



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

VÝVOJ A TESTOVANIE ŠIROKOZVÄZKOVÉHO IONOVÉHO ZDROJA

DEVELOPMENT AND TESTING OF A BROAD BEAM ION SOURCE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARIÁN ČURLEJ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK NOVÁČEK, PhD.

BRNO 2025

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav fyzikálního inženýrství
Student: **Marián Čurlej**
Studijní program: Fyzikální inženýrství a nanotechnologie
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Zdeněk Nováček, Ph.D.**
Akademický rok: 2024/25

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:

Vývoj a testování širokosvazkového iontového zdroje

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Širokosvazkové iontové zdroje se využívají například pro čištění povrchů vzorků v podmínkách vakua nebo pro odprašování materiálů ze zvoleného terče a jejich následnou depozici na povrch substrátu. Obě tyto aplikace lze využít ve spojení s elektronovou mikroskopií pro přípravu vzorků určených k následné analýze.

Cíle bakalářské práce:

Navrhněte iontový zdroj se širokým svazkem vhodný pro vestavbu například do komory rastrovacího elektronového mikroskopu.

Optimalizujte parametry zdroje ve vhodném simulačním software.

Vyrobte a otestujte vlastnosti navrženého zdroje.

Seznam doporučené literatury:

KAUFMAN, H. R.; CUOMO, J. J. a HARPER, J. M. E. Technology and applications of broad-beam ion sources used in sputtering. Part I. Ion source technology. Online. Journal of Vacuum Science and Technology. 1982, roč. 21, č. 3, s. 725-736. ISSN 0022-5355. Dostupné z: <https://doi.org/10.1116/1.571819>.

ŠIKOLA, T.; SPOUSTA, J.; DITTRICHOVÁ, L. Equipment for modification, etching and deposition of thin films based on a broad beam ion source. Scripta fac. sci. nat. univ. Masaryk Brun., 1992, 119-137.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

prof. RNDr. Tomáš Šikola, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Cieľom tejto bakalárskej práce je navrhnúť širokozväzkový iónový zdroj vhodný na integráciu do komory rastrovacieho elektronového mikroskopu (SEM). Práca sa zameriava na analýzu a optimalizáciu parametrov zdroja pomocou špecializovaného simulačného softvéru. Na základe výsledkov simulácií bude vyhotovený prototyp, ktorý následne preverím z hľadiska stability, prúdovej hustoty a homogenity iónového zväzku. Očakáva sa, že optimalizovaný zdroj rozšíri možnosti SEM, najmä o in-situ čistenie vzoriek priamo v komore.

Zdroj vyvíjam predovšetkým na úpravy povrchov v elektrónovom mikroskope, najmä na odstraňovanie tenkých kontaminačných vrstiev. Z tohto dôvodu bolo nutné zvoliť široký zväzok s nízkou prúdovou hustotou, aby nedošlo k poškodeniu samotnej vzorky. Ako najvhodnejšie riešenie sa ukázal iónový zdroj typu ALIS pracujúci v režime s nízkym výbojovým prúdom a vysokým výbojovým napätím, ktorý generuje malé množstvo iónov, avšak s vysokou kinetickou energiou.

Summary

The aim of this bachelor's thesis is to design a broad-beam ion source that can be integrated into the chamber of a scanning electron microscope (SEM). The work focuses on analysing and optimising the source parameters using dedicated simulation software. Based on the simulation results, a prototype will be fabricated and subsequently tested for beam stability, current density and homogeneity. The optimised source is expected to extend the capabilities of the SEM—most notably by enabling in-situ cleaning of samples directly inside the chamber.

The ion source is being developed specifically for surface modifications within the electron microscope, primarily for removing thin contamination layers. To avoid damaging sensitive specimens, a broad beam with low current density is required. The chosen solution is an ALIS-type ion source operated in a regime of low discharge current and high discharge voltage, which produces a modest ion flux while delivering high kinetic energy.

Klíčová slova

iont, zdroj, široký zväzok

Keywords

ion, source, broad beam

ČURLEJ M. *Vývoj a testovanie širokozväzkového iónového zdroja*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025. 33 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Nováček, PhD.

Čestne vyhlasujem, že som bakalársku prácu na tému „Vývoj a testovanie široko-
zväzkového ionového zdroja” vypracoval samostatne s použitím riadne citovaných zdrojov.
Práca nebola predložená na získanie akademického titulu na inej inštitúcii.

V Brne, dňa 23. 5. 2025

Marián Čurlej

Týmto by som rád vyjadril úprimnú vďaku Ing. Zdeňkovi Nováčkovi, Ph.D., za odborné vedenie, cenné rady a podporu pri písaní tejto bakalárskej práce; pánovi prof. RNDr. Jiřímu Spoustovi, Ph.D., za cenné odborné rady; Ing. Kataríne Rovenskej za pomoc pri meraní AFM; a Ing. Vojtěchovi Mikeráskovi za pomoc pri meraní XPS.

Ďalej by som sa chcel poďakovať Ústavu fyzikálneho inžinierstva za poskytnutie potrebných materiálov a technického zázemia.

V Brne, dňa 23. 5. 2025

Marián Čurlej

Obsah

Úvod	1
1 Iónové zdroje: vývoj, typy a charakteristika	3
1.1 História	3
1.2 Rozdelenie a vybrané typy iónových zdrojov	4
1.2.1 Elektronovo-zrážkové zdroje	4
1.2.2 Plazmové iónové zdroje	5
1.2.3 Kaufmanov iónový zdroj	6
1.2.4 RF iónový zdroj	7
2 Fyzikálne princípy iónového zdroja ALIS	9
2.1 Princíp činnosti iónového zdroja ALIS	9
2.2 Ionizačné procesy	11
3 Návrh a výroba iónového zdroja ALIS	13
3.1 Dizajn zdroja	13
3.1.1 Simulácia	14
3.1.2 Konštrukcia iónového zdroja typu ALIS	15
3.2 Popis zdroja	16
3.3 Zhotovenie a optimalizácia iónového zdroja	16
3.3.1 Výber materiálov	17
3.3.2 Výroba dielov	18
3.4 Popis a zostavenie skúšobnej aparatúry	19
3.4.1 Nosná konštrukcia	19
3.4.2 Vákuová časť aparatúry	20
3.4.3 Elektronická časť aparatúry	22
4 Testovanie	23
4.1 Úvodné testovanie	23
4.2 Test optimalizovaného riešenia	24
4.3 Depozícia tenkej vrstvy	26
4.3.1 Analýza vzorky	26
Závěr	29
Literatúra	31
Zoznam použitých skratiek	33

Úvod

Iónove zdroje patria k základným nástrojom moderných technológií v oblasti materiálového inžinierstva, mikroelektroniky a povrchových úprav. Umožňujú ciele interakciu urýchlených iónov s povrchom materiálov, čím otvárajú široké spektrum možností pre úpravu, analýzu a optimalizáciu vlastností rôznych vrstiev a štruktúr. Medzi veľmi rozšírené typy iónových zdrojov dnes patria aj širokozväzkové iónové zdroje, ktoré sa používajú v mnohých priemyselných a výskumných procesoch, ako napríklad iónové leptanie a depozície tenkých vrstiev.

Základom ich funkcie je generovanie iónov v pracovnom plyne (napríklad v argóne, kyslíku či dusíku) a následné urýchľovanie týchto iónov elektrickým poľom na požadovanú energiu. Oproti fokusovaným zdrojom s úzkym profilom zväzku prinášajú širokozväzkové iónové zdroje výhody spočívajúce v rovnomernosti a schopnosti pokrytia väčšej plochy, čo je dôležité nielen vo výskumných laboratóriách, ale aj pri priemyselnej výrobe, kde je kľúčová vysoká produktivita a reprodukovateľnosť výsledkov.

Pre správne fungovanie iónového zdroja je nevyhnutné takýto zdroj optimalizovať. Optimalizácia zdroja si vyžaduje dôkladné skúmanie viacerých parametrov – od geometrie elektród a tvaru tela samotného zdroja, cez druh a tlak pracovného plynu, až po riadenie urýchľovacieho napätia. Tieto parametre majú výrazný vplyv na homogénnosť lúča, jeho energetické spektrum, prúdovú hustotu, tvar stopy, ako aj na životnosť samotného zdroja.

Cieľom tejto bakalárskej práce je priblížiť problematiku širokozväzkových iónových zdrojov, opísať ich konštrukciu a spôsob generovania lúča, a následne predstaviť metódy ich testovania a charakterizácie. Zároveň sa sústreďíme na vplyv rôznych prevádzkových parametrov na výsledné vlastnosti lúča a navrhujeme optimalizačné kroky, ktoré prispievajú k zlepšeniu efektivity a účinnosti zdroja. Týmto spôsobom práca poskytne priblíženie problematiky vývoja a testovania širokozväzkových iónových zdrojov a ich význam v súčasnej praxi v oblasti povrchových úprav a materiálového inžinierstva.

1. Iónové zdroje: vývoj, typy a charakteristika

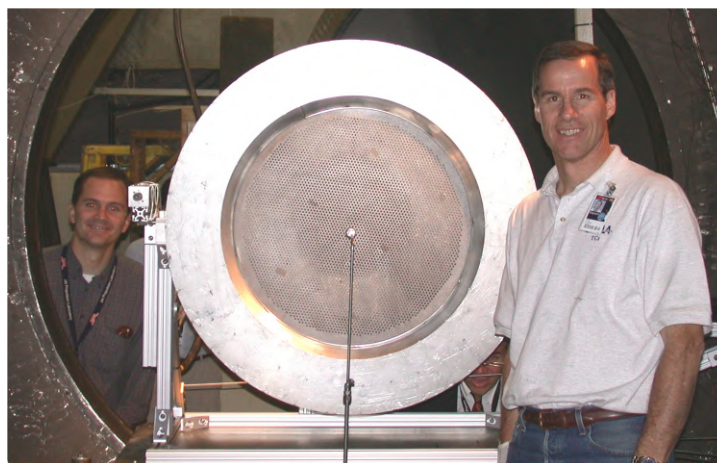
Pre lepšie pochopenie problematiky iónových zdrojov je vhodné ozrejmiť historické pozadie tejto technológie a vysvetliť základné princípy fungovania niektorých najdôležitejších typov zdrojov.

1.1. História

Počiatky zdrojov schopných generovať lúče nabitých častíc s kontrolovanými parametrami sa spájajú s prudkým rozvojom elektroniky počas 2. svetovej vojny. V tom období sa vyvíjali technológie pre radarové a zobrazovacie systémy. Jedným z dôležitých vynálezov bol magnetron, ktorý vznikol vo Veľkej Británii a využíval sa v prvých radaroch. Dnes sa magnetrony bežne používajú v mikrovlnných rúrach na ohrev potravín pomocou mikrovlnného žiarenia [1].

Vývoj iónových zdrojov, podobných tým, ktoré sa neskôr začali využívať v iónových motoroch, započal v americkej NASA koncom 50. rokov. Fyzici sa vtedy zameriavali na zostrojenie vhodného iónového motora pre družice a sondy operujúce vo vesmíre. Počas 60. rokov boli úspešne otestované prvé funkčné iónové motory. V nasledujúcich desaťročiach ich vývoj ďalej napredoval a v súčasnosti mnohé moderné družice na stabilizáciu či korekciu dráhy využívajú práve iónový pohon. Takýto motor, môžeme vidieť na obrázku 1.1. Jedná sa o motor NEXIS (Nuklear Electric Xenon Ion System) spoločnosti NASA. Ide o motor z vývojovej vetvy projektu Prometheus, ktorý mal za cieľ vyvinúť motor s dlhou životnosťou a vysokým výkonom, pre použitie na družiciach a iných vesmírnych zariadeniach [2].

Iónové zdroje však našli široké uplatnenie aj v pozemských podmienkach. Používajú sa napríklad pri depozícii tenkých vrstiev (naprašovaním), pri povrchových úpravách (napr. iónovom leptaní) a v mnohých ďalších oblastiach výskumu i priemyslu. Tieto techniky sú dnes kľúčové v polovodičovom priemysle, optoelektronike, ale aj v materiálovom inžinierstve [3].



Obr. 1.1: Dan Goembel a Tom Randolph stoja pri iónovom motore Nexis. Prevzaté a upravené z [4].

1.2. Rozdelenie a vybrané typy iónových zdrojov

Iónové zdroje podľa princípu vzniku iónov delíme na dve základné kategórie: plazmové a elektrónovo-zrážkové. V plazmových zdrojoch vznikajú ióny priamo v plazme, kde výboj alebo iný zdroj energie ionizuje plyn. Elektrónovo-zrážkové zdroje naopak využívajú zrážky zrýchlených elektrónov s atómami či molekulami – ich energia musí byť dostatočne vysoká na vyrazenie elektrónov z obalu a vytvorenie iónov. Tieto dva typy iónových zdrojov rozoberám v nasledujúcich odstavcoch, pretože názorne ilustrujú princípy súvisiace s mojou prácou. Ďalšie špecializované typy iónových zdrojov, ako napríklad LMIS (Liquid Metal Ion Source) či GFIS (Gas Field Ion Source), sme bližšie nerozoberali, pretože rozsah tejto problematiky sa výrazne presahuje rámec mojej práce.

