



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV FYZIKÁLNÍ A SPOTŘEBNÍ CHEMIE

INSTITUTE OF PHYSICAL AND APPLIED CHEMISTRY

**CHARAKTERIZACE MIKROVLNNÉ PLAZMOVÉ TRYSKY
VE SMĚSI ARGONU S KYSLÍKEM**

CHARACTERIZATION OF MICROWAVE PLASMA JET GENERATED IN ARGON-OXYGEN MIXTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kateřina Smejkalová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. František Krčma, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1222/2017
Ústav: Ústav fyzikální a spotřební chemie
Studentka: **Kateřina Smejkalová**
Studijní program: Chemie a chemické technologie
Studijní obor: Chemie pro medicínské aplikace
Vedoucí práce: **doc. RNDr. František Krčma, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

Název bakalářské práce:

Charakterizace mikrovlnné plazmové trysky ve směsi argonu s kyslíkem

Zadání bakalářské práce:

Cílem práce je charakterizace aktivních částic a podmínek v mikrovlnami buzeném plazmatu ve směsi argonu s kyslíkem s ohledem na využitelnost systému v biomedicínských aplikacích. Detailní úkoly jsou následující:

1. Seznamte se s aplikacemi plazmových trysek v biomedicínských aplikacích
2. Nastudujte základy diagnostiky plazmatu pomocí optické emisní spektrometrie
3. Naučte se ovládat všechna potřebná experimentální zařízení
4. Proveďte osově rozlišenou charakterizaci plazmatu mikrovlnné trysky ve směsi argonu s kyslíkem

Termín odevzdání bakalářské práce: 21.5.2018

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí bakalářské práce.

Kateřina Smejkalová
student(ka)

doc. RNDr. František Krčma, Ph.D.
vedoucí práce

prof. Ing. Miloslav Pekař, CSc.
vedoucí ústavu

V Brně dne 31.1.2018

prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.
děkan

SMEJKALOVÁ, K. Charakterizace mikrovlnné plazmové trysky ve směsi argonu s kyslíkem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2018. 45 s. Vedoucí bakalářské práce doc. RNDr. František Krčma, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracovávala samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být použita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce.

.....
Podpis studenta

PODĚKOVÁNÍ:

Na tomto místě bych chtěla poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce panu doc. RNDr. Františku Krčmovi, PhD. za poskytnuté rady, vstřícnost, pomoc a trpělivost při řešení bakalářské práce.

ABSTRAKT

Předmětem této bakalářské práce je optická diagnostika mikrovlnné plazmové trysky pracující na frekvenci 2,45 GHz. Mikrovlnné plazma je generované pomocí surfatronového rezonátoru v argonu s příměsí kyslíku (max. 1,7 %) při konstantním průtoku argonu (3 Slm).

Teoretická část je zaměřena na základní informace o plazmatu a procesech v něm probíhajících. Plazma generuje řadu aktivních částic, jako jsou hydroxylové radikály, radikály oxidů dusíku, excitovaných molekul dusíku, atomárního dusíku, argonu a kyslíku. Všechny tyto částice společně s fotony generovanými plazmatem jsou využitelné v biomedicínských aplikacích, jejich přehled je v teoretické části také uveden.

Experimentální část je zaměřena na vizuální pozorování vlivu příměsí kyslíku na výboj a na stanovení přítomnosti aktivních částic podél osy aktivního výboje i jeho dohasínání pomocí optické emisní spektroskopie. Na tomto základě pak byly určeny i vybrané parametry samotného plazmatu – teplota elektronů, rotační a vibrační teplota.

KLÍČOVÁ SLOVA

Mikrovlnný výboj, plazma za atmosférického tlaku, studené plazma, diagnostika plazmatu, rozdělení aktivních částic, biomedicínské aplikace plazmatu

ABSTRACT

The optical diagnostics of microwave plasma torch operating at the frequency of 2,45 GHz is a subject of this bachelor thesis. Microwave plasma is generated using the surfatron resonator in argon with oxygen admixture (up to 1,7 %) at the constant argon flow of 3 Slm.

The theoretical part gives the basic information about plasma and processes running under plasma conditions. Various active particles such as hydroxyl radicals, nitric oxides, excited nitrogen molecules, nitrogen, argon and oxygen atoms are generated in the discharge. All these particles together with the plasma generated photons can be used in biomedical applications that are briefly reviewed in the theoretical part, too.

The visual observation of oxygen admixture on the discharge and the optical emission spectroscopy based determination of the active particles presence along the discharge and post-discharge axis is the subject of experimental part. Based on it, the selected plasma parameters like electron, rotational and vibrational temperatures were calculated.

KEY WORDS

Microwave discharge, atmospheric pressure plasma torch, low-temperature plasma, plasma diagnostics, active particles distribution, bio-medical plasma applications

1	ÚVOD	6
2	TEORETICKÁ ČÁST	7
2.1	Plazma	7
2.1.1	Historie	7
2.1.2	Vlastnosti plazmatu	7
2.1.3	Druhy plazmových výbojů	9
2.1.4	Interakce plazmatu s vodou	13
2.1.5	Aktivní složky plazmatu.....	13
2.2	Aplikace plazmatu v medicíně.....	14
2.2.1	Přímé terapeutické aplikace.....	14
2.2.2	Nepřímé terapeutické aplikace	15
2.2.3	Použití plazmatu	18
2.3	Optická emisní spektrometrie (OES).....	19
2.3.1	Stanovení teplot v plazmatu	20
3	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	22
3.1	Aplikace plazmatu	22
3.2	Mikrovlnné plazma buzené povrchovou vlnou	22
3.3	Schéma aparatury.....	23
3.4	Přístroje ke měření.....	23
3.4.1	Mikrovlnný výboj.....	23
3.4.2	Odrazová hliníková destička	23
3.4.3	Křemenná kapilára	24
3.4.4	Optická emisní spektrometrie.....	24
3.4.5	Použité mřížky pro stanovení jednotlivých spekter	25
4	VÝSLEDKY A DISKUZE	26
4.1	Vizuální pozorování	27
4.2	Rozdělení aktivních částic	29
4.3	Distribuce parametrů plazmatu.....	36
5	ZÁVĚR	39
6	POUŽITÉ REFERENCE	40
7	PŘÍLOHY	44

1 ÚVOD

Jak je všeobecně známo, plazma je čtvrté skupenství hmoty. Existuje ve vesmíru v různých, často velmi odlišných, formách. S plazmatem se můžeme setkat například ve formě blesku, polární záře, uvnitř zářivek, či v elektrickém oblouku. Plazma tvoří také hvězdy, mlhoviny, ionosféru nebo sluneční vítr. Parametry plazmatu v těchto formách se liší o mnoho řádů [1].

Plazma v nerovnovážném stavu za atmosférického tlaku je v současnosti široce studováno, protože umožňuje celou řadu aplikací v úrovni high-tech. Bylo vyvinuto mnoho typů zdrojů plazmatu, které pracují v otevřeném prostoru. Tyto zdroje mají výhody aplikace pro přímou úpravu materiálů včetně živých tkání. Za těchto podmínek zdroj plazmatu vyrábí aktivní částice, radikály i ultrafialové záření. Díky jejich kombinaci je aplikace plazmatu vysoce účinná. Byly vyvinuty další aplikace plazmatu pro různé obory (zpracování materiálů, inaktivace toxických látek, nanotechnologie, biomedicínské aplikace, sterilizace či chemická neutralizace). Plazma, které je v nerovnovážném stavu, může být za atmosférického tlaku produkováno různými typy zdrojů, jedním z nich je výboj povrchové vlny (SWD). Plazma je produkováno elektromagnetickou vlnou, která se pohybuje podél rozhraní plazmatu a dielektrika. Protože zde neexistují žádné elektrody, je tento druh plazmatu velice čistý a mohou tedy být aplikovány různé směsi plynů. Plazma generované mikrovlnnou tryskou v argonu a směsích molekulárních plynů s argonem poskytuje dostatek reaktivních částic. A při případné interakci s kapalinou do ní mohou efektivně pronikat a dále iniciovat celou řadu chemických procesů v kapalně fázi. Díky těmto procesům umožňuje plazma interakce s povrchem tkání, protože lidské tkáně a celkově celý lidský organismus je z většiny tvořen vodou [2].

Před zavedením plazmatu do praxe je potřeba detailně charakterizovat plazma, aby bylo možné zabránit jeho možným negativním účinkům. Dále je také potřeba identifikovat potenciál zdravotní indikace a odhadnout rizika užívání. Teprve poté mohou začít experimenty in vitro a následně in vivo [3, 4].

Tato práce se zabývá nízkoteplotním plazmatem, které bylo mikrovlnně buzené povrchovou vlnou v argonu s příměsí kyslíku. Bylo snímáno záření, které emitovalo excitované atomy argonu a molekuly dusíku, hydroxylové radikály, radikály oxidů dusíku a v neposlední řadě také radikály kyslíku.

Výše uvedeny aktivní částice jsou velmi důležité při léčbě plazmatem. Hydroxylový radikál je schopen tvořit peroxidy, které mají vysoce sterilizační účinky. Reakcí hydroxylového radikálu s radikálem oxidu dusíku vzniká peroxytril a následnou reakcí vzniká peroxytrilová kyselina, která má také sterilizační účinky. Celkově všechny tyto aktivní částice mají sterilizační účinky. Mimo jiné se u nich objevují i proliferační účinky, které podporují růst nových buněk.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Plazma

Plazma bývá považováno za čtvrté skupenství hmoty. Plazma je v podobě ionizovaného plynu, který je složený z iontů, elektronů a neutrálních atomů a molekul. Aby byl ionizovaný plyn považován za plazma, musí vykazovat kolektivní chování a kvazineutralitu. Plazma je elektricky vodivé, protože obsahuje volné nosiče elektrického náboje. Díky elektrické vodivosti působí na plazma i elektromagnetické pole [1].

