VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

NÁVRH IONTOVÉHO ZDROJE PRO ODPRAŠOVÁNÍ

DESIGN OF AN ION SOURCE FOR SPUTTERING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — PETR GLAJC
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. MIROSLAV KOLÍBAL, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav fyzikálního inženýrství
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Glajc

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Fyzikální inženýrství a nanotechnologie (3901R043)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Návrh iontového zdroje pro odprašování

v anglickém jazyce:

Design of an ion source for sputtering

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Iontové zdroje se často používají k čištění substrátů před depozicí tenkých vrstev nebo pozorováním v elektronovém mikroskopu. Ideálním zdroj pro tento účel má velkou proudovou hustotu, tak aby bylo zaručeno rovnoměrné a rychlé odprašování vzorku.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešerše problematiky iontových zdrojů. Volba vhodného typu zdroje.

2. Konstrukční a iontově-optický návrh zdroje tak, aby splňoval zadané parametry.

Seznam odborné literatury:

[1] The Physics and Technology of ion sources, ed. Ian G. Brown, Wiley-VCH,Weinheim 2004, ISBN 3-527-40410-4

[2] Atom and Ion Sources, L. Valyi, John Wiley and Sons 1978, ISBN 978-0471994633

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Miroslav Kolíbal, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 3.11.2011

L.S.

prof. RNDr. Tomáš Šikola, CSc. Ředitel ústavu	prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc. Děkan fakulty

Abstrakt
Tato bakalářská práce se zabývá vývojem nového typu iontového zdroje. Jejím cílem je navrhnout iontový zdroj se sedlovým polem pro odprašování. Inovací ve vypracovaném návrhu je kombinace klasického válcově symetrického iontového zdroje a žhavené katody vyrobené z wolframu. V první části práce je uvedena rešerše problematiky iontových zdrojů. Druhá část se zabývá elektronově-optickým návrhem zdroje a simulací elektrostatického pole včetně trajektorií elektronů a iontů. Jsou také odhadnuty některé parametry iontového zdroje. V třetí části je detailně popsán konstrukční návrh založený na předchozích simulacích. Součástí práce je kompletní výkresová dokumentace.

Summary
This bachelor's thesis deals with the development of a new type of an ion source. The aim is to design a saddle-field ion source for sputtering. The unique property of the design is that it combines classical cylindrical-symmetry saddle-field ion source with a hot cathode made of tungsten. In the first part of the thesis an overview of the published research in the field of ion sources is presented. The second part deals with an electrostatic-optical design of the source and with simulations of the electrostatic field including trajectories of electrons and ions. Also a crude estimation of the source parameters is made. In the third part the construction design based on previous simulations is described.

Klíčová slova
iontový zdroj, sedlové pole, žhavená katoda, odprašování, EOD, konstrukce

Keywords
ion source, saddle field, hot cathode, sputtering, EOD, construction

GLAJC, P. *Návrh iontového zdroje pro odprašování.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 29 s. Vedoucí Ing. Miroslav Kolíbal, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Návrh iontového zdroje pro odprašování* vypracoval samostatně, pouze za odborného vedení Ing. Miroslava Kolíbala, Ph.D. Dále prohlašuji, že veškeré prameny, ze kterých jsem při tvorbě práce čerpal, jsou uvedeny v seznamu literatury.

V Brně dne ....

Petr Glajc

Poděkování

Mé poděkování patří zejména trojici kolegů z Ústavu fyzikálního inženýrství. Děkuji Ing. Miroslavu Kolíbalovi, Ph.D. za čas, který mi věnoval při tvorbě této práce, za svědomité vedení práce a za jeho připomínky a návrhy. Také děkuji Ing. Jakubu Zlámalovi, Ph.D. za cenné rady a za úsilí, které vynaložil při navrhování optimálního simulačního modelu. Dále děkuji Ing. Jindřichu Machovi, Ph.D. za odborné konzultace a připomínky týkající se konstrukční problematiky iontového zdroje.

Děkuji všem, kteří si toto poděkování z jakéhokoliv důvodu zaslouží.

Petr Glajc

Obsah

1 Úvod **1**

2 Iontové zdroje **2**
2.1 Stručná historie . . . 2
2.2 Fyzikální procesy v iontových zdrojích . . . 2
2.2.1 Ionizace . . . 2
2.2.2 Rekombinace . . . 5
2.2.3 Excitace . . . 5
2.2.4 Disociace . . . 6
2.3 Elektronově srážkové iontové zdroje . . . 6
2.4 Iontový zdroj se sedlovým polem . . . 8
2.4.1 Výhody a nevýhody . . . 8
2.4.2 Typy sedlových zdrojů . . . 9

3 Elektronově-optický návrh **11**
3.1 Požadované parametry . . . 11
3.2 Prvotní návrhy . . . 12
3.3 Model s oscilujícími elektrony . . . 13
3.4 Konečný návrh . . . 14
3.5 Odhady parametrů zdroje . . . 16

4 Konstrukční návrh **18**
4.1 První konstrukční návrh . . . 18
4.2 Návrh se šroubovanou elektrodou . . . 19
4.3 Konečný konstrukční návrh . . . 20
4.3.1 Výměnná elektroda a žhavicí vlákno . . . 20
4.3.2 Elektroda s extrakčním otvorem a vnitřní elektrody . . . 21
4.3.3 Anoda . . . 22
4.3.4 Příruba . . . 22
4.3.5 Sestavení iontového zdroje . . . 23

5 Závěr **26**

1. Úvod

Iontové zdroje jsou v dnešní době nedílnou součástí téměř každé fyzikální laboratoře, ve které se pracuje s vysokým nebo ultravysokým vakuem. Existuje velké množství různých typů iontových zdrojů, které se liší velikostí, principem fungování, ale hlavně parametry vystupujícího iontového svazku. Mezi nejdůležitější parametry lze zařadit typ vystupujících částic, jejich energii a energetický rozptyl, proudovou hustotu či profil iontového svazku. Právě kvůli rozličnosti těchto parametrů jsou iontové zdroje používány v mnoha výzkumných či průmyslových odvětvích. Svoji nepostradatelnou roli hrají převážně v hmotnostní spektroskopii, jaderné fyzice, mikroelektronice či nanotechnologiích.

Iontové zdroje se často používají k čištění substrátů před depozicí tenkých vrstev nebo pozorováním v elektronovém mikroskopu. Pro tyto účely se používají zdroje, které poskytují iontové svazky s velkou proudovou hustotou a malým energetickým rozptylem.

Hlavním cílem práce je vytvořit návrh iontového zdroje pro odprašování, který bude splňovat zadané parametry. Kompletní návrh zdroje se skládá ze dvou částí. První část, elektronově-optická simulace, byla prováděna v programu EOD. Druhá část návrhu obsahuje vlastní konstrukční řešení, tedy 3D model a výkresovou dokumentaci. K modelování byl použit program SolidWorks.

Bakalářská práce je rozdělena do tří hlavních částí. V první kapitole je provedena rešeršní studie elektronově srážkových iontových zdrojů, zejména zdrojů se sedlovým polem jako jejich speciálního druhu. Podstatná část kapitoly se zabývá fyzikální podstatou fungování iontových zdrojů. Druhá kapitola uvádí požadované parametry zdroje, vysvětluje důvody vedoucí k návrhu iontového zdroje se sedlovým polem a dále popisuje elektronově-optický návrh, včetně jeho vývoje a s ním spojených problémů. Třetí kapitola se výhradně věnuje konstrukčnímu návrhu zdroje, jeho důkladnému popisu a vývoji.

2. Iontové zdroje

2.1. Stručná historie

Svazkem nabitých částic, *iontů*, se na přelomu 19. a 20. století jako první zabýval Eugen Goldstein při studiu výbojů za nízkého tlaku. Wilhelm Wien pak studoval vlastnosti iontového svazku a dospěl k názoru, že ionty vznikají z atomů plynu ve výbojové trubici. Joseph J. Thomson[1] sestrojil vůbec první iontový zdroj, který použil pro studium izotopů neonu. Jeho zdroj byl napájen vysokým napětím a vykazoval velký rozptyl energie iontů, což bylo pro další vývoj iontových zdrojů nepraktické. Začal tedy intenzivní výzkum iontových zdrojů s lepšími vlastnostmi. Byly vyvinuty nové zdroje pracující na různých fyzikálních principech, což umožnilo jejich použití v rozličných oblastech vědy [1].

V dnešní době je známo několik desítek různých typů iontových zdrojů. Z hlediska vzniku iontů je můžeme dělit na elektronově srážkové, plazmatické, fotoionizační, povrchově ionizační, autoionizační a další. Také můžeme vzít v úvahu, zda využívají elektrické či magnetické pole (nebo jejich kombinaci) například k prodloužení trajektorie elektronů nebo ke zlepšení parametrů plazmatu. V neposlední řadě můžeme posoudit znaménko náboje generovaných iontů – kladné či záporné. Detailní rozdělení známých typů iontových zdrojů lze najít například v [1] nebo v novější publikaci [2]. Tato práce bude zaměřena na elektronově srážkové iontové zdroje, především na iontové zdroje se sedlovým polem.

2.2. Fyzikální procesy v iontových zdrojích

Před vysvětlením principu funkce iontových zdrojů je vhodné zmínit některé základní procesy, které probíhají v plynu s volnými nosiči náboje (elektrony, ionty). Mezi tyto procesy patří zejména ionizace, rekombinace, excitace a disociace. Při zpracování této sekce byly použity publikace [1] a [3].

2.2.1. Ionizace

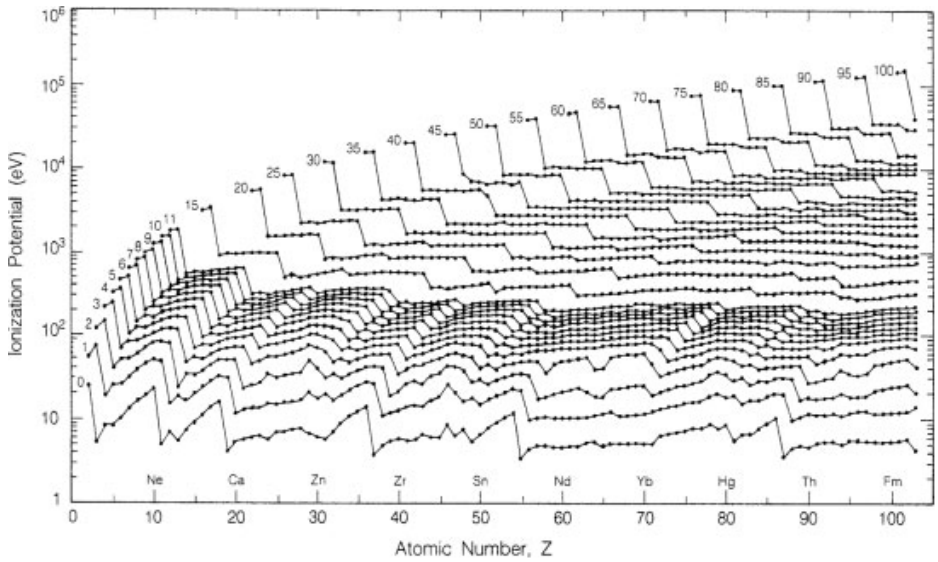
Ionizace je fyzikální proces, při kterém z částic o elektrickém náboji n ($n \in \mathbb{Z}$) vznikají částice s elektrickým nábojem $n \pm m$, a to ztrátou, resp. příjmem m elektronů. Pokud částici elektrony chybí, hovoříme o kladném iontu (kationtu); pokud naopak elektrony přebývají, hovoříme o záporném iontu (aniontu).

K ionizaci za vzniku kationtu je potřeba určitá minimální hodnota energie E_{ion}. Tato energie se nazývá *první ionizační potenciál*. Ionizační potenciál je silně závislý na elektronové konfiguraci ionizovaného prvku. Nejsnáze se ionizují prvky z levé strany periodické tabulky prvků (alkaloidy a kovy alkalických zemin), naopak největších hodnot ionizačního potenciálu nabývají prvky z pravé strany tabulky (vzácné plyny a halogeny). Z Obrázku 2.1 je vidět, že daný prvek má několik ionizačních potenciálů, které se zvyšují v závislosti na počtu vyražených elektronů. Při sledování polohy minim či maxim lze vidět, že se v grafu ubírají nejen nahoru, ale také mírně doprava. Tento fakt je způsoben změnou zaplnění elektronových orbitalů daného prvku. Pokud se v orbitalu nachází samotný elektron, je mnohem lehčí tento elektron vyrazit, než když má prvek plně zaplněné orbitaly.

[1] mimo jiné objevitel elektronu

Tomu odpovídá pohyb minim a maxim grafu. Také stojí za zmínku, že svislá osa má logaritmické měřítko.

Pokud neutrální atom přijme elektron, vzniká aniont a při tomto procesu se uvolní určité množství energie, která se nazývá *elektronová afinita*. Na rozdíl od předchozího případu ionizace jsou anionty nejsnadněji tvořeny halogeny, naopak nejhůře alkaloidy a vzácnými plyny.