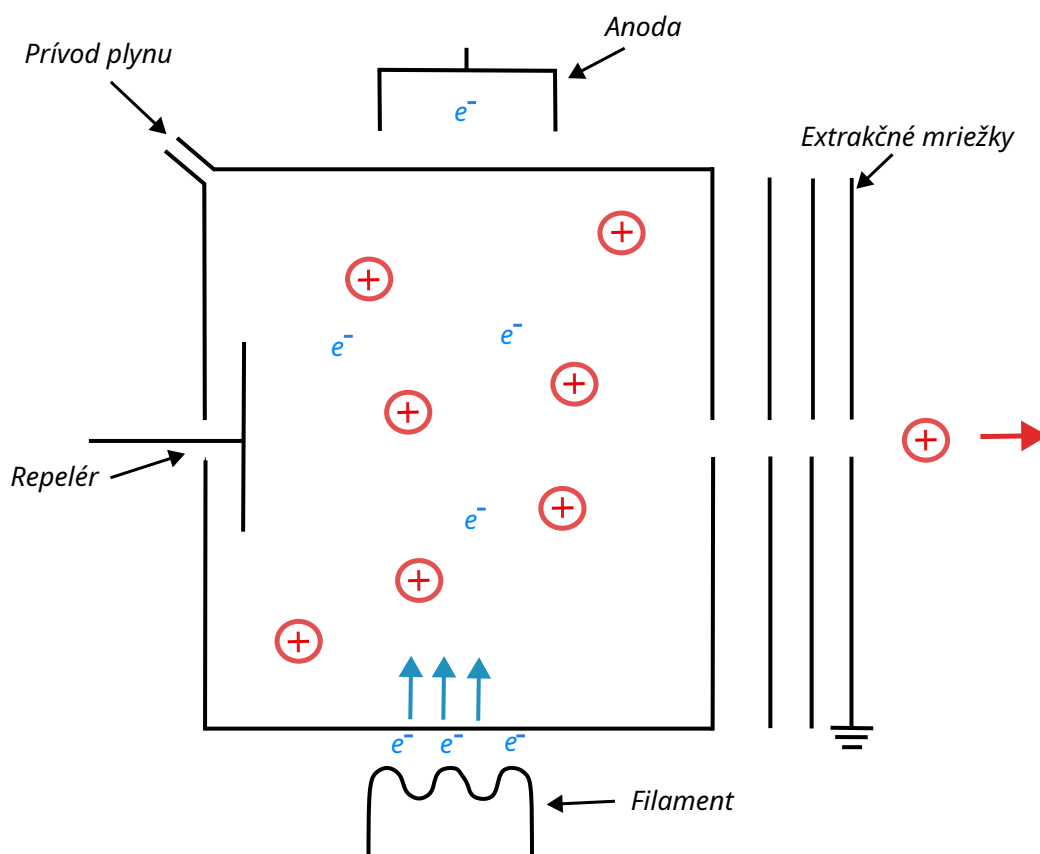
1.2.1. Elektrónovo-zrážkové zdroje

Elektrónovo-zrážkové iónové zdroje pracujú na princípe zrážok elektrónov, ktoré sú emitované zo žeravenej katódy a urýchľované elektrickým potenciálom, s molekulami pracovného plynu. Pri týchto zrážkach dochádza k ionizácii neutrálnych atómov, alebo molekúl, avšak – na rozdiel od plazmových zdrojov – nevzniká plazma, pričom energia potrebná na urýchľovanie emitovaných elektrónov závisí od ionizačného potenciálu elektrónu, ktorý má byť vyrazený. Samotné ióny sa zo zdroja extrahujú pomocou mriežky, na ktorú sa privádza jednosmerné napätie. Existujú však aj pulzné zdroje, kde sa namiesto jednosmerného napätia môže využiť RF¹ napätie. Takýto typ zdroja umožňuje riadenú, časovo diskretnú extrakciu iónov, čo prináša výhodu v aplikáciách vyžadujúcich presné ovládanie impulzov iontového zväzku. V ďalšom kroku sa lúč fokusuje pomocou fokusačných elektród, vďaka čomu je sústredený do bodu v určitej vzdialenosti od zdroja. Schematický náčrt elektrónovo-zrážkového zdroja je znázornený na obrázku 1.2.

Vďaka jednoduchej konštrukcii predstavujú tieto iónové zdroje praktické riešenie, ktoré sa v priemysle a výskume často uplatňuje na rôzne ciele analýzy. Ich hlavnou prednosťou je schopnosť generovať ióny s vysokou energiou, no zároveň s nízkou hustotou prúdu, čo je pri niektorých aplikáciách žiaduce.

Veľkou výhodou je aj mimoriadne malý energiový rozptyl iónov, čo je nevyhnutné v oblastiach, kde je presnosť merania a reprodukovateľnosť výsledkov kľúčová [6]. Práve pre túto vlastnosť sú elektrónovo-zrážkové zdroje obľúbené v analytických metódach, ako je napríklad hmotnostná spektrometria, alebo plynová analýza, v ktorých hrá dôležitú úlohu práve schopnosť presne identifikovať a kvantifikovať jednotlivé zložky skúmaných vzoriek.

¹Radio Frequency (radiofrekvenčný) Ide o striedavé elektrické napätie alebo signál s frekvenciou v rozsahu približne 3 kHz až 300 GHz, teda v pásme rádiových vln.



Obr. 1.2: Schematický náčrt elektrónovo-zrážkového zdroja iónov. Prevzaté a upravené z [5].

1.2.2. Plazmové iónové zdroje

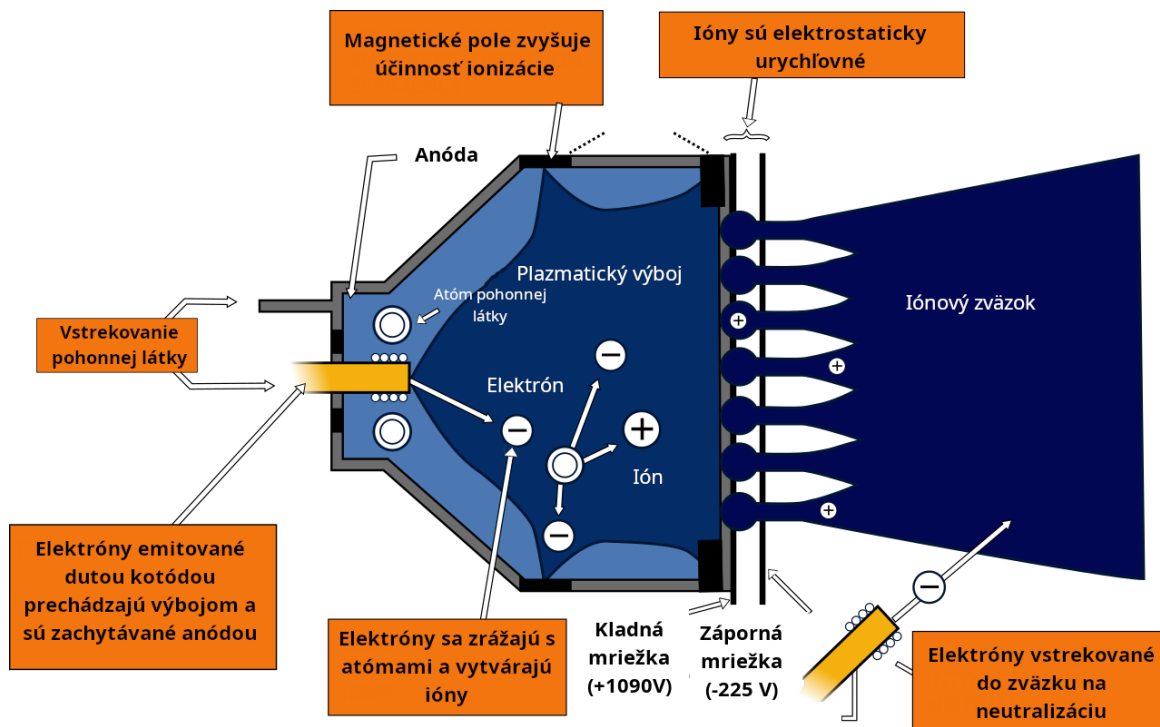
Rovnako ako pri elektrónovo-zrážkových zdrojoch, aj v prípade plazmatických iónových zdrojov existuje široké spektrum rôznych konštrukcií a typov. Tieto zdroje sa zväčša odlišujú najmä spôsobom, akým vzniká plazma, a technikou, ktorou sú z ionizovaného prostredia extrahované ióny. Ióny môžu byť extrahované extrakčnými mriežkami a ďalej byť fokusované podobne ako v prípade elektrónovo-zrážkových zdrojov, alebo sú zo zdroja urýchľované elektrodynamicky a zväzok už ďalej nie je nijako upravovaný. V prípade nefokusovaného zväzku sa jedná o tzv. širokozväzkové zdroje.

Jedným z charakteristických znakov plazmových zdrojov je ich vysoká hustota iónov, vďaka čomu sa plazmové zdroje široko uplatňujú vo viacerých oblastiach, kde je vysoká hustota iónov výhodná. Napríklad v kozmonautike ich môžeme nájsť ako súčasť iónových motorov, ktoré sa vyznačujú efektívnym využitím paliva a dlhodobou prevádzkou v podmienkach vesmírneho prostredia [7]. V priemysle zase hrajú významnú úlohu pri depozícii tenkých vrstiev, kde sú ióny využívané na vytváranie a úpravu povrchových vrstiev materiálov. Rovnako sa uplatňujú aj pri leptaní povrchov, či už v mikroelektronike, alebo na príklad pri výrobe polovodičových súčiastok [8]. Týmto všetkým prispievajú plazmové zdroje k ďalšiemu rozvoju vedeckých aj priemyselných postupov a technológií.

1.2.3. Kaufmanov iónový zdroj

Kaufmanov zdroj patrí medzi jedny z prvých zariadení určených na generovanie a urýchľovanie iónov, pôvodne vyvinutých pre vesmírne aplikácie [9]. Rez Kaufmanovho zdroja využívaného ako motor družicou Deep Space 1 môžeme vidieť na obrázku 1.3. Z hľadiska konštrukcie sa značne podobá zdroju, ktorý budeme zostavovať (najmä svojím vonkajším vzhľadom), avšak pracuje na mierne odlišnom princípe.

Základom jeho fungovania je tvorba plazmy vo výbojovej komore, extrakcia iónov a ich urýchľovanie elektrickým poľom. Plazma sa vytvára vo vnútri zdroja, kde elektróny emitované z katódy narážajú do molekúl pracovného plynu (napríklad argónu) a ionizujú ich. Elektróny sú pri tom udržiavané v magnetickom poli, ktoré predlžuje ich dráhu (pohybujú sa po špirále) a zvyšuje pravdepodobnosť ďalších zrážok s molekulami plynu. Vzniknuté ióny sa potom extrahujú a urýchľujú pomocou tzv. extrakčných mriežok.



Obr. 1.3: Schéma Kaufmanovho zdroja, ktorý na svoj pohyb využíva družica Deep Space 1 Americkej spoločnosti NASA. Prevzaté a upravené z [10].

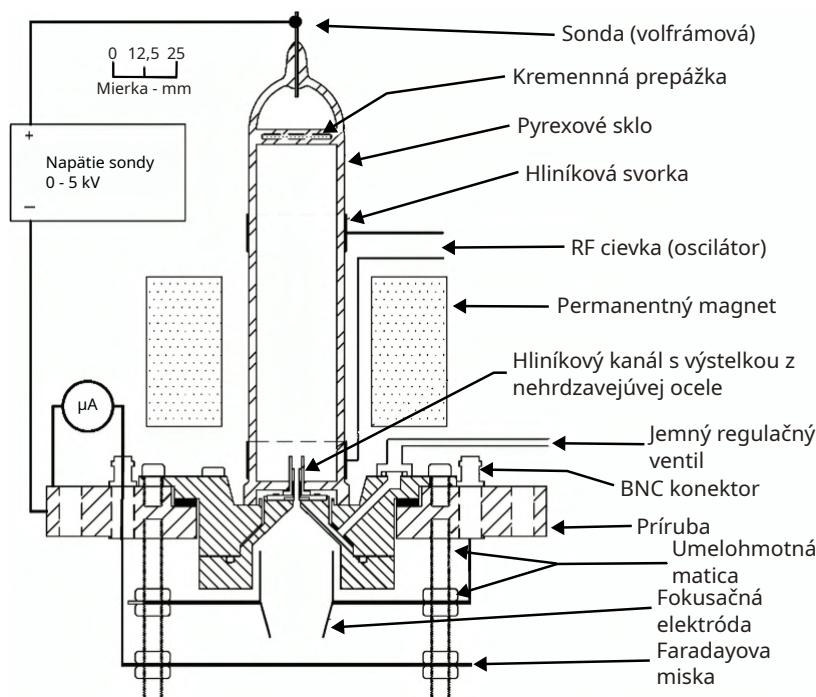
Kaufmanove zdroje sa často využívajú pri depozícii tenkých vrstiev, predovšetkým v procesoch Ion Beam Sputtering (IBS) a Ion Beam Assisted Deposition (IBAD) [11].

V porovnaní s nami konštruovaným zdrojom (ktorý budem popisovať v nasledujúcich kapitolách) má však Kaufmanov zdroj okrem viacerých výhod aj niektoré nevýhody. Najvýznamnejšou nevýhodou je jeho komplexnejšia konštrukcia. Zatiaľ čo nami vyvíjaný zdroj nevyužíva extrakčné mriežky ani žeravenú katódu, Kaufmanov zdroj oba tieto prvky obsahuje, čo zvyšuje náročnosť výroby, údržby a môže skracovať životnosť.

Medzi hlavné výhody Kaufmanovho zdroja patrí najmä presnejšia kontrola energie iónov, ktorú je možné nastavovať potenciálovým rozdielom medzi extrakčnými mriežkami.

1.2.4. RF iónový zdroj

RF zdroje sa často využívajú v procesoch, akými sú napríklad iónové leptanie alebo povrchová modifikácia a úprava tenkých vrstiev. Rovnako ako Kaufmanov zdroj, aj tento zdroj má v porovnaní s mnou konštruovaným zdrojom viacero výhod a nevýhod. Na obrázku 1.4 je znázornená konštrukcia RF zdroja. Čitateľ si môže všimnúť značnú komplexnosť tohto zdroja.



Obr. 1.4: Schéma RF zdroja. Čitateľ si môže všimnúť značnú komplexnosť konštrukcie tohto typu zdroja. Prevzaté a upravené z [12].

Nielenže samotná vysokofrekvenčná (RF) elektronika môže byť nákladná, ale aj fyzický dizajn zdroja je voči nášmu zdroju výrazne zložitejší.

Na druhej strane medzi jeho nesporné prednosti patrí presné kolimovanie iónového zväzku (čo môže byť výhoda aj nevýhoda v závislosti na aplikácii) a vysoká čistota procesu, pretože sa pri ňom neuvolňujú čiastočky z katódy (čo pri sa pri iných typoch zdrojov deje a môže to spôsobiť nežiadúcu kontamináciu vzorky). Okrem toho má tento zdroj dlhú životnosť, keďže chýbajú opotrebovateľné katódové časti [12].

RF iónový zdroj vytvára plazmu pomocou vysokofrekvenčného elektromagnetického poľa, z plazmy sa potom ióny vyťahujú cez extrakčné mriežky a ďalšími elektródami sa

lúč zaostruje. Na obrázku 1.4 je znázornený model, v ktorom plazma vzniká v pyrexovej² komore excitovanej RF cievkou. Striedavé magnetické pole cievky indukuje v pracovnom plyne RF prúd a tým ho ionizuje. Permanentné magnety zvyšujú hustotu plazmy tak, že udržiavajú elektróny na špirálových dráhach a tiež spôsobujú difúziu nabitých častíc od stien komory, čím plazmu silne zaostrujú pozdĺž osi výbojovej trubice, najmä v oblasti extrakcie [12].