2.1.1 Historie

První pokusy v oblasti fyziky plazmatu byly umožněny díky E.G. von Kleistovi (Německo), který roku 1745 vynalezl tzv. Leidenskou láhev. Jednalo se o jednoduchý kondenzátor, sestávající ze skleněné láhve, zevnitř i zvenčí obalené kovovou fólií. Toto uspořádání umožnilo uchovávat dostatečné množství elektrického náboje k dosažení vysokého elektrického potenciálu [5].

Hlavní rozvoj studia plazmatu však nastal až v minulém století. Zasloužil se o něj především držitel Nobelovy ceny Irving Langmuir, který definoval ionizovaný plyn termínem plazma (1927). Langmuir se svým spolupracovníkem Lewi Tonskem objasnil teorii „plasma sheaths“, tedy popsal jevy na rozhraní mezi ionizovaným plynem a pevným povrchem. Taktéž objasnil periodické proměny elektronové hustoty v trubici s plazmovým výbojem, které jsou dnes označovány jako plazmové vlny [5].

2.1.2 Vlastnosti plazmatu

Kvazineutralita

Jednou ze základních vlastností plazmatu je kvazineutralita. Jedná se o přibližnou rovnost koncentrací kladně nabitých iontů a záporně nabitých elektronů v oblastech plazmatu, kde všechny tři lineární rozměry jsou podstatně větší než Debyeova stínící délka (viz dále). Díky přítomnosti volných nabitých částic se v objemu plazmatu vytváří prostorový náboj a elektrostatické pole, které zpětně silově působí na nabitě částice. Výsledkem je kompenzace fluktuací hustoty náboje a plazma se ve větším měřítku jeví jako elektricky neutrální [1].

S kvazineutralitou úzce souvisí Debyeovo stínění. Tento jev je pozorován například v přítomnosti pevné látky v plazmatu. Pevná látka nese náboj, ale ten je díky kvazineutralitě plazmatu odstíněn. Ve vzdálenosti označované jako Debyeova stínící délka je již plazma opět kvazineutrální [1].

Debyeova stínící délka

Když do plazmatu vložíme nepohyblivý náboj q (za předpokladu homogenního plazmatu), tak částice se souhlasným nábojem jsou jím odpuzované a s nesouhlasným přitahované. Plazma se proto polarizuje a elektrické pole vloženého náboje tím pádem odstíní. Odstíněním klesne potenciál elektrického pole v plazmatu oproti potenciálu elektrického pole ve vakuu na $1/e$, ve vzdálenosti označované jako Debyeova stínící délka [1].

Vznik plazmatu

Plazma vzniká odtržením elektronu z molekuly nebo atomu (ionizace). Toto odtržení vzniká dodáním energie. Nejběžněji dodávaná energie je elektrického původu pomocí elektronů, které naráží do neutrálních částic. Při vzniku plazmatu mohou nastat pružné nebo nepružné srážky. Pružné srážky jsou založeny na změně kinetické energie, naproti tomu nepružné srážky jsou založeny na vzniku excitovaných neutrálních částic, resp. iontů [1].

Klasifikace plazmatu

Plazma se dělí dle elektronové hustoty nebo teploty. Podle teploty jej můžeme rozdělit na horké a studené. Vysokoteplotní plazma má vysokou elektronovou hustotu. Pružné srážky mezi elektrony a částicemi vytváří reaktivní částice. Nepružné srážky zahřívají těžké částice, a tak se energie elektronů spotřebovává. Střední energie nabitých částic ve vysokoteplotním plazmatu je vyšší než 100 eV. Vysokoteplotní plazma se vyskytuje ve hvězdách a při experimentech s řízenou termonukleární syntézou. Naproti tomu nízkoteplotní plazma má nízkou elektronovou hustotu. Pružné srážky způsobují chemické změny plazmatu. Je zde menší množství nepružných srážek, které lehce zahřívají těžké částice. Vyskytuje se např. v zářivkách a výbojkách, nebo také v elektrickém oblouku [1].

Dále můžeme plazma rozdělit na termální a neizotermické. Pro termální plazma je typické, že střední kinetické energie všech částic jsou stejné. Naproti tomu v neizotermickém plazmatu jsou elektrony, které mají velkou kinetickou energii, ale ostatní částice mají kinetickou energii malou.

Stupeň ionizace

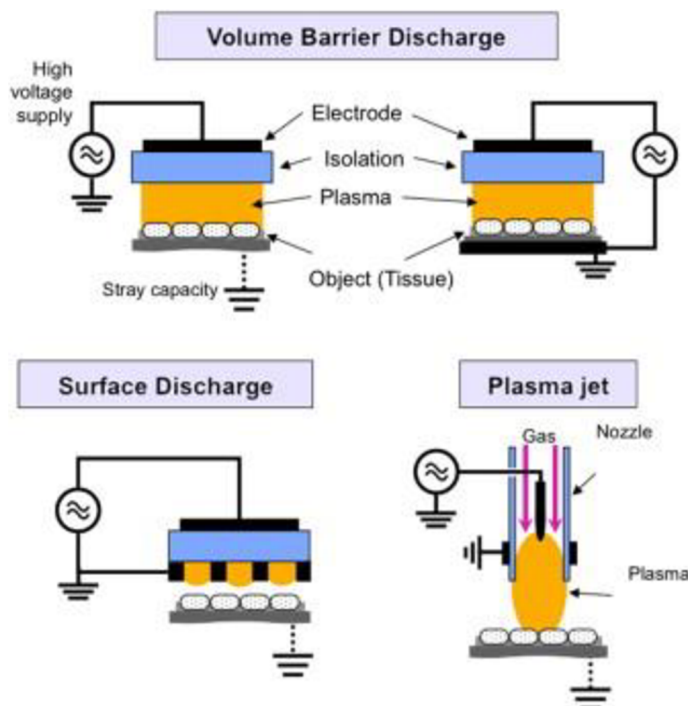
Stupeň ionizace plazmatu (poměr počtu ionizovaných částic vůči celkovému počtu částic) je jedním z nejdůležitějších parametrů, který určuje chování plazmatu. Závisí především na teplotě (to vyjadřuje Sahaova rovnice). Podle stupně ionizace rozlišujeme slabě ionizované plazma a silně ionizované plazma. Ve slabě ionizovaném plazmatu je koncentrace nabitých částic zanedbatelně malá v porovnání s koncentrací neutrálních molekul. Naproti tomu v silně ionizovaném plazmatu převládá koncentrace nabitých částic [1].

Elektrický proud v plazmatu

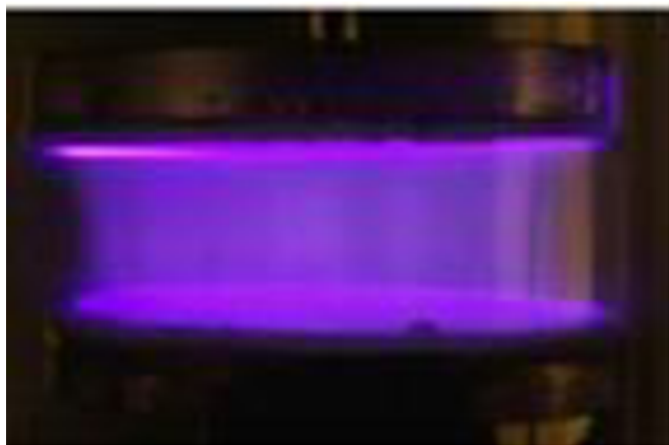
Plazma obsahuje volné elektrické náboje, proto je elektricky vodivé. Díky elektrické vodivosti působí na plazma i silné magnetické pole. S rostoucí koncentrací nabitých částic se mění i koeficienty tepelné vodivosti a dynamické viskozity ionizovaného plynu. Elektromagnetické síly a dobrá elektrická vodivost plazmatu obvykle zajistí, že hustota kladných a záporných nábojů se vyrovná. Je-li v plazmatu významný nadbytek kladných nebo záporných nábojů, v extrémním případě, je-li složeno jen z kladných nebo jen ze záporných nábojů, tak v takovém plazmatu hraje elektrické pole dominantní roli. Příkladem jsou nabitě paprsky částic, elektronový oblak v Penningově pasti a pozitronové plazma [1].

2.1.3 Druhy plazmových výbojů

Existuje celá řada druhů plazmových výbojů, které se mohou lišit způsobem, kterým byly vytvořeny, ale také se liší svými vlastnostmi. Můžeme tedy prohlásit, že plazmové výboje jsou velmi variabilní. Tedy pro každou konkrétní aplikaci může být uzpůsoben konkrétní plazmový výboj. Vlastnosti výboje nezávisí pouze na použité aparatuře, ale také na pracovním plynu, elektrickém napětí a prostředí. Zde bude uvedeno několik druhů plazmových výbojů, které jsou nejčastěji používány i v oblasti interakce plazmatu s biologickými objekty.



