou lze měnit funkce zařízení modifikací softwaru bez nutnosti zasahovat do obvodového řešení. Elektronické řízení svářečky bylo v tomto duchu zcela přepracováno. Nezbytným krokem bylo vytvoření potřebného software na všech úrovních, tj. od programů řídících přímo hardware, přes komunikaci až po vrchní vrstvu uživatelského rozhraní. Směrem k výzkumnému zaměření bylo nutné vybudovat vazbu na vhodné softwarové prostředí umožňující snadné sestavení experimentu. Jako vhodný zástupce byl pro tuto práci zvolen systém MatLab [70].

Práce na návrhu a výrobě MEBW-60/2 byly zahájeny v lednu 2006, prototyp byl dokončen v září 2007 a výrobní dokumentace byla dokončena v říjnu 2008. Licenční výrobu zajišťuje zmíněná firma Focus GmbH [43]. Veškeré uvedené úpravy mechanických částí provedl Ing. Vlček, já jsem se podílel na vývoji jako koordinátor projektu, výhradní návrhář elektroniky a programátor softwaru. Kromě prototypu dodaného licenčnímu výrobcí byla realizována i upravená verze tohoto zařízení, která je nyní plně funkční a používána pro experimenty v rámci této práce a dalších projektech v ÚPT AV ČR (viz obr. 4.28). V následujícím textu budou stručně popsány její základní vlastnosti. Další informace je možno čerpat z publikací [37, 38, 101, 102, 120–123].

4.2 Fyzikální část

Fyzikální část svářečky MEBW-60/2, jejíž schéma je na obr. 4.2, sestává z

- elektronové trysky,
- pracovní vakuové komory,
- manipulátoru,
- vakuového systému a
- dalších pomocných a bezpečnostních prvků.



Obrázek 4.2: Uspořádání fyzikální části a vakuového systému elektronové svářečky.

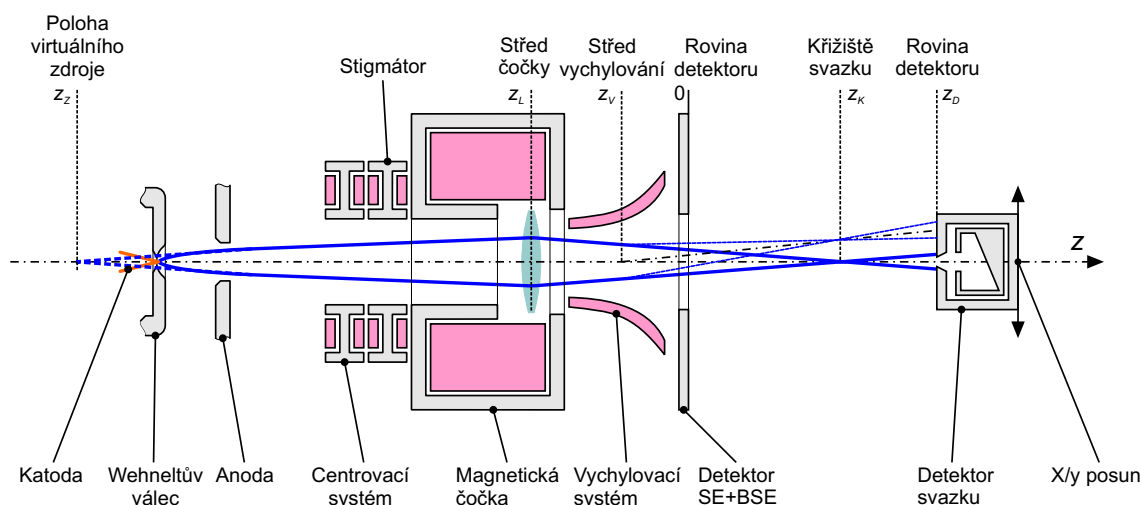
4.2.1 Elektronová tryska

Elektronová tryska (obr. 4.3) vychází z konstrukce popsané v [30, 31] a pracuje s urychlovacím napětím do 60 kV. Maximální výkon nebyl zjišťován, protože je v praxi limitován výkonem napájecího zdroje (v našem případě 2 kW).

Optický systém elektronové trysky MEBW-60/2 je na obrázku 4.4. Obsahuje jednu magnetickou čočku, jednostupňový magnetický centrovací systém a rovněž jednostupňový magnetický vychylovací systém. Optika může být případně doplněna stigmatorem. Jako zdroj elektronů slouží přímo žhavená vlásenková katoda z wolframového drátu o průměru 0,15 mm. Žhavicí příkon se pohybuje od 10 do 16 W. Životnost katody silně závisí na druhu provozu a je v rozmezí od 30 minut do zhruba 10 hodin. Katodu lze centrovat a výškově nastavovat vzhledem k otvoru ve Wehneltově válci (ne za provozu). Výškové nastavení je možné díky stavěcímu šroubu se stoupáním závitu 1 mm na otáčku. Wehneltova elektroda je opatřena úhlovou stupnicí rozdělenou na deset dílků odpovídajících kroku 0,1 mm (obr. 4.5a). Celý zdroj elektronů je možno vystředit vůči optické ose zařízení, a to i za provozu.



Obrázek 4.3: (a) – elektronová tryska a vakuová pracovní komora; (b) – otevřený prostor katody s namontovaným držákem katody a Wehneltovým válcem.

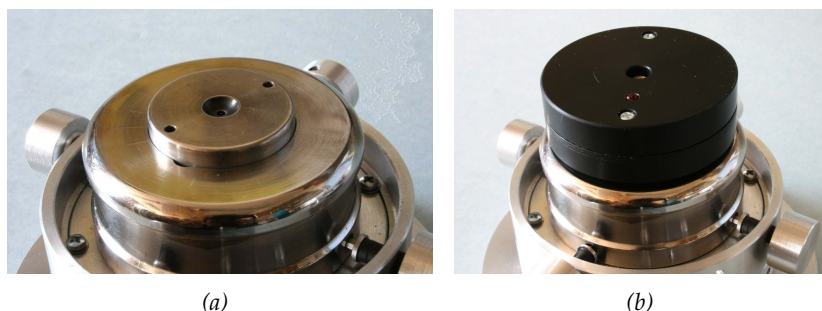


Obrázek 4.4: Schéma optické soustavy trysky s vyznačením chodu svazku.

Ve svářečce jsou použity upravené vychylovací cívky původně určené pro televizní přijímače. Jde o kombinaci sedlových vzduchových cívek pro jeden směr vychylování a toroidní cívky s feritovým jádrem pro druhý směr.

4.2.2 Pracovní komora a vakuový systém

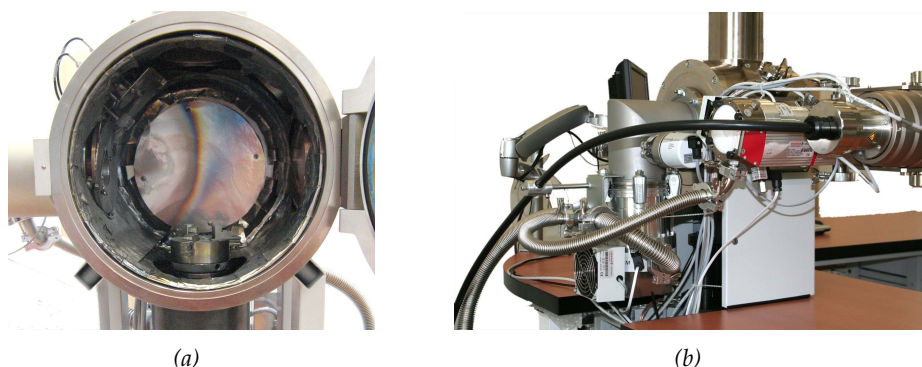
Pracovní komora (obr. 4.7a) je válcová s vnitřními rozměry $\phi 235 - 155$ mm. Je opatřena čtyřmi shodnými většími přírubami, na které lze montovat elektronovou trysku, manipulátor nebo případné rozšíření komory. Kromě toho obsahuje i dvě menší příruby, které jsou určeny například pro elektrické průchodky nebo průzor. Elektronová tryska



Obrázek 4.5: Nastavení výšky vlákna katody: (a) – držák katody s výškově nastavitelným Wehneltovým válcem; držák je upevněn v přípravku pro centrování katody, (b) – přípravek pro přesné nastavení polohy katody pomocí elektrického kontaktu. Konstrukce a realizace: Ivan Vlček.



Obrázek 4.6: X-y manipulátor poháněný krokovými motory (snímek I. Vlček).



Obrázek 4.7: Pracovní komora a vakuový systém MEBW-60/2: (a) pohled do vakuové pracovní komory svářečky MEBW-60/2 a na (b) vakuový systém (bez rotační vývěvy).

je běžně montována na bok komory (při svařování nejběžnějších rotačních součástí) nebo shora. Komora, elektronová tryska i rozšíření komory jsou řešeny s ohledem na zamezení úniku rentgenového záření. Měřením certifikovaným úřadem prokázalo, že úroveň radiace nepřekračuje povolenou hodnotu ($1 \mu\text{Gy/h}$).

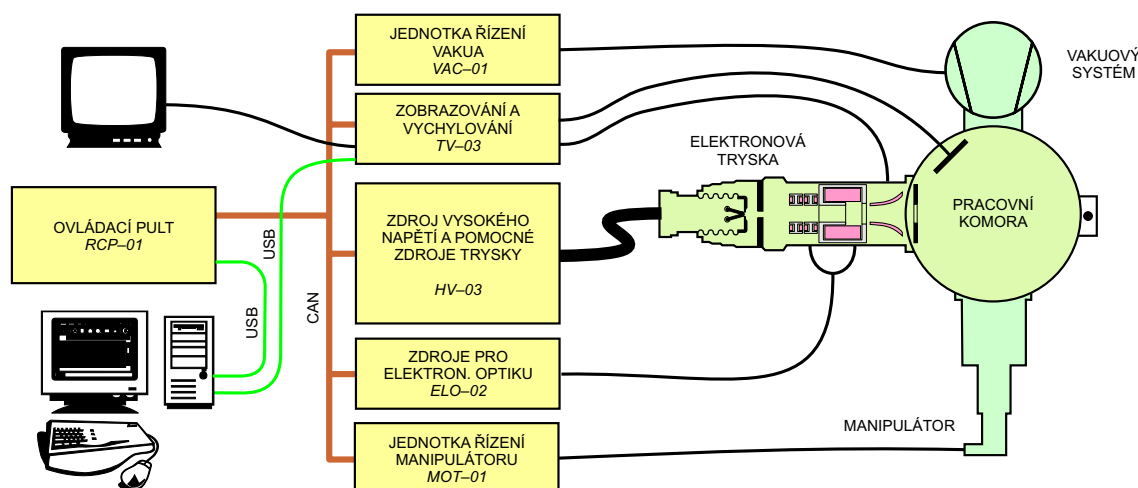
Svářečka je vybavená *motorizovaným manipulátorem*, umožňujícím rotaci a lineární pohyb v ose Z, vhodným pro svařování rotačně symetrických součástí. Manipulátor je na komoru namontován zvenku a nezmenšuje tak vnitřní prostor. Pohon manipulátoru je realizován stejnsměrnými motory s permanentními magnety. K odměřování polohy slouží dvojice optických enkodérů. Celkový zdvih manipulátoru je 120 mm, z toho motoricky 60 mm. Rychlost lineárního posuvu je spojitě nastavitelná od 0 do $3,5 \text{ mm s}^{-1}$. Rychlost rotace je také spojitě regulovatelná od 0 do 32 otáček/min. V případě potřeby je možno do komory nainstalovat x-y stolek poháněný krokovými motory (obr. 4.6, [101]). Stolek má zdvih 50 mm v obou směrech. Základní krok posunu je $2 \mu\text{m}$ a maximální rychlost 2 mm s^{-1} . Minimální krok je možno zmenšit technikou mikrokrokování na $0,5 \mu\text{m}$. Vzájemný úhel obou os je spojitě nastavitelný.

Jednoduchý *vakuový systém* obsahuje turbomolekulární vývěvu pro pracovní komoru a pro elektronovou trysku. Předvakuum zajišťuje rotační vývěva. Měření tlaku je realizováno kombinovanou vakuovou měrkou Pirani/Penning namontovanou na elektronové trysce v blízkosti katody. Tlak v trysce je za provozu pod $4 \cdot 10^{-4} \text{ mbar}$, dosažitelný mezní tlak okolo 10^{-5} mbar . Pracovního tlaku je dosaženo zhruba po 1,5 až 2 minutách čerpání. Zavzdušňuje se celý prostor pomocí elektromagnetických ventilů během necelých 20 sekund. Fotografie vakuového systému je na obrázku 4.7b.

4.3 Elektronická část

Elektronika MEBW-60/2 je rozdělena do šesti samostatných funkčních bloků, a to

- zdroje vysokého napětí (HV-03),
- jednotky řízení vakua (VAC-01),
- jednotky řízení manipulátorů (MOT-01),
- zdroje pro elektronovou optiku (ELO-02),
- zobrazovací a vychylovací jednotky (TV-03) a
- ovládacího pultu (RCP-01).



Obrázek 4.8: Blokové schéma řízení elektronové svářečky MEBW-60/2.

Napojení na fyzikální část je symbolicky naznačeno na obr. 4.8. Vzájemnou komunikaci jednotek zajišťuje sériová sběrnice standardu CAN 2.0 [10]. Protokol CAN2.0 je velmi robustní, odolný proti chybám při přenosu. I v podmínkách, které panují u elektronové svářečky (poměrně velké výkony, občasné výboje vysokého napětí apod.), zaručuje bezpečný přenos informací mezi jednotkami.

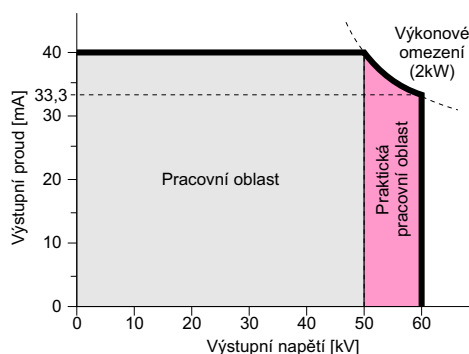
Přístroje jsou zabudovány do standardní 19palcové skříňky výšky 3U (s výjimkou VN zdroje, který má výšku 6U – viz obr. 4.3). Vzhledem ke skutečnosti, že veškeré řízení je dálkové prostřednictvím CAN sběrnice, neobsahují (až na výjimky) žádné ovládací prvky na čelních panelech s výjimkou síťového vypínače.



Obrázek 4.9: Vzor mechanické konstrukce elektroniky svářečky MEBW-60/2: pohled na standardní 19palcovou jednotku výšky 3U.

4.3.1 Zdroj vysokého napětí

Zdroj vysokého napětí generuje urychlovací napětí pro elektronovou trysku, napětí pro žhavení katody a předpětí Wehneltova válce [124]. Je rozdělen na dva hlavní celky: část



Obrázek 4.10: Zatěžovací charakteristika zdroje vysokého napětí HV-03.



(a) pohled zepředu



(b) pohled zezadu

Obrázek 4.11: Fotografie zdroje vysokého napětí HV-03.

spojenou se zemí (kostrou přístroje) a částí plovoucí na vysokém potenciálu. S ohledem na uspořádání elektronové trysky s uzemněnou anodou je třeba na katodu přivádět vysoký záporný potenciál. Zdroj žhavení a předpětí Wehneltova válce z toho důvodu nemůže být spojen se zemí, ale musí „plavat“ na tomto potenciálu. To komplikuje konstrukci zdroje, protože musí být vyřešeno elektrické oddělení plovoucí a uzemněné části.

Vlastní zdroj vysokého napětí je spojitě regulovatelný od nuly do maximálního napětí 60 kV. Maximální výstupní proud je 40 mA, který je při napětí vyšším než 50 kV postupně omezován na 33,3 mA při 60 kV (maximální výkon zdroje je 2 kW, viz obr. 4.10). Uváděné údaje o vysokém napětí a výstupním proudu by měly být vzhledem ke konvenci záporné. S ohledem na přehlednost (zejména u grafů) budou však jejich hodnoty v dalším textu v absolutní hodnotě.

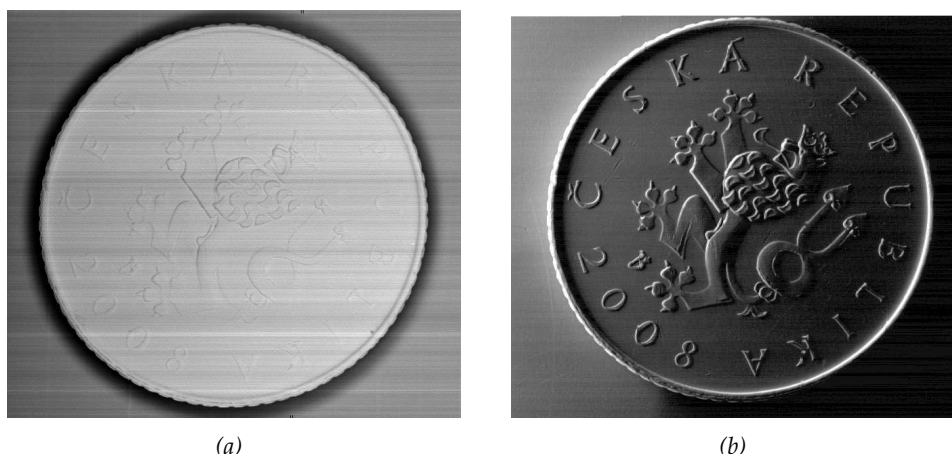
Jednotka je zabudována do 19palcové skřínky výšky 6U (266 mm). Celková hmotnost je cca 20 kg. Snímky sestaveného zdroje jsou na obrázku 4.11. Další informace je možno čerpat z [121, 124].

4.3.2 Jednotka řízení vakua

Jednotka řízení vakua ovládá prvky vakuového systému a zajišťuje měření a vyhodnocování tlaku v elektronové trysce. Stará se o spouštění a vypínání jednotlivých vakuových komponent ve správném pořadí a ve vhodný okamžik tak, aby čerpací (či zavzdušňovací) proces probíhal co nejrychleji, ale přitom bezpečně. Jejím úkolem je také blokovat činnost dalších jednotek v případě, že vakuové podmínky neumožňují provoz zařízení.

4.3.3 Jednotka pro řízení elektronové optiky

Zdroj pro elektronovou optiku napájí magnetickou čočku a centrovací systém. Za tímto účelem je vybaven numericky řízenými proudovými zdroji. Pro magnetickou čočku



Obrázek 4.12: Zobrazení v REM režimu. Korunová mince z rubu (vnější průměr 20 mm). Zobrazení pomocí (a) – koaxiálního detektoru a (b) – bočního detektoru.

byl navržen unipolární spínaný zdroj s vysokou účinností (cca 85 %), který se obejde bez rozměrného chladiče či nuceného chlazení ventilátorem. Zdroj je přizpůsoben k napájení zátěže s velkou indukční složkou (což například fokusační čočka bezesporu je). Zdroj pro centrovací systém je navržen jako dvojité bipolární lineární proudový zdroj. Jednotku je možno v případě potřeby rozšířit o další moduly (maximálně čtyři), například pro stigmátor, druhé patro centrovacího systému nebo pro statické vychylování svazku.

4.3.4 Jednotka řízení manipulátoru

Jednotka řízení manipulátoru je modulární víceosý pohybový kontrolér určený k řízení stejnosměrných a krokových motorů s možností připojit až osm nezávislých os. Stejnoseměrné motory jsou řízeny v servo-smyčce s odměřováním polohy pomocí optických enkodérů namontovaných na hřídeli motoru. Jsou k dispozici následující režimy řízení:

- režim volného běhu motoru – osa běží konstantní rychlostí zadaným směrem,
- režim polohování – osa je přesunuta z aktuální pozice na nově zadanou pozici; během přesunu se osa pohybuje podle zadaného rychlostního profilu.

4.3.5 Zobrazovací a vychylovací jednotka

Zobrazovací a vychylovací jednotka je centrum vychylování svazku a zpracování signálů z detektorů zpětně odražených a sekundárně emitovaných elektronů. Umožňuje práci v režimech:

- statického (ručního) vychylování,
- zobrazování v rastrovacím režimu s obnovovacím kmitočtem 50 Hz (viz níže),
- kombinovaného zobrazování a statického vychylování s nastavitelným poměrem,
- vychylování řízeného z externího zdroje (například z PC) a
- režimu s vypnutým vychylováním (pro seřizovací a speciální účely).

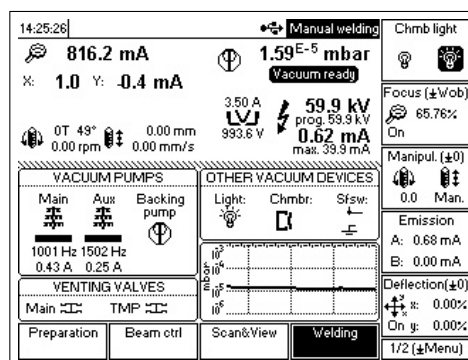
Konstrukce jednotky vychází z mé diplomové práce [119]. Zmíněný rastrovací režim je obdobou funkce rastrovacího elektronového mikroskopu (dále jen REM). Příklad zobrazení s použitím axiálního a bočního detektoru je na obrázku 4.12.

4.3.6 Ovládací panel

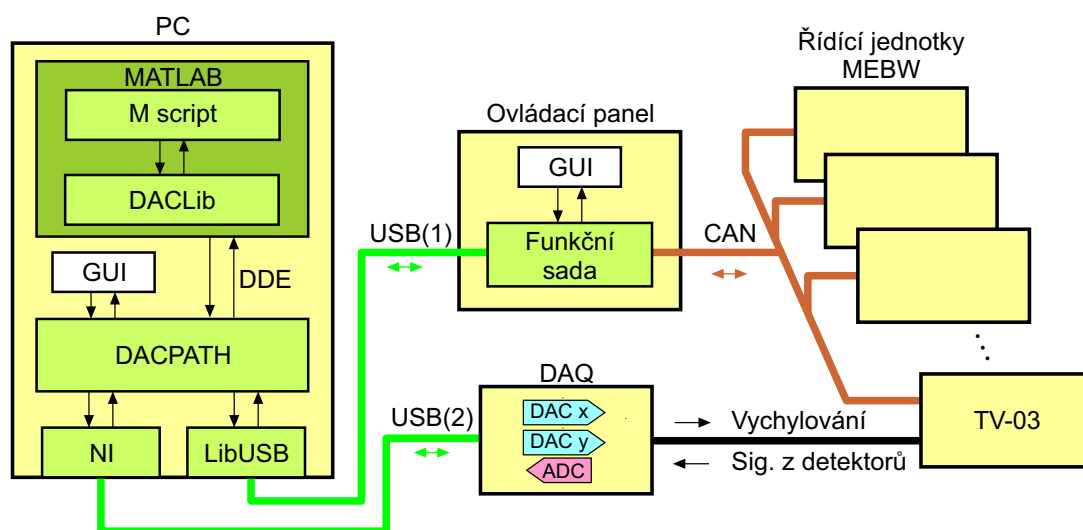
Ovládací panel (viz obr. 4.13) je autonomní jednotka, která zajišťuje koordinaci celého systému a zprostředkovává uživatelský vstup. Provozní hodnoty, jako například velikost urychlovacího napětí, proud svazku, aktuální stav vakuového systému a další, jsou zobrazeny na grafickém displeji (viz obr. 4.14) s rozlišením 320 × 240 bodů. K ovládání



Obrázek 4.13: Snímek ovládacího pultu svářečky MEBW-60/2.



Obrázek 4.14: Zobrazení údajů na displeji elektronové svářečky MEBW-60/2.



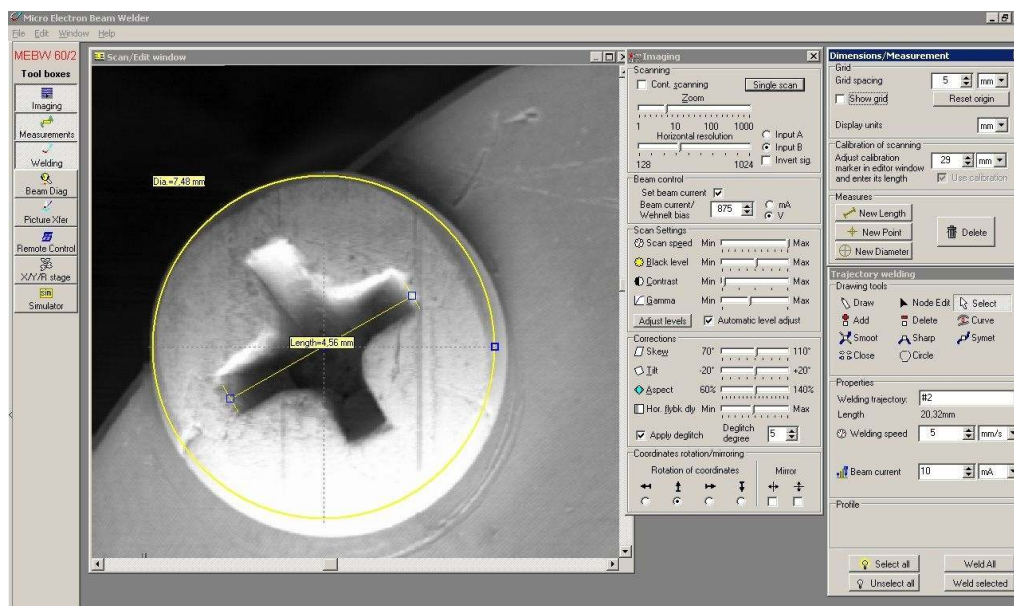
Obrázek 4.15: Schéma datových toků hardwaru a softwaru svářečky MEBW-60/2.

slouží sada tlačítek umístěných po stranách displeje. Jejich funkce se mění podle potřeby a je zobrazena na přiléhajícím místě displeje. K zadávání číselných, spojitě se měnících hodnot se používají otočné voliče realizované pomocí optických enkodérů. Dva z nich, umístěné po stranách displeje, mění význam podle naposledy uživatelem zvolené funkce. Například potřebuje-li uživatel centrovat trysku, zvolí funkci centrování postranním tlačítkem a otočnými voliči pak může měnit proudy v centrovacích cívkách.

Uživatel má možnost přiřadit čtyři často používané funkce voličům umístěných na pravém a levém okraji pultu. Ty jsou doplněny čtyřmístnými sedmi-segmentovými displeji, na kterých je indikována aktuální velikost ovládané veličiny. Ve výchozím stavu je takto možno nastavovat proud ostřící čočky, proud svazku, zvětšení obrazu v REM režimu a statickou výchylku v jednom směru.

4.4 Software a komunikace

Svářečku MEBW-60/2 lze řídit pomocí výše zmíněného ovládacího pultu nebo z běžného osobního počítače s operačním systémem Windows. Schéma komunikace je na obrázku 4.15. Jednotlivé řídicí jednotky si vyměňují informace mezi sebou a nadřazeným ovládacím panelem po sběrnici CAN2.0 [10]. Ovládací pult funguje jako prostředník (můstek) mezi touto sítí a osobním počítačem, ke kterému je připojen USB rozhraním (označeno USB(1) v obrázku) [97]. K dispozici je stále se rozrůstající funkční sada, která



Obrázek 4.16: Snímek uživatelského rozhraní PC software svářečky MEBW-60/2.

v době psaní práce čítala asi 70 položek. Komunikační protokol byl vytvořen zvláště pro tento účel. Na straně PC jsou použity univerzální USB ovladače LibUSB šířené jako Open-Source [73].

Komunikaci s hardwarem ze strany PC zajišťuje program DACPATH, který bude popsán níže. Ten disponuje jednak grafickým uživatelským rozhraním, ale i softwarovým rozhraním pro komunikaci mezi aplikacemi typu DDE (Dynamic Data Exchange) [74]. To dává možnost dalším aplikacím využít pokročilých prostředků aplikace DACPATH. V práci jsem ji využil k propojení s prostředím MatLab. Pro tento účel vznikla knihovna funkcí pro MatLab nazvaná symbolicky DAClib, díky které je možné snadno začlenit pokyny pro MEBW-60/2 do uživatelských skriptů (viz příloha B.7).

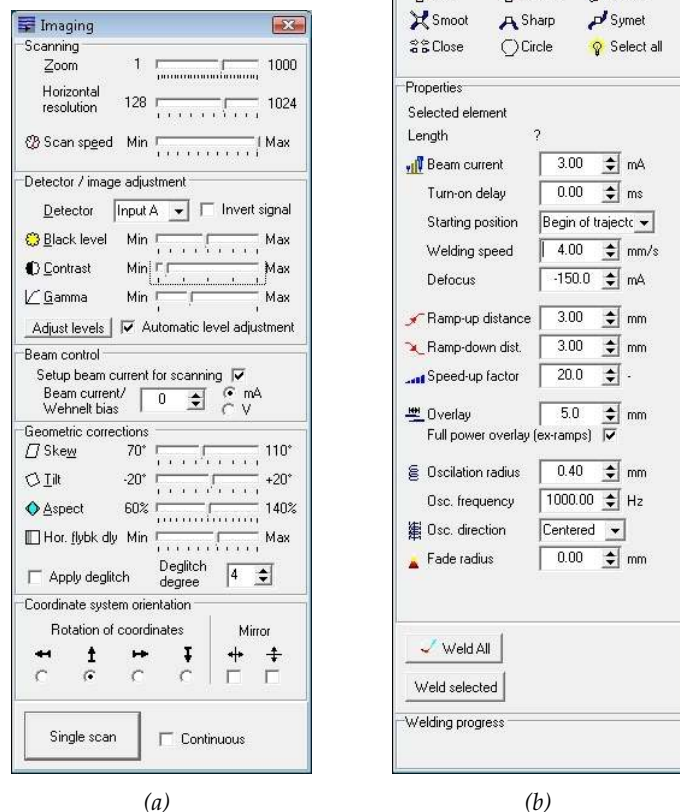
4.4.1 Program DACPATH

Pro ovládání svářečky z počítače PC byl vyvinut program DACPATH, který pracuje pod operačním systémem Windows XP nebo vyšším. Jeho uživatelské rozhraní (GUI) je na obr. 4.16. Jádrem ovládacího programu je algoritmus pro snímání obrazu v REM režimu. Získaný snímek slouží jako podklad k zadávání polohy svazku pro další úkony, například při definici komplexní trajektorie pro svařování nebo pro vyznačení místa pro vytvoření nápisu (viz níže). Program obsahuje následující moduly:

- snímání obrazu (Imaging),
- svařování po zadané křivce (Welding),
- diagnostiku svazku (BeamDiag),
- diagnostiku vychylovacího systému (DeflDiag),
- odměřování (Measurements),
- přenos grafiky (Picture Transfer),
- dálkové ovládání (Remote Control) a
- simulátor vychylování svazku (Simulator).

Snímání obrazu (Imaging)

Jak již bylo řečeno, základem programu je snímání obrazu obdobným způsobem, jako je běžné u rastrovacího elektronového mikroskopu. Program je také vybaven podobnými



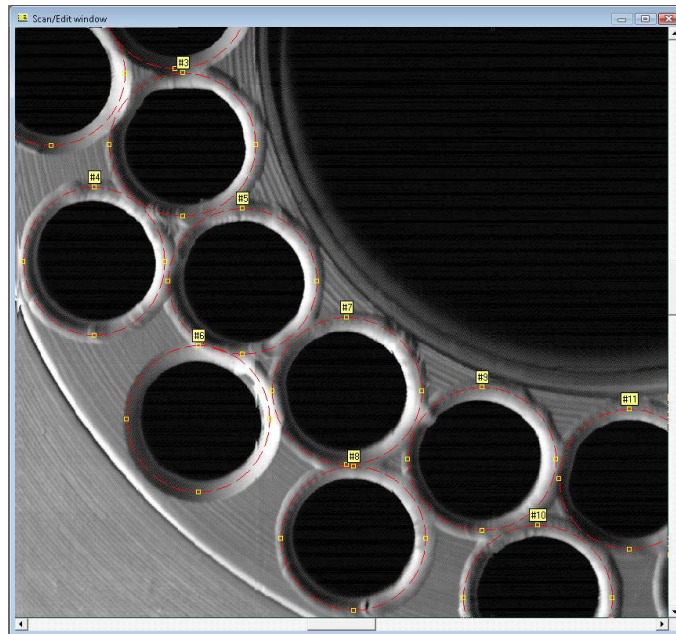
Obrázek 4.17: GUI modulů (a) snímání obrazu (Imaging) a (b) svařování po zadané křivce (Welding).

prostředky pro nastavení snímání (viz obrázek 4.17a). Na rozdíl od běžného mikroskopu má uživatel možnost zvolit polohu a velikost zorného pole v rámci celého rozsahu vychylovacího systému. Dále se volí rozlišení (počet bodů na jeden řádek obrazu, maximálně 1024), rychlost snímání (maximum je 250 tisíc bodů za sekundu), vybraný vstup (detektor) a proud sondy (svazku). Obraz je nasnímán s 16bitovým intenzitním rozlišením. Převod na 8bitovou zobrazitelnou škálu je proveden běžným způsobem zadáním úrovně černé (Black level), kontrastu a případné gama-korekce (nonlinearity). K dispozici je automatický režim, který nastavuje úroveň černé a kontrast na základě vyhodnocení histogramu intenzit. Modul Imaging dává možnost ruční korekce základních zkreslení – špatné ortogonality, natočení a poměr stran. Dále je možné otočit celý souřadný systém po 90°, například pro různé orientace trysky a komory.

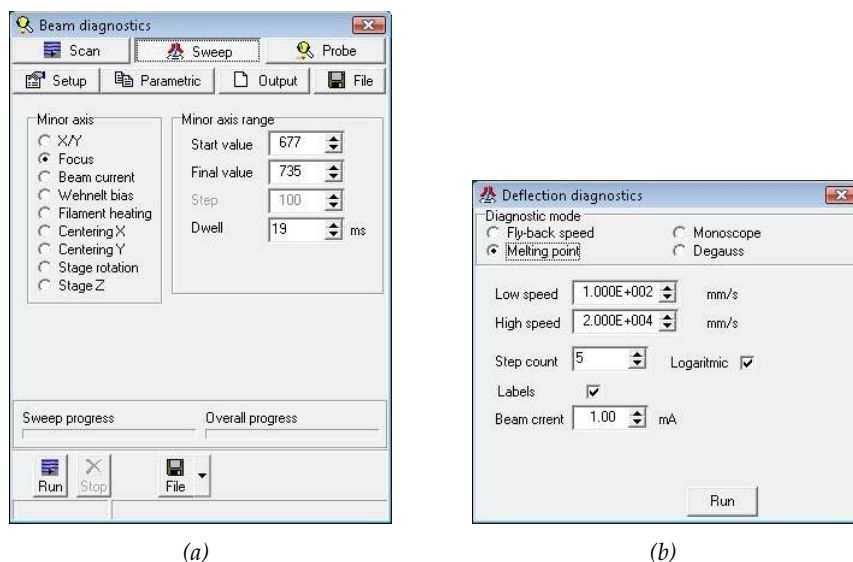
Svařování po zadané křivce (Welding)

Tento modul umožňuje zadat požadovanou trajektorii svazku složenou z úseček a částí Bézierových křivek [44, 107, kap. 11]. Body se vkládají ručně pomocí myši na podkladě nasnímaného obrazu, takže můžeme snadno sledovat například spáru mezi dvěma součástkami. Křivku je možno posléze jednoduše upravovat, opět pomocí myši.

Uživateli je dána možnost zadat řadu parametrů prováděného svaru (viz obr. 4.17b). Základní je nastavení požadovaného svařovacího proudu, rychlosti a případného přestřžení (defocus). V některých případech je vhodné rozšířit nastavenou zónu (například pro některé kombinace materiálů) pomocí oscilací svazku [71, str. 133–136]. Program umožňuje kruhové kmity svazku se zadanou frekvencí a amplitudou. Kmity mohou být vystředěny vůči zadané trajektorii nebo posunuty k jedné straně.



Obrázek 4.18: Příklad vyznačených trajektorií svařů vytvořených pomocí nástroje Welding (snímek pořízen s již hotovými svařy).



(a)

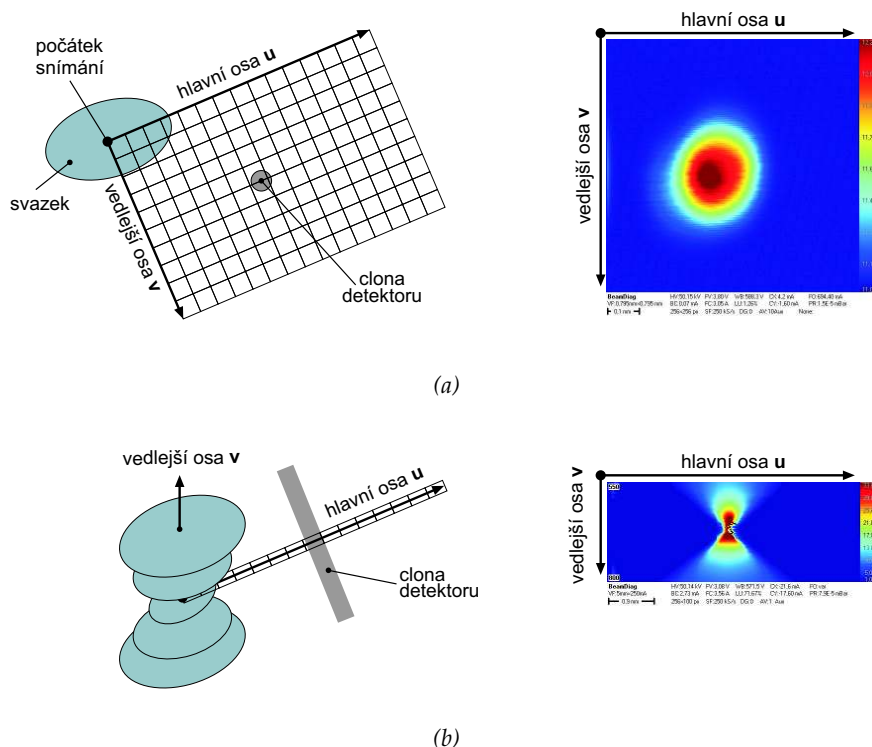
(b)

Obrázek 4.19: GUI modulů (a) diagnostika svazku (BeamDiag) a (b) diagnostika vychylovacího systému (DeflDiag).

Při „ostrém“ začátku a ukončení svařování zůstává na koncích svařu stopa. Pro její potlačení je možné zvolit výběh svařu, kterého se dosahuje zvýšením rychlosti na začátku a konci trajektorie nebo zvýšením amplitudy oscilací svazku.

Diagnostika svazku (BeamDiag)

Pomocí tohoto modulu můžeme získat příčné a podélné profily svazku (obr. 4.19a). Snímání probíhá buď rastrováním ve dvou kolmých směrech v rovině $X - Y$ (použití pro příčné profily) nebo vychylováním jen v jednom směru v kombinaci se změnou zvoleného parametru (použití pro podélné profily). Před zahájením snímání je možno nastavit velikost proudu svazku, žhavení, ostřicí proud, centrovací proudy a polohu manipulátoru.



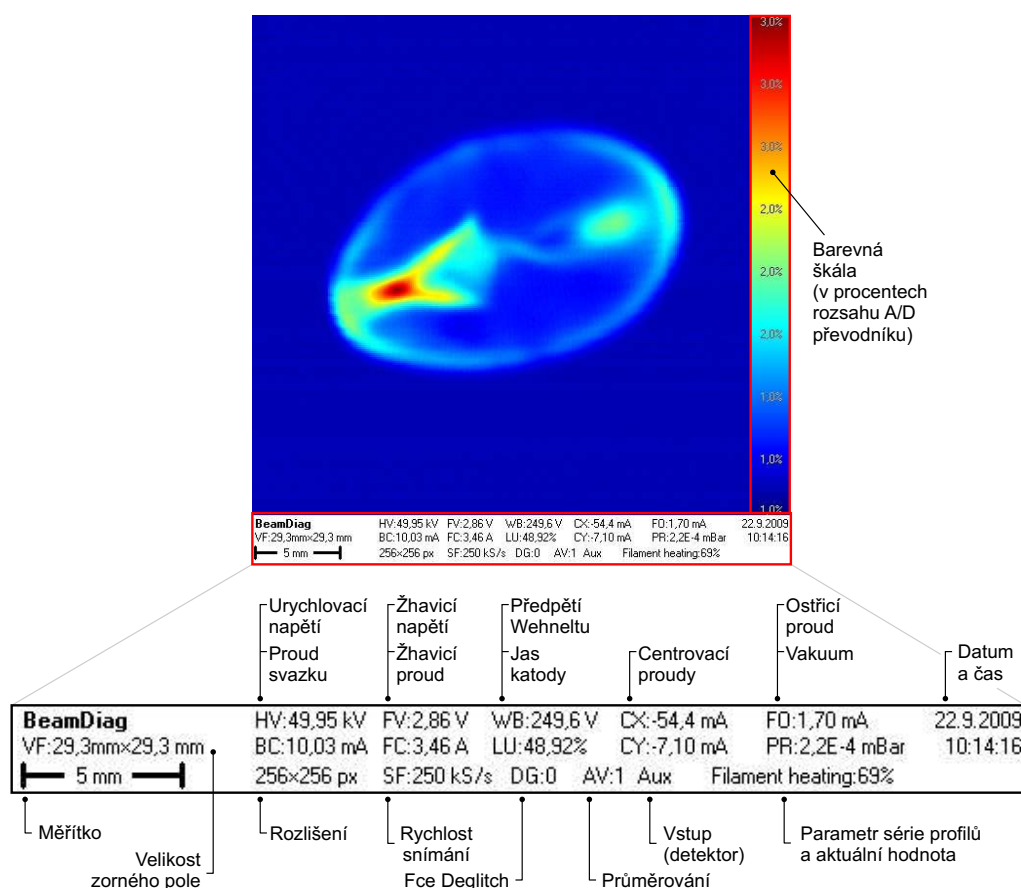
Obrázek 4.20: Definice hlavní a vedlejší osy při snímání profilu svazku (v obecné poloze): (a) – vychylování svazku ve dvou osách, (b) – vychylování svazku pouze v jednom směru kombinované se změnou další nezávislé veličiny (osa v).

Rastrování ve dvou kolmých směrech odpovídá snímání obrazu v REM režimu (obr. 4.20a). Uživatel má možnost zvolit obdélníkovou oblast (libovolně natočenou vůči souřadnému systému), po které je svazek vychylován. Střed oblasti by měl přibližně odpovídat středu detektoru. Svazek je rychle vychylován podél hlavní osy u a pomaleji podél vedlejší osy v . Odpovídající orientace os v sestavené „mapě“ rozložení proudové hustoty je v obrázku 4.20a vpravo. Je možno zvolit rozlišení (počet snímaných bodů), frekvenci (odpovídající převrácené hodnotě doby setrvání v jednom bodě), průměrování a další parametry snímání.

Situace při vychylování jen ve směru jedné osy v rovině $X - Y$ je naznačena na obr. 4.20b. Svazek se opakovaně rychle vychyluje po stále stejné přímce (hlavní osa u), ale každý řádek je nasnímán s jinou hodnotou zvolené nezávislé veličiny (vedlejší osa v). Touto veličinou může být:

- proud v fokusační čočce,
- proud svazku,
- předpětí Wehneltova válce,
- žhavení katody (proud, napětí, výkon nebo relativní jas vlákna podle zvoleného režimu),
- centrovací proud ve vybrané centrovací cívce,
- úhel natočení manipulátoru nebo
- poloha manipulátoru v ose Z .

Uživatel zvolí rozsah, ve kterém se bude vybraná veličina měnit a prodlevu potřebnou k jejímu ustálení. Pokud se rozhodne sejmout sérii profilů, zvolí nezávislý parametr, který bude mezi jednotlivými měřeními měněn. Výběr možných parametrů je shodný s možnostmi pro vedlejší osu. V tomto režimu se ukládá samostatný soubor (resp. trojice souborů) pro každou hodnotu parametru s automatickým číslováním názvů souborů.



Obrázek 4.21: Legenda ke snímku profilu uloženého nástrojem BeamDiag.

Sejmutí příčného profilu s rozlišením 256×256 bodů trvá asi 0,4 s při maximální rychlosti snímání. Sejmání podélného profilu se stejným rozlišením při prodlevě 19 ms na každém řádku trvá asi pět sekund.

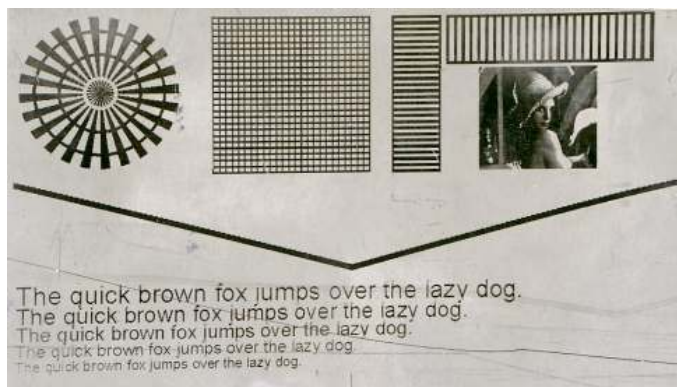
Nasnímaná data jsou vizualizována ve formě pseudo-barevné intenzitní mapy, kterou je možno ukládat ve formátu BMP nebo JPG s osmibitovou hloubkou. Přiřazení barev k intenzitám je prováděno automaticky (pomocí histogramu) nebo ručně. Lze zvolit jedno ze čtyř barevných schémat. Intenzitní mapa může být doplněna o barevnou škálu intenzit a informační pás, ve kterém jsou uvedeny nejdůležitější parametry zaznamenané během měření (viz obr. 4.21). Kompletní sada procesních parametrů (cca 70 hodnot) a nastavení snímání jsou uloženy do zvláštního souboru. Pro další zpracování lze naměřená data uložit v binární formě v plné (32bitové) hloubce. Ukládání veškerých souborů může být automatické po dokončení snímání nebo ručně na požádání.

Diagnostika vychylovacího systému (DeflDiag)

Experimentální modul *DeflDiag* je určený pro analýzu vlastností vychylovacího systému (viz obr. 4.19b). Podle zvoleného režimu řídí vychylovací systém a případně další procesní parametry. Modul je řešený jako otevřený systém, který je postupně rozšiřován podle nově vzniklých potřeb. V současnosti umožňuje:

- vytvoření kontrolní mřížky (monoskopu) svazkem,
- vytvoření obrazce pro určení skutečné rychlosti vychylování,
- testování mezní rychlosti vychylování a
- demagnetizaci vychylovacího systému.

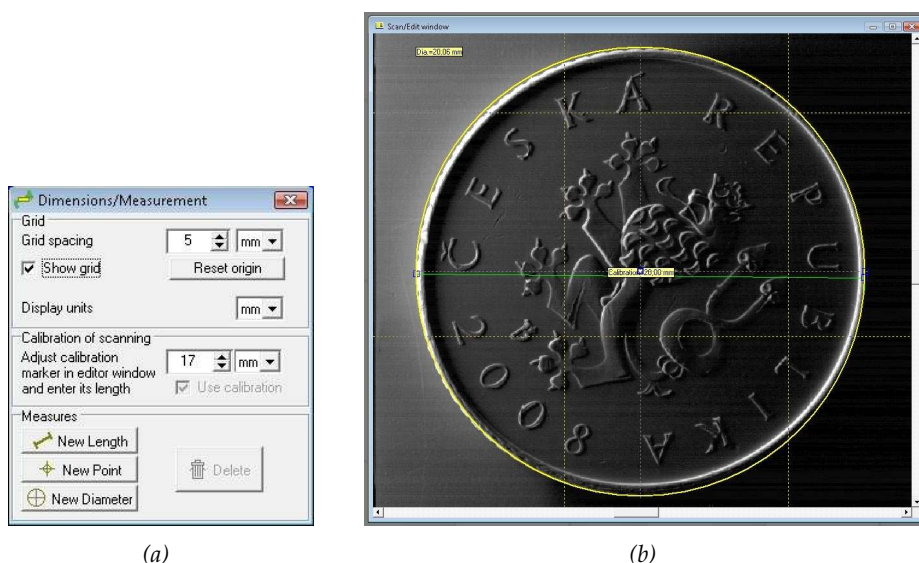
Pro ovládání hardwaru byla napsána softwarová knihovna, které zjednodušuje implementaci konkrétního postupu. K dispozici je řada funkcí pro generování jednoduchých grafických entit (čára, kružnice a další) i komplexních útvarů, například nápisů nebo rastrových obrázků (viz obr. 4.22).



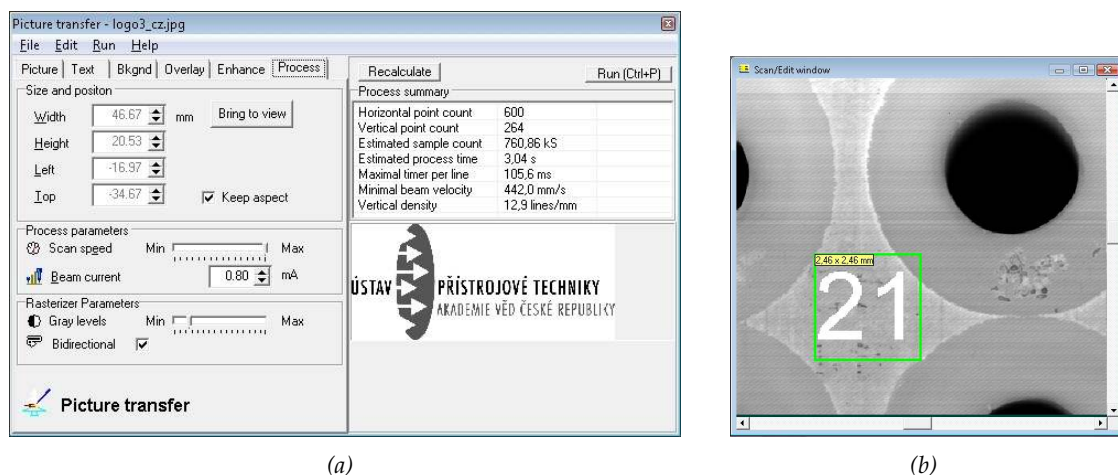
Obrázek 4.22: Testovací obrazec vytvořený přetavením povrchu elektronovým svazkem.

Odměrování (Measurements)

Pomocí modulu *Measurements* (GUI je na obr. 4.23a) se kalibruje citlivost vychylovacího systému tak, aby indikovaná pozice kurzoru v sejmutém obraze odpovídala (přibližně) skutečné poloze (více o této problematice bude uvedeno v kapitole 5.3.3). Kalibrace se provede nastavením měřicí úsečky s pomocí myši na referenční značku či výrazný prvek v obraze (viz příklad na obr. 4.23b). Rozměr zadá uživatel do příslušného pole. Po zkalibrování vychylovacího systému je možné odečítat rozměry a polohu prvků v obraze. K dispozici je odečet délky, průměru a polohy. Kalibraci je nutné opakovat při každé změně pracovní vzdálenosti nebo velikosti urychlovacího napětí. Automatická korekce nebyla doposud zavedena.



Obrázek 4.23: Modul pro kalibraci vychylovacího systému a odměřování vzdáleností (Measurements): (a) – GUI, (b) – příklad kalibrace provedené pomocí mince o průměru 20 mm.



Obrázek 4.24: Modul pro přenos grafiky (Picture Transfer): (a) – GUI s načteným logem ÚPT, (b) – označování provedeného svaru číselným kódem.