Obrázek 2.1: Ionizační potenciály v závislosti na stupni ionizace a atomovém čísle. Převzato z [2].

Ionizace srážkou s jinou částicí

Z fyzikálního hlediska rozlišujeme dva základní typy srážek – pružné a nepružné. V prvním případě platí zákon zachování mechanické energie i hybnosti, kdežto v druhém případě je zachována pouze hybnost částic. K ionizaci atomu nebo molekuly tedy může dojít v případě neelastické srážky s elektronem, atomem, molekulou či iontem. Musí být ovšem splněn energetický předpoklad popsaný nerovností [1]

$$E_{impact} \geq \frac{E_{ion}(m_1 + m_2)}{m_2}, \tag{2.1}$$

kde E_{impact} je srážková energie, tj. součet kinetických energií částic, E_{ion} je ionizační potenciál a m_1, m_2 jsou hmotnosti ionizované, resp. ionizující částice.

V případě, že jsou atomy plynu ionizovány svazkem elektronů o proudové hustotě j_e, můžeme celkový proud vzniklých iontů I_i [1] vyjádřit vztahem

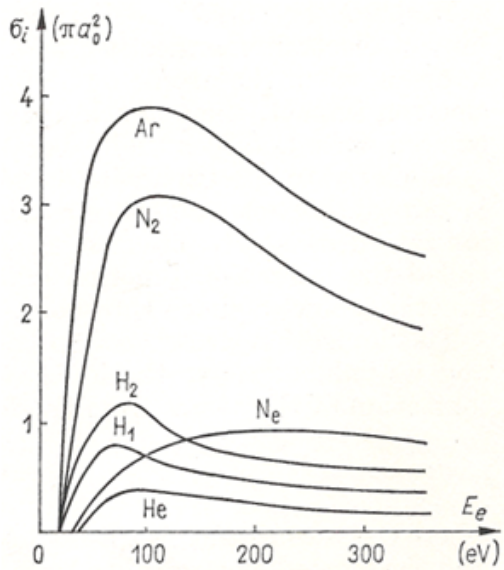
$$I_i = j_e V_{ef} n \sigma_i. \tag{2.2}$$

V rovnici (2.2) značí V_{ef} efektivní objem, ve kterém probíhá ionizace. Symbolem n je označena koncentrace atomů plynu, kterou lze vyjádřit pomocí klasické stavové rovnice pro ideální plyn jako

$$n = \frac{p}{kT}. \tag{2.3}$$

Posledním členem v rovnici (2.3) je ionizační (též srážkový) účinný průřez σ_i, pro jehož výpočet se používají klasické či kvantové aproximace, stejně jako semi-empirické vztahy.

Typické průběhy ionizačních účinných průřezů různých plynů v závislosti na energii jsou zobrazeny na Obrázku 2.2.



Obrázek 2.2: Závislost ionizačního účinného průřezu různých plynů na energii. Převzato z [1].

Fotoionizace

K fotoionizaci, neboli ionizaci pohlcením kvanta elektromagnetické energie, může dojít, pokud je atomem absorbován foton dopadajícího záření. Aby došlo k fotoionizaci, musí být splněna podmínka

$$h\nu \geq E_{ion}, \tag{2.4}$$

kde h je Planckova konstanta a ν je frekvence dopadajícího fotonu.

První ionizační potenciály se pohybují v rozmezí přibližně od 5 do 15 eV [2]. Podle vztahu

$$E = \frac{hc}{\lambda}, \tag{2.5}$$

kde c je rychlost světla ve vakuu, se vlnová délka fotonů schopných ionizovat pohybuje v rozmezí $80 \div 250$ nm, což odpovídá ultrafialové a měkké RTG části spektra. Fotony o kratších vlnových délkách jsou pak schopné vícenásobné ionizace.

Ionizace silným elektrickým polem

Jak již název napovídá, k tomuto typu ionizace je zapotřebí elektrického pole s vysokou intenzitou. Z hrotů o velmi malém poloměru křivosti jsou tímto polem vytrhovány elektrony nebo ionty, které překonají výstupní práci materiálu, ze kterého je hrot vyroben. Velmi často bývá hrot vyroben z hexaboridu lanthanu (LaB_6).

Tohoto typu ionizace se využívá v iontových zdrojích na bázi tekutých kovů (LMIS, *liquid metal ion source*), které produkují ionty kovů s nízkou teplotou tání (typicky gallium, indium, bismut a další). Svazek iontů vzniklých v tomto typu iontových zdrojů je velmi úzký, dosahuje i desítek Å a iontový proud se pohybuje v řádu desítek mA. [2]

Další typy ionizace

Mezi další způsoby ionizace patří například povrchová ionizace či autoionizace.

K povrchové ionizaci dochází, jestliže na povrch zahřátého kovu dopadají atomy či molekuly okolního plynu. Při tomto procesu se může ionizovat jak dopadající atom (molekula), tak atom kovu. Tento děj může být popsán dvěma koeficienty – stupněm ionizace α_{ion} a koeficientem povrchové ionizace β_{ion}.

K autoionizaci může dojít, pokud jsou v atomu současně excitovány dva elektrony a jejich excitační energie je v součtu vyšší než ionizační potenciál daného prvku. V důsledku překročení ionizačního potenciálu unikne jeden elektron z elektronového obalu atomu. Druhý elektron klesne na nižší energiovou hladinu a z atomu vzniká kladný iont.

2.2.2. Rekombinace

Rekombinaci můžeme chápat jako protiklad ionizace. Při tomto procesu zanikají ionty za vzniku neutrálních částic. Schematicky lze tento proces zapsat například rovnicemi

$$A^+ + e^- \rightarrow A + \frac{hc}{\lambda} \tag{2.6}$$

$$A^- + e^- \rightarrow A + 2e^- \tag{2.7}$$

Rovnice (2.6) popisuje zánik kationtu – kationt se sloučí s elektronem a vzniklý přebytek energie vyzáří ve formě fotonu. Naproti tomu zánik aniontu probíhá vyražením přebytečného elektronu, jak popisuje rovnice (2.7).

Tento proces je nedílnou součástí každého iontového zdroje, ale zároveň je procesem nežádoucím. Je vcelku logické, že rekombinace snižuje počet iontů vystupujících ze zdroje a tím zhoršuje proudové charakteristiky svazku.

2.2.3. Excitace

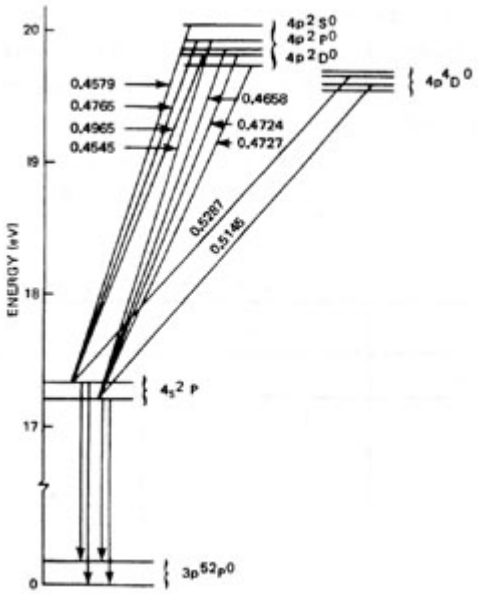
Dalším ze základních fyzikálních procesů probíhajících v plynu za přítomnosti volných nábojů je excitace. Počátek procesu je podobný ionizaci – neutrální atom či molekula přijme jisté množství energie (opět existuje více možností, nejčastější ovšem bývá pohlcení kvanta elektromagnetické energie). Tato energie je využita k excitaci elektronu, neboli k jeho vybuzení na vyšší energiovou hladinu atomu.

Takto excitovaný atom však nebývá stabilní, a proto dochází i k opačnému procesu, deexcitaci. Excitovaný elektron spadne v energiovém žebříčku na nižší hladinu, přičemž dochází k vyzáření fotonu o přesně definované vlnové délce, která odpovídá energiovému rozdílu hladin.

Mnohdy bývá deexcitace elektronu složitější, elektron může spadnout i na jiné energiové hladiny a vyzářit tak fotony o různých (ale přesně definovaných) vlnových délkách. Při přechodech musí být dodržena výběrová pravidla. Všechny přípustné přechody lze zobrazit v tzv. *Grotrianově diagramu*, znázorněném na Obrázku 2.3.

Proces excitace i deexcitace lze zjednodušeně zapsat rovnicí

$$A + E_{exc} \rightarrow A^* \rightarrow A + \frac{hc}{\lambda} \tag{2.8}$$



Obrázek 2.3: Grotrianův diagram pro atom argonu. Převzato z [4].

2.2.4. Disociace

Disociací rozumíme proces, při kterém se molekuly rozpadají na jednotlivé atomy. K tomu je potřeba molekule dodat disociační energii E_{dis}. Dodání energie může opět proběhnout více způsoby, například nepružnou srážkou s jinou částicí či pohlcením kvanta elektromagnetického záření. Rovnici popisující disociaci lze vyjádřit ve tvaru

$$AB + E_{dis} \rightarrow A + B \tag{2.9}$$

Závislost potenciální energie molekuly na vzdálenosti jader má klasický „jamkovitý“ průběh, ve kterém hloubka minima udává sílu vazby. U excitované molekuly AB^* je hloubka minima *menší* než u molekuly v základním stavu, proto lze snadněji disociovat excitované molekuly.

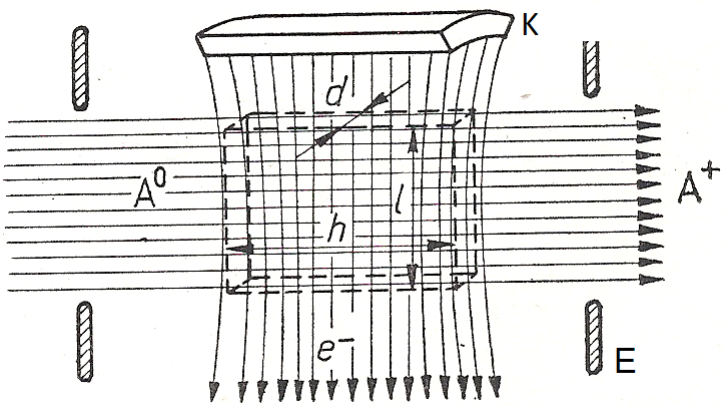
Na závěr této podsekce je vhodné zmínit, že poměr mezi disociačními a asociačními procesy v plynu je dán *rovnovážnou konstantou* K_e, která je úměrná Boltzmannovu faktoru [1]

$$K_e \propto \exp\left(-\frac{E_{dis}}{kT}\right). \tag{2.10}$$

2.3. Elektronově srážkové iontové zdroje

Elektronově srážkové iontové zdroje našly v aplikacích zřejmě největší uplatnění, a to zejména díky malé technické náročnosti konstrukce a jednoduchému principu.

Na Obrázku 2.4 je zobrazen schematický nákres elektronově srážkového zdroje. Základní součástí každého takového zdroje je *katoda*, fungující jako zdroj elektronů. Pokud jsou elektrony z katody emitovány termoemisí, pak takové katodě říkáme *žhavená*. Nejčastější žhavenou katodou bývá wolframové vlákno, které může být pokryté vrstvou thoria či jiného elektropozitivního prvku, který snižuje výstupní práci a tím zvyšuje emisní proud elektronů. Vláknem protéká proud (řádově v jednotkách A), který ho zahřívá a dodává tedy elektronům dostatečnou energii, aby unikly z atomové mřížky kovu. Elektrony mají energii řádově v desetinách až jednotkách eV [5].



Obrázek 2.4: Schematický nákres elektronově srážkového zdroje. K – katoda, E – extrakční elektroda. Převzato z [1].

Pro výpočet proudové hustoty elektronů vzniklých termoemisí j_e se používá Richardsonova-Dushmanova rovnice [6] ve tvaru

$$j_e = AT_v^2 \exp\left(-\frac{W_e}{kT_v}\right), \tag{2.11}$$

kde k je Boltzmannova konstanta, T_v teplota vlákna a W_e výstupní práce materiálu vlákna. A je Richardsonova konstanta, která je definována [6] jako

$$A = \frac{4\pi m_e e k^2}{h^3}, \tag{2.12}$$

kde m_e je hmotnost elektronu, e elementární náboj a h Planckova konstanta. Teoretická hodnota konstanty A je 120 A·cm^{-2}·K^{-2}. Tato hodnota však není univerzální. Experimentálně bylo zjištěno, že reálná hodnota této konstanty je závislá mimo jiné i na materiálu katody.

Druhým typem je tzv. *studená* neboli *nežhavená* katoda, ze které jsou elektrony extrahovány silným elektrickým polem. Pole musí mít dostatečnou intenzitu, aby elektrony mohly překonat výstupní práci katody a uniknout. Elektrony snáze unikají, pokud má katoda povrch s malým poloměrem křivosti (hrot).