Obrázek 1 Bariérové výboje vhodné pro biomedicínské aplikace [6]



Obrázek 2 Fotografie objemového bariérového dielektrického výboje [7]

Bariérové výboje

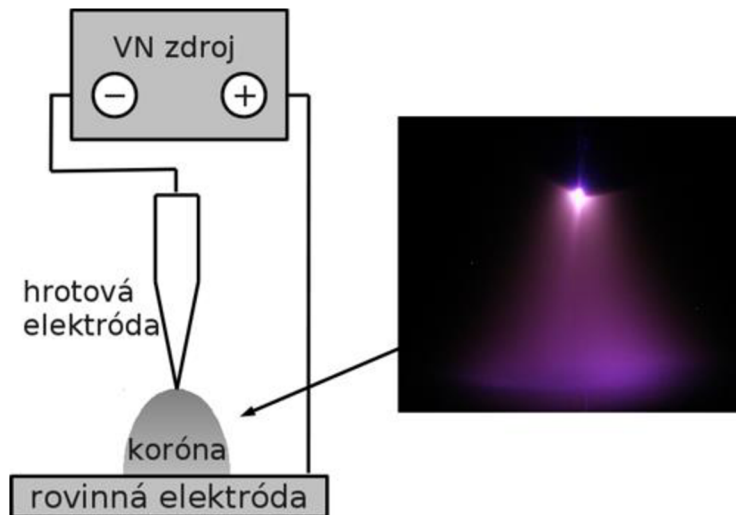
Bariérové výboje (BD) jsou charakterizovány přítomností alespoň jedné izolační vrstvy v jiskřišti (viz Obrázek 1). Klasické uspořádání tvoří dvě elektrody, izolační vrstva a jiskřiště. V případě, že předmět, který má být modifikován, tvoří jednu z elektrod, výboj umožňuje přímé opracování objektu. Omezením proudu je možné bezbolestné ošetření živých tkání. Variantou BD je válcová konfigurace v podobě plazmové trysky. Plazmová atmosférická tryska se skládá z plynem protékané trubice, která je vybavená jednou nebo dvěma elektrodami. Plazma je zapáleno uvnitř trysky a je vyfukováno ven na objekt. Různé plazmové trysky se liší v konfiguraci elektrod, druhem plynu a také elektrickými parametry [6].

U tohoto druhu bariérového výboje můžeme zavést pulzní režim, který je řízen pulzním elektrickým generátorem a vytváří velmi ostrý pulz vysokého napětí na krátký časový úsek. Tímto způsobem elektrony získají vysokou energii, což má za následek generaci nízkoteplotního plazmatu [6, 7].

Korónový výboj

Korónový výboj vzniká mezi dvěma elektrodami, z nichž aspoň jedna musí mít malý poloměr křivosti (hrot, tenký drát). Díky tomu vzniká v jejím okolí gradientní elektrické pole, které má vysokou intenzitu a na elektrodě dochází k průrazu. Okolí elektrody je silně ionizováno a je nazýváno koróna. Tento výboj bývá obvykle využíván v těžko dostupných prostorech o malých rozměrech.

Korónový výboj může také probíhat jak v kontinuálním, tak i v pulzním režimu. Tímto způsobem získají elektrony vysokou energii, což má za následek generaci nízkoteplotního plazmatu [7, 8].



Obrázek 3 Schéma a fotografie negativního korónového výboje [7]

Klouzavý obloukový výboj

Tento výboj je považován za inovativní technologii, která vykazuje dvojitý charakter termického a nízkoteplotního plazmatu. Vysoké napětí bývá většinou zaváděno mezi dvě elektrody, kde v nejužším místě dochází k obloukovému výboji. Pro snížení teploty výboje se zvyšuje proudění plynu tryskou, díky čemu vzniká nízkoteplotní plazmový oblouk [8].

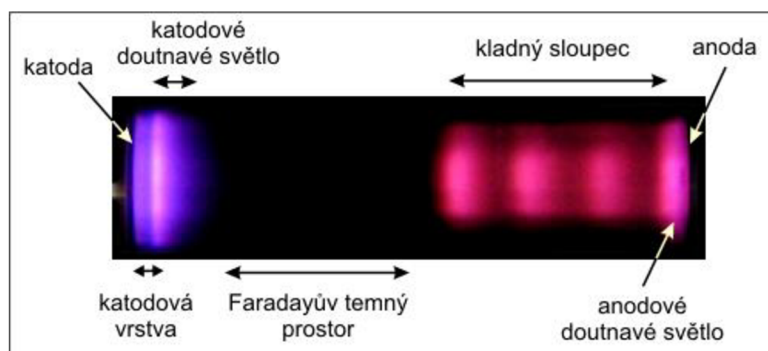


Obrázek 4 Fotografie klouzavého obloukového výboje při dvou různých průtocích argonu [9]

Doutnavý výboj

Principem tohoto výboje je vytvoření lavinové ionizace. Dochází k tomu takovým způsobem, že náhodný elektron je urychlen v elektrickém poli a díky srážkám s okolními částicemi dochází k jejich ionizaci. Ionty dopadající na katodu musí mít dostatečnou energii, aby došlo k sekundární emisi elektronů z katody. Což je podmínkou pro udržení samostatného výboje.

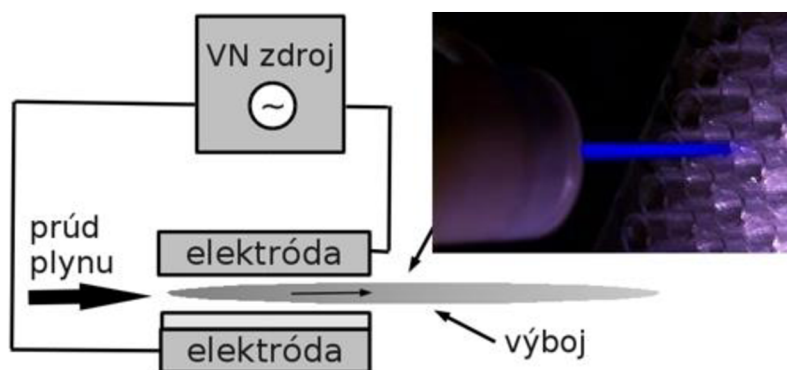
Tento druh výboje se používá ve velké většině za sníženého tlaku. Proto se při využití v medicíně uplatňuje při povrchových úpravách materiálů (například implantátů) a dále také při sterilizaci objemových materiálů, nebo také jako doplněk k běžnému autoklávování [10].



Obrázek 5 Doutnavý výboj [10]

Plazmová tryska

Plazmová tryska patří mezi hojně využívaný zdroj nízkoteplotního plazmatu. Zařízení se skládá ze dvou elektrod, které jsou uspořádané proti sobě. Mezi nimi vzniká výboj a proudící plyn strhává částice plazmatu a vytváří dojem plamene [7].



Obrázek 6 Schéma a fotografie plazmového hořáku [7]

Na obrázku 6 můžeme vidět schéma, které je vhodné pro metodu s využitím plazmové trysky. Toto schéma můžeme použít i pro dielektrické bariérové výboje (DBD). Kdy vidíme, že jedna elektroda je pokryta dielektrickou vrstvou.

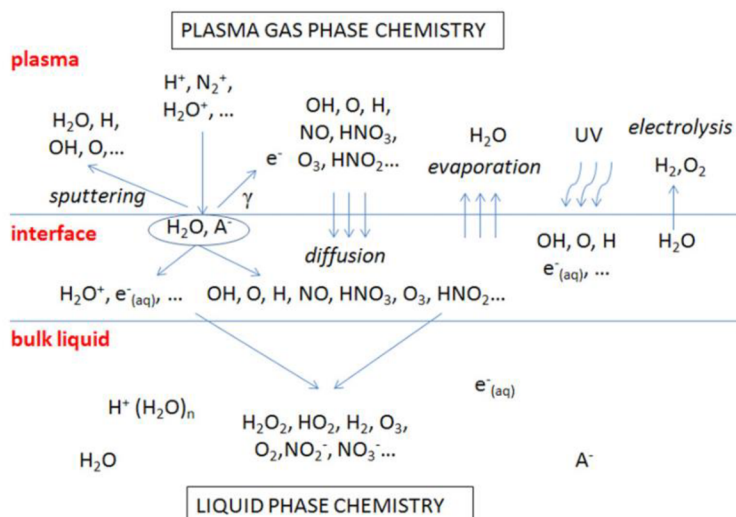
Mikrovlnný výboj

Mikrovlny jsou elektromagnetické vlny s frekvencí mnohem vyšší (řádově GHz) než u radiofrekvenčních výbojů. V mikrovlnném výboji má plazma vyšší (přibližně desetkrát vyšší) elektronovou hustotu než plazma získané stejnosměrným a vysokofrekvenčním výbojem [11].

K vytváření mikrovlnného plazmatu lze použít různých konfigurací. Jednou z nich je výboj buzený povrchovou vlnou (viz Experimentální část).

2.1.4 Interakce plazmatu s vodou

Pro interakci plazmatu s vodou musíme modifikovat vlastnosti plazmatu nebo modifikovat vlastnosti vody (pH, konduktivita). Plazma vytvořené za atmosférického tlaku pomocí výboje povrchové vlny (SWD) můžeme aplikovat při modelovém čištění vod, a to díky jeho baktericidnímu efektu [12].