Přenos grafiky (Picture Transfer)

Přenos grafického motivu na povrch materiálu lokálním přetavením či odpařením je příklad možností, které přináší počítačem řízené vychylování svazku. Zadaný motiv je vytvářen řádek po řádku rastrujícím svazkem, přičemž odlišného působení na povrch je dosaženo změnou doby vystavení daného místa tepelným účinkům svazku [117]. Modul pro přenos grafiky (viz obr. 4.24) má velký počet nastavení, které nebudou všechny uváděny. Mezi podstatnými zmiňme možnost načtení přenášeného obrazce uloženého v běžných formátech pro rastrové obrázky, úpravu jeho rozměrů (zmenšení či ořezání), odstranění pozadí a převod na černobílý obraz. Pro rychlé vytváření nápisů na povrchu součástek (například číselné značení svarů a podobně) je možno místo grafické předlohy použít text zadaný uživatelem s možností výběru písma a jeho velikosti (viz obr. 4.24b). Před spuštěním procesu je nutno zadat oblast, kde se má obrázek vytvořit. Důležitá je volba proudu (výkonu) svazku a parametrů expozice.

Vzhledem k vlastnostem používané trysky je optimální velikost proudu pro tento účel okolo 0,8 mA, při kterém je šířka stopy zanechané svazkem na povrchu okolo 0,08 mm (optimální hustota obrazce je tedy asi dvanáct čar na milimetr). Svazek má při malých proudech velmi vysokou hloubku ostroty a obrazec je i v rozích ostrý. Čas pro vytvoření obrazce s rozlišením řádově 500×500 bodů se pohybuje v desítkách sekund. Příklad vytvořené grafiky ve stupních šedé je na obrázku 4.25.

Dálkové ovládání (Remote Control)

Prakticky všechny funkce elektronové svářečky je možno řídit z PC pomocí pokynů zasílaných po USB sběrnici do ovládacího pultu (viz str. 28). Z programu DACPATH je možné řídit a sledovat funkci vakuového systému, zdroje vysokého napětí, zdrojů elektronové optiky a manipulatorů. Je možné přenést a uložit obsah LCD displeje ovládacího pultu (viz obr. 4.14). Modul *Remote control* (viz obr. 4.26a) disponuje rozsáhlou sadou funkcí přístupných prostřednictvím DDE rozhraní.

Simulátor vychylování svazku (Simulator)

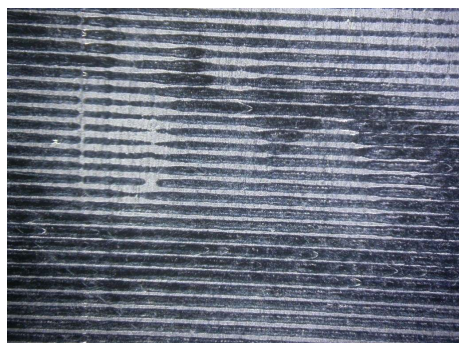
Pro ověření připravených procesů i pro testování chování programu byl vytvořen simulátor, který vizualizuje pohyb svazku a jeho tepelné účinky na monitoru počítače (viz obr. 4.26b). Simulace může být spuštěna souběžně se skutečným procesem nebo samostatně.



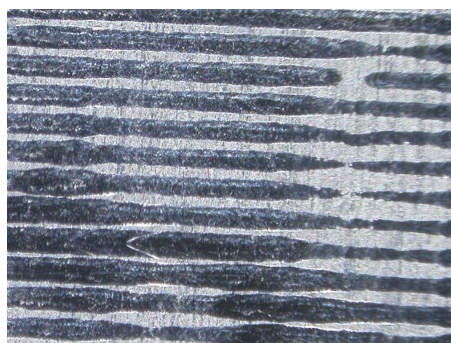
(a) skutečné rozměry 85 × 58 mm



(b) 5×

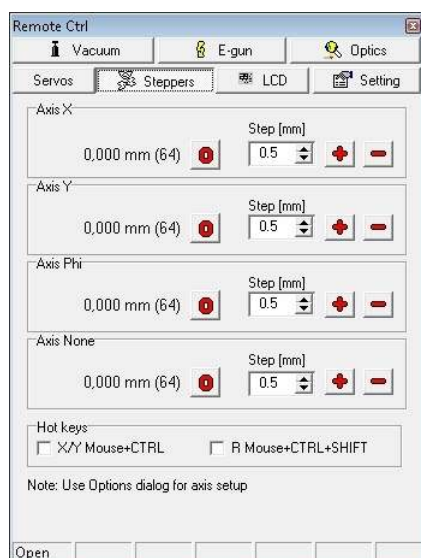


(c) 45×

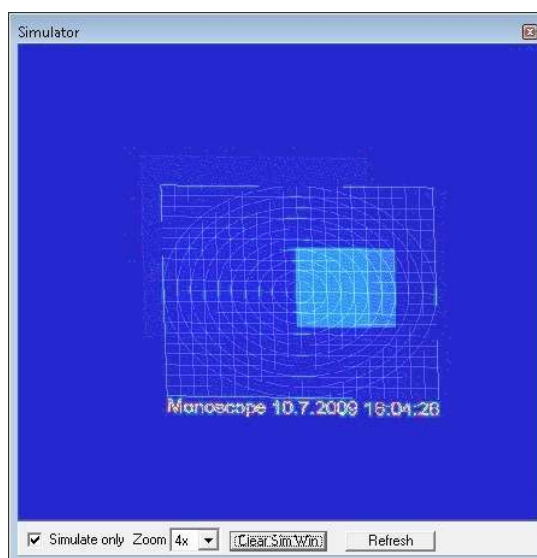


(d) 115×

Obrázek 4.25: Příklad fotografie přenesené na povrch nerezového plechu přetavením elektronovým svazkem.



(a)



(b)

Obrázek 4.26: GUI modulů (a) pro dálkové ovládání svářečky (Remote Control) a (b) simulátoru vychylování svazku.

Zobrazuje se jako pseudo-barevná mapa odpovídající rozměrům vychylovacího pole. Simulace uvažuje dobu setrvání elektronového svazku v daném místě a intenzita (barva) odpovídá tepelné dávce. Barevná škála se automaticky přizpůsobuje maximální hodnotě.

4.5 Faradayova sonda

4.5.1 Mechanická konstrukce

Při experimentech uvedených v této práci byly používány dvě konstrukce Faradayovy sondy. Starší konstrukce (na fotografii 4.27a) byla podle instrukcí autora vytvořena Ing. Janem Dupákem. Jejím základem je robustní měděný plášť ve tvaru hrníčku, který má ve vnitřním prostoru izolovaně připevněnu sběrací elektrodu. K izolaci byla původně použita slída, která byla později nahrazena keramickými podložkami. Elektroda je složená z tvarovaného dna a krycího víčka s otvorem. Celý prostor sondy je shora uzavřen výměnným krytem, který je upevněn čtyřmi šrouby po obvodu. K dispozici je kryt s centrálním otvorem, nad který se montuje vstupní clona nebo je možné použít dvojici měděných desek s podbroušenými hranami. Signální vývod je protažen otvorem v boční stěně. Sonda se upevňuje pomocí čepu opatřeného závitem M6 namontovaného do dna.

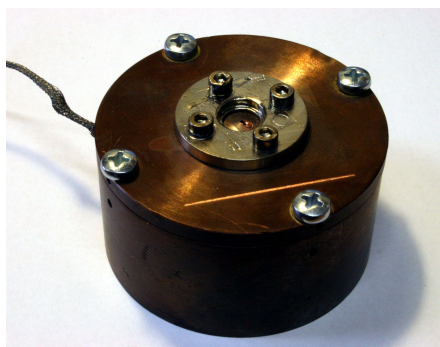
Druhá konstrukce pochází od Ing. Ivana Vlčka (viz fotografie 4.27b). Hlavní rozdíl je ve vnějších rozměrech. Vnější průměr 20 mm umožňuje zasunout sondu i do vnitřní části trysky a měřit tak při velmi malé pracovní vzdálenosti. Clona ve formě tenkého kotoučku nebo kruhových segmentů se vkládá pod krycí víčko. Sonda je oproti předchozí konstrukci vybavena stavěcími šrouby, pomocí kterých je možné clonu precizně seřizovat.

Díky větším rozměrům a hmotnosti umožňuje starší konstrukce měřit svazky z vyšším výkonem. Novější konstrukce naproti tomu zabírá menší prostor v pracovní komoře. Při návrhu sond nebyly zohledněny některé poznatky ovlivňující sběrovou účinnost (viz § 6.5.4), především tvar dna a poměr hloubky a šířky vnitřní elektrody, což bude v budoucnosti zohledněno.

4.5.2 Měření teploty

Faradayova sonda je během měření vystavena poměrně velkému tepelnému příkonu. Je proto vhodné vybavit ji kontrolním měřením teploty, které v případě překročení bezpečné hodnoty varuje obsluhu. Vhodné jsou například termočláňkové teploměry. V našem případě byl použit termočlánek Fe-Ko připevněný svým měřicím koncem k tělesu sondy. Elektrické přívody byly vyvedeny přes společnou vakuovou průchodku a připojeny k běžnému multimetru, který obsahoval vstup pro uvedený typ termočláňku.

Teplota sondy během měření stoupá poměrně strmě, zejména při vyšších výkonech svazku. Během měření přesáhne teplota „velké“ sondy během několika minut 250 °C při



(a)



(b)

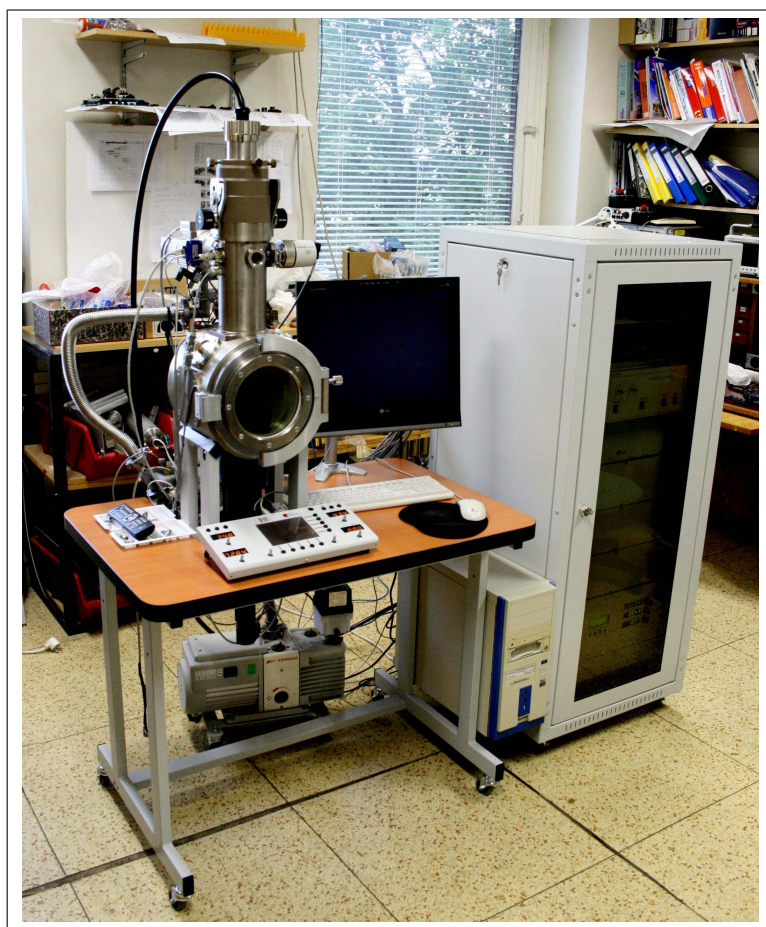
Obrázek 4.27: Faradayovy sondy: (a) – starší konstrukce sondy, (b) – novější konstrukce.

výkonu svazku v řádu kilowattů. Nutno připomenout, že ve vakuu je sonda ochlazována prakticky jen radiací. Vyšší teplota je vzhledem k použitým materiálům (zejména izolace přívodních vodičů) nepřijatelná a měření je nutné přerušit. Během řešení této práce nebylo možné nuceně chladit Faradayovu sondu. V současné době je rozpracované chlazení uzavřeným vodním okruhem a zvýšení rychlosti měření, které sníží množství tepla dodaného svazkem.

4.6 Prototyp a experimentální verze svářečky

Prototyp elektronové svářečky MEBW-60/2 byl navržen a vyroben během mého doktorského studia. Veškeré konstrukční i realizační práce proběhly v ÚPT. Během řešení projektu jsem zastával funkci koordinátora a (jediného) konstruktéra elektroniky a softwaru. Dokončený a otestovaný prototyp byl předán licenčnímu výrobcí – německé firmě Focus GmbH. Práce na prototypu trvala necelé dva roky a během následujícího roku byla dokončena výrobní dokumentace. V současné době je již výroba plně řízena firmou Focus [43]. Elektronová svářečka MEBW-60/2 byla vystavována na řadě mezinárodních veletrhů a konferencí, mimo jiné na přehlídce svařovacích technologií přidružené ke konferenci *Schweißtechnik und Fügetechnik – Schlüsseltechnologien der Zukunft* v Cáchách v roce 2007 [86], na výstavě *Vienna-Tek* v roce 2008, na výstavě *Schweissen und Schneiden* v Essenu. Experimentální verze MEBW-60/2-E byla vystavena na *Mezinárodním strojírenském veletrhu* v Brně v roce 2009.

Pro experimentální účely, jako podklad pro další vývoj a částečně i pro drobnou produkci, byl vyroben upravený kus elektronové svářečky MEBW-60/2-E, jehož fotografie je na obrázku 4.28. Změny oproti prototypu spočívají ve zmenšené pracovní ploše, která byla vynucena prostorovými důvody, a přemístění veškeré elektroniky do komerční 19palcové skříně (na obrázku vpravo). Funkčně zůstalo zařízení beze změn a byly na něm provedeny veškeré experimenty uveřejněné v této práci.



Obrázek 4.28: Experimentální verze elektronové svářečky MEBW-60/2-E nainstalovaná v ÚPT.

5 Vychylování svazku

5.1 Úvod

Vysoká rychlost vychylování svazku magnetickým polem je velká přednost, která otevírá nové možnosti pro technologické aplikace elektronového svazku. Řešení vychylovacího systému je však komplexní problém, zahrnující oblasti elektronové optiky, mechanické konstrukce, technologie, elektroniky a softwaru. Při vývoji elektronové svařičky MEBW-60/2 a při experimentech s novými aplikacemi elektronového svazku jsme narazili na řadu nedostatků vychylovacího systému. Například při použití svazku ke svařování v malém měřítku (mikrosvařování) byla na závadu malá stabilita výchylky a nízká opakovatelnost nastavení polohy. Při svařování po zadané trajektorii výsledek negativně ovlivňovalo geometrické zkreslení a hystereze. Při gravírování, kdy je svazek nutno velmi rychle přemísťovat z místa na místo, způsobovala problémy nedostatečná dynamika vychylování, především příliš dlouhá doba ustálení v cílové poloze. Při měření profilů svazku, popsaném v kapitole 6, je nutná velmi vysoká rychlost vychylování.

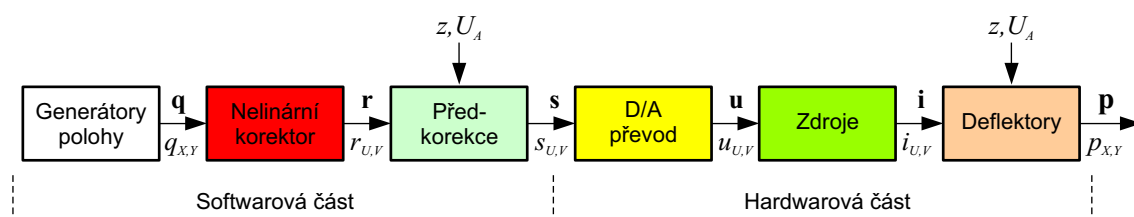
V této kapitole jsou popsány vlastnosti magnetického jednostupňového dvouosého (x-y) vychylovacího systému a metody jejich měření. Jejich hlavním účelem je objektivně popsat uvedené nedostatky a najít cestu k jejich odstranění. K popisu vychylovacího systému je použit model, který zahrnuje kromě vlastních vychylovacích cívek i související elektronické a softwarové bloky. V první části kapitoly je stručně vysvětlena činnost těchto bloků a uvedeno matematické vyjádření jejich funkce. Další část se zabývá měřicími metodami pro určení polohy svazku. Největší část kapitoly je věnována rozboru jednotlivých vlastností vychylování, jmenovitě:

- geometrickému zkreslení a jeho korekci,
- hysterezi,
- krátkodobé a dlouhodobé stabilitě a
- rychlosti a době ustálení s přihlédnutím k vířivým proudům, parazitním kapacitám a dalším vlivům.

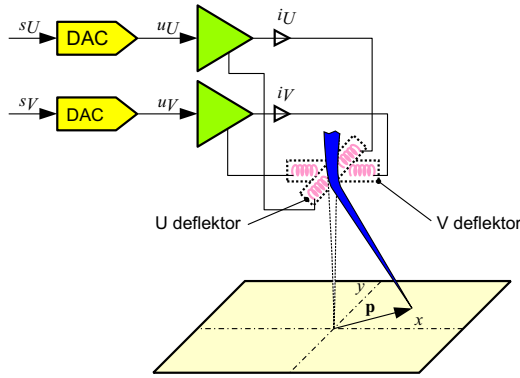
5.2 Model vychylovacího systému

5.2.1 Uspořádání

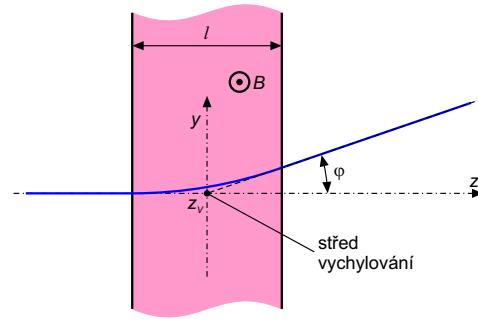
Schéma na obrázku 5.1 představuje model vychylovacího systému, který používám v této práci, a který odpovídá řešení použitému v zařízení MEBW-60/2. Obsahuje deflektory a související elektronické a softwarové bloky. Elektronická část je tvořena budicími zdroji a digitálně/analogovými převodníky (viz obr. 5.2). Softwarová část je rozdělena na bloky, určené ke kompenzaci zkreslení a změn citlivosti, a na generátor(y) polohy. Bloky budou



Obrázek 5.1: Model vychylovacího systému elektronového svazku (rozdělení na funkční bloky).



Obrázek 5.2: Hardwarevá část vychylovacího systému.



Obrázek 5.3: Vychýlení elektronového svazku homogenním magnetickým polem.

popsány v následujícím textu od konce proti směru toku informace vyznačeném v obrázku. Deflektory jsou v textu označovány symboly U a V , které odpovídají horizontálnímu a vertikálnímu páru vychylovacích cívek.

V textu používám výraz *citlivost vychylovacího systému* pro vyjádření poměru změny polohy svazku (nikoliv úhlu vychýlení) ke změně řídicí veličiny, která tuto změnu vyvolala. Tuto definici jsem zvolil z praktického hlediska, protože výchylka svazku je přímo měřitelná. Takto definovaná citlivost je však závislá na pracovní vzdálenosti.

5.2.2 Deflektory

Deflektory jsou tvořeny vychylovacími cívkami a případným magnetickým obvodem. Jejich chování zde nebude blíže analyzováno, protože je dobře zpracováno v odborných článcích a publikacích [47, 63–67, 87]. V této práci se omezím na tvrzení, že mění polohu elektronového svazku ve zvolené rovině kolmé k optické ose v závislosti na budících proudech a dalších parametrech podle obecného vztahu

$$\mathbf{p} = f_D(\mathbf{i}, z, U_A), \quad [m; A, m, V] \quad (5.1)$$

kde $\mathbf{p}$ je polohový vektor místa dopadu svazku, $\mathbf{i}$ je vektor budících proudů, z je poloha pracovní roviny a U_A je urychlovací napětí. U dobře navrženého deflektoru je závislost výchylky na budícím proudu téměř lineární.

Pro odhad závislosti na pracovní vzdálenosti a urychlovacím napětí svazku uvažujme situaci na obrázku 5.3 s homogenním ostře ohraničeným magnetickým polem. V paraxiální aproximaci (pro malé úhly) se svazek vychýlí o úhel [64]:

$$\varphi = \frac{dy}{dz} = \frac{Bl}{\sqrt{2m_e U_A / q_e}}, \quad (5.2)$$

kde l je délka pole deflektoru, U_A je urychlovací napětí a B je indukce magnetického pole. Dále předpokládáme, že pro indukci platí vztah:

$$B = k NI, \quad (5.3)$$

kde k je součinitel závislý na tvaru vinutí a prostředí, N je počet závitů cívky a I je budící proud. Člen k bude konstantní v případě vzduchových cívek. Pro obvody obsahující

magnetické materiály bude vztah nelineární a bude vykazovat hysterezi, což v tomto případě zanedbáme. Za vychylovacími cívkami pak bude poloha svazku dána výrazem:

$$y(z) = \frac{dy}{dz}(z - z_V) = \frac{kNI l}{\sqrt{2m_e U_A/q_e}}(z - z_V), \quad (5.4)$$

kde z_V je poloha (zdánlivého) středu vychylování, tzv. pivotního bodu. Citlivost deflektoru k_D je poměr změny polohy svazku a změny budicího proudu, který změnu vyvolal. Z (5.2) a (5.4) dostaneme:

$$k_D = \frac{dy}{dI} = \frac{kNI l}{\sqrt{2m_e U_A/q_e}}(z - z_V). \quad (5.5)$$

Z výsledku je zřejmé, že citlivost vychylování roste úměrně pracovní vzdálenosti a klesá při zvyšování urychlovacího napětí podle $U_A^{-1/2}$. Určením polohy pivotního bodu se zabývá experiment uvedený v části 7.2.

5.2.3 Budicí zdroje vychylovacích cívek

Napájecí zdroje dodávají proudy do vychylovacích cívek úměrné napětovým signálům reprezentovaných vektorem $\mathbf{u}$, což lze vyjádřit vztahem

$$\mathbf{i} = \begin{pmatrix} g_{Du} & 0 \\ 0 & g_{Dv} \end{pmatrix} \mathbf{u}, \quad [A; A V^{-1}, V] \quad (5.6)$$

kde g_{Du} a g_{Dv} jsou transkonduktance zdrojů. Poměr g_{Du} a g_{Dv} je zvolen tak, aby se vyrovnala rozdílná citlivost obou deflektorů. Stejným řídicím signálům na vstupech pak odpovídá přibližně stejně velká výchylka v obou směrech. Absolutní velikost transkonduktance je zvolena tak, aby se přizpůsobil rozsah vstupů rozsahu předchozího bloku, například digitálně/analogových (dále D/A) převodníků. Praktickou realizaci budicích zdrojů je možno vidět v odstavci 4.3.5 – *Zobrazovací a vychylovací jednotka*.

5.2.4 Digitálně/analogový převod

Numerické řízení polohy svazku umožňuje dvojice D/A převodníků, které převádějí bezrozměrný numerický vstupní vektor $\mathbf{s}$ na napětovou úroveň podle vztahu:

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} k_{DAu} & 0 \\ 0 & k_{DAv} \end{pmatrix} \mathbf{s} + \mathbf{u}_0, \quad [V; V, -] \quad (5.7)$$

kde k_{DAu} a k_{DAv} jsou převodní konstanty (krok) D/A převodníků a $\mathbf{u}_0$ určuje napětí na výstupech převodníků pro nulové vstupní hodnoty. Konstanty k_{DA} jsou definované jako:

$$k_{DA} = 2^{-b}(U_{max} - U_{min}), \quad [V; -, V] \quad (5.8)$$

kde $\langle U_{min}, U_{max} \rangle$ je napětový rozsah převodníku a b je počet bitů převodníku. Například pro převodníky použité v experimentálním zařízení MEBW-60/2-E (16-ti bitové s rozsahem ± 10 V pro oba směry vychylování – více v části 4.4 – *Software a komunikace*) je $k_{DA} = 2^{-16} \cdot 20 = 0,305$ mV a posuvy u_{0u} a u_{0v} jsou rovny nule.

V některých případech blok D/A převodu v systému zcela chybí nebo může být v případě potřeby odpojen. Pak je vychylovací systém řízen přímo napětovými signály $\mathbf{u}$ z vhodného zdroje (například pilových generátorů – viz § 4.3.5 – *Zobrazovací a vychylovací jednotka*).

5.2.5 Lineární předkorekce

Bezrozměrné řízení vychylování prostřednictvím numerického vektoru $\mathbf{s}$ lze upravit tak, aby bylo možno zadávat požadovanou polohu svazku v délkových jednotkách. Vložený korekční člen (označený *předkorekce* na obr. 5.1) vytvářející tuto transformaci musí brát v úvahu změnu citlivosti deflektorů při změně energie svazku a/nebo pracovní vzdálenosti (viz § 5.2.2). Obecně člen realizuje vztah:

$$\mathbf{s} = f_L(\mathbf{r}, z, U_A), \quad (5.9)$$

kde $\mathbf{r}$ je vstupní vektor požadované polohy svazku. Pokud je vychylovací systém dostatečně lineární a ortogonální (což předpokládáme), lze použít vztah:

$$\mathbf{s} = \begin{pmatrix} 1/k_U & 0 \\ 0 & 1/k_V \end{pmatrix} (\mathbf{r} - \mathbf{s}_0), \quad [-; m^{-1}, m] \quad (5.10)$$

kde k_U a k_V jsou citlivosti budiče, $\mathbf{s}_0$ je případný posun počátku souřadného systému a $\mathbf{r}$ je vektor požadované polohy svazku. Koeficienty $k_{U/V}$ je možno určit přibližně podle vztahu:

$$k_{U/V} \approx \frac{|\Delta \mathbf{p}|}{\Delta s_{U/V}}, \quad [m; m, -] \quad (5.11)$$

kde $|\Delta \mathbf{p}|$ je posun svazku vyvolaný změnou řídicího signálu o $\Delta s_{U/V}$. Závislost koeficientů $k_{U/V}$ na z a U_A popisuje vztah:

$$k_{U/V}(z, U_A) = k_{(U/V)_1} \frac{z - z_V}{z_1 - z_V} \sqrt{\frac{U_{A_1}}{U_A}}, \quad (5.12)$$

kde $k_{(U/V)_1}$ je citlivost zjištěná pro polohu pracovní roviny z_1 a urychlovací napětí U_{A_1} . Použitím uvedených vztahů vznikne souřadný systém, který bude v dalším textu označován jako *hrubý souřadný systém*. Pomocí členu $\mathbf{s}_0$ ve výrazu (5.10) lze posunout počátek souřadnic do libovolného bodu vychylovacího pole. Poloautomatická implementace předkorekce je součástí softwaru elektronové svářečky MEBW-60/2 (viz § 4.4.1).

5.2.6 Nelineární korektor

Nelineární korektor má za úkol napravovat geometrické zkreslení vychylovacího systému. Požadovanou polohu svazku „předzkreslí“ v opačném smyslu, než jak působí zkreslení vychylovacího systému. Člen realizuje obecný vztah:

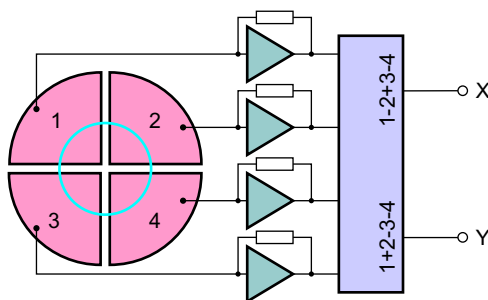
$$\mathbf{r} = f_A(\mathbf{q}), \quad (5.13)$$

kde $\mathbf{q}$ je vstupní vektor požadované polohy svazku. Určením přenosové funkce f_A se zabývá část 5.4.

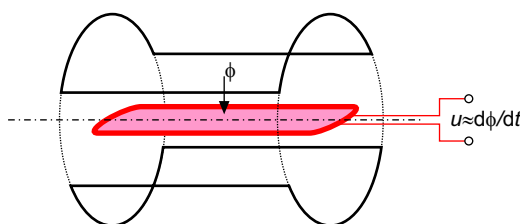
5.3 Vyhodnocení polohy svazku

5.3.1 Kvadrantový detektor

K přímé detekci polohy svazku je možné využít kvadrantový detektor podle obr. 5.4. Detektor je sestaven ze čtyř shodných vodivých plošek rozmístěných po devadesáti stupních. Pokud na detektor dopadá svazek, vytvoří elektrony elektrický proud, který je zesílen a převeden na napětí čtveřicí zesilovačů. Je-li svazek nasměrován přesně na střed detektoru, bude proud tekoucí do všech čtyř kvadrantů shodný (v případě rotačně symetrického svazku). Při vychýlení ze střední polohy dojde k porušení rovnováhy. Maticovým obvodem realizujícím naznačené vztahy získáme signály X a Y závislé na poloze svazku. Svazek nemusí být nutně rotačně symetrický, postačuje dvojčetná nebo



Obrázek 5.4: Princip kvadrantového polohového detektoru.



Obrázek 5.5: Princip vyhodnocení změn magnetického pole deflektoru pomocnou cívkou.

čtyřčetná symetrie. V případě, že chceme znát polohu pouze v jenom směru, může detektor obsahovat pouze dvě snímací plošky. Analogický detektor složený ze čtveřice fotodiód se používá k detekci polohy laserů, například v CD přehrávačích [7, str. 1025].

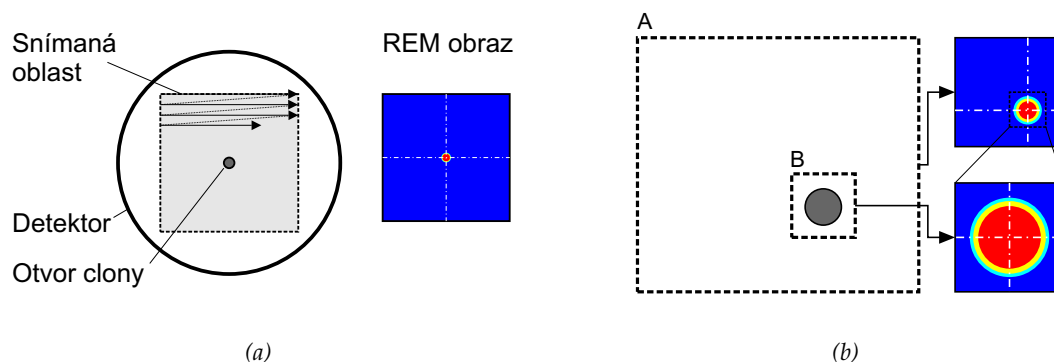
Laterální rozsah detektoru je zhruba roven rozměrům svazku, které se nastaví pomocí zaostřovací čočky. Linearita je závislá na rozložení proudu ve svazku. Důležitá je minimalizace mezer mezi jednotlivými ploškami, protože velké mezery zhoršují linearitu. Proud svazku se volí tak, aby byl dostatečně vysoký odstup signálu od šumu, ale s ohledem na tepelné zatížení detektoru. Ztráty tvořené SE a BSE elektrony snižují signál, ale neovlivňují přesnost, protože jsou u všech plošek přibližně stejné. Měření polohy kvadrantovým detektorem je velmi rychlé, ale s omezeným rozsahem a linearitou. Je vhodné pro měření vyžadující velmi rychlou odezvu bez nároků na přesnost určení polohy, například pro určení krátkodobé stability nebo doby ustálení výchylky.

5.3.2 Měření magnetického pole deflektoru

Rychlé změny magnetického pole můžeme měřit plochou měřicí cívkou, která se vloží do dutiny deflektoru (obr. 5.5). Cívka se orientuje tak, aby jí procházela co největší část magnetického toku testovaného deflektoru. Možný způsob spočívá v zavedení střídavého signálu do vychylovacích cívek a ustavení měřicí cívky podle maximální amplitudy indukovaného napětí. Poté je možné pomocné buzení vypnout.

Napětí na cívce s N závity je úměrné $Nd\phi(t)/dt$, tedy časové změně magnetického toku procházející cívkou. Integrací napěťové odezvy získáme funkci magnetického toku $\phi(t)$, ze které lze po kalibraci určit změny polohy svazku. Ke kalibraci je možné využít zmíněné pomocné buzení střídavým proudem známé amplitudy.

Větší citlivost bude mít cívka s větší plochou. Ideální je cívka, která obsáhne celou významnou část pole deflektoru, protože se tak potlačí vliv případné nehomogenity pole. Případné zákmity napěťového signálu způsobené parazitními kapacitami obvodu je možné ztlumit pomocí rezistoru paralelně zapojeného k cívce; velikost odporu se nalezne pokusně. Integraci napěťového signálu měřicí cívky je možné provést analogově nebo – po digitalizaci signálu – číslicově. Metoda je rychlá, má velký rozsah, ale poměrně



Obrázek 5.6: Vyhodnocení polohy svazku: (a) – princip vyhodnocení polohy detektoru snímáním v SEM režimu, (b) – zpřesňující snímání ve dvou krocích.

malou přesnost. Je použitelná pro měření dynamických vlastností vychylovacího systému. Nehodí se pro statická měření.

5.3.3 REM režim

V některých případech je možné a výhodné úlohu určení polohy svazku obrátit a namísto hledání neznámé polohy vychýleného svazku nalézt budící proudy deflektorů, které vychýlí svazek do místa se známou pozicí. Následující metoda k tomuto účelu využívá REM režim.

Elektronovým svazkem malého výkonu zaostřeným do roviny detektoru (viz část 4.5 – *Faradayova sonda*) je rastrováno přes oblast zvolenou tak, aby s rezervou obsáhla celou plochu clony detektoru (viz obr. 5.6a). Ze signálu sondy je sestaven obraz, ve kterém se objeví i projekce otvoru clony. Z obrazu je způsobem popsaným níže určena poloha vztažného bodu. V případě vyšší vyžadované přesnosti měření je možné postup zopakovat se zorným polem upraveným podle výsledků prvního měření (viz obr. 5.6b). První snímání se provede odhadem oblasti, případně se sejme celé vychylovací pole (oblast A). Ve snímku se lokalizuje otvor clony a určí jeho rozměry. Poté je sejmuta oblast B, která je již jen o málo větší než otvor.

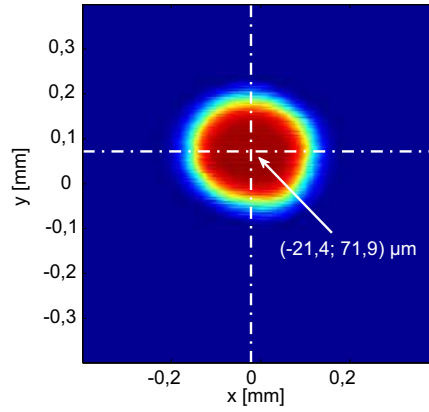
Měření je poměrně pomalé, ale velmi přesné a s rozsahem zahrnujícím celé vychylovací pole. Je vhodné k měření přesné polohy svazku, vyhodnocení zkreslení, dlouhodobé stability a podobně.

Vyhodnocení obrazu

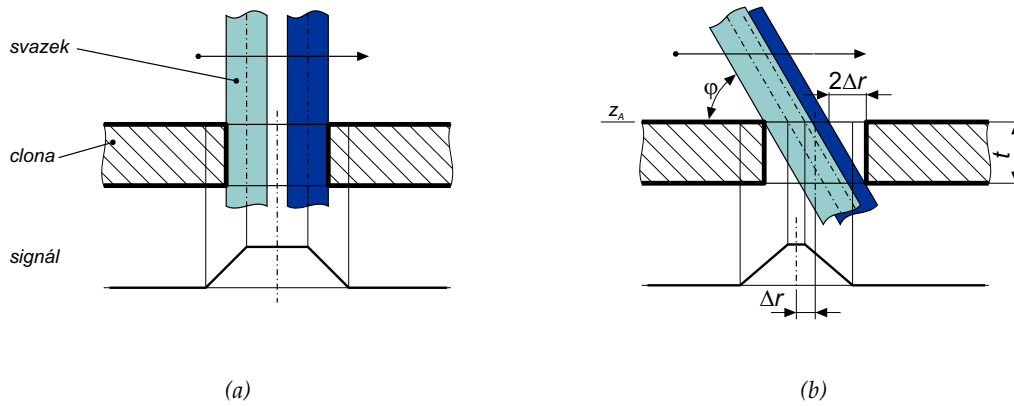
Při vyhodnocení obrazu je třeba brát v úvahu, že svazek má nenulové rozměry a získaný obraz clony je tedy neostrý. Na tvaru clony se při velkém zvětšení ve větší míře projeví nedokonalosti výroby. Zvolené vyhodnocovací kritérium musí tyto skutečnosti brát v úvahu. Jako vhodné se ukázalo použití výpočtu těžiště získaného obrazce podle vztahu (2.6). V prostředí MatLab lze použít kód podle přílohy B.1. Pro určení rozměrů (okrajů) clony je možné použít vztah (2.5), jehož realizace v MatLabu je v příloze B.3. Příklad obrazu clony s nalezeným těžištěm je na obr. 5.7.

Systematické chyby měření

Clona použitá při měření má vždy nenulovou tloušťku. Uvažujme jeden průchod svazku přes otvor clony, jak je naznačeno v řezu na obrázku 5.8. Křivky pod náčrtky odpovídají průběhu proudového signálu sondy. V blízkosti optické osy dopadá elektronový



Obrázek 5.7: Příklad sejmутého obrazu clony Faradayovy sondy. Poznámka: indikovaná poloha je uvedena v „hrubém souřadném systému“.



Obrázek 5.8: Systematická chyba snímání polohy způsobená úhlem dopadu svazku a nenulovou tloušťkou clony: (a) – kolmý (nevychýlený) svazek, (b) – svazek dopadající šikmo na detektor. Signál odpovídá jednomu řádku obrazu.

svazek na clonu kolmo a šířka impulsu odpovídá rozměru otvoru. Určení středu pak bude přesné (viz obr. 5.8a). Při měření s vychýleným svazkem však dochází k omezení svazku vnitřní válcovou plochou clony (obr. 5.8b), což způsobí zúžení impulsu a střed pak bude vyhodnocen s chybou Δr , která je dána vztahem:

$$\Delta r = \frac{1}{2} t \operatorname{tg} \varphi = \frac{1}{2} t_A \frac{r}{|z_A - z_V|}, \quad (5.14)$$

kde t_A je tloušťka clony, φ je úhel vychýlení svazku od optické osy, r je radiální výchylka svazku, z_A je poloha roviny clony a z_V je poloha středu vychylování.

5.4 Geometrické zkreslení

5.4.1 Přenosová funkce

U ideálního vychylovacího systému je výchylka svazku úměrná proudům vychylovacích cívek. To bohužel u reálných systémů není pravda a závislost polohy je na

proudech vázána obecným vztahem. Tento vztah je možné s dostatečnou přesností vyjádřit přenosovou funkcí ve tvaru:

$$f_A(\mathbf{q}) = \begin{pmatrix} r_U \\ r_V \end{pmatrix} = \overbrace{\begin{pmatrix} a_{Ux^3} & a_{Ux^2y} & a_{Uxy^2} & a_{Uy^3} & a_{Ux^2} & a_{Uxy} & a_{Uy^2} & a_{Ux} & a_{Uy} & a_{U0} \\ a_{Vx^3} & a_{Vx^2y} & a_{Vxy^2} & a_{Vy^3} & a_{Vx^2} & a_{Vxy} & a_{Vy^2} & a_{Vx} & a_{Vy} & a_{V0} \end{pmatrix}}^{\mathbf{A}} \begin{pmatrix} x^3 & x^2y & xy^2 & y^3 & x^2 & xy & y^2 & x & y & 1 \end{pmatrix}^T, \quad (5.15)$$

kde x a y jsou vstupní souřadnice a $\mathbf{A}$ je matice koeficientů. $\mathbf{r} = (r_U; r_V)$ jsou transformované souřadnice, které podle uvedeného modelu představují souřadnice v hrubém souřadném systému. Funkce obsahuje členy do třetího řádu včetně, což umožňuje korigovat i vady nelineárního charakteru jako je soudkovitost či poduškovitost. Význam koeficientů přenosové funkce je v tabulce 5.1.

Poznámka: Pro korekci vad lineárního charakteru (viz obr. 5.9) je možno použít přenosovou funkci s členy do 1. řádu. Její podoba v tzv. homogenním tvaru je spolu s velikostí koeficientů pro různé typy transformací uvedena v příloze A.

5.4.2 Určení koeficientů přenosové funkce

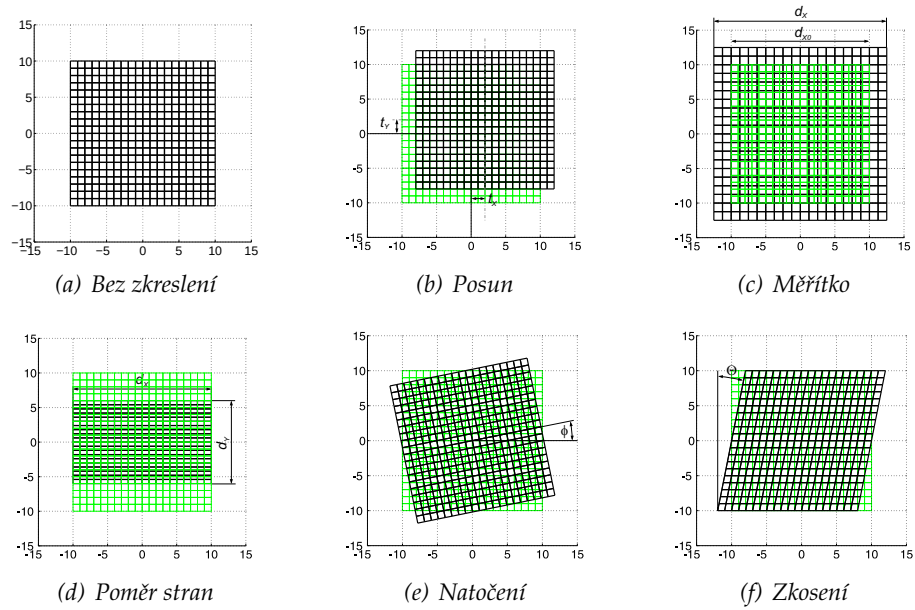
Koeficienty přenosové funkce se určí tak, aby odchylky požadované a skutečné polohy svazku byly co nejnižší. K tomu je nutné změřit odchylky v dostatečném počtu bodů rozprostřených po celém vychylovacím poli [18]. Vyjdeme z požadavku, aby požadovaná a skutečná poloha byly totožné, tedy $\mathbf{q} = \mathbf{p}$. Zaved'me chybový vektor $\mathbf{e}$ daný výrazem:

$$\mathbf{e}_{i,j} = \mathbf{r}_{i,j} - f_A(\mathbf{p}_{i,j}), \quad (5.16)$$

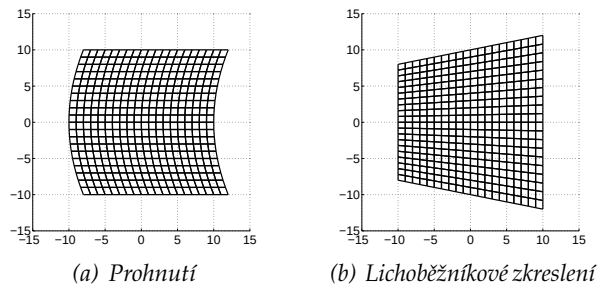
kde $\mathbf{p}_{i,j}$ jsou souřadnice uzlů kontrolní sítě, $\mathbf{r}_{i,j}$ jsou odpovídající souřadnice v hrubém souřadném systému (viz obr. 5.12). Koeficienty funkce f_A podle výrazu (5.15) můžeme určit, pokud budeme mít k dispozici měření v deseti bodech, což odpovídá počtu párů

Tabulka 5.1: Charakteristické typy geometrického zkreslení a příslušné koeficienty přenosové funkce.

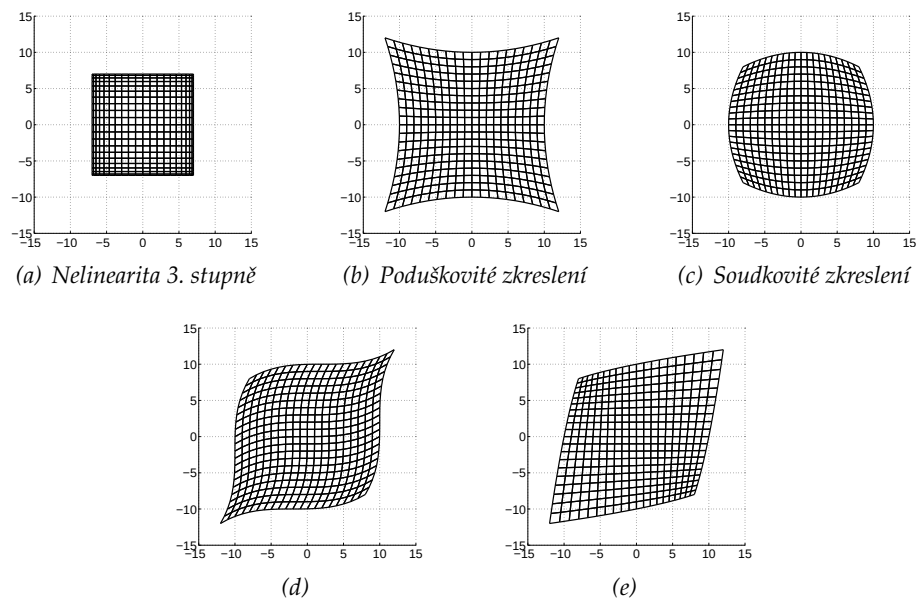
Koeficienty	Typ	Obr.	Poznámka
a_{U0}, a_{V0}	Posun vychylovacího pole	5.9b	Není faktickou vadou, protože souvisí s volbou vztažného bodu soustavy
	Měřítka	5.9c	Nesprávné určení citlivosti vychylovacích cívek, případně nastavení zisku signálního řeťezce
$a_{Ux}, a_{Uy}, a_{Vx}, a_{Vy}$	Poměr stran Natočení vychylovacího pole	5.9d 5.9e	Nesprávný poměr citlivostí U a V deflektoru Špatná orientace vychylovacích cívek vůči souřadnému systému
	Zkosení vychylovacího pole	5.9f	Nedokonalé nastavení vzájemného úhlu deflektorů
a_{Uxy}, a_{Vxy}	Lichoběžníkové zkreslení	5.10b	Vyosené vychylovací cívky
a_{Uy^2}, a_{Vx^2}	Prohnutí	5.10a	Vyosené vychylovací cívky
a_{Uxy^2}, a_{Vx^2y}	Poduškovitost Soudkovitost	5.11b 5.11c	Principiální vada při velkých úhlech Principiální vada při velkých úhlech
a_{Ux^3}, a_{Vy^3}	Nelinearita	5.11a	Principiální vada při velkých úhlech
a_{Uy^3}, a_{Vx^3} a_{Ux^2y}, a_{Vxy^2}	Anizotropní zkreslení	5.11d 5.11e	Nevyskytuje se



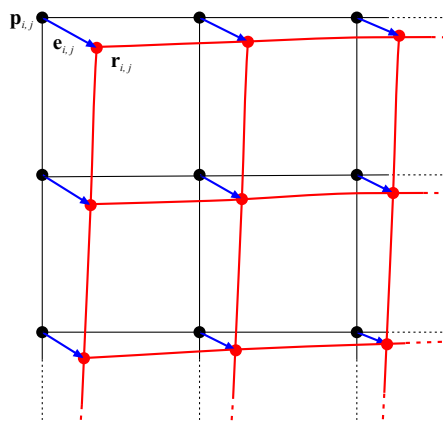
Obrázek 5.9: Geometrická zkreslení prvního řádu.



Obrázek 5.10: Geometrická zkreslení druhého řádu.



Obrázek 5.11: Geometrická zkreslení třetího řádu.



Obrázek 5.12: Síť kontrolních bodů pro určení zkreslení vychylovacího systému. Uzly sítě $\mathbf{p}_{i,j}$ jsou zobrazeny černě, odpovídající body hrubého souřadného systému $\mathbf{r}_{i,j}$ (v podstatě jde o proudy deflektorů vyjádřené v délkových mírách) jsou vyznačeny červeně. Rozdílové (chybové) vektory $\mathbf{e}_{i,j}$ jsou modré.

koeficientů této funkce. Dosazením vznikne soustava lineárních rovnic, jejichž řešením jsou hledané koeficienty. Nevýhodou tohoto postupu je velká citlivost na chyby měření.

Jako vhodnější se mi jeví měření vychylovacího pole ve více bodech, než je minimální počet. Vzniklá přeuročená soustava se vyřeší pomocí regresní analýzy, například metodou nejmenších čtverců:

$$\arg \min_A \sum_{\substack{1 \leq i \leq M \\ 1 \leq j \leq N}} |\mathbf{e}_{i,j}|^2, \quad (5.17)$$

kde M a N jsou počty řádků a sloupců sítě. Řešení není triviální; pro přenosovou funkci 3. řádu je nutné hledat 20 koeficientů. S výhodou lze použít prostředí MatLab – viz příloha B.5.

Počet koeficientů přenosové funkce je možné snížit vyloučením některých prvků na základě předpokládané symetrie systému. Experiment uvedený v části 7.3 ukáže, že například koeficienty druhého řádu mají malou velikost. Jejich případným vypuštěním je možné řešení vztahu (5.17) zjednodušit.

Geometrické vady lineárního charakteru (natočení, špatnou ortogonalitu, rozdílnou citlivost v X a Y směru) můžeme s menší přesností korigovat i pomocí REM režimu zobrazením vhodného objektu (kruhu, čtverce a podobně) a ručním nastavením korekcí podobně jako u počítačového CRT monitoru. Tento postup je zabudován v softwaru elektronové svářečky MEBW-60/2 (viz § 4.4.1). Měřením zkreslení vychylovacího systému a stanovením koeficientů přenosové funkce se zabývá experiment v části 7.3.

5.5 Magnetická hystereze

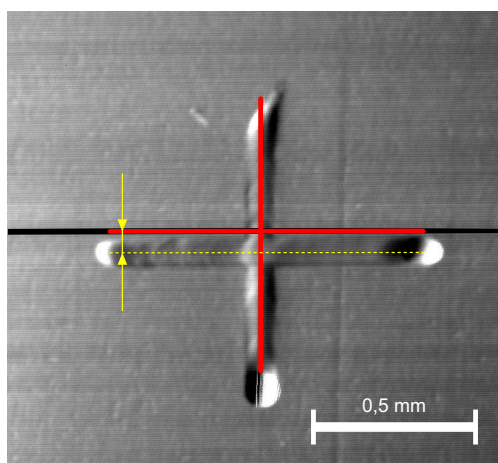
Opakovatelnost polohování svazku zhoršuje hystereze magnetických materiálů, kterými prochází magnetický tok vychylovacích cívek [45, kap. 2 a 3]. Skutečná výchylka svazku je tak závislá nejen na okamžitém proudu vychylovacích cívek, ale i na předchozím stavu. Remanentní magnetismus ovlivní trajektorii svazku i poté, co budící pole zaniklo. Příkladem může být situace na obrázku 5.13. Provedený svar ve tvaru kříže je posunut oproti zamýšlené poloze (vyznačené červeně) vlivem hystereze, protože mezi snímáním obrazu a vlastním svařováním byl svazek vychýlen daleko za hranice obrázku. Výsledkem je nežádoucí vertikální posun svaru oproti svařovací spáře.