Emitované elektrony jsou poté elektrickým polem urychlovány směrem k anodě. Po cestě prochází ionizační oblastí, tedy oblastí, kde se vyskytují atomy či molekuly ionizovaného plynu. Zde dochází k pružným a nepružným srážkám mezi elektrony a atomy (molekulami). Ionizace proběhne při nepružné srážce, jak již bylo řečeno v sekci 2.2.1.

Vzniklé ionty jsou urychlovány k *extrakční elektrodě* a dále dle potřeby fokusovány nebo vychylovány.

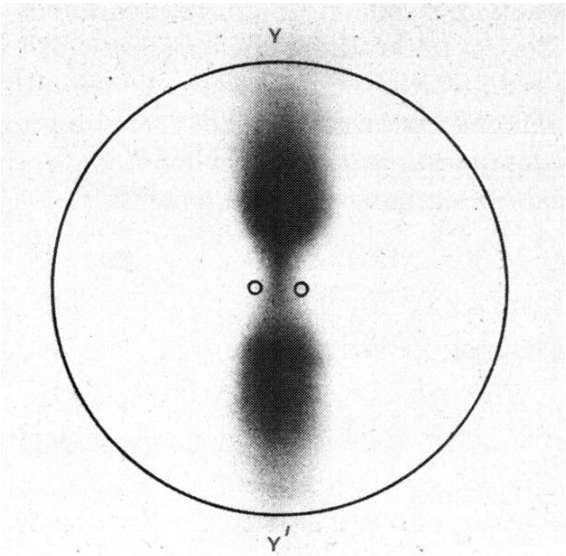
Mnoho současných elektronově srážkových zdrojů používá navíc i axiální magnetické pole, které zajišťuje, že se elektrony pohybují po šroubovicích. Prodlužuje se tedy délka trajektorie elektronů, což zvyšuje pravděpodobnost ionizace. Přiložené magnetické pole (případně také střídavé elektrické pole) však často nepříznivě ovlivňuje prvotní účel použití nebo přístroje uvnitř vakuových aparatur, proto se často používají jiné způsoby prodloužení trajektorie elektronů. Jedním ze způsobů je použití elektrostatického sedlového pole.

2.4. Iontový zdroj se sedlovým polem

Teoretický i konstrukční základ tohoto typu zdroje položil v roce 1972 A. H. McIlraith ve své práci *A Charged Particle Oscillator* [7]. Zkoumá zde možnost uzavřít pohybující se nabité částice do omezeného prostoru pouze pomocí elektrostatického pole.

Jeho teoretický model obsahuje dva nekonečně dlouhé rovnoběžné dráty, sloužící jako kladné elektrody, okolo nichž je umístěn nekonečně dlouhý vodivý válec. Z válce jsou extrahovány elektrony, které pak vykonávají oscilující pohyb mezi elektrodami. Výskyt elektronů je symetrický vůči rovině YY' – viz Obrázek 2.5. Ionty vzniklé v prostoru mezi elektrodami jsou urychlovány radiálně směrem k válcové katodě, ve které je vyroben otvor umožňující iontům opustit zdroj.

Konstrukčně byla délka zdroje omezena na 100 mm a průměr válce na 25 mm. Délka trajektorie elektronu dosahovala až 5 km [7].



Obrázek 2.5: Výskyt elektronů v McIlraithově oscilátoru. Převzato z [7].

2.4.1. Výhody a nevýhody

Hlavní výhodou takového iontového zdroje je zejména fakt, že může pracovat i za nízkých tlaků bez pomoci magnetického nebo proměnného elektrického pole, jejichž nevýhody byly diskutovány na konci sekce 2.3. Další výhodou je absence žhavené katody, což zvyšuje životnost zdroje a snižuje náklady na údržbu. Zároveň je iontový zdroj konstrukčně velice jednoduchý a kompaktní, odpadá tedy starost s umístěním v menších vakuových systémech. V neposlední řadě můžeme vyzdvihnout i vlastnosti vystupujícího iontového svazku, který má vysokou proudovou hustotu [8]. Iontový zdroj se tedy výborně hodí pro aplikace v ultravakuových aparaturách, odprašování či povrchové analýze.

Mezi nevýhody je nutné zařadit větší nároky na výrobní přesnost součástí kvůli důslednému dodržení symetrie. Další nevýhodou je obtížné nastavení konstantního potenciálu ionizační oblasti, což může vést k většímu energiovému rozptylu iontového svazku. V neposlední řadě může u tohoto typu zdroje (zejména při vyšších tlacích) dojít k vytvoření plazmatu. To vede k jistému zkomplikování výpočtů, simulací a návrhu iontového zdroje jako takového.

2.4.2. Typy sedlových zdrojů

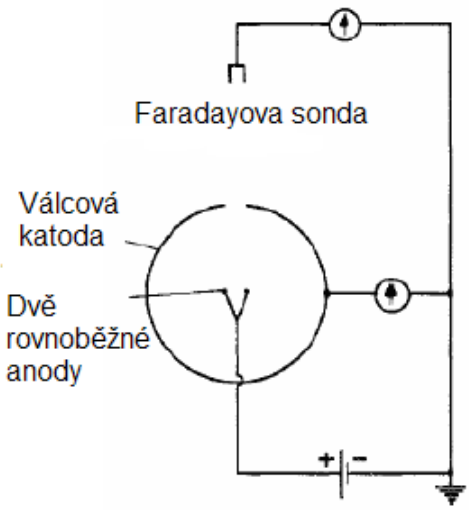
Válcově symetrický: iontový zdroj byl sestrojen A. H. McIlraithem. Provedení již bylo diskutováno na začátku této sekce. Schematický nákres je na Obrázku 2.6.

Kulově symetrický: iontový zdroj zhotovil J. Franks [9]. Ve svém zdroji nahrazuje dva rovnoběžné dráty jednou prstencovou anodou a válcovou katodu dvěma polokoulemi. Tím odstraňuje problémy s konečnou délkou katody. Na každé z polokoulí je vytvořen otvor, takže vzniklé ionty vystupují na obou stranách, čehož je využito pro měření vlastností iontového svazku.

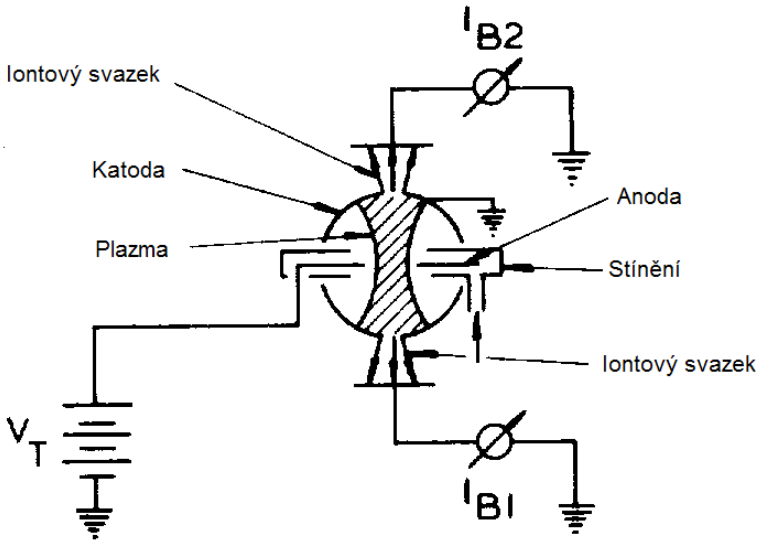
Franksův konstrukční návrh obsahuje anodu z nerezové oceli o tloušťce 2 mm a vnitřním průměru 5 mm. Polokoule jsou vyrobeny z hliníku a mají poloměr 11 mm. Jak lze vidět i na schematickém řezu na Obrázku 2.7, obě polokoule jsou uzemněny a na prstencovou anodu je přivedeno kladné napětí.

Rovinně symetrický: iontový zdroj, zobrazený na Obrázku 2.8, má tělo tvořené nerezovou trubkou (T) zakončenou z obou stran mosaznými víčky, sloužícími zároveň jako katody (K). Uprostřed se nachází kruhová anoda (A) o vnitřním průměru 5 mm, obklopená z obou stran tenkými kruhovými destičkami (D) o průměru 9 mm. Na anodu je přivedeno vysoké napětí (řádově v desítkách kV), zbytek zdroje je uzemněn.

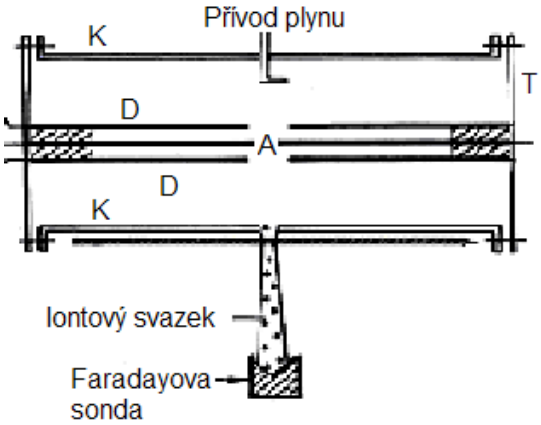
Tento typ iontového zdroje se sedlovým polem má oproti ostatním výhodu v tom, že iontový svazek je extrahován axiálně, nikoli radiálně. Z konstrukčního hlediska je tento typ také velmi jednoduchý. Zejména tyto důvody vedly k vytvoření elektronově-optických návrhů s rovinnou symetrií, což bude ukázáno v další kapitole.



Obrázek 2.6: Schematický nákres válcově symetrického zdroje (řez). Převzato z [8] a upraveno.



Obrázek 2.7: Schematický nákres kulově symetrického zdroje (řez). Převzato z [9] a upraveno.



Obrázek 2.8: Schematický nákres rovinně symetrického zdroje (řez). T – tělo, K – katody, A – anoda, D – pomocné destičky. Převzato z [8] a upraveno.

3. Elektronově-optický návrh

Dříve, než lze přistoupit k vlastní konstrukci iontového zdroje se sedlovým polem, je nezbytné vytvořit na počítači simulační model. Díky němu je možné optimalizovat konstrukční tvar a rozměry iontového zdroje, zobrazit výsledné elektrické pole či trajektorie elektronů a iontů. Simulace byly vytvořeny v programu Electron Optical Design (dále jen EOD) verze 3.143.7. [10]

3.1. Požadované parametry

Navrhovaný iontový zdroj má být použit pro odprašování vzorků, proto je zapotřebí vytvořit svazek iontů s vysokou proudovou hustotu (řádově ve stovkách μA/cm^2) a malým energetickým rozptylem (řádově v jednotkách eV). Iontový zdroj nesmí ovlivňovat přístroje uvnitř UHV aparatury, proto není vhodné, aby zdroj využíval magnetické či proměnné elektrické pole. Z hlediska finančních nákladů by měl být konstrukční návrh zdroje co nejjednodušší pro výrobu a montáž. Kvůli splnění všech těchto požadavků a v neposlední řadě také kvůli získání know-how v této oblasti byl vybrán *elektronově srážkový iontový zdroj se sedlovým polem.*

Všechny typy sedlových iontových zdrojů (viz sekce 2.4.2) vytvářejí ionty pomocí studené emise. V této práci bude popsán návrh, který jako zdroj elektronů využívá wolframového vlákna. Předpokládá se, že díky žhavenému vláknu bude dosaženo většího elektronového proudu I_e než při studené emisi. Díky zvýšení elektronového proudu vzroste také iontový proud svazku I_i, což je výhodné při použití zdroje pro odprašování.

Z konstrukčního hlediska je požadováno, aby zdroj byl k UHV aparatuře připevněn pomocí příruby DN40CF; celková délka zdroje uvnitř aparatury by neměla překročit 20 centimetrů a *pracovní vzdálenost*, tj. vzdálenost mezi koncem iontového zdroje a vzorkem by se měla pohybovat okolo 20 mm. Extrakční část by měla být uzpůsobena pro umístění vychylovacích destiček, případně jiných komponent ovlivňujících fyzikální vlastnosti iontového svazku (tzn. elektrostatické čočky, Wiennův filtr a další).

Pracovním plynem bude argon, iontový svazek tedy bude obsahovat ionty Ar^+, Ar^{2+} i více ionizované; případně i neutrální atomy argonu. Energie iontového svazku by měla být nastavitelná a měla by se pohybovat v rozmezí 500 eV až 5 keV, přičemž energetický rozptyl v rámci svazku by měl být co nejmenší. *Proudová hustota* svazku by měla dosahovat přibližně 300 μA·cm^{-2}. Vycházející iontový svazek má být velice úzký, velikost stopy na vzorku (*spot size*) by se měla pohybovat mezi 100 a 200 μm.

Přehledné shrnutí všech parametrů je uvedeno v následující tabulce:

Plyn	Ar
Energie	500 eV ÷ 5 keV
Proudová hustota	až 200 ÷ 300 μA·cm^{-2}
Velikost stopy	100 ÷ 200 μm
Pracovní vzdálenost	okolo 20 mm
Délka uvnitř	10 ÷ 20 cm
Příruba	DN40CF
Vychylování iontového svazku	

Tabulka 3.1: Shrnutí požadovaných parametrů iontového zdroje.