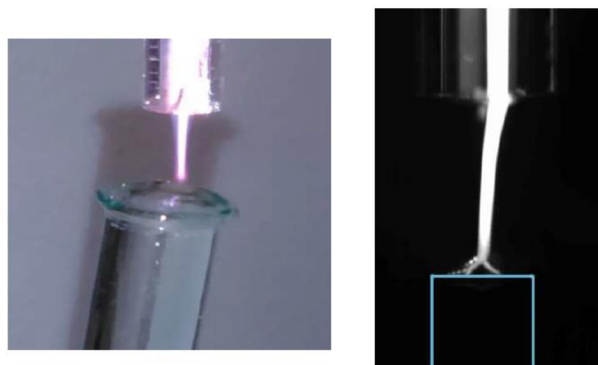


Obrázek 7 Schéma chemického působení plazmatu na kapalinu [13]

Na obrázku 7 můžeme vidět schéma chemického působení plazmatu na kapalinu, respektive dále na povrchy, včetně biologických. Je vidět, že v procesech vystupuje celá řada aktivních částic, které přecházejí mezi plazmatem a kapalinou oběma směry. Proto tyto systémy představují velmi komplexní chemicky vysoce reaktivní prostředí. Detailní rozbor procesů na rozhraní plazma – kapalina je uveden v publikaci Bruggemana a kol. [13].

2.1.5 Aktivní složky plazmatu

Plazma obsahuje různé aktivní složky, jako jsou elektrony a ionty, radikály, excitované atomy a molekuly. Také plazma současně vytváří elektromagnetické pole, UV záření a při interakci s pevnými látkami nebo kapalinami vyvolává také zahřívání [12].



Obrázek 8 Plazmový výboj na hladině vody [12]

2.2 Aplikace plazmatu v medicíně

Léčba plazmatem je inovativní a rozvíjející se obor, který kombinuje biologii, klinickou medicínu a v neposlední řadě také fyziku plazmatu. Z obecného hlediska lze aplikaci plazmatu v medicíně rozdělit na přímé a nepřímé aplikace. Při nepřímé aplikaci plazmatem se ošetřují různé povrchy, materiály a další zařízení, které se následně mohou používat pro speciální lékařské účely. Naopak při přímé aplikaci plazmatem je plazma aplikováno přímo na (lidské) tělo. Díky této přímé interakci plazmatu s živou tkání se mohou realizovat terapeutické účinky.

Zavedení plazmatu do klinické praxe otevírá novou možnost vyvíjení nových léčebných strategií pro léčení těžko vyléčitelných nemocí. Před zavedením do praxe je nezbytné identifikovat potenciál zdravotní indikace a odhadnout i rizika užívání. Mezi další nezbytnosti před zavedením plazmatu do praxe patří detailní charakterizace plazmatu, abychom mohli predikovat jeho možné účinky. Teprve poté lze přistoupit k experimentům *in vitro* a následně *in vivo* [3, 4].

V současné době již existují přesvědčivé důkazy o tom, že neizotermické atmosférické plazma (NAP) je schopno při interakci s živou tkání cíleně odstranit buňky bez způsobení nekrózy. Ukazuje se, že působení NAP nemá stejný vliv na eukaryotické buňky a bakterie. Bakterie jsou vůči plazmatu působení NAP méně odolné a jsou inaktivované již po krátké době působení. Oproti tomu eukaryotické buňky jsou odolnější a nevratné procesy v nich začnou probíhat až po delší době [14].

Schopnost NAP usmrcovat bakterie a také zvýšit proliferaci buněk specifických tkání skýtá možnost uplatnění plazmatu při mnoha medicínských aplikacích. Tato schopnost se v praxi osvědčila a NAP se tak stalo účinným nástrojem používaným při hojení špatně se hojících ran, léčení kožních nemocí, dodržování nemocniční hygieny, sterilizaci, antimykotické léčbě, zubní péči a kosmetickém cíleném odstranění buněk. Dále je nutné zmínit možný potenciál této metody při léčbě nádorových buněk *in vitro* a také způsobuje redukci velikosti tumoru při zkoumání *in vivo* [15–17].

V dalších odstavcích je uvedeno několik příkladů přímé terapeutické aplikace NAP.

2.2.1 Přímé terapeutické aplikace

Antibakteriální účinky plazmatu

Aplikace plazmatu v medicíně bychom mohli využít při mnoha procesech léčby. Můžeme ošetřit kůži pomocí plazmatu. Plazmová léčba vyvolává podráždění tkáně, které stimuluje kožní procesy, které mají silný a pozitivní vliv na hojení ran. Dále můžeme využít plazma v léčbě kožních infekcí. Zde aplikace nízkoteplotního plazmatu vyvolává antibakteriální účinek, který působí proti většině choroboplodných zárodků na poraněné kůži [3].

Léčení ekzému

Mezi další možné medicínské aplikace patří léčení ekzému (resp. atopického ekzému). Atopický ekzém je velmi časté chronické onemocnění, kterým trpí 3-5 % populace. Léčení kombinací různých procedur může být velmi zdlouhavé a pracné. Bylo prokázáno, že při léčbě ekzému pomocí plazmatu po dobu 30 dnů, se zmírnil pocit svědění a došlo k výraznému zlepšení zarudnutí kůže. Mohli bychom aplikovat tento druh léčení pomocí námi vytvořeného plazmatu vzhledem k podmínkám jeho vzniku a interakce s vodou [3].

Léčení chronických ran

Mezi další aplikace plazmatu patří léčení chronických ran. Bércové vředy patří mezi časté onemocnění kůže. Na léčbu tohoto onemocnění se vynakládají vysoké finanční prostředky.

V dnešní době existuje velké množství různých léčebných postupů, ale vzhledem k tomu, že přesné molekulární mechanismy hojení ran jsou většinou neznámé, používá se převážně symptomatická léčba. Díky dezinfekčnímu účinku atmosférického plazmatu tato léčba vede k ošetření proti bakteriální kolonizaci, což vede k podpoře léčbě chronických ran. Další výhodou použití tohoto druhu plazmatu je, že vede k proliferaci endoteliálních buněk, což má za následek postupného uzavírání rány. A v neposlední řadě bylo zjištěno, že při léčbě plazmatem se snižuje pH, což vede k acidifikaci ran [3].

Díky těmto poznatkům můžeme prohlásit, že jedno ošetření plazmatem kombinuje několik pozitivních účinků na hojení ran [3].

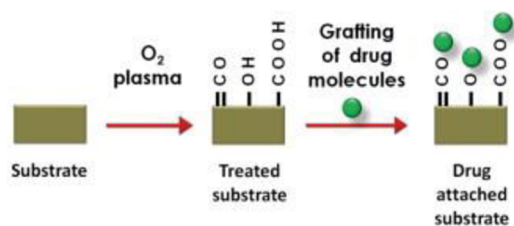
Stomatologie

Celá řada metod, jako jsou laserové techniky, mechanické vrtání a použití chemických činidel k čištění a dezinfekci tkáně v zubní dutině, má celou řadu nevýhod. Aplikace plazmatu v ústní dutině umožňuje inaktivaci bakterií a zároveň nedochází k poškození okolních tkání. Výhodou je, že plazma je tekutina o nízké viskozitě, a tedy velmi dobře proniká do komplikovaných struktur kořenových kanálků. Bylo vyvinuto několik typů nízkoteplotních, atmosférických plazmových přístrojů pro zubní ošetření. Jejich primárním cílem je zabít *Streptococcus mutans*, což je hlavní mikroorganismus, který způsobuje zubní kaz [18].

2.2.2 Nepřímé terapeutické aplikace

Podávání léků

Povrchovou úpravou plazmatem může být poskytnuta dostatečná přilnavost na kovové a polymerní materiály pro vázání léčiv. Nosič léčiva je vstřebatelný materiál a řídí rychlost a uvolňování léčiva. Obrázek znázorňuje schéma lékové molekuly přichycené na plazmatem ošetřeném materiálu [18].



Obrázek 9 Lékové molekuly přichycené na plazmatem ošetřeném materiálu [18]

Sterilizace

Sterilizace je proces založený na fyzikálním nebo chemickém postupu, který slouží k odstranění nebo k usmrcení všech mikroorganismů včetně klidových stádií (spory). Existuje řada sterilizačních postupů. Jsou různě finančně i časově náročné a většinou nejsou příliš šetrné k životnímu prostředí. Mezi klasické metody sterilizace se využívají vysoké teploty, chemické a toxické látky, které mohou být těžce odbouratelné [19].

Sterilizace plazmatem

Velmi účinnou sterilizační metodou je sterilizace plazmatem. Jednoduchá konstrukce umožňuje použití plazmových přístrojů namísto konvenčních sterilizačních metod. Velkou výhodou plazmové sterilizace je její netoxická povaha. Mezi další výhody této sterilizace patří finanční nenáročnost a možnost sterilizace teplotně senzitivních materiálů. Jedná se o krátkou dobu expozice při relativně nízké teplotě. Mezi výhody patří fakt, že není potřeba zahřívat velké objemy látek [19].