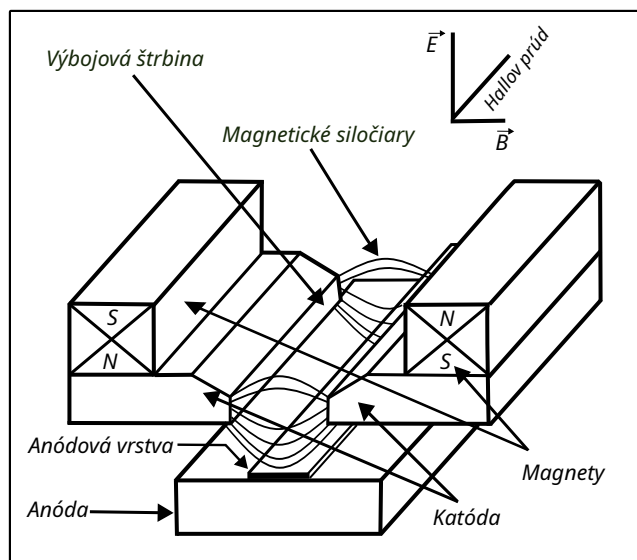
²Pyrex je obchodný názov pre teplotne a chemicky odolné borosilikátové sklo používané najmä na výrobu laboratórneho riadu a žiaruvzdorných kuchynských nádob.

2. Fyzikálne princípy iónového zdroja ALIS

V tejto kapitole sa zameriame na základné fyzikálne mechanizmy iónového zdroja ALIS. Najprv vysvetlíme princípy tvorby iónov v plazme, potom popíšeme úlohu elektrických a magnetických polí pri ich zrýchľovaní a nakoniec ukážeme, ako sa formuje výsledný iónový zväzok. Na záver si predstavíme princíp ionizácie v plazmovom výboji a rozoberieme jeho jednotlivé fázy.

2.1. Princíp činnosti iónového zdroja ALIS

Anode Layer Ion Source (ALIS) patrí medzi tzv. „gridless“ zdroje iónov, teda zdroje bez extrakčných mriežok. Na urýchlenie iónov sa v tomto type zdroja nevyužívajú mriežky. Ióny sú zo zdroja urýchľované elektrodynamicky [13]. Vďaka tomu možno dosiahnuť dlhodobú a spoľahlivú prevádzku s minimálnymi servisnými zásahmi¹.



Obr. 2.1: Grafické znázornenie princípu iónového zdroja typu ALIS: Na obrázku možno vidieť magnetické siločiaru sústredené vo výbojovej štrbine, smery elektrického a magnetického poľa a z nich vyplývajúci smer toku Hallovoho prúdu. Prevzané a upravené z [13].

Princíp činnosti tohto zdroja je založený na skríženom poli $\vec{E} \times \vec{B}$. Elektrické pole vzniká medzi katódou – vytvorenou pólovými nástavcami – a anódou v takzvanej výbojovej štrbine. Magnetické pole generujú magnety umiestnené v osi zdroja a magnetický obvod sa uzatvára v štrbine medzi pólovými nástavcami, ako ukazuje schematický obrázok 2.1. Na elektróny, ktoré vstúpia do výbojovej štrbiny, pôsobí Lorentzova sila: $\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$, kde \vec{F} reprezentuje výslednú Lorentzovu silu pôsobiacu na časticu, \vec{E} intenzitu elektrického poľa, \vec{v} okamžitú rýchlosť častice, \vec{B} magnetickú indukciu a q je náboj častice v tomto prípade elektrónu. Táto sila núti elektróny pohybovať sa po špirálach, čím výrazne predlžuje ich trajektóriu a „zväzuje“ ich vo výbojovej štrbine. Po

¹<https://www.beamtec.de/en/anode-layer-ion-sources/>

privedení dostatočného množstva pracovného plynu sa elektróny zrážajú s neutrálnymi molekulami plynu, ktoré týmto ionizujú, čím sa zapáli tzv. dútnavý výboj (budem sa mu venovať v neskorších častiach práce).

Lorentzova sila spôsobuje vznik prúdu elektrónov rovnobežného s výbojovou štrbinou. Tento prúd, generovaný skríženým elektrickým a magnetickým polom, nazývame Hallov prúd; jeho smer je znázornený na obrázku 2.1. Aby bol Hallov prúd uzavretý, majú všetky zdroje typu ALIS uzavretú geometriu štrbiny – či už kruhovú, alebo lineárnu.

Obrázok 2.1 zobrazuje aj oblasť anódovej vrstvy, kde prebieha väčšina ionizácií. Práve tu sa nachádza hlavná časť elektrónov krúžiacich po špirálach nad anódou. Táto vrstva je veľmi tenká, len niekoľko elektrónových Larmorových polomerov². Keď elektrón dopadne na anódu, vznikne nevyváženosť náboja a na ióny v anódovej vrstve začne pôsobiť odpudivá sila, ktorá ich urýchľuje smerom von zo zdroja.

Hallov prúd cirkulujúci v magnetickom poli \vec{B} taktiež prispieva k urýchľovaniu iónov smerom von zo zdroja. Veľkosť tejto sily je úmerná súčinu \vec{B} a Hallovho prúdu, pričom jej smer udáva vektorový súčin $\vec{J}_H \times \vec{B}$. Ióny urýchlené týmto procesom majú široký energiový rozptyl, pretože vznikli v rôznych miestach anódovej vrstvy. Stredná hodnota však pri výbojovom napätí 3 kV býva okolo 1,8 kV [13].

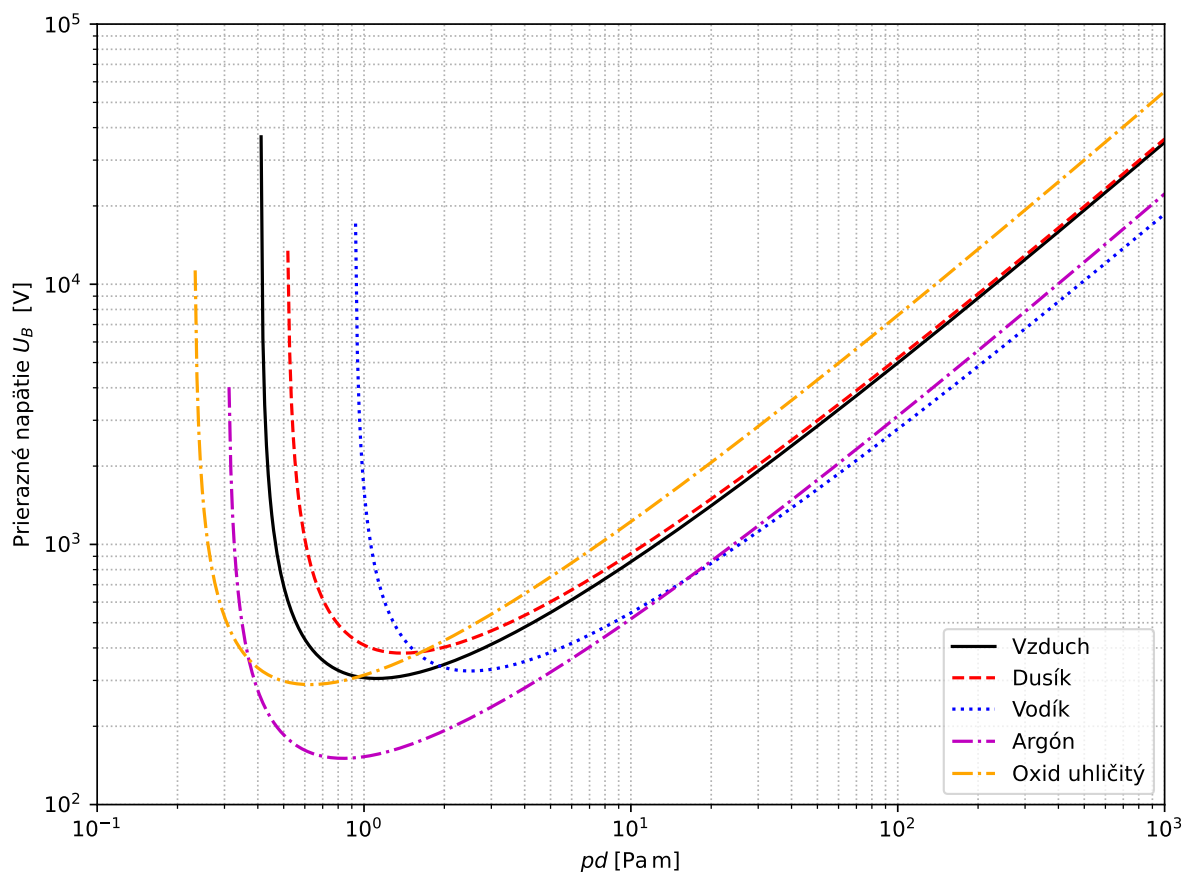
Ióny, ktoré zo zdroja unikajú, stiahnu so sebou časť elektrónov a tým zabezpečia že zväzok nie je limitovaný priestorovým nábojom (dochádza k čiastočnej samoneutralizácii iónového zväzku) [14]. Vďaka tomuto tento typ zdroja nepotrebuje externé žhavené vlákno a aparatúru s ním spojenú na neutralizáciu zväzku, ako je to pri iných typoch zdrojov. Vďaka tomu sa výrazne zjednodušuje použitie tohto zdroja v rôznych, či už depozičných, alebo leptacích aparatúrach.

²Larmorov polomer je polomer dráhy, po ktorej sa elektrón pohybuje v danom magnetickom poli.

2.2. Ionizačné procesy

Počiatočná fáza ionizácie plynu v plazmových zdrojoch je nazývaná Townsendov výboj. Jedná sa o „temnú“ fázu plynového elektrického výboja, ktorá sa objavuje pri veľmi nízkych prúdoch a napätiach tesne pod prierazom. Elektróny uvoľnené z katódy (napr. fotoefektom či tepelnou emisiou) sú v elektrickom poli urýchľované a pri zrážkach s neutrálnymi molekulami ionizujú ďalšie častice; vzniká tak lavína nosičov – tzv. Townsendova lavína. Hustota plazmy je však stále malá a prúd rastie exponenciálne s napätím. Až keď lavínové množenie prekročí kritickú hodnotu, dôjde k prierazu a výboj prejde do jasnejšieho dútnavého režimu [15]. Grafické znázornenie tejto oblasti je možné vidieť na obrázku 2.3.

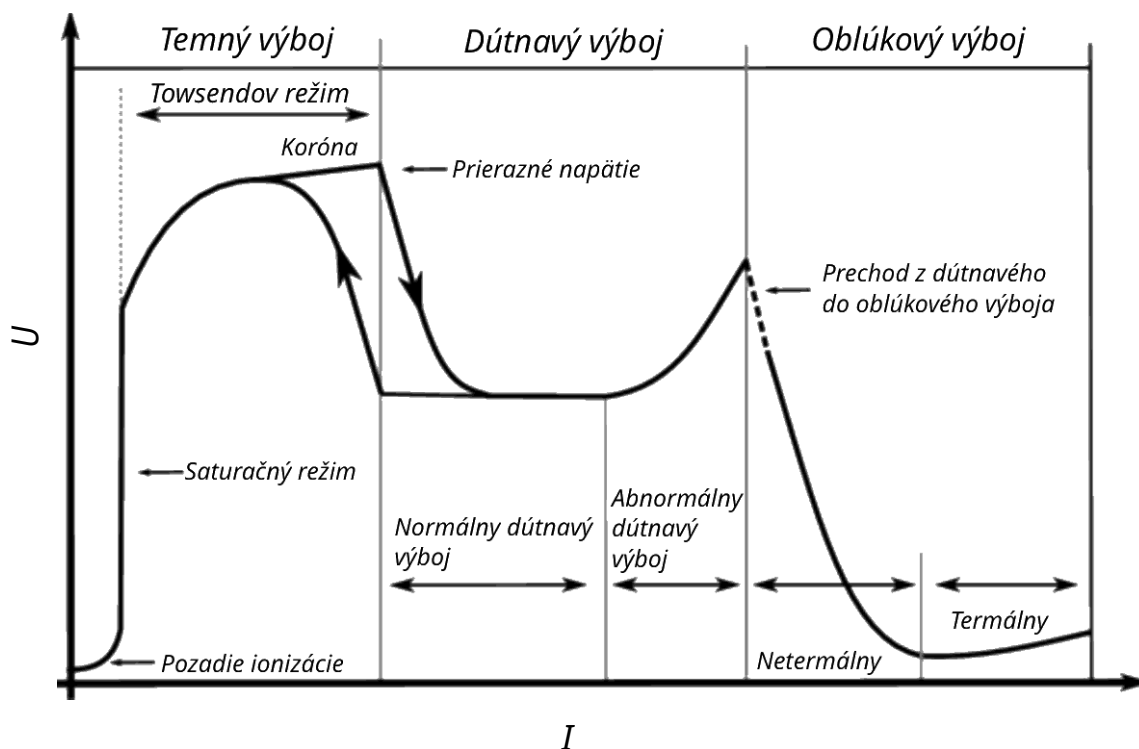
Ďalšou fázou je dútnavý výboj. Je to stabilná forma elektrického výboja, ktorá sa vytvára v plyne po prekročení prierazného napätia pri tlaku typicky okolo 10^1 Pa až 10^3 Pa (pôsobením magnetického poľa je možné dosahovať tento výboj aj pri nižších tlakoch približne do 10^{-2} Pa) a pri dostatočne vysokom napätí medzi dvoma elektródami. Vzťah medzi napätím tlakom a vzdialenosťou elektród popisuje takzvaná Paschenova krivka, ktorá je zobrazená na obrázku 2.2.



Obr. 2.2: Paschenova krivka popisujúca závislosť napätia na tlaku a vzdialenosti elektród.