Podstatu jevu objasňuje obrázek 5.14a. Jak víme ze vztahu (5.4), odpovídá výchylka svazku indukci pole B . Předpokládáme, že deflektor je vybuzen proudem, kterému

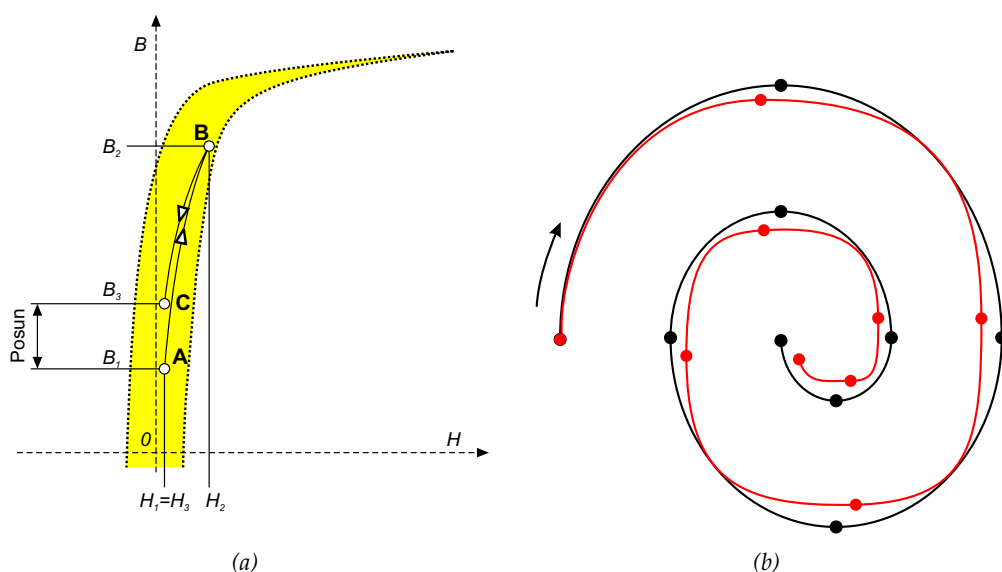
odpovídá intezita magnetického pole H_1 a okamžitá hodnota magnetické indukce B_1 (bod A v diagramu). Při změně budicího proudu na novou hodnotu se zvýší intezita pole na $H_2 > H_1$ (bod B). Po návratu na hodnotu $H_3 = H_1$ se indukce nevrátí na hodnotu B_1 , ale bude poněkud vyšší ($B_3 > B_1$ – bod C). Poloha svazku bude rovněž posunuta směrem k bodu B. V obrázku 5.14b je vykreslena trajektorie svazku ovlivněná hysterezí. Vliv hystereze je na obrázcích 5.14a a (b) záměrně zdůrazněn. Ve skutečných systémech se velká část pole uzavírá vzduchem (resp. vakuem), což vliv hystereze potlačuje.

Konstrukce a volba materiálů vychylovacího systému a sousedící konstrukce má rozhodující vliv na hysterezi systému. Pokud bude vychylovací systém zcela prostý feromagnetických prvků, nebude mít hysterezi. Je-li nezbytné použít magneticky vodivé prvky, měla by volba materiálu respektovat požadavek na co nejužší hysterezní křivku.

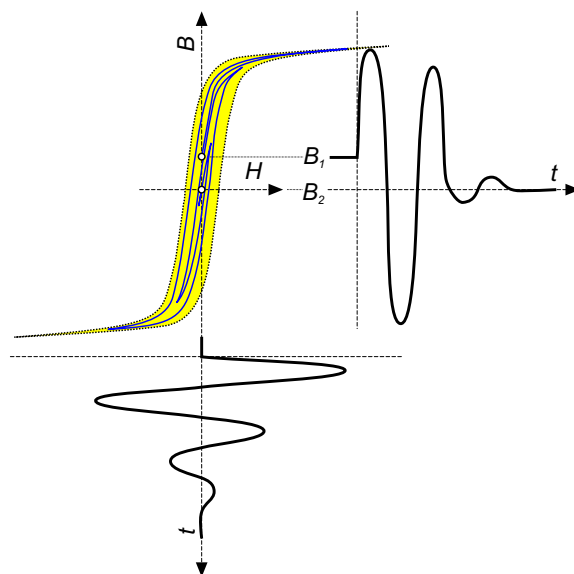
Pro uvedení vychylovacího systému do výchozího stavu můžeme odstranit remanentní magnetismus pomocí demagnetizace. Ta spočívá ve vybuzení deflektoru harmonickými kmity a postupném snižování jejich amplitudy k nule (viz obr. 5.15). V B-H diagramu



Obrázek 5.13: Příklad ovlivnění polohy svazku hysterezí magnetického obvodu deflektorů.



Obrázek 5.14: Objasnění vlivu hystereze magnetického obvodu deflektorů na reprodukovatelnost nastavení polohy svazku: (a) – hysterezní křivka, (b) – „skluz“ svazku vlivem hystereze; černě je nakreslena správná trajektorie, červeně dráha svazku ovlivněná hysterezí.



Obrázek 5.15: Demagnetizace tlumenými kmity (degauss).

opíše pracovní bod zpočátku velké hysterezní křivky, které se postupně zmenší až do bodu v blízkosti počátku. Následné vybuzení deflektoru bude sledovat křivku prvotní magnetizace. Průběh demagnetizačních tlumených kmitů je popsán výrazem:

$$i(t) = I_0 e^{-bt} \sin 2\pi ft, \quad (5.18)$$

kde I_0 je počáteční amplituda kmitů, f je jejich frekvence, b je součinitel útlumu a t je čas. Pokud byl magnetický obvod silně zmagnetován (například vnějším polem nebo při výrobě), nemusí stačit odmagnetování polem, které jsou schopny vytvořit cívky deflektorů. V tomto případě je třeba demagnetovat pomocí vnějšího elektromagnetu.

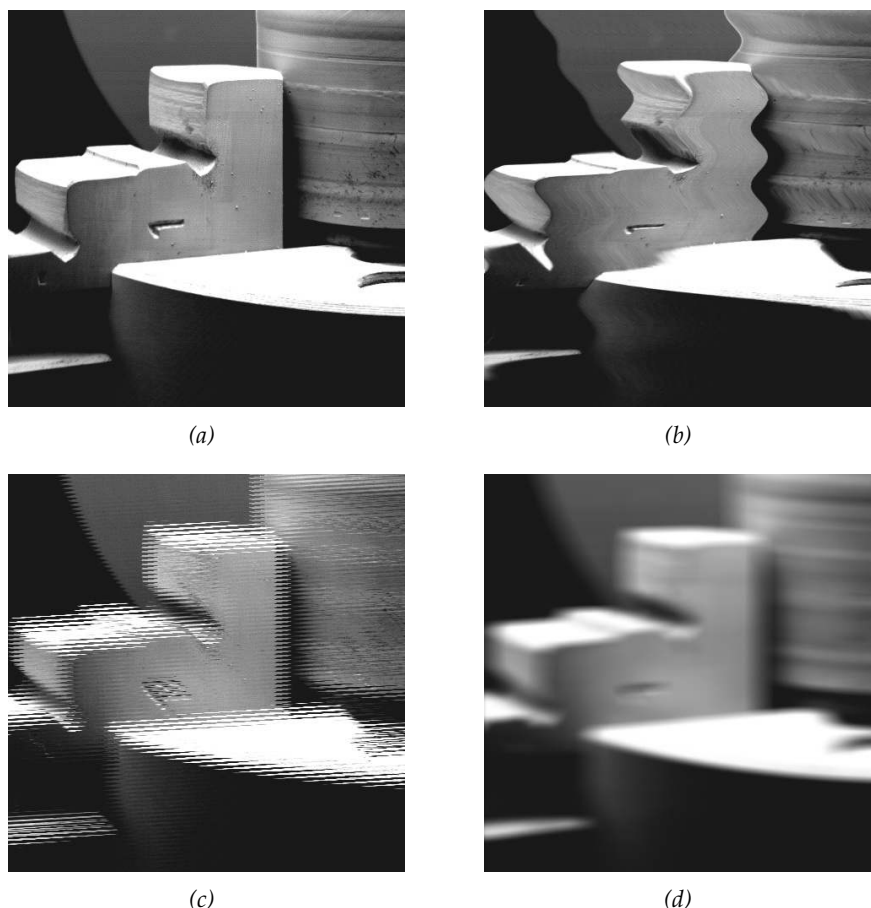
Úplné odstranění vlivu hystereze by bylo možné jen vytvořením algoritmu, který by na základě modelu chování vychylovacího systému určoval potřebnou korekci výchylky. Podobnou problematikou se zabývají konstruktéři piezo-elektrických aktuátorů, například [Yeh et al.](#) v [110]. Model chování feromagnetických materiálů uvádí [Jiles a Atherton](#) v [57]. Výsledky měření remanentního magnetismu vychylovacího systému u svářečky MEBW-60/2 jsou uvedeny v části 7.4.

5.6 Stabilita

5.6.1 Krátkodobá stabilita – zvlnění a šum

Zvlnění či šum ve vychylovacím řetězci se projevuje rozmazáním stopy svazku a zvlněním či deformacemi obrazu v REM režimu. Nestabilitu je možno snížit vhodným návrhem budicích obvodů (pro vnitřní zdroje nestability), případně přidavným stíněním (pro rušení pocházející z vnějších zdrojů). Praxe ukazuje, že největší měrou se na krátkodobé nestabilitě podílí rušení, které má původ ve střídačových napájecích zdrojích použitých v systému a jeho okolí. Míru šumu ve vychylovacím řetězci je možné určit měřením:

- proudů deflektorů,
- pole deflektorů (například s pomocí měřicí cívky – viz § 5.3.2),
- výchylek svazku (například kvadrantovým detektorem – viz § 5.3.1) nebo
- nepřímo z degradace REM obrazu.



Obrázek 5.16: Degradace REM obrazu způsobená rušením vychylovacího systému různými kmitočty: (a) – obraz bez rušení, (b) – rušení kmitočtem $f_N = 0,014f_H$, (c) – rušení kmitočtem $f_N = 11,2f_H$, (d) – vysoký kmitočet způsobuje rozmazání obrazu ($f_N \gg f_H$), f_H je kmitočet horizontálního rozkladu (simulováno).

Při měření proudů deflektorů nepostihneme rušení střídavými elektromagnetickými poli působícími přímo na svazek. Nicméně je toto měření vhodné k posouzení kvality elektroniky a nalezení případných zdrojů rušení v této části řetězce. Měření je možné provést osciloskopicky (v časové oblasti) nebo s pomocí spektrálního analyzátoru (ve frekvenční oblasti). Ke snímání proudu se hodí proudová sonda nebo je možno do série s deflektorem vřadit vhodný rezistor a měřit úbytek napětí. Vazba může být střídavá, je-li zajištěno, že budou přeneseny i nejnižší sledované kmitočty.

Vyhodnocení rychlých změn polohy svazku metodou popsanou v § 5.3.3 nelze použít pro nízkou frekvenci snímání. Periodické rušení však můžeme posoudit z obrazu získaného v REM režimu. Při zobrazení vhodného objektu odečteme v obraze frekvenci a amplitudu zvlnění na hranách, případně je možné data podrobit spektrální analýze. K určení frekvence je nutné znát rozkladové kmitočty použité při snímání obrazu. Simulované příklady obrazu poškozeného rušením jsou na obrázku 5.16. Na obrázku 5.16b má zdroj rušivého signálu kmitočet f_N značně nižší než řádkový kmitočet f_H . To se projeví vodorovným zvlněním obrazu. Na obrázku 5.16c je naopak kmitočet vyšší než řádkový. Je-li kmitočet rušení vyšší, než je pixelová frekvence, obraz se rozmáže (obr. 5.16d).

5.6.2 Dlouhodobá stabilita

Dlouhodobá stabilita se vyznačuje relativně pomalými změnami polohy svazku, které snižují reprodukovatelnost nastavení polohy. Zdrojem nestability mohou být budící zdroje vychylovacího systému, elektrická a mechanická nestabilita celého zařízení, oteplení optických prvků nebo nabíjení nevodivých předmětů v blízkosti svazku.

Při měření dlouhodobé stability se pro svou relativní jednoduchost a přesnost ukázalo jako nejvhodnější měření pomocí REM režimu (viz § 5.3). Použití měřicí cívky není vhodné, protože napěťový signál bude příliš malý ($d\phi/dt \rightarrow 0$) a při integraci by se příliš kumulovaly chyby. Měření s kvadrátovým detektorem je možné, pokud vyhoví jeho rozsah a při použití vhodného frekvenčního filtru potlačující rychlé změny. Měření dlouhodobé stability se věnuje experiment popsáný v části 7.5.

5.7 Dynamika vychylovacího systému

5.7.1 Rychlost vychylování

Rychlost vychylování svazku je možno měnit v širokém rozsahu a velmi strmě. Minimální rychlost není prakticky nijak omezena; maximální závisí na mnoha faktorech, například na indukčnosti vychylovacích cívek, na jejich citlivosti pro danou energii svazku, na pracovní vzdálenosti nebo na špičkovém napětí budičího zdroje [119]. Relativně snadno dosažitelná rychlost je řádově 10^3 m s^{-1} . Zrychlení či zpomalení dosahuje řádově 10^9 m s^{-2} , což je asi 10^6 krát více (!) ve srovnání s mechanickým polohováním. Z hlediska elektronové optiky je vychylovací systém považován zpravidla za statický [47, 63, 65, 87], proto je nutné informace o jeho dynamických vlastnostech čerpat z literatury související například s televizní technikou [99].

Maximální rychlost přesunu místa dopadu svazku je dána především vlastnostmi vychylovacích cívek a jejich zdrojů. Teoretická mezní rychlost pro systém s daným zdánlivým výkonem [119] nemusí však být vždy dosažena. Snížit ji mohou nežádoucí jevy, například vířivé proudy nebo parazitní kapacita cívek.

5.7.2 Omezené napětí budiče

Maximální rychlost vychylování je principiálně omezena špičkovým napětím, které vyvine budičí zdroj. Předpokládejme, že příčná výchylka svazku je dána zjednodušeným výrazem:

$$y(t, z = \text{konst}) = k_D i(t), \quad (5.19)$$

kde $i(t)$ je okamžitá velikost proudu deflektoru a k_D je citlivost deflektoru podle výrazu (5.5). Příčná rychlost svazku bude

$$v(t) = \frac{dy(t)}{dt} = k_D \frac{di(t)}{dt}. \quad (5.20)$$

Napětí na reálné cívce bude

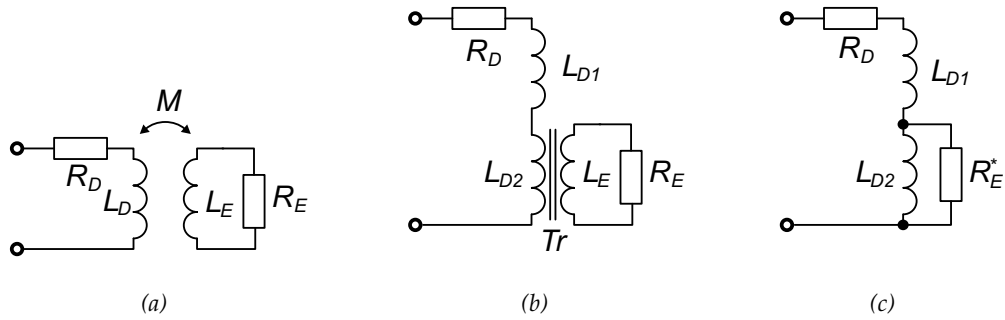
$$u(t) = L_D \frac{di(t)}{dt} + R_D i(t), \quad (5.21)$$

kde L_D a R_D je indukčnost a sériový (vnitřní) odpor vychylovacích cívek. Použijeme-li vztahy (5.20) a (5.21), a zanedbáme-li rezistivní složku impedance cívek, můžeme pro rychlost vychylování psát vztah:

$$v(t) = k_D \frac{u(t)}{L_D}. \quad (5.22)$$

Protože maximální napětí je omezené konstrukcí budičího zdroje, je i maximální rychlost limitovaná.

Příčnou rychlost svazku lze vyhodnocovat ze signálové odezvy vhodného detektoru, například dvojice senzorů umístěných v rovině měření. Ze zpoždění impulsů vypočteme střední rychlost svazku. Je též možné použít měřicí cívky popsané v odstavci 5.3.2 – *Měření magnetického pole deflektoru*. Napětí na cívce je úměrné rychlosti změn pole a tedy i rychlosti vychylování svazku. Praktické ověření jsem uskutečnil, ale z časových důvodů jsem jej nezařadil do této práce.



Obrázek 5.17: Náhradní schémata vychylovacích cívek se započtením vlivu vířivých proudů: (a) – rezistor R_E představující vodivý materiál je vázán s hlavní cívkou vzájemnou indukčností M , (b) – indukčnost M nahrazena ideálním transformátorem, (c) – rezistor R_E převeden na primární stranu $\rightarrow R_E^*$. Legenda: L_D a R_D – indukčnost a vnitřní odpor vychylovacích cívek, L_E a R_E – ekvivalentní indukčnost a odpor obvodu vířivých proudů, M vzájemná indukčnost, ostatní viz text.

5.7.3 Vířivé proudy

Prochází-li proměnlivý magnetický tok vychylovacích cívek elektricky vodivými tělesy, indukují se v nich proudy, které se označují jako vířivé. Tyto proudy vytvoří magnetické pole, které bude mít opačnou orientaci, a výsledné pole bude zeslabeno. Nebude-li se buzení dále měnit, vířivé proudy postupně zaniknou rychlostí danou vlastnostmi materiálu (vnitřním odporem), geometrií a prostředím (permeabilitou).

Vířivé proudy můžeme modelovat jako závit s malým odporem, kterým prochází magnetický tok deflektoru. Na náhradním schématu 5.17a jsou vychylovací cívky magneticky vázány s rezistorem R_E představujícím vodivý materiál. V obrázku 5.17b je vzájemná indukčnost M nahrazena ideálním transformátorem Tr a indukčnost L_D je rozdělena na dvě, L_{D1} a L_{D2} , podle vztahu:

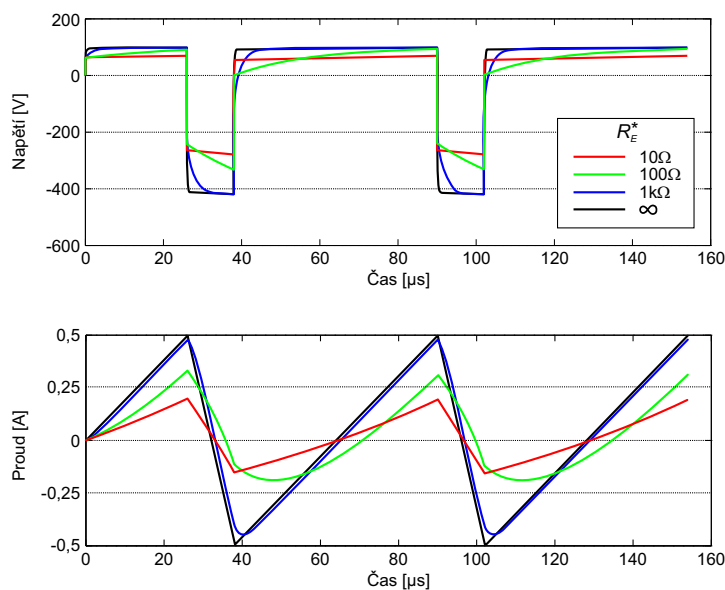
$$\begin{aligned} L_{D1} &= (1 - k_c)L_D, \\ L_{D2} &= k_c L_D, \end{aligned} \quad (5.23)$$

kde k_c je činitel vazby. Rezistor R_E s indukčností L_{D1} a odporem R_D tvoří RL člen s časovou konstantou:

$$\tau_{RL} = \frac{L_{D1}}{R_D + R_E \frac{L_{D2}}{L_E}} \quad (5.24)$$

Posouzení vlivu vířivých proudů je možné při znalosti k_c a R_E . Platí, že čím bude vyšší činitel vazby k_c a nižší ekvivalentní odpor R_E , tím bude vliv vyšší. Přímé měření uvedených hodnot není snadné, pokud je vůbec možné. Vliv vířivých proudů lze posoudit i z pozorování chování vychylovacího systému. V obrázku 5.18 jsou vypočtené časové průběhy napětí na vychylovacích cívkách a efektivní proud během rychlého rastrování. Efektivním proudem je myšlena část celkového proudu odpovídající výslednému poli, tedy tomu, které se skutečně podílí na vychylování svazku. Ze simulace je vidět, že vířivé proudy zmenšují amplitudu oscilací a způsobují jejich fázový posun oproti ideálnímu případu. To se projeví v REM režimu „roztážením“ obrazu a jeho „přeložením“ na levé straně, kde snímání začíná po rychlém zpětném běhu (viz obr. 5.19). Poznamenejme, že deformace REM obrazu uvedená na obrázku 5.19 může být způsobena i nedostatečně rychlým zpětným během svazku. V tomto případě stačí prodloužit čas rezervovaný pro návrat svazku.

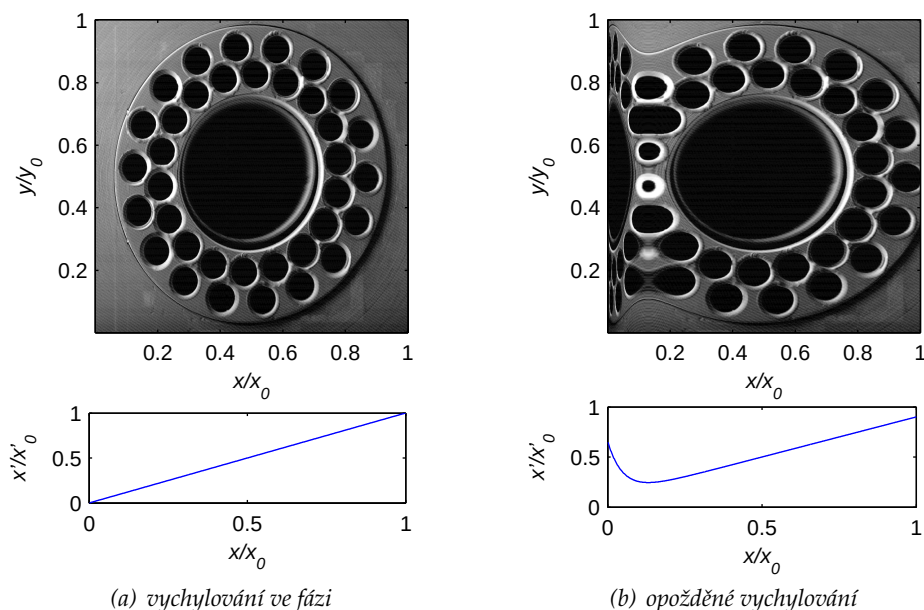
Vířivé proudy kromě uvedených problémů také zbytečně zatěžují vychylovací systém, protože část energie se mění neúčelně v teplo. Vliv vířivých proudů je možno zmenšit oddálením vodivých součástek od rychle se měnícího magnetického pole deflektorů nebo



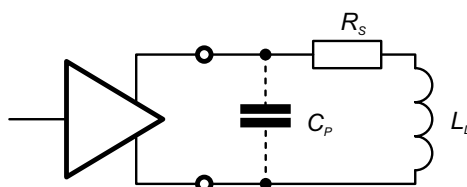
Obrázek 5.18: Napětí na vychylovacích cívkách a efektivní vychylovací proud během rychlého rastrování zatíženého vířivými proudy (simulace). Frekvence rastrování: 15 kHz, indukčnost vychylovacích cívek: 5 mH, sériový odpor cívek: 5 Ω . Barva čar odlišuje míru vířivých proudů reprezentovanou ekvivalentním odporem R_E^* . Černě je případ bez vířivých proudů ($R_E^* = \infty$).

výrobou těchto součástí z nevodivých materiálů. Další možnost je přerušení vodivých cest, což je princip používaný u transformátorů: rozdělením jádra na navzájem izolované plechy nebo použití feritů, kde jsou jednotlivá zrna magnetického materiálu oddělena nevodivým pojivem. Wardly [104] popisuje metodu potlačení vířivých proudů pomocí přídavných cívek kompenzujících pole vně vychylovacího systému a tím aktivně zabraňujících indukci těchto proudů. Princip byl uplatněn například u elektronového litografu [68].

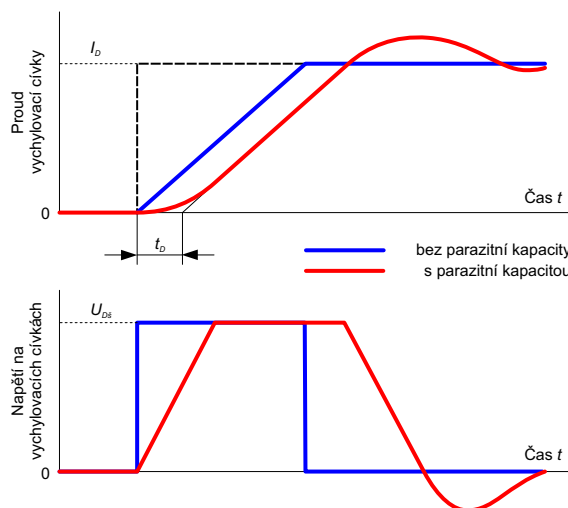
Doposud byla provedena pouze základní měření vířivých proudů, která však nebyla z časových důvodů zdokumentována a nestala se tak součástí experimentální části této



Obrázek 5.19: Deformace REM obrazu způsobená „opožděním“ vychylování svazku (simulace). Křivky pod obrázky symbolizují vztah skutečné normalizované výchylky svazku x'/x'_0 a pozice v obrázku x/x_0 .



Obrázek 5.20: Zjednodušené schéma vychylovacích cívek s napájecím zdrojem a parazitní kapacitou.



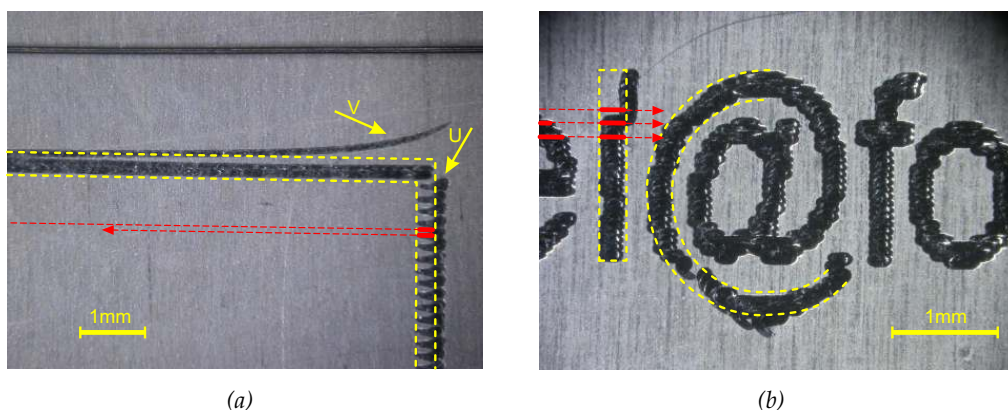
Obrázek 5.21: Vliv parazitní kapacity na napěťové a proudové průběhy.

práce. Výpočet uvedený na obrázku 5.18 jsem uskutečnil v systému PSpice [94] pomocí následujícího kódu, který odpovídá náhradnímu schématu 5.17c:

```
* Nastavení analýzy v časové doméně
.TRAN 20ns 154u 0 0.1u
.OP
* Parametrizace
.PARAM k_cpl=0.35 LD=5mH Re=3000
.STEP PARAM Re LIST 10,100,1000,10meg
* Zapojení
RD 2 1 5
RE 0 3 {Re}
LD1 1 3 {LD*(1-k_cpl)}
LD2 3 0 {LD*k_cpl}
* Proudový zdroj pilového signálu 15 kHz, ±0,5 A
I1 2 0 PWL 0 0 26u 0.5A 38u -0.5A 90u 0.5A 102u -0.5A 154u 0.5A
```

5.7.4 Parazitní kapacity

Každé vychylovací cívky mají nenulovou vnitřní kapacitu. Rovněž budicí zdroj a přívodní kabel nejsou prosté parazitních prvků. Ve schématu 5.20 jsou všechny nahrazeny jedním ekvivalentním kondenzátorem C_p . Ze vztahu (5.21) je vidět, že napětí na deflektoru s výraznou induktivní složkou je úměrné především rychlosti změny proudu. Při rychlém vychylování svazku, typickém například pro snímání obrazu, bude deflektor vyžadovat skokové změny napětí při každé změně směrnice proudu. Těmto změnám bude kapacita bránit.



Obrázek 5.22: Projevy nenulové doby ustálení polohy svazku při gravírování obrazců do povrchu nerezového plechu: (a) – artefakty způsobené přechodovými jevy U a V deflektoru; (b) – detail chybně vykreslených znaků „l“ a „@“ gravírovaného textu. Červené šipky naznačují směr pohybu svazku; přerušovanou čarou je rychlý pohyb, silnou čarou pomalý pohyb.

Parazitní kapacita negativně ovlivňuje chování vychylovacího systému, protože zatěžuje napájecí zdroj, který musí dodávat (případně odvádět) příslušný elektrický náboj. Indukčnost cívek spolu s kapacitou tvoří paralelní rezonanční člen, který má výrazně induktivní charakter pro podrezonanční kmitočty a přechází na kapacitní pro nadrezonanční frekvence. Popis celého systému se započtením parazitních kapacit není triviální a vyžaduje podrobnou znalost všech složek. V obrázku 5.21 je zjednodušeně naznačeno chování budiče pracujícího v proudovém režimu. Modře je uveden případ bez parazitní kapacity a červeně s jejím vlivem. Kapacita omezuje rychlost přeběhu budiče du/dt a způsobuje zpoždění:

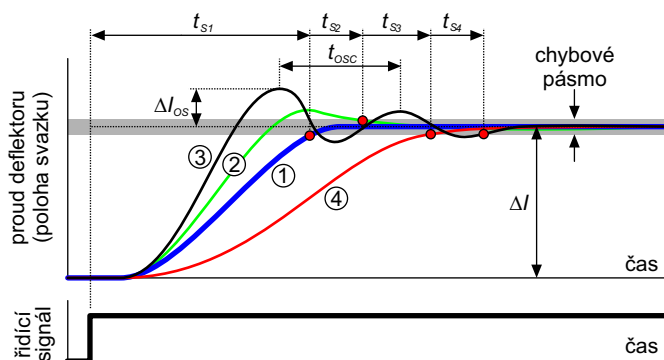
$$t_D = \frac{U_{\max}}{2I_D} C_P, \quad (5.25)$$

kde $U_{\max}$ je špičkové napětí budiče a I_D je výstupní proud. Parazitní kapacita také ovlivňuje stabilitu a zvyšuje riziko oscilací snížením fázové bezpečnosti. To přináší nutnost zvýšení zpětnovazební frekvenční kompenzace a tím (obvykle) i další zpomalení odezvy systému. V praxi je parazitní kapacita tvořena především výstupní kapacitou koncového stupně budičského zdroje cívek, která je v řádu stovek pikofaradů až jednotek nanofaradů. Kapacita kabelu se pohybuje ve stovkách pikofaradů na metr vedení, vnitřní kapacita vychylovacích cívek je v řádu desítek pikofaradů.

5.7.5 Doba ustálení

Při přesunu svazku je nutno počítat s dodatečným časem potřebným ke zpomalení a ustálení svazku v cílové poloze. Tento „přídavný“ čas může být delší než čas hlavního přesunu svazku do blízkosti cíle a ve výsledku může zcela degradovat dynamiku vychylovacího systému. Doba ustálení je dána především kvalitou napájecích zdrojů (budičů) vychylovacích cívek, případně indukci vířivých proudů. Přesně lze dobu ustálení stanovit pomocí osciloskopického záznamu proudů deflektorů, případně měřením výchylky rychlým polohovým detektorem (např. kvadrantovým).

Na příliš dlouhou dobu ustálení upozorní nežádoucí artefakty pozorovatelné na výsledku technologické operace. Na fotografiích 5.22 jsou vidět tyto jevy při gravírování svazkem. Motiv na obrázku 5.22a byl tvořen po řádcích směrem shora dolů a střídavě zprava doleva a opačně (viz červená šipka). Na pravém okraji jsou vidět artefakty způsobené ustalováním U deflektoru, kdy svazek po rychlém pohybu zleva „přestřelí“ mimo vyznačenou oblast. Na horním okraji, odpovídajícím začátku procesu, je vidět značně delší ustalování pomalejšího V deflektoru. Na obrázku 5.22b je zobrazena deformace



Obrázek 5.23: Doba ustálení výchylky svazku. Odezva na skok řídící veličiny pro (1) optimální tlumení, (2, 3) nevykompenzovaný systém s překmitem a zákmity, (4) překompenzovaný systém.

gravírovaného textu. Proces probíhal tentokrát jednosměrným řádkováním zleva doprava. Písmeno „l“ a znak „@“ jsou částečně deformovány v místech, kde nalevo od nich je velká mezera.

V obrázku 5.23 je příklad odezvy budicího zdroje deflektoru na skok řídící veličiny. Proud začíná stoupat s určitým zpožděním po této změně a konverguje k nové hodnotě. Doba ustálení je definována jako čas potřebný k překonání hranice, po které již signál neopustí zvolené chybové pásmo. Křivka s pořadovým číslem (1) je pro optimálně tlumený systém, kdy proud hladce, bez překmitu, ale nejvyšší možnou rychlostí dosáhne ustáleného stavu. Křivka (2) zachycuje případ nevykompenzovaného zdroje, u kterého dochází k překmitu. Velikost překmitu ΔI_{OS} se uvádí relativně k velikosti změny signálu ($\Delta I_{OS}/\Delta I$). V případě (3) je tlumení systému ještě nižší a proud konverguje k ustálenému stavu tlumenými kmity s periodou t_{OSC} . Průběh (4) je naopak příklad překompenzovaného zdroje, kdy proud sice hladce a bez překmitu konverguje, ale celková doba ustálení je prodloužená.

5.8 Shrnutí kapitoly

V této kapitole jsem popsal model vychylovacího systému, který obsahuje všechny důležité softwarové, elektronické i elektronově-optické bloky. Odvodil jsem matematické vztahy pro popis funkce těchto bloků. Navrhl jsem tři metody vyhodnocení polohy svazku: s pomocí kvadrantového detektoru, REM režimu s Faradayovou sondou a přímým měřením magnetického pole deflektoru. Podrobně diskutuji vlastnosti magnetického jednostupňového vychylovacího systému a příslušných měřicích metod. Pro určení geometrického zkreslení navrhuji postup srovnávající požadované a skutečné výchylky svazku v dostatečném množství kontrolních bodů. Z výsledků je možné určit koeficienty korekční funkce a potlačit zkreslení. Dále jsem popsal mechanismus vlivu magnetické hystereze na opakovatelnost nastavení polohy svazku. Uvedl jsem možné příčiny snížené časové stability výchylky, která je dalším faktorem ovlivňujícím přesnost polohování. Poslední část popisu vlastností vychylování se věnuje dynamickému chování. Odvodil jsem vztahy pro maximální rychlost vychylování danou vlastnostmi budicího zdroje. Popsal jsem nežádoucí jevy, jako je indukce vířivých proudů v blízkosti deflektorů a vliv parazitních kapacit. Závěrečná část je věnována přechodovému jevu doprovázejícímu rychlou změnu polohy svazku.

Z popsaných metod jsem na zařízení MEBW-60/2-E ověřil měření středu vychylování v § 7.2, geometrického zkreslení v § 7.3, remanentního magnetismu v § 7.4 a dlouhodobé stability v § 7.5. Další měření jsem pouze vyzkoušel, ale výsledky jsem dosud neměl čas zpracovat a interpretovat. Jedná se zejména o stanovení dynamických vlastností

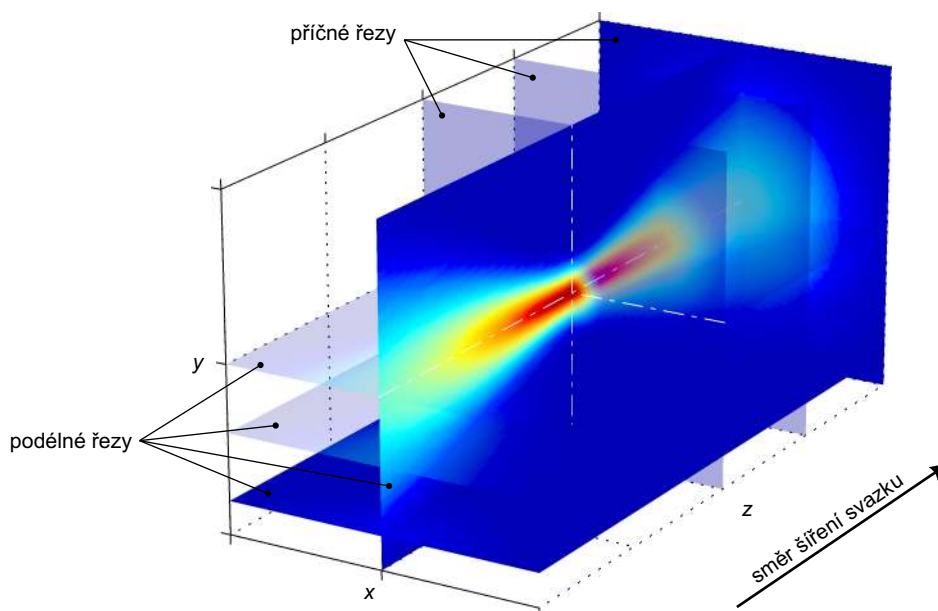
vychylovacího systému, pro které jsem vytvořil účelový softwarový nástroj DeflDiag, který je součástí ovládacího softwaru svářečky MEBW-60/2 (viz § 4.4.1).

6 Profily svazku

6.1 Úvod

Potřeba charakterizace elektronového svazku vznikla na našem pracovišti během vývoje technologií a zařízení využívající svazek. Bez možnosti objektivního posouzení stávajícího vybavení by byl další postup velmi obtížný. Neméně důležitým důvodem, souvisejícím se zavedením elektronové svářečky do MEBW-60/2 průmyslové výroby, je nutnost vytvoření charakteristik elektronové trysky a stanovení referenčních hodnot napomáhající reprodukovatelné výrobě zařízení.

V následující kapitole podrobně rozeberu problematiku měření a interpretace profilů elektronového svazku, tj. rozložení výkonové, případně proudové hustoty v řezu svazku. Stanovení profilů svazku, jakožto poměrně rychlá a jednoduchá metoda charakterizace svazku, se mi jeví jako vhodná cesta k zajištění uvedených požadavků.



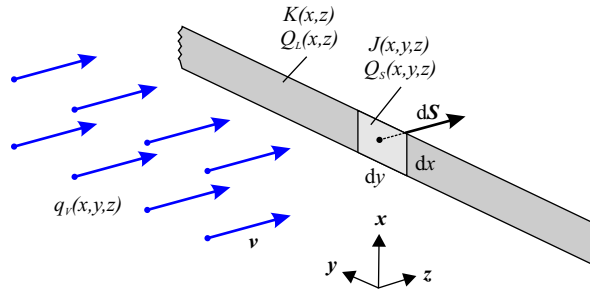
Obrázek 6.1: Orientace řezů svazkem.

Na obrázku 6.1 jsou význačné roviny řezů svazku – rovnoběžné s osou svazku a kolmé k ní. Oba případy jsou rozebrány v samostatných podkapitolách spolu s uvedením výpočtů významných parametrů. Podrobně je prostudována interpretace signálu z Faradayovy sondy i s odhadem systematických chyb měření. V další části je stručně zmíněno elektronické zpracování signálu ze sondy. Závěrečná část kapitoly se věnuje tepelnému zatížení měřicí sondy.

6.1.1 Plošná a lineární hustota proudu a výkonu

Elektronový svazek z makroskopického hlediska vytváří prostorový náboj $q_V(x, y, z)$, který se pohybuje střední rychlostí $\mathbf{v}$ (viz obr. 6.2) a vytváří tak elektrický proud s proudovou hustotou:

$$\mathbf{J}(x, y, z) = q_V(x, y, z) \cdot \mathbf{v}. \quad [\text{A mm}^{-2}] \quad (6.1)$$



Obrázek 6.2: Náčrtek k definici plošné a lineární proudové hustoty svazku.

Vektory $\mathbf{J}$ a $\mathbf{v}$ jsou orientovány ve směru šíření svazku. K měření proudové hustoty proto budeme potřebovat detektor, jenž vyhodnocuje tuto složku proudové hustoty. V našem případě půjde o Faradayovu sondu, jejíž vymezující clona bude ležet v rovině kolmé k optické ose.

Pro integrální měření se štěrbinovou clonou zavedeme lineární proudovou hustotu danou vztahem (pro případ štěrbinu orientované podél osy y):

$$K(x, z) = \int_{-\infty}^{\infty} J(x, y, z) dy. \quad [\text{A mm}^{-1}] \quad (6.2)$$

Na místo hustoty proudu je pro praxi vhodnější uvádět hodnoty hustoty výkonu, protože jsou rozhodující pro tepelné účinky na materiál a nejčastěji se vyskytují v literatuře. Protože zkoumané svazky jsou prakticky monoenergetické, jsou výkonová a proudová hustota navzájem vázány jednoduchými vztahy. Plošná hustota výkonu se určí podle vztahu:

$$Q_S = J E_k / q_E = J U_A, \quad [\text{W mm}^{-2}] \quad (6.3)$$

kde E_k je kinetická energie elektronů a U_A je urychlovací napětí svazku. Lineární hustota výkonu se určí podobně:

$$Q_L = K E_k / q_E = K U_A. \quad [\text{W mm}^{-1}] \quad (6.4)$$

Běžné jednotky jsou uvedeny u jednotlivých vztahů.

Poznámka: K zamezení záměny budu v dalším textu hustotu proudu či výkonu doplňovat o výraz „plošná“, ačkoliv se běžně neuvádí.

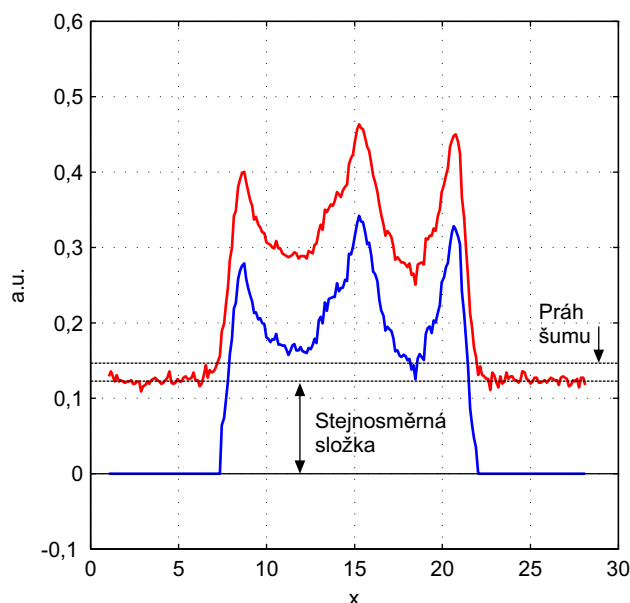
6.2 Příčný profil svazku

6.2.1 Úvod

Měření profilů v rovině kolmé k ose svazku jsem řešil postupným snímáním proudu svazku pomocí Faradayovy sondy s bodovou clonou. Vymezení dostatečně malé části svazku se dosáhne zmenšením vstupu sondy clonou s malým otvorem. Vzorkování probíhá po řádcích (princip měření byl blíže popsán v odstavci 2.5.2 na str. 15). Změnu vzájemné polohy svazku a sondy zajišťují vychylováním svazku magnetickým polem, přičemž vycházím z předpokladu, že vzhledem k malým vychylovacím úhlům to profil významně neovlivní. Díky rychlosti vychylovacího systému je možné provést vzorkování velice rychle a tím snížit množství energie, která se přemění v teplo v detektoru.

6.2.2 Odstranění stejnosměrné složky signálu a šumu pozadí

Signál z detektoru, který prošel celým řetězcem zpracování (viz §6.6), má často nesprávnou stejnosměrnou složku, tzn. je vertikálně posunutý. Tento posuv je nutné



Obrázek 6.3: Odstranění stejnosměrné složky a šumu pozadí signálu z detektoru. Červeně je nakreslen původní signál, modře upravený.

odstranit. Správná velikost se stanoví buď měřením „pozadí“ s vypnutým svazkem nebo se hodnota odhadne z naměřených dat. Určení stejnosměrné složky podle minima signálu selhává, protože je často přítomný výstřelový šum. Lépe funguje určení minimální hodnoty z histogramu se zanedbáním extrémních (málo četných) hodnot. Osvědčila se mi jednoduchá a rychlá metoda, která stejnosměrnou hodnotu určuje z průměru několika hodnot na okraji naměřených dat, kam již nezasahuje svazek. Pro profil s 256 vzorky je dostatečných asi šest bodů.

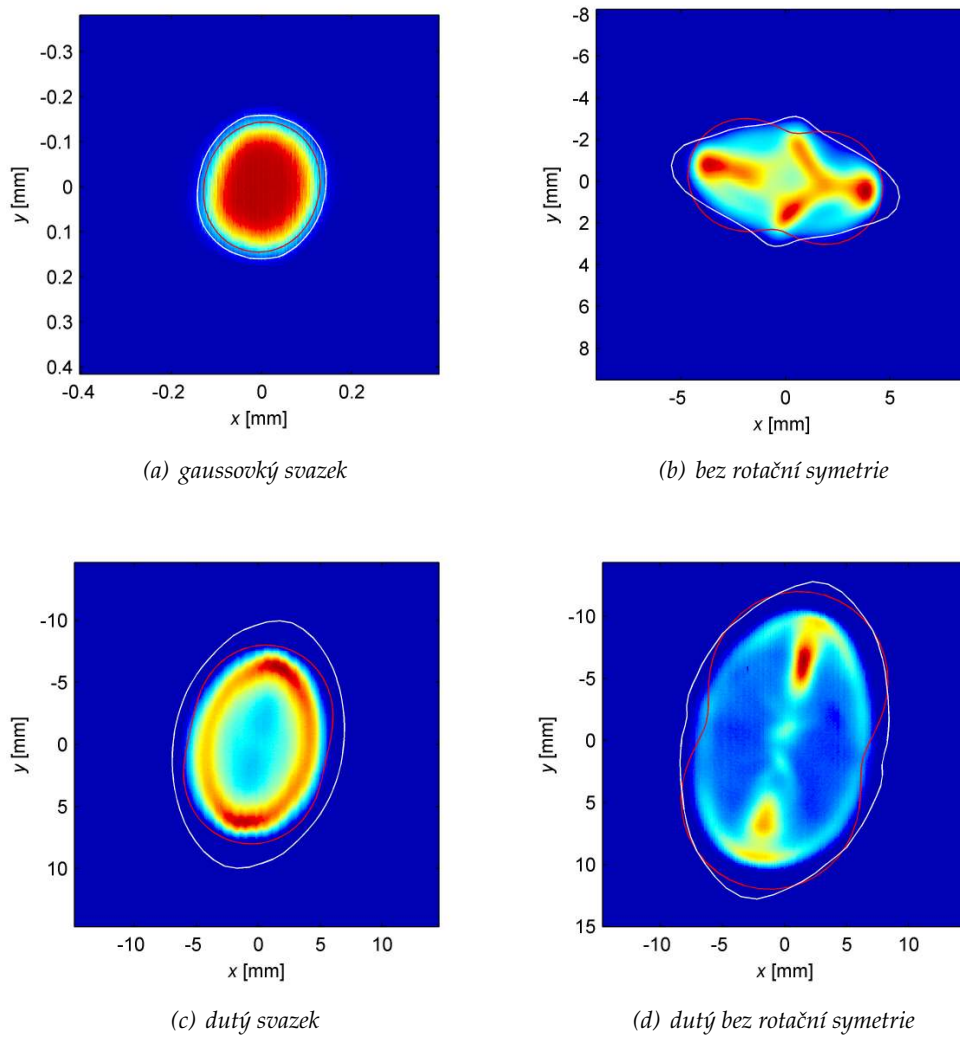
Měření profilů není prosté nahodilých vlivů, které se projeví zejména při měření svazků s poměrně malým celkovým proudem. Při dalším zpracování je na závalu zejména šum pozadí. Pro jeho odstranění se mi osvědčilo prahování, které nahrazuje hodnoty pod určitou mezí nulou. Volba prahové hodnoty je kritická, protože příliš nízký práh propustí i šum a vysoký práh může odstranit i podstatnou část signálu. Osvědčila se mi prahová hodnota okolo 3,5 až 5 % z maxima. Příklad je na obrázku 6.3. Realizace odstranění šumu pozadí a stejnosměrné složky v jazyce MatLab je v příloze B.4.

6.2.3 Střed, rozměry a obálka svazku

Častá úloha při zpracování příčného profilu svazku je určení geometrického středu svazku. Jedna z cest je nalezení těžiště rovinného útvaru s pomocí vztahu (2.6) a odpovídajícího výrazu pro souřadnici y . Příslušný kód pro MatLab je v příloze B.2.

Z příčného profilu svazku můžeme určit průměr svazku. Protože je okraj svazku typicky nezřetelný (neostrý), je nutné zvolit určité kritérium. Několik jich bylo popsáno v odstavci 2.5.7 (str. 17). Nejspolehlivější výsledky dává kritérium $d_{4\sigma}$, a to i pro svazky s velmi složitým profilem. Kromě absence jednoznačného okraje svazku způsobuje problémy i chybějící rotační symetrie svazku. Uvedení pouze jedné hodnoty průměru tak může být zavádějící.

V některých případech se hledá tzv. obálka svazku, tj. hranice, za kterou se vyskytuje jen malá část elektronů. Při jejím stanovení opět narazíme na problém nejasného okraje svazku. Lze použít například již zmíněné prahování, které ale selhává například u dutého svazku. Osvědčilo se mi využití modifikace vztahu (2.5). Předpokládáme svazek s rozložením



Obrázek 6.4: Příčné profily svazku s vyznačenou obálkou. Bíle je vykreslena obálka stanovená podle vztahu (6.5), červeně podle (2.5).

v rovině kolmé k ose svazku $J(x, y)$ s těžištěm v bodě $(x_0; y_0)$. Poloměr svazku v polárních souřadnicích vypočteme výrazem (2.7) s použitím substituce $x = x_0 + r \cos \phi$, $y = y_0 + r \sin \phi$:

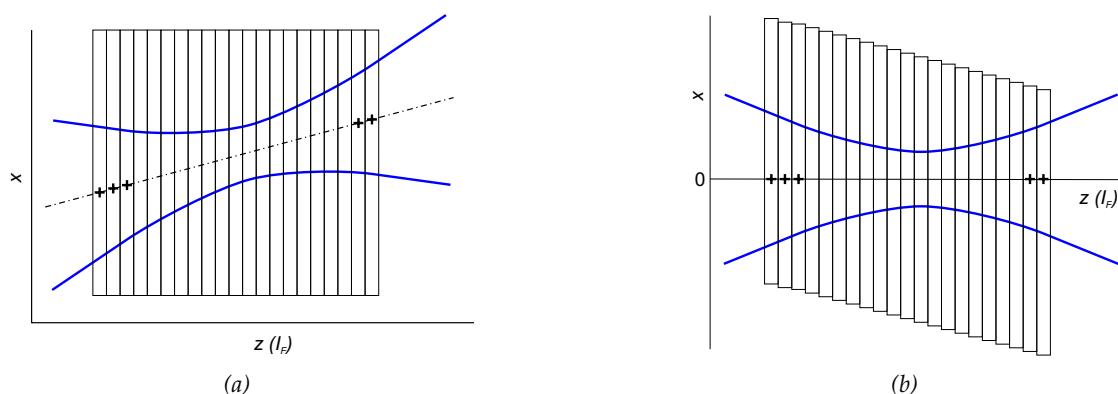
$$r(\phi) = 2 \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} J(x_0 + r \cos \phi, y_0 + r \sin \phi) r^2 dr}{\int_{-\infty}^{\infty} J(x_0 + r \cos \phi, y_0 + r \sin \phi) dr}}. \quad (6.5)$$

Aplikace uvedeného vztahu na různé profily jsou uvedeny v obrázku 6.4 bílou barvou, průměr $d_{4\sigma}$ je pro srovnání vyznačen červeně. Je vidět, že pro rotačně symetrické svazky (obr. (a) a (d)) jsou obě řešení téměř totožná. Pokud symetrie chybí, kopíruje tvar svazku lépe vztah (6.5).