3.2. Prvotní návrhy

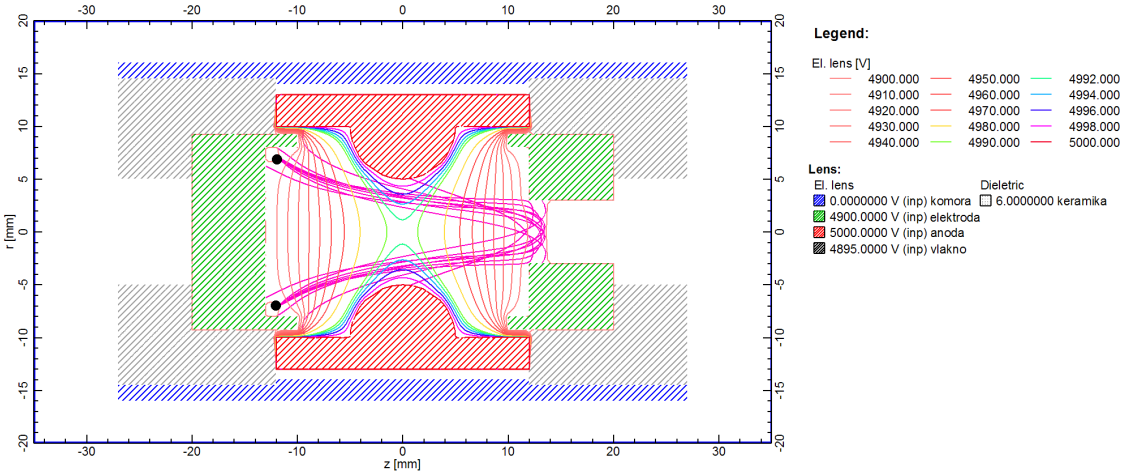
Inspirací pro návrh prvního modelu se stal návrh sedlového iontového zdroje od Ing. Kuštery z VUT Brno. [11]

Na Obrázku 3.1 lze vidět řez válcově symetrickým modelem. Zeleně šrafované jsou elektrody na potenciálu 4900 V; na přibližně stejném potenciálu je černě značené vlákno, kterým protéká proud; na červeně šrafovanou anodu je přivedeno napětí 5000 V a modře šrafovaný válcový obal je uzemněn.

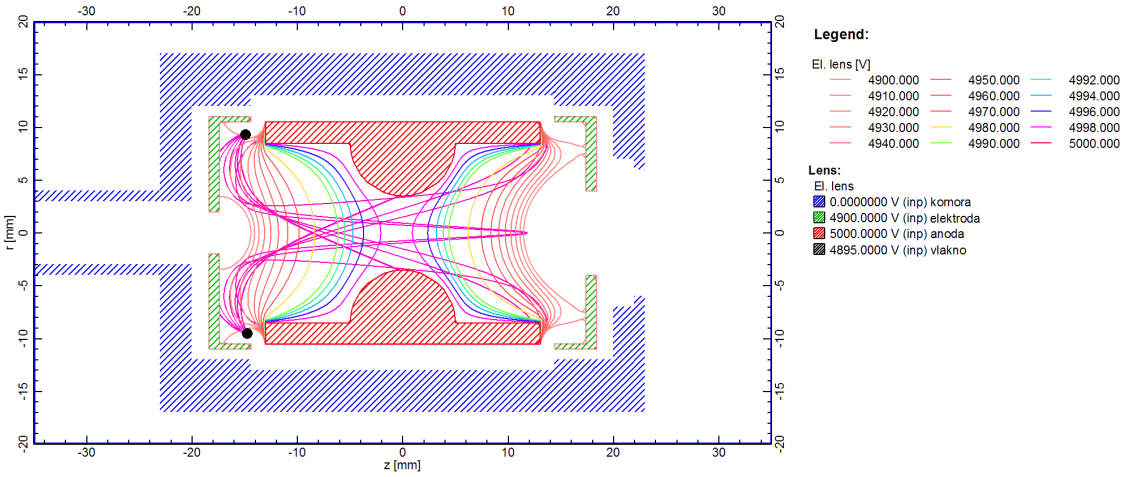
Na obrázku lze dále vidět barevně rozlišené ekvipotenciální hladiny (od 4900 V do 5000 V) a růžové trajektorie elektronů emitovaných z vlákna. Trajektorie kladných iontů či sekundárních elektronů vzniklých při ionizaci ještě nejsou v tomto stádiu zobrazeny.

Model je navrhován tak, aby se sedlový bod nacházel v počátku souřadnicového systému, tj. v bodě $r = 0$ mm a $z = 0$ mm.

Elektrony mají požadovaný směr pohybu, procházejí sedlem a na druhé straně se jejich trajektorie obrací. Nevykonávají ovšem oscilující pohyb, což je základní požadavek pro tento typ iontového zdroje. Drobnými úpravami tvaru i rozměrů (viz Obrázek 3.2) se podařilo mírně vylepšit trajektorie elektronů, ale stále se neobjevuje zmíněný oscilující pohyb.



Obrázek 3.1: Řez iontovým zdrojem – první návrh.

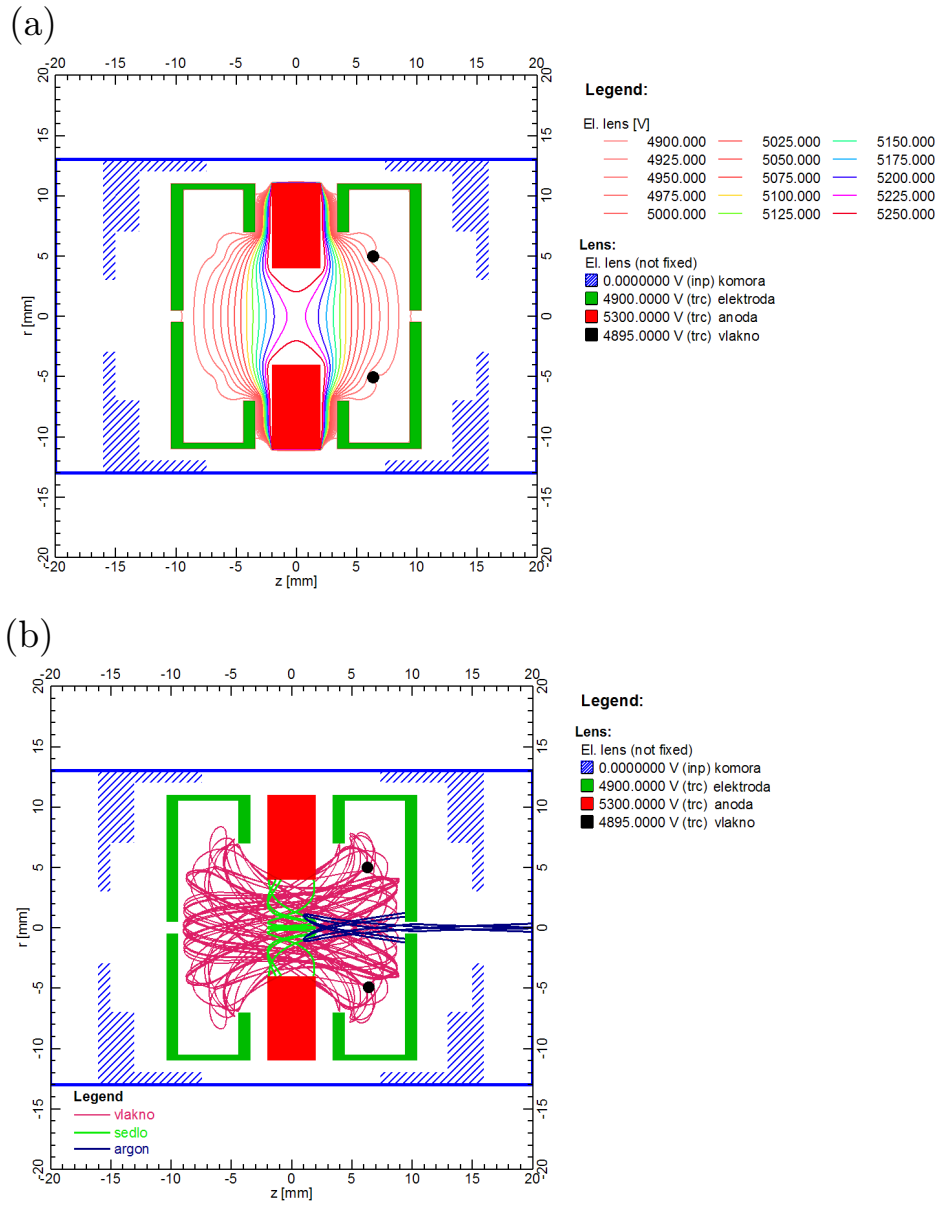


Obrázek 3.2: Řez iontovým zdrojem – druhý návrh.

3.3. Model s oscilujícími elektrony

Po konzultaci vlastností modelu iontového zdroje s Jakubem Zlámalem byl pozměněn tvar elektrod a navrženo jejich jiné uspořádání. Na základě tohoto návrhu bylo vytvořeno zhruba 15 různých konfigurací, které se lišily velikostmi a pozicemi elektrod. Z těchto konfigurací byla poté vybrána ta s nejoptimálnějším uspořádáním elektrod. Jedná se již o pokročilý návrh, proto byly trasovány nejen emitované elektrony, ale i argonové ionty a sekundární elektrony vzniklé v okolí sedlového bodu při ionizaci.

Model se zobrazeným elektrickým polem (ekvipotenciálními hladinami) je zobrazen na Obrázku 3.3(a). Model s trajektoriemi elektronů emitovaných z vlákna (vínová), sekundárních elektronů z oblasti sedla (světle zelená) a iontů argonu z blízkého okolí sedla (tmavě modrá) je na Obrázku 3.3(b).

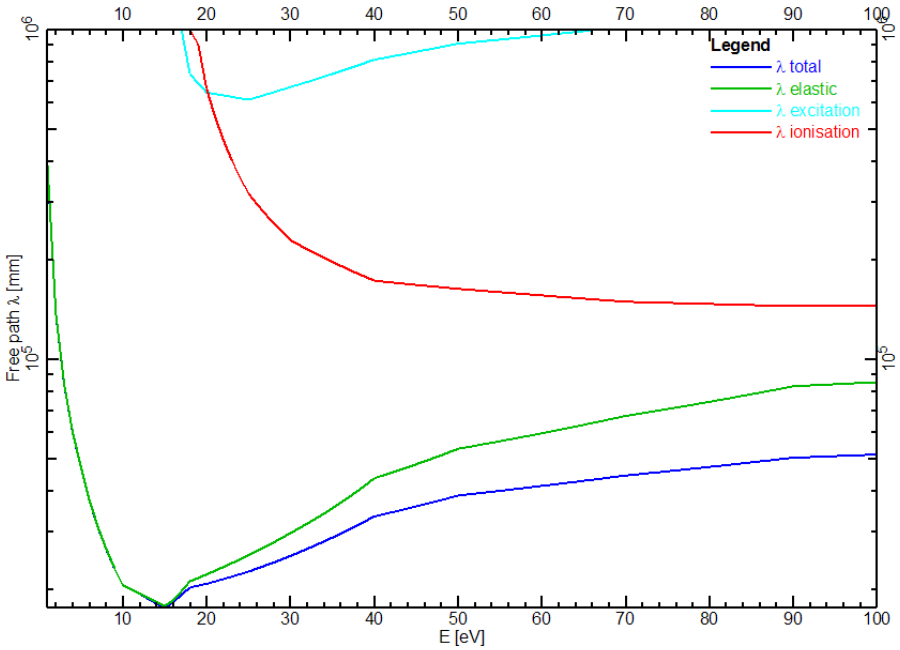


Obrázek 3.3: Řez iontovým zdrojem – třetí návrh, (a) ekvipotenciální hladiny, (b) trajektorie elektronů a iontů.

Elektrony emitované z vlákna již konají oscilující pohyb, nicméně po určitém čase vždy narazí na anodu. Bylo vypočítáno, že celková dráha nejdéle oscilujícího elektronu l_{max} měří přibližně 230 mm. Dráhy dalších elektronů (emitovaných z vlákna pod jinými počátečními úhly) nepřesáhly 80 mm. Bylo zjištěno, že tyto délky nestačí k tomu, aby se elektron srazil s jinou částicí, tím pádem nemůže dojít ani k ionizaci atomů argonu.

Na Obrázku 3.4 je zobrazen graf závislosti *střední volné dráhy* elektronů na jejich energii. Světle modrá křivka udává minimální délku střední volné dráhy potřebnou pro excitaci, zelená pro elastickou srážku a tmavě modrá udává celkovou střední volnou dráhu. Nejpodstatnější je ovšem červená křivka, která udává minimální délku střední volné dráhy potřebnou pro *ionizaci*.