Po počiatočnej Townsendovej ionizačnej fáze, keď zrýchlené elektróny vyvolávajú ďalšie ionizácie, sa ustáli prúdová hustota a v trubici sa vyformujú charakteristické zóny: pri katóde úzka, jasne svietajúca katódová žiara obklopená katódovým temným priestorom, za ktorým nasleduje Faradayov temný priestor a napokon najdlhší úsek – pozitívny stĺpec, ktorý vyplňa väčšinu trubice mäkkým farebným svetlom. Svetelné emisie vznikajú

kajú pri rekombinácii iónov a excitovaných atómov či molekúl, takže farba žiary závisí od druhu plynu (neón – červeno-oranžová, argón – modro-fialová). Dútnavý výboj vyniká nízkym príkonom, rovnomerným osvetlením a chladným katódovým povrchom, čo umožnilo jeho široké využitie: od neónových reklám a plazmových displejov cez analytickú spektroskopiu až po plazmochemické nanášanie vrstiev a leptanie v polovodičovej výrobe [16]. My však používame „magnetronový dútnavý výboj“. Tento výboj sa od klasického dútnavého výboja líši tým, že na plazmu v tomto prípade pôsobí magnetické pole. Magnetronový (magnetizovaný) výboj dosiahne vyššiu plazmovú hustotu, intenzívnejšie žiarenie a nižšie prevádzkové napätie než klasický dútnavý výboj pri tom istom tlaku (alternatívne nižší tlak pri rovnakom napätí). Práve preto sa magnetronový výboj používa na depozíciu tenkých vrstiev a iónové leptanie. Závislosť napätia na prúde dútnavého výboja zobrazená na obrázku 2.3 ukazuje, že v oblasti normálneho výboja zostáva napätie prakticky konštantné, hoci výbojový prúd rastie. Graf preto zachytáva iba typický tvar závislosti napätia na prúde. Presné číselné hodnoty nie sú uvedené, keďže výrazne závisia na viacerých parametroch – predovšetkým na druhu plynu, tlaku a geometrie elektród. Kvôli obmedzenému výkonu nášho vysokonapäťového zdroja nedokážeme tieto parametre určiť ani experimentálne, nedostaneme sa totiž ani do oblasti abnormálneho dútnavého výboja, kde by napätie znovu stúpalo. Iónový zdroj teda v súčasnosti pracuje len na začiatku normálneho dútnavého výboja – napätie je vysoké (maximum zdroja 3 kV) a prúd nízky (okolo 1 mA). Testovali sme aj iný režim normálneho výboja, kam sa ešte s našim zdrojom dokážeme dostať. Jedná sa o časť krivky (obrázok 2.3) s takmer konštantným napätím. Táto prevádzka nám však nevyhovuje, pretože potrebujeme vyššiu energiu iónov, zároveň však nechceme zvyšovať prúd, aby sme sa vyhli náročnému vodnému chladeniu.



Obr. 2.3: Charakteristika závislosti napätia na prúde v rôznych fázach výboja. Zvislá os reprezentuje výbojové napätie a vodorovná výbojový prúd [17].

3. Návrh a výroba iónového zdroja ALIS

Zdroj sme navrhli so zámerom dosiahnuť čo najjednoduchší dizajn, aby sa dal vyrobiť pomocou bežných kovoobrábacích strojov a nástrojov, ktoré máme k dispozícii na fakulte. Zároveň sme sa snažili využiť komerčne dostupné materiály a súčiastky z dostupných laboratórnych zásob, čím sa minimalizovali náklady na obstaranie nových komponentov. Výsledkom je zdroj s jednoduchou konštrukciou, ktorý sa dá vyrobiť bez potreby špeciálneho priemyselného vybavenia.

3.1. Dizajn zdroja

Pred samotným návrhom zdroja som sa inšpiroval komerčne dostupnými verziami podobného typu iónového zdroja¹, čo mi pomohlo lepšie pochopiť štandardné konštrukčné prístupy a overené riešenia. Pri formovaní vlastného dizajnu však bolo nevyhnutné zohľadniť zadané technické požiadavky zhrnuté v tabuľke 3.1.

Táto podmienka vychádzala z potreby zabezpečiť vysokú kompatibilitu so širokou škálou vákuových aparátúr. Vďaka tomu, že vonkajší priemer nášho zdroja nepresahuje 33,8 mm, je možné ho inštalovať cez mnohé typy vákuových prírub. Menovite napríklad (CF40, KF40)², ale aj mnohé ďalšie. Výrazne sa tak zvyšuje flexibilita pri jeho nasadzovaní do rôznych experimentálnych aparátúr.

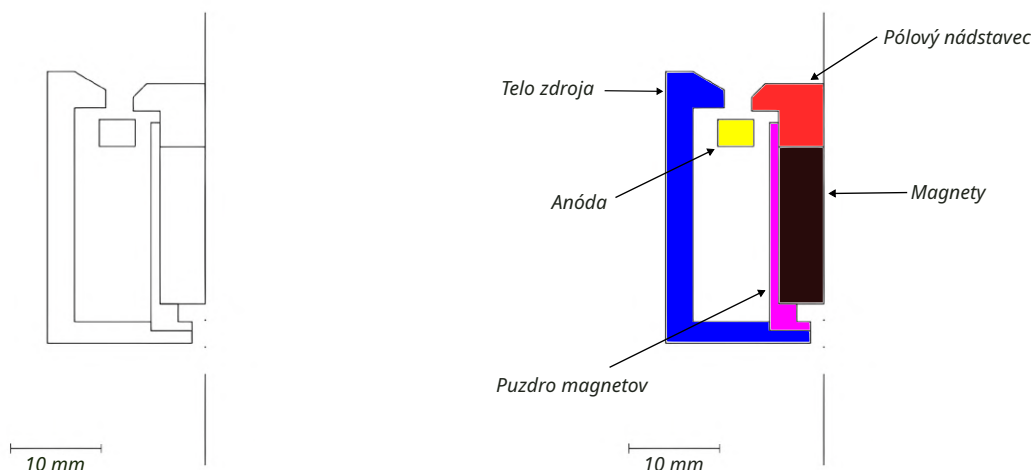
Tabuľka 3.1: Porovnanie požadovaných a skutočných parametrov zdroja

Parameter	Požadované parametre	Skutočné parametre zdroja
Možnosť implementovať do komory SEM – $\varnothing <$ ako \varnothing ISO-KF 40	$\varnothing < 38$ mm	$\varnothing = 33,8$ mm
Výbojové napätie	0.6 kV – 3 kV	0 kV – 3 kV
Výbojový prúd	0 mA – 5 mA	0 mA – 40 mA
Prevádzkový tlak	$1 \cdot 10^{-4}$ Pa – $1 \cdot 10^{-1}$ Pa	$\leq 1 \cdot 10^2$ Pa – $5 \cdot 10^{-2}$ Pa

¹<https://www.beamtec.de/en/anode-layer-ion-sources/>

²https://www.lesker.com/newweb/flanges/adapters_fittings_ports.cfm?pgid=kfbaseplate

Po zvážení všetkých týchto požiadaviek sme v CAD softvéri Autodesk Inventor vytvorili hrubý model zdroja, ktorý následne poslúžil na vyhotovenie konštrukčných rezov. Tento model (obrázok 3.1) sme ďalej využili pri simuláciách v programe EOD³, ktoré nám umožnili overiť, či navrhnuté riešenie zodpovedá stanoveným konštrukčným a funkčným požiadavkám.



Obr. 3.1: Vľavo rez importovaný do EOD. Vpravo popis hlavných častí zdroja.

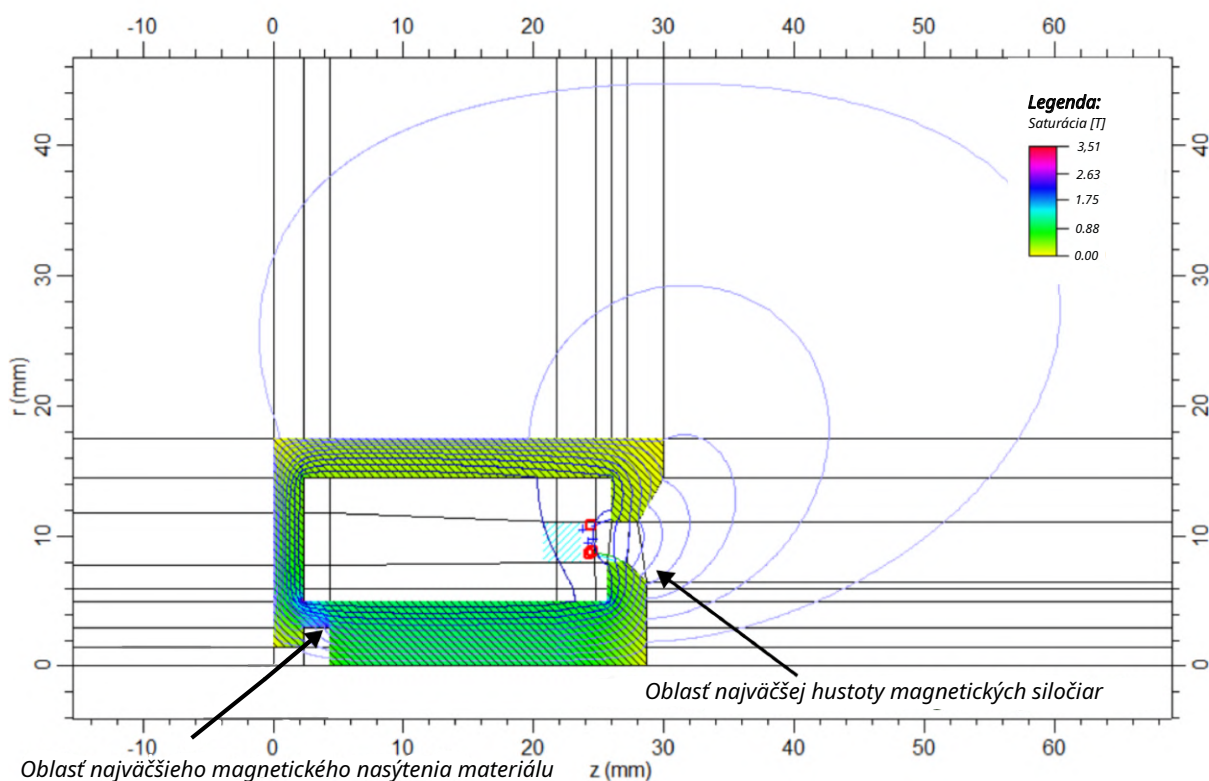
3.1.1. Simulácia

Numerické výpočty prebiehali v programe EOD (Electron Optical Design) a boli zamerané na optimalizáciu tvaru iónového zdroja. V rámci simulácií sme systematicky obmieňali geometriu magnetického pólového nadstavca aj hodnoty urýchľovacieho napätia. Program poskytol celý rad výstupov – od grafického zobrazenia tvaru iónového zväzku, cez počty vygenerovaných a zachytených častíc, až po štatistické rozdelenie dopadov častíc na jednotlivé konštrukčné povrchy. Tieto údaje nám umožnili odhadnúť, ako sa menšími konštrukčnými zásahmi mení kvalita a homogenita zväzku, a teda aj úroveň iontovej implantácie v budúcom zariadení.

Táto simulácia prebiehala za predpokladu modelu, v ktorom je dominantnou tvorbou iónov elektrónovo-nárazovou ionizáciou, čo sa v našom konkrétnom usporiadaní nepotvrdilo. Plazmová dynamika v ionizačnej komore je zložitejšia a kompletná simulácia plazmy presahuje rámec tejto práce aj dostupných softvérových nástrojov. Preto sme sa napokon rozhodli pokračovať experimentálnou optimalizáciou prototypu.

Napriek tomu sa zo simulácií podarilo získať dôležitý dizajnový poznatok: finálny tvar magnetického obvodu. Obrázok 3.2 ukazuje rozloženie magnetickej saturácie v jadre. Vidno, že materiál nie je v žiadnom mieste úplne saturovaný a magneticke siločiarly sú najhustejšie práve v oblasti extrakčnej štrbiny. Práve tam potrebujeme najvyššie magneticke pole na zachytenie elektrónov. Tento výsledok tvorí pevný základ pre ďalšie úpravy a bol priamo prenesený do konštrukcie experimentálneho prototypu.

³<https://www.lencova.com/>



Obr. 3.2: Výstup simulácie zo softvéru EOD.

3.1.2. Konštrukcia iónového zdroja typu ALIS

Pri konštrukcii zdroja sa vychádzalo z nadobudnutých teoretických poznatkov a z dostupných schematických nákresov, ktoré boli publikované v odborných článkoch spomenutých v predchádzajúcich odstavcoch. Tieto materiály slúžili ako východiskový základ, do ktorého sa následne zapracovali viaceré špecifické požiadavky. Jednou z hlavných bolo zachovať čo najmenšie rozmery celého zariadenia, aby sa dalo umiestniť do širokej škály rôznych prírub.

Požiadavka na kompaktné vyhotovenie priniesla niekoľko konštrukčných ťažkostí, pričom najväčšou výzvou bolo umiestnenie keramických priechodiek. Napriek tomu, že sa ich podarilo osadiť aj do relatívne malého priestoru, zvýšila sa tým náročnosť na presnosť výroby. Ako možno vidieť na obrázku 3.3, už pri malej odchýlke v polohe otvorov pre priechodky môže dôjsť ku kolízii so stenou zdroja alebo s puzdrom magnetov.

Na základe týchto skutočností bolo nevyhnutné klásť nároky na presnosť výroby, aby sa znížilo riziko nesprávneho usadenia priechodiek či ich poškodenia pri montáži. Uvedený prístup zabezpečí, že aj napriek kompaktným rozmerom bude zdroj plne funkčný a kompatibilný s viacerými typmi prírub, pričom sa minimalizujú potenciálne problémy pri montáži alebo neskorších úpravách.

Prívod pracovného plynu do zdroja je riešený centrálnou trubičkou (\varnothing 6 mm), ktorá zároveň plní funkciu mechanického úchyty celej zostavy k vákuovej prírube. Plyn sa z tejto trubičky distribuuje do priestoru medzi magnetickými pólovými nadstavcami prostredníctvom sústavy mikrodýz integrovaných priamo v obale magnetov (obrázok 3.3). Takto navrhnuté usporiadanie má dve kľúčové výhody:

Lokálne obohatenie ionizačnej oblasti – plyn je privádzaný presne tam, kde dochádza k najvyššej hustote elektrónov a k efektívnej ionizácii, čím sa znižuje plytvanie pracovným plynom a minimalizujú sa kolízie mimo aktívnej zóny. A redukcii zvyškovej tlakovej záťaže v komore – priame vstrekovanie plynu do vnútra tela zdroja umožňuje udržať celkový tlak v hlavnej vákuovej komore na nižšej úrovni (bez tejto úpravy sme dokázali výboj zapáliť pri najnižšom tlaku približne 6 Pa), čím sa predlžuje stredná voľná dráha elektrónov. Dlhšia voľná dráha znižuje pravdepodobnosť nežiaducich zrážok, vďaka čomu dokážu ióny generované zdrojom doletieť ďalej bez kolízie, a teda sa zvyšuje počet iónov dopadajúcich na terč.