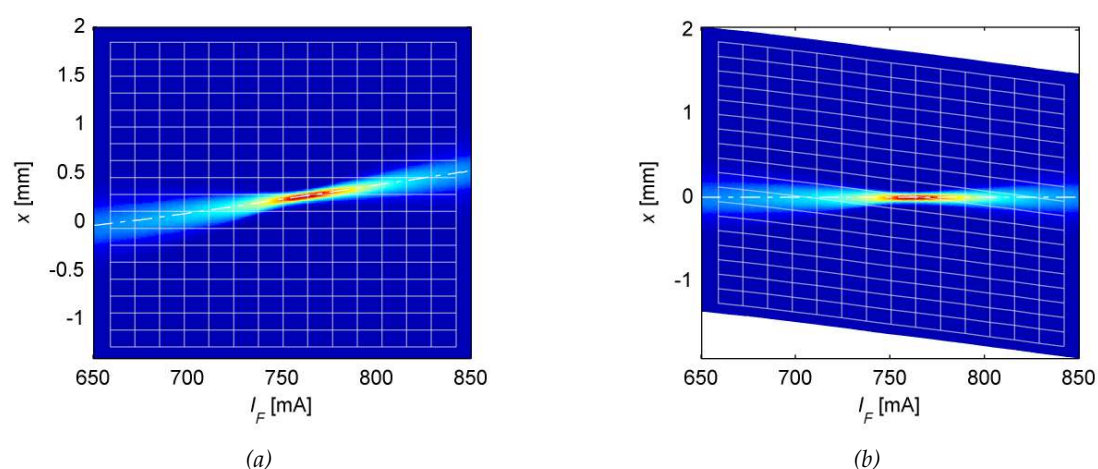
6.3 Podélný profil

6.3.1 Úvod

Podélný profil svazku je rozložení výkonové hustoty podél osy svazku. Získá se obdobně jako příčný profil, přičemž se sonda a svazek vzájemně pohybují v rovině



Obrázek 6.5: Princip narovnání osy podélného profilu svazku: (a) – podélný profil svazku s vyznačenou osou, a (b) – naznačené narovnání profilu posunutím jednotlivých řezů.

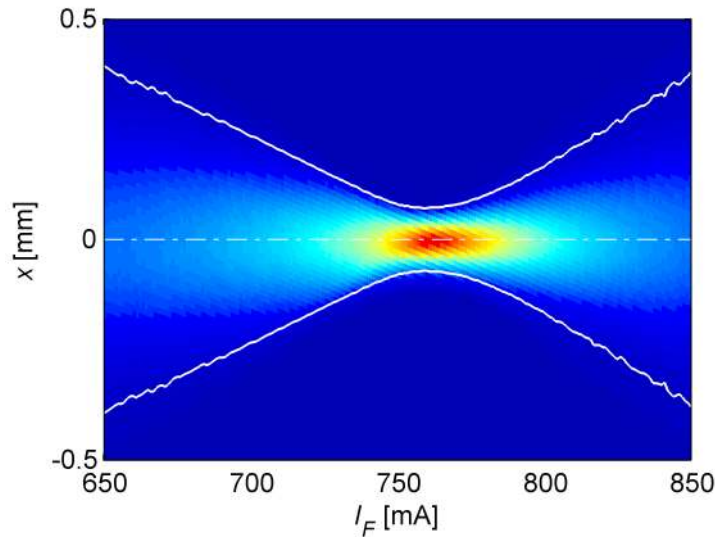


Obrázek 6.6: Podélný profil svazku (a) s nakloněnou a (b) narovnanou osou. Mřížka naznačuje provedenou transformaci.

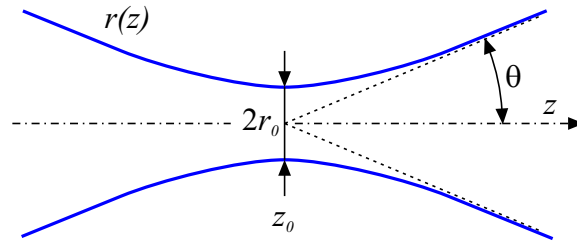
rovnoběžné s osou svazku. Orientace sondy je stejná jako při měření příčného profilu. Příčný pohyb lze nahradit vychylováním svazku stejně jako u příčného profilu. Pro podélný pohyb to není možné, avšak do jisté míry se dá ke stejnému účelu využít změna roviny zaostření. Takto získaný profil má osu z nahrazenou osou proudů fokusační čočky I_F (v dalším textu bude označován jako *podélný profil s proudovou osou*). V řadě případů nahrazení polohy z proudem v čočce není na závadu nebo je to dokonce výhodné. Příkladem může být častá úloha určení správného fokusačního proudu, pro kterou je profil s proudovou osou ideální – stačí nalézt místo nejmenšího průměru svazku a odečíst příslušný proud čočky. V případě, že není proudová osa žádoucí, je možné takový profil transformovat způsobem diskutovaným níže v odstavci 6.4. Při měření podélného profilu je možné použít bodovou nebo štěrbinovou sondu. V druhém případě získáme integrální profil. Pro úpravu signálu platí postupy z odstavce 6.2.2.

6.3.2 Osa svazku

Osa získaného profilu často není totožná s podélnou osou snímání. V případě profilu získaného pohybem sondy podél optické osy je to nejčastěji způsobeno nesprávným seřízením optické soustavy nebo nerovnoběžností optické osy a posunu sondy. V případě profilu měřeného přeostrčením čočky tato skutečnost nasvědčuje, že svazek neprochází středem čočky. Tuto informaci je možné využít k seřízení přístroje.



Obrázek 6.7: Integrální podélný profil zaostřeného svazku získaný přeostršením čočky s vyznačenou obálkou určenou metodou $d_{4\sigma}$.



Obrázek 6.8: Aproximace podélné obálky svazku podle vztahu (6.6).

Osu určíme pomocí vztahu (2.6) pro výpočet těžiště. Profil rozdělíme na pásy a těžiště spočítáme pro každý pás zvlášť (viz obr. 6.5a). Výsledné body můžeme případně proložit přímkou, aby se odstranil vliv náhodných chyb měření. Příklad profilu je na obrázku 6.6a s osou vyznačenou čerchovanou čarou. Je-li sklon osy svazku na závadu, můžeme jej odstranit a svazek „narovnat“. Protože je úhel sklonu osy typicky velmi malý, narovnání profilu provedeme posunutím jednotlivých pásů, jak je naznačeno na náčrtku 6.5 a příkladu 6.6b.

6.3.3 Obálka svazku

Hledání obálky v podélném profilu svazku je obdobné určování okraje svazku v příčném profilu, jak bylo popsáno výše. Použitelná kritéria jsou uvedeny v odstavci 2.5.7 (str. 17). Humphries v [52, str. 101] doporučuje použití výrazu (2.7) v kombinaci se snímáním šterbinovou clonou (tedy integrálním profilem). Ilustrativní příklad profilu s vyznačenou obálkou $d_{4\sigma}$ je na obr. 6.7.

Pro aproximaci obálky zaostřeného svazku je možno použít vztah vycházející z [52]:

$$r_a(z) = \sqrt{r_0^2 + \theta^2(z - z_0)^2}, \quad [\text{m}, \text{m}; \text{m}, \text{rad}, \text{m}] \quad (6.6)$$

kde $r_a(z)$ je aproximovaný poloměr svazku, r_0 je poloměr svazku v nejužším místě (pase), z_0 je poloha toho místa, θ je divergence (poloviční úhel) svazku [81, str. 31]. Význam parametrů je zřejmý z obr. 6.8. Výraz (6.6) nelze použít pro profily naměřené s přeostršením čočky bez přepočtu, který bude popsán níže.

Koeficienty vztahu (6.6) určíme regresí, například metodou nejmenších čtverců. Protože okolí pasu svazku má větší význam než oblasti vzdálené od osy, je vhodné použít váhovanou metodu nejmenších čtverců se zvýšením vlivu částí obálky v blízkosti osy:

$$\min \sum \left(\frac{r(z) - r_a(z)}{r_a(z)} \right)^2, \quad (6.7)$$

kde $r(z)$ je prokládaná obálka svazku.

6.3.4 Beam Parameters Product

Součin divergence svazku θ a nejmenšího poloměru svazku r_0 se označuje zkratkou BPP z anglického „Beam Parameters Product“:

$$\text{BPP} = \theta r_0 \quad [\text{mm mrad}; \text{mrad}, \text{mm}] \quad (6.8)$$

BPP charakterizuje kvalitu svazku a to, jak může být zaostřen do malého bodu. Ideální svazek má BPP roven nule, což je splněno pro paralelní svazek či svazek z bodového zdroje. BPP byl zaveden pro laserové svazky [81, 105, str. 31], ale jeho použití se rozšířilo i do oblasti částicových svazků [69, 72]. BPP souvisí s emitancí svazku, kterou může v některých případech nahradit. Má stejný fyzikální rozměr, ale liší se způsobem stanovení. BPP má velký význam při posuzování kvality zdroje elektronového svazku, protože citlivě odráží jeho vlastnosti. Určí se výpočtem z hodnot získaných postupem naznačeným v předchozím odstavci.

6.4 Transformace profilů měřených přeostřením čočky

Je-li k dispozici transportní optický systém, který je dostatečně lineární (má malé vady) a u svazku se neprojevuje významně vliv prostorového náboje (Loefflerův jev), je možné nahradit měření proudové hustoty svazku v různých místech podél osy z změnou roviny zaostření. Té se dosáhne změnou optické mohutnosti čočky, kterou v elektronové optice realizujeme změnou budicího proudu fokusační čočky I_F . Potřeba měnit polohu detektoru v ose z tak odpadá a měření je snazší a rychlejší, což platí zejména při snímání podélných profilů. Zmíněný postup využívají například autoři v [60, 72].

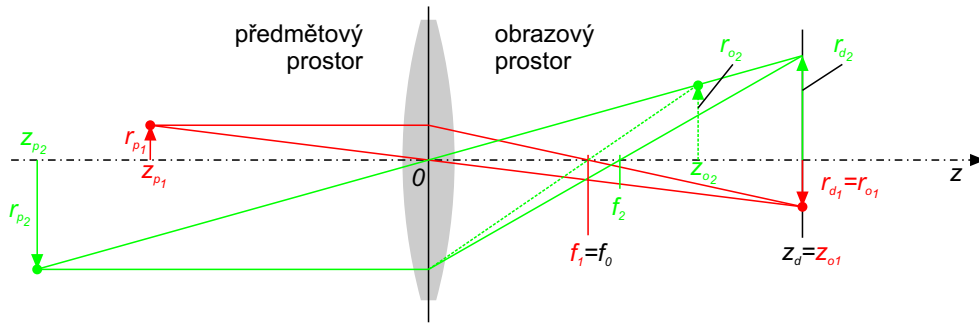
Profily, u kterých známe namísto polohy z proud v čočce I_F , jsou v některých případech výhodné. Například při hledání správného fokusačního proudu stačí nalézt místo nejmenšího průměru svazku na podélném profilu s proudovou osou a odečíst příslušné buzení čočky. Potřebujeme-li ale určit divergenci svazku nebo zjistit hloubku ostrosti, je nutné profil transformovat. Při výpočtu využijeme principů geometrické optiky, kdy mezi polohou předmětu a , ohniskovou délkou čočky f a polohou obrazu b platí známý vztah:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}. \quad (6.9)$$

Uvedené vzdálenosti jsou vztaženy k hlavní rovině čočky. Optická soustava použité trysky obsahuje magnetickou čočku (viz obr. 4.4, str. 23), kterou můžeme považovat za tenkou, jak bude dokázáno později. Její optická mohutnost závisí na budícím proudu podle vztahu [64]:

$$f = \underbrace{\left(\frac{2m_e v}{q_e \mu_0 N} \right)^2}_{k_F} l_F I_F^{-2}, \quad (6.10)$$

kde I_F je budicí proud, v je rychlost částic, N je počet závitů budicí cívky a l_F je délka pole čočky. Pro určitou energii částic je možno všechny konstanty ve vztahu nahradit jedinou hodnotou k_F .



Obrázek 6.9: Transformace polohy a měřítka profilů naměřených přeostrněním svazku pro dvě ohniskové vzdálenosti čočky (odlišeno barevně a číselnými indexy). Počátek souřadného systému $z = 0$ je totožný s polohou hlavní roviny čočky.

Vztah mezi ohniskovou vzdáleností čočky a polohou řezu ve svazku je naznačen na obr. 6.9, na kterém je zachycena situace pro dvě různé hodnoty ohniskové vzdálenosti čočky f_i . Na detektor v poloze z_d se promítne řez svazku o velikosti r_{d_i} . Virtuální zdroj odpovídající tomuto řezu bude v předmětovém prostoru ležet v poloze z_{p_i} :

$$\frac{1}{z_{p_i}} = \frac{1}{f_i} - \frac{1}{z_d}, \quad (6.11)$$

a jeho velikost bude:

$$r_{p_i} = r_{d_i} \frac{z_{p_i}}{z_d}. \quad (6.12)$$

Zvolíme-li ohniskovou vzdálenost čočky f_0 , pro kterou provedeme transformaci, dostaneme obraz virtuálního zdroje v poloze z_{o_i} o rozměru r_{o_i} v předmětovém prostoru:

$$\frac{1}{z_{o_i}} = \frac{1}{f_0} - \frac{1}{z_{p_i}} = \frac{1}{f_0} - \frac{1}{f_i} + \frac{1}{z_d}, \quad (6.13)$$

$$r_{o_i} = r_{p_i} \frac{z_{o_i}}{z_{p_i}} = r_{d_i} \frac{z_{o_i}}{z_d} = r_{d_i} M_i. \quad (6.14)$$

$$(6.15)$$

Člen $M_i = z_{o_i}/z_d$ představuje lineární zvětšení, které se aplikuje na daný řez. Kromě toho je nutné u stejného řezu upravit velikost plošné hustoty výkonu (proudu) faktorem $1/M_i^2$ a lineární hustotu faktorem $1/M_i$.

Na obrázku 6.10a je příklad podélného profilu ve stavu, jakém byl naměřen s použitím přeostrnění čočky. Na spodní vodorovné ose jsou uvedeny použité fokusační proudy a na horní (nelineární) ose je vypočtená poloha z . Na obrázku 6.10b je tentýž profil vykreslen po popsané transformaci.

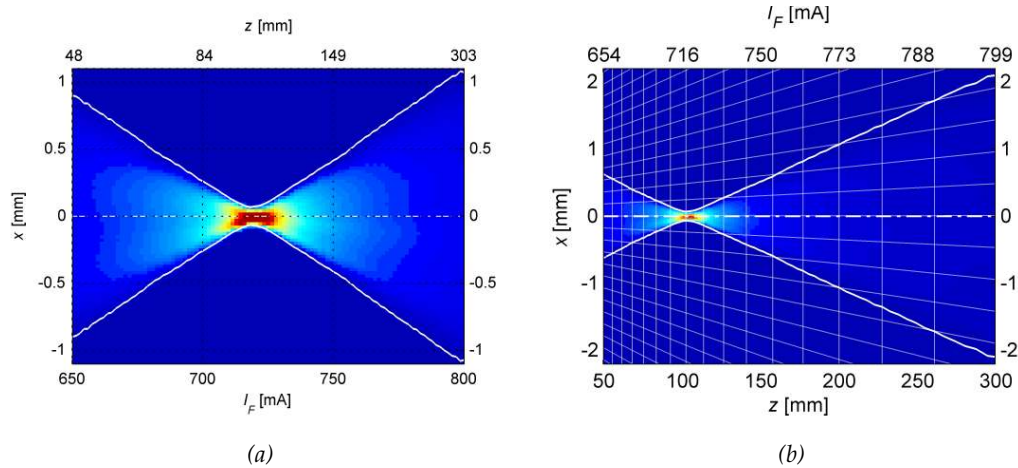
Uvedeným postupem můžeme přepočítat podélné profily získané přeostrněním čočky i série příčných profilů naměřených pro různé vybuzení čočky. Přepočtovou ohniskovou vzdálenost f_0 je možné volit libovolně, ale s ohledem na přesnost by neměla být příliš rozdílná od střední ohniskové vzdálenosti během měření. Praktické je zvolit f_0 tak, aby se místo nejmenšího průměru svazku před i po transformaci shodovalo, což bylo učiněno v příkladu na obr. 6.10. Ověření uvedených vztahů je provedeno v experimentu popsáném v podkapitole 7.9.

6.5 Měření proudové a výkonové hustoty

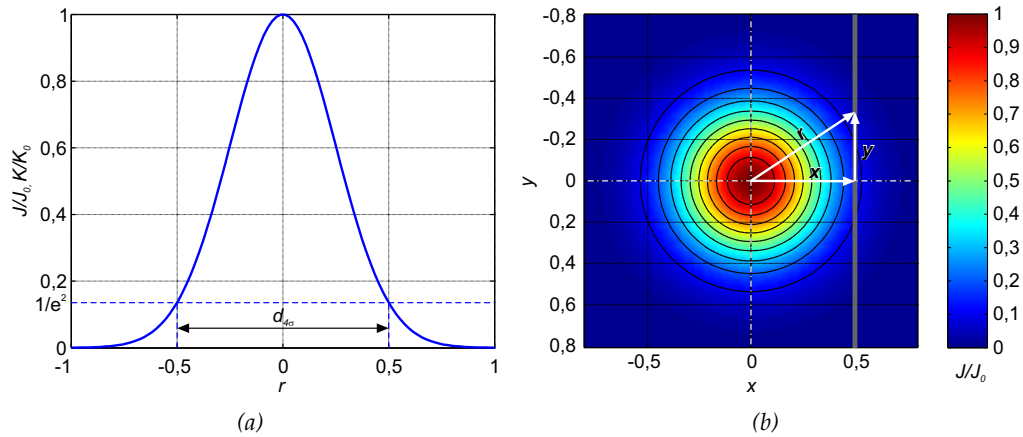
6.5.1 Otvorová clona

Pro měření plošné proudové hustoty je vhodná sonda s clonou ve formě kruhového či čtvercového otvoru. Střední proudová hustota ve vymezené části svazku je dána vztahem:

$$J = I_D / \eta_D S_A, \quad [\text{A mm}^{-2}; \text{A}, -, \text{mm}^2] \quad (6.16)$$



Obrázek 6.10: Podélný profil získaný přestřelením čočky a jeho transformace pro $z_D = 105$ mm a $f_0 = 720$ mA: (a) – naměřený profil s lineární osou I_F , (b) – přepočtený profil s lineární osou z . Mřížka naznačuje provedenou transformaci.



Obrázek 6.11: Normalizovaný průběh proudové hustoty svazku s normálním rozložením: (a) – osový průběh plošné a lineární proudové hustoty, (b) – barevná mapa normálního rozložení plošné proudové hustoty s vyznačením směru integrace K (silná bílá čára).

kde I_D je proud sondy, η_D je účinnost detekce (bude zmíněna níže) a S_A je plocha clony.

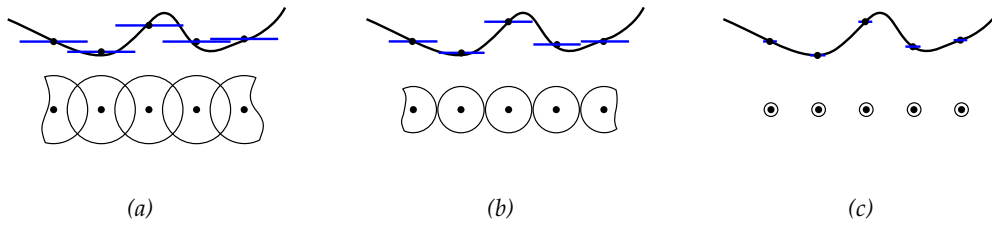
Rozměry clony se volí s ohledem na očekávané rozměry měřeného svazku a požadované rozlišení měření. Clony je možno vyrobit vrtáním (větší průměry), leptáním (menší průměry), případně sestavením z břitů (čtvercové otvory). Jako materiál je vhodná například měď (pro svou velkou tepelnou vodivost), molybden, wolfram nebo tantal (pro vysokou teplotu tavení) – více viz odstavec 6.7 – *Tepelné zatížení clony*.

6.5.2 Štěrbínová clona

Při použití štěrbinové clony měření poskytuje informaci o rozložení proudu pouze ve směru kolmém k hraně štěrbin. Signál je úměrný lineární hustotě podle vztahu:

$$K = I_D / \eta_D d_A, \quad [\text{A m}^{-1}; \text{A}, -, \text{m}] \quad (6.17)$$

kde d_A je šířka štěrbin. Clona se realizuje nejčastěji pomocí dvou desek či břitů, mezi kterými se ponechá mezera, nastavená například vložením fólie s příslušnou tloušťkou. Pro volbu materiálu platí stejná kritéria jako v případě otvorové clony.



Obrázek 6.12: Vzorkování proudové hustoty různě velkými clonami: (a) – velká clona způsobuje „rozmazání“ profilu, (b) – optimální clona, (c) – malá clona produkuje slabý signál.

Za předpokladu rotačně souměrného svazku se známým rozložením lze z rozložení lineární proudové hustoty vypočítat rozložení plošné hustoty. Příkladem může být častý případ svazku s normálním (gaussovským) rozložením proudové hustoty [21, str. 84]:

$$J(r) = J_0 e^{-(r/r_{1/e})^2} = J_0 e^{-8(r/d_{4\sigma})^2}, \quad (6.18)$$

kde J_0 je proudová hustota ve středu svazku (maximální), $2r_{1/e}$ je průměr svazku podle kritéria $d_{1/e}$, $d_{4\sigma}$ je průměr svazku podle vztahu (2.5) a r je vzdálenost od osy svazku (viz obr. 6.11). Celkový proud gaussovského svazku je:

$$I = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} J(r) r \, d\varphi \, dr = \frac{\pi}{8} d_{4\sigma}^2 J_0. \quad (6.19)$$

Lineární proudová hustota je obecně dána vztahem (6.2). Pro gaussovský svazek za použití substituce $r^2 = x^2 + y^2$ (viz obr. 6.11b) dostaneme:

$$K(x) = J_0 \int_{-\infty}^{\infty} e^{-8(y^2+x^2)/d_{4\sigma}^2} \, dy = J_0 \underbrace{\sqrt{\frac{\pi}{8}} d_{4\sigma}}_{K_0} e^{-8(x/d_{4\sigma})^2}. \quad (6.20)$$

Průběh je tedy formálně shodný s průběhem (6.18) s maximem rovným K_0 .

6.5.3 Systematické chyby měření

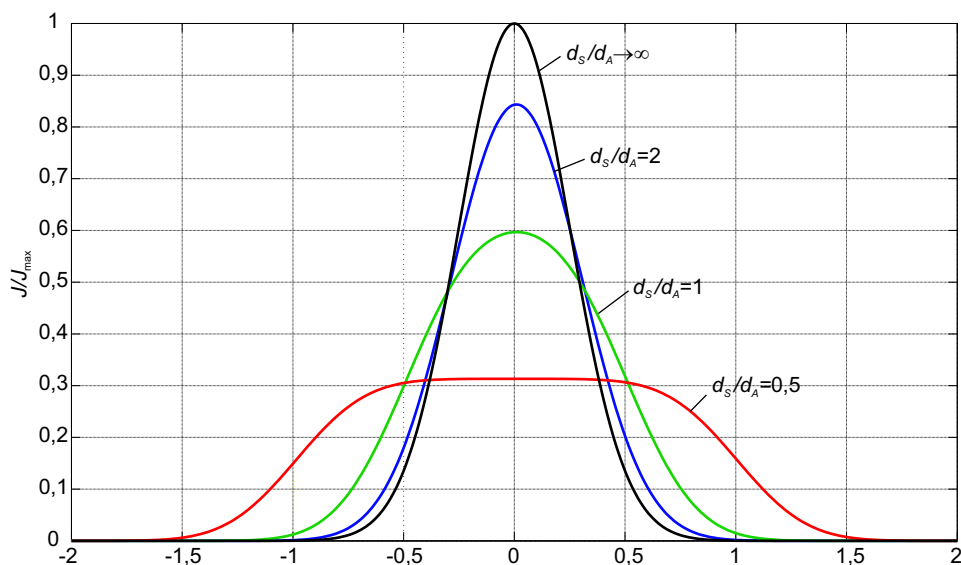
Chyba určení průměru svazku

Vzhledem ke skutečnosti, že měřicí clona detektoru nemůže mít libovolně malé rozměry, je rozlišení naměřených profilů též limitované. Při zvyšování hustoty snímaných bodů dojde od určité hranice k překrývání měřených oblastí a k „rozmazání“ profilu (viz obr. 6.12). Při vyhodnocování rozměrů svazku z takto zkreslených profilů bude výsledek zatížen chybou. Při jejím odhadu vyjdeme z normalizovaného modelu rozložení proudové hustoty svazku s gaussovským profilem podle vztahu (6.18). Clonu s otvorem o průměru (šířce) d_A popisuje model:

$$A(x) = \begin{cases} 1 & \text{když } |x| \leq d_A/2, \\ 0 & \text{jinde} \end{cases} \quad (6.21)$$

Odezva snímače $S(x)$ je dána konvolucí:

$$S(x) = J * A = \int_{-\infty}^{\infty} J(u) A(x-u) \, du \quad (6.22)$$



Obrázek 6.13: Modelovaná odezva snímače proudové hustoty pro různé poměry průměru svazku d_S a velikosti měřicí clony d_A pro profil s normálním rozložením.

Tabulka 6.1: Chyba vyhodnocení průměru svazku pro různé poměry velikosti průměru svazku a otvoru v měřicí cloně. d'_S/d_A je systémem vyhodnocený průměr svazku (zatížený chybou) vztažený k průměru clony.

d_S/d_A	d'_S/d_A	Chyba %	d_S/d_A	d'_S/d_A	Chyba %
–	–	–	–	–	–
0,1	1,16	1059,0	3,5	3,69	5,30
0,3	1,19	297,3	5,0	5,13	2,63
0,5	1,26	151,7	7,0	7,09	1,35
0,7	1,34	92,1	10,0	10,07	0,66
1,0	1,53	52,7	15,0	15,04	0,30
1,5	1,89	26,2	20,0	20,03	0,17
2,0	2,31	15,4	50,0	50,01	0,03

Dosazením vztahu (6.18) a úpravou získáme odezvu pro gaussovský svazek:

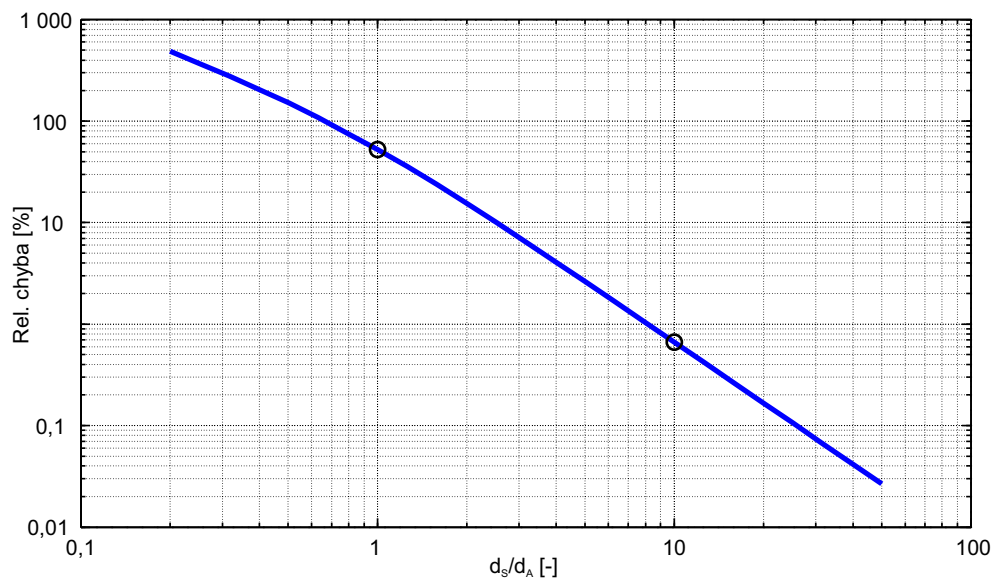
$$S(x) = \frac{\sqrt{2\pi}}{8} d_S \left[\operatorname{erf} \frac{\sqrt{2}(2x + d_A)}{d_S} - \operatorname{erf} \frac{\sqrt{2}(2x - d_A)}{d_S} \right], \quad (6.23)$$

kde $d_S = d_{4\sigma}$ je průměr svazku. Tvar normalizované odezvy je vyneseno v grafu 6.13 pro různé poměry šířky svazku a clony.

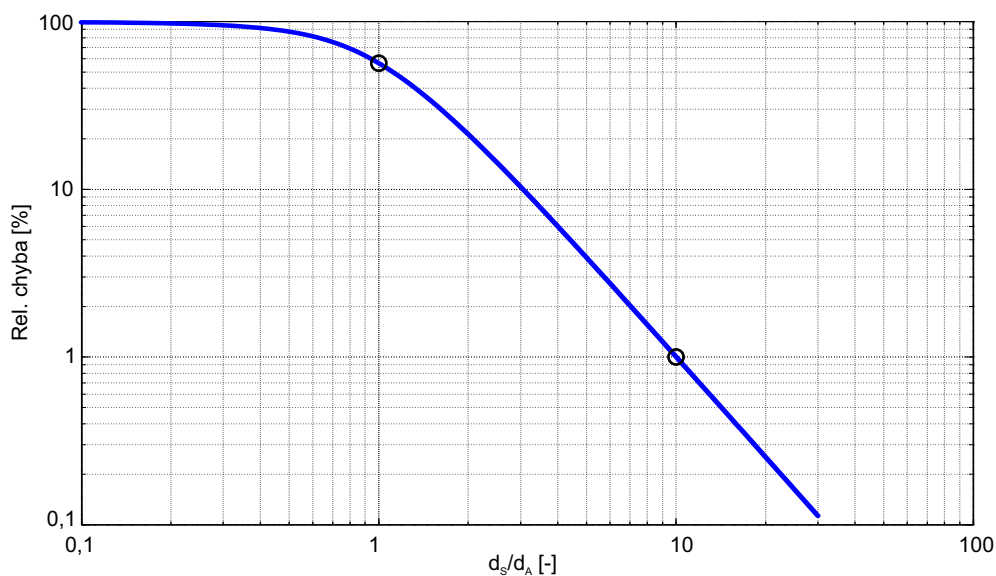
Výpočtem vztahu (2.7) pro odezvu $S(x)$ dostaneme průměr svazku zatížený chybou měření. Chybu měření získáme porovnáním tohoto výsledku se skutečným průměrem d_S . Komplikované analytické řešení jsem nahradil numerickým odhadem, jehož výsledky jsou uvedeny v tabulce 6.1 a grafu 6.14 pro různé poměry průměru svazku a otvoru v měřicí cloně. Bude-li například průměr svazku a clony shodný ($d_S/d_A = 1$), bude vyhodnocený průměr svazku o 53 % větší. Pro desetkrát menší clonu ($d_S/d_A = 10$) již bude chyba menší než 0,7 %.

Chyba určení proudové hustoty

Obdobně lze odhadnout chybu s jakou bude vyhodnocena plošná proudová hustota svazku při příliš velké cloně. Vyjdeme opět z modelu gaussovského svazku (6.18). Celkový



Obrázek 6.14: Relativní chyba určení průměru svazku pro různé poměry průměru svazku a velikosti měřící clony.



Obrázek 6.15: Relativní chyba určení proudové hustoty svazku pro různé poměry velikosti průměru svazku a otvoru měřící clony.

proud prošlý kruhovou clonou o průměru d_A umístěnou soustředně s osou svazku o maximální proudové hustotě J_0 a průměru $d_S = d_{4\sigma}$ bude:

$$\begin{aligned}
 I_A &= 2\pi J_0 \int_0^{d_A/2} J(r) r dr = 2\pi J_0 \int_0^{d_A/2} e^{-8(r/d_S)^2} r dr \\
 &= \frac{1}{8} \pi d_S^2 J_0 \left[1 - e^{-2(d_A/d_S)^2} \right].
 \end{aligned} \tag{6.24}$$

Maximální proudová hustota ve středu svazku určená pomocí tohoto proudu bude:

$$J_A = \frac{I_A}{S_A} = \frac{1}{2} \frac{d_S^2}{d_A^2} J_0 \left[1 - e^{-2(d_A/d_S)^2} \right]. \tag{6.25}$$

Tabulka 6.2: Relativní chyba určení proudové hustoty svazku pro různé poměry velikosti průměru svazku a otvoru měřicí clony.

d_S/d_A	Chyba %	d_S/d_A	Chyba %	d_S/d_A	Chyba %
–	–	–	–	–	–
0,1	99,5	1,5	33,8	10	0,99
0,3	95,5	2	21,3	20	0,25
0,5	87,5	3,5	7,74	30	0,11
0,7	75,9	5	3,9	50	0,04
1	56,8	7	2,01	100	0,01

Pro relativní chybu měření po dosazení získáme vztah:

$$1 - \frac{I_A}{J_0} = 1 - \frac{1}{2} \frac{d_S^2}{d_A^2} \left[1 - e^{-2(d_A/d_S)^2} \right]. \quad (6.26)$$

Tato závislost je pro různé poměry velikosti měřicí clony a průměru svazku spočtena v tabulce 6.2 a vynesena v grafu 6.15. Z něj například odečteme velikost chyby 57 %, je-li průměr clony roven průměru svazku. Měření s přesností okolo jednoho procenta získáme s clonou desetkrát menší než je průměr svazku.

6.5.4 Sběrová účinnost sondy

Dopadne-li na elektrodu elektronový svazek, dochází k vzájemným interakcím mezi primárními elektrony a atomy elektrody [85]. Nepružné srážky snižují energii dopadajících elektronů a pružné srážky mění jejich směr. Část elektronů je zpomalena natolik, že zůstává v materiálu, respektive je posléze odvedena ve formě elektrického proudu. Část elektronů je odražena zpět do volného prostoru (tzv. BSE – Back Scattered Electrons). Při vzájemných interakcích se uvolňují elektrony původně setrvávající v materiálu elektrody – tzv. sekundární elektrony (SE). Energie BSE elektronů dosahuje téměř energie primárního svazku, zatímco SE elektrony mají energii výrazně nižší. Dle konvence se elektrony s energií nižší než 50 eV považují za SE.

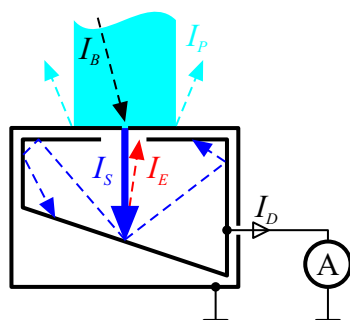
Nejjednodušší detektor elektronů je prostá kovová elektroda – kolektor (obr. 6.17a). Takový detektor má však signál značně snižený o BSE a SE elektrony, protože jim nic nebrání v opuštění detektoru. Proto se nejčastěji používá *Faradayova sonda* [80], jejíž uspořádání je na obr. 6.16. Je tvořena dutým kolektorem, do kterého vstupuje svazek, resp. jeho část vymezená clonou, představující proud I_S . Podstatné části BSE a SE elektronů se nepodaří z dutiny uniknout a stává se tak součástí měřeného signálu I_D . Malá část opustí sondu vstupním otvorem zpět do volného prostoru (I_E). BSE a SE elektrony vznikají rovněž z vycloněné části svazku na vnějšku sondy. Vlivem vícenásobného odrazu od stěn komory přispívají tyto elektrony částečně k výstupnímu signálu sondy (proud I_B). Celkový proud sondy je dán vztahem:

$$I_D = I_S - I_E + I_B \quad (6.27)$$

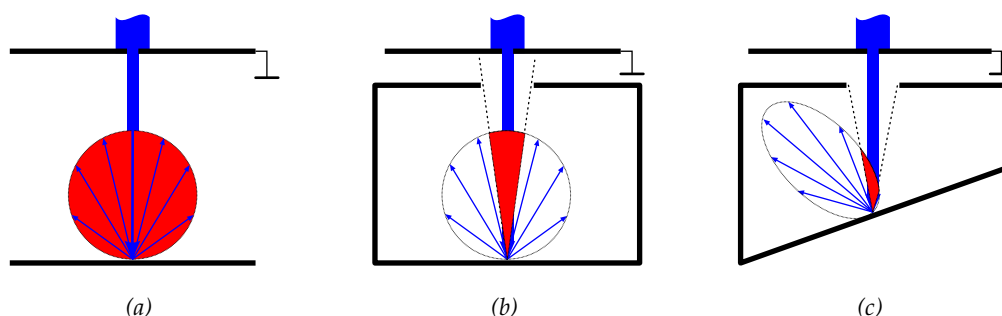
Sběrová účinnost sondy η_D je dána poměrem I_D/I_S . Je možno ji ovlivnit:

- tvarem kolektoru,
- velikostí vstupního otvoru vnitřního kolektoru,
- profilem otvorů, kterými prochází svazek do kolektoru a
- přídatným elektrickým polem.

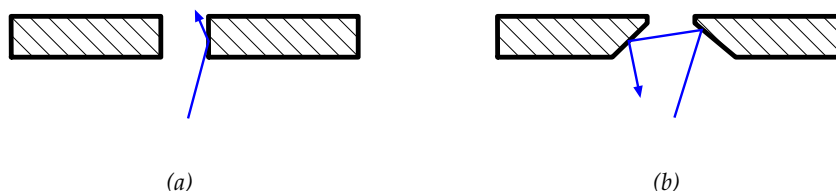
Na obrázku 6.17 je srovnání vlivu tvaru sběrací elektrody na účinnost detektoru pro kolmý dopad svazku. Má-li sběrací elektroda dno kolmé k ose (obr. 6.17b), bude největší část BSE elektronů směřovat do vstupního otvoru a účinnost bude snížena. Nakloněním dna dojde k odklonění maxima BSE elektronů mimo otvor a zlepšení účinnosti (obr. 6.17c).



Obrázek 6.16: Principiální schéma Faradayovy sondy s vyznačenými pozitivními i negativními příspěvky k výstupnímu signálu.



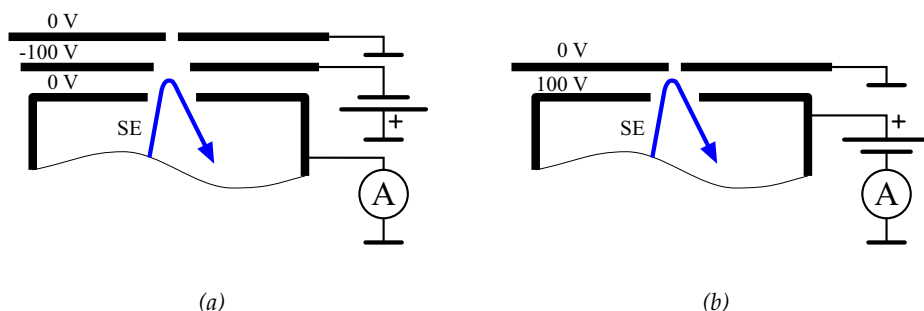
Obrázek 6.17: Vliv tvaru kolektoru na sběrovou účinnost detektoru: (a) jednoduchý kolektor, Faradayova sonda s (b) rovným a (c) šikmým dnem. Ztracená část signálu vyznačena červeně.



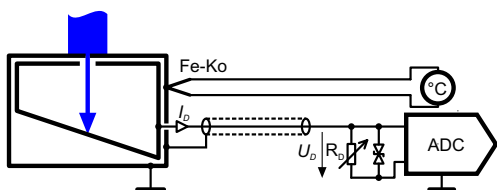
Obrázek 6.18: Vliv profilu otvoru na zachycení BSE či SE elektronů: (a) válcový otvor, (b) kónický otvor.

Pro zvýšení pravděpodobnosti zachycení BSE a SE elektronů dále platí následující pravidla: Velikost vstupního otvoru sběrací elektrody má být co nejmenší. Tvar tohoto otvoru má kopírovat krycí clonu a být jen o málo větší. Poměr hloubky a šířky duté části kolektoru by měl být co nejvyšší. Oba otvory, kterými prochází elektronový svazek do vnitřní části sondy (ve vymežující cloně a kolektoru) mají být kónické, rozšiřující se ve směru pohybu primárních elektronů (viz obr. 6.18).

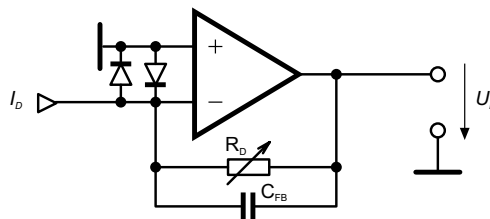
Účinnost detekce lze rovněž zvýšit přidáním elektrického pole mezi sběrací elektrodou a uzemněným pláštěm (obr. 6.19). Kladný potenciál kolektoru bude unikající elektrony přitahovat zpět. Prakticky použitelné napětí (< 100 V) může však mít vliv pouze na sekundární elektrony. Konstrukce Faradayovy sondy použité v této práci je uvedena v § 4.5.



Obrázek 6.19: Zvýšení detekční účinnosti elektrickým polem pomocí (a) přidavné elektrody, (b) předpětí kolektoru.



Obrázek 6.20: Schéma signálního řetězce detektoru s pasivním převodníkem proud/napětí, přepětovou ochranou a měřením teploty sondy.



Obrázek 6.21: Aktivní převodník proud/napětí s operačním zesilovačem s přepětovou ochranou.

6.6 Elektronické zpracování

6.6.1 Převod proudového signálu na napěťový

Proudový signál Faradayovy sondy I_D je před digitalizací nutno převést na napěťový signál U_D . Nejjednodušší způsob je použití pasivního převodníku proud/napětí (I/U převodníku – viz obr 6.20). Na rezistoru s odporem R_D vytvoří protékající proud napětí podle Ohmova zákona:

$$U_D = I_D R_D. \quad (6.28)$$

Při volbě velikosti odporu R_D je nutno zohlednit předpokládaný rozsah měřených proudů a vstupní rozsah A/D převodníku. R_D by měl být daleko menší než je vstupní impedance převodníku Z_{AD} nebo je nutné počítat ve vztahu (6.28) s paralelní kombinací R_D a Z_{AD} . Vstupní kapacita převodníku C_{AD} spolu s R_D vytváří dolní propust. Její mezní kmitočet omezuje šířku pásma, která musí být vyšší, než je maximální kmitočet očekávaný v měřeném signálu (v praxi je to polovina vzorkovacího kmitočtu). Velikost odporu R_D se v praxi pohybuje ve stovkách až tisících ohmů. Nevýhody uvedeného jednoduchého řešení jsou především invertovaný napěťový signál (záporný proud I_D vytváří rovněž záporný úbytek napětí U_D), omezení maximální dosažitelné citlivosti a šířky pásma, a potenciál U_D na sběrací elektrodě.

Všechny tyto nevýhody odstraňuje (nebo přinejmenším zmenšuje) aktivní převodník s operačním zesilovačem. Jeho zjednodušené schéma je na obrázku 6.21. Obvod převádí vstupní proud I_D na napětí podle vztahu:

$$U_D = -I_D R_D, \quad (6.29)$$

který je až na znaménko stejný jako v případě pasivního převodníku. Napětí na vstupu je operačním zesilovačem aktivně udržováno na nulovém potenciálu. Tím je (mimo jiné) potlačen vliv parazitních kapacit a šířka pásma je dána jen vlastnostmi operačního zesilovače a zpětnovazebními členy.

Vzhledem k tomu, že elektronově-optická zařízení pracují vždy s relativně vysokými rozdíly potenciálů, hrozí nebezpečí vzniku přepětí na citlivých vstupech A/D převodníku nebo I/U převodníku. Pro ochranu je možné použít například transil (u pasivního převodníku – viz obr. 6.20) nebo antiparalelně zapojené diody (u aktivního převodníku).

6.6.2 Analogově/digitální převod

Signál sondy je nutné digitalizovat, a to synchronně s vychylováním svazku. Synchronizace se zjednoduší, je-li k řízení vychylování a digitalizaci použita jedna kombinovaná převodníková karta (DAQ). Při snímání intenzivních svazků je nutné zkrátit expozici na nejmenší možnou míru, aby nedošlo k poškození sondy – viz § 6.7 – *Tepelné zatížení clony*. Při nedostatečné rychlosti digitální části je pak měření možno realizovat jen za cenu snížení laterálního rozlišení. Střední rychlost pohybu svazku bude:

$$v = \frac{l}{t_s} = \frac{l}{N_p} f_s, \quad (6.30)$$

kde l je šířka snímané oblasti, t_s je celková doba snímání, N_p je počet snímaných bodů a f_s je vzorkovací kmitočet. Máme-li například získat 256 bodů v 5 mm širokém poli při minimální rychlosti svazku 10^3 m s^{-1} , musí být vzorkovací frekvence nejméně 5,1 MHz.

6.7 Tepelné zatížení clony

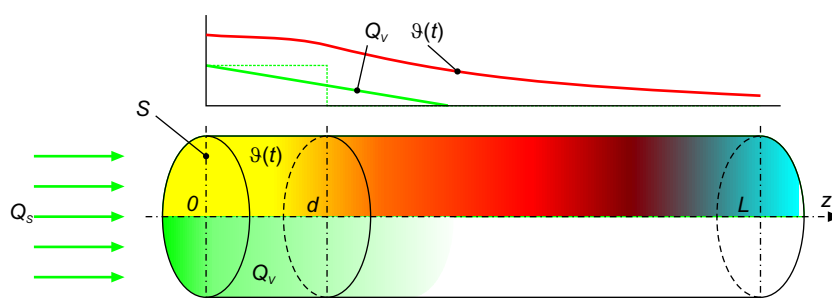
6.7.1 Model šíření tepla

Při volbě materiálu vstupní clony detektoru se snažíme zabránit poškození clony překročením teploty tavení daného materiálu. Rychlost ohřevu při dané hustotě výkonu svazku závisí na vlastnostech materiálu, konkrétně jeho tepelné kapacitě, tepelné vodivosti a hustotě. Protože se uplatňuje vedení tepla, je třeba znát dynamiku jeho šíření materiálem. V této práci byl použit jednoduchý jednorozměrný model naznačený na obrázku 6.22. Tyč konečné délky L je na jednom konci zahřívána elektronovým svazkem o plošné hustotě výkonu Q_s . Teplo se šíří podél osy z směrem k neochlazovanému konci tyče. Model odpovídá situaci ve středu plochy zahříváné dopadajícím svazkem s rovnoměrným rozložením hustoty výkonu. V tomto případě můžeme vedení tepla kolmo k ose z zanedbat, protože zde nebude přítomen výrazný teplotní spád.

S ohledem na skutečnost, že hledáme řešení pro teploty pod bodem tavení, není třeba uvažovat skupenské přeměny. Materiálové konstanty běžných kovů jsou uvedeny v tabulce 6.3. Jejich teplotní závislost byla zanedbána. Teplotní vodivost (difuzivita) α byla určena podle vztahu:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_M}, \quad (6.31)$$

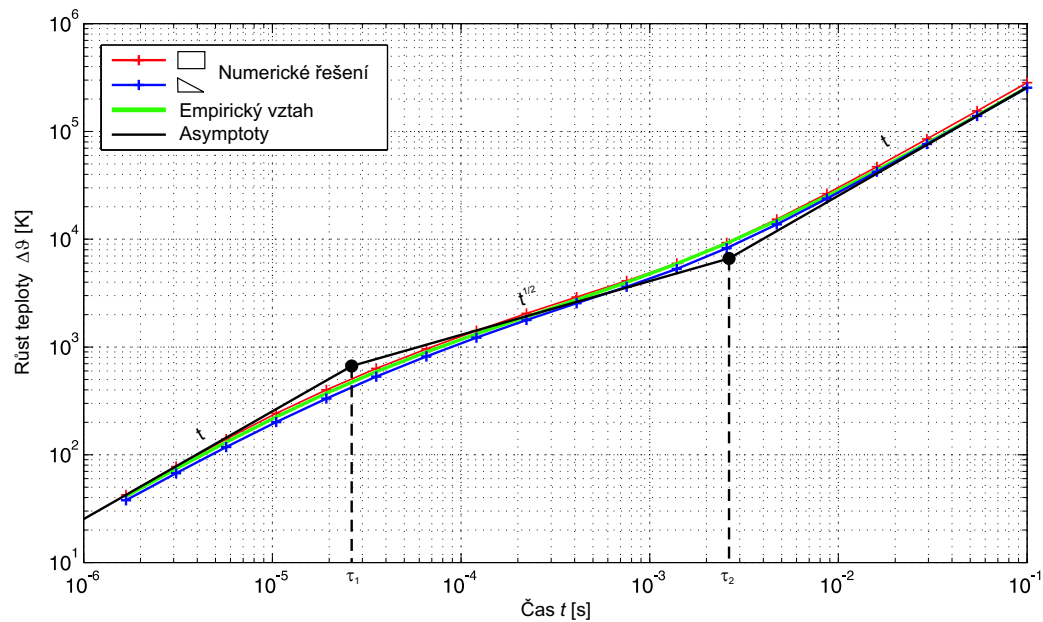
kde λ je měrná tepelná vodivost, ρ je měrná hmotnost a c_M je měrná tepelná kapacita.



Obrázek 6.22: Model šíření tepla.

Tabulka 6.3: Materigálové konstanty vybraných kovů.

Materiál	Hustota ρ 10^3 kg m^{-3}	Měrná tepelná kap. c_M $\text{W kg}^{-1} \text{ K}$	Tepelná vodivost λ $\text{J m}^{-1} \text{ K}$	Teplotní vodivost α $10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	Teplota tavení ϑ_T $^\circ\text{C}$
Wolfram	19,25	132	173	68,1	3422
Molybden	10,28	251	138	53,5	2623
Tantal	16,69	140	58	24,6	3017
Niob	8,57	264	54	23,7	2477
Měď	8,96	384	401	116,5	1085
Hliník	2,70	896	237	98,0	660
Nerez 17 240 (dle ČSN)	7,90	500	15	3,8	1450



Obrázek 6.23: Průběh nárůstu teploty vypočtený numericky a podle odhadu pro nerez ČSN 17 240, hloubka vniku $d_V = 10 \mu\text{m}$, tloušťka $L = 0,1 \text{ mm}$, hustota výkonu svazku $Q_S = 10^3 \text{ W mm}^{-2}$.