Graf odpovídá srážkovým průřezům [12] a byl vygenerován pluginem *Collisions* [13] programu EOD použitým při simulaci srážek elektronů[1]. Z grafu lze vidět, že pro ionizaci je optimální energie elektronů cca 100 eV, při níž dosahuje střední volná dráha potřebná pro ionizaci svého minima – cca 150 metrů. Z toho vyplývají dva základní požadavky na návrh zdroje, a to na minimální délku trajektorie elektronů a na jejich energii, která je dána potenciálovým rozdílem katody a anody.



Obrázek 3.4: Graf závislosti střední volné dráhy elektronů na jejich energii. Světle modře je zobrazena dráha potřebná pro excitaci, červeně pro ionizaci, zeleně pro elastickou srážku a tmavě modře celková délka střední volné dráhy.

3.4. Konečný návrh

V důsledku předchozího zjištění o nedostatečné délce trajektorií elektronů bylo nutné opět přepracovat celý návrh iontového zdroje. V této sekci bude model detailně popsán a bude vysvětleno, z jakých důvodů byl návrh prohlášen za konečný.

I při tvorbě tohoto návrhu bylo vytvořeno velké množství různých konfigurací, které se lišily tvarem a polohou elektrod. U každé konfigurace byly provedeny simulace elektrosta-

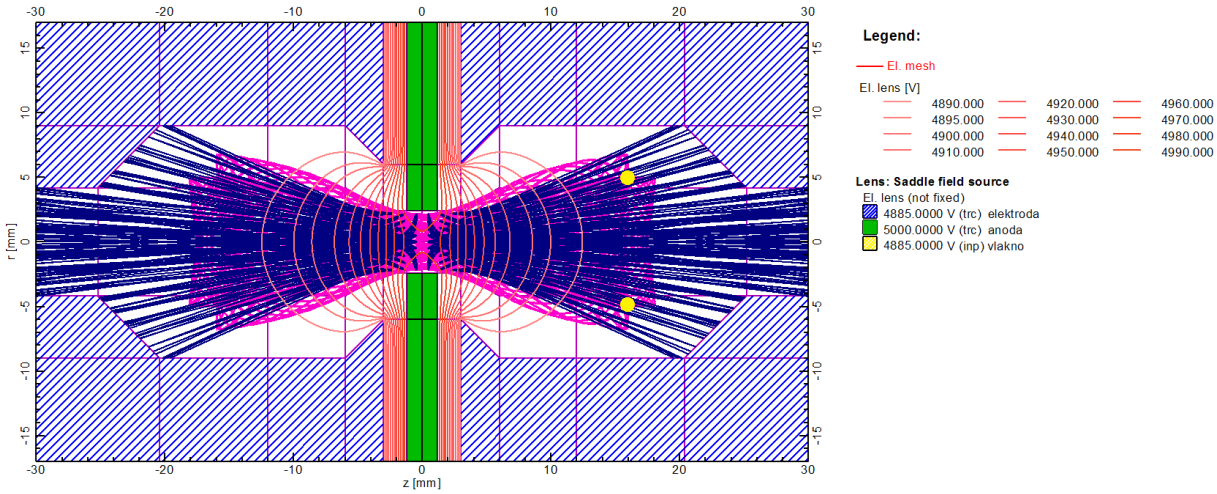
[1] dalšími vstupními daty byl tlak $p = 10^{-3}$ Pa a teplota $T = 300$ K

tického pole a trasovány elektrony a ionty. Návrh popsaný níže je výsledkem dlouhého optimalizačního procesu.

Model má opět válcovou symetrii a je složen ze tří elektrod. Anoda je tvořena jednoduchým prstencem, zatímco další elektrody mají na straně přiléhající k anodě výčnělky, které modelují elektrické pole tak, aby elektrony mohly konat oscilující pohyb sedlovým bodem. Extrakční otvor elektrod je optimalizován tak, aby bylo dosaženo co největší výtěžnosti extrahovaných iontů, zároveň docházelo k omezení tlakového gradientu a také k co nejmenšímu pronikání vnějšího elektrického pole dovnitř zdroje.

Model s ekvipotenciálními hladinami a trajektoriemi elektronů a iontů je zobrazen na Obrázku 3.5. Modře šrafovaná je dvojice elektrod, anoda je zeleně vyplněná, vlákno je kvůli přehlednosti zobrazeno žlutě. Červeně jsou zobrazeny ekvipotenciální hladiny; růžově jsou naznačeny trajektorie elektronů emitovaných z vlákna; tmavě modře pak trajektorie kladných iontů argonu vzniklých v okolí sedlového bodu.

Trajektorie všech naznačených elektronů jsou nyní teoreticky nekonečně dlouhé, omezené pouze počtem iteračních kroků programu EOD. Výpočty trajektorií kationtů argonu byly provedeny pro 200 částic vzniklých v okolí sedlového bodu. Do Obrázku 3.5 jich bylo kvůli přehlednosti zaneseno o polovinu méně. Z celkového počtu 200 iontů jich 126 vyletí ven ze zdroje, dá se tedy říci, že teoretická účinnost extrakce je 63%.



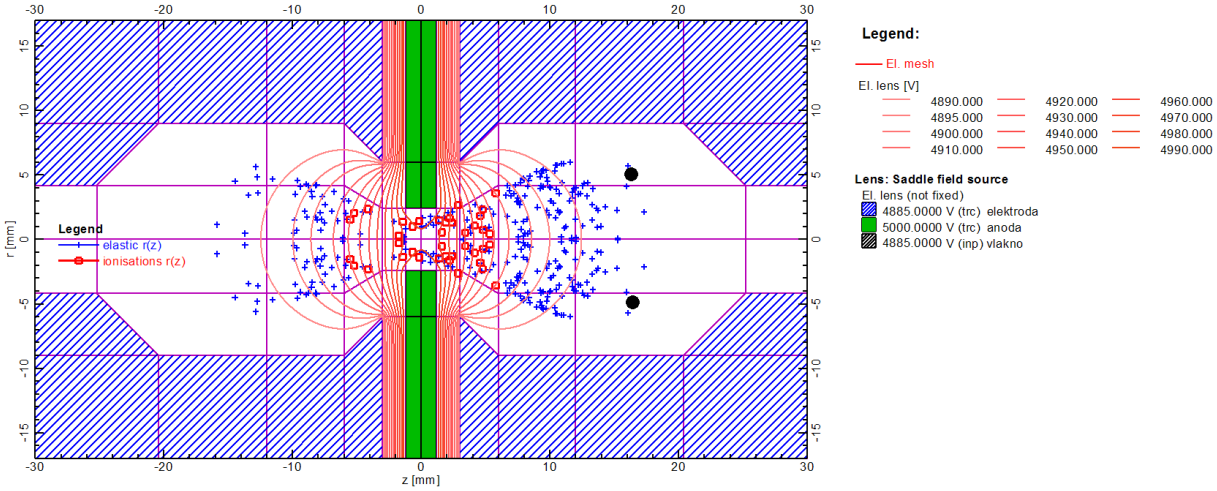
Obrázek 3.5: Řez iontovým zdrojem – konečný návrh. Dvojice elektrod je modře šrafovaná, anoda má zelenou výplň, vlákno je zobrazeno žlutě. Trajektorie elektronů mají růžovou barvu, ionty tmavě modrou.

Po zjištění délky trajektorií elektronů a účinnosti extrakce započaly simulace fyzikálních procesů uvnitř ionizační komory. Bylo trasováno celkem 1000 elektronů emitovaných z vlákna pod různými počátečními úhly. Program EOD počítal interakce jednotlivých elektronů s atomy argonu. Počáteční podmínky byly nastaveny stejně jako při výpočtu střední volné dráhy elektronů, tedy tlak 10^{-3} Pa, teplota 300 K a srážkové průřezy získané z [12].

Simulace trvala sedm a půl hodiny a jejím výsledkem byla místa vzniku a počet jednotlivých interakcí, které lze vidět na Obrázku 3.6. Z 1000 elektronů se jich 161 elasticky srazilo a 20 elektronů posloužilo k ionizaci. Žádný atom nebyl excitován, i když simulační

model bral excitace v potaz. Vzniklé sekundární elektrony byly taktéž trasovány a přispěly ke zvýšení pravděpodobnosti vzniku interakce.

Teoretická účinnost ionizace je tedy 2,0%. Je ovšem nutné mít na paměti, že přibližně dvě třetiny vzniklých iontů jsou extrahovány ven ze zdroje. Dále lze vidět, že polovina iontů vznikne na opačné straně komory než je extrakční otvor, a proto tyto ionty nepřispějí k celkovému iontovému proudu. Výsledná účinnost ionizace vychází tedy přibližně 0,63%, což je hodnota lehce vyšší či srovnatelná s hodnotami účinností elektronově srážkových zdrojů, které jsou uvedeny v [1].



Obrázek 3.6: Řez iontovým zdrojem – konečný návrh. Zaznamenána místa interakcí elektronů s atomy (modrá = elastická srážka, červená = ionizace).

Důležitou vlastností elektrostatického pole je invariantnost vůči změně měřítka. Pokud jsou ve fungujícím modelu v libovolném měřítku zvětšeny či zmenšeny *všechny* rozměry, funkce „nového“ zdroje není nijak pozměněna. Tohoto jevu bylo využito i při tvorbě konečného modelu – muselo být přihlédnuto ke konstrukčním a technickým možnostem výroby. O konstrukčním řešení pojednává kapitola 4.

3.5. Odhady parametrů zdroje

Souběžně s vývojem elektronově-optického a konstrukčního návrhu byly jednoduchými výpočty odhadovány teoretické parametry iontového zdroje. Vstupními hodnotami výpočtů byly některé fyzikální konstanty, materiálové konstanty wolframu, parametry vlákna a ionizační oblasti. Tyto hodnoty shrnuje Tabulka 3.2. Hlavním výstupem výpočtu je tepelný výkon vlákna P a proud I_{out} iontů extrahovaných ze zdroje.

Tepelný výkon vlákna lze spočítat využitím klasického vztahu

$$P = RI^2, \tag{3.1}$$

kde R je elektrický odpor vlákna při žhavicí teplotě T_v. Je známé, že měrný elektrický odpor kovů se zvyšuje s rostoucí teplotou podle vztahu

$$\varrho_T = \varrho_0 \left(1 + \alpha\Delta T + \beta\Delta T^2\right). \tag{3.2}$$

parametr	značka	hodnota	jednotka
měrný elektrický odpor (20°C) [14]	ϱ_{20}	$5,28 \cdot 10^{-8}$	Ω·m
teplotní součinitel rezistivity [15]	α	$4,82 \cdot 10^{-3}$	K^{-1}
teplotní součinitel rezistivity [15]	β	$6,76 \cdot 10^{-7}$	K^{-2}
výstupní práce [6]	W_e	4,54	eV
Richardsonova konstanta [6]	A	60	$A \cdot cm^{-2} \cdot K^{-2}$
průměr vlákna	ϕ	0,15	mm
průměr kružnice vlákna	d	10	mm
žhavicí teplota vlákna	T_v	2500	K
proud protékající vláknem	I	5	A
tlak v ionizační oblasti	p	10^{-3}	Pa
teplota v ionizační oblasti	T	300	K
průměr a délka ionizační oblasti	$D; L$	6;12	mm
účinný ionizační průřez Ar (100 eV) [12]	σ_i	2,85	$Å^2$

Tabulka 3.2: Shrnutí vstupních parametrů pro výpočty.

Všeobecně se tabeluje hodnota měrného elektrického odporu při pokojové teplotě ϱ_{20}, proto musela být z rovnice (3.2) nejdříve vyjádřena hodnota ϱ_0 a až posléze mohla být vypočítána hodnota při žhavicí teplotě ϱ_{2500}.

Elektrický odpor R je pak dán vztahem

$$R = \varrho_T \frac{l}{S}, \tag{3.3}$$

kde l je délka vlákna a S jeho průřez.

Po dosazení číselných hodnot z Tabulky 3.2 vychází hodnota odporu vlákna $R = 1,48\ \Omega$ a tepelný výkon vlákna $\mathbf{P = 36,97\ W}$.

Z rovnice (2.11) byla vypočítána proudová hustota elektronů j_e emitovaných z vlákna. Dále byla z rovnice (2.3) vypočítána koncentrace atomů argonu n. Efektivní objem ionizace V_{ef} je roven objemu válce, tedy $\frac{\pi D^2 L}{4}$. Všechny tyto hodnoty byly následně dosazeny do rovnice (2.2). Tato rovnice však udává *celkový* iontový proud tekoucí ven z ionizační oblasti. Ne všechny ionty jsou však schopné opustit zdroj extrakčním otvorem (viz Obrázek 3.5). Jednoduchou trojčlenkou byl vypočítán proud iontů I_{out}, který teče ven z extrakčního otvoru.