Týmto riešením teda dosahujeme mechanickú kompaktnosť (spojenie trubičky a nosnej konštrukcie) a zároveň aj optimalizované pracovné podmienky pre plazmu.

3.2. Popis zdroja

Zdroj sa skladá z viacerých súčastí, ktoré popíšem v nasledujúcom odstavci.

Telo zdroja:

Dvojdielne teleso pozostáva zo spodného dielu s otvormi pre keramické izolátory a prívod plynu a z vrchného dielu, ktorý slúži ako pólový nástavec.

Magnetický obvod:

V osi zdroja je pólový nástavec uložený na permanentných SmCo magnetoch. Magnety sú zvolené pre svoju vysokú maximálnu prevádzkovú teplotu (300°C) a sú vložené v „puzdre magnetov“. Na spodnej strane puzdra sú vyvrtané 4 dýzy, ktoré privádzajú pracovný plyn priamo do telesa zdroja.

Rozvod plynu:

Pod magnetmi leží podložka s dvoma navzájom kolmými kanálkami, ktoré rozvádzajú plyn k dýzám. Plyn sa privedie cez plynovú trubku zaskrutkovanú otvorom v tele zdroja do puzdra magnetov. Trubka má vonkajší závit na oboch koncoch; jeden závit je vybavený maticou M6 slúžiacou ako doraz, aby trubka netlačila priamo na magnety, a zostal tak priestor na únik plynu cez drážky v podložke.

Anóda:

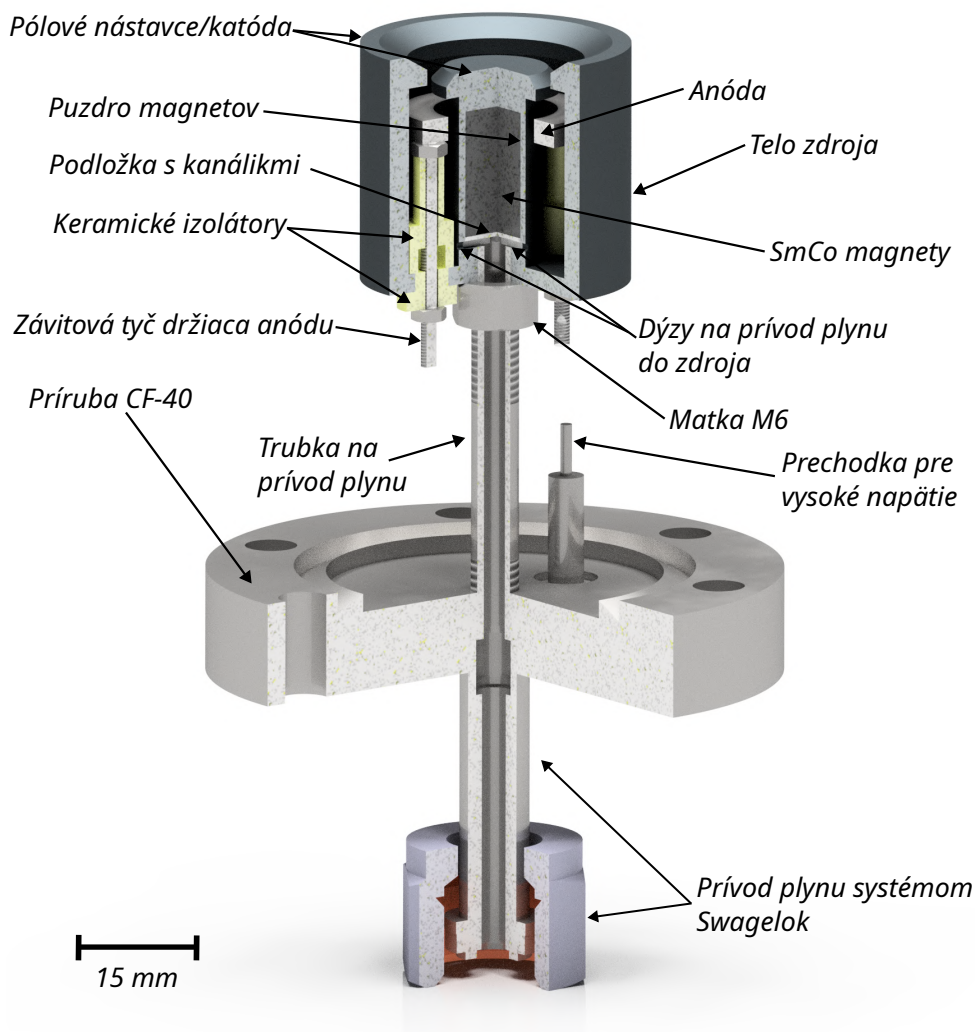
Kruhová nerezová anóda je uchytená na dvoch závitových tyčiach veľkosti M2, ktoré zároveň tvoria prívody vysokého napätia. Tyče sú od telesa elektricky oddelené keramickými priechodkami a na jednu z nich je privedené vysoké napätie pomocou káblíka pripevneného k priechodke na príruby.

Upevnenie do vákuového systému:

Celý zdroj je pripevnený k vákuovej príruby typu CF-40 prostredníctvom plynovej trubky s vonkajším závitom. Na príruby je privarená elektrická priechodka a plynový vstup systému Swagelok.

3.3. Zhotovenie a optimalizácia iónového zdroja

Pred samotnou výrobou bolo nevyhnutné vyhotoviť výkresovú dokumentáciu všetkých súčastí. Táto dokumentácia, (ktorá je súčasťou elektronickej prílohy) slúži ako základný



Obr. 3.3: Rez mnou navrhnutého zdroja typu ALIS.

podklad pre všetky neskoršie výrobné a kontrolné procesy, pretože z nej vychádzajú rozmery, tvary a tolerancie jednotlivých dielov. Rovnako dôležité bolo zvoliť vhodné materiály a určiť rozmery polotovarov, čím sa vytvorili predpoklady pre presnú a efektívnu výrobu. Výber materiálov sa pritom odvíjal od požadovaných mechanických a fyzikálnych vlastností, ale aj od praktických hľadísk, ako je dostupnosť či možnosť obrábania na existujúcich strojoch.

3.3.1. Výber materiálov

Pôvodný zámer spočíval v použití nehrdzavejúcej ocele s magnetickými vlastnosťami⁴ na všetky konštrukčné prvky s výnimkou anódy. Tento materiál mal zaručiť optimálne uzatváranie magnetického obvodu a zároveň odolávať korózii, čo je v prostredí rôznych prevádzkových podmienok nemalou výhodou. Za účelom stavby prototypu sme však použili bežnú uhlíkovú oceľ kvôli jej lepšej dostupnosti.

Z uhlíkovej ocele bola vyrobená väčšina dielov okrem anódy, ktorá bola vyrobená z austenitickej nehrdzavejúcej ocele ISO označenie: 1.4301/X5CrNi18-10, ktorá sa vyzna-

⁴<https://www.agst.de/4003?lang=sk>

čuje len slabými magnetickými vlastnosťami [18] a preto sa považuje za nemagnetickú. Dôvodom tohto prístupu bolo zabezpečiť, aby sa magnetický obvod uzatváral medzi pólovým nadstavcom magnetmi a telom zdroja, a nie neželaným spôsobom cez anódu. Z nemagnetického materiálu zhotovená anóda teda priamo napomáha k riadnemu fungovaniu celého zdroja, keďže neovplyvňuje prechod magnetického toku.

Táto kombinácia materiálov sa osvedčila nielen z hľadiska dosiahnutia požadovaných vlastností akými sú magnetická vodivosť/nevodivosť, tepelná odolnosť a nízka miera uvoľňovania plynov, ale aj z hľadiska dostupnosti a spracovateľnosti v podmienkach bežnej dielenskej výroby. Vďaka nej bolo možné vytvoriť spoľahlivý a odolný zdroj.

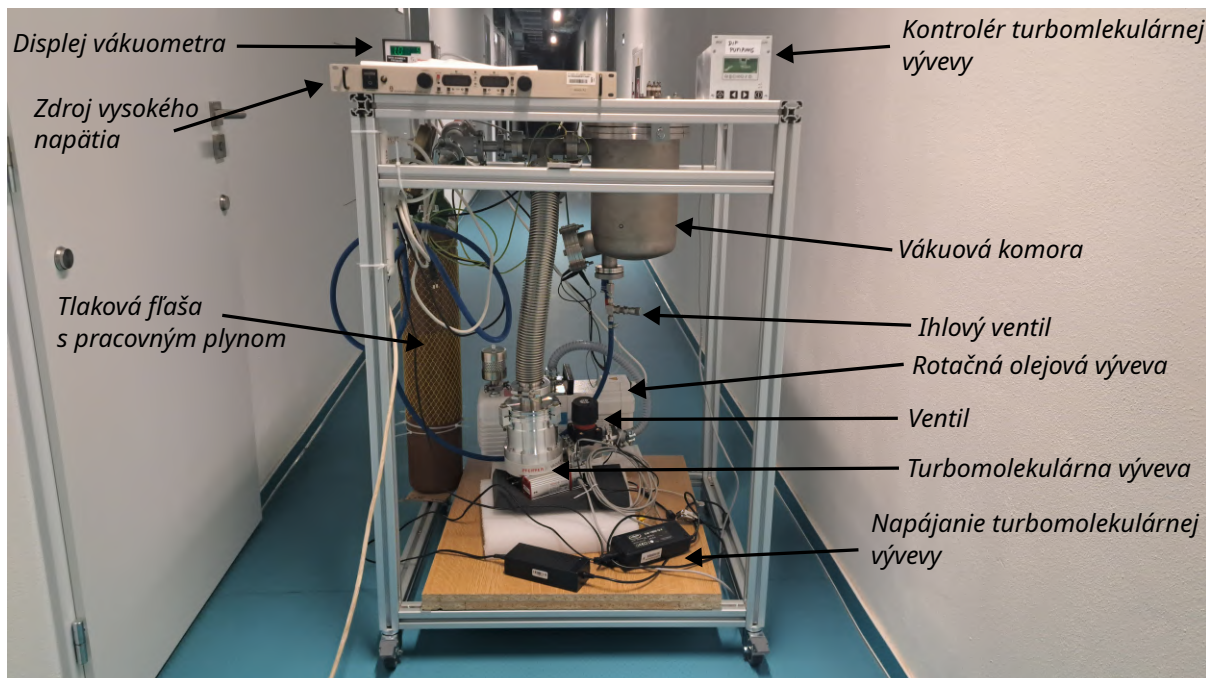
3.3.2. Výroba dielov

Vďaka jednoduchej konštrukcii bolo možné celý zdroj vyhotoviť priamo v dielenských priestoroch Ústavu fyzikálneho inžinýrství FSI VUT. Pri výrobe sme spočiatku používali klasické kovoobrábacie stroje – konvenčný sústruh a stolovú vŕtačku, ktoré sa ukázali ako dostatočne presné a univerzálne pre zhotovenie väčšiny dielov. V neskoršej fáze však bola do procesu zapojená aj CNC frézka. K jej nasadeniu sme pristúpili predovšetkým z praktických dôvodov, a to v čase, keď došlo k poruche na stolovej vŕtačke. V opačnom prípade by danú operáciu bolo možné vykonať aj na bežných zariadeniach, pričom by výsledná presnosť zostala na požadovanej úrovni.

Po uskutočnení prvých testov a overení funkčných parametrov sa ukázalo, že istú časť komponentov, najmä anódy a pólové nadstavce, bude potrebné vyrobiť opakovane alebo rovno vo viacerých variantoch. Tento postup mal zabezpečiť, aby zdroj vykazoval lepšie prevádzkové vlastnosti a aby boli odstránené prípadné nedostatky, ktoré sa pri prvotných skúškach objavili.

3.4. Popis a zostavenie skúšobnej aparatúry

Pred samotným testovaním zdroja sme si museli zostaviť experimentálnu aparatúru. Táto by mala pozostávať z vákuovej komory, rotačnej olejovej a turbomolekulárnej vývevy, vákuometra a rámu, v ktorom budú jednotlivé súčasti uchytené. Už zostavenú aparatúru môžeme vidieť na obrázku 3.8



Obr. 3.4: Zostavená skúšobná aparatúra.

3.4.1. Nosná konštrukcia

Pri návrhu hlavného rámu sme sa rozhodli využiť hliníkové profily typu BH 40-10 rozmeru 40×40 mm od firmy VSK profily⁵, a to predovšetkým pre ich vysokú modularitu, jednoduchú montáž a nízku hmotnosť, ktorá uľahčuje manipuláciu s celou konštrukciou. Veľkou výhodou bolo, že daná firma dodala materiál narezaný na požadovanú dĺžku, spolu s potrebným spojivovým materiálom. Vopred som si v softvéri Autodesk Inventor vytvoril detailný 3D model rámu, ktorý je zobrazený na obrázku 3.5.

Na základe tohto modelu som následne spracoval kompletný zoznam dielov a príslušenstva, ktoré budú potrebné na výrobu a montáž. Tieto diely boli neskôr zadané do výroby alebo objednané priamo u vyššie spomínaného dodávateľa. Vďaka takémuto postupu som už v prípravnej fáze eliminoval potenciálne nedostatky konštrukcie a zároveň zefektívnil celý proces od návrhu až po realizáciu.

Výsledná konštrukcia rámu, vyhotovená z hliníkových profilov, je pevná, stabilná a poskytuje možnosti na prípadnú úpravu, ak by boli potrebné ďalšie rozšírenia. Táto variabilita a možnosť rýchlych zmien je v prototypovej fáze kľúčová, a preto sa tento spôsob riešenia konštrukcie ukázal ako veľmi praktický.

⁵Materiál a spojivo bol nakúpený zo stránky :<https://www.vsk-profily.cz>



Obr. 3.5: Model rámu v softvéri Inventor.