6.7.2 Model elektronového svazku

Pro výpočet je nutné odhadnout hloubku vniku elektronového svazku do materiálu v pevné fázi (viz § 2.1.4) a rozložení objemové hustoty výkonu ve směru osy z . Při výpočtech byly použity dva modely rozložení objemové hustoty výkonu svazku. Nejjednodušší případ předpokládá rovnoměrné rozložení až do hloubky vniku (v obrázku 6.22 Q_V čárkovaně):

$$Q_V(z) = \begin{cases} Q_S/d_V & \text{pro } z \leq d_V, \\ 0 & \text{jinde} \end{cases} \quad (6.32)$$

Druhý model předpokládá postupný pokles výkonu směrem do hloubky (v obrázku 6.22 plnou čarou):

$$Q_V(z) = \begin{cases} Q_S(2d_V - z)/(2d_V) & \text{pro } z \leq 2d_V, \\ 0 & \text{jinde} \end{cases} \quad (6.33)$$

6.7.3 Rovnice šíření tepla

Dynamiku šíření tepla popisuje Fourierův zákon vyjádřený parabolickou parciální diferenciální rovnicí [15]. Pro případ uvedený na obrázku 6.22 má tvar:

$$\frac{\partial \vartheta(z, t)}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 \vartheta(z, t)}{\partial z^2} + \lambda Q_V(z) \right). \quad (6.34)$$

Počáteční a okrajové podmínky volíme:

$$\vartheta(z, t = 0) = 0, \quad (6.35)$$

$$\partial \vartheta(z = 0) / \partial t = \partial \vartheta(z = L) / \partial t = 0. \quad (6.36)$$

Ochlazování radiací bylo zanedbáno. Řešení rovnice (6.34) jsem hledal numericky pro oba modely 6.32 a 6.33. Z výsledných průběhů teplot, které se pro oba případy příliš nelišily, jsem odhadnul tvar výrazu pro časový průběh oteplení začátku tyče:

$$\vartheta(z = 0, t) = \frac{\overbrace{Q_S}^{k_H}}{\rho c_M d_V} \sqrt{\frac{1 + \alpha t d_V^{-2}}{1 + \alpha t L^{-2}}} t. \quad (6.37)$$

Zvyšování teploty je zpočátku lineární se strmostí k_H až do okamžiku $\tau_1 = d_V^2 / \alpha$, kdy se začne uplatňovat vedení tepla. To zpomalí další růst teploty, která nadále roste úměrně $t^{1/2}$. V čase $\tau_2 = L^2 / \alpha$, kdy teplo dorazí na konec tyče, začne teplota opět růst lineárně v čase. Rovnice asymptot jsou:

$$\vartheta(z = 0, t) \approx \begin{cases} k_H t & \text{pro } t \leq \tau_1 \\ k_H \sqrt{\tau_1} \sqrt{t} & \text{pro } \tau_1 \leq t \leq \tau_2 \\ k_H \sqrt{\tau_1 / \tau_2} t & \text{pro } \tau_2 \leq t \end{cases} \quad (6.38)$$

a teploty v bodech zlomu:

$$\vartheta(z = 0, t = \tau_1) \approx k_H \tau_1 = k_H \frac{d_V^2}{\alpha} \quad (6.39)$$

$$\vartheta(z = 0, t = \tau_2) \approx k_H \sqrt{\tau_1 \tau_2} = k_H \frac{d_V L}{\alpha} \quad (6.40)$$

6.7.4 Rychlost růstu teploty

V tabulce 6.4 jsou vypočtené hodnoty časové konstanty τ_1 pro svazek o energii 50 keV pro vybrané materiály. Je zde rovněž uvedena doba potřebná k dosažení teploty tavení t_T (při počáteční teplotě 25 °C). Výpočet byl proveden s použitím uvedených vztahů pro různou plošnou hustotu výkonu. Ze srovnání je vidět, že zatímco pro relativně nízkou hustotu výkonu 10^3 W mm^{-2} snese nejvyšší dávku wolfram (více jak třicetinasobnou ve srovnání s nerezí), při hustotě 10^5 W mm^{-2} a vyšší jsou již rozdíly mezi materiály minimální.

6.7.5 Tepelná dávka a rychlost pohybu svazku

Při měření profilu intenzivního svazku potřebujeme vědět, jaká minimální rychlost vychylování svazku zamezí poškození clony. Je totiž zřejmé, že čím rychleji svazek přes clonu přeběhne, tím méně tepla jí předá. Minimální rychlost, kterou musí svazek dosáhnout, bude záviset na schopnosti daného materiálu absorbovat a rozvádět dodávané

teplo. Zavedme měrnou tepelnou dávku W_S jako množství tepla, které zvýší teplotu jednotkové plochy povrchu materiálu z počáteční teploty na teplotu tavení:

$$W_S = t_T Q_S, \quad (6.41)$$

kde t_T je čas potřebný k dosažení teploty tavení podle minulého odstavce a Q_S je plošná výkonová hustota dopadajícího svazku. Konkrétní hodnoty jsou spočteny v tabulce 6.5. Ze srovnání je vidět, že s výkonovou hustotou klesá množství tepla, které je schopen materiál absorbovat bez přehřátí, protože se nestačí uplatnit vedení tepla. Teplo dodané pohybujícím se svazkem, vztažené na jednotku plochy, je dáno vztahem:

$$W_B = \int_{-\infty}^{\infty} Q_S(vt) dt, \quad (6.42)$$

kde v je rychlost pohybu místa dopadu svazku po povrchu materiálu a $Q_S(x)$ je funkce rozložení výkonové hustoty podél osy pohybu. Uvažujme *top-hat* svazek s rozložením výkonu:

$$Q_S(r) = \begin{cases} Q_{S0} & \text{pro } r \leq d_S/2, \\ 0 & \text{jinde.} \end{cases} \quad (6.43)$$

kde d_S je průměr svazku. Po dosazení do (6.42) dostaneme:

$$W_B = Q_{S0} \frac{d_S}{v}, \quad (6.44)$$

Tabulka 6.4: Doba potřebná k dosažení teploty tavení t_T a konstanta τ_1 pro vybrané materiály. Vypočteno pro 50 keV, tloušťku 1 mm a počáteční teplotu 25 °C. Červené hodnoty udávají relativní dobu dosažení teploty tavení vztaženou k času pro nerez.

Materiál	τ_1 μs	Plošná hustota výkonu Q_S							
		Doba dosažení teploty tavení t_T							
		μs	–	μs	–	μs	–	μs	–
Wolfram	0,11	3989	30,47	50,7	11,54	0,60	1,58	0,026	0,70
Molybden	0,49	2155	16,46	24,5	5,58	0,48	1,27	0,035	0,95
Tantal	0,40	1170	8,93	12,4	2,83	0,29	0,76	0,023	0,60
Niob	1,58	720	5,50	8,6	1,97	0,38	1,00	0,034	0,92
Měď	0,29	1340	10,24	15,8	3,59	0,30	0,80	0,022	0,59
Hliník	3,86	230	1,76	4,4	0,99	0,31	0,82	0,030	0,80
Nerez 17 240 (dle ČSN)	11,63	131	1,00	4,4	1,00	0,38	1,00	0,037	1,00

Tabulka 6.5: Měrná tepelná dávka potřebná k dosažení teploty tavení povrchu a rychlost svazku. Černě jsou uvedeny měrná tepla, červeně rychlost pohybu svazku odpovídající této dávce. Vypočteno pro 50 keV, tloušťku 1 mm, počáteční teplotu 25 °C a výkon svazku 1 kW s *top-hat* profilem.

Materiál	Plošná hustota výkonu Q_S							
	Tepelná dávka W_S a minimální rychlost svazku v_T							
	mJ mm ⁻²	ms ⁻¹	mJ mm ⁻²	ms ⁻¹	mJ mm ⁻²	ms ⁻¹	mJ mm ⁻²	ms ⁻¹
Wolfram	3989	0,28	507	7	60	188	26,2	1361
Molybden	2155	0,52	245	15	48,3	234	35,5	1006
Tantal	1170	0,96	124	29	28,8	392	22,6	1579
Niob	719,8	1,6	86,4	41	37,8	298	34,4	1039
Měď	1340	0,84	158	23	30,5	370	22,2	1611
Hliník	230,1	4,9	43,6	82	31,1	363	30	1189
Nerez 17 240	130,9	8,6	43,9	81	38	297	37,5	952

Celkový výkon top-hat svazku je:

$$P = \frac{\pi}{4} d_S^2 Q_{S0}. \quad (6.45)$$

Ze vztahů (6.41), (6.44) a (6.45) dostane výraz pro nutnou minimální rychlost svazku:

$$v_T = \frac{d}{t_T} = \sqrt{\frac{4P}{\pi Q_{S0}}} \frac{1}{t_T}. \quad (6.46)$$

Vypočtené hodnoty minimální rychlosti pro svazek o výkonu 1 kW s různou plošnou hustotou jsou uvedeny červeně v tabulce 6.5. Rychlosti pro hustoty do 10^4 W mm^{-2} včetně jsou relativně nízké a snadno dosažitelné (pod 100 m s^{-1}). Pro vyšší výkonové hustoty jsou již v řádech stovek až tisíců metrů za sekundu. Taková rychlost se již blíží horní hranici možností magnetického vychylovacího systému.

6.7.6 Přesnost výsledků

Vztahy a vypočtené hodnoty uvedené v této podkapitole je nutno brát jako přibližné odhady, protože je zanedbána řada skutečností. Při výpočtech se neuvažovala změna materiálových součinitelů s teplotou, především tepelné vodivosti. V principu by při numerickém řešení nebyl problém tuto závislost postihnout, pokud by byla pro daný materiál známa. Šíření tepla bylo řešeno jako jednorozměrný případ odpovídající nekonečně velké ploše rovnoměrně ohřívané svazkem. To přibližně odpovídá situaci uprostřed svazku. Na okrajích se však bude uplatňovat vedení tepla v laterálním směru. Tato skutečnost je ku prospěchu věci a uvedené výpočty dají méně příznivý výsledek s určitou rezervou. Na druhou stranu se uplatní zhoršený odvod tepla na hraně clony, což rovněž není ve výpočtu zohledněno.

Při výpočtech se počítalo s výchozí teplotou rovnou 25°C . Při opakovaných a/nebo víceprůchodových měřeních však mezi jednotlivými průchody nemusí být dostatek času, aby se vyrovnala její teplota a tepla okolí. Při nové expozici tak začíná ohřev s jinými počátečními podmínkami. Tuto skutečnost je nutné v praxi také zohlednit. Uvedené závěry jsou prakticky využity například v měření popsaném v § 7.8.

6.8 Přehled studovaných metod a experimentů

V této kapitole jsem představil metody měření rozložení výkonové, resp. proudové, hustoty v příčných a podélných řezech elektronového svazku. Pro příčný profil jsem stanovil střed svazku, jeho rozměry a tvar obálky. Popsal jsem také postup odstranění stejnosměrného posunu signálu detektoru a potlačení šumu pozadí. Pro podélný profil jsem přiblížil postup pro určení osy svazku a její narovnání. Uvedl jsem způsob nalezení obálky svazku, její proložení vhodným analytickým průběhem a odečtení důležitých parametrů svazku: rozměru a polohy místa nejmenšího průměru svazku (pasu), divergence svazku a parametru BPP. Pro případ snímání profilů s využitím přestřeny fokusační čočky jsem odvodil vztahy pro transformaci naměřených profilů. Dále jsou uvedeny vztahy pro výpočet plošné a lineární proudové hustoty svazku ze signálu sondy i s odhadem systematické chyby měření vznikající nenulovými rozměry clony, konstrukční detaily detektoru ovlivňující sběrovou účinnost a elektronické zpracování signálu sondy. Poté jsem se věnoval výpočtům tepelného zatížení detektoru, podle kterých je možné najít nejnižší rychlost vychylování svazku, při které ještě nedojde k poškození sondy.

Experimentální ověření poznatků je dokumentováno v části 7.8 až 7.15. Měření proběhlo na zařízení MEBW-60/2-E s využitím softwarového modulu BeamDiag (viz § 4.4.1).

7 Experimentální výsledky

7.1 Úvod

Dříve popsané metody byly základem pro uskutečnění experimentů, které jsou zde rozděleny do tří skupin. V první části jsou uvedeny měření vlastností vychylovacího systému. Následují elektrické charakteristiky elektronové trysky. V poslední části jsou měření vlastností elektronového svazku. U každého měření je v úvodu zmíněna motivace, proč byl daný experiment uskutečněn. Řazení jednotlivých podkapitol sleduje logický postup při postupné charakterizaci zařízení, kdy jsou dílčí výsledky využívány při následujících experimentech. Měření jsem realizoval na experimentálním zařízení MEBW-60/2-E popsaném v kapitole 4. Řízení experimentů bylo zautomatizováno s pomocí skriptů vytvořených v prostředí MatLab, ve kterém bylo provedeno i následné vyhodnocení. Vzorové funkce pro zpracování jsou uvedeny v příloze B. Práce si neklade za cíl vysvětlit děje, které jsou v této kapitole zmíněny. Jejím smyslem je představit metodiku pro jejich objektivní posuzování. Nutno dodat, že pro praktické použití je často určení závislostí postačující. Osa z je orientována směrem od trysky do pracovní komory; počátek leží v rovině axiálního detektoru (viz obr. 4.4 na str. 23). Údaj o pracovní vzdálenosti vyjadřuje vzdálenost měřicí sondy od roviny $z = 0$.

Seznam experimentů

(a)	Vlastnosti vychylovacího systému	
7.2	Určení středu vychylování	82
7.3	Zkreslení vychylovacího systému	84
7.4	Remanentní magnetismus vychylovacího systému	87
7.5	Dlouhodobá stabilita vychylovacího systému	88
(b)	Elektrické charakteristiky trysky	
7.6	Přenosové charakteristiky elektronové trysky	91
7.7	Voltampérové charakteristiky katody	94
(c)	Vlastnosti elektronového svazku	
7.8	Rozložení výkonové hustoty ve svazku	96
7.9	Srovnání profilu měřeného se stacionárním a pohyblivým detektorem	99
7.10	Příčný profil při změně předpětí Wehneltu	101
7.11	Příčný profil při změně teploty katody	102
7.12	Určení optimálního žhavicího proudu katody	106
7.13	Závislost optimálního žhavení katody na jejím stáří	108
7.14	Závislost kvality svazku na poloze vlákna katody	110
7.15	Fokusační křivky	114

7.2 Určení středu vychylování

7.2.1 Úvod

V následujícím experimentu jsem hledal střed vychylovacího systému, tedy místo, ze kterého vycházejí (zdánlivě) trajektorie vychýleného svazku. Tento údaj je možné uplatnit například při automatické korekci zvětšení při změně pracovní vzdálenosti, při výpočtu úhlu dopadu svazku nebo ke kontrole případného omezení zorného pole axiálním detektorem.

7.2.2 Uspořádání experimentu

Zobrazení v REM režimu je perspektivní, tzn. že objekty, které jsou dále od vychylovacího systému se jeví menší ve srovnání s objekty bližšími. Této skutečnosti jsem využil k určení středu vychylování svazku. Při měření jsem snímal objekt vložený do pracovní komory v různých pracovních vzdálenostech. Na obrázku 7.1 nahoře je symbolicky zobrazen předmět (silná čára) v různých polohách podél osy z . Pokud při zobrazení nebudeme měnit zorný úhel, tj. rozkmit proudů ve vychylovacích cívkách bude stálý, bude předmět zabírat různě velkou část zorného pole (viz snímky pod náčrtkem). Poměr šířky zorných polí pro libovolné dvě vzdálenosti bude nepřímo úměrný zdánlivému průměru předmětu na získaných obrázcích:

$$\frac{s_i}{s_j} = \frac{d'_j}{d'_i} \quad (7.1)$$

kde d'_1 a d'_i jsou zdánlivé rozměry předmětu odečtené z REM obrazu a s_i a s_j jsou odpovídající šířky zorného pole ve polohách z_i a z_j . Rozměry d' mohou být v libovolných jednotkách, například v pixelech obrazu. Z podobnosti trojúhelníků dostaneme vztah:

$$\frac{z_i - z_V}{z_j - z_V} = \frac{s_i}{s_j} = \frac{d'_j}{d'_i} \quad (7.2)$$

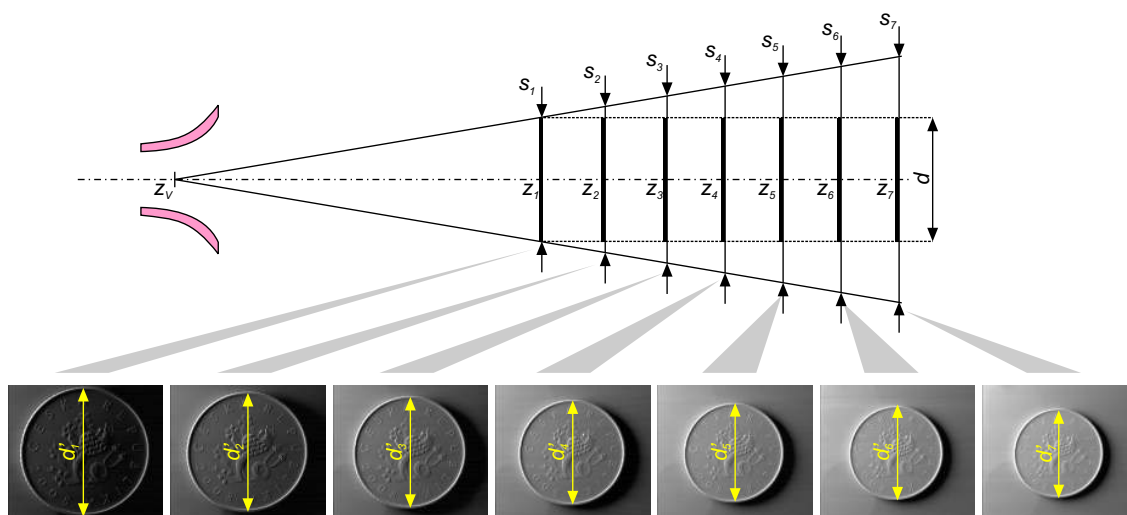
kde z_V je hledaný střed vychylování. Úpravou dostaneme pro z_V výraz:

$$z_V = \frac{d'_j z_j - d'_i z_i}{d'_j - d'_i}. \quad (7.3)$$

7.2.3 Výsledky

Pro vyloučení chyb jsem měření uskutečnil pro sedm pracovních vzdáleností ($z=80$ až 140 mm) a střed vychylování určil z průměru. Měřil jsem pro tři hodnoty urychlovacího napětí, a to 50 , 55 a 58 kV. Jako vhodný objekt posloužila korunová mince, která má průměr 20 mm. Protože v principu nemusí být střed vychylování obou deflektorů totožný, měření bylo provedeno v obou hlavních směrech a výsledky porovnány.

Nasnímané obrázky jsem zpracoval v grafickém editoru a odečtené průměry v pixelech jsou uvedeny v tabulce 7.1. Vypočtené středy vychylování jsou v tabulce 7.2. Ve zvoleném souřadném systému (viz obr. 4.4) je poloha středu vychylování záporná, proto je v tabulce faktor -1 . Střední hodnota (vypsána červeně) byla spočtena z hodnot z_{V5} až z_{V7} , které vykazovaly menší rozptyl. Z výsledků je zřejmé, že pivotní body U a V deflektoru prakticky splývají (rozdíly jsou pod hranicí přesnosti měření).



Obrázek 7.1: Náčrtek k experimentálnímu určení středu vychylovacího systému.

Tabulka 7.1: Naměřené hodnoty zdánlivého průměru mince pro určení středu vychylování.

Urych. nap. U_a kV	Zdánlivý průměr							Deflektor
	d'_1	d'_2	d'_3	d'_4	d'_5	d'_6	d'_7	
50	854	797	748	705	664	627	594	U
	846	791	739	694	653	618	586	V
55	869	803	755	709	669	633	597	U
	859	798	746	698	660	622	591	V
58	891	831	779	731	685	650	614	U
	882	822	765	720	679	640	607	V
Prac. vzdál.	80	90	100	110	120	130	140	mm

Tabulka 7.2: Vypočtené polohy středu vychylování pro U a V deflektor a různé urychlovací napětí.

Urych. nap. U_a kV	Poloha středu vychylování							Deflektor
	z_{V2}	z_{V3}	z_{V4}	z_{V5}	z_{V6}	z_{V7}	$\bar{z}_V$	
50	59,8	61,1	61,9	59,8	58,1	57,1	58,3	U
	63,8	58,1	57,0	55,3	55,5	55,2	55,4	V
55	41,7	52,5	52,9	53,8	54,1	51,7	53,2	U
	50,8	52,0	50,1	52,7	51,2	52,3	52,1	V
58	58,5	59,1	57,1	53,0	54,9	53,0	53,6	U
	57,0	50,8	53,3	53,8	52,2	52,4	52,8	V

7.3 Zkreslení vychylovacího systému

7.3.1 Úvod

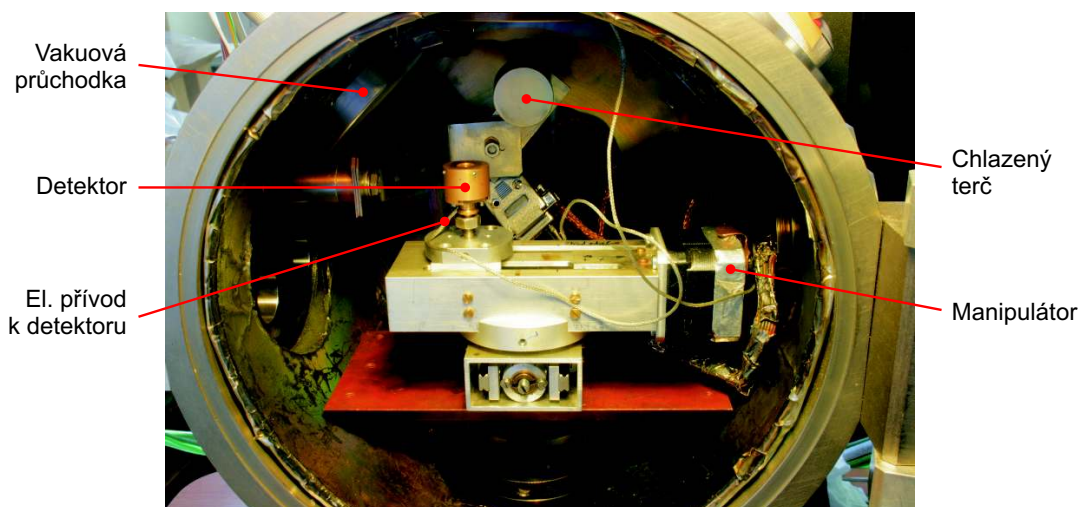
Reálný vychylovací systém vykazuje vždy geometrické zkreslení. Cílem následujícího experimentu je toto zkreslení objektivně posoudit a nalézt koeficienty korekční funkce, která se stane součástí signálního řetězce a pomůže minimalizovat chyby nastavení polohy svazku.

7.3.2 Uspořádání experimentu

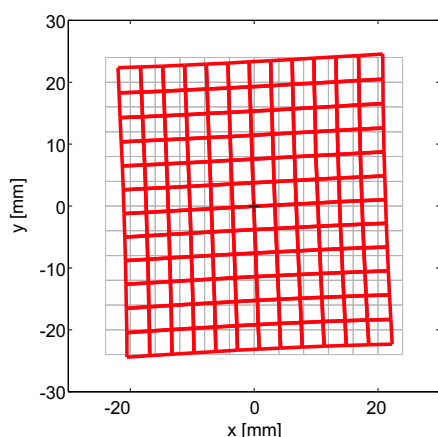
Uspořádání měřicí aparatury je na fotografii 7.2. Na precizním x-y stolku poháněném krokovými motory byla umístěna Faradayova sonda s clonou z měděné fólie tloušťky 0,05 mm s kruhovým otvorem o průměru asi 0,2 mm. Stolek umožnil posun detektoru v rozsahu 50 × 50 mm. Přesnost nastavení polohy byla lepší než 1 μm (ověřeno nezávislým měřením). Signál z detektoru byl vyveden přes vakuovou průchodku a byl digitalizován pomocí převodníkové karty.

Během měření byl detektor postupně mechanicky přemísťován manipulátorem do jednotlivých bodů pravidelné pravoúhlé měřicí sítě p_i se středem přibližně v ose nevychýleného svazku. Svazkem byla přerastrována oblast o rozměrech přibližně 12 × 12 mm za současného snímání signálu z Faradayovy sondy. Oblast byla zvolena tak, aby se v ní zároveň nacházel i otvor v cloně detektoru. Z obrazu byla následně určena přibližná poloha a rozměry clony detektoru. Poté bylo snímání zopakováno, avšak rozměry snímaného pole byly zmenšeny na asi trojnásobek zjištěného rozměru clonky a jeho střed byl posunut podle prvního odhadu. Rozlišení obrazu bylo v obou případech stejné – 256 × 256 bodů. Postup určení polohy je podrobně popsán v části 5.3.3 – *REM režim*. Parametry měření shrnuje tabulka 7.3.

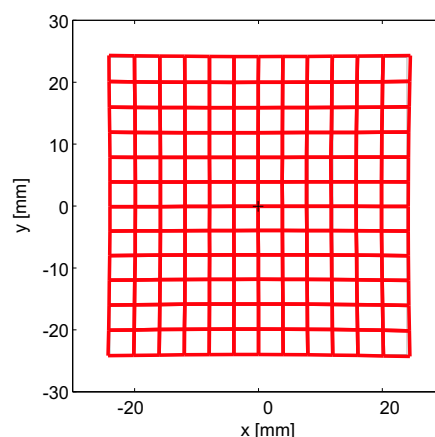
Z uvedených údajů lze odhadnout dosažitelné rozlišení měření. Při průměru clony 0,2 mm byla snímána v druhém průchodu oblast o šířce $3 \cdot 0,2 = 0,6$ mm. Při 256 bodech připadá na jeden pixel 2,3 μm. Rozlišení měření je však vyšší, protože poloha středu clony je určena průměrováním z více řádků – viz výraz (2.5). Zabírá-li kruh clony třetinu z 256 řádků obrazu, je rozlišení přibližně 85 krát vyšší (z tohoto počtu řádků je vyhodnocována poloha), tedy okolo 27 nm. Reálná přesnost měření však je podstatně nižší vlivem nestability a šumu. Očekávat lze spíše opakovatelnost okolo ±1,5 μm, jak ukazuje měření stability v části 7.5.



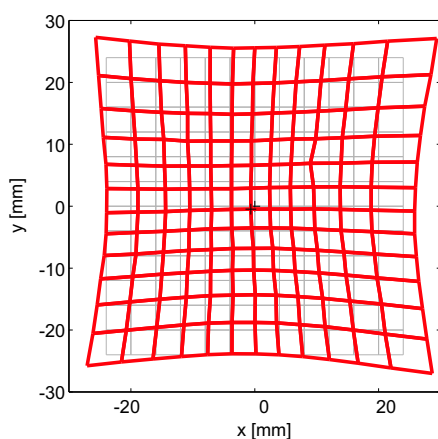
Obrázek 7.2: Uspořádání měřicí aparatury pro určení zkreslení vychylovacího systému.



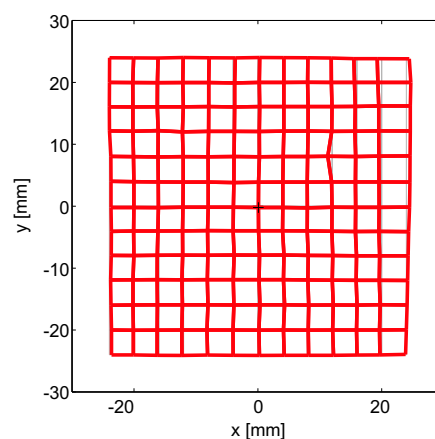
(a) Měřítko 1:1



(b) Měřítko 1:1



(c) Měřítko 10:1



(d) Měřítko 10:1

Obrázek 7.3: Zkreslení vychylovacího pole: (a) – naměřená síť kontrolních bodů v oblasti 48×48 mm (střední zbytková chyba 1,95 mm), (b) a (c) – síť korigovaná polynomem 1. řádu (chyba 0,16 mm), (d) – síť korigovaná polynomem 3. řádu (chyba 0,022 mm). Odchylky poloh jednotlivých uzlů sítě jsou zvětšeny v uvedeném měřítku.

Poznámka: Veškeré odečty polohy a rozměrů probíhaly v hrubém souřadném systému, který jsem před měřením zkalibroval pro zvolenou energii svazku a pracovní vzdálenost. V systému byly vypnuty ruční korekce natočení a ortogonalitě vychylovacího pole a korekce špatného poměru stran.

7.3.3 Výsledky

Naměřená data jsem použil k nalezení koeficientů korekční funkce (5.15) metodou minimalizace vztahu (5.17). Pro srovnání jsem fitování provedl pro polynomy nultého,

Tabulka 7.3: Podmínky při experimentálním určení zkreslení vychylovacího systému

Energie svazku	50 keV
Proud svazku	0,15 mA
Pracovní vzdálenost	60 mm
Síť měřicích bodů	48×48 mm
Počet bodů sítě	13 bodů horizontálně, 13 bodů vertikálně
Rozměr hrubého lokalizačního pole	asi 12×12 mm
Rozlišení obrazu	256×256 bodů

prvního a třetího řádu. Polynom nultého řádu pouze odstraňuje chybu posunu počátku (viz obr. 7.3a). Polynom prvního řádu koriguje natočení, špatnou ortogonalitu a poměr stran (obr. 7.3b). Nekorigované zůstávaly vady nelineárního charakteru, jak je vidět z obrázku 7.3c, který zachycuje stejnou situaci v desetinásobném zvětšení. K odstranění těchto vad lze úspěšně použít polynom třetího řádu, jak je vidět z obrázku 7.3d (rovněž v desetinásobném zvětšení).

Nalezené koeficienty korekční funkce jsou uvedeny v tabulce 7.4. V tabulce 7.5 je uvedena střední a maximální hodnota úchyly a směrodatná odchylka. Hodnoty jsou pro každý směr zvlášť a pro výslednici. Porovnáním lze zjistit, že polynom prvního stupně snížil odchylku asi dvanáctkrát a polynom třetího stupně asi 88krát.

Podle vztahu 5.14 jsem odhadnul velikost systematické chyby při měření polohy detektoru, která vzniká v důsledku nenulové tloušťky měřicí clony. Pro okraj vychylovacího pole je chyba:

$$\Delta r = 0,5t_A \frac{r}{z_D - z_V} = 0,5 \cdot 0,05 \cdot \frac{\sqrt{24^2 + 24^2}}{60 + 56,9} = 7,3 \mu\text{m}.$$

Za z_V bylo dosazena hodnota podle tabulky 7.2 (průměr pro U a V deflektor) pro příslušné U_A . Ze srovnání s velikostí zbytkových chyb po korekci (tab. 7.5) je zřejmé, že by bylo vhodné provést korekci této systematické chyby měření. V opačném případě se může výsledek mírně zkreslit (chyba bude mít podobný charakter jako soudkovitost).

Poznámka: Všechny uvedené grafy znázorňují červenou barvou sítí koncových bodů chybových vektorů umístěných do uzlů sítě kontrolních bodů. Délka vektorů byla zvětšena v uvedeném měřítku pro lepší zviditelnění deformací.

Tabulka 7.4: Koeficienty přenosové funkce získané měřením pro polynom nultého, prvního a třetího řádu.

Řád		a_0	a_x	a_y	a_{x^2}	a_{xy}	a_{y^2}	a_{x^3}	a_{x^2y}	a_{xy^2}	a_{y^3}
		–	–	–	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}
0.	U:	–1,37									
	V:	0,33									
1.	U:	–1,37	1,12	0,03							
	V:	0,33	–0,05	1,04							
3.	U:	–1,30	1,15	0,04	–0,22	0,07	–0,09	–45,67	–4,10	–21,53	–2,47
	V:	0,35	–0,05	1,05	0,08	–0,06	–0,20	1,65	–15,78	3,11	–35,94

Tabulka 7.5: Statistické údaje zbytkových (neodstraněných) chyb Δp po korekci zkreslení vychylovacího systému pro polynom nultého, prvního a třetího řádu. Procentuální údaje jsou vztaženy k maximální výchylce.

Řád		Průměr $\overline{\Delta p}$		Maximum $\max(\Delta p)$		Směr. odchylka $\sigma(\Delta p)$	
		μm	%	μm	%	μm	%
0.	U:	1681	7	3458	14	939	3,9
	V:	744	3,1	1725	7,2	484	2
	Celkově:	1947	8,1	3483	15	839	3,5
1.	U:	113	0,47	540	2,2	91,3	0,38
	V:	94,1	0,39	328	1,4	63	0,26
	Celkově:	161	0,67	622	2,6	89,8	0,37
3.	U:	19,6	0,082	72,1	0,3	15,7	0,065
	V:	7,3	0,03	25,7	0,1	6,0	0,025
	Celkově:	22,4	0,093	73,9	0,3	14,8	0,062

7.4 Remanentní magnetismus vychylovacího systému

7.4.1 Úvod

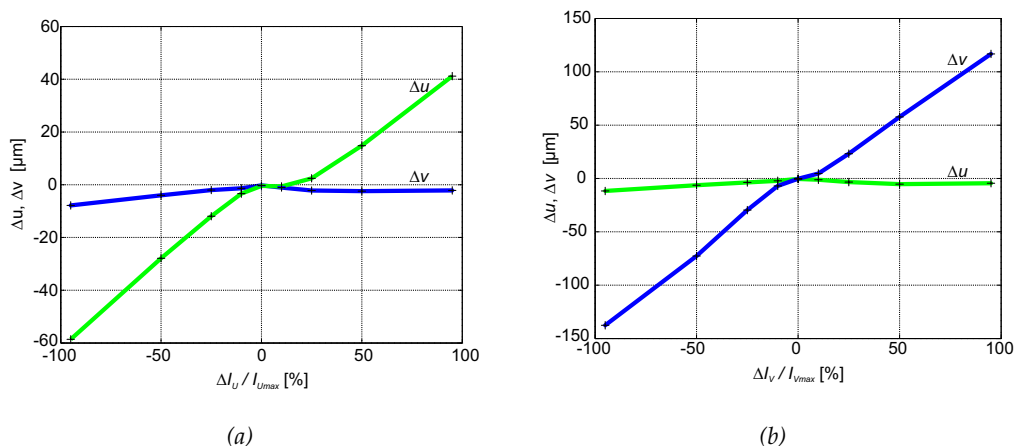
V části 5.5 jsem popsal mechanismus vlivu hystereze magnetického obvodu vychylovacího systému na reprodukovatelnost nastavení polohy svazku. Důsledné experimentální proměření hystereze spadá mimo rámec této práce. V následujícím měření se proto soustředím pouze na měření jednoho parametru. Je jím zbytkový magnetismus (remanence), tedy indukce magnetického pole, která zůstane v magnetickém obvodu i po snížení intenzity budícího pole na nulu. Výsledky mají sloužit především k získání představy o vlivu remanence na přesnost a reprodukovatelnost polohování elektronového svazku.

7.4.2 Uspořádání experimentu

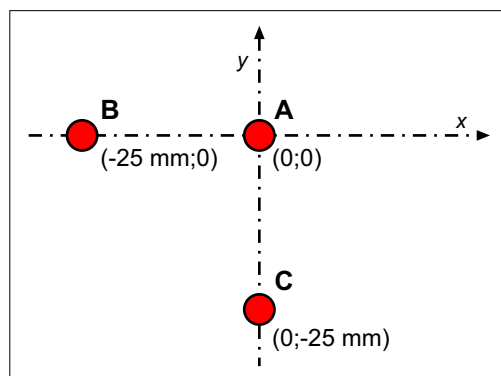
Při měření jsem zjišťoval změnu polohy svazku při nulových (resp. velmi malých) proudech deflektorů po krátkém vybuzení deflektoru. Polohu jsem určoval pomocí REM režimu s malým zorným polem, aby nedošlo k významnému ovlivnění měření rastrováním (viz níže). Měření jsem uskutečnil nezávisle pro oba směry vychylování a zaznamenával jsem výchylky v obou směrech, abych mohl posoudit vzájemné ovlivňování deflektorů. Vychylovací systém jsem před každým měřením nejprve demagnetizoval pomocí budících proudů s tlumeným harmonickým průběhem. Poté jsem zaměřil přesnou polohu svazku v nevychýleném stavu. Po krátkém vybuzení vybraného deflektoru do zvolené úrovně jsem polohu změřil podruhé a z rozdílu určil posunutí. Vybuzení vychylovacích cívek je uváděno v procentech z maximálního proudu. Ten je pro U deflektor asi 1,0 A a pro V deflektor asi 0,6 A. Podmínky měření jsou shrnuty v tabulce 7.6.

Tabulka 7.6: Podmínky při měření remanentního magnetismu.

Energie svazku	50 keV
Pracovní vzdálenost	170 mm
Rozsah přebuzení	−95 až 95 % maximálního proudu deflektoru
Demagnetizační kmitočet f	200 Hz
Amplituda	100 % maximálního proudu deflektoru
Součinitel útlumu b	25 s^{-1} (viz výraz (5.18))



Obrázek 7.4: Posun svazku vlivem remanence magnetického obvodu vychylovacího systému pro přebuzení ve směru (a) U a (b) V. Měření při energii svazku 50 keV v pracovní vzdálenosti 170 mm.



Obrázek 7.5: Poloha měřicích bodů při stanovení dlouhodobé stability vychylovacího systému

7.4.3 Výsledky

V grafech 7.4a a 7.4b jsou vyneseny naměřené posuny svazku pro U a V deflektor. Rozdíl maximálních úchylek je asi $100\ \mu\text{m}$ pro U a $260\ \mu\text{m}$ pro V deflektor. Větší hodnota V deflektoru je vysvětlitelná odlišnou konstrukcí obou deflektorů (viz § 4.2.1, str. 22). Zatímco V deflektor je tvořen feritovým toroidem, kterým prochází většina magnetického toku, U deflektor má podobu samonosných sedlových cívek. Tyto cívky jsou vsunuty do V deflektoru a feritem tak prochází jen část toku a vliv remanence je nižší. Závislosti jsou téměř lineární s výjimkou okolí počátku, kde se pravděpodobně projeví rastrování svazku nutné k určení polohy, které způsobuje částečnou demagnetizaci.

7.5 Dlouhodobá stabilita vychylovacího systému

7.5.1 Úvod

Určení stability vychylovacího systému je důležité pro aplikace, při kterých přesné polohování svazku hraje důležitou roli. Je zřejmé, že pokud je „nejistota“ nastavení polohy malá ve srovnání s rozměry svazku, nebude nutné s ní počítat. Opačným případem jsou aplikace jako je mikrosvařování či mikroobrábění.

7.5.2 Uspořádání experimentu

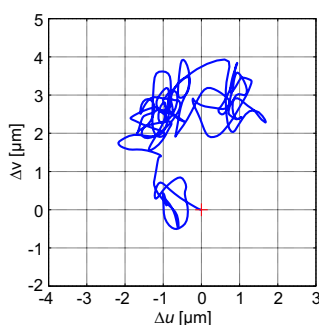
Při tomto měření byla poloha detektoru svazku pevná. Vycházel jsem z předpokladu, že systém je mechanicky natolik tuhý, že případné detekované změny polohy budou způsobeny nestabilitou vychylovacího systému. Měření jsem provedl ve třech bodech vychylovacího pole (viz obr. 7.5) zvolených tak, aby bylo možno posoudit vliv střední hodnoty proudů deflektory na stabilitu výchylky. Polohu detektoru jsem v pravidelných časových intervalech automaticky určoval způsobem popsáným v podkapitole 5.3. Podmínky měření shrnuje tabulka 7.7.

Tabulka 7.7: Podmínky při měření stability vychylovacího systému.

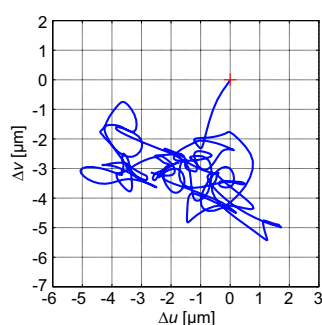
Energie svazku a proud svazku	50 keV 0,1 mA
Pracovní vzdálenost	61,5 mm
Detektor	Faradayova sonda, kruhová clona $\phi 0,2\ \text{mm}$
Snímání polohy	v REM režimu, dvoufázově
Rozměry lokalizačního pole	1. fáze: $2 \times 2\ \text{mm}$, 2. fáze: asi $0,6 \times 0,6\ \text{mm}$
Perioda a délka měření	2 s, celkem asi 20 min
Poloha měřicích bodů	viz obr. 7.5

Tabulka 7.8: Statistické hodnoty měření stability vychylovacího systému. Hodnoty uvedené černě jsou pro nefiltrovaná data, červeně pro filtrovaná.

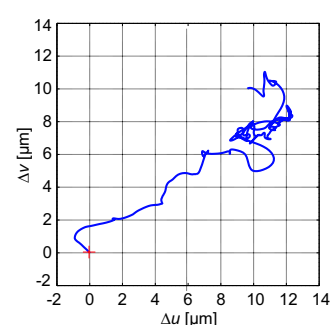
Parametr	Směr U		Směr V		Výslednice		Měřicí bod
	μm	μm	μm	μm	μm	μm	
Směrodatná odchylka	1,22	0,90	1,74	1,03	1,17	0,85	A
Maximum	7,46	3,86	10,17	4,44	6,64	3,98	
Směrodatná odchylka	2,16	1,54	1,42	0,88	1,41	0,91	B
Maximum	13,60	6,79	8,65	5,43	9,93	5,95	
Směrodatná odchylka	3,16	3,22	2,31	2,29	3,64	3,77	C
Maximum	15,83	13,28	11,83	11,04	16,77	15,44	



(a) střed (bod A)



(b) $x = -25 \text{ mm}$ (bod B)

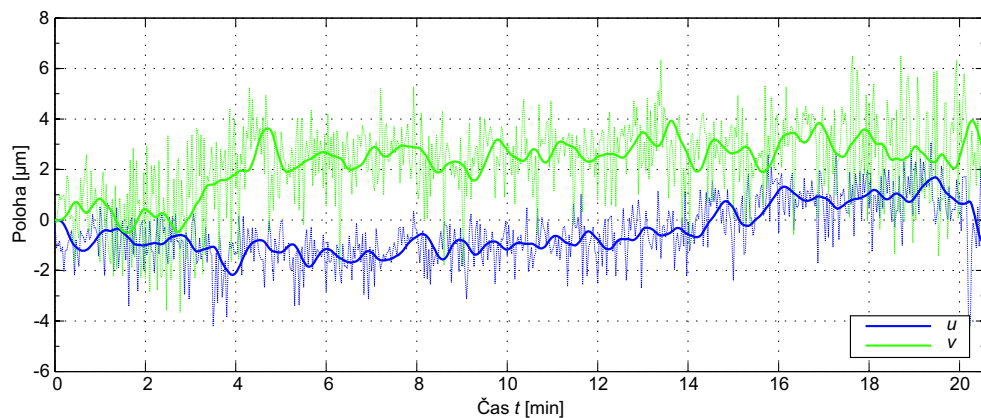


(c) $y = -25 \text{ mm}$ (bod C)

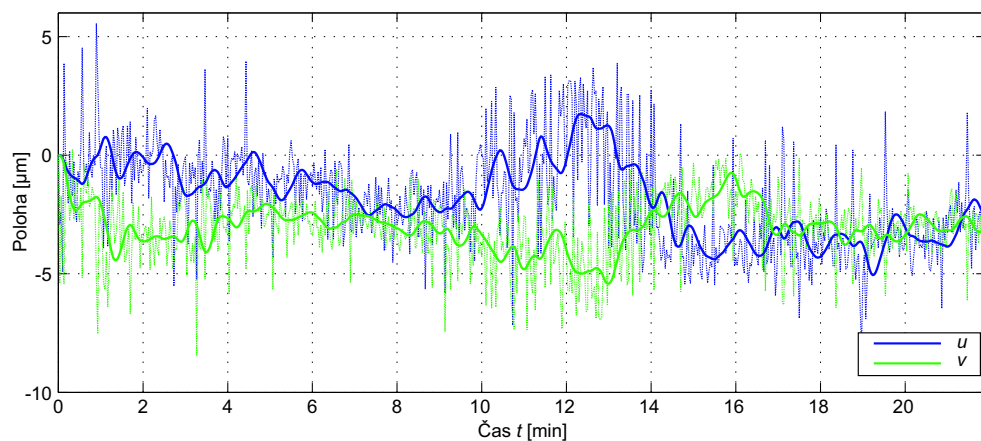
Obrázek 7.6: Fluktuační vychylování (filtrované dolní propustí 0,2 Hz). Červený křížek vyznačuje výchozí bod.

7.5.3 Výsledky

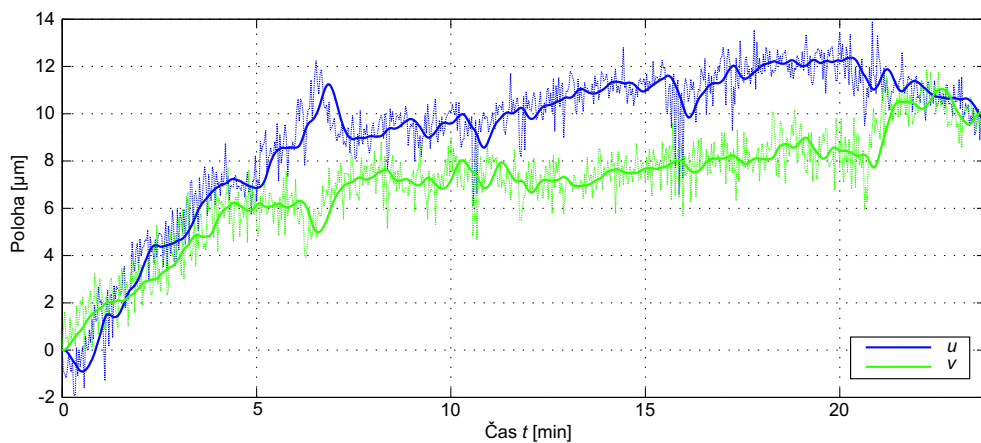
Tři provedená měření byla zpracována do grafů 7.6 (úchylykly zobrazeny v kartézských souřadnicích) a grafu 7.7 zachycující časovou závislost fluktuací. Naměřená data jsem filtroval dolní propustí o mezním kmitočtu 0,2 Hz, aby byly lépe patrné pomalé změny polohy svazku. V tabulce 7.8 je uvedena směrodatná odchylka a maximální hodnota vzdálenosti mezi naměřenými body. Ze srovnání vyplývá, že mezi U a V směrem není větší rozdíl. Růst nestability pro vyšší hodnoty statického budicího proudu nelze podle naměřených dat jednoznačně potvrdit ani vyvrátit. Vyšší hodnoty pro bod C jsou způsobeny pravděpodobně skutečností, že měření bylo zahájeno krátce po zapnutí celého zařízení, které tak nemělo čas se ustálit (warm-up). Na obrázku 7.7c tak lze pozorovat během prvních sedmi minut ustalovací děj. Na základě měření je možno prohlásit, že dvacetiminutová stabilita výchylky (po ustálení po zapnutí) je lepší než $\pm 1,5 \mu\text{m}$. Při vyšším urychlovacím napětí (a tedy nižší citlivosti vychylování) či menší pracovní vzdálenosti bude stabilita vyšší, a naopak.



(a) střed (bod A)



(b) $x = -25$ mm (bod B)



(c) $y = -25$ mm (bod C)

Obrázek 7.7: Fluktuace vychylování. Tečkovaně je uvedeno nefiltrované měření, plnou čarou jsou data vyhlazená dolní propustí s prahovým kmitočtem 0,2 Hz.

7.6 Přenosové charakteristiky elektronové trysky

7.6.1 Úvod

Elektronová tryska je v podstatě vakuová trioda, u které funkci řídící mřížky – regulaci anodového proudu – nahrazuje Wehneltův válec. Závislost proudu svazku na předpětí Wehneltova válce $I_B = f(U_W)$ se nazývá *přenosová charakteristika*, protože popisuje vztah mezi vstupní veličinou (mřížkovým napětím) a výstupní veličinou (anodovým proudem). Tvar přenosové charakteristiky je především ovlivněn geometrií trysky a katody, teplotou a stavem katody a velikostí urychlovacího napětí. Naměřené závislosti se uplatní při dalších experimentech a pro praxi, kde poslouží k porovnání různých trysek mezi sebou a pro jejich reprodukovatelné seřízení.

7.6.2 Uspořádání experimentu

Uspořádání fyzikální části bylo stejné jako při běžném provozu zařízení jen s tím rozdílem, že svazek dopadal na masivní měděný blok, ze kterého bylo vznikající teplo odváděno uzavřeným vodním chladícím okruhem mimo pracovní komoru. V následujícím textu jsou uvedeny výsledky ovlivnění přenosové charakteristiky změnou žhavicího proudu, energie svazku a polohy katody.

7.6.3 Vliv žhavicího proudu katody

Při tomto měření jsem sledoval vliv teploty vlákna katody (realizovaný změnou žhavicího proudu I_C) na tvar přenosové charakteristiky. Parametry měření shrnuje tabulka 7.9. Výsledky měření jsou vyneseny do grafu 7.8. Body byly proloženy závislostí:

$$I_B(U_W) = \begin{cases} k_3 (U_W - U_{W_0})^3 + k_2 (U_W - U_{W_0})^2 & \text{pro } U_W > U_{W_0} \\ 0 & \text{jinde} \end{cases} \quad [\text{mA; V}], \quad (7.4)$$

kde U_{W_0} je závěrné napětí a k_2, k_3 jsou konstanty. Regresí určené koeficienty jsou uvedeny v tabulce 7.10. Konstanta k_2 rostoucí se žhavicím proudem určuje strmost převodní charakteristiky a k_3 souvisí se saturací katody pro vysoké proudy svazku. Závěrné napětí trysky U_{W_0} je (podle očekávání) na žhavení katody nezávislé (rozdíly jsou způsobeny chybami měření).

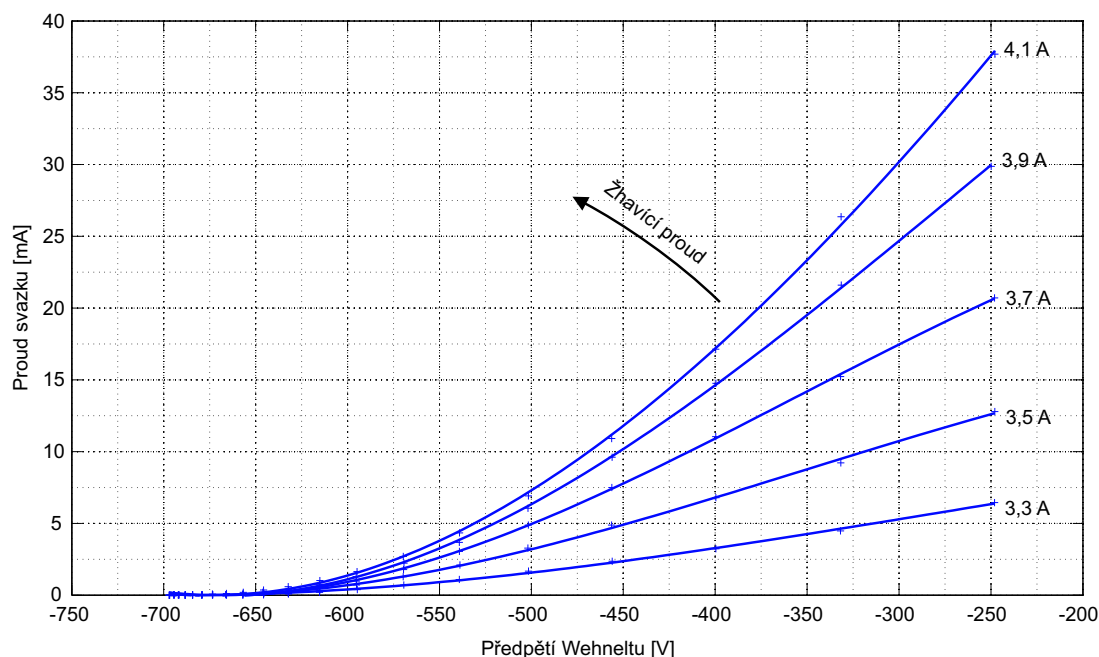
7.6.4 Vliv energie svazku

Při tomto měření jsem sledoval vliv změny energie svazku (realizované změnou urychlovacího napětí) na tvar přenosové charakteristiky. Parametry tohoto měření shrnuje tabulka 7.12.

Data jsem zpracoval stejně jako v předchozím odstavci. Koeficienty vztahu (7.4) pro vliv energie svazku jsou v tabulce 7.11. Z grafu 7.9 je vidět, že při zvýšení energie svazku zůstává tvar přenosové charakteristiky prakticky beze změn, ale posune se směrem k vyšším napětím na Wehneltově elektrodě. Závěrné napětí se zvýšilo z -673 V na -750 V.

Tabulka 7.9: Podmínky při měření závislosti přenosu trysky na žhavicím proudu katody.

Parametrická proměnná	Proud žhavení katody
- hodnoty	3,3; 3,5; 3,7; 3,9 a 4,1 A
Energie svazku	50 keV
Nezávislá proměnná	Předpětí Wehneltova válce
- rozsah	-700 až -250 V
Závislá proměnná	Proud svazku
Katoda	vlásenková z wolframového drátu $\phi 0,15$ mm
Stav katody	nová (nepoužitá)
Poloha katody	nominální (1,4 mm)



Obrázek 7.8: Závislost proudu svazku na předpětí Wehneltu a žhavicím proudu katody při 50 keV, nominální poloze vlákna a při použití nové katody.