Po dosazení číselných hodnot vychází proudová hustota elektronů $j_e = 0,26\ A \cdot cm^{-2}$, iontový proud $I_i = 6,12\ \mu A$ a extrahovaný iontový proud $\mathbf{I_{out} = 240\ nA}$.

Nicméně je nutné dodat, že se jedná o zjednodušené teoretické výpočty, které neberou v potaz vliv prostorového náboje, možnost rekombinace iontů a další faktory, které se mohou v reálné situaci vyskytnout.

4. Konstrukční návrh

Po vytvoření konečného elektronově-optického návrhu bylo možné přistoupit k samotnému konstrukčnímu řešení. Při tvorbě konstrukčního návrhu bylo přihlédnuto k mnoha různým aspektům, které ovlivnily konečný vzhled celého zdroje. Podobně jako v předchozí kapitole, i zde bude v jednotlivých sekcích popsán vývoj návrhu, jeho úskalí a důležité konstrukční změny. Následně bude detailně popsán konečný návrh.

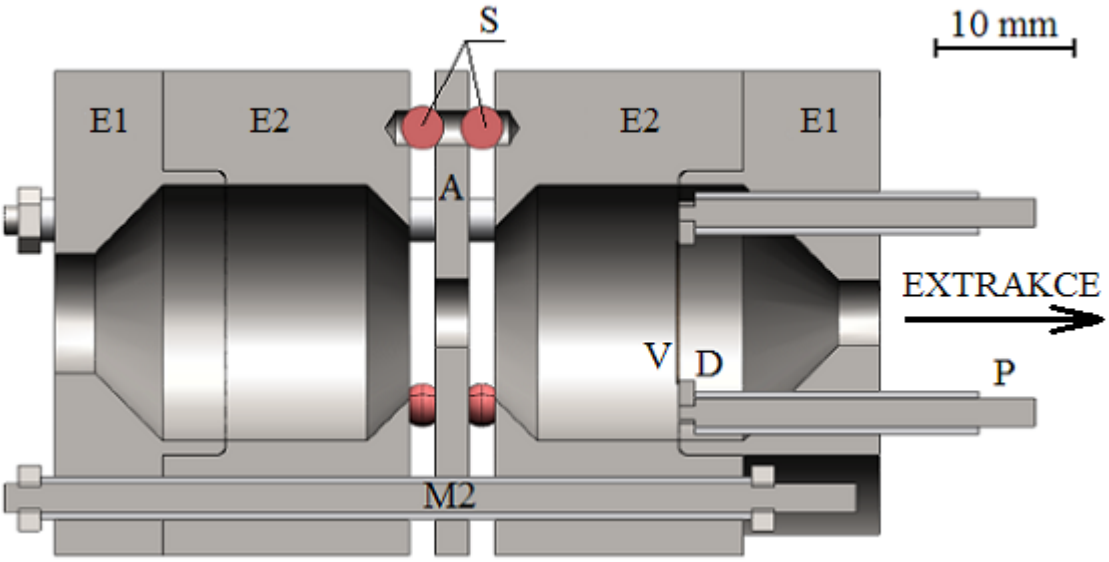
4.1. První konstrukční návrh

Velikost a umístění elektrod prvního návrhu přesně kopíruje geometrii elektronově-optického návrhu (Obrázek 3.5, resp. 3.6). Celková délka těla dosahuje 60 mm a vnější průměr zdroje 34 mm. Návrh je zobrazen na Obrázku 4.1.

V tomto návrhu byl zohledněn poněkud výrobně náročnější tvar ionizační komory. Obě elektrody tvořící převážnou část těla zdroje jsou dělené, což zabezpečuje snadnou a technologicky nenáročnou výrobu. Rovina rozdělující elektrodu se nachází na styku válcové a kuželové části ionizační komory dále od sedlového bodu. Masivní těla obou elektrod (E2) se nachází blíže k anodě, zatímco užší části (E1) s extrakčním, resp. přírubovým otvorem zakončují tělo zdroje. Celé tělo (kromě výměnné části elektrody s vláknem) je pevně spojeno třemi závitovými tyčemi M2, které jsou vedeny skrz keramické trubičky.

Spojení elektrodových částí E1 a E2 je řešeno pouze tvarovým stykem – je zde vytvořeno rozebíratelné přechodné uložení, které zabezpečí jak pevné spojení obou částí, tak i snadnou demontáž za účelem výměny vlákna. Vlákno (V) je bodovým svařováním přichyceno na pomocných destičkách (D), které jsou umístěny na válcových proudových průchodkách (P). Ty jsou vedeny skrz válcové izolace, které je izolují od elektrody. Není zde ale vyřešeno zajištění izolací a průchodek proti pohybu.

Anoda (A) je tvořena úzkým prstencem a od obou elektrod je izolována na každé straně trojicí safírových kuliček (S), které dosedají do válcových otvorů v anodě i elektrodách a tím zároveň vymezují vůli mezi elektrodami.



Obrázek 4.1: První konstrukční návrh. E1, E2 – elektrody, A – anoda, V – vlákno, D – pomocné destičky, P – proudové průchodky, S – safírové kuličky, M2 – závitové tyče.

4.2. Návrh se šroubovanou elektrodou

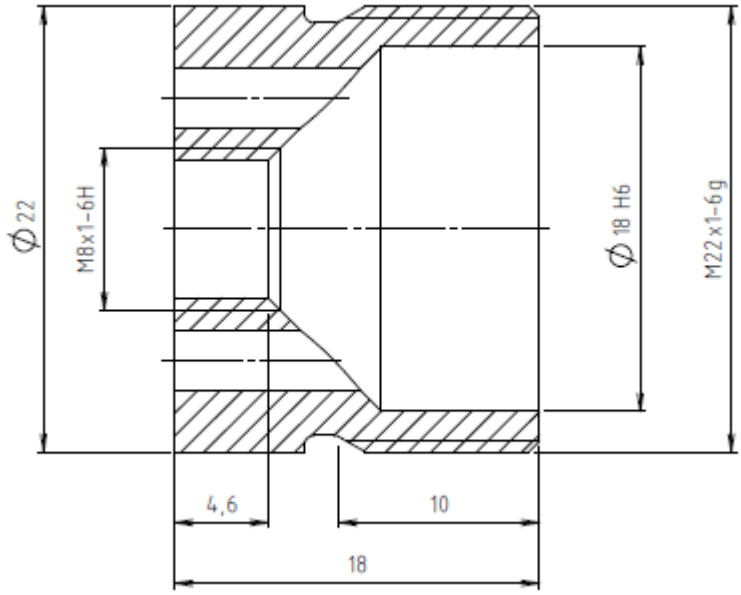
Návrh s výměnnou elektrodou umístěnou v extrakční části zdroje byl považován za výhodnější, nicméně od tohoto návrhu muselo být odstoupeno. Vyskytlo se více důvodů proč přemístit výměnnou část elektrody do přírubové části.

Zřejmě nejzásadnějším důvodem se stal fakt, že na extrakční část je plánováno umístit fokusační a vychylovací optiku. Tyto části by se v případě výměny vlákna musely odmontovat spolu s výměnnou elektrodou. Muselo by tedy být promyšleno samostatné spojení přídavné optiky, aby nemusela být znovu skládána při každé výměně vlákna.

Na vlákno i na přídavnou optiku je také nutné přivést nenulová napětí o různých hodnotách. Napětí je přiváděno vodivými dráty přes elektrické průchodky v přírubě. Mezi přírubou a vláknem (případně optikou) se však nachází celé tělo zdroje, od kterého musí být vodiče odizolovány. To vyžaduje dodatečné konstrukční úpravy těla zdroje pro umístění keramických izolací, jimiž je vhodné vodiče vést.

Dalším důvodem pro změnu umístění je problematický přívod proudu na vlákno. Ten je řešen pomocí ocelových průchodek, na které jsou připojeny proudové vodiče. Takovéto uspořádání vyžaduje poněkud více prostoru, jehož je v extrakční části zdroje nedostatek. Případnou fokusační optiku je totiž vhodné umístit co nejblíže extrakci, aby došlo k urychlení či fokusaci iontů co nejdříve po extrakci a omezily se tím ztráty vlivem prostorového náboje.

V neposlední řadě mohou pomocné destičky, vodivé průchodky či samotné vlákno vychylovat trajektorie iontů mířících k extrakčnímu otvoru a tím negativně ovlivňovat proudové charakteristiky zdroje.



Obrázek 4.2: Řez šroubovací výměnnou elektrodou se základními rozměrovými kótami.

Kvůli těmto důvodům byla přesunuta výměnná část elektrody do přírubové části. Na Obrázku 4.2 je zobrazen řez výměnnou částí elektrody se základními kótami. Ionizační komora a otvory pro průchodky, které přivádějí proud na vlákno, zůstávají beze změny. Návrh se však liší způsobem spojení této části elektrody s tělem zdroje a s přírubou. Ani jeden ze spojů nemůže být trvalý, což vyřazuje možnost svaření dílů. Kvůli snadné demontáži nemůže průměr elektrody dosahovat plných 34 mm – vyšroubování by nebylo

možné kvůli závitovým tyčím, které spojují tělo zdroje. Z důvodu zmenšení průměru také nelze spojit elektrodu s tělem pomocí šroubu.

Bylo tedy navrženo řešení obsahující vnitřní závit M8x1 pro spojení s přírubou a vnější závit M22x1 pro spojení s tělem zdroje. K přírubě vede upravená bezešvá trubka, na jejíž jeden konec je vyřezán vnější závit. Taktéž do druhé části elektrody je místo zasouvací drážky vyřezán závit pro našroubování.

Tento návrh byl však také zavržen, a to zejména z důvodu velmi obtížné vyrobitelnosti závitu M22x1.

4.3. Konečný konstrukční návrh

Po důkladných konzultacích zejména s Ing. Jindřichem Machem, Ph.D. byla navržena konečná konstrukční podoba iontového zdroje. V následujících sekcích budou jednotlivě popsány nejdůležitější části zdroje a vazby mezi nimi. Kompletní výkresová dokumentace je přiložena k této bakalářské práci.

4.3.1. Výměnná elektroda a žhavicí vlákno

Žhavicí vlákno je zřejmě nejdůležitější částí iontového zdroje, proto bylo nutné konstrukční návrh přizpůsobit právě jemu. Vlákno je vyrobeno z wolframového drátu o průměru $\phi = 0,15$ mm stočeného do kružnice. Jelikož se wolframový drát velice špatně ohýbá, minimální průměr této kružnice se pohybuje okolo 10 mm. Kvůli tomuto faktu bylo nutné změnit celkové měřítko elektronově-optického návrhu, jak bylo předesláno v minulé kapitole. Měřítko zvětšení bylo optimalizováno tak, aby elektrony emitované z vlákna měly stabilní (tzn. nekonečné) oscilující trajektorie a aby celkový vnější průměr nepřesáhl 35 mm, tedy průměr vnitřní části příruby DN40CF.

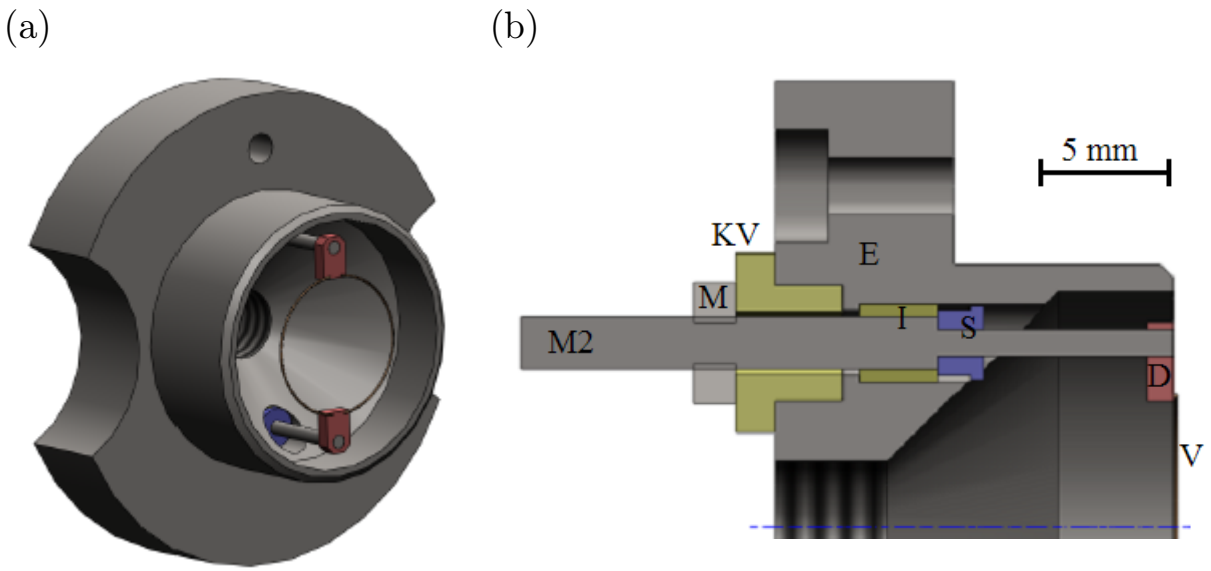
Z konstrukčního hlediska je vlákno (V) tvořeno dvěma půlkružnicemi o průměru 10 mm, které jsou bodově přivařeny na pomocné destičky (D). Destičky jsou nalisovány na zúžené konce závitových tyčí M2, které jsou přes keramické izolace (I) vyvedeny mimo zdroj. Kvůli zabránění nežádoucímu naprašování izolací[1] jsou na zúžené části tyčí nalisovány také stínící kroužky (S). Závitové tyče jsou k elektrodě (E) uchyceny pomocí matic (M), jež dosedají na keramické vložky (KV) zapuštěné do elektrody. Tento systém zabezpečuje přívod proudu na vlákno, izolaci průchodek od elektrody a také nepohyblivost jednotlivých částí vůči sobě i vůči elektrodě. Vlákno je takto ustanoveno do roviny vzdálené 16 mm od roviny sedlového bodu. Uspořádání je zobrazeno na Obrázku 4.3(b).