3.4.2. Vákuová časť aparatury

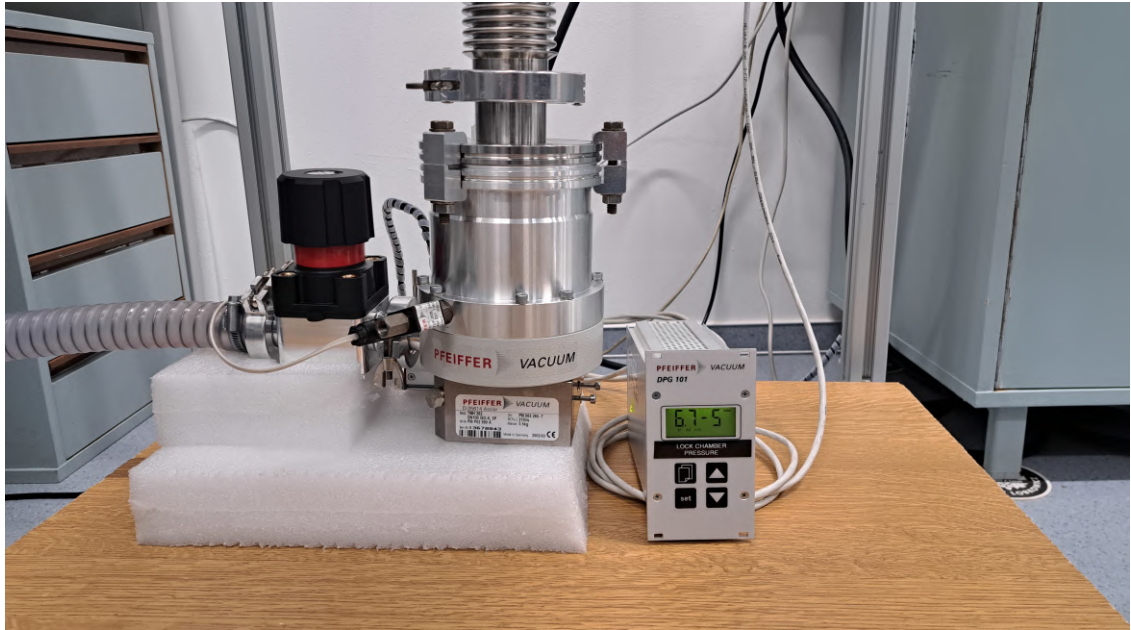
Vákuová zostava nášho experimentu sa skladá z vákuovej komory, rotačnej olejovej a turbomolekulárnej vývevy, sústavy ventilov a príslušného potrubia. Ako prvé sme otestovali tesnosť samotnej komory tým, že sme ju začali čerpať pomocou rotačnej olejovej vývevy. Po ustálení tlaku na minimálnej hodnote, ktorú sme boli pomocou danej vývevy schopní dosiahnuť (približne 1 Pa), sme vývevu vypli a pozorovali, či tlak v komore nenarastá príliš rýchlo. Úvodné skúšky ukázali, že pôvodné medené tesnenia nevyhovujú, pretože sú vhodné len na jedno použitie, čo sa vylučuje s našou potrebou častej manipulácie so súčasťami komory, a preto sme ich nahradili novými Vitonovými⁶. Za použitia týchto tesnení sa nám tlak v komore podarilo znížiť za pomoci turbomolekulárnej vývevy na približne $(0,67 \cdot 10^{-2} \text{ Pa})$, čo už vysoko presahuje hodnoty tlaku, pri ktorých zdroj prevádzkujeme. Na priloženom obrázku 3.6 vidieť, že tento stav bol po výmene tesnení stabilný a komora si tlak držala spoľahlivo.

Po kompletnej montáži rámu sme doň komoru pevne usadili a prepojili ju s ďalšími komponentmi, medzi ktoré patrí napríklad rotačná olejová výveva a turbomolekulárna výveva. Za ňu sme zaradili ventil, ktorým sme mohli regulovať rýchlosť čerpania a tým aj výsledný tlak vnútri komory. Napokon bol k zostave pripojený výstup do rotačnej olejovej vývevy.

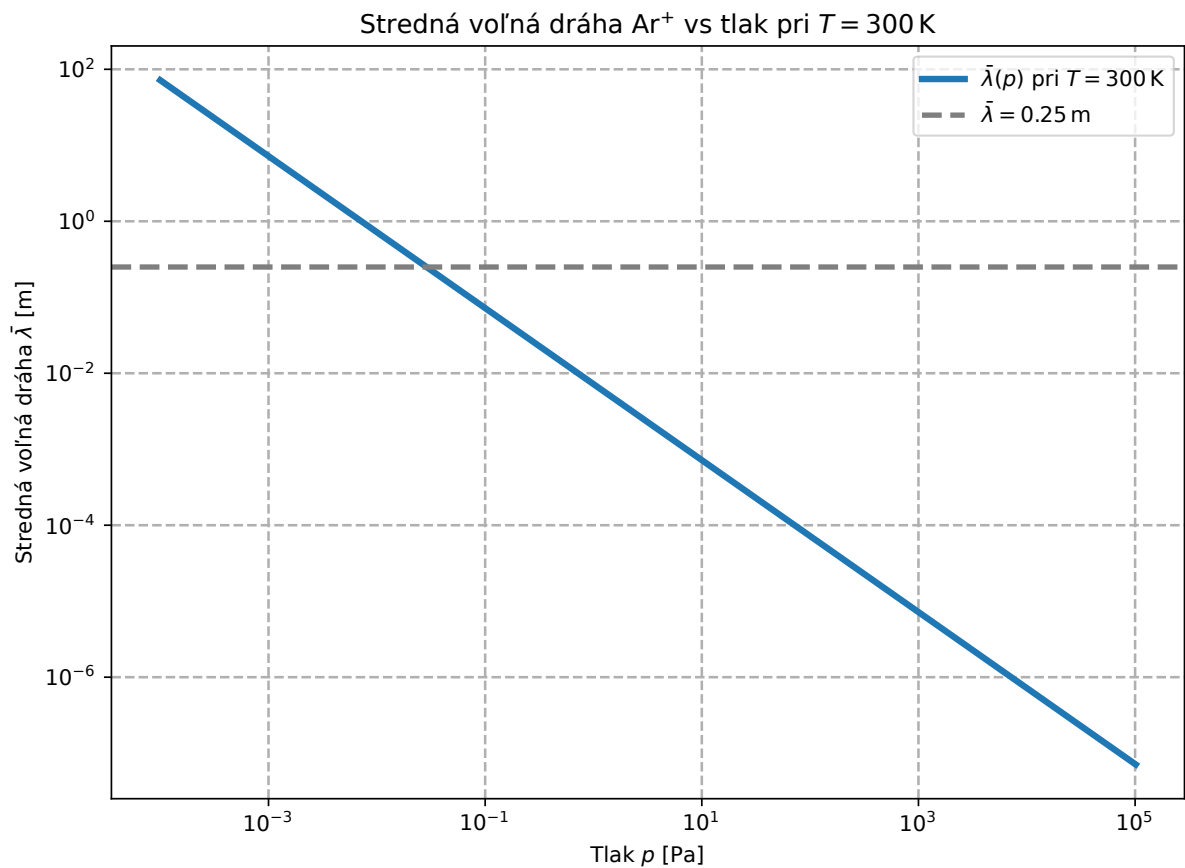
Cieľom bolo dosiahnuť tlak v komore, pri ktorom by bola stredná voľná dráha iónov približne 2 cm. Z grafu na obrázku 3.7 môžeme odčítať, že potrebujeme dosiahnuť hodnotu tlaku $5 \cdot 10^{-2} \text{ Pa}$.

V neskorších fázach testov sme do zostavy zaradili ihlový ventil, ktorý nám umožňuje veľmi presné a plynulé dávkovanie pracovného plynu do iónového zdroja. Zároveň sme k zostave pridali tlakovú fľašu, s pracovným plynom.

⁶<https://www.lewvac.co.uk/product/viton-gaskets-for-cf-flanges/>



Obr. 3.6: Testovanie tesnosti komory. Hodnota na displeji je uvedená v jednotkách mbar.



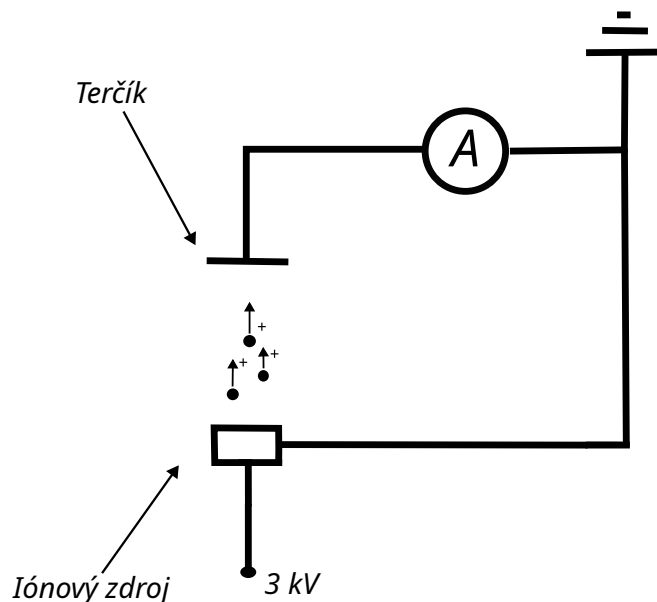
Obr. 3.7: Závislosť voľnej dráhy iónov na tlaku. Sivá prerušovaná čiara je hodnota voľnej dráhy, ktorú by sme chceli dosiahnuť, približne 25 cm.

Toto výsledné usporiadanie nám poskytuje dostatočnú variabilitu pri nastavovaní požadovaných parametrov tlaku a zloženia plynu, čo je kľúčové pre ďalšie experimentálne kroky v rámci tejto práce.

3.4.3. Elektronická časť aparatury

Elektronická časť nášho experimentálneho zariadenia je koncipovaná tak, aby poskytovala stabilné vysokonapäťové napájanie a súčasne umožňovala presné merania prúdu. Hlavným prvkom tejto časti je vysokonapäťový zdroj typu XP GLASSMAN FJ3R40⁷, ktorý dokáže dodávať napätie až do 3 kV a prúd do 40 mA. Tieto parametre nám poskytujú dostatočnú výkonovú rezervu na vytváranie a udržiavanie požadovaných podmienok v experimente, či už ide o generovanie potrebného elektrického poľa alebo ionizáciu plynu.

Ďalším komponentom zostavy je multimeter. Je určený na sledovanie prúdu vytváraného zdrojom prostredníctvom iónov, vďaka čomu dokážeme získať prehľad o tom, ako účinne prebieha ionizácia a aká je stabilita iontového toku. Toto meranie je kľúčové pre vyhodnocovanie a optimalizáciu experimentálnych podmienok, keďže nám umožňujú zachytiť a analyzovať aj drobné odchýlky vo výkone a správaní sa systému. Zjednodušená verzia tohto zapojenia je zobrazená na obrázku 3.8.



Obr. 3.8: Zjednodušené schématické zapojenie zdroja.

⁷<https://www.bamer.it/en/high-voltage-power-supplies/8494-xp-glassman-fj3r40-high-voltage-power-supply-0-3kv-0-40ma.html>

4. Testovanie

Po úspešnom sprevádzkovaní vákuovej i elektronickej časti našej aparatúry sme pristúpili k samotnému testovaniu zdroja. Hlavným cieľom bolo experimentálne overiť jeho prevádzkové parametre, najmä stabilitu výstupného prúdu a napätia, ako aj spoľahlivosť pri dlhodobej záťaži. V rámci meraní sme sledovali rozsah prevádzkových hodnôt, odolnosť jednotlivých komponentov a reakciu systému na zmeny výkonu.

Získané údaje nám umožnili detailne identifikovať prípadné odchýlky, chyby či konštrukčné nedostatky, ktoré môžu nepriaznivo ovplyvniť dlhodobú stabilitu zariadenia. Na základe týchto poznatkov sme navrhli potrebné úpravy, aby sme zabezpečili spoľahlivú a bezpečnú prevádzku v budúcich experimentoch.

4.1. Úvodné testovanie

Počas série testov sme zdroj systematicky vystavovali rôznym prevádzkovým podmienkam. Menili sme najmä tlak v komore, veľkosť prúdu dodávaného do výboja a vzdialenosť katódy od anódy. Ukázalo sa, že hneď po zapálení stabilného (dútnavého) výboja sa napätie na zdroji ustáli približne na hodnote 300 V pri tlakoch v rozmedzí od $5 \cdot 10^0$ Pa do $7 \cdot 10^2$ Pa (obrázok tohto výboja je na obrázku 4.1). Síce sa prejavila mierna závislosť na tlaku, prúdu aj vzdialenosti elektród, rozdiely boli len niekoľko desiatok voltov, čo je pri našom cielovom výbojovom napätí v jednotkách kV prakticky zanedbateľné. Prúd sa vždy ustálil na hodnote nastavenej na zdroji (prúdovo limitovaný režim) a dokázali sme ho plynulo zvýšiť až na maximálnych 40 mA. Pri raste prúdu bolo voľným okom zreteľné zosilnenie jasu plazmy. Súčasne sa zvýšil aj prúd iónov dopadajúci na nerezový terčík pripojený k zemi cez ampérmetr. Terčík bol umiestnený na pohyblivom držiaku, takže jeho vzdialenosť od plazmového zdroja sa dala jednoducho nastaviť. Pri vzdialenosti približne 7 cm, tlaku niekoľkých desiatok pascalov a zdrojovom prúde 40 mA sme na ampérmetri namerali prúdy okolo 4 mA. Znížením zdrojového prúdu sa prúd dopadajúcich iónov očakávane znižoval; pri zdrojovom prúde v jednotkách miliampérov klesol až na $\pm 0,03$ mA. Ak chceme v tomto režime dosiahnuť požadovanú energiu iónov, museli by sme do zdroja priviesť podstatne vyšší prúd¹ a prejsť tak do oblasti abnormálneho dútnavého výboja (toto dobre popisuje graf na obrázku 2.3). Takýto postup by však vyžadoval chladenie zdroja (napríklad pri $I=200$ mA a $U=1$ kV by výkon dosiahol 200 W) a zároveň by viedol k vysokej hustote prúdu, čo nie je pre našu aplikáciu žiaduce.

Počas testov som zaznamenal zaujímavý jav. Pri dovtedy najnižšom dostupnom prevádzkovom tlaku, približne $1 \cdot 10^0$ Pa (systém bol evakuovaný iba rotačnou olejovou vývevou), sa občas prejavil odlišný pracovný režim. Výboj už nebol limitovaný prúdom, ale napätím približne 1 kV, pričom prúd zostával nízky, okolo 1 mA. Tento stav – zobrazený na obrázku 4.1 vľavo – je režim, ktorý chceme pri prevádzke využívať. V grafe na obrázku 2.3 mu zodpovedá počiatočná fáza normálneho dútnavého výboja. Parametre tohto režimu sú pre nás mimoriadne priaznivé, a preto sa ďalšie úpravy zdroja zamerali na jeho stabilné dosiahnutie.