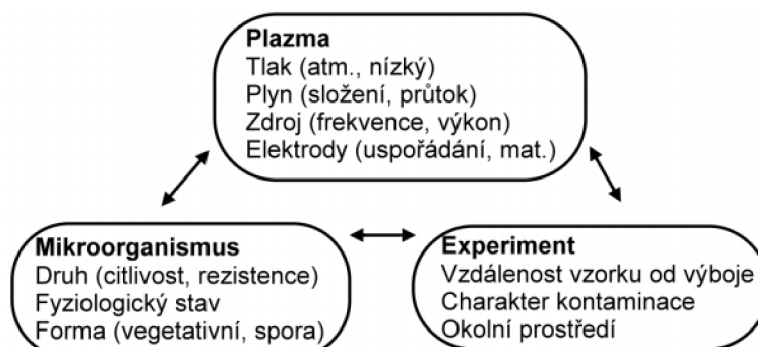
Tento způsob sterilizace využívá plazmatu generovaného elektromagnetickým polem. Principem této metody je působení více faktorů, a to jak fyzikálních (UV záření), tak i chemických (působení vytvořeného ozonu a dalších volných radikálů). Standardně se tato metoda zařazuje mezi fyzikální sterilizační metody. Celkové sterilizace je dosaženo synergickým působením vlivem tepla, UV záření, volných radikálů a elektricky nabitých částic [19].

Sterilizace plazmatem – vliv tepla

Sterilizace teplem je nejpoužívanější sterilizační metoda, ovšem během plazmové sterilizace není vyzářené teplo nejdůležitější složkou. Většinou jen podporuje celkový sterilizační efekt. U některých druhů bakterií může být vyvolané teplo naopak obtíží, protože podporuje jejich množení [19].

Sterilizace plazmatem – vliv elektricky nabitých částic

Výzkumy ukázaly, že se nabitě částice hromadí na vnější straně buněčné membrány, což způsobí zvýšení elektrostatické síly, která poté může poškodit tyto membrány. Ty se následně stávají propustnější pro klasická léčiva a v případě většího poškození může dojít k vyelití buněčné cytoplazmy a tím k nevratné destrukci buňky [19].



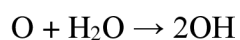
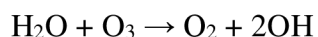
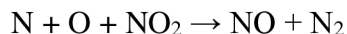
Obrázek 10 Variabilita plazmatu [20]

Sterilizace plazmatem – volné radikály

Při plazmové sterilizaci vznikají velmi reaktivní chemické látky zvané volné radikály. Jsou to atomy či molekuly, které obsahují nespárový elektron. Radikál se snaží doplnit elektron, aby vznikla stabilní konfigurace. To vyvolá řetězec reakcí, který je zakončen neutralizací volných radikálů. Volné radikály způsobují poškození makromolekul a membrán v živém organismu, což vede ke sterilizaci. Jejich největší využití je takové, že řetězové reakce vytváří další volné radikály. Mluvíme o radikálech kyslíkových, dusíkových a hydroxidových (O, O₃, OH, NO, NO₂ a další).

Při sterilizaci nízkoteplotním plazmatem ovlivňují ztrátu životaschopnosti bakterií právě volné radikály [21].

Zde je ukázka radikálových reakcí:



Sterilizace plazmatu – UV záření

Ultrafialové záření je elektromagnetické záření o vlnové délce kratší než viditelné světlo. Jeho zdrojem může být Slunce (přírodní původ) nebo může být generováno i uměle. Nejvíce škodlivé záření je pro biologické struktury v rozmezí vlnové délky 240 až 300 nm.

Podle vlnové délky, účinku a výskytu rozeznáváme 3 typy ultrafialového záření.

UVA záření o vlnové délce 400 až 320 nm, někdy také nazýváno měkké UV záření. Toto záření proniká do šikry. Setkáváme se s ním zejména u terapeutických zářičů (léčba lupénky) a v soláriích.

UVB záření má vlnovou délku 320 až 280 nm, které proniká do epidermis. Může být také nazýváno jako záření erytémové. Protože působí přímo na DNA buněk, může vyvolat imunitní supresi. Paprsky s vlnovou délkou kratší než 300 nm mají baktericidní účinky a užívají se v germicidních zářičích.

UVC záření o vlnové délce 280 až 100 nm, které je rozptylováno v ionosféře a je pohlceno ozónovou vrstvou Země. Toto záření má nejvyšší energii z UV záření a je tedy nejnebezpečnější. Navíc UVC záření je schopno disociovat molekuly. V tabulce 1 jsou uvedeny některé disociační a ionizační energie základních molekul. Přibližná velikost energie UVC záření se pohybuje v rozmezí 4,43 – 12,4 eV [22].

Tabulka 1 Disociační energie některých molekul [22-26]

Molekuly	Ionizační energie [eV]	Disociační energie [eV]
Kyslík	12,06	4,98
Voda	12,65	3,66
Dusík	15,58	9,79

UV záření dodá molekulám takovou energii, že se dostanou do excitovaného stavu. To zvýší jejich schopnost chemicky reagovat. Mezi nejdůležitější funkce patří zástava replikace DNA, což vede ke sterilizaci. UV záření také podporuje vznik volných radikálů [19].

2.2.3 Použití plazmatu

Jak již bylo výše uvedeno, plazmový výboj vytvořený elektromagnetickou vlnou s frekvencí při 2,45 GHz může interagovat s vodou. Při krátké vlnové délce (jednotky cm) plazma pouze klouže na vodní ploše a nemůže ji proniknout (viz Obrázek 8).

Díky nerovnovážnosti plazmatu můžeme uskutečnit dotek přímo s plazmatem, což je znázorněno na Obrázku 8. Právě tohoto jevu využíváme při ošetření živých tkání a dalších biomedicínských aplikacích. Živé tkáně obsahují velké množství vody a díky tomuto umožňuje reakci plazmatu na malém povrchu kůže. Reakce by mohla porušit určitou část DNA, proto by se toto mohlo aplikovat v budoucnosti např. při likvidaci bradavic na kůži apod.

Dále díky vzniku velmi čistého plazmatu může vznikat výboj, který je generovaný buď v heliu, nebo v argonu. V našem případě byl výboj generovaný v argonu s příměsí kyslíku. Toto má za následek, že mohou vznikat další radikály, které po reakci ve vodném prostředí mohou reagovat na další sloučeniny [2].

Jak již bylo výše uvedeno, námi vytvořené plazma bylo generované v argonu s příměsí kyslíku. V takto vytvořeném plazmatu můžeme pozorovat ultrafialové záření, elektrické pole, reaktivní formy kyslíku (ozon) i dusíku, což má za následek protizánětlivé a antimikrobiální účinky, tkáňovou stimulaci a stimulaci mikrocirkulace [3].

Za těchto podmínek vznikaly radikály kyslíku a hydroxyly, dále oxidy dusíku (NO_x), excitované stavy dusíku a argonu.

2.3 Optická emisní spektrometrie (OES)

Spektroskopie je obecně metoda pro diagnostiku stavu látek, založená na interakci mezi elektromagnetickým polem a molekulami diagnostikovaných látek v plynné, kapalném nebo pevném stavu.

Optická spektroskopie (jak absorpční, tak zejména emisní) je základní metodou diagnostiky plazmatu. Její výhodou je značná univerzálnost pro nejrůznější typy plazmatu (jak nízkotlaké, tak i vysokotlaké, bez ohledu na teplotu), navíc nijak neovlivňuje vlastní plazma (tento fakt platí pouze u emisní spektroskopie, u absorpční spektroskopie zanedbatelný vliv existuje). Spektroskopicky lze určit částečné složení plazmatu, informace o jeho teplotě a rozdělení energií [27].

Jedná se o fyzikální analytickou metodu sloužící ke kvalitativnímu a kvantitativnímu určení složení analyzovaného vzorku pomocí fotonů, které jsou vysílány atomy, ionty a molekulami zkoumaného vzorku. Aby vzorek vysílal záření, musí se atomy a molekuly vzorku převést do excitovaného stavu dodáním energie. Vysílané záření je polychromatické a nespojité. Je složeno z různých vlnových délek, které prvek nebo molekulu charakterizují (spektrum prvku).

Spektrum vzniká přechodem vnějších, tzv. valenčních elektronů z výšekvantových na nížekvantové stavy, popř. základní hladiny. Je složeno z řady spektrálních čar, přičemž ty nejintenzivnější vznikají přechodem mezi hladinou základní a nejbližší vyššími, z nichž může přejít elektron jednoznačně jenom do hladiny základní. Takové spektrální čáry nazýváme rezonanční. Molekulové spektrum je složitější, protože obsahuje větší počet excitačních hladin. Potom můžeme tedy pozorovat celou řadu přechodů, které mají tzv. pásovou strukturu. Ze získaného spektra můžeme určit složení vzorku, teplotu plazmatu nebo rozdělení energií [28].

Problém emisní molekulární spektroskopie se zpravidla omezuje jen na dvouatomové molekuly. Stanovení složení plazmatu z molekulárních spekter je poměrně obtížné, neboť jednotlivé molekulární pásy se rozkládají v širokém oboru vlnových délek, překrývají se jak vzájemně, tak i s atomárními spektry. Běžně lze v tabulkách emisních spekter nalézt pouze spektra dvouatomových molekul. Proto pro studium složení plazmatu je nutné využívat i dalších analytických metod. Proto se molekulární spektroskopie dvouatomových molekul využívá v podstatě pouze k určení teploty a rozdělení energie v plazmatu [27].

2.3.1 Stanovení teplot v plazmatu

Stanovení teploty neutrálního plynu

Z atomárních spektrálních čar lze zjistit informace o teplotě plazmatu. Pro toto stanovení potřebujeme spektrum s velmi vysokým rozlišením (cca 0,01 nm).