Vlastní tělo výměnné elektrody je nyní více podobné na původně zamýšlenou „zasouvací“ elektrodu E1 (viz Obrázek 4.1). Tělo má vnější průměr 34 mm a po stranách jsou vyrobena dvě vybrání, která zabezpečují bezproblémový přístup napěťových vodičů k dalším částem zdroje. Zásuvná část je o něco delší než délka drážky v protikusu, což poskytuje dostatek prostoru pro matice našroubované na koncích svorníků, které spojují zbytek zdroje. V horní části elektrody je vyrobeno zahloubení pro šroub s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem. Výměnná část elektrody tedy není s protikusem (potažmo celým tělem zdroje) spojena svorníky, ale pomocí jediného šroubu, jak lze vidět například na Obrázku 4.5(a). Toto uspořádání zabezpečuje jak rychlou demontáž výměnné části, tak přesné uložení a pevné spojení obou částí elektrody. Spojení výměnné elektrody s přírubou

[1] naprašování vede ke vzniku vodivé vrstvy a následnému zkratování

je realizováno pomocí závitu M6. Tímto otvorem je přiváděn plyn do prostoru ionizační komory, což bude naznačeno i v sekci 4.3.4.

Celkový 3D pohled na sestavu výměnné elektrody je zobrazen na Obrázku 4.3(a).



Obrázek 4.3: Výměnná elektroda s vláknem a přívodem proudu. (a) celkový 3D pohled, (b) řez s popisem částí.

4.3.2. Elektroda s extrakčním otvorem a vnitřní elektrody

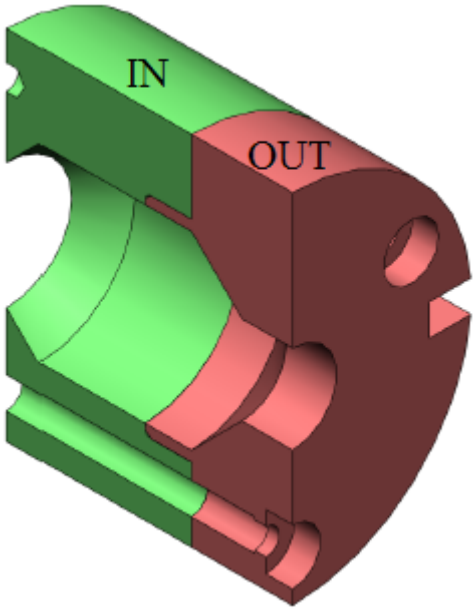
Vnější (extrakční) část elektrody je z důvodu zachování symetrie velmi podobná tělu výměnné elektrody. Tvar ionizační komory je stejný, stejně jako vnější průměr. Opět se zde objevuje zásuvná část, která však nemusí být prodlužována kvůli svorníkům. Vnější vybrání jsou nahrazena pouze dvojicí drážek pro vedení keramických trubiček. Extrakční otvor, který je na rozdíl od přírubového otvoru bez závitu, má průměr 8,4 mm. Průměr byl zvolen jako optimální již při simulacích v EOD (viz sekce 3.4). V extrakční části elektrody jsou také vyvrtány otvory, do kterých jsou umístěny keramické vložky a trubičky pro vedení svorníků. Systém děr o různých průměrech je navržen tak, aby zabraňoval pohybu keramik a svorníků sevřených maticemi. Na Obrázku 4.4 je naznačena vnější část (červená, OUT) spojená s vnitřní částí (zelená, IN) extrakční elektrody.

Dvojice vnitřních elektrod, symetricky umístěných po obou stranách sedlového bodu, tvoří podstatnou část těla zdroje. Obě elektrody jsou vesměs identické, jediným rozdílem mezi díly jsou dva vyřezané závity v těle elektrody blíže k přírubě. Jeden závit slouží ke šroubovému spojení s výměnnou elektrodou, druhý závit je určen pro šroub sloužící pro přívod napětí na celou „přírubovou“ elektrodu. Výběhy závitů jsou z vnějšku navrtané malým otvorem. Tímto se předchází zhoršování tlaku v UHV aparatuře vlivem uvolňování plynu uvězněného ve výběhu závitu.

Vnitřní elektroda má opět průměr 34 mm a po jejím obvodu jsou opět vytvořeny dvě drážky, kterými budou vedeny keramické trubičky s elektrickými vodiči. Uvnitř elektrody je vysoustružena válcová a kuželová část ionizační komory. Průměr komory dosahuje 18 mm, na vnitřním konci elektrody je redukován na 12 mm. Na opačném konci je vyrobena drážka, do níž se nasouvá výměnná a extrakční elektroda. Skrz celé tělo elektrody je

vyvrtána trojice otvorů o průměru 3 mm, kterými prochází keramické trubičky izolující svorníky.

Vnitřní elektrody musí být taktéž izolovány od společné anody. Izolace a zároveň funkční vůle mezi elektrodami je ustavena na obou stranách trojicí safírových kuliček o průměru 3 mm, které jsou vsazeny do otvorů o průměru 2,4 mm souose umístěných v každé elektrodě. Mezi elektrodou a anodou tak vzniká vůle 1,8 mm.



Obrázek 4.4: Izometrický pohled na vnitřní (zelená, IN) a vnější (červená, OUT) část elektrody s extrakčním otvorem.

4.3.3. Anoda

Anoda je na rozdíl od elektrod jedním z výrobně jednodušších prvků zdroje. Má stejný vnější průměr jako elektrody, je však mnohem tenčí a její vnitřní otvor má mnohem menší průměr. Anodou jsou rovnoměrně vyvrtány otvory pro safírové kuličky a pro keramické izolace svorníků. Po straně anody je na rozdíl od elektrod vyroben kruhový otvor pro vedení izolovaných elektrických vodičů a zamezení jejich vypadení z drážky. Druhá drážka je nahrazena závitem M2, do nějž bude zavedena krátká závitová tyč přivádějící napětí na anodu.

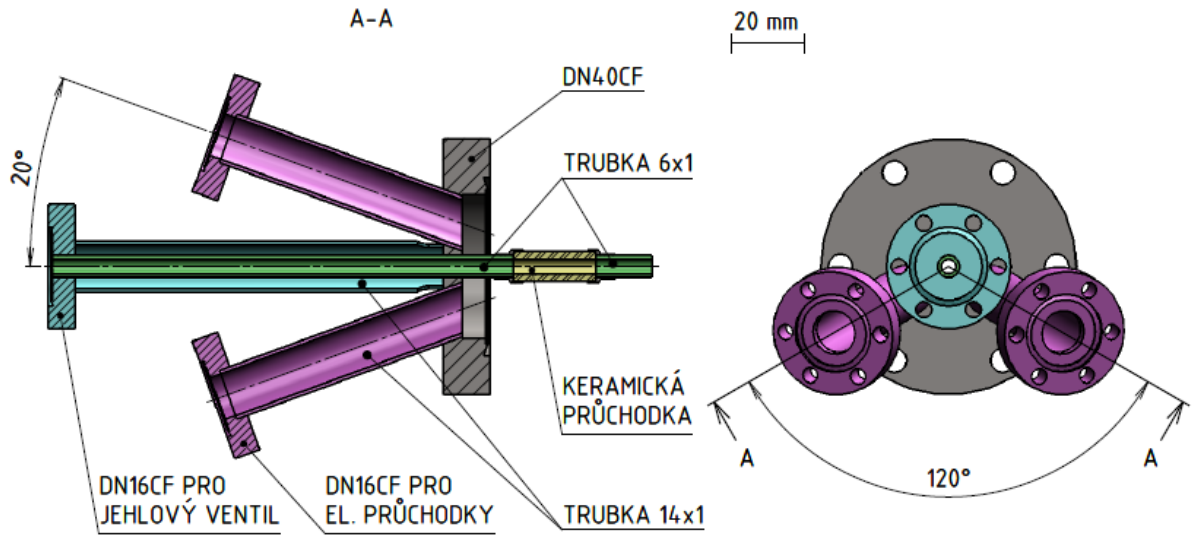
4.3.4. Příruba

Polotovarem pro výrobu je běžná zaslepovací příruba Conflat DN40. Z důvodu snížení hmotnosti a zlepšení další práce s přírubou je vnitřní část příruby o průměru 39 mm ztenčena na šířku 5 mm. Ve středu příruby je vyvrtán otvor o průměru 6 mm, kterým je vedena nerezová trubka 6x1 přivádějící plyn do iontového zdroje. Jelikož příruba musí být uzemněna a na všechny elektrody je přivedeno vysoké napětí, musí být mezi trubku a tělo zdroje vložena keramická průchodka. Samotné uchycení těla zdroje je realizováno pomocí kratší trubky 6x1, na jejímž jednom konci je vyřezán vnější závit M6, na který lze našroubovat výměnnou elektrodu.

Na druhém konci trubky, která přivádí plyn do komory, je přivařena příruba DN16CF. Ta slouží k připojení jehlového ventilu, který umožňuje velmi jemné dávkování plynu. Jelikož je tento ventil poměrně těžký, z pevnostního hlediska by jej trubka 6x1 nemusela udržet. Proto je zvnějšku k oběma přírubám přivařena pomocná trubka 14x1, jejíž jediným účelem je vyztužit konstrukci, aby nedošlo k ohybu nebo zlomení přívodní trubky. Na jednom konci trubky (blíže k přírubě DN40) se nachází malé vybrání, které je nutné udělat z rozměrových důvodů. Vybrání také zabraňuje uvěznění plynu mezi trubkami.

Skrz přírubu musí být vedeny veškeré napěťové a proudové vodiče. Proto jsou na přírubu přivařeny dvě trubky 14x1 zakončené přírubami DN16CF. Takovýto koncept umožňuje jednak větší flexibilitu z hlediska počtu přiváděných elektrických vodičů, ale zejména umožňuje snadnou a méně pracnou výměnu poškozených průchodek. Příruby lze spojit s protikusem, tedy druhou přírubou DN16CF, na kterou je již od výrobce přichycena keramická izolace nesoucí různý počet vodičů. Jedna z přírub také může být zaslepena nebo použita k jinému účelu než pro připojení elektrické průchodky.

Nicméně z rozměrových důvodů nemohly být trubky s přírubami umístěny vedle sebe kolmo k přírubě. Bylo proto navrženo jiné řešení, ve kterém jsou do příruby zešikma vyvrtány otvory zabezpečující správné umístění a orientaci trubek. Úhel mezi trubkami je 120° a obě jsou vedeny pod úhlem 20° měřeným od osy. Zadní pohled a řez připojovací přírubou DN40 s výše popsanými komponentami lze vidět na Obrázku 4.5. Podobné uspořádání se objevuje i v iontově-atomárním zdroji, který byl vyvinut Ing. Jindřichem Machem, Ph.D. [5] a který se používá v laboratořích Ústavu fyzikálního inženýrství.



Obrázek 4.5: Konstrukční uspořádání příruby DN40 se dvěma přírubami DN16 pro elektrické průchodky, přírubou pro připojení jehlového ventilu a přívodními trubkami oddělenými keramickou průchodkou.