Z priebehu Paschenovej krivky (obrázok 2.2) vyplýva, že na dosiahnutie tohto režimu je nutné ďalšie zníženie tlaku. Keďže bolo potrebné tlak znížiť aj kvôli testovaniu ióno-

¹Konštrukčne a principiálne podobné zdroje využívajú výbojový prúd viac než 150 mA – <https://www.beamtec.de/en/anode-layer-ion-sources/>

vého zdroja v SEM mikroskope, pridal som do systému turbomolekulárnu vývevu. Bez väčších ťažkostí tak bolo možné dosiahnuť tlaky okolo 10^{-2} Pa, čo považujem za vhodné aj vzhľadom na strednú voľnú dráhu častíc, ktorá pri tomto tlaku dosahuje desiatky cm (graf na obrázku 3.7). Pri tak nízkom tlaku však už nie je možné výboj zapáliť, a preto som v tejto fáze experimentov zaviedol prívod pracovného plynu priamo do tela zdroja, ako bolo spomenuté v predchádzajúcich odstavcoch.

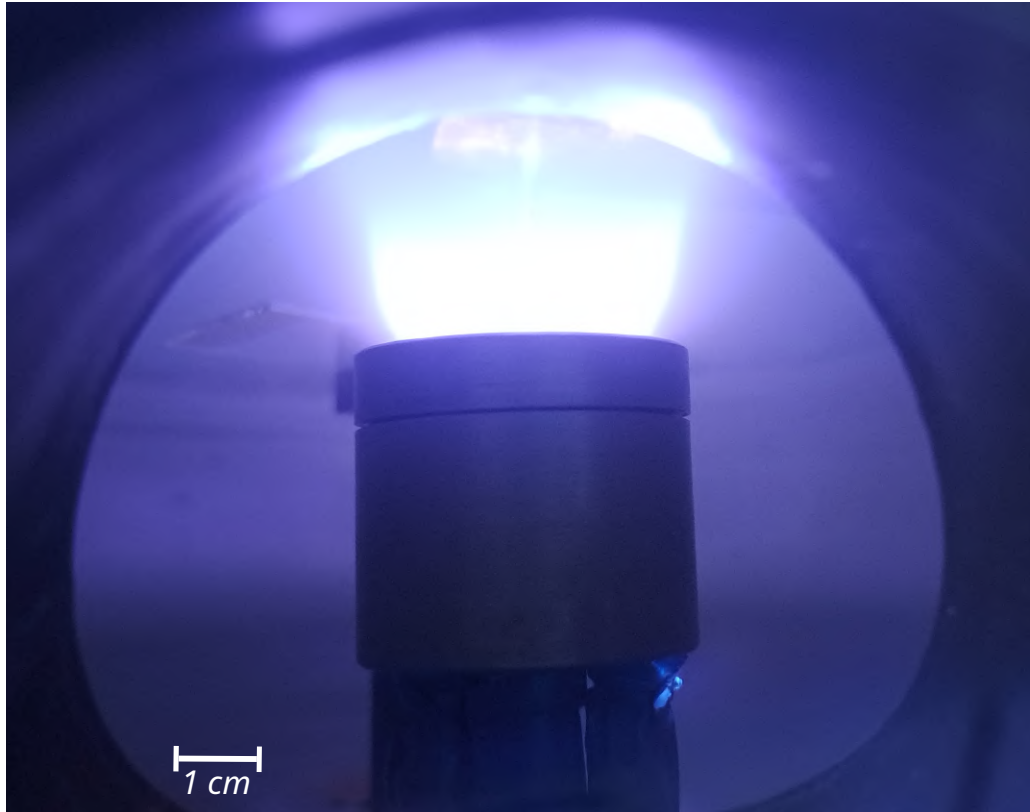


Obr. 4.1: V ľavo napäťovo limitovaný režim (1 mA, 1,2 kV, $2 \cdot 10^0$ Pa). Vpravo prúdom limitovaný režim (40 mA, 280 V, $15 \cdot 10^0$ Pa).

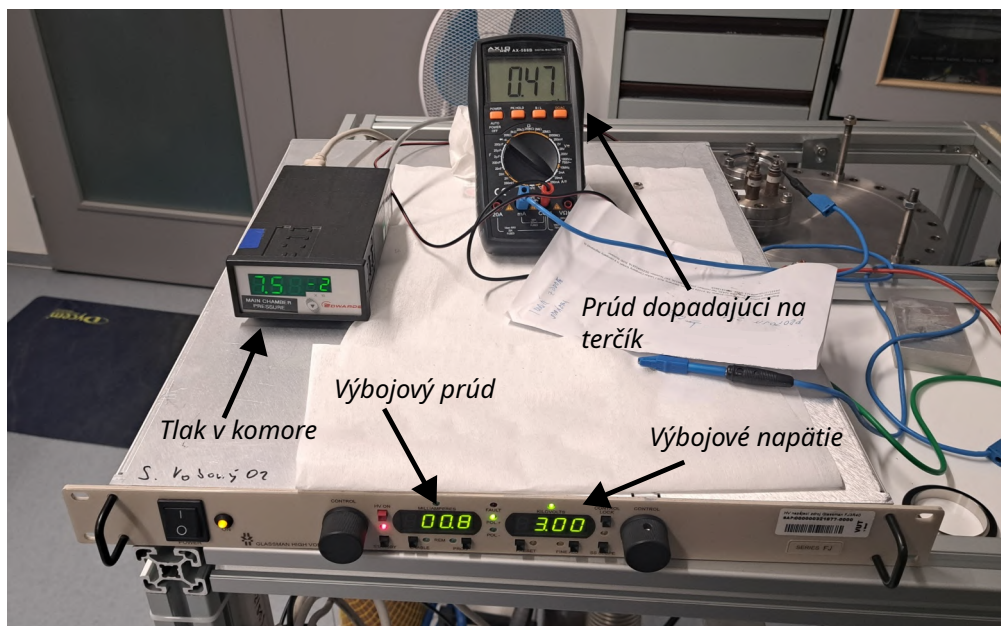
4.2. Test optimalizovaného riešenia

Po úprave iónového zdroja a inštalovaní turbomolekulárnej vývevy som začal novú sériu testov. Po evakuácii komory na tlak približne $4,5 \cdot 10^{-2}$ Pa som povolil ihlový ventil tak, aby sa pokles tlaku spomalil. Keď tlak dosiahol hodnotu $5,0 \cdot 10^{-2}$ Pa, nastavil som ventil do polohy, v ktorej už tlak ďalej neklesal. Na napájacom zdroji som prednastavil napätie 3 kV a prúdový limit 5 mA. Po zapnutí výstupu sa výboj zapálil prakticky okamžite, bez iskrenia či preblikávania. Pohľad na výboj z boku je na obrázku 4.2. Režim bol tentoraz limitovaný napätím a pri maximálnom napätí 3 kV prúd dosahoval 0,1 mA – 3 mA v závislosti od tlaku. Napätie bolo možné plynule zvyšovať aj znižovať (so znižujúcim sa napätím klesal prúd a naopak), zatiaľ čo prúd bolo možné len znížiť (zvýšiť len po hodnotu danú limitom napätia).

Merali sme aj prúd iónov dopadajúci na terčik. Jeho hodnota bola o niečo vyššia ako polovica výbojového prúdu a táto charakteristika sa zachovala aj pri zmenách tlaku či výbojového napätia. Ako ukazuje obrázok 4.3, pri výbojovom prúde 0,8 mA sme na terčiku detekovali prúd 0,47 mA pri tlaku $7,5 \cdot 10^{-2}$ Pa.



Obr. 4.2: Fotka tvaru zväzky. Fotka je robená s dlhou expozíciou (4 s).



Obr. 4.3: Zobrazenie prevádzkových parametrov výboja.

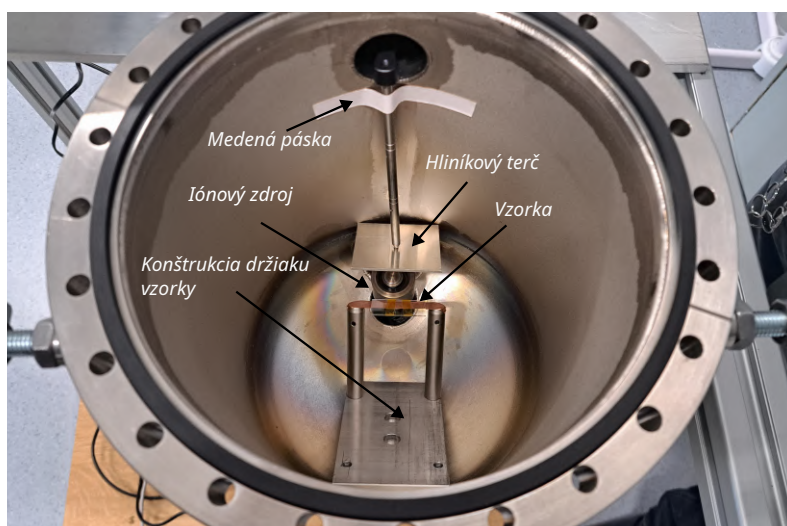
Pri regulácii prívodu pracovného plynu som skúmal vplyv tlaku na charakteristiky výboja. Postupným znižovaním tlaku klesal výbojový prúd – rovnako aj prúd meraný na terčiku – až po hranicu $1,0 \cdot 10^{-2}$ Pa, kde som narážal na merací limit vákuomera. Výboj pritom horel až do neznámeho tlaku $\leq 1,0 \cdot 10^{-2}$ Pa, pri ktorom napokon zhasol.

Pri opačnom postupe, teda pri zvyšovaní tlaku, prúd rástol približne lineárne až na $\sim 3\text{mA}$. V tomto bode začal výboj periodicky zhasínať; napájací zdroj sa to snažil kompenzovať opakovaným zapáľovaním, čo sa prejavovalo „cvakaním“ relé a preblikávaním plazmy. Keďže tento stav zbytočne zatažuje zdroj vysokého napätia, tlak som čo najskôr znížil, čím sa stabilný dútnavý výboj opäť obnovil.

4.3. Depozícia tenkej vrstvy

K ďalším experimentom patrilo nadeponovanie tenkej vrstvy na podložné sklíčko mikroskopu. Aby bolo možné výsledok spoľahlivo vyhodnotiť, prilepil som na časť skla pásik kaptonovej pásky², čím sa vytvorila ostro viditeľná hrana medzi pokrytou a čistou časťou sklíčka. Sklíčko bolo ku kovovej konštrukcii prichytené obojstrannou medenou páskou, ktorá zabezpečovala aj elektrický kontakt na odvod prípadného prebytočného náboja.

Ako terč som použil kúsok hlinku, upevnený v komore pomocou držiaka a uzemnený medenou páskou. Celú zostavu ilustruje obrázok 4.4.



Obr. 4.4: Použitá depozičná aparátúra.

Aparatúra bežala niekoľko hodín. Po ukončení procesu som z komory vybral vzorku. Prekvapilo ma, že na sklíčku nebola zjavná kovová vrstva s charakteristickým leskom; voľným okom bola rozpoznateľná len veľmi nejasne a bez referenčnej, kaptonovou páskou prekrytej čistej oblasti by ostala prakticky neviditeľná. Pri pozorovaní pod stereoskopickým mikroskopom sa však prechod medzi čistou časťou skla a oblasťou s nadeponovanou vrstvou ukázal zreteľne, čo ma podnietilo podrobiť vzorku ďalším analýzám.

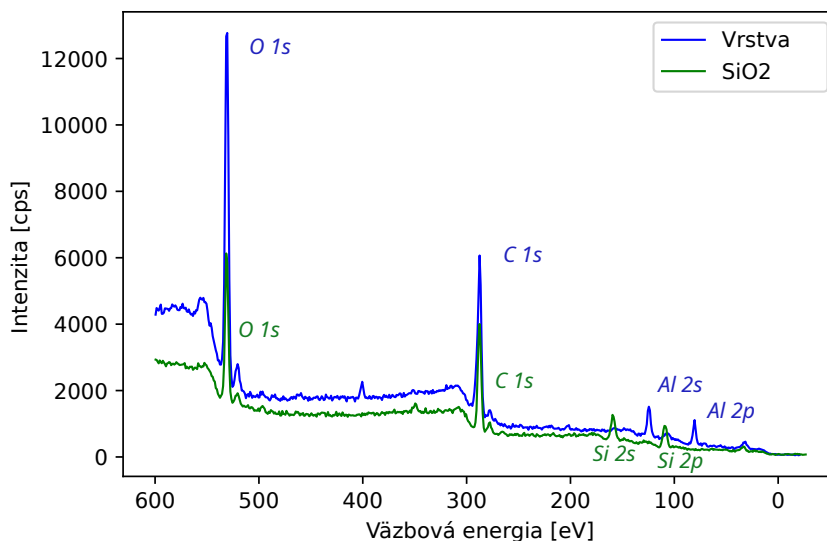
4.3.1. Analýza vzorky

Na charakterizáciu vzorky sme použili dve metódy: XPS (*X-ray Photoelectron Spectroscopy*) a AFM (*Atomic Force Microscopy*). Ako prvú sme realizovali analýzu XPS. Vyhotovili sa dve merania – jedno v oblasti s nadeponovanou vrstvou a druhé na čistej časti

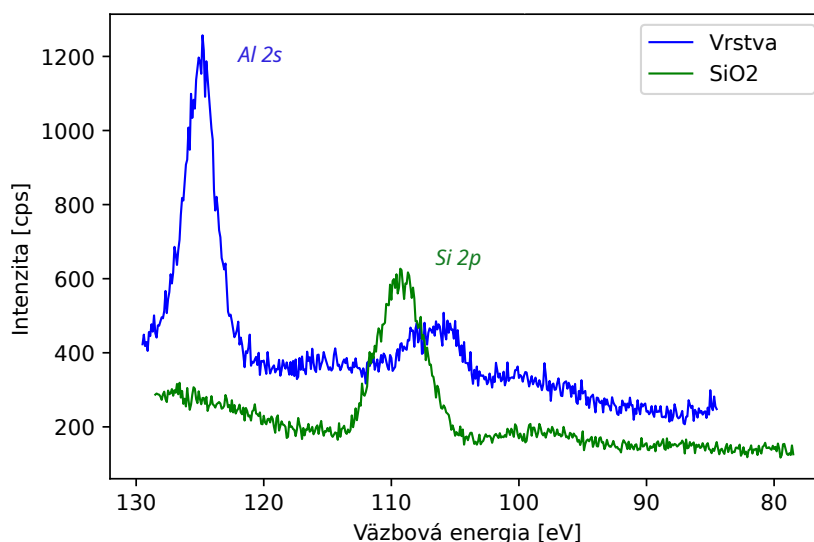
²Kapton® je tepelne odolná polyimidová pásky s nízkou plynivosťou, a preto je vhodnejšia než iné druhy pásov.

skla, viď obrázok 4.5. Výsledkom sú spektrá s charakteristickými vrcholmi jednotlivých prvkov. Zobrazili sme signály kyslíka, kremíka, uhlíka a hliníka.