Jsou-li jednotlivé atomární stavy excitovány tepelně v jednotlivých elektronových stavech, je rozdělení populací popsáno Boltzmannovým rozdělením. To je předpoklad, z něhož se při výpočtu teploty neutrálního plynu vychází. Tento předpoklad není v nízkotlakém plazmatu splněn, protože nízkotlaké plazma není izotermní. Intenzita emisní spektrální čáry je tedy dána vztahem:

$$I_{nm} = A_{nm} \cdot h \cdot \nu_{nm} \cdot \frac{g_n}{Z} \cdot N \cdot e^{-\frac{E_n}{kT}},$$

kde A_{nm} je Einsteinův koeficient pravděpodobnosti spontánní emise, h je Planckova konstanta, ν_{nm} je frekvence spontánního přechodu, g_n je statická váha (stupeň degenerace) horního stavu přechodu, Z je tzv. stavová suma, N představuje celkový počet atomů, E_n je excitační energie hladiny n , k je Boltzmannova konstanta, T je teplota neutrálního plynu.

Ze vztahu můžeme vidět, že intenzita spektrálních čar závisí na teplotě. Vyskytne-li se ve spektru větší počet čar, které pocházejí z různých excitovaných hladin, lze graficky zobrazit závislost

$$\ln \frac{I_{nm}}{A_{nm} \cdot g_n \cdot \nu_{nm}}$$

na energii E_{nm} . Z její směrnice, která je rovna $-\frac{1}{kT}$, pak vypočítáme teplotu neutrálního plynu [28].

Stanovení teploty elektronů

Výše uvedený postup lze použít pro stanovení teploty elektronů v takovém případě, že k excitaci nedochází tepelně, ale srážkami s elektrony. Pouze tedy energií elektronů. Pak budou počty atomů excitovaných do různých stavů plně odrážet energie elektronů v plazmatu. Tato situace nastává u nízkoteplotního nerovnovážného plazmatu, které je základem většiny plazmochemických technologií [28].

Stanovení rotační teploty

Rotační teplota charakterizuje rotační rozdělení stavů molekuly. Vzhledem k velmi rychlé termalizaci (ustanovení Boltzmannovského rozdělení) rotačních stavů odpovídá rotační teplota v podstatě teplotě neutrálního plynu, proto také patří k základním charakteristikám plazmatu. Toto tvrzení platí v případech, kdy jsou v plazmatu přítomny jen molekuly jednoho plynu (např. dusík nebo kyslík).

Z podrobného rozboru založeného na kvantové mechanice vyplývá, že ze změřených intenzit jednotlivých rotačních čar daného vibračního pásu můžeme sestrojit závislost (tzv. pyrometrická přímka) $\ln \frac{I(J)}{J+1}$ na $J(J+1)$ pro R-větev spektra, respektive $\ln \frac{I(J)}{J}$ na $J(J+1)$ pro P-větev.

V těchto vztazích $I(J)$ označuje intenzity jednotlivých rotačních čar, J je rotační kvantové číslo v horním stavu přechodu. Směrnici této závislosti označme K . Pak

$$T_R = -\frac{h \cdot c \cdot B_v}{K \cdot k}$$

kde h je Planckova konstanta, c je rychlost světla ve vakuu, k je Boltzmannova konstanta a B_v je rotační konstanta horního elektronového stavu. Tento postup je sice zjednodušen, ale i přesto poskytuje poměrně dobré výsledky [28].

Stanovení vibrační teploty

Vibrační teplota charakterizuje vibrační rozdělení stavů molekuly. V neizotermickém plazmatu bývá zpravidla vyšší než teplota rotační a menší než teplota elektronová. V některých případech (v případě termodynamické rovnováhy) však i vibrační teplota charakterizuje teplotu neutrálního plynu. Na hodnotu vibrační teploty má vliv stupeň ionizace plazmatu, teplota elektronů a tlak neutrálního plynu, ale také chemické reakce probíhající v plazmatu. V případě neizotermického plazmatu je potřeba provádět složitější výpočty, aby bylo možné naměřené hodnoty vibračních teplot správně interpretovat.

Počet molekul nabuzených do daného vibračního stavu charakterizovaného vibračním číslem v je podle Boltzmannovy statistiky úměrný výrazu $e^{-\frac{E_{v'}}{k \cdot T}}$, kde $E_{v'}$ je energie dané vibrační hladiny. Podrobným rozбором dojdeme k podobnému závěru jako při určování rotační teploty. Stačí sestrojit závislost $\ln \frac{I_{v'v''}}{v^4 A(v'v'')}$, kde v' je vibrační kvantové číslo horního stavu, v'' je vibrační kvantové číslo dolního stavu, $A(v'v'')$ je pravděpodobnost přechodu a v je vlnočet pásu; zpravidla se užívá vlnočet hrany (hlavy) pásu. Směrnici výše uvedené závislosti označme opět K . Vibrační teplota pak bude dána jednoduchým výrazem $T = -\frac{1}{k \cdot K}$, kde k je Boltzmannova konstanta [28].

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Použití plazmatu má velký potenciál v budoucnu pro využití v medicínských aplikacích. V rámci bakalářské práce jsem používala mikrovlnné plazma buzené povrchovou vlnou a optický emisní spektrometr.

3.1 Aplikace plazmatu

Principem této nově vytvořené aplikace jsou dvě hlavní schémata výboje plazmatu. První schéma obsahuje rovinné konfigurace výboje dielektrických bariér, které můžeme aplikovat hlavně pro přímou úpravu plazmatem. Tyto výboje můžeme použít na rovinné povrchy a díky své konfiguraci umožňují širší povrchovou léčbu. Druhá je tvořena různými plazmovými tryskami, které jsou aplikovány hlavně pro lokalizovanou léčbu. Plazmové trysky jsou typicky vytvářeny radiofrekvenčními zdroji s výkonem několika wattů. Schéma výboje je bezelektrodové nebo s jednou elektrodou v přímém kontaktu s plazmatem. Povrchová úprava, která využívá tyto výboje, probíhá prostřednictvím aktivních částic, které proudí do aktivní části výboje plazmatu.

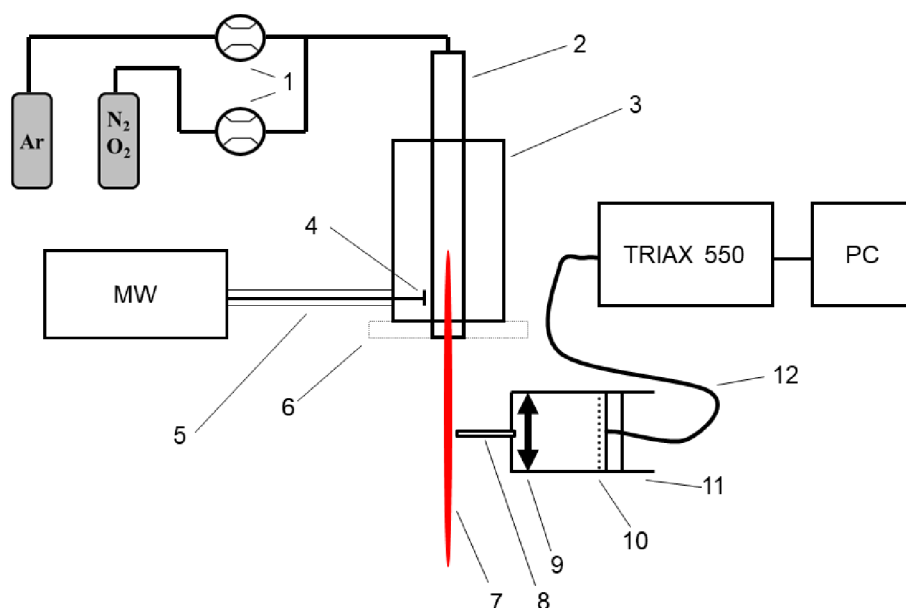
Nedávno vyvinutá mikrovlnná plazmová tryska s výbojem generovaným pomocí povrchové vlny umožňuje jedinečnou kombinaci výhod plošných systému DBD a vysokofrekvenčních trysek. Mikrovlnná energie, která je přiváděna do plazmatu, se šíří podél povrchu plazmatu na delší vzdálenost a umožňuje tak prodloužení aktivní výbojové zóny na vzdálenost několika centimetrů směrem dolů po proudu plynu od rezonátoru. Díky prodloužení aktivní zóny výboje je tedy možná lokální interakce plazmatu s povrchem.

3.2 Mikrovlnné plazma buzené povrchovou vlnou

Mechanismus tohoto buzení plazmatu spočívá v tom, že vzniklá elektromagnetická vlna se pohybuje na rozhraní plazma – dielektrikum. Respektive během šíření elektromagnetické vlny elektrony získávají energii z povrchové vlny a využívají ji pro ionizaci a excitaci neutrálních atomů a iontů. Vzhledem k tomu, jak tyto elektrony absorbují tento druh energie, pohybují se směrem dolů ve sloupci plazmatu. Výsledkem je změna hustoty plazmatu a hustoty ostatních částic, které se pohybují v axiálním směru. Což má za následek, že plazma je nehomogenní.

3.3 Schéma aparatury

Celkové schéma aparatury je znázorněno na obrázku 11.