4.3.5. Sestavení iontového zdroje

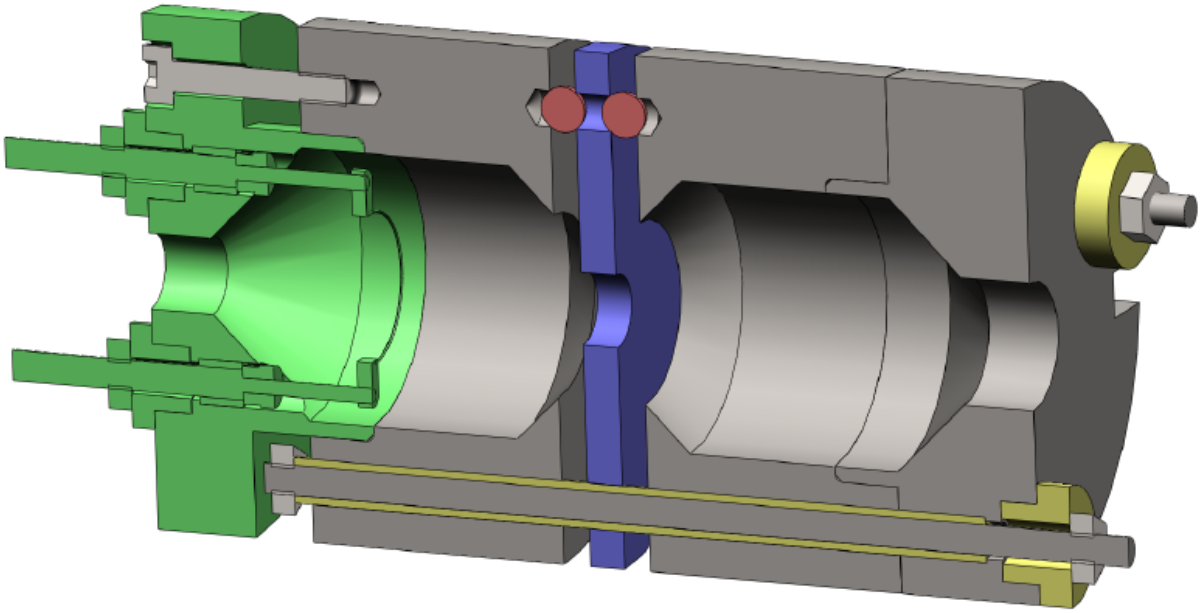
V předchozích sekcích byly popsány jednotlivé součásti iontového zdroje, zde bude pojednáno o jeho vlastním sestavení, které je velmi jednoduché a intuitivní.

Sestavení probíhá směrem od vnější extrakční elektrody k přírubě. Vnitřní část elektrody se zasune do extrakční elektrody a pootočí tak, aby korespondovaly boční drážky i průchozí otvory v obou částech. Do neprůchozích otvorů na čele vnitřní části se umístí trojice safírových kuliček, na které se usadí anoda. Anodu je nutné umístit tak, aby závitová díra byla umístěna v boční drážce na opačné straně než závitová díra v extrakční elektrodě. Na anodu se umístí druhá trojice kuliček a tělo se uzavře přidáním druhé vnitřní části elektrody, opět s ohledem na průchozí otvory a boční drážky. Do průchozích otvorů se zasunou keramické trubičky, skrz ně se protáhnou svorníky s maticemi. Konce svorníků nesmí nad čelo vnitřní elektrody přesahovat o více jak 3,5 mm, aby nedošlo ke kontaktu svorníků a výměnné elektrody. Do otvorů v extrakční elektrodě se zasunou keramické vložky, na něž dosednou utažené matice na svornících. Tím je vytvořena pevná část těla zdroje.

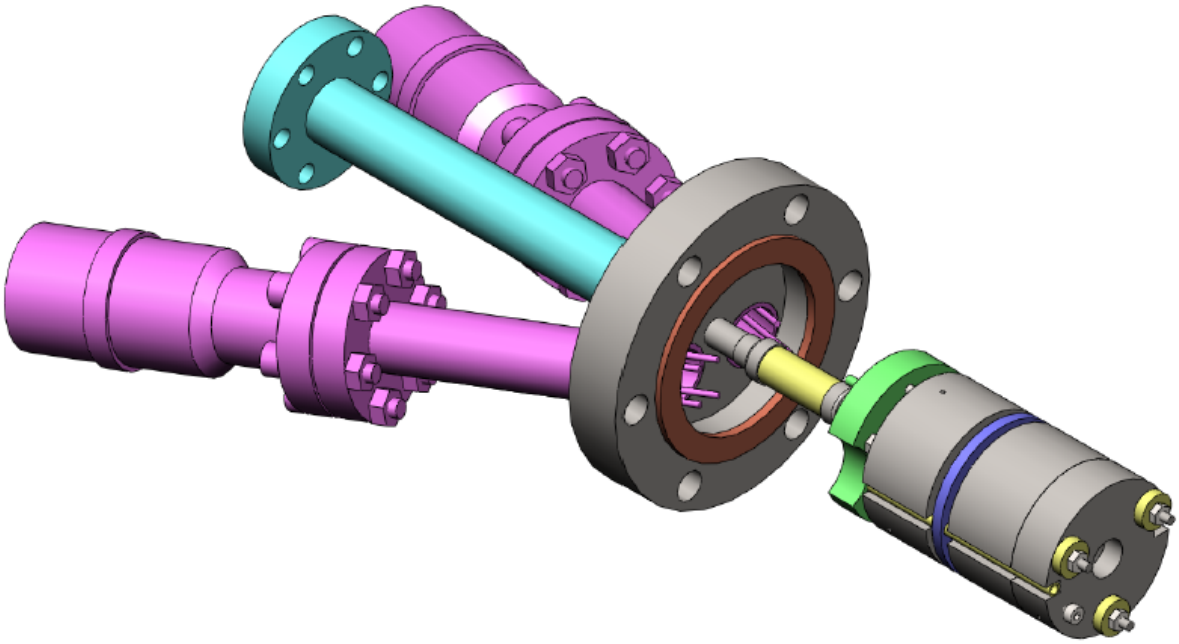
Do pevného těla se zasune zkompletovaná výměnná elektroda s vláknem a části se napevno spojí šroubem. Vzniklé tělo (Obrázek 4.6(a)) se našroubuje na závitovou část trubky připojené k přírubě. Vzhledem k válcové symetrii lze tělo zdroje libovolně pootočit, je však vhodné jej natočit drážkami co nejblíže k elektrickým průchodkám v přírubě, jak je naznačeno na Obrázku 4.6(b).

Závěrečnou úlohou před vložením zdroje do UHV komory je připojení elektrických průchodek na volné příruby DN16CF a jejich vodivé spojení s jednotlivými částmi zdroje.

(a)



(b)



Obrázek 4.6: Konstrukční návrh iontového zdroje. (a) řez tělem zdroje, (b) kompletní sestavení zdroje. Barvy: fialová – elektrické průchodky, světle modrá – připojení jehlového ventilu, zelená – výměnná elektroda, modrá – anoda, červená – safírové kuličky, žlutá – keramika.

5. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo provést rešeršní studii problematiky iontových zdrojů a vytvořit elektronově-optický a konstrukční návrh iontového zdroje pro odprašování dle zadaných parametrů, které jsou uvedeny v Tabulce 3.1.

Pro efektivní odprašování vzorků je zapotřebí, aby iontový zdroj dokázal vytvořit iontový svazek o vysoké proudové hustotě (řádově stovky μA/cm^2) a velké energii (řádově jednotky keV). Z konstrukčního hlediska je vhodné, aby byl zdroj co nejjednodušší na výrobu a montáž. Spojení zejména těchto dvou požadavků vedlo k výběru iontového zdroje se sedlovým polem. Přínosem ve výzkumu problematiky tohoto typu zdrojů je použití wolframového vlákna jako žhavené katody, což by mělo vést ke zvýšení proudové hustoty iontového svazku.

Bakalářská práce je členěna do tří částí. V první, teoretičtější kapitole je provedena rešeršní studie iontových zdrojů. Jsou zde popsány základní fyzikální procesy probíhající v iontových zdrojích. Dále je vysvětlen princip fungování elektronově srážkových zdrojů. Závěr kapitoly se věnuje iontovým zdrojům se sedlovým polem.

Druhá kapitola popisuje vývoj elektronově-optického návrhu zdroje. Ze začátku vývoje muselo být řešeno velké množství problémů, které se týkaly zejména ideálního uspořádání elektrod, aby bylo vytvarováno elektrostatické sedlové pole. I po dosažení oscilujícího pohybu elektronů v sedlovém poli bylo nutné vyřešit například problém s nedostatečnými délkami trajektorií elektronů. Po vytvoření konečného návrhu (Obrázek 3.5) byla provedena simulace interakcí elektronů s atomy (Obrázek 3.6). Dále byla vypočítána teoretická účinnost iontového zdroje, která vychází **0,63%**, což je hodnota srovnatelná nebo lehce vyšší než je uváděno v literatuře. V závěru kapitoly jsou odhadovány parametry vystupujícího svazku. Důležitým parametrem je iontový proud **240 nA**.

Vlastní konstrukční provedení je obsahem třetí kapitoly. Část kapitoly popisuje vývoj konstrukčního návrhu, který opět nebyl přímočarý a snadný. V průběhu vývoje musely být řešeny problémy spojené například s výrobními či rozměrovými omezeními. Při vývoji byl kladen důraz zejména na jednoduchost výroby jednotlivých součástí, dále na nenáročnost sestavení zdroje, ale zejména na snadnou demontáž při případném poškození některých částí zdroje. Konečný návrh, který je zobrazen na Obrázku 4.6(b), optimálně spojuje tyto požadavky, v maximální možné míře respektuje uspořádání elektronově-optického návrhu a vyhovuje i požadovaným parametrům.

V rámci práce byl vyvinut elektronově-optický a konstrukční návrh iontového zdroje se sedlovým polem. Zdroj se vyznačuje netradičním použitím žhavené katody, poměrně dobrou účinností ionizace a jednoduchým konstrukčním řešením. V současné době jsou jednotlivé součásti zdroje zadané do výroby. Z vyrobených částí bude sestaven prototyp iontového zdroje a budou otestovány jeho vlastnosti. Při uspokojivých výsledcích experimentů lze uvažovat o přidání fokusační a vychylovací optiky či o případném celkovém zlepšování návrhu.

Literatura

[1] VÁLYI, L. *Atom and Ion Sources.* Budapest : Akadémiai Kiadó, 1977. 429 s. ISBN 963-05-1113-4.

[2] BROWN, I.G. *The Physics and Technology of Ion Sources.* Weinheim : Wiley-VCH, 2004. 379 s. ISBN 3-527-40410-4.

[3] ŠAMOŘIL, T. *Vývoj atomárních a iontových svazkových zdrojů.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 54 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jindřich Mach.

[4] *Module 3-6, Energy Transfer in Ion Lasers* [online]. [cit. 2012-03-21]. Dostupné z: <http://cord.org/cm/leot/course03_mod06/mod03_06.htm>

[5] MACH, J. *Vývoj a aplikace UHV zařízení pro depozice tenkých vrstev (atomární a iontové svazkové systémy.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 103 s. Vedoucí dizertační práce prof. RNDr. Tomáš Šikola, CSc.

[6] *Simion, Definiton: Richardson-Dushman Equation* [online]. 2003-2006 [cit. 2012-04-22]. Dostupné z: <http://simion.com/definition/richardson_dushman.html>

[7] McILRAITH, A.H. A Charged Particle Oscillator. *Journal of Vacuum Science and Technology.* 1972, roč. 9, čís. 1, str. 209-212. ISSN 0022-5355.

[8] ABDELRAHMAN, M.M., HELAL, A.G. Developments of saddle field ion sources and their applications. *IX Radiation Physics and Protection Conference.* 2008. [cit 2012-04-12]. Dostupné z: <http://www.rphysp.com/proceeding/131.pdf>.

[9] FRANKS, J. Properties and applications of saddle-field ion sources. *Journal of Vacuum Science and Technology.* 1979, roč. 16, čís. 2, str. 181-183. ISSN 0022-5355.

[10] ZLÁMAL, J., LENCOVÁ, B. Development of the program EOD for design in electron and ion microscopy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* [online]. 2011, roč. 645, čís. 1, str. 278–282 [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900210030007>.

[11] KUŠTERA, I. *Návrh prvků ultravakuové aparatury pro sledování optických vlastností povrchů pevných látek za vysokých teplot.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojní, 1997. 86 s. Vedoucí diplomové práce RNDr. Tomáš Šikola, CSc.

[12] RAJU, G.G. Electron-atom Collision Cross Sections in Argon: An Analysis and Comments. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation.* 2004, roč. 11, čís. 4, str. 649-673. ISSN 1070-9878.

[13] NEDĚLA, V., et al. Experimental and simulated signal amplification in variable pressure SEM. *14th European Microscopy Congress.* 2008, str. 587-588 [cit. 2012-05-12]. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/content/w7822071115h72l6/>.

[14] LASSNER, E., SCHUBERT, W.D. *Tungsten: Properties, Chemistry, Technology of the Element, Alloys, and Chemical Compounds*. Springer, 1999. 416 s. ISBN 978-0-306-45053-2.

[15] *Phywe, Stefan-Boltzmann's law of radiation with an amplifier* [online]. [cit. 2012-05-11]. Dostupné z: <http://www.phywe.com/index.php/fuseaction/download/lrn_file/versuchsanleitungen/P2350101/e/P2350101.pdf>

Seznam příloh

Příloha na CD

- elektronově-optický návrh v programu EOD ..... `EOD.zip`
- 3D model iontového zdroje ..... `3D-model.STEP`
- kompletní výkresová dokumentace ve formátu PDF ..... `vykresy.zip`

Tištěná příloha

- kompletní výkresová dokumentace