Tabulka 7.10: Koeficienty výrazu (7.4) pro různé žhavicí proudy I_C .

I_C A	k_3 10^{-7} mA V^{-3}	k_2 10^{-4} mA V^{-2}	U_{W_0} V	chyba mA
3,3	-0,40	0,50	-692,8	0,067
3,5	-1,25	1,22	-679,1	0,103
3,7	-2,19	2,08	-670,3	0,082
3,9	-2,13	2,60	-668,0	0,115
4,1	-1,39	2,69	-672,5	0,186

Tabulka 7.11: Koeficienty výrazu (7.4) pro různé energie svazku E_K .

E_K keV	k_3 10^{-7} mA V^{-3}	k_2 10^{-4} mA V^{-2}	U_{W_0} V	chyba mA
50	-1,39	2,69	-672,5	0,186
55	-0,18	2,07	-750,3	0,046

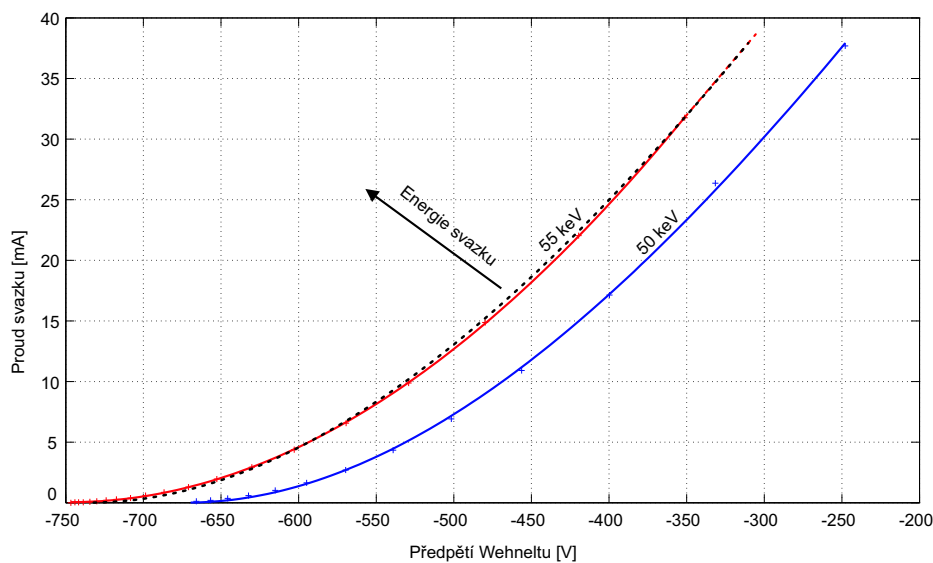
Tabulka 7.12: Podmínky při měření závislosti přenosu trysky na energii svazku.

Parametrická proměnná	Energie svazku
– hodnoty	50 keV a 55 keV
Nezávislá proměnná	Předpětí Wehneltova válce
– rozsah	-650 až -250 V pro 50 keV, -750 až -350 V pro 55 keV

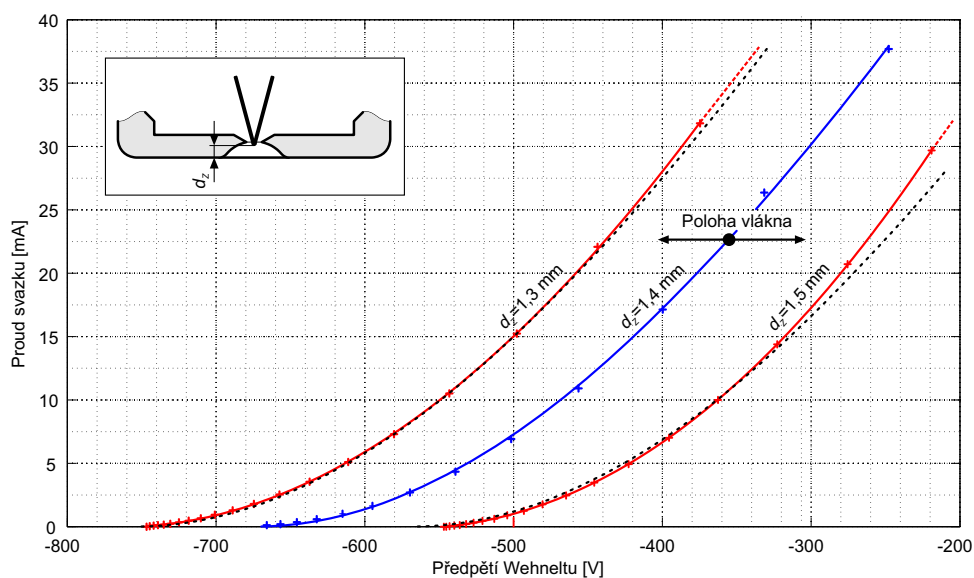
7.6.5 Vliv polohy katody

Při tomto měření jsem studoval vliv polohy vlákna katody na tvar přenosové charakteristiky. Měření jsem provedl pro energii svazku 50 keV a tři polohy vlákna 1,3; 1,4 a 1,5 mm. Polohu vrcholu vlákna katody jsem měřil vůči čelní ploše Wehneltova válce (viz obr. 7.10) způsobem popsaným v části 4.2.1 – *Elektronová tryska* na straně 22.

Výsledky měření jsou zachyceny v grafu 7.10 a v tabulce 7.13. Z nich vyplývá, že vliv změny polohy vlákna je obdobný, jako vliv změny energie svazku. Tvar přenosové charakteristiky je téměř stejný. Pro vlákno, které je v menší hloubce pod povrchem Wehneltovy elektrody, je závěrné napětí vyšší a naopak.



Obrázek 7.9: Závislost proudu svazku na předpětí Wehneltu a energii svazku 50 a 55 keV. Čárkovaná čára je posunutá křivka 50 keV pro porovnání tvaru obou křivek.



Obrázek 7.10: Závislost proudu svazku na předpětí Wehneltu pro tři polohy vlákna katody pro svazek o energii 50 keV. Pro posouzení změny tvaru je čárkovaně vynesena posunutá nominální závislost pro polohu $d_z = 1,4$ mm.

Tabulka 7.13: Koeficienty výrazu (7.4) pro různé polohy vlákna katody.

d_z mm	k_3 $10^{-7} \text{ mA V}^{-3}$	k_2 $10^{-4} \text{ mA V}^{-2}$	U_{W_0} V	chyba mA
1,5	0,11	2,46	-563,6	0,042
1,4	-1,39	2,69	-672,5	0,186
1,3	-0,45	2,29	-763,2	0,057

7.7 Voltampérové charakteristiky katody

7.7.1 Úvod

Výkonnost elektronové trysky je velmi závislá na vlastnostech a provozním stavu zdroje elektronů. U termoemisní katody je nejdůležitější parametr teplota jejího vrcholu, která ovlivňuje současně emisi elektronů i životnost katody (viz odstavec 2.1.3 – *Termoemise*). Vzhledem k tomu, že naše zařízení nedisponuje přímým měřením teploty vlákna, je nutné vhodné pracovní podmínky zajistit jinak. Pomocným prvkem jsou voltampérové charakteristiky katody, tedy závislosti napětí a proudu vlákna. Jejich měřením se zabývá tato část.

7.7.2 Uspořádání experimentu

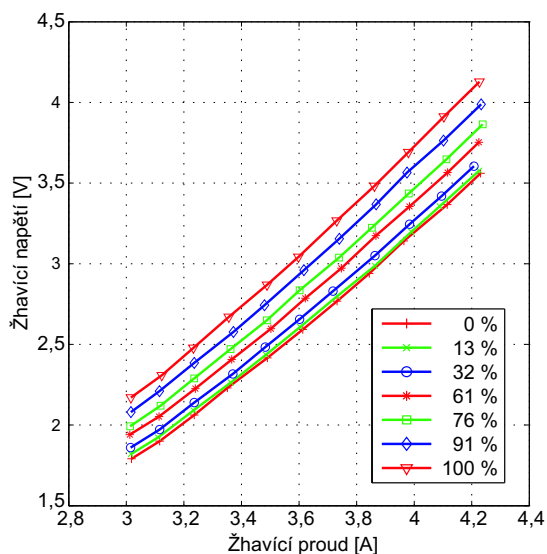
Měření jsem zahájil s novou katodou z wolframového drátu o průměru 0,15 mm. V průběhu životnosti katody jsem opakovaně měřil a zaznamenával závislosti napětí a jasů vlákna na žhavicím proudu. Životnost vlákna jsem záměrně zkrátil poměrně vysokým žhavicím proudem. Parametry měření jsou shrnuty v tabulce 7.14:

Tabulka 7.14: Podmínky při experimentálním určování volt-ampérových charakteristik katody.

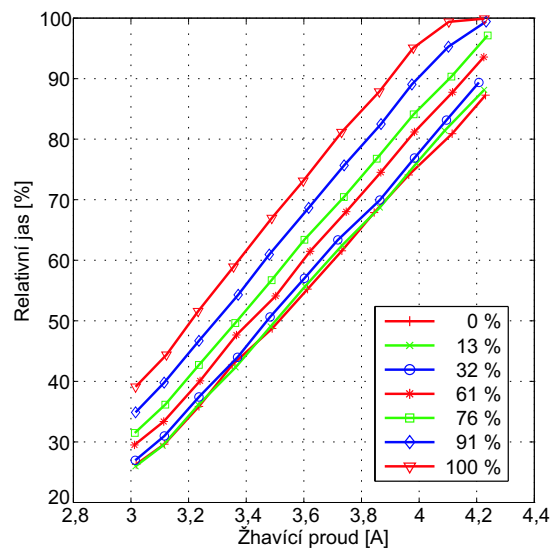
Rozsah žhavicího proudu	3,0 až 4,2 A
Žhavicí proud v mezech měření	4,0 A
Životnost katody	30 minut
Počet měření v průběhu životnosti	7

7.7.3 Výsledky

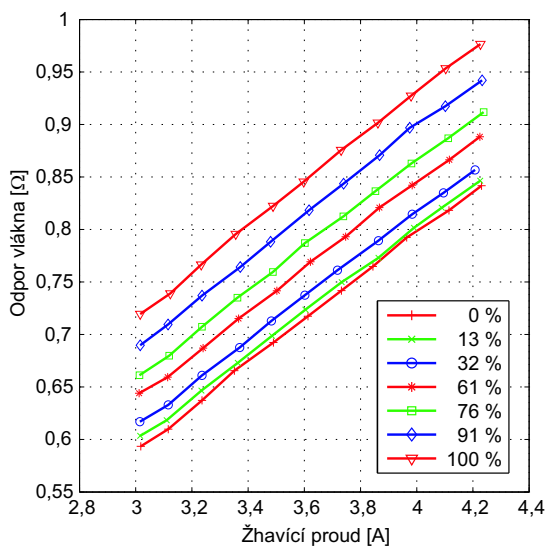
Výsledky měření jsou zaznamenány v grafech 7.11 až 7.14. Ve všech případech odpovídají jednotlivé křivky stavu vlákna v různých fázích jeho životnosti (viz legenda – 0 % odpovídá nové katodě a 100 % vlákně těsně před přerušením). Z grafů je zřejmá závislost odporu vlákna na žhavicím proudu, související se vzrůstem jeho teploty, i postupný růst odporu vlivem zmenšujícího se průřezu během provozu. Závislost 7.14 dokazuje, že jas vlákna odpovídá žhavicímu napětí bez ohledu na stáří. Z toho lze vyvodit, že ke stabilizaci teploty je možné využít jak signál z fotoelektrického snímače, tak i stabilizaci žhavicího napětí. Druhá možnost je bohužel komplikována existencí nestabilních přechodových odporů v sérii s vláknem. Výsledky najdou využití například při návrhu žhavicího zdroje s pokročilým řízením vedoucím k prodloužení životnosti vlákna a k predikci jeho přerušení [49].



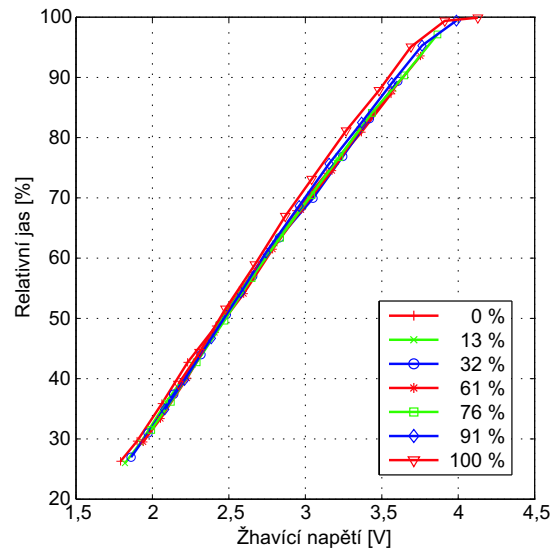
Obrázek 7.11: Závislost napětí katody na žhavicím proudu v průběhu její životnosti.



Obrázek 7.12: Závislost relativního jasu katody na žhavicím proudu v průběhu její životnosti.



Obrázek 7.13: Závislost odporu katody na žhavicím proudu v průběhu její životnosti.



Obrázek 7.14: Závislost relativního jasu katody na žhavicím napětí v průběhu její životnosti.

7.8 Rozložení výkonové hustoty ve svazku

7.8.1 Úvod

Následující měření se zaměřuje na rozložení výkonové hustoty v svazku, které je charakterizované sérií příčných profilů. Zvolil jsem metodu se stacionárním detektorem umístěným blízko středu komory, což je typické pro běžný provoz zařízení. Změnu roviny řezu svazku jsem dosáhl přeostrůváním čočky (viz § 6.4 – *Transformace profilů měřených přeostrůváním čočky* – oprávněnost metody je ověřena v experimentu 7.9). Měření umožňuje posoudit příčné rozměry svazku, určit maximální výkonovou hustotu a hloubku ostrosti. Tyto parametry jsou důležité z hlediska technologického využití svazku.

Protože experiment měl především ověřit funkčnost metody, měřil jsem jen pro jeden vybraný proud svazku (5,0 mA).

7.8.2 Uspořádání experimentu

Clonu detektoru jsem vyrobil z tantalové fólie s kruhovým otvorem o průměru 0,2 mm. Rozsah fokusačních proudů jsem zvolil tak, aby bylo naměřeno okolí nejužšího místa svazku. Velikost zorného pole, rychlost snímání a rozlišení profilu jsem stanovil s ohledem na tepelné zatížení detektoru. Protože i tak došlo při prvním měření k poškození clony, byl proces doplněn o 10 ms dlouhou prodlevu mezi snímáním jednotlivých řádků profilu. Tento čas byl dostatečný k odvedení tepla ze clony do okolí. Trysku jsem před měřením seřídil. Parametry měření jsou pro přehlednost shrnuty v tabulce 7.15.

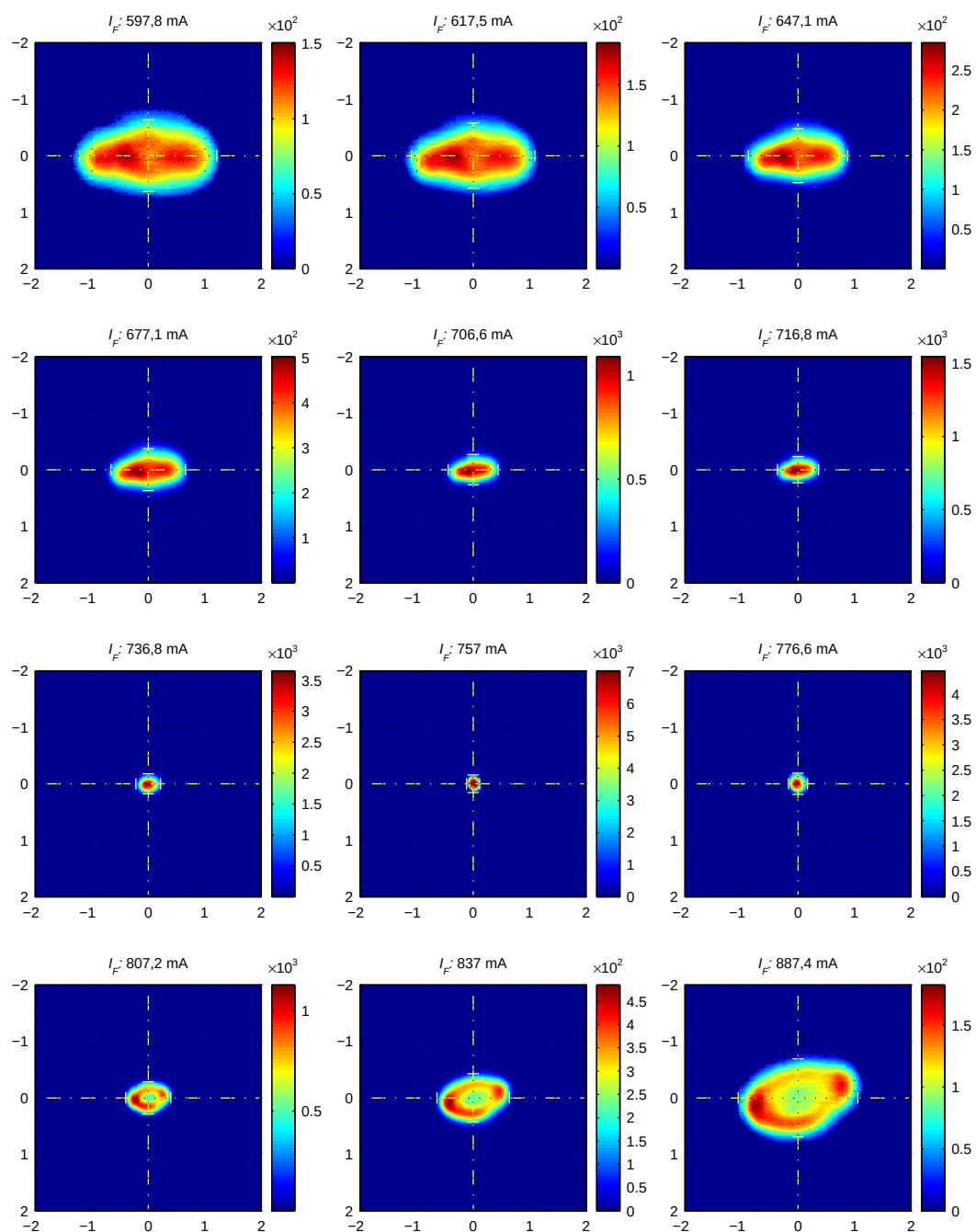
7.8.3 Výsledky

Změřené profily jsou uvedeny na obrázku 7.15. V tabulce 7.16 je přehled hodnot, které byly z těchto profilů určeny. Rozměry svazku d_X a d_Y byly stanoveny podle vztahu (2.5). Maximum výkonové hustoty $(Q_S)_{max}$ je udáno s odhadem chyby $\Delta(Q_S)_{max}$ vypočteným podle vztahu (6.26). Výsledky jsem transformoval podle § 6.4; přepočtené hodnoty jsou v tabulce označeny apostrofem. Pro přepočet jsem zvolil proud čočky 757 mA, aby se nezměnilo místo pasu svazku po transformaci (přímé i transformované hodnoty v označeném řádku jsou proto shodné).

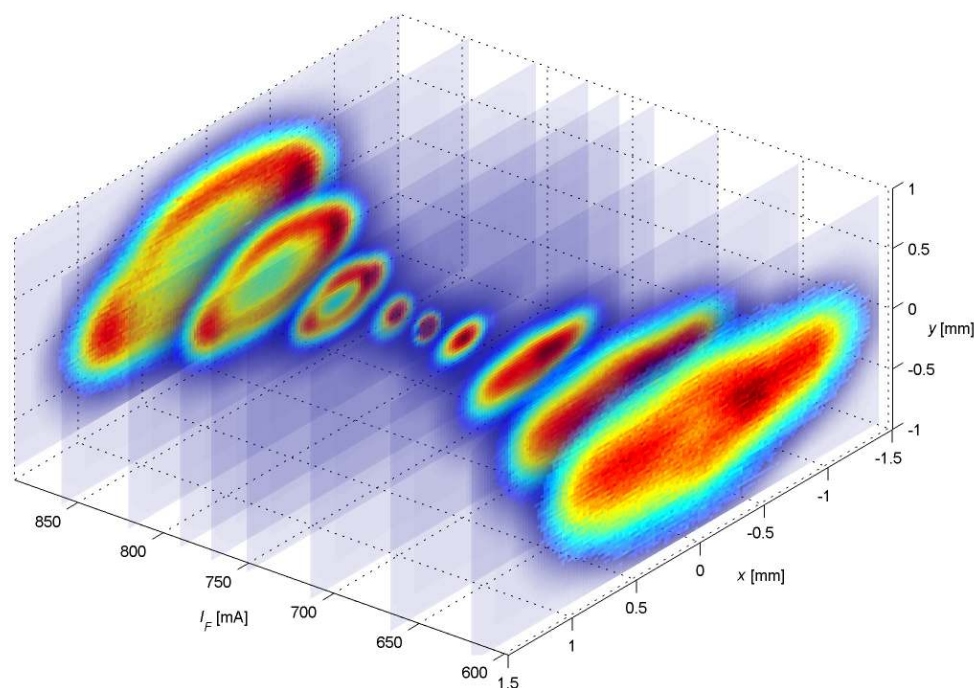
Nejvyšší výkonové hustoty ($7 \cdot 10^3 \text{ W mm}^{-2}$) bylo dosaženo pro proud čočky $I_F = 757 \text{ mA}$. Hodnota však není příliš spolehlivá vzhledem k rozměrům svazku srovnatelným s otvorem clony (chyba asi 49 %). Na obrázku 7.16 je 3D vizualizace svazku sestavená z vybraných profilů podél proudové osy I_F .

Tabulka 7.15: Podmínky při snímání příčných profilů v okolí pasu svazku.

Energie svazku	50,4 keV
Proud svazku	5,0 mA
Pracovní vzdálenost	105 mm
Žhavicí proud katody	3,42 A
Fokusační proud	600 až 850 mA
<i>Parametry profilů</i>	
Počet bodů	256×256
Rozměry snímacího pole	$6 \times 6 \text{ mm}$
Rychlost snímání	250 kS s^{-1}
Rychlost pohybu svazku	$5,9 \text{ m s}^{-1}$
Prodleva mezi řádky	10 ms
Rozměr clony detektoru	$\phi 0,2 \text{ mm}$
Materiál clony	tantalový plech tl. 0,04 mm



Obrázek 7.15: Příčné profily svazku pro různé proudy fokusační čočky. Barva odpovídá plošné hustotě výkonu, škála je uvedena v W mm⁻². Měřeno při energii 50 keV, proudu svazku 5,0 mA a žhavicím proudu 3,42 A v pracovní vzdálenosti 105 mm.



Obrázek 7.16: Příčné řezy svazkem na ose fokusačního proudu. Měřeno při energii 50 keV, proudu svazku 5,0 mA, žhavicím proudu 3,42 A v pracovní vzdálenosti 105 mm. Poznámka: barevná škála odpovídá výkonové hustotě svazku a je upravena individuálně pro každý řez.

Tabulka 7.16: Příčné řezy svazkem podél optické osy – přehled hodnot. I_B je proud svazku, U_W je předpětí Wehneltu, d_X a d_Y jsou rozměry svazku, $(Q_S)_{max}$ je maximální hodnota hustoty výkonu, $\Delta(Q_S)_{max}$ je odhad chyby, $z' - z_D$ je relativní přepočtená poloha řezu vzhledem k poloze detektoru ($z_D = 105$ mm – kladné hodnoty jsou dále od trysky), M je lineární zvětšení řezu.

Přímé hodnoty					Transformované hodnoty				
I_F mA	d_X mm	d_Y mm	$(Q_S)_{max}$ kW mm ⁻²	$\Delta(Q_S)_{max}$ %	$z' - z_D$ mm	M –	d'_X mm	d'_Y mm	$(Q'_S)_{max}$ kW mm ⁻²
597,8	2,43	1,27	0,15	2,4	–90,3	0,56	1,36	0,71	0,48
617,5	2,18	1,16	0,18	2,9	–84,4	0,59	1,28	0,68	0,53
647,1	1,76	0,95	0,29	4,3	–73,9	0,64	1,12	0,61	0,70
677,1	1,32	0,74	0,50	7,0	–60,5	0,70	0,93	0,52	1,01
706,6	0,88	0,53	1,09	12,9	–43,5	0,79	0,69	0,42	1,76
716,8	0,73	0,46	1,55	16,4	–36,5	0,82	0,60	0,38	2,29
736,8	0,44	0,35	3,66	26,1	–20,4	0,90	0,39	0,32	4,51
757,0	0,23	0,31	7,03	48,8	0,0	1,00	0,23	0,31	7,03
776,6	0,34	0,38	4,46	27,8	25,3	1,12	0,38	0,42	3,54
807,2	0,80	0,57	1,13	11,2	82,5	1,40	1,12	0,80	0,58
837,0	1,28	0,86	0,48	5,3	178,8	1,87	2,39	1,60	0,14
887,4	2,12	1,38	0,18	2,1	741,0	4,61	9,78	6,37	0,01

7.9 Srovnání profilu měřeného se stacionárním a pohyblivým detektorem

7.9.1 Úvod

Cílem experimentu bylo ověření možnosti transformace profilů naměřených v jedné rovině pro různé vybuzení fokusační čočky do příslušných rovin podél optické osy, které jsem popsal v § 6.4.

7.9.2 Uspořádání experimentu

Měření jsem provedl s pomocí detektoru se štěrbinovou clonou namontovanou na manipulátoru, který umožňuje posuv ve směru osy z . Za shodných podmínek jsem naměřil dva podélné profily s pomocí štěrbinové clony. V prvním případě byl detektor nehybný v poloze $z_D = 105$ mm a měnil se proud fokusační čočky. V druhém případě byl proud čočky konstantní a detektor se pomocí manipulátoru posunoval. Rozsahy fokusačních proudů a poloh detektoru jsem zvolil zkusmo tak, aby došlo k překrytí výsledků. Nastavení a parametry měření jsou shrnuty v tabulce 7.17.

7.9.3 Výsledky

Přepočet podélného profilu měřeného se stacionárním detektorem jsem provedl podle vztahů (6.14) a (6.15) s využitím výsledků z měření popsaného v části 7.15. Neupravený profil je na obrázku 7.17a, přepočtený s vyznačenou obálkou svazku je na obr. 7.17b. Profil byl rovněž upraven tak, aby jeho osa ležela na ose z . Při přepočtu byl uvažován proud v čočce stejný jako u druhého měření, tedy $I_F = 715$ mA.

Na obrázku 7.17c je podélný profil naměřený s pohyblivým detektorem. Protože při změně pracovní vzdálenosti dochází ke změně citlivosti vychylovacího systému (viz § 5.2.2, str. 43), je nutné provést korekci i tohoto měření. Přepočet spočíval v úpravě měřítka řezů svazku podle vztahu (5.5) s použitím výsledků z § 7.2. Výsledek je na obrázku 7.17d. Pro lepší představu o transformacích jsou v obrázcích (b) a (d) vykresleny sítě, které odpovídají původní pravoúhlé rovnoměrné mřížce.

Při srovnání obrázků 7.17b a (d) je vidět velmi dobrá shoda získaných profilů. Objektivní srovnání jsem učinil porovnáním charakteristických parametrů svazku určených z výsledných profilů (viz tabulka 7.18). Nízká chyba určení polohy a poloměru pasu svazku

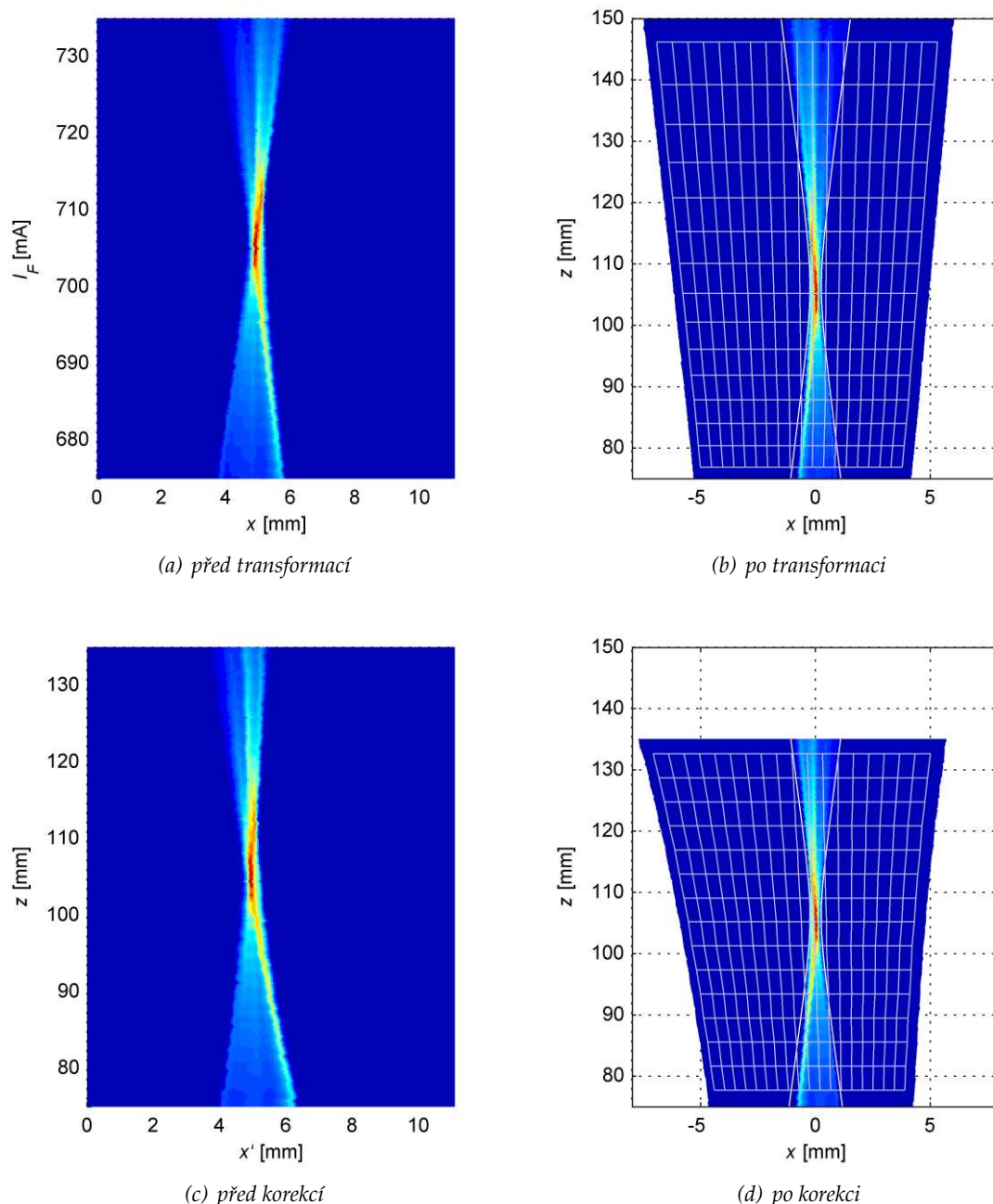
Tabulka 7.17: Podmínky při srovnávacím měření podélného profilu se stacionárním a pohyblivým detektorem.

	Stacionární detektor	Pohyblivý detektor
Energie svazku a proud svazku	50 keV / 10 mA	
Detektor	Štěrbina 50 μ m	
Pracovní vzdálenost	105 mm	75 až 135 mm
Ostřicí proud	675 až 735 mA	715 mA
Šířka snímacího pole	11,1 mm	
Počet bodů	256 $\times$ 200	

Tabulka 7.18: Srovnání parametrů svazku určených z profilů získaných se stacionárním a pohyblivým detektorem.

Profil	Poloha pasu z_0 mm	Poloměr pasu r_0 mm	Divergence θ mrad	BPP mmrad
Stacionární detektor	106,3	0,243	33,9	8,26
Pohyblivý detektor	106,1	0,239	36,4	8,70
Rel. rozdíl	0,17 %	1,95 %	6,8 %	5,0 %

kvalitu přepočtu nedokazuje, protože vyplývá z principu. Rozdíl v hodnotách divergence (6,8 %) a BPP (5 %) považují za vyhovující pro praxi. Magnetická čočka testovaného zařízení je zřejmě dostatečně lineární a nemění významně rozložení svazku. To je dané především katodou a urychlovací částí.



Obrázek 7.17: Profily změřené přeostrněním čočky s detektorem v poloze $z_D = 105$ mm (nahore) a pomocí pohyblivého detektoru pro fixní proud čočky $I_F = 715$ mA (dole). Proud svazku byl 10 mA a energie 50 keV.

7.10 Příčný profil při změně předpětí Wehneltu

7.10.1 Úvod

Následující měření ukazuje změny rozložení výkonové hustoty v příčném řezu svazku při změně předpětí Wehneltova válce (a tedy i změně proudu svazku). Wehneltův válec spolu s katodou a anodou tvoří elektrostatický elektronově-optický prvek, jehož optické vlastnosti se mění při změně potenciálů elektrod. Tyto změny se navenek projeví na trajektoriích elektronů ve svazku. Hlavní význam experimentu spočívá v kvalitativním posouzení změn rozložení proudu ve svazku a jako podklad pro srovnání s numerickými modely trysky [54–56].

7.10.2 Uspořádání experimentu

Při tomto měření jsem vyloučil vliv dalších optických prvků na svazek (vypnutím) s výjimkou vychylovacího systému. Mimo urychlovací část se tak elektrony v oblasti bez pole pohybovaly přímočaře. Nezaostřený svazek má poměrně malou hustotu výkonu, proto jsem použil sondu s velkým otvorem ve cloně. Rovina měření může být v principu libovolná. Parametry měření jsou shrnuty v tabulce 7.19.

7.10.3 Výsledky

Naměřené profily jsou na obrázku 7.18. V tabulce 7.20 je přehled hodnot, které byly určeny ze změřených profilů. Rozměry svazku d_X a d_Y jsem stanovil podle vztahu (2.5).

Tabulka 7.19: Podmínky při měření rozložení výkonové hustoty v příčném profilu svazku při změně předpětí Wehneltu.

Energie svazku	50 keV
Pracovní vzdálenost	105 mm
Proud svazku	0,5 až 20 mA
Žhavicí proud katody	4,0 A
Fokusační proud	0 mA
<i>Parametry profilů</i>	
Počet bodů	256 × 256
Rozměry snímacího pole	29,3 × 29,3 mm
Rychlost snímání	250 kS s ⁻¹
Clona	měděná tl. 0,5 mm s otvorem ϕ 0,8 mm

Tabulka 7.20: Příčné profily svazku při různém předpětí Wehneltova válce – přehled hodnot.

U_W V	I_B mA	d_X mm	d_Y mm	$(Q_S)_{\max}$ W mm ⁻²	$\Delta(Q_S)_{\max}$ %
727,2	0,5	3,9	5,2	4,0	4,0
705,2	1,0	3,0	4,2	10,5	6,6
688,7	1,5	3,1	3,8	16,7	6,6
675,3	2,0	3,3	3,4	20,9	5,7
652,7	3,0	4,4	3,4	21,0	5,4
632,6	4,0	5,7	3,9	16,3	4,0
616,4	5,0	7,1	4,8	12,6	2,8
587,7	7,0	9,8	6,6	10,1	1,5
552,0	10,0	13,3	9,3	9,0	0,7
526,7	12,5	16,0	11,5	8,8	0,5
503,8	15,0	18,4	13,4	8,8	0,4
462,3	20,0	22,7	17,0	9,2	0,2

Poznámka: U_W je předpětí Wehneltu, I_B je proud svazku, d_X a d_Y jsou rozměry svazku, $(Q_S)_{\max}$ je maximální hodnota hustoty výkonu, $\Delta(Q_S)_{\max}$ je odhad chyby.

$(Q_S)_{\max}$ udává maximální hodnoty výkonové hustoty s odhadem chyby $\Delta(Q_S)_{\max}$ podle vztahu (6.26). Nejvyšší výkonové hustoty 21 W mm^{-2} bylo dosaženo při předpětí $U_W = 653 \text{ V}$ (proud svazku $I_B = 3 \text{ mA}$), kdy je svazek také nejvíce kruhový a rozložení se blíží normálnímu (gaussovu). Pro větší proudy se svazek rozšiřuje, maximum hustoty se přesouvá k okraji a vzniká tzv. dutý svazek.

7.11 Příčný profil při změně teploty katody

7.11.1 Úvod

Následující měření sleduje vliv měření sleduje vliv teploty na rozložení výkonu v příčném profilu svazku. Motivace je stejná jako v předchozím případě a výsledky jsou podkladem k dalšímu zkoumání a diskusi.

7.11.2 Uspořádání experimentu

Uspořádání a nastavení bylo stejné jako u předchozího experimentu. Vzhledem k tomu, že při změně teploty katody se mění i emisní proud, není-li současně upraveno i předpětí Wehneltova válce, bylo měření provedeno dvěma způsoby:

- se stálým předpětím $U_W = 525 \text{ V}$ a
- s konstantním proudem svazku $I_B = 10 \text{ mA}$.

7.11.3 Výsledky

Naměřené profily pro případ s konstantním předpětí U_W jsou na obrázku 7.19 a přehled odečtených hodnot je v tabulce 7.21. Nejvyšší výkonové hustoty ($14,7 \text{ W mm}^{-2}$) bylo dosaženo při žhavicím proudu $3,6 \text{ A}$, při kterém katoda emitovala proud $7,2 \text{ mA}$. Další zvyšování žhavicího proudu již nevedlo k nárůstu intenzity svazku, rostl pouze emisní proud. Pro případ konstantního proudu svazku jsou výsledky v obrázku 7.20 a tabulce 7.22. Zde bylo dosaženo téměř shodné maximální výkonové hustoty $15,1 \text{ W mm}^{-2}$ při podobném žhavicím proudu $3,7 \text{ A}$. Tendence je podobná jako v prvním případě. Vysvětlení zjištěných jevů není triviální a bude vyžadovat další podrobnější výzkum. Souvisí zřejmě se vzájemnými stochastickými interakcemi elektronů v blízkosti katody (tedy s vlivem prostorového náboje) [52, 64].

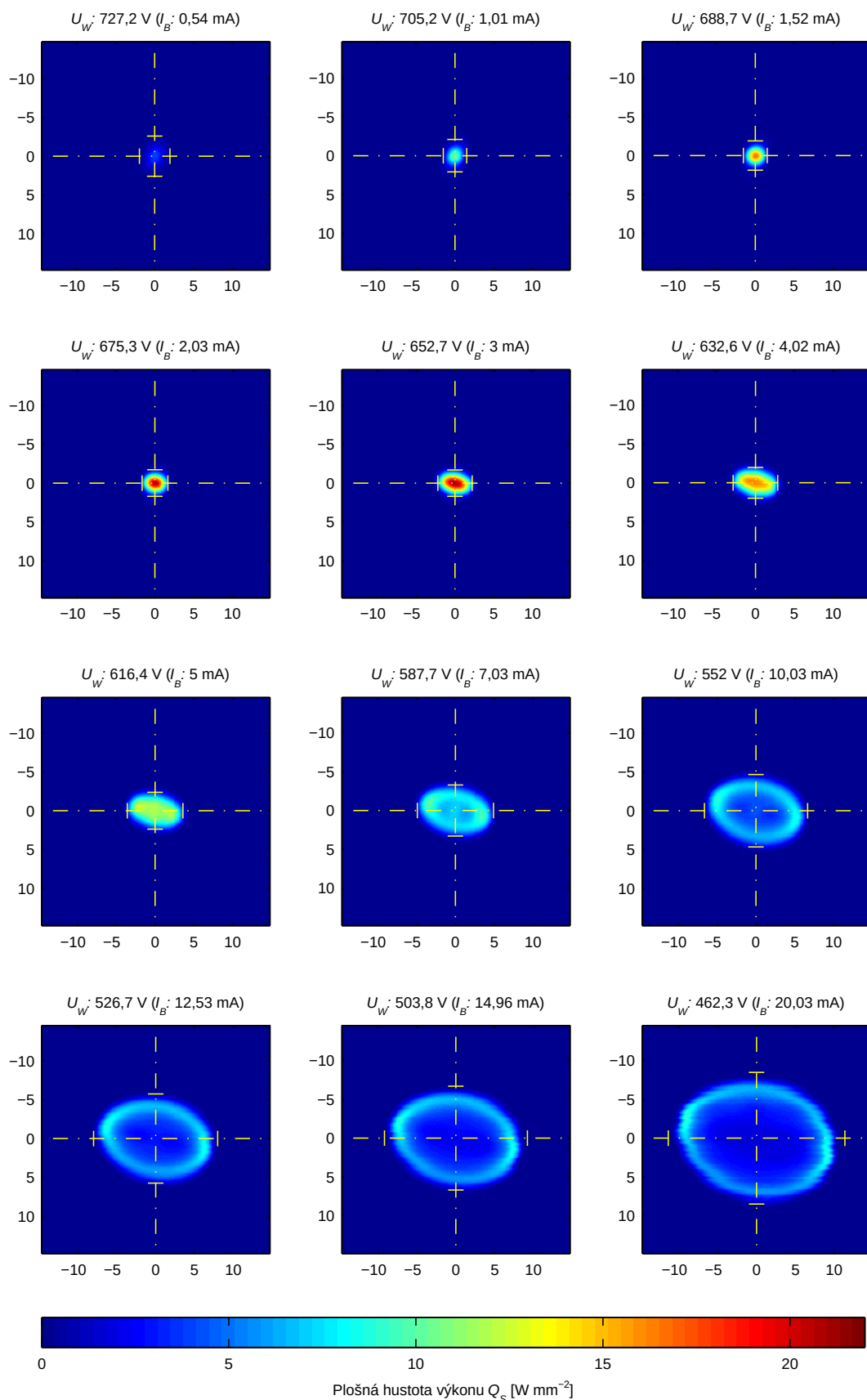
Tabulka 7.21: Příčné řezy svazkem pro různé žhavení katody při konstantním předpětí Wehneltu 525 V – přehled hodnot.

I_C A	I_B mA	d_X mm	d_Y mm	$(Q_S)_{\max}$ W mm^{-2}	Δ %
3,41	4,8	8,6	4,8	11,6	2,8
3,46	5,5	9,2	4,9	12,8	2,6
3,51	6,3	9,8	5,3	13,8	2,2
3,56	7,2	10,5	5,8	14,7	1,9
3,61	8,1	11,2	6,5	14,7	1,5
3,66	8,9	11,9	7,3	14,1	1,2
3,76	10,5	13,4	8,9	11,8	0,8
3,86	11,8	14,8	10,2	10,1	0,6
3,95	12,7	15,7	11,1	9,6	0,5
4,05	13,4	16,4	11,7	9,7	0,5
4,15	14,0	17,0	12,2	9,5	0,4
4,25	14,7	17,7	12,7	9,6	0,4

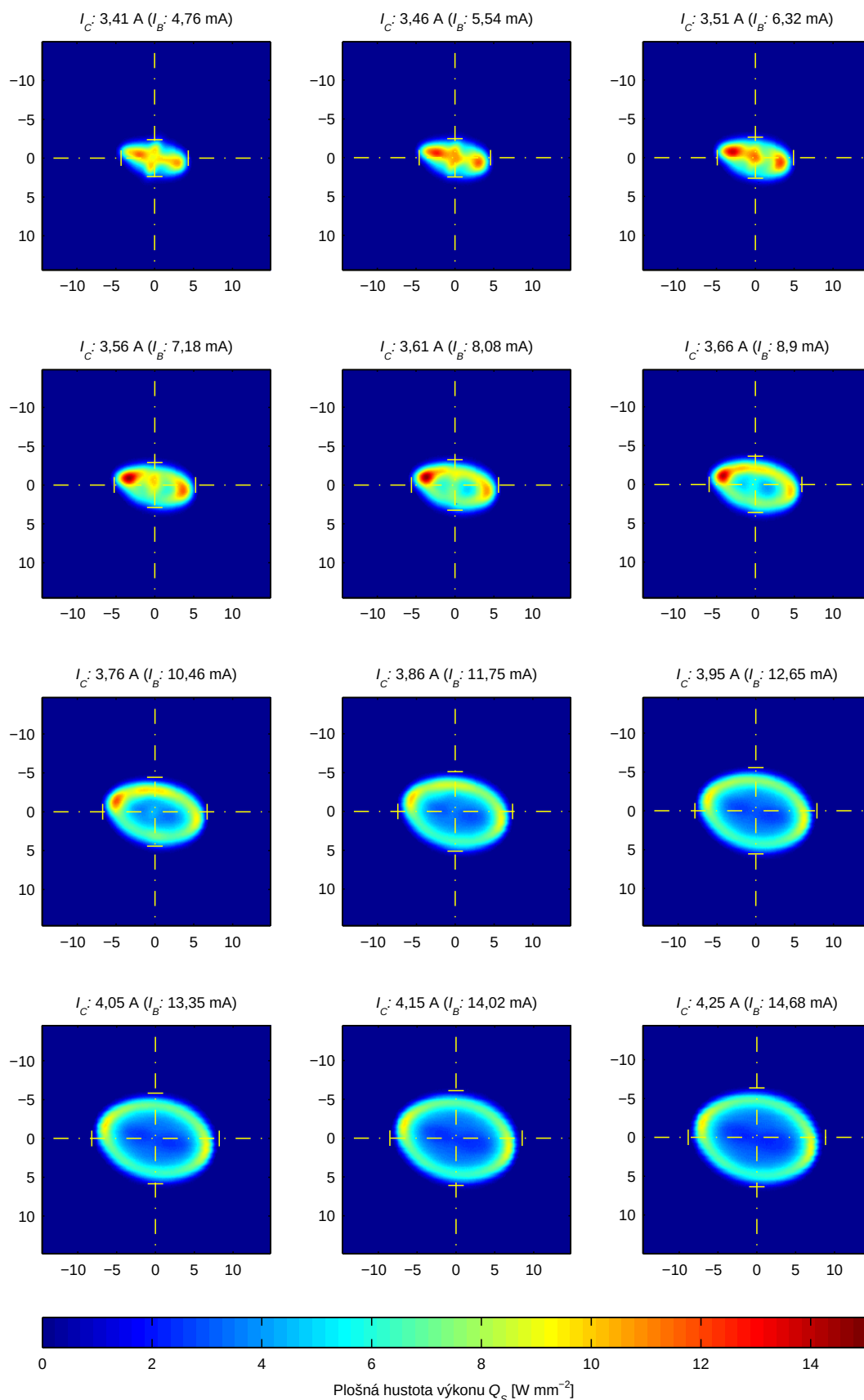
Tabulka 7.22: Příčné řezy svazkem pro různé žhavení katody při konstantním proudu svazku 10 mA – přehled hodnot.

I_C A	U_W V	d_X mm	d_Y mm	$(Q_S)_{\max}$ W mm^{-2}	Δ %
3,41	336,9	27,1	16,2	7,1	0,2
3,46	379,3	23,2	13,5	7,5	0,4
3,51	414,7	20,0	11,4	8,5	0,5
3,56	446,7	17,2	9,7	10,9	0,7
3,61	473,9	15,2	8,6	14,2	0,9
3,66	494,9	13,9	8,2	15,1	0,9
3,71	512,0	13,2	8,2	14,2	1,0
3,76	524,5	12,9	8,3	12,6	0,9
3,81	533,7	12,8	8,6	11,0	0,9
3,86	539,5	12,9	8,8	10,1	0,8
3,91	544,7	13,0	9,0	9,7	0,8
3,95	547,7	13,1	9,1	9,7	0,8

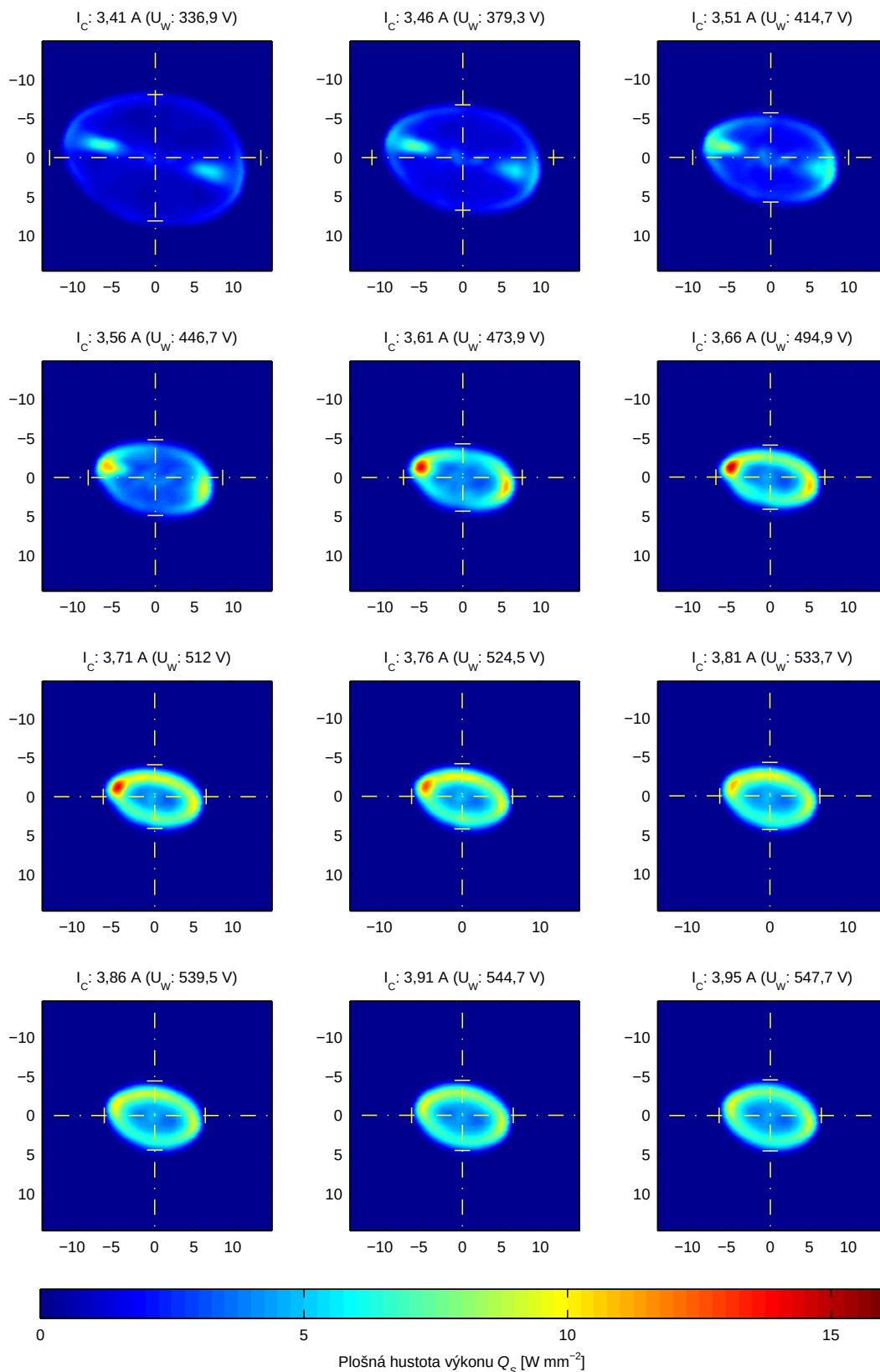
Poznámka: I_C je žhavicí proud, I_B je proud svazku, U_W je předpětí Wehneltu, d_X a d_Y jsou rozměry svazku, $(Q_S)_{\max}$ je maximální hodnota hustoty výkonu, Δ je odhad chyby.