Obrázek 11 Schéma experimentu: 1 – regulátory hmotnostního průtoku; 2 – křemenné kapiláry; 3 – surfatronový rezonátor; 4 – MW-anténa; 5 – MW-koaxiální kabel; 6 – hliníková odrazová mřížka; 7 – proud plazmatu; 8 – černé plátno (pro zamezení výskytu jiných aktivních částic); 9 – křemenné čočky; 10 – žlutý optický filtr (volitelný); 11 – xyz – optický pohyblivý jezdec; 12 – optické vlákno [29]

3.4 Přístroje ke měření

3.4.1 Mikrovlnný výboj

V tomto experimentu byl jako zdroj plazmatu využíván mikrovlnný výboj. Tento výboj pracoval při relativně nízkém výkonu (25 W) a s frekvencí 2,45 GHz. Zdroj byl propojen se surfatronovým rezonátorem pomocí koaxiálního kabelu. Rezonátor byl neustále chlazen průtokem vody (5 l/min při 20 °C).

3.4.2 Odrazová hliníková destička

Dále byla v experimentální části využívána odrazová hliníková destička. Důvodem této aplikace bylo zvýšit počet fotonů, které byly emitované plazmatem. A další výhodou byla taková, že hliníková destička odrážela elektromagnetické vlny.

3.4.3 Křemenná kapilára

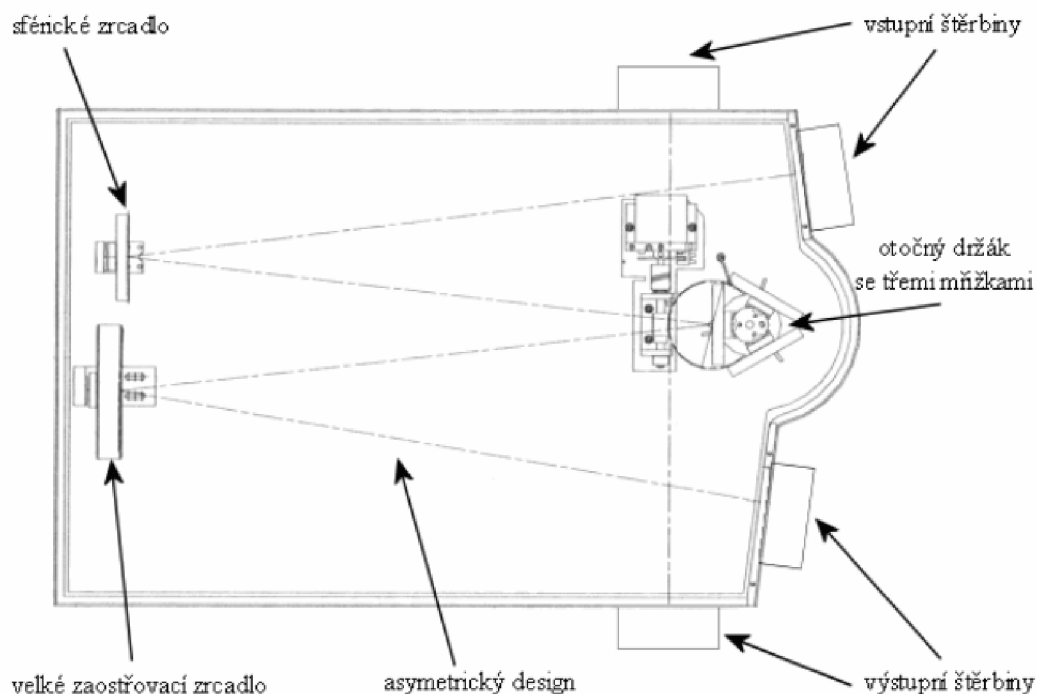
Výboj byl vytvořen v křemenné kapiláře o délce cca 15 cm, vnitřním průměru 2,5 mm a vnějším průměru 4 mm, přičemž konec kapiláry byl 1 mm od konce hliníkové destičky. Do křemenné kapiláry proudil argon, jehož čistota byla 99,996 % a proudil konstantním průtokem 3 Slm. Průtok argonu byl řízen regulátorem hmotnostního průtoku Omega FMA-A2408. V rámci bakalářské práce byl argon obohacen příměsí kyslíku, jehož čistota byla 99,95 %. Průtok kyslíku byl postupně přidáván od 0,00 Slm do 0,05 Slm a řízen regulátorem hmotnostního průtoku Bronkhorst FMA 201.

3.4.4 Optická emisní spektrometrie

Pro diagnostiku plazmatu byla použita optická emisní spektrometrie. Záření, které bylo vyzařováno výbojem, bylo zaměřeno na křemennou čočku, která měla průměr 25 mm a její ohnisková vzdálenost byla 35 mm. Záření přiváděné do spektrometru zajišťoval optický kabel, který byl zhotoven z křemenného skla. Pomocí tohoto kabelu bylo přiváděno záření (v podobě emitovaných fotonů) do spektrometru TRIAX 550.

Výsledné emitované záření bylo snímáno v různém rozmezí vlnových délek pro námi zvolené částice. Mezi tyto částice patřili excitované atomy argonu či dusíku nebo hydroxylové či kyslíkové radikály a oxidy dusíku.

Optický kabel byl umístěn na pohyblivém jezdcí, který byl nainstalován vertikálně a pohyboval se ve směru proudu plynů, tedy shora dolů.



Obrázek 12 Schéma optického emisního spektrometru TRIAX 550 [30]



Obrázek 13 Skutečný pohled na optický emisní spektrometr TRIAX 550 [30]

Následně byla data vyhodnocena v podobě spektrografů pomocí optického emisního spektrometru a zpracována v programu Microsoft Excel. Dále bylo určeno rozdělení vybraných aktivních částic, a v neposlední řadě také parametry plazmatu, jako jsou teploty (rotační, vibrační a elektronové) podél osy trysky.

3.4.5 Použité mřížky pro stanovení jednotlivých spekter

Během tohoto měření byly použity dvě různé mřížky pro měření spektrálních čar a samotných spekter. Mřížka 3600 gr/mm, která byla použita pro rozsah 150 až 450 nm, byla použita pro měření dusíku a jeho oxidů a hydroxylových radikálů. Pro zjištění spektra argonu a kyslíku byla použita mřížka 1200 g/mm.

Rotační a vibrační teploty byly určeny pomocí Boltzmannové grafické metody. Teplota elektronů byla následně vypočítána z integrálních intenzit spektrálních čar argonu (603,21; 667,73; 675,28; 687,13 a 714,70 nm) za použití konstant, které byly uvedeny v NIST [31].

4 VÝSLEDKY A DISKUZE

Ve spektru molekulového dusíku byly identifikovány tři spektrální systémy:

- a) První pozitivní systém ($N_2 (B \ ^3\Pi_g) \rightarrow N_2 (A \ ^3\Sigma_u^+)$) v rozsahu vlnových délek 660,5 až 665,2 nm kvůli tomu, abychom zabránili překrytí spektrálních čar dusíku se spektrálními čarami argonu.
- b) První negativní systém ($N_2^+ (B \ ^2\Sigma_g^+) \rightarrow N_2^+ (X \ ^2\Sigma_u^+)$), pás 0–0. Intenzita hlavy tohoto pásu byla při vlnové délce 391,4 nm.
- c) Druhý pozitivní systém ($N_2 (C \ ^3\Pi_u) \rightarrow N_2 (B \ ^3\Pi_g)$) v rozsahu 360–381 nm z důvodu potřeby výpočtu vibrační teploty. Navíc z pásu 0–2 byla počítána rotační teplota.

Ve spektru molekuly oxidu dusnatého byly identifikovány dva spektrální systémy:

- a) Gamma systém NO, pás 0–2, jehož integrální intenzita byla v rozsahu vlnových délek 244,5 až 248,0 nm.
- b) Beta systém NO, pás 0–11, jehož vlnová délka byla 378,9 nm.

Spektrum hydroxylových iontů bylo charakterizováno pomocí záření systému OH (A→X), pás 0–0 v rozsahu vlnových délek 306,0 až 310,8 nm. Navíc tento systém se použil i pro výpočet rotační teploty.

Spektrum kyslíku bylo měřeno v rozsahu vlnových délek 750–850 nm, kde se vyskytuje triplet okolo 777 nm (777,19 nm, 777,45 nm, 777,54 nm) a nerozlišený triplet při 844,7 nm.