Zelená krivka (obrázok 4.5) predstavuje meranie v oblasti s nadeponovanou vrstvou, zatiaľ čo modrá zodpovedá meraniu na čistom skle. Vrchol kyslíka na modrej krivke pochádza z kyslíka viazaného v skle; v porovnaní s vrcholom na zelenej krivke má však približne polovičnú intenzitu. Uhlíkový vrchol je v oboch meraniach takmer rovnaký a súvisí s povrchovými organickými nečistotami. Posledné dva vrcholy modrej krivky patria kremíku, ktorý spolu s kyslíkom tvorí sklenenú maticu. V zelenej krivke sú tieto vrcholy nahradené signálmi hliníka, potvrdzujúcimi prítomnosť nadeponovaného hliníkového filmu.



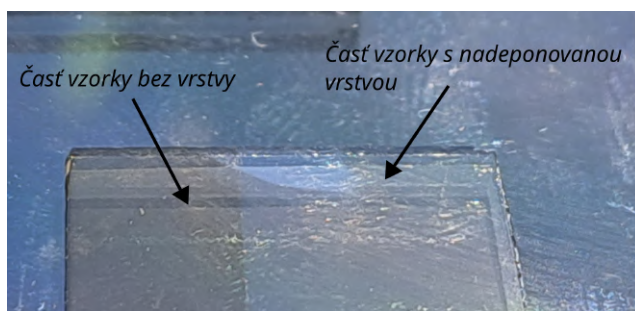
Obr. 4.5: Graf s vrcholmi jednotlivých prvkov, získaný metódou XPS. Výsledky preukázali prítomnosť hliníku.



Obr. 4.6: Detail vrcholu hliníku v prípade modrej krivky jednoznačne preukazuje prítomnosť prvku na vzorke.

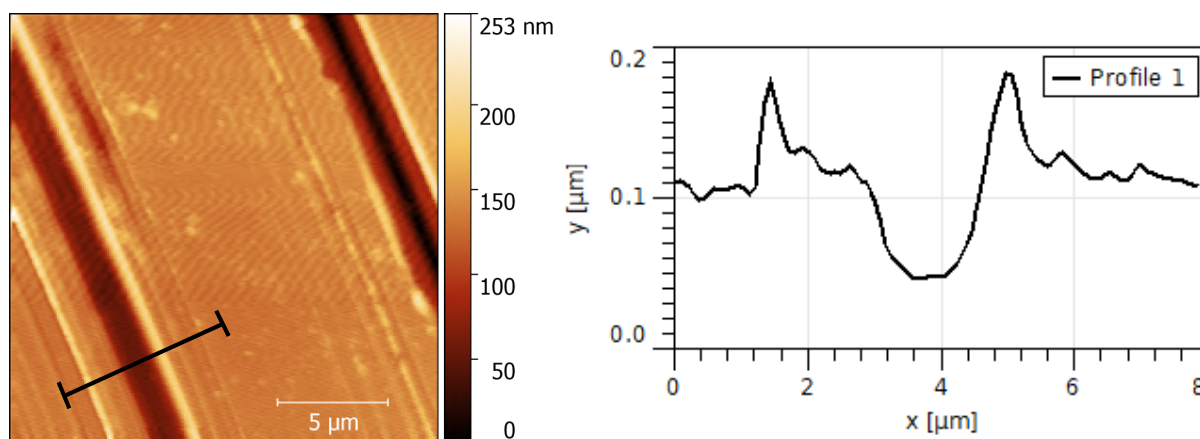
Pre absenciu referenčnej vzorky čistého hliníka (resp. oxidu hliníka) na skle a vzhľadom na nabíjanie samotného skla, ktoré znemožnilo využiť inú referenciu, nie je možné jednoznačne určiť, či nadeponovaná vrstva pozostáva z kovového hliníka alebo z oxidu hliníka. Keďže však vrstva úplne „odtienila“ kremíkové vrcholy a zároveň vykazuje výrazný kyslíkový signál – dokonca vyšší než kyslík na čistom skle (čomu by prítomnosť čisto kovového Al nezodpovedala) – prikláňam sa k interpretácii, že ide o oxid hliníka.

Za povšimnutie stojí aj zhnednutie vzorky po dlhšom ožiarení röntgenovým (RTG) žiarením. Sfarbenie bolo výraznejšie v oblasti, kde sklo nebolo chránené vrstvou, než tam, kde chránené bolo. Tento rozdiel ilustruje obrázok 4.7.



Obr. 4.7: Vzorka po vybratí z komory XPS „zhnedla“. Za povšimnutie stojí, že časť vzorky s nadeponovanou vrstvou bola RTG žiarením zasiahnutá menej.

Hrúbku nadeponovanej vrstvy sme stanovili pomocou AFM (*Atomic Force Microscopy*). Do vrstvy sme urobili vryp pomocou plastovej pinzety, aby nedošlo k poškodeniu podkladového skla. Ryha bola viditeľná už v optickom mikroskope, takže sme následne presne lokalizovali miesto merania v AFM. Topografia, aj výškový profil, zobrazené na obrázku 4.8, stanovujú hrúbku vrstvy na približne 70 nm.



Obr. 4.8: Vrchný obrázok reprezentuje topologický sken meranej oblasti, spodný zas výškový profil nameraný vo vyznačenom mieste.

Vrstva hliníka s takouto hrúbkou by už vytvárala nepriehľadný zrkadlovo lesklý povrch, čo však nepozorujeme. Toto zistenie ďalej podporuje záver, že ide skôr o oxid hliníka (Al_2O_3). Príčinou oxidácie by mohla byť netesnosť komory a natekajúci atmosférický kyslík počas depozičného procesu.

Záver

V rámci tejto bakalárskej práce sa podarilo navrhnúť, optimalizovať a depozíciou tenkej vrstvy experimentálne overiť širokozväzkový iónový zdroj určený na implementáciu do komory rastrovacieho elektrónového mikroskopu (SEM). Úvodné simulačné štúdie v softvéri EOD síce neumožnili priamo modelovať tvar zväzku, avšak poskytli dôležité informácie o magnetickom obvode zdroja a pomohli správne dimenzovať jednotlivé magnetické prvky. Tieto poznatky predstavovali kľúčový vstup pri tvorbe konštrukčných výkresov, ktoré sú priložené v elektronickej prílohe práce.

Na základe týchto výkresov bol zdroj vyrobený a po následnej kompletizácii podrobený sérii testov zameraných na overenie jeho vlastností, a spoľahlivosti. Experimenty preukázali, že zdroj spĺňa požiadavky na čistenie vzoriek v podmienkach SEM, pričom je schopný odstraňovať aj veľmi tenké kontaminačné vrstvy jednotky nanometrov bez narušenia vzorku (Na depozíciu vrstvy hrubej 70 nm bola potrebná niekoľko hodinová prevádzka).

Osobitnou prednosťou zariadenia je možnosť prevádzky s reaktívnymi plynmi, čo otvára priestor nielen na čistenie, ale aj na kontrolovanú povrchovú úpravu – napríklad selektívnu oxidáciu exponovaných oblastí pomocou iónov. Vďaka tomu môže zdroj výrazne rozšíriť schopnosti existujúcich SEM pracovísk, a to bez nutnosti zásadných zásahov do vákuovej či riadiacej infraštruktúry mikroskopu. Rovnako veľkou výhodou je možnosť prevádzky bez chladenia. Tento fakt bol overený niekoľkohodinovou nepretržitou prevádzkou, počas ktorej sa nevyskytli nijaké problémy, alebo výkyvy parametrov zdroja.

Celkovo práca potvrdila životaschopnosť navrhovaného riešenia a vytvorila pevný základ pre ďalší vývoj. Budúce kroky môžu zahŕňať detailnejšiu spektrálnu charakterizáciu energie emitovaných iónov, a samotnú implementáciu do komory SEM mikroskopu.

Literatúra

- [1] Martin Reiser. *Theory and Design of Charged Particle Beams*. Wiley-VCH, Weinheim, Germany, 2nd, updated and expanded edition, 2008. ISBN 978-3-527-40741-5.
- [2] T. M. Randolph and J. E. Polk. An Overview of the Nuclear Electric Xenon Ion System (NEXIS) Activity. In *40th Joint Propulsion Conference*, Fort Lauderdale, 2004. URL <https://ntrs.nasa.gov/citations/20070023749>. AIAA Paper 2004-3450, [cit. 2025-05-10].
- [3] P. D. Reader. Ion Beam Sources, Past, Present and Future. In *Proceedings of the 42nd Annual Technical Conference of the Society of Vacuum Coaters*, pages 3–8, Albuquerque, NM, 1999. Society of Vacuum Coaters. URL https://www.svc.org/clientuploads/directory/resource_library/99_003.pdf.
- [4] Jet Propulsion Laboratory. Dan Goebel and Tom Randolph with an early version of JPL’s NEXIS ion thruster. [online image], n.d. URL https://sec353ext.jpl.nasa.gov/ep/img/ion_thrusters/nexis_goebel_randolph.jpg. [cit. 2025-05-10].
- [5] PhD McMahon, Greg. Mass spectrometry ionization. Technology Networks, Analysis & Separations, May 2021. URL <https://www.technologynetworks.com/analysis/articles/mass-spectrometry-ionization-347995>. Last updated January 2, 2024; accessed May 23, 2025.
- [6] H. Barthels, J. Grosser, and H.-P. Neitzke. Electron bombardment ion source with small energy spread and high brightness. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 19(10):819, Oct 1986. doi: 10.1088/0022-3735/19/10/012.
- [7] T. A. Bond and J. A. Christensen. NSTAR Ion Thrusters and Power Processors. Technical Report NASA/CR-1999-209162, NASA Glenn Research Center, 1999. URL <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20000003023/downloads/20000003023.pdf>. [cit. 2025-05-10].
- [8] Oleg A. Popov. *High Density Plasma Sources: Design, Physics and Performance*. Noyes, Park Ridge, N.J., 2009.
- [9] Robert Arrighi. Dr. Harold R. Kaufman. [online], Jul 2021. URL <https://www1.grc.nasa.gov/glenn-history/hall-of-fame/biographies/harold-kaufman/>. [cit. 2025-05-10].
- [10] Guifen Shi, Yiren Li, Bin Miao, Kai Liu, Xinjun Hao, Zonghao Pan, and Meng Guan. An Ion Beam System for Calibration of Space Low-Energy Ion Detectors. *Open Astronomy*, 32, 2023. doi: 10.1515/astro-2022-0225.
- [11] J. K. Hirvonen. Ion Beam Assisted Deposition for Optical Coatings: R&D to Production. In *Proceedings of the 37th Annual Technical Conference of the Society of Vacuum Coaters*, pages 269–274, Albuquerque, NM, 1994. Society of Vacuum Coaters. URL https://www.svc.org/clientuploads/directory/resource_library/94_269.pdf. Discusses IBAD using a Kaufman-type ion source.

- [12] S. Lawitlang, Hranghming Thanga, T. Lalthanthuama, B. Lalremruata, and R. Zonunsanga. Development and Characterization of Radio Frequency Ion Source. *Indian Journal of Physics*, 98:1–7, Feb 2024. doi: 10.1007/s12648-024-03110-w.
- [13] J. E. Keem. High Current Density Anode Layer Ion Sources. In *Proceedings of the 44th Annual Technical Conference of the Society of Vacuum Coaters*, pages 388–394, Philadelphia, PA, 2001. Society of Vacuum Coaters. URL https://www.svc.org/clientuploads/directory/resource_library/01_388.pdf. [cit. 2025-05-10].
- [14] Vadim Dudnikov and A. Westner. Ion Source with Closed Drift Anode Layer Plasma Acceleration. *Review of Scientific Instruments*, 73, Feb 2002. doi: 10.1063/1.1431703.
- [15] Dengming Xiao. Fundamental Theory of Townsend Discharge. In *Gas Discharge and Gas Insulation*, volume 6 of *Energy and Environment Research in China*, pages 47–88. Springer, Berlin and Heidelberg, 2016. ISBN 978-3-662-48040-3. doi: 10.1007/978-3-662-48041-0_3. URL https://doi.org/10.1007/978-3-662-48041-0_3.
- [16] Annemie Bogaerts. The glow discharge: an exciting plasma! *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 14:1375–1384, Sep 1999. doi: 10.1039/a900772e.
- [17] Marija RadmilovićRadjenović, Branislav Radjenović, Matej Klas, Aleksandar Bojarov, and Štefan Matejčík. The breakdown mechanisms in electrical discharges: The role of the field emission effect in direct current discharges in microgaps. *Acta Physica Slovaca*, 63:105–205, Jun 2013. doi: 10.2478/apsrt-2013-0003.
- [18] Shangxi Tonghui Steel Pipe Co., Ltd. Why Are Some Stainless Steels Magnetic and Some Not? [online], 2025. URL <https://sk.sxthsteelpipe.com/news/why-are-some-stainless-steels-magnetic-and-som-72712024.html>. [cit. 2025-04-26].

Zoznam použitých skratiek

ALIS	Anode Layer Ion Source (Iónový zdroj s anódovou vrstvou)
SEM	Scanning Electron Microscopy (Skenovací elektrónový mikroskop)
IBS	Ion Beam Sputtering (Depozícia iónovým účom)
IBAD	Ion Beam Assisted Deposition (Depozícia asistovaná iónovým zväzkom)
RF	Radio Frequency
ÚFI	Ústav Fyzikálneho Inžinierstva
TMP	Turbo Molecular Pump (Turbomolekulárna výveva)
AFM	Atomic Force Microscopy (Mikroskopia atomárnych síl)
XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy (Röntgenová fotoelektrónová spektroskopia)
EOD	Electron Optical Design software (Softvér na simuláciu časticovej optiky)
RTG	Röntgenové