Obrázek 7.18: Příčné profily svazku v závislosti na předpětí Wehneltova válce. Měřeno při energii 50 keV a žhavicím proudu 4,0 A v pracovní vzdálenosti 105 mm při vypnuté fokusační čočce. Předpětí Wehneltova válce U_W a odpovídající proudy svazku I_B jsou uvedeny nad obrázky. Nepopsané osy x a y jsou v milimetrech.



Obrázek 7.19: Příčné profily svazku pro různé žhavení katody při konstantním předpětí Wehneltova válce. Měřeno při energii 50 keV a předpětí Wehneltu 525 V v pracovní vzdálenosti 105 mm při vypnuté fokusační čočce. Žhavicí proud katody I_C a odpovídající proud svazku I_B jsou uvedeny nad obrázky. Nepopsané osy x a y jsou uvedeny v milimetrech.



Obrázek 7.20: Příčné profily svazku pro různé žhavení katody při konstantním proudu svazku. Měřeno při energii 50 keV a proudu svazku 10 mA v pracovní vzdálenosti 105 mm při vypnuté fokusační čočce. Žhavicí proud katody I_C a předpětí Wehneltu U_W jsou uvedeny nad obrázky. Nepopsané osy x a y jsou uvedeny v milimetrech.

7.12 Určení optimálního žhavicího proudu katody

7.12.1 Úvod

Při tomto experimentu jsem hledal vhodné kritérium pro nalezení optimálního provozu katody. Jak bylo uvedeno výše, vlastnosti termoemisního elektronového zdroje se zlepšují s jeho teplotou, ovšem za cenu zkrácení jeho životnosti, a proto se v praxi vždy hledá určitý kompromis. Důležitá je závislost na proudu svazku, protože pro menší emisní proudy bude vhodné jiné nastavení než pro proudy vysoké.

7.12.2 Uspořádání experimentu

Vlastnosti zdroje elektronů je možno dobře posoudit pomocí BPP (jeho určením se zabývá § 6.3.4). K jeho stanovení jsem nasnímal sadu podélných profilů pro široký rozsah proudů svazku a různé žhavicí proudy katody. Parametry profilů jsou uvedeny v tabulce 7.23 spolu s výchozími podmínkami experimentu. Vzhledem k počtu nasnímaných profilů jsou zde pro ilustraci uvedeny pouze dva (viz obr. 7.21).

7.12.3 Výsledky

Všechny profily byly zpracovány podle § 6.3.3 a § 6.3.4 a získané hodnoty BPP byly vyneseny do obr. 7.22. Získané závislosti odpovídají předpokladu, že se zvyšováním žhavicího proudu (a tedy i teploty katody) dochází ke zlepšování vlastností zdroje až po určitou hranici. Po jejím překročení již kvalita dále neroste a pouze se zkracuje životnost vlákna. Současně je ze sítě křivek vidět, že pro vyšší proudy svazku je nutný vyšší žhavicí proud, nicméně kvalita svazku i tak klesá.

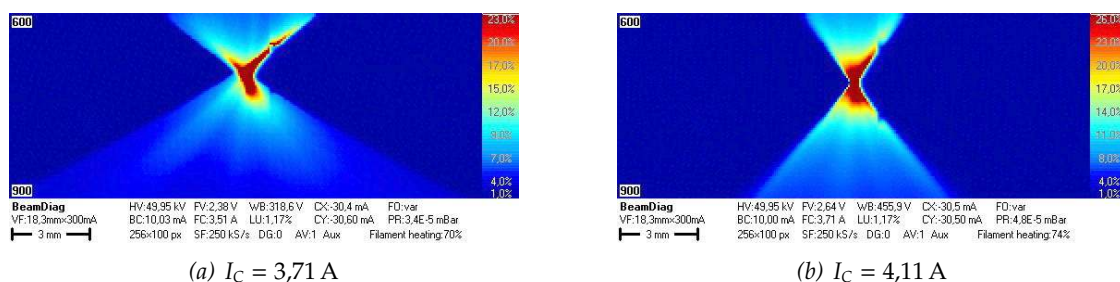
Kompromisní nastavení žhavení s ohledem na kvalitu svazku a životnost katody vyžaduje volbu pracovního bodu v blízkosti ohybu uvedených charakteristik. Jako objektivní kritériu pro volbu tohoto bodu jsem zvolil relativní nárůst BPP oproti minimální hodnotě BPP_0 (například o 10 %). Naměřené hodnoty jsem proložil křivkou podle vztahu:

$$BPP_a(I_C) = BPP_0 \left[1 + k_1 e^{-k_2(I_C - I_{C0})} \right], \quad (7.5)$$

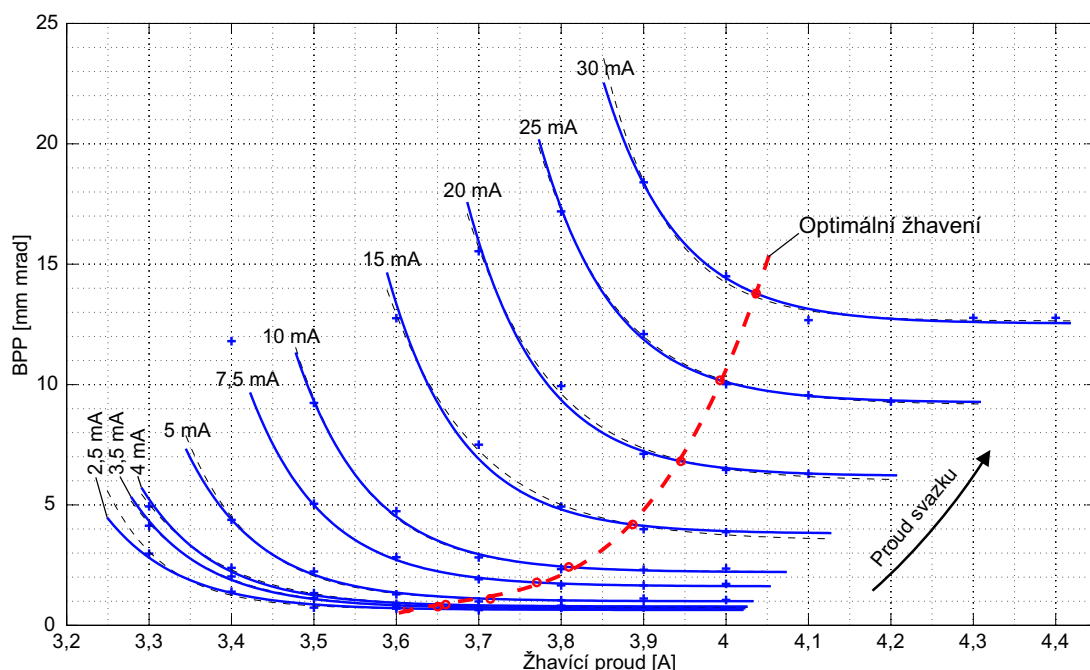
kde I_C je proud žhavení katody, BPP_0 je minimální hodnota BPP, k_2 je „tvarový“ koeficient a I_{C0} je proud žhavení, při kterém BPP vzroste na $(1 + k_1)$ násobek BPP_0 . Výsledky fitování pro $k_1 = 0,1$ odpovídající 10% nárůstu BPP jsou shrnuty v tabulce 7.24. Fitování bylo provedeno metodou nejmenších čtverců, zbytková průměrná chyba vztažená k BPP_0 je uvedena v posledním sloupci.

Tabulka 7.23: Podmínky při experimentálním určování optimálního žhavicího proudu katody.

Energie svazku	50 keV
Proud svazku	rozsah 2,5–30 mA
Detektor	Faradayova sonda se štěrbinovou clonou širokou 50 μm
Pracovní vzdálenost	105 mm (měřeno od čelní plochy trysky)
Katoda	vlásenková z Wolframového drátu $\phi 0,15$ mm
Stav katody	nová (nepoužitá)
Šířka zorného pole	14 až 20 mm (podle proudu svazku)
<i>Parametry snímaných profilů</i>	
Počet bodů	256
Rozsah fokusačních proudů	600 až 900 mA
Počet bodů proudové osy	100
Rozsah žhavicích proudů	3,0 až 4,4 A
Proudy svazku	2,5; 3,5; 4,0; 5,0; 7,5; 10; 15; 20; 25 a 30 mA
Celkový počet profilů	96



Obrázek 7.21: Příklad dvou profilů svazku pro stanovení optimálního žhavení katody. Proud svazku 10 mA, šířka zorného pole 18,3 mm.



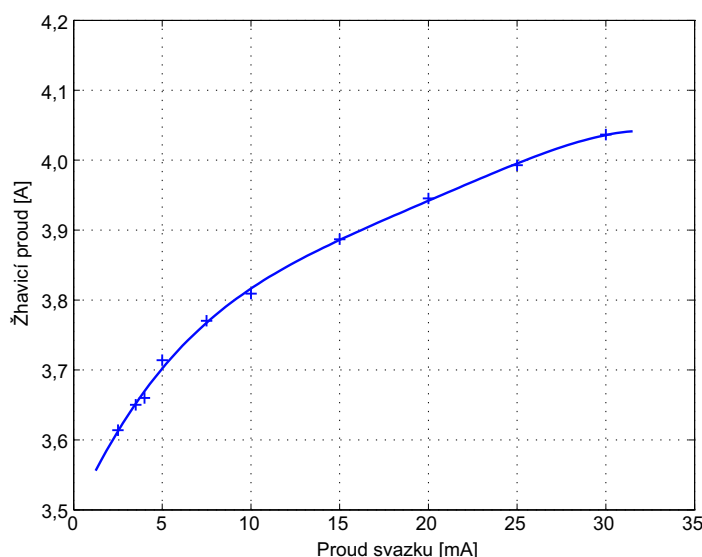
Obrázek 7.22: Závislost BPP na žhavicím proudu katody I_C a proudu svazku I_B pro novou katodu. Křivka optimálního žhavení (červeně) určena pro 10% zvýšení BPP. Křivky podle tabulky 7.25 jsou vyneseny plnou čarou, podle tabulky 7.24 čárkovaně.

Tabulka 7.24: Výsledky fitování výrazu (7.5).

I_B mA	BPP ₀ mm mrad	k_2 –	I_{C0} A	rel. chyba %
2,5	0,67	14,25	3,55	7,7
3,5	0,69	10,60	3,67	4,7
4,0	0,74	10,10	3,70	3,8
5,0	1,02	12,20	3,69	6,4
7,5	1,61	11,08	3,78	3,3
10,0	2,23	11,68	3,80	4,0
15,0	3,52	9,19	3,96	2,5
20,0	5,99	9,80	3,98	2,2
25,0	9,15	10,44	4,01	0,8
30,0	12,64	12,98	4,02	1,7

Tabulka 7.25: Výsledky fitování výrazu (7.5) s $k_2 = 11,23$.

I_B mA	BPP ₀ mm mrad	I_{C0} A	rel. chyba %
2,5	0,64	3,61	10,0
3,5	0,71	3,65	5,1
4,0	0,78	3,66	5,1
5,0	1,00	3,71	6,8
7,5	1,62	3,77	3,4
10,0	2,20	3,81	4,1
15,0	3,81	3,89	4,6
20,0	6,20	3,95	3,0
25,0	9,25	3,99	1,0
30,0	12,53	4,04	1,9



Obrázek 7.23: Závislost optimálního žhavicího proudu katody I_C na proudu svazku I_B pro novou katodu.

Z výsledků je vidět, že velikost koeficientu k_2 je pro všechny proudy svazku přibližně stejná. Proto byl nahrazen průměrnou hodnotou ($\bar{k}_2 = 11,23$) a regrese byla provedena znovu. Výsledky jsou v tabulce 7.25. Po porovnání obou tabulek můžeme prohlásit, že zavedením konstantního koeficientu k_2 nedojde k výraznému zvýšení chyby s ohledem na očekávatelnou přesnost měřící metody a vztah (7.5) může být zjednodušen. Nalezená závislost optimálního žhavicího proudu na proudu svazku je pro přehlednost vynesena do grafu 7.23.

7.13 Závislost optimálního žhavení katody na jejím stáří

7.13.1 Úvod

Výsledky z předchozího měření mají platnost pouze pro novou katodu. Vláknem postupem času mění svoje vlastnosti a lze předpokládat i změnu zjištěných charakteristik. Experiment uvedený v této části byl uspořádán stejně jako v předchozím případě, ale měření se omezilo na jednu vybranou hodnotu proudu svazku a bylo prováděno opakovaně v průběhu celé životnosti katody.

7.13.2 Uspořádání experimentu

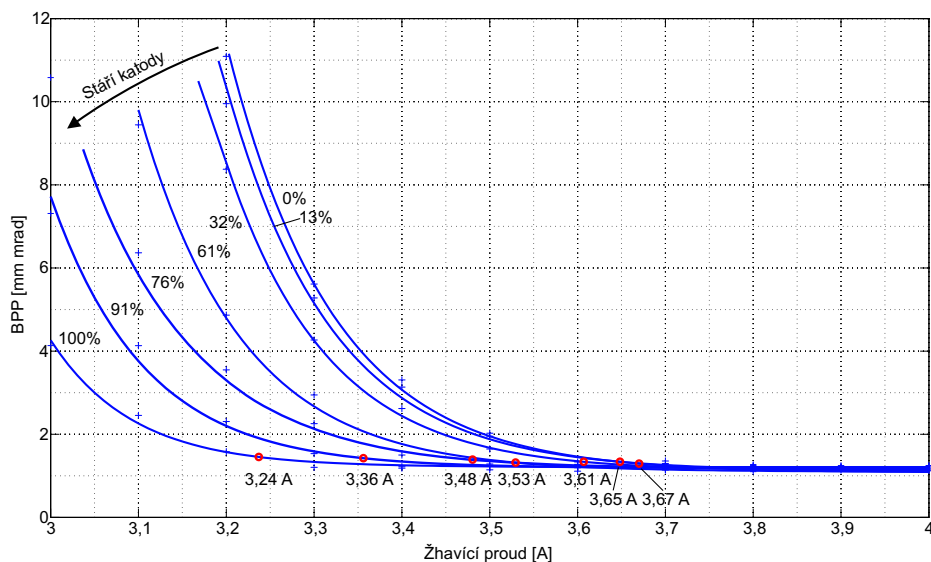
Pro zkrácení doby měření jsem vlákno v mezech žhavl na poměrně vysokou teplotu, takže celková životnost se zkrátila na 30 minut (běžná životnost je okolo osmi hodin). Parametry experimentu jsou shrnuty v tabulce 7.26, neuvedené parametry jsou stejné jako v tabulce 7.23.

7.13.3 Výsledky

Výsledky, zpracované stejně jako v předchozím případě, jsou vyneseny v grafu 7.24. Stáří katody je uvedeno relativně, kdy 100 % odpovídá vláknu těsně před přerušením. Je vidět, že minimální hodnota BPP, odpovídající nejvyšší dosažitelné kvalitě svazku, zůstala po celou dobu nezměněná. Během zeslabování vlákna docházelo k posunu křivek směrem k menším hodnotám žhavicího proudu, což odpovídá předpokladu. Kvalita svazku totiž závisí především na dosažené proudové hustotě na povrchu katody, která závisí na jeho

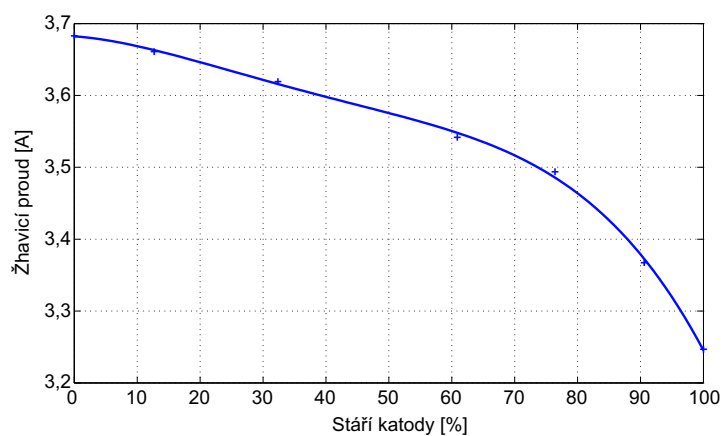
Tabulka 7.26: Podmínky při experimentálním určení závislosti optimálního žhavení katody na jejím stáří.

Energie svazku	50 keV
Proud svazku	5,0 mA
Stav katody	měřeno v průběhu celé životnosti
Žhavicí proud	4,0 A
Životnost katody	30 minut
Počet měření	7



Obrázek 7.24: Závislost BPP na žhavicím proudu katody I_C a relativním stáří katody pro proud svazku $I_B = 5$ mA.

teplotě; geometrie špičky vlákna, ze které se emitují elektrony, se během stárnutí katody prakticky nemění. Tenčí vlákno dosáhne stejné teploty za pomoci nižšího příkonu ve srovnání se silnějším. Pro praktické použití jsem z nalezených bodů sestavil závislost optimálního žhavicího proudu na relativním stáří katody (viz obr. 7.25).



Obrázek 7.25: Závislost optimálního žhavicího proudu katody I_C na relativním stáří katody pro proud svazku $I_B = 5$ mA.

7.14 Závislost kvality svazku na poloze vlákna katody

7.14.1 Úvod

Při tomto experimentu jsem hledal vztah mezi polohou vrcholu vlákna katody a kvalitou svazku. Cílem bylo zjistit, je-li výchozí poloha vlákna $d_Z = 1,4$ mm optimální (viz obr. 7.10) a jak lze polohou katody ovlivnit vlastnosti svazku při různém výkonu.

7.14.2 Uspořádání experimentu

K posouzení kvality svazku jsem opět použil BPP odečítaný z podélných profilů svazku. Měření proběhlo pro typické nastavení zařízení, tj. střední pracovní vzdálenost při urychlovacím napětí 50 kV s novou katodou (další parametry měření shrnuje tabulka 7.27). Katodu jsem ustavil do výchozí pozice pomocí přípravku s elektrickým měřicím hrotem (obr. 4.5b, str. 23). Při každé změně polohy vlákna bylo nutné zavzdušnit elektronovou trysku a nastavit polohu vlákna. Po opětovném vyčerpání zařízení jsem elektronový svazek před započítáním měření vystředil pomocí elektrického centrovacího systému. Tuto operaci bylo nutno opakovat po každé změně polohy vlákna, protože pootočením Wehneltu se systém rozcentroval.

7.14.3 Výsledky

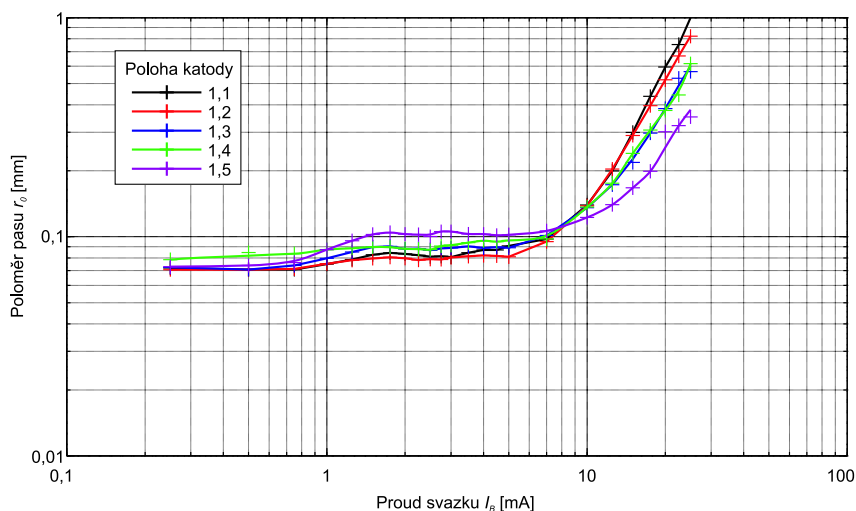
Naměřené profily jsem zpracoval způsobem popsáným v minulých kapitolách. Hodnoty přímo odečtené z obálky svazku jsou zachyceny v grafech 7.26 až 7.28, z nich vypočtené parametry v grafech 7.29 až 7.31. Ilustrativní vzorek naměřených profilů je vyobrazen v příloze C.

Ze závislosti 7.26 je vidět, že pro velmi malé proudy (do asi 1 mA) je nejmenší průměr svazku $2r_0$ prakticky nezávislý na poloze katody. Pro střední rozsah proudů (1 až 8 mA) lze lepších výsledků dosáhnout s více vysunutým vláknem, ale rozdíly jsou minimální. Pro velké proudy (nad 8 mA) je situace opačná: pro maximální testovaný proud 25 mA byl nejmenší poloměr svazku 3,5 mm pro vlákno umístěné 1,5 mm pod povrchem oproti rozměru svazku 10 mm pro vlákno v poloze 1,1 mm. Podle grafu 6.14 je možné odhadnout chybu určení r_0 zaviněnou nenulovým rozměrem měřicí clony. Chyba bude největší v oblasti malých proudů svazku (okolo 5,3 %).

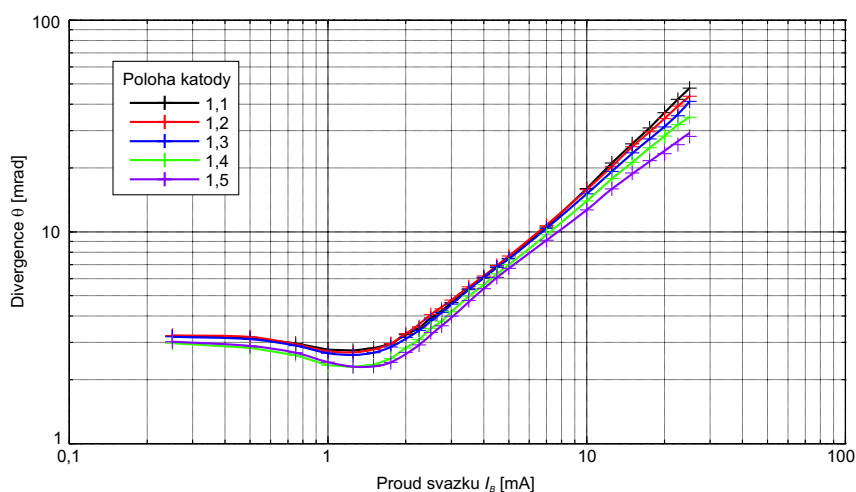
Divergence svazku θ (obr. 7.27) vykazuje minimum okolo 1,5 mA bez ohledu na polohu vlákna a je lepší (nižší) pro vlákno více zapuštěné. Tvar křivek je pro různé d_Z prakticky shodný, závislosti jsou pouze vertikálně posunuty (v logaritmickém zobrazení). Parametr BPP (obr. 7.29) je pro malé proudy (≤ 1 mA) konstantní (2 mm mrad) a pro střední proudy zvolna roste bez ohledu na d_Z . Pro proudy nad 7 mA roste rychleji pro více vysunutě

Tabulka 7.27: Podmínky při experimentálním určování závislosti kvality svazku na poloze vlákna katody

Energie svazku	50 keV
Proud svazku	rozsah 0,5–25 mA
Detektor	Faradayova sonda se šterbinovou clonou širokou 40 μ m
Pracovní vzdálenost	105 mm (měřeno od čelní plochy trysky)
Katoda	vlásenková z Wolframového drátu $\phi 0,15$ mm
Poloha vlákna	1,1 až 1,5 mm (po 0,1 mm – měřeno podle obr. 7.10)
Žhavicí napětí	3,25 V
Parametry snímaných profilů	
Počet bodů	256
Šířka zorného pole	5 až 17 mm (podle proudu svazku)
Rozsah fokusačních proudů	650 až 800 mA
Počet bodů proudové osy	100
Celkový počet profilů	5 $\times$ 24



Obrázek 7.26: Závislost poloměru svazku v nejužším místě (pasu) na proudu svazku a poloze katody.

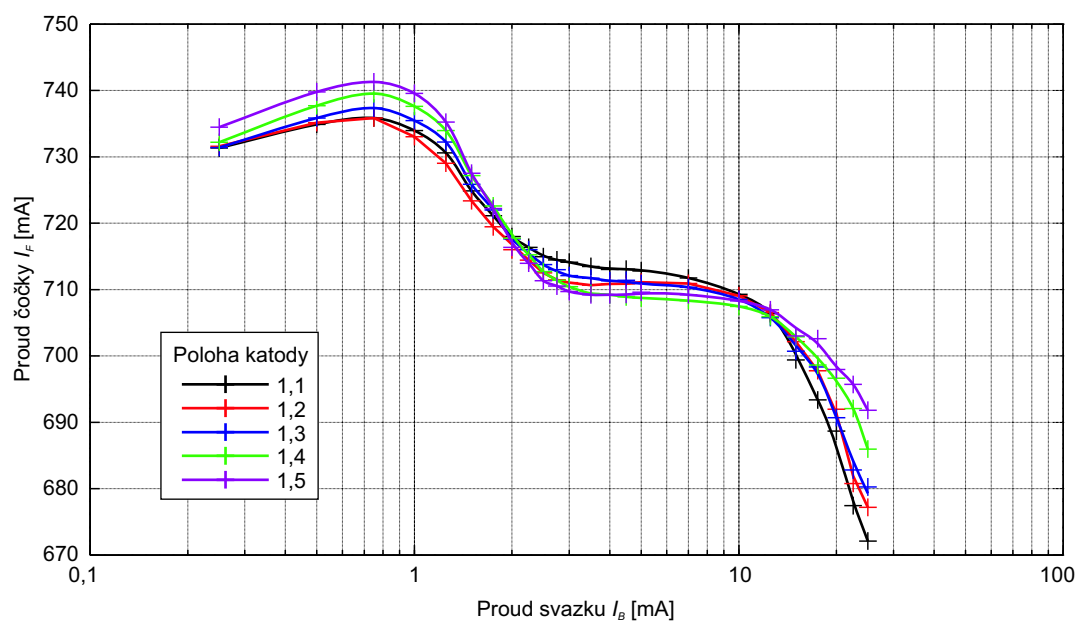


Obrázek 7.27: Závislost divergence svazku θ na proudu svazku a poloze katody.

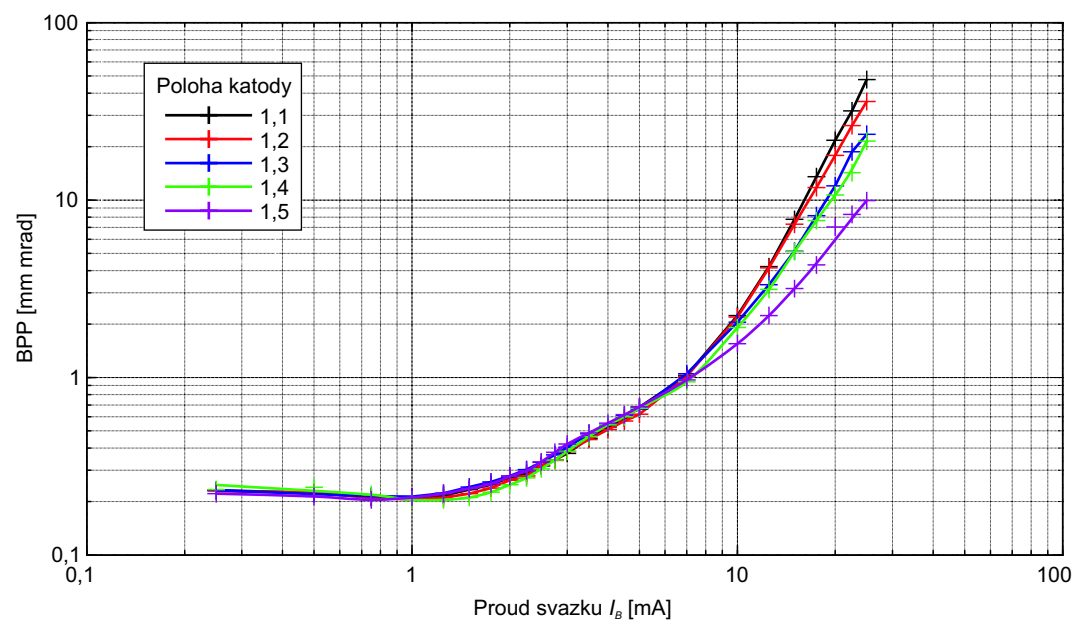
vlákno. Při maximálním testovaném proudu byl rozdíl asi pětinasobný. Z toho plyne, že pro malé a střední proudy je poloha vlákna prakticky lhostejná, ale pro velké proudy je výhodnější katodu více zapustit. Omezující faktor je maximální proud, který je schopna katoda dodat a který klesá se zapuštěním vlákna.

V naměřených profilech jsem kromě zmíněných údajů určil i maximální hodnotu lineární výkonové hustoty Q_L (obr. 7.30). Trend Q_L je ve shodě s průběhy BPP. Nejvyšších hodnot Q_L bylo dosaženo při proudu okolo 10 mA. Absolutně nejvyšší hodnota byla asi $3,7 \cdot 10^3 \text{ W mm}^{-1}$. Podle vztahu (6.20) byl vypočten odhad maximální plošné výkonové hustoty ve středu svazku Q_S , který je vyneseno do grafu 7.31. Maxima ($1,4$ až $1,7 \cdot 10^4 \text{ W mm}^{-2}$) je dosaženo pro všechny polohy katody v okolí 7 mA, pro vyšší proudy hodnota Q_S rychle klesá, protože roste průměr svazku.

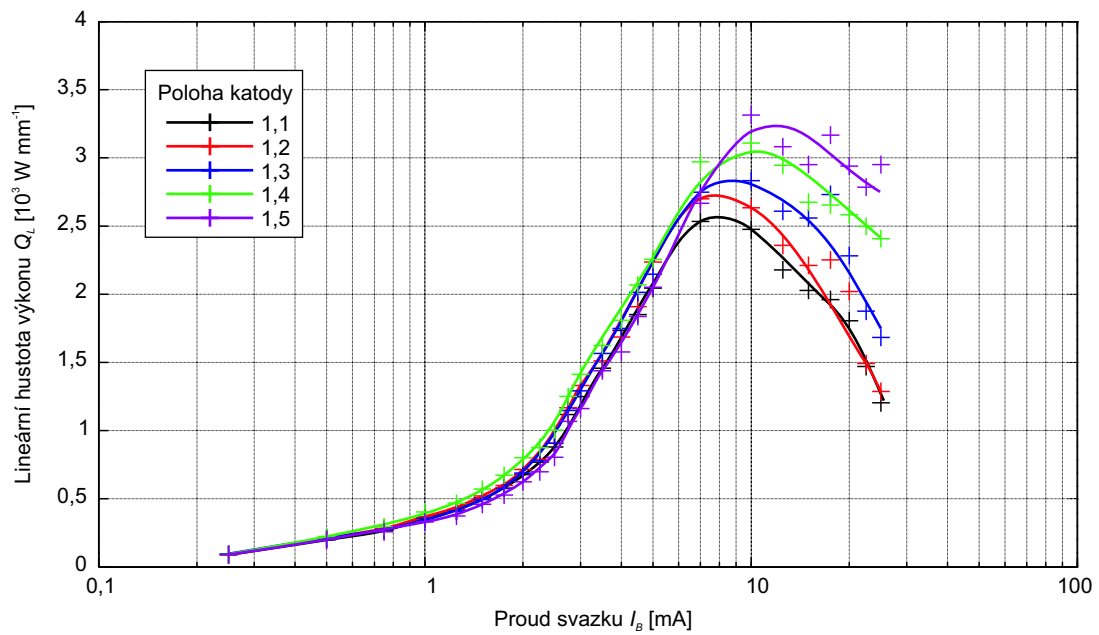
Změna polohy katody se také projeví na velikosti proudu fokusační čočky potřebného k zaostření svazku do dané roviny. Větší vysunutí katody je nutné kompenzovat snížením proudu čočky. Blíže se závislostí fokusačního proudu na proudu svazku zabývá experiment 7.15.



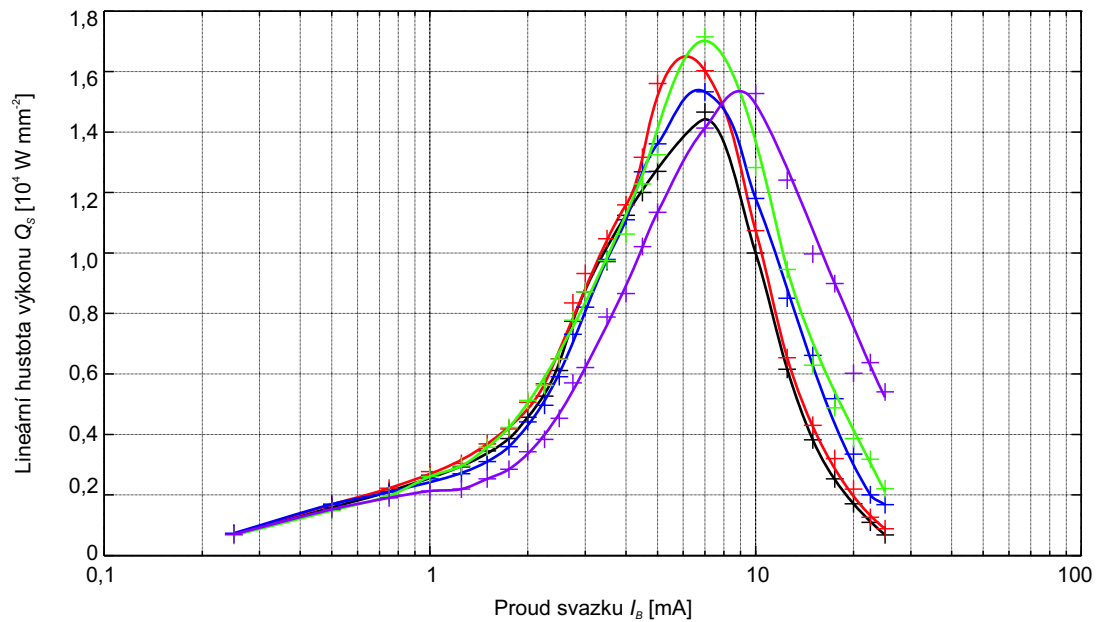
Obrázek 7.28: Závislost fokusačního proudu I_F na proudu svazku a poloze katody.



Obrázek 7.29: Závislost BPP na proudu svazku a poloze katody.



Obrázek 7.30: Závislost maxima lineární výkonové hustoty Q_L na proudu svazku a poloze katody.



Obrázek 7.31: Závislost odhadu maxima plošné výkonové hustoty Q_S na proudu svazku a poloze katody.

7.15 Fokusační křivky

7.15.1 Úvod

Hledání správného zaostření elektronového svazku je jeden z nejčastějších úkolů, před kterými stojí obsluha zařízení. Situaci komplikuje závislost na řadě faktorů. Ostření je třeba korigovat při změně pracovní vzdálenosti a/nebo urychlovacího napětí (viz vztah (6.10)). Kromě toho byla empiricky vysledována závislost na velikosti proudu svazku, která souvisí se změnou polohy virtuálního zdroje elektronů při změně potenciálu řídicí elektrody – Wehneltova válce.

Následující experiment se zabývá závislostí optimálního fokusačního proudu na pracovní vzdálenosti a proudu svazku. Naměřené závislosti jsou podrobeny další analýze za účelem určení konstanty použité magnetické čočky (člen k_F ve výrazu 6.10) a polohy virtuálního zdroje elektronů. Tyto údaje jsou důležité pro praktické využití zařízení, pro modelování optické soustavy a jako podklad pro teoretické studium chování dané elektronové trysky.

7.15.2 Uspořádání experimentu

Faradayovu sondu se šterbinovou clonou jsem umístil do vybraných pracovních vzdáleností a měřil podélné profily svazku pro celý pracovní rozsah proudu svazku. Měření probíhalo se stacionárním detektorem změnou budícího proudu čočky. Pro posouzení astigmatismu soustavy jsem měření provedl pro tři různé úhly natočení šterbiny detektoru. Optimální proud čočky potřebný k zaostření do roviny detektoru jsem stanovil podle polohy pasu naměřené obálky svazku. Parametry měření jsou uvedeny v tabulce 7.28.

Tabulka 7.28: Podmínky při měření fokusačních křivek.

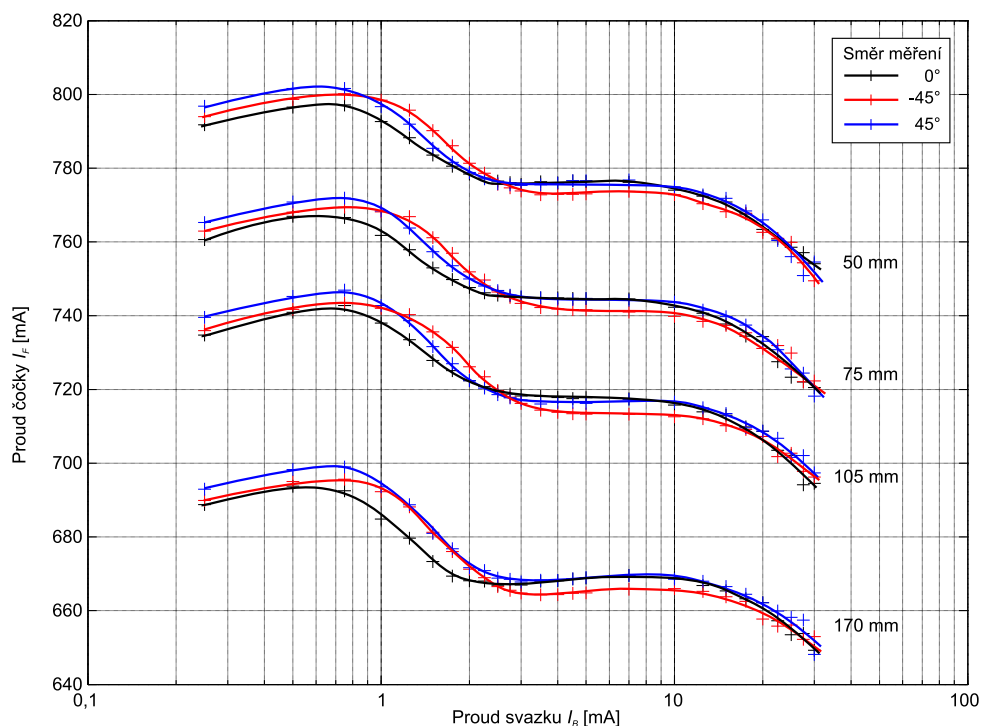
Energie svazku	50 keV
Proud svazku	0,25 až 30 mA
Pracovní vzdálenost	50; 75; 105 a 170 mm
Orientace clony detektoru	−45°; 0° a 45° (měřeno vůči ose V deflektoru)
<i>Parametry snímaných profilů</i>	
Počet bodů	256 (laterálně) × 100 (proudová osa)
Rozsah fokusačních proudů	550 až 950 mA (podle pracovní vzdálenosti)
Proud svazku	0,25 až 30 mA (26 hodnot)
Celkový počet profilů	$4 \times 3 \times 26 = 312$

7.15.3 Výsledky

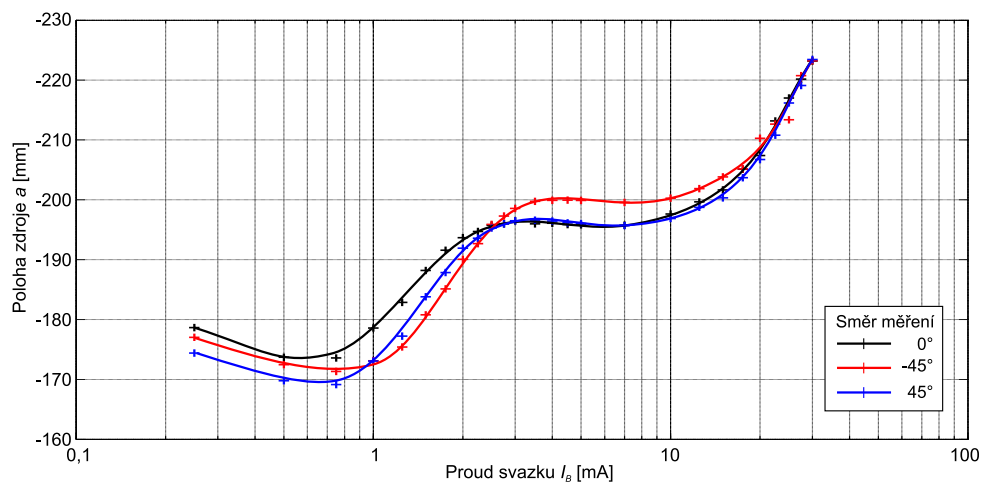
Naměřené profily jsem podrobil analýze popsané v odstavci 6.3.3 – *Obálka svazku*. Pro každý proud svazku, pracovní vzdálenost a orientaci detektoru jsem určil proud fokusační čočky odpovídající nejmenšímu průměru svazku. Výsledky jsou zpracovány do grafu 7.32. Při hledání polohy virtuálního zdroje a konstanty k_F použité čočky jsem vyšel ze zákonů geometrické optiky. Rovnice (6.9) dostane po dosazení tvar:

$$\frac{1}{z_L - z_Z(I_B, \phi)} + \frac{1}{z_D - z_L} = \frac{1}{k_F I_F(z_D, I_B, \phi)^{-2}}, \quad (7.6)$$

kde z_Z je neznámá poloha virtuálního zdroje, I_F je budící proud čočky, I_B je proud svazku, ϕ je orientace detektoru a z_D je poloha detektoru. Poloha středu čočky $z_L = -99$ mm byla stanovena numerickým výpočtem v programu EOD [3] (viz poznámka níže). Výpočet rovněž potvrdil, že použitou čočku je možno považovat za tenkou, protože vzdálenost obou hlavních rovin čočky byla pouze 0,1 mm, což je ve srovnání s používanou pracovní vzdáleností zanedbatelné.



Obrázek 7.32: Závislosti proudu čočky na proudu svazku a pracovní vzdálenosti pro 50 keV



Obrázek 7.33: Závislosti polohy virtuálního zdroje na proudu svazku pro 50 keV

Regresí celého souboru naměřených dat (pro všechny hodnoty I_B , z_D a ϕ) jsem určil velikost konstanty $k_F = 51,1 \pm 1,9 \text{ mm A}^2$. Pro tuto konstantu jsem pak z výrazu (7.6) vypočetl polohu virtuálního zdroje. Výsledek je vyneseno do grafu 7.33.

Z výsledků lze vyvodit, že při změně proudu svazku je nutné provést korekci ostření, aby bylo dosaženo maximálního fokusování svazku. To potvrzuje praktické zkušenosti. K nejvýraznější změně dochází v pásmu asi od 1 mA do 3 mA, kdy se virtuální zdroj posouvá směrem dozadu o asi 25 mm. Při dalším zvyšování výkonu je již jeho poloha téměř konstantní, ale po překročení hodnoty okolo 10 mA začne opět ustupovat. Z měření pro různé orientace sondy je patrný astigmatismus soustavy, který je dán zřejmě vlastním zdrojem elektronů, který není rotačně symetrický (vlásenková katoda).

Poznámka: Výpočet elektronové čočky v programu EOD provedl Ing. Ivan Vlček, PhD.

7.16 Shrnutí experimentálních výsledků

Tato kapitola přinesla soubor výsledků měření vlastností vychylovacího systému, elektrických charakteristik elektronové trysky a vlastností elektronového svazku.

V experimentu 7.2 jsem určil polohu středu vychylování $z_V = (-58,3; -55,4)$ mm při urychlovacím napětí 50 kV (pro jiné energie jsou hodnoty v tab. 7.2). Měřením zkreslení vychylovacího systému jsem určil koeficienty korekční funkce, která snižuje chybu nastavení polohy na 22,4 μm , což je asi 88krát méně, než bez korekce. Měření remanentního magnetismu deflektorů ukázalo, že způsobuje chyby polohování až 260 μm . Měření dlouhodobé stability vychylovacího systému prokázalo, že fluktuace svazku se pohybují pod hodnotou 1,5 μm během 20minutového intervalu.

Ve skupině měření elektrických vlastností triodové trysky jsem získal přenosové charakteristiky zachycující závislost emisního proudu na energii elektronů, žhavicím proudu katody a poloze vlákna katody a voltampérové charakteristiky přímo žhavené katody.

Třetí skupina výsledků se týká měření vlastností generovaného svazku, přičemž jednotícím prvkem je využití měření rozložení výkonové hustoty v řezu svazku. Prokázal jsem použitelnost metody měření profilů s použitím přeostržení čočky. Na trojici měření sérií příčných profilů svazku jsem ukázal změny profilu podél optické osy svazku a vliv žhavení katody a předpětí Wehneltu. Ze sérií podélných profilů svazku jsem odvodil změny kvality svazku (posuzované pomocí BPP) při změně žhavicího proudu a polohy katody. Vysledoval jsem závislost kvality svazku na provozním stáří katody. Určení fokusačních křivek dává návod k správné volbě buzení fokusační čočky pro danou pracovní vzdálenost s ohledem na proud svazku. Určení konstanty fokusační čočky a změn polohy virtuálního zdroje při změně proudu svazku umožňuje zavedení automatických korekcí.

Součástí práce se bohužel z časových důvodů nestalo ověření některých měřicích metod, konkrétně měření dynamických vlastností vychylovacího systému. Způsoby určení krátkodobé stability, mezní rychlosti přeběhu svazku a doby ustálení svazku v cílové poloze jsou pouze naznačeny v teoretické části.

8 Závěr

V předložené práci jsem se soustředil na dvě významná témata z oblasti řízení a diagnostiky technologických zařízení s elektronovým svazkem: na analýzu vlastností magnetického jednostupňového vychylovacího systému a na měření rozložení výkonové hustoty v příčných a podélných řezech svazku.

Ve 4. kapitole jsem se věnoval především popisu elektronové svářečky MEBW-60/2, která byla navržena a vyrobena během mého doktorského studia. Během řešení projektu jsem zastával funkci koordinátora a konstruktéra elektroniky a softwaru. Elektronová svářečka MEBW-60/2, jejíž sériovou výrobu nyní zajišťuje licenční výrobce – německá firma Focus GmbH, byla prezentována na několika mezinárodních výstavách, mimo jiné na přehlídce technologií svařování přidružené ke konferenci *Schweißtechnik und Fügetechnik – Schlüsseltechnologien der Zukunft* v Cáchách v roce 2007 [86], na výstavě *Vienna-Tek* v roce 2008 a na výstavě *Schweissen und Schneiden* v Essenu. Pro experimentální účely byl v ÚPT vyroben upravený kus elektronové svářečky MEBW-60/2-E, který byl vystaven na *Mezinárodním strojírenském veletrhu* v Brně v roce 2009.

V 5. kapitole jsem zavedl model vychylovacího systému a odvodil jsem jeho matematický popis. Navrhl jsem tři metody vyhodnocení polohy svazku. Pro určení geometrického zkreslení vychylování jsem ukázal postup srovnávající požadované a skutečné výchylky svazku. Podle výsledků jsou stanoveny koeficienty navržené korekční funkce, která umožní zmenšit zkreslení. Dále jsem popsal mechanismus vlivu magnetické hystereze deflektorů a uvedl jsem možné příčiny snížené časové stability výchylky. Zabýval jsem se dynamickým chováním vychylovacího systému a odvodil jsem vztahy pro maximální rychlost vychylování danou vlastnostmi budicího zdroje. Popsal jsem negativní vliv indukce vířivých proudů v blízkosti deflektorů a parazitních kapacit obvodu vychylovacích cívek.

V 6. kapitole jsem podobně rozebral problematiku měření profilů svazku. U příčných profilů svazku jsem popsal stanovení středu svazku, jeho rozměrů a tvaru obálky. Pro podélný profil jsem vytvořil postup pro určení osy a obálky svazku a pro získání charakteristických parametrů svazku: rozměru a polohy místa nejmenšího průměru svazku (pasu), divergence svazku a parametru BPP (Beam Parameters Product). Odvodil jsem vztahy pro transformaci profilů měřených s využitím přeostržení čočky. Popsal jsem úpravu signálu detektoru a vztahy pro výpočet plošné a lineární proudové hustoty svazku i s odhadem systematických chyby měření. V další části jsem se věnoval sběrové účinnosti sondy, elektronické zpracování signálu a výpočtům tepelného zatížení detektoru.

V 7. kapitole jsou uvedeny výsledky měření rozdělené do tří skupin. V první skupině jsou měření vlastností vychylovacího systému. Určení polohy pivotního bodu se uplatní například pro korekci změn zvětšení optické soustavy při změně pracovní vzdálenosti. Stanovení geometrického zkreslení umožnilo sestavit korekční vztah, který zvýšil přesnost polohování svazku téměř o dva řády. Měření hystereze magnetického obvodu ukázalo, že při nevhodném provozu vychylovacího systému mohou vzniknout chyby polohování až 260 μm . Měření dlouhodobé stability vychylovacího systému prokázalo, že fluktuace svazku se pohybují pod hodnotou 1,5 μm během 20minutového intervalu. Výsledky měření vychylovacího systému byly prezentovány na konferenci *Electron Beam Technologies EBT'2009* [118]. Jsou z části přímo aplikovatelné (korekce zkreslení) nebo mohou být podkladem pro další vývoj zařízení, například pro zvýšení stability budicích zdrojů, vytvoření modelu hystereze vychylovacího systému nebo zlepšení dynamiky vychylovacího systému.

Druhá skupina výsledků uvádí elektrické vlastnosti triodové elektronové trysky s termoemísí přímo žhavenou katodou. Získané přenosové charakteristiky zachycují závislost emisního proudu na energii elektronů, žhavicím proudu katody a poloze vlákna katody. Voltampérové charakteristiky katody pohlíží na termoemísí zdroj jako na nelineární odpor. Naleznou využití například při návrhu žhavicího zdroje s pokročilým řízením vedoucí k prodloužení životnosti vlákna a k predikci jeho přerušení [49].

Třetí skupina výsledků se týká měření vlastností generovaného svazku, přičemž jednotícím prvkem je využití měření rozložení výkonové hustoty v řezu svazku. Trojice měření sérií příčných profilů svazku demonstruje změny profilu podél optické osy svazku a vliv žhavení katody a předpětí Wehneltu. Ze sérií podélných profilů svazku je odvozena změna kvality svazku (posuzované pomocí faktoru BPP tj. Beam Parameters Product) při změně žhavicího proudu a polohy katody. Byla vysledována závislost kvality svazku na provozním stáří katody. Určení fokusačních křivek je praktická pomůcka k správné volbě buzení ostřicí čočky pro danou pracovní vzdálenost s ohledem na proud svazku. Měřením byl prokázán astigmatismus použitého zdroje elektronů. Určení konstanty fokusační čočky a změn polohy virtuálního zdroje při změně proudu svazku umožňuje zavedení automatických korekcí.

Uvedené výsledky umožňují reprodukovatelné seřízení elektronové trysky a usnadňují volbu procesních parametrů. Jsou však úzce spjaté s konkrétním zařízením a nejsou dosud zpracovány do podoby využitelné v běžné praxi. Hlavním cílem provedených měření byla demonstrace popisovaných měřicích metod, které se mohou stát podkladem k obecnějšímu studiu chování elektronově-optických zařízení podobného typu. Možná další témata jsou:

- vývoj integrované diagnostické jednotky svazku (Faradayova sonda jako stálá součást zařízení pro operativní diagnostiku svazku),
- automatizace seřizování elektronové optiky trysky (centrování, případně stigmatování svazku),
- hledání optimálního režimu trysky s cílem dosáhnout co nejvyšší kvality svazku,
- sestavení a implementace algoritmů pro automatické (případně i dynamické) zaostřování svazku v závislosti na urychlovacím napětí, proudu svazku, pracovní vzdálenosti a výchylce svazku,
- optimalizace provozu zdroje elektronů (katody) s odhadem konce životnosti,
- výzkum vlivu geometrie urychlovací části (katoda, Wehnelt, anoda) na kvalitu svazku,
- výzkum vlivu vychylovacího systému na profil elektronového svazku.