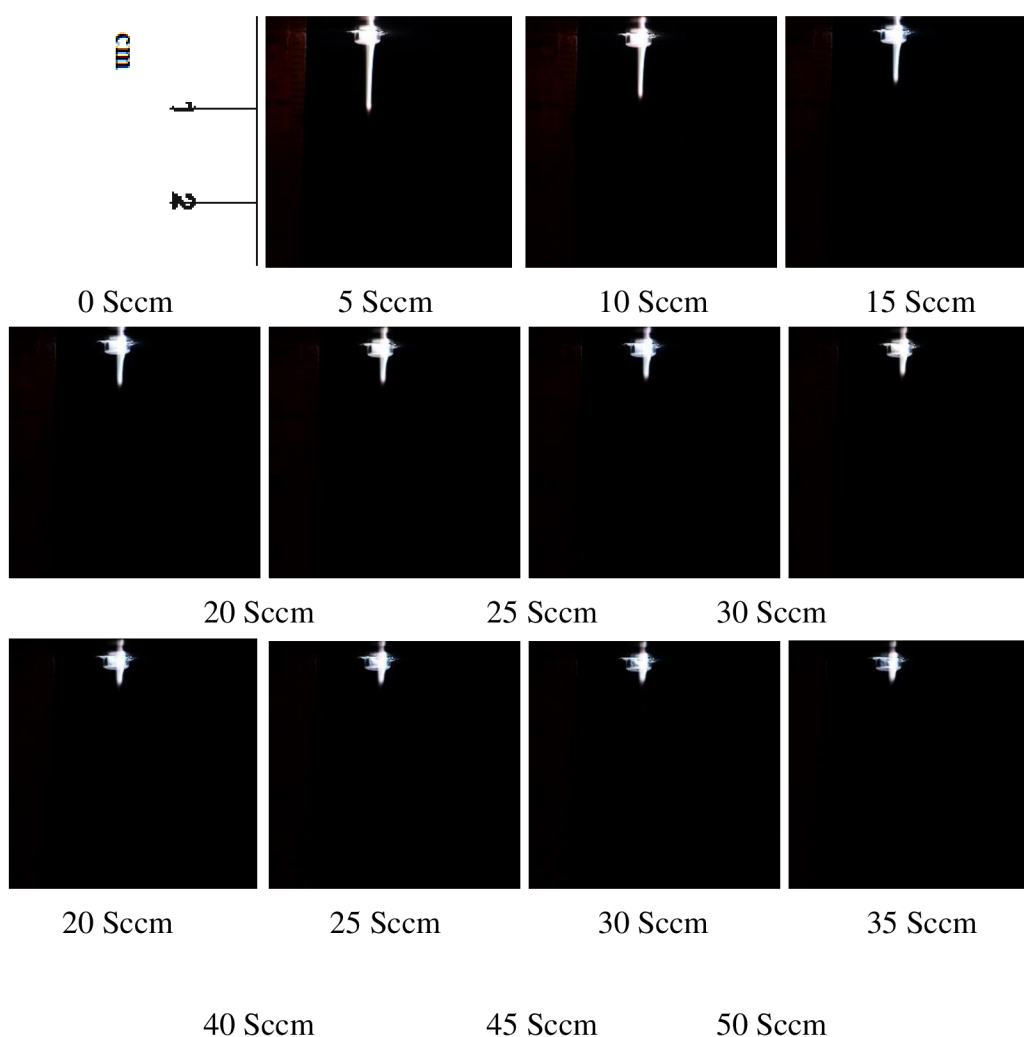
Spektrum argonu bylo měřeno při dané vlnové délce, která byla 772,4 nm. Na této vlnové délce se vyskytovala spektrální čára argonu. Navíc pomocí spektrálních čar argonu byla vypočítána elektronová teplota.

4.1 Vizuální pozorování

V rámci experimentu bylo první fází vizuální pozorování plazmové trysky v závislosti na velikosti příměsi. Snímky byly pořízeny fotoaparátem (Nikon D7500 s AF-S Micro NIKKOR 85 mm 1:3,5 G ED makroobjektiv). Doba expozice 1/100 s byla použita pro zachycení aktivního výboje. Doba expozice 1 s byla použita pro vizualizaci dohasínajícího výboje.

Fotografie aktivního výboje

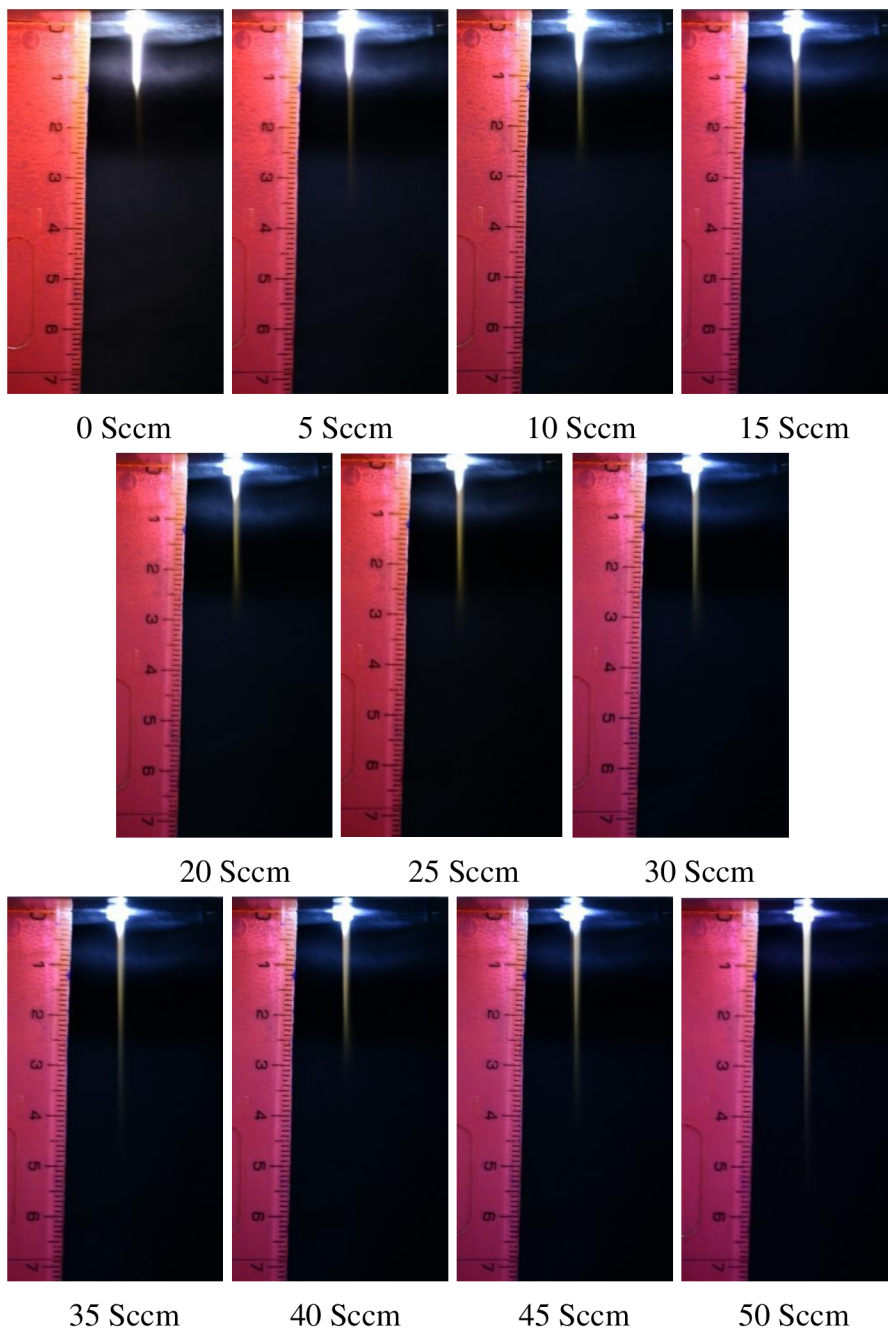
Na těchto snímcích (viz Obrázek 14) můžeme vidět, jak se postupným přidáváním příměsi kyslíku zkracovala aktivní délka výboje.



Obrázek 14 Fotografie aktivního výboje s postupným přidáváním příměsi kyslíku

Fotografie dohasínajícího výboje

Na fotografiích (viz Obrázek 15) můžeme zaznamenat viditelnou délku po výboji, která je závislá na koncentraci příměsi kyslíku.



Obrázek 15 Fotografie dohasínajícího výboje s postupným přidáváním příměsi kyslíku

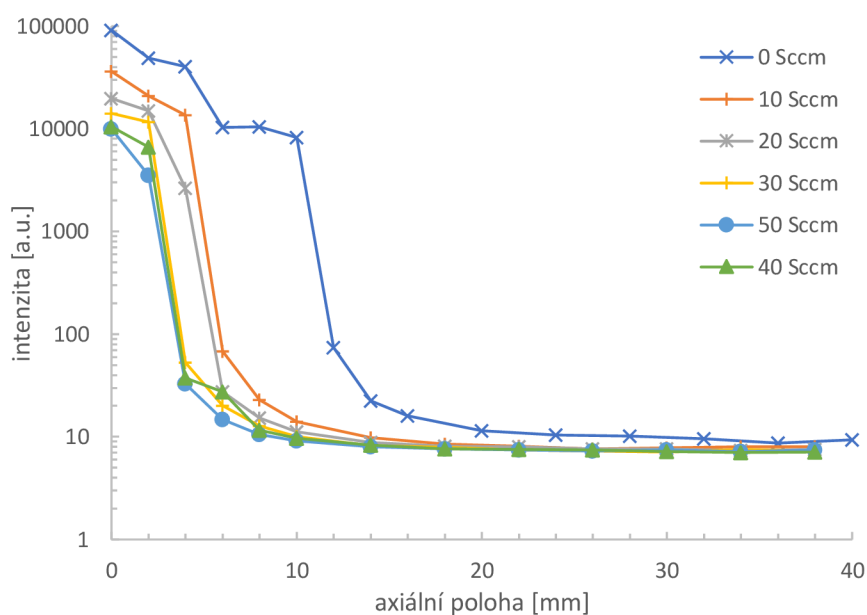
Na těchto fotografiích můžeme pozorovat, že délka dohasínání výboje roste v závislosti na koncentraci příměsi a je mnohem delší než v aktivním výboji, který se naopak, jak již bylo uvedeno, zkracuje. Přitom tato vzdálenost v neaktivní části výboje má mnohem důležitější předpoklady pro aplikace. Zejména se může uplatnit při jemném ošetření biologických materiálů.

4.2 Rozdělení aktivních částic

Pro vybrané atomární spektrální čáry a molekulové pásy bylo stanoveno rozdělení jejich intenzit podél osy výboje v závislosti na velikosti příměsí kyslíku ve výboji.

Argon