Přílohy

A. Lineární transformace a homogenní souřadnice

A.1 Lineární přenosová funkce

Lineární transformaci souřadnic v rovině popisuje přenosová funkce:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{Xx} & a_{Xy} & a_{X0} \\ a_{Yx} & a_{Yy} & a_{Y0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (\text{A.1})$$

kde x a y jsou původní souřadnice bodu, x' a y' jsou transformované souřadnice a $a_{X/Y}$ jsou koeficienty přenosové matice.

V případě, že je potřebné provést sérii lineárních transformací, můžeme zavést tzv. homogenní souřadnice. Výsledná přenosová matice pak bude čtvercová ve tvaru:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} a_{Xx} & a_{Xy} & a_{X0} \\ a_{Yx} & a_{Yy} & a_{Y0} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_A \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (\text{A.2})$$

Uvedená úprava umožňuje sérii po sobě jdoucích transformací nahradit jednou, jejíž matice je dána součinem jednotlivých přenosových matic:

$$A = \prod_{i=1}^N A_i, \quad (\text{A.3})$$

kde A_i jsou jednotlivé transformační matice.

A.2 Příklady transformací

Transformační matice pro translaci podle obr. 5.9b je:

$$A_t = \begin{pmatrix} 0 & 0 & t_x \\ 0 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (\text{A.4})$$

kde (t_x, t_y) je požadovaný posun. Změnu měřítka (viz obr. 5.9c) lze provést pomocí transformace:

$$A_m = \begin{pmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (\text{A.5})$$

kde $m = d_X/d_0$ je zvětšení. Změnu poměru stran (viz obr. 5.9d) zastane matice:

$$A_a = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & k_a & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (\text{A.6})$$

kde $k_a = d_Y/d_X$ je poměr stran. Rotaci o úhel ϕ (viz obr. 5.9e) zajistí matice:

$$\mathbf{A}_\phi = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (\text{A.7})$$

Zkosení o úhel Θ (viz obr. 5.9f) je možné pomocí matice:

$$\mathbf{A}_\Theta = \begin{pmatrix} 1 & \sin \Theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (\text{A.8})$$

B. Vzorové funkce pro MatLab

V této příloze je uvedeno nemnoho příkladů zdrojových textů v jazyce MatLab [70], které jsem používal ke sběru a zpracování dat při experimentech popsaných v kapitole 7.

B.1 Výpočet těžiště

Tato funkce počítá polohu těžiště průběhu určeného řádkovým vektorem y v bodech x (podle výrazu (2.6)). Je-li y matice, je vyhodnocena poloha těžiště pro každý řádek této matice a výsledek je vrácen v podobě sloupcového vektoru. Pro výpočet těžiště plošného útvaru slouží funkce **centroid2**.

```
function [xc] = centroid( x, y )
if (size(y,2)>1)
    xc=zeros(size(y,2),1);
    for i=1:size(y,2),
        xc(i)=sum( x.*y(:,i)' ) / sum( y(:,i) );
    end
else
    xc = sum( x.*y ) / sum( y );
end
```

B.2 Výpočet těžiště plošného útvaru

Funkce spočte polohu těžiště plošného útvaru popsaného intenzitní maticí p . Souřadnice sloupců matice jsou předány ve vektoru x , souřadnice řádků ve vektoru y .

```
function [xc,yc] = centroid2( x,y,p )
xc=centroid(x',sum(p)');
yc=centroid(y',sum(p'));
```

B.3 Výpočet šířky profilu dle kritéria $d_{4\sigma}$

Funkce počítá šířku průběhu profilu zadaného ve formě řádkového vektoru y v bodech x . Střed (těžiště) průběhu je předán v parametru xc . Je-li na místě parametru y předána matice namísto vektoru, je spočtena šířka pro každý řádek této matice a vrácena obálka profilu ve sloupcovém vektoru. Pro tento případ je xc vektor středů profilů pro každý řádek matice vypočtený například pomocí funkce **centroid**. Šířka profilu je vyhodnocena podle kritéria $d_{4\sigma}$ (výraz (2.5)).

```
function [res] = d4sigma( x, y, varargin )
if nargin<3
    xc=zeros(1,size(y,2));
else
    xc=varargin{1};
```

```

end
if ~isvector(y)
    res=zeros(size(y,2),1);
    for i=1:size(y,2),
        if isvector(x)
            x2=x;
        else
            x2=x(:,i)';
        end
        res(i) = 4 * sqrt( sum( y(:,i)'.*( x2-xc(i) ).^2 ) / sum( y(:,i) ) );
    end
else
    res = 4 * sqrt( sum( ( x-xc).^2 ).*y' ) / sum( y );
end
end

```

B.4 Odstranění šumu a pozadí

Funkce odečítá pozadí signálu a odstraňuje šum pomocí prahování profilu *p*. Profil se zpracovává po řádcích, což odpovídá jeho postupnému snímání. Pozadí signálu (stejnosečná složka) se vyhodnocuje pomocí průměrné hodnoty posledních šesti pixelů na každém řádku, kde se předpokládá, že již není žádný signál (nutno brát v úvahu při volbě snímací oblasti). Parametr *th* určuje relativní prahovou hodnotu pro odstranění šumu, vztaženou k maximu signálu pro každý řádek zvlášť.

```

function [res] = remback( p, th )
w = size(p,1);
h = size(p,2);
m = zeros(1,h);
res = p;
for i=1:h,
    m(i) = mean( p(w-5:w,i) );
    res(:,i) = p(:,i) - m(i);
    thr=th*max( p(:,i) );
    for j=1:w,
        if res(j,i)<thr
            res(j,i)=0;
        end
    end
end
end

```

B.5 Minimalizace funkce

Tento kód slouží jako příklad při řešení problému hledání minima dané funkce více proměnných. V tomto konkrétním příkladě je použita pro regresní analýzu metodou nejmenších čtverců při hledání koeficientů přenosové funkce pro korekci zkreslení vychylovacího systému. Je založena na použití MatLab funkce **fminsearch**, která hledá minimum zadaného výrazu (funkce) simplexní metodou [61] pro libovolný počet proměnných. Její prvním parametrem je odkaz na minimalizovanou funkci, druhým parametrem je počáteční odhad a třetí volitelný parametr je struktura dodatečných voleb ovlivňující průběh minimalizace. Minimalizovaná funkce může být ve zvláštním M-souboru nebo, jako v uvedeném příkladu, definovaná uvnitř daného zdrojového souboru (tzv. nested-function).

```
p=fminsearch( @errfnc, A0, optimset('Display', 'Iter', ...
    'TolX', 1E-8, 'TolFun', 1e-8, 'MaxFunEvals', 200000, ...
    'MaxIter', 200000 ));

%% Error function
function err = errfnc( A~)
[X2,Y2] = transform( Xp-AX, Yp-AY, A~);
err = sum( sum( (X2-Xp).^2 + (Y2-Yp).^2 ) );
end
```

Jistá nevýhoda funkce **fminsearch** je, že argumentem minimalizované funkce může být pouze vektor, nikoliv matice. Protože v našem příkladě je tímto argumentem transformační dvouřádková matice, musí být vhodným způsobem upravena do formy vektoru.

B.6 Transformace polynomem prvního až pátého řádu

Tato funkce realizuje transformaci souřadnic x, y pomocí dvourozměrného polynomu prvního až pátého řádu (viz vztah (5.15)). Vstupní páry souřadnic mohou být zadány jako skalární hodnoty, ve formě vektorů nebo matic. Přenosové koeficienty jsou předány v parametru p ve formě vektoru namísto matice, z důvodu kompatibility s funkcí **fminsearch**, která dokáže pracovat pouze s vektory. Struktura vektoru p je v tabulce B.1. Funkce **transform** provede transformaci řádu odpovídající délce vektoru p (viz tab. B.2).

```
function [xT,yT]=transform(x,y,p)
lp=length(p);
if lp<=2
    p = [p 1 0 0 1];
end
xT = p( 1)+ p( 3)*x+p(5)*y;
yT = p( 2)+ p( 4)*x+p(6)*y;
if
    x2 = x.^2; y2 = y.^2;
    xT = xT + p( 7)*x2+p( 9)*x.*y+p(11)*y2;
    yT = yT + p( 8)*x2+p(10)*x.*y+p(12)*y2;
```

Tabulka B.1: Význam koeficientů vektoru $\mathbf{p}$ funkce **transform** podle vztahu (5.15).

p(1)	p(2)											
a_{U0}	a_{V0}											
p(3)	p(4)	p(5)	p(6)									
a_{Ux}	a_{Vx}	a_{Uy}	a_{Vy}									
p(7)	p(8)	p(9)	p(10)	p(11)	p(12)							
a_{Ux^2}	a_{Vx^2}	a_{Uxy}	a_{Vxy}	a_{Uy^2}	a_{Vy^2}							
p(13)	p(14)	p(15)	p(16)	p(17)	p(18)	p(19)	p(20)					
a_{Ux^3}	a_{Vx^3}	a_{Ux^2y}	a_{Vx^2y}	a_{Uxy^2}	a_{Vxy^2}	a_{Uy^3}	a_{Vy^3}					
p(21)	p(22)	p(23)	p(24)	p(25)	p(26)	p(27)	p(28)	p(29)	p(30)			
a_{Ux^4}	a_{Vx^4}	a_{Ux^3y}	a_{Vx^3y}	$a_{Ux^2y^2}$	$a_{Vx^2y^2}$	a_{Uxy^3}	a_{Vxy^3}	a_{Uy^4}	a_{Vy^4}			
p(31)	p(32)	p(33)	p(34)	p(35)	p(36)	p(37)	p(38)	p(39)	p(40)	p(41)	p(42)	
a_{Ux^5}	a_{Vx^5}	a_{Ux^4y}	a_{Vx^4y}	$a_{Ux^3y^2}$	$a_{Vx^3y^2}$	$a_{Ux^2y^3}$	$a_{Vx^2y^3}$	a_{Uxy^4}	a_{Vy^4}	a_{Uy^5}	a_{Vy^5}	

Tabulka B.2: Řád transformace a odpovídající délka vektoru **p** funkce **transform**.

1. řád	2. řád	3. řád	4. řád	5. řád
6	12	20	30	42

```

end
if lp>12
    x3 = x2.*x; y3 = y2.*y;
    xT = xT + p(13)*x3+p(15)*x2.*y+p(17)*x.*y2+p(19)*y3;
    yT = yT + p(14)*x3+p(16)*x2.*y+p(18)*x.*y2+p(20)*y3;
end
if lp>20
    x4 = x3.*x; y4 = y3.*y;
    xT = xT + p(21)*x4+p(23)*x3.*y+p(25)*x2.*y2+p(27)*x.*y3+p(29)*y4;
    yT = yT + p(22)*x4+p(24)*x3.*y+p(26)*x2.*y2+p(28)*x.*y3+p(30)*y4;
end
if lp>30
    x5 = x4.*x; y5 = y4.*y;
    xT = xT + p(31)*x5+p(33)*x4.*y+p(35)*x3.*y2+p(37)*x2.*y3+ ...
        p(39)*x.*y4+ p(41)*y5;
    yT = yT + p(32)*x5+p(34)*x4.*y+p(36)*x3.*y2+p(38)*x2.*y3+ ...
        p(40)*x.*y4+ p(42)*y5;
end

```

B.7 Ovládání svářečky z prostředí MatLab

Pro prostředí MatLab jsem vyvinul sadu příkazů (*toolbox* v terminologii MatLabu), která umožňuje prostřednictvím kanálu DDE [74] využívat program DACPATH k řízení elektronové svářečky MEBW-60/2 (viz část 4.4). Vyjmenovávat všechny funkce by patrně postrádalo smysl, proto se v tomto pojednání omezíme jen na několik příkladů ilustrujících filozofii ovládání. Komunikace je zahájena zavoláním funkce **dac_open**, jejíž realizace je následující:

```

function dac_open
% DAC_OPEN opens communication with MEBW control software
global DAC_BEAMDIAG DAC_REMOTE DAC_MEASURE DAC_DEFLDIAG
DAC_BEAMDIAG = ddeinit( 'dacpath', 'DDEBeamDiag' );
if (DAC_BEAMDIAG==0) error( 'Can''t connect to BeamDiag toolbox' ); end
DAC_REMOTE = ddeinit( 'dacpath', 'DDERemoteCtrl' );
if (DAC_REMOTE==0) error( 'Can''t connect to Remote Ctrl toolbox' ); end
DAC_MEASURE = ddeinit( 'dacpath', 'DDEMeasure' );
if (DAC_MEASURE==0) error( 'Can''t connect to Measure toolbox' ); end
DAC_DEFLDIAG = ddeinit( 'dacpath', 'DDEDeflDiag' );
if (DAC_DEFLDIAG==0) error( 'Can''t connect to DeflDiag toolbox' ); end
disp( 'DAC channel opened' );

```

Opakovaným voláním funkce **ddeinit** se postupně otevrou komunikační DDE kanály se všemi potřebnými nástroji programu DACPATH. Ukazatele (handles) těchto kanálů jsou uloženy do globálních proměnných DAC_BEAMDIAG, DAC_REMOTE atd. Párová funkce ukončující komunikaci je **dac_close**:

```

function dac_close
% DAC_CLOSE closes communication with MEBW control software
global DAC_BEAMDIAG DAC_REMOTE DAC_MEASURE DAC_DEFLDIAG
ddeterm( DAC_BEAMDIAG );
ddeterm( DAC_REMOTE );
ddeterm( DAC_MEASURE );
ddeterm( DAC_DEFLDIAG );

```

```
DAC_BEAMDIAG = 0;  
DAC_REMOTE = 0;  
DAC_MEASURE = 0;  
DAC_DEFLDIAG = 0;
```

Technicky probíhá komunikace DDE kanálem zasíláním textových příkazů, tzv. maker, pomocí MatLab funkce **ddeexec**. Příkladem může být funkce pro nastavení oblasti pro měření profilu svazku, jež se předává ve formě matice *area* se šesti prvky:

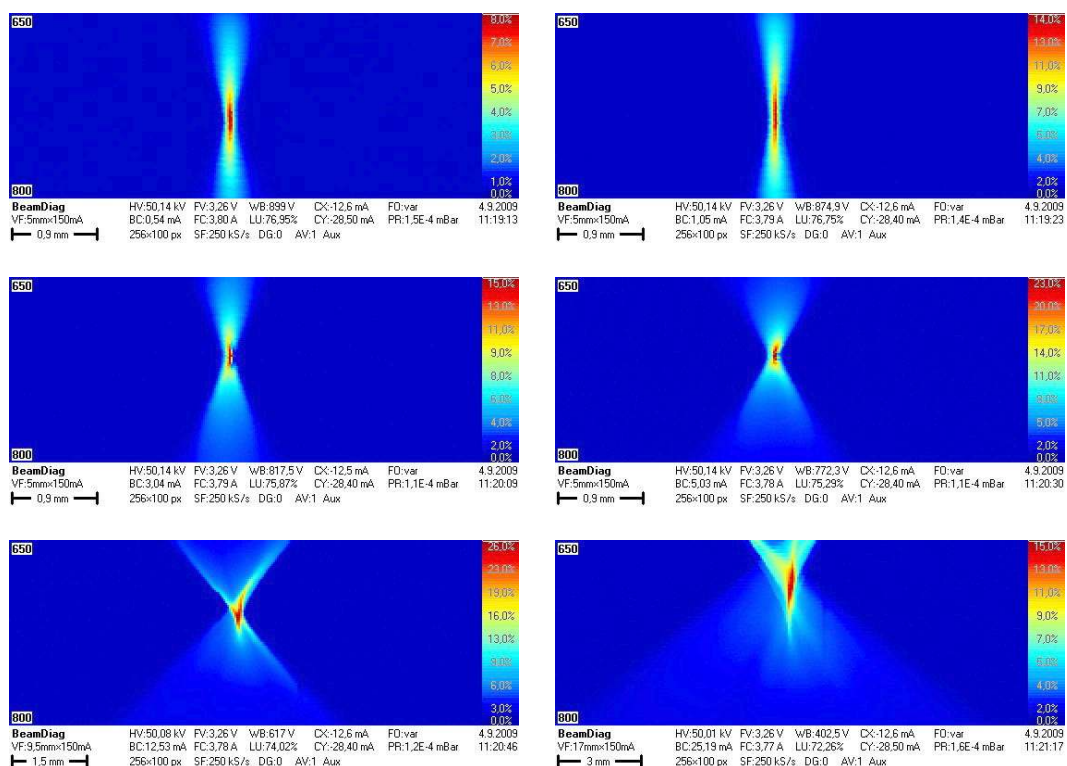
```
function [rc]=bd_setarea(area)  
  
% BD_SETAREA sets scanning area in BeamDiag tool box  
%  
% AREA matrix is defined as follows:  
% AREA(1,:) are coordinates of top-left corner of the scanning area ,  
% AREA(2,:) is horizontal vector ,  
% AREA(3,:) is vertical vector  
  
global DAC_BEAMDIAG  
  
arg=sprintf( 'SetArea(%g,%g,%g,%g,%g,%g)', area(1,1), area(1,2), area(2,1),...  
            area(2,2), area(3,1), area(3,2) );  
rc=ddeexec( DAC_BEAMDIAG, arg );
```

Funkce nejprve pomocí příkazu **sprintf** připraví textový řetězec obsahující všechny prvky matice *area*, který poté zašle otevřeným DDE kanálem nástroji BeamDiag. Ten doručený řetězec interpretuje a nastaví polohu a rozměry snímací oblasti. Párový příkaz, který zjistí nastavení této oblasti lze vytvořit takto:

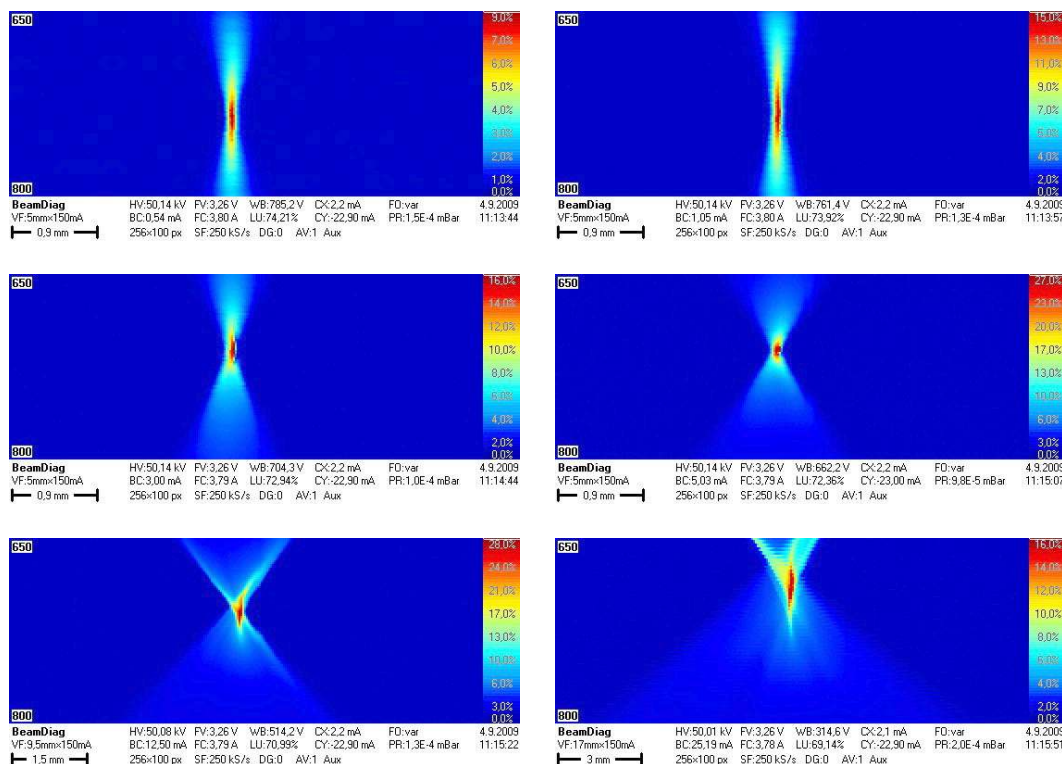
```
function [ area ]=bd_getarea;  
  
% BD_GETAREA retrieves scanning area from BeamDiag tool box  
%  
% Returns AREA matrix where  
% AREA(1,:) are coordinates of top-left corner of the scanning area ,  
% AREA(2,:) is horizontal vector ,  
% AREA(3,:) is vertical vector  
  
global DAC_BEAMDIAG  
  
rc=ddeexec( DAC_BEAMDIAG, 'GetArea' );  
if rc ~= 0  
    a=ddereq( DAC_BEAMDIAG, 'DDEResult', [1 0] );  
    area=[ a(1) a(2); a(3) a(4); a(5) a(6) ];  
else  
    area=[];  
end
```

Příjem odezvy programu byl realizován příkazem **ddereq**.

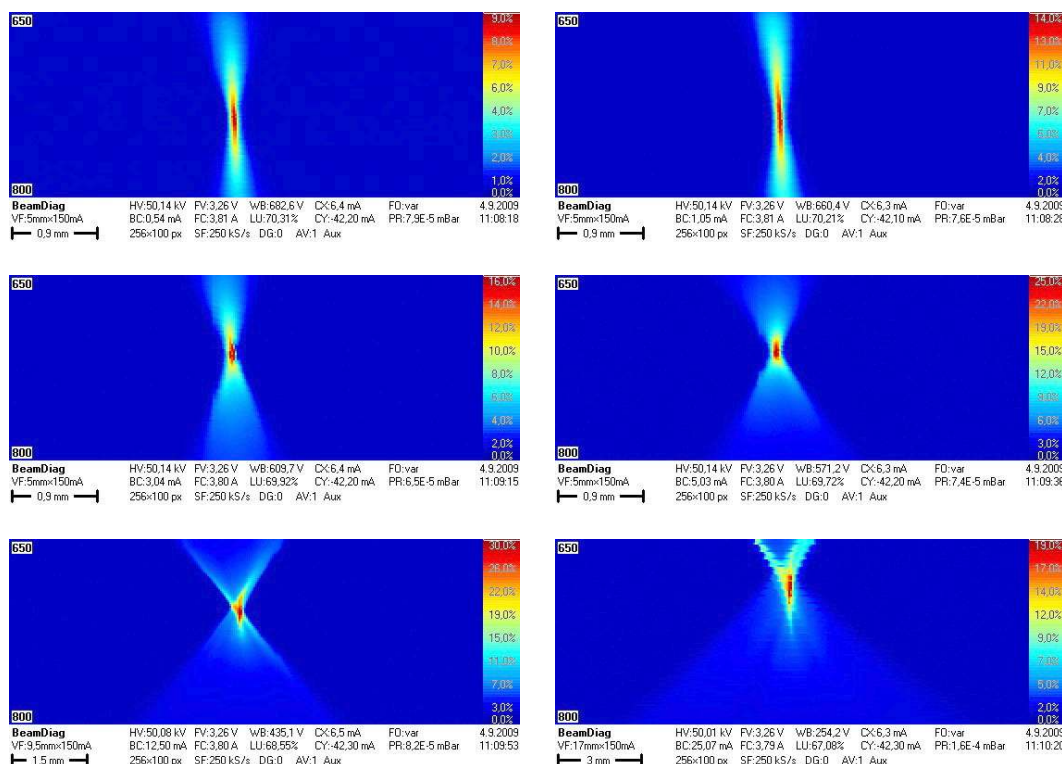
C. Profily pro určení kvality svazku v závislosti na poloze katody



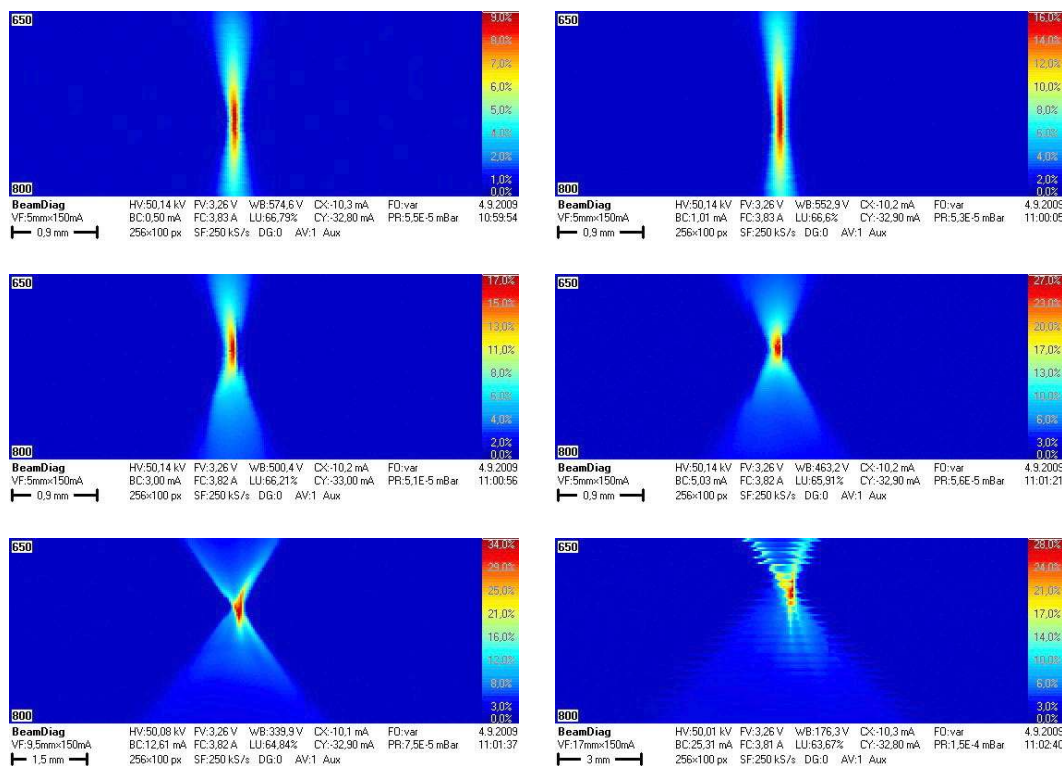
Obrázek C.1: Série profilů pro polohu katody 1,1 mm a proudy svazku 0,5; 1,0; 3; 5; 12,5 a 25 mA.



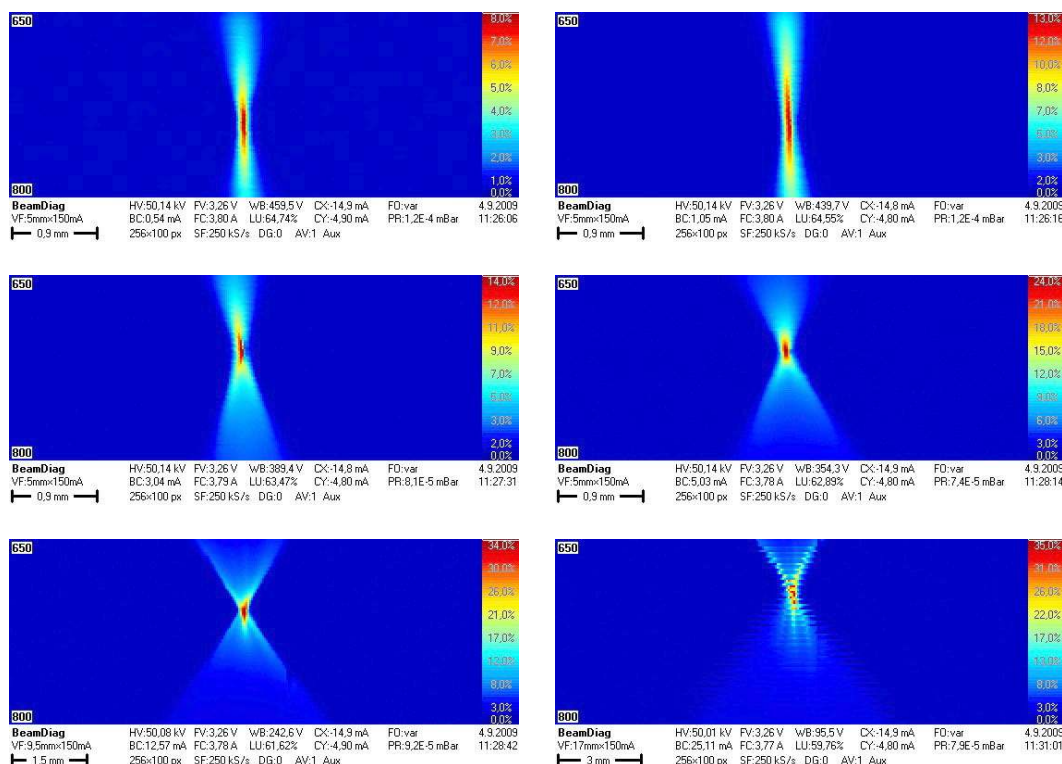
Obrázek C.2: Série profilů pro polohu katody 1,2 mm a proudy svazku 0,5; 1,0; 3; 5; 12,5 a 25 mA.



Obrázek C.3: Série profilů pro polohu katody 1,3 mm a proudy svazku 0,5; 1,0; 3; 5; 12,5 a 25 mA.



Obrázek C.4: Série profilů pro polohu katody 1,4 mm a proudy svazku 0,5; 1,0; 3; 5; 12,5 a 25 mA.



Obrázek C.5: Série profilů pro polohu katody 1,5 mm a proudy svazku 0,5; 1,0; 3; 5; 12,5 a 25 mA.

Literatura

- [1] ANKRON. *Standard Definition of Beam Width* [online]. [cit. 1. 2. 2009]. Dostupné z: http://www.ankron.com/TN8_Standard_Definition.html.
- [2] ARCAM AB. *Electron Beam Melting–RAPID MANUFACTURING IN METAL* [online]. [cit. 26. 9. 2008]. Dostupné z: <http://www.arcam.com/>.
- [3] B. LENCOVÁ. *EOD (Electron optical design) – software for design of charged particle optics devices* [online]. [cit. 31. 8. 2009]. Dostupné z: <http://www.lencova.com/>.
- [4] BACH, F. W. et al. Non-Vacuum Electron Beam Diagnostics. In [77], s. 52–58.
- [5] BAKER, R. J. – JOHNSON, B. P. Sweep circuit design for a picosecond streak camera. *Measurement Scientific Technologies*, 1994, s. 408–411.
- [6] BAKISH. Electron beam melting 1995 to 2005. In [75], s. 233–240.
- [7] BALLOU, G. *Handbook for Sound Engineers*. Burlington : Elsevier, 4th edition, 2008. ISBN 978-0-240-80969-4.
- [8] BÄRTLE, J. – LÖWER, T. – von DOBENECK, D. Electron beam welding beyond the ordinary scale. In [76], s. 41–45.
- [9] BELYAEV, G. et al. Tomography reconstruction of the intensity distribution in a beam cross-section using optical diagnostics. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2007, vol. 578, no. 1, s. 47–54.
- [10] BOSCH. *Controller Area Network (CAN) Specification – Version 2.0*. Robert Bosch GmbH, Stuttgart, 1991.
- [11] BRAVERMAN, V. – BELOZERCEV, V. – BASHENKO, V. Device for Automatic Seam Control. In [77], s. 100–103.
- [12] BUBLEY, A. – PANASYUK, V. – PARKHOMCHUK, V. – REVA, V. Measuring a hollow electron beam profile. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2004, A 532, s. 413–417.
- [13] BUCHWALDER, A. – ZENKER, R. Electron Beam Liquid Phase Surface Technologies for Component made from High Loaded Aluminium Materials. In [77], s. 138–141.
- [14] CAMBRIDGE VACUUM ENGINEERING. [online]. [cit. 23. 9. 2008]. Dostupné z: <http://www.camvaceng.com/>.
- [15] CANNON, J. *Encyclopedia of mathematics and its applications: The One-Dimensional Heat Equation*. Reading : Addison-Wesley, 1984. ISBN 0-521-30243-9.
- [16] DALKE, A. et al. Duplex Surface Treatment of Aluminium Alloys Using Electron Beam Surface Alloying. In [77], s. 128–131.
- [17] DANCE, B. G. I. – BUXTON, A. L. Surfi-Sculpt™: A New Electron Beam Processing Technology. In [76], s. 70–77.
- [18] DANĚK, L. Kalibrace vychylovacího pole litografu řady BS600 využitím režimu REM. In [78]. ISBN 80-239-2268-8.
- [19] DILTHEY, U. – DORFMÜLLER, T. Micro electron beam welding. *Microsystem Technologies*, 2006, 12, s. 626–631. ISSN 1432-1858.

- [20] DILTHEY, U. – MASNY, H. Diagnosis and Beam Measurement in Non-Vacuum Electron Beam Welding. In [76], s. 61–65.
- [21] DILTHEY, U. – GOUMENIOUK, A. – BÖHM, S. – WELTERS, T. Electron beam diagnostics: A new release of the diabeam system. *Vacuum*, 2001, vol. 62, no. 2–3, s. 77–85. ISSN 0042-207X.
- [22] DILTHEY, U. – GOUMENIOUK, A. – NAZARENKO, O. K. – AKOPJANTZ, K. S. Mathematical simulation of the influence of ion-compensation, self-magnetic field and scattering on an electron beam during welding. *Vacuum*, 2001, vol. 62, no. 2–3, s. 87–96. ISSN 0042-207X.
- [23] DILTHEY, U. – BRANDENBURG, A. – SMOLKA, G. Assembly of hybrid micro-systems — the SFB 440. *Microsystem Technologies*, 2004, 10, s. 247–251. ISSN 1432-1858.
- [24] DILTHEY, U. – REISGEN, U. – WOESTE, K. Neueste Entwicklungen beim Strehlschweißen. In [86], s. 559–569. ISBN 978-3-8322-6644-8.
- [25] von DOBENECK, D. Economizing electron beam welding for high volume production. In [75], s. 185–190.
- [26] von DOBENECK, D. *Elektronenstrahlschweißen: das Verfahren und seine industrielle Anwendung für höchste Produktivität*. Landsberg/Lech : Verlag Moderne Industrie, 2001. ISBN 3-478-93262-9.
- [27] von DOBENECK, D. *Electron Beam Welding: Examples of 30 Years Job-Shop Experience*. Planegg : Pro-beam AG&Co., 2005.
- [28] von DOBENECK, D. *Electron Beam Welding: A Key Technology to Construct Vehicles for Road, Rail, Sea, Air and Space*. Planegg : Pro-beam AG&Co., 2007.
- [29] DORA, J. – FELBA, J. – SIELANKO, W. A new generation of power supplies for electron beam welding machines. In [75], s. 631–632.
- [30] DUPÁK, J. – VLČEK, I. Elektronové dělo pro svařování v přístrojové technice. *Jemná mechanika a optika*, 1999, roč. 44, č. 7–8, s. 239–241. ISSN 0447-6441.
- [31] DUPÁK, J. – VLČEK, I. – ZOBACH, M. Electron gun for computer-controlled welding of small components. *Vacuum*, 2001, vol. 62, no. 2–3, s. 159–164. ISSN 0042-207X.
- [32] DUPÁK, J. – MICHALIČKA, P. – USTOHAL, V. – KUCHYŇKA, R. Electron beam welding of stainless steel with tungsten, tantalum and molybdenum. In [75], s. 198–201.
- [33] DUPÁK, L. *Studium interakce elektronového svazku a materiálu při mikroobrábění*. Diplomová práce, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, Ústav fyzikálního inženýrství, Brno, 2005.
- [34] DUPÁK, L. – DUPÁK, J. Planar Heating Element Adjusted by Electron Beam Micromachining. In [77], s. 82–84.
- [35] DUPÁK, L. – ZOBACH, M. Electron Beam Micromachining. In *Recent Trends (10th seminar)*, s. 15–16, Brno, 2006. ÚPT AV ČR. ISBN 80-239-6285-X.
- [36] DUPÁK, L. – DUPÁK, J. – ZOBACH, M. Vytváření jemných otvorů do křemenného skla pomocí elektronového svazku. *Jemná mechanika a optika*, 2006, roč. 51, č. 1, s. 10–12. ISSN 0447-6441.
- [37] DUPÁK, L. – ZOBACH, M. – DUPÁK, J. – VLČEK, I. Experimental Device for Electron Beam Micromachining. In [76], s. 272–275.
- [38] DVS. *Klein, präzise und sparsam — neues Elektronenstrahlschweißgerät auf dem Markt*. DVS, Düsseldorf, 2008.
- [39] ECKERTO VÁ, L. – FRANK, L. (Ed.). *Metody analýzy povrchů—elektronová mikroskopie a difrakce*. Praha : Academia, 1. vydání, 1996. ISBN 80-200-0329-0.

- [40] FATH, J. – LÖWER, T. Industrial Applications of Backscattered Electrons in Modern EB-Welding Machines. In [76], s. 66–69.
- [41] FELBA, J. – FRIEDEL, K. P. – WÓJCICKY, S. The optimization of a triode electron gun with a thermionic cathode. *Vacuum*, 1997, 111, s. 126–134.
- [42] FELBA, J. Emittance of high-power-density electron beam. *Vacuum*, 1999, 55, s. 223–233. ISSN 0042-207X.
- [43] FOCUS GmbH. *Micro Electron Beam Welder MEBW-60/2* [online]. [cit. 23. 9. 2008]. Dostupné z: <http://www.focus-e-welding.de/>.
- [44] FOLEY, J. D. – van DAM, A. – FEINER, S. K. – HUGHES, J. F. *Computer Graphics: Principles and Practice in C*. Toronto : Addison-Wesley Professional, 1995. ISBN 978-0201848403.
- [45] GOLDMAN, A. *Modern Ferrite Technology*. New York : Springer, 2nd edition, 2006. ISBN 978-0-387-28151-3.
- [46] HAWKES, P. W. *Topics in Current Physics: Magnetic Electron Lenses*. Berlin : Springer-Verlag, 1982. ISBN 3-540-10296-5.
- [47] HAWKES, P. W. – KASPER, E. *Principles of Electron Optics*. Volume 1 – Basic Geometrical Optics. London : Academic Press, 1989. ISBN 0-12-333351-2.
- [48] HAYASHI, Y. – OKINO, A. – HOTTA, E. Emittance Measurement of Axisymmetric High-Current Electron Beam Confined by a Longitudinal Magnetic Field. *Journal of Applied Physics*, 2001, vol. 40, no. 12, s. 7135–7139.
- [49] HORÁČEK, M. – DUPÁK, J. Temperature controlled cathode heating in electron beam welding machine. *Vacuum*, 2001, vol. 62, no. 2–3, s. 165–169. ISSN 0042-207X.
- [50] HRABOVSKÝ, M. – KOPŘIVA, M. – KUBÍNEK, R. Uplatnění svařování elektronovým svazkem v přístrojové technice. *Jemná mechanika a optika*, 2005, roč. 50, č. 1, s. 5–7. ISSN 0447-6441.
- [51] HULÍNSKÝ, V. – JUREK, K. *Zkoumání látek elektronovým paprskem*. Praha : SNTL, 1982.
- [52] HUMPHRIES, S. Jr. *Charged Particle Beams*. New York : John Wiley and Sons., Inc., 1990. ISBN 0-471-60014-8.
- [53] ISO 11146-1:2005(E). *Lasers and laser-related equipment — Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios — Part 1: Stigmatic and simple astigmatic beams*. 2005.
- [54] JÁNSKÝ, P. – LENCOVÁ, B. – ZLÁMAL, J. Optimalizace optiky elektronové svářečky. *Jemná mechanika a optika*, 2005, roč. 50, č. 2, s. 46–48. ISSN 0447-6441.
- [55] JÁNSKÝ, P. – LENCOVÁ, B. – ZLÁMAL, J. Accurate calculations of thermionic electron gun properties. In LUYSBERG, M. – TILLMANN, K. – WEIRICH, T. (Ed.) *EMC 2008 – 14th European Microscopy Congress – Instrumentation and Methods*, s. 557–558, Berlin, 2008. Springer. ISBN 978-3-540-85154-7.
- [56] JÁNSKÝ, P. et al. Numerical Simulations of the Thermionic Electron Gun for Electron-Beam Welding and Micromachining. *Vacuum*, 2009, 84, s. 357–362. ISSN 0042-207X.
- [57] JILES, D. – ATHERTON, D. Theory of ferromagnetic hysteresis. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1986, 61, 1–2. ISSN 0304-8853.
- [58] KLEMM, M. et al. New Electron Beam Multi-Process Technologies for the Liquid Phase Surface Treatment of Aluminium Materials. In [77], s. 123–127.
- [59] KOLEVA, E. – MLADENOV, G. – GARKOVA, K. – KARDJIEV, M. Quality Characterization of Electron Beams. In [77], s. 64–69.

- [60] KOLEVA, E. – MENHARD, C. – LOEWER, T. – MLADENOV, G. Emittance Calculation Based on the Current Distribution Measurements at Changes of the Beam Focusing. In [76], s. 51–65.
- [61] LAGARIAS, J. C. – REEDS, J. A. – WRIGHT, M. H. – WRIGHT, P. E. Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions. *SIAM Journal of Optimization*, 1998, vol. 9, no. 1, s. 112–147.
- [62] LAWSON, J. D. *The Physics of the Charged-Particle Beams*. Oxford : Clarendon Press, 2nd edition, 1988. ISBN 0-19-851719-X.
- [63] LENC, M. – LENCOVÁ, B. On the deflection of electrons with homogeneous fields. *Optik*, 1988, vol. 78, no. 4, s. 127–131.
- [64] LENC, M. – LENCOVÁ, B. Optické prvky elektronových mikroskopů. In [39]. ISBN 80-200-0329-0.
- [65] LENC, M. – LENCOVÁ, B. Analytical and numerical computation of multipole components of magnetic deflector. *Review of Scientific Instruments*, 1997, vol. 68, no. 12, s. 4409–4414. ISSN 0034-6748.
- [66] LENCOVÁ, B. Deflection aberrations of multi-stage deflection systems. *Optik*, 1981, vol. 58, no. 1, s. 25–35.
- [67] LENCOVÁ, B. On the design of electron beam deflection systems. *Optik*, 1988, vol. 79, no. 1, s. 1–12.
- [68] LENCOVÁ, B. *Metody elektronové optiky pro elektronovou litografii*. Disertační práce, Ústav přístrojové techniky ČSAV Brno, Brno, 1988.
- [69] LÖWER, T. Analysis, visualization and accurate description of an electron beam for high repeatability of industrial production processes. In [75], s. 45–50.
- [70] MATHWORKS™. *MatLab – The Language Of Technical Computing* [online]. [cit. 16. 2. 2009]. Dostupné z: <http://www.mathworks.com/products/matlab/>.
- [71] MELEKA, A. H. *Electron-beam Welding: Principles and Practice*. London : McGRAW-HILL, 1971. ISBN 07-094218-8.
- [72] MENHARD, C. G. Fast measurements of important electron beam parameters by variation of beam focusing. In [76], s. 11–12.
- [73] MEYER STE. *LibUsb-Win32* [online]. [cit. 9. 7. 2009]. Dostupné z: <http://libusb-win32.sourceforge.net/>.
- [74] MICROSOFT. *Dynamic Data Exchange* [online]. [cit. 13. 7. 2009]. Dostupné z: [http://msdn.microsoft.com/en-us/library/ms648711\(VS.85\).aspx](http://msdn.microsoft.com/en-us/library/ms648711(VS.85).aspx).
- [75] MLADENOV, G. (Ed.). *Proceedings of the 7th International Conference on Electron Beam Technologies*, Varna, 2003. Bulgarian Academy of Sciences.
- [76] MLADENOV, G. (Ed.). *Proceedings of the 8th International Conference on Electron Beam Technologies*, Varna, 2006. Bulgarian Academy of Sciences.
- [77] MLADENOV, G. (Ed.). *Proceedings of the 9th International Conference on Electron Beam Technologies*, Varna, 2009. Bulgarian Academy of Sciences.
- [78] MÜLLEROVÁ, I. (Ed.). *PDS 2003 Sborník prací doktorandů prezentovaných na Seminári oddělení Elektronové optiky*, Brno, 2004. ÚPT AV ČR. ISBN 80-239-2268-8.
- [79] OWENS CORNING CORP. *Electron Beam Drilling* [online]. [cit. 26. 9. 2008]. Dostupné z: <http://www.ebdrilling.com/>.

- [80] PALMER, T. – ELMER, J. Improving process control in electron beam welding using the enhanced modified Faraday cup. *JOURNAL OF MANUFACTURING SCIENCE AND ENGINEERING-TRANSACTIONS OF THE ASME*, 2008, vol. 130, no. 4. ISSN 1087-1357.
- [81] PASCHOTTA, R. *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*. Berlin : Wiley-VCH, 2008. ISBN 978-3-527-40828-3.
- [82] PATON ELECTRIC WELDING INSTITUTE. *Welding Electron Beam Analyzer* [online]. [cit. 14. 10. 2009]. Dostupné z: <http://www.nas.gov.ua/pwj/beam/i13c.html>.
- [83] von PIRANI, M. *Production of homogeneous bodies from tantalum or other metals*. U.S. Patent No. 848600.
- [84] PRO-BEAM. [online]. [cit. 23. 9. 2008]. Dostupné z: <http://www.pro-beam.de/>.
- [85] REED, S. J. B. *Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy in geology*. Cambridge : Cambridge University Press, 2005. ISBN 978-0-521-84875-6.
- [86] REISGEN, U. (Ed.). *Schweißtechnik und Fügetechnik – Schlüsseltechnologien der Zukunft*, Aachen, 2007. Shaker Verlag. ISBN 978-3-8322-6644-8.
- [87] ROSE, H. H. *Geometrical Charged-Particle Optics*. Berlin : Springer, 2009. ISBN 978-3-540-85915-4.
- [88] RÜTHRICH, K. – ZENKER, R. – BUCHWALDER, A. – FRENKLER, N. Investigation of Electron Beam Profiling of Metal Surfaces. In [77], s. 152–155.
- [89] SCHULTZ, H. *Electron Beam Welding*. Cambridge : Abington Publishing, 1994.
- [90] SCIACY INC. [online]. [cit. 15. 10. 2008]. Dostupné z: <http://www.sciaky.com/>.
- [91] SMOLKA, G. – GILLNER, A. – BOSSE, L. – LÜTZELER, R. Micro electron beam welding and laser machining — potentials of beam welding methods in the micro-system technology. *Microsystem Technologies*, 2004, 10, s. 187–192. ISSN 1432-1858.
- [92] STEIGERWALD STRAHLTECHNIK. [online]. [cit. 23. 9. 2008]. Dostupné z: <http://www.steigerwald-eb.de/en/>.
- [93] SYNERGEERING GROUP. *EBM - Electron Beam Melting* [online]. [cit. 7. 10. 2008]. Dostupné z: <http://www.synergeering.com/ebm.php>.
- [94] TUINENGA, P. W. *Spice – A Guide to Circuit Simulation & Analysis Using PSpice*. New Jersey : Prentice Hall, 1988. ISBN 0-13-834607-0.
- [95] TWI. [online]. [cit. 23. 9. 2008]. Dostupné z: <http://www.twi.co.uk/>.
- [96] ÚPT AV ČR. *Laboratoř speciálních technologií* [online]. [cit. 26. 9. 2008]. Dostupné z: <http://www.isibrno.cz/~mih/stl.htm>.
- [97] USB.ORG. *Universal Serial Bus Specification*. USB Implementers Forum, Inc., 2000.
- [98] VISSER, A. *Werkstoffabtrag durch Elektronen- und Photonenstrahlen*. Bern : Technische Hochschule, 1972.
- [99] VÍT, V. *Televizní technika*. Praha : SNTL, 1979.
- [100] VLČEK, I. Study of the Welding Electron Gun Optical Properties for Work Piece Imaging. In [77], s. 70–72.
- [101] VLČEK, I. – ZOBAČ, M. Křížový stolek do stolní elektronové svářečky. *Jemná mechanika a optika*, 2006, roč. 51, č. 7–8, s. 214–216. ISSN 0447-6441.
- [102] VLČEK, I. et al. Prototyp stolní elektronové svářečky MEBW–60/2. *Jemná mechanika a optika*, 2008, roč. 53, č. 1, s. 27–29. ISSN 0447-6441.

- [103] VOGES, K. – WELTERS, T. – BÖHM, S. – DILGER, K. The Application of Monte-Carlo Methods to Electron-Beam Interactions with Solids for the Prediction of Micromachining Capabilities. In [76], s. 46–50.
- [104] WARDLY, G. A. Correction of eddy current errors in electron beam deflection. *Journal of Applied Physics*, 1973, 44, s. 3766–3769.
- [105] WIKIPEDIA. *Beam Parameters Product* [online]. [cit. 16.6.2009]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Beam_parameter_product.
- [106] WIKIPEDIA. *Laser beam profiler* [online]. [cit. 27.1.2009]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Beam_profiler.
- [107] WIKIPEDIA. *Bézier curve* [online]. [cit. 13.7.2009]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Bézier_curve.
- [108] WIKIPEDIA. *Cathode ray* [online]. [cit. 31.8.2009]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Cathode_ray.
- [109] WIKIPEDIA. *Thermionic emission* [online]. [cit. 31.8.2009]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Thermionic_emission.
- [110] YEH, T.-J. – RUO-FENG, H. – SHIN-WEN, L. An integrated physical model that characterizes creep and hysteresis in piezoelectric actuators. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2008, vol. 16, no. 1, s. 93–110. ISSN 569-190X.
- [111] ZENKER, R. – BUCHWALDER, A. – SPIES, H. J. New electron beam technologies for surface treatment. In [75], s. 202–209.
- [112] ZENKER, R. – BUCHWALDER, A. – THIEMER, S. – BACKOFEN, J. Electron Beam Surface Countouring. In [76], s. 78–84.
- [113] ZENKLER, R. *Electronenstrahl-Randschichtbehandlung: Innovative Technologien für Höchste insustrielle Ansprüche*. Germany : pro-beam AG & Co. KGaA, 2003.
- [114] ZOBAČ, L. – ZOBAČ, M. Kryochirurgický přístroj pro jemné operace. *Jemná mechanika a optika*, 2006, roč. 51, č. 1, s. 13–15. ISSN 0447-6441.
- [115] ZOBAČ, L. et al. Víceúčelová vakuová pec s indukčním, elektronovým a odporovým ohřevem. *Slaboproudý obzor*, 1965, roč. 28, č. 3, s. 146–152.
- [116] ZOBAČ, L. *Vakuová technika*. Praha : SNTL, 1954.
- [117] ZOBAČ, M. Marking of Welded Pieces Using Continuous or Pulsed Electron Beam. In [75], s. 191–197.
- [118] ZOBAČ, M. Analysis of a high speed electron beam deflection system. In [77], s. 59–63.
- [119] ZOBAČ, M. *Zobrazování svarů v elektronové svářečce*. Diplomová práce, Fakulta elektrotechniky a informatiky VUT v Brně, Ústav radioelektroniky, Brno, 1998.
- [120] ZOBAČ, M. Mikroobrábění elektronovým svazkem. In MÜLLEROVÁ, I. (Ed.) *PDS 2002*, s. 49–50, Brno, 2002. ÚPT AV ČR. ISBN 80-239-9915-5.
- [121] ZOBAČ, M. Mikroobrábění elektronovým svazkem. In [78], s. 67–72. ISBN 80-239-2268-8.
- [122] ZOBAČ, M. Rozvoj aparatury pro mikroobrábění elektronovým svazkem. In MÜLLEROVÁ, I. (Ed.) *PDS 2004*, s. 65–70, Brno, 2004. ÚPT AV ČR. ISBN 80-239-4561-0.
- [123] ZOBAČ, M. Inovace elektronové svářečky. In MÜLLEROVÁ, I. (Ed.) *PDS 2006*, s. 59–60, Brno, 2006. ÚPT AV ČR. ISBN 80-239-7957-4.
- [124] ZOBAČ, M. – VLČEK, I. Solid state high voltage supply for EB and X-ray generators. In [77], s. 73–75.
- [125] ZOBAČ, M. – VLČEK, I. Electron Beam Welding in ISI Brno: Past and Present. In MIKA, F. (Ed.) *Recent Trends (11th seminar)*, s. 109–110, Brno, 2008. ÚPT AV ČR. ISBN 978-80-254-0905-3.

Tato stránka zůstává prázdná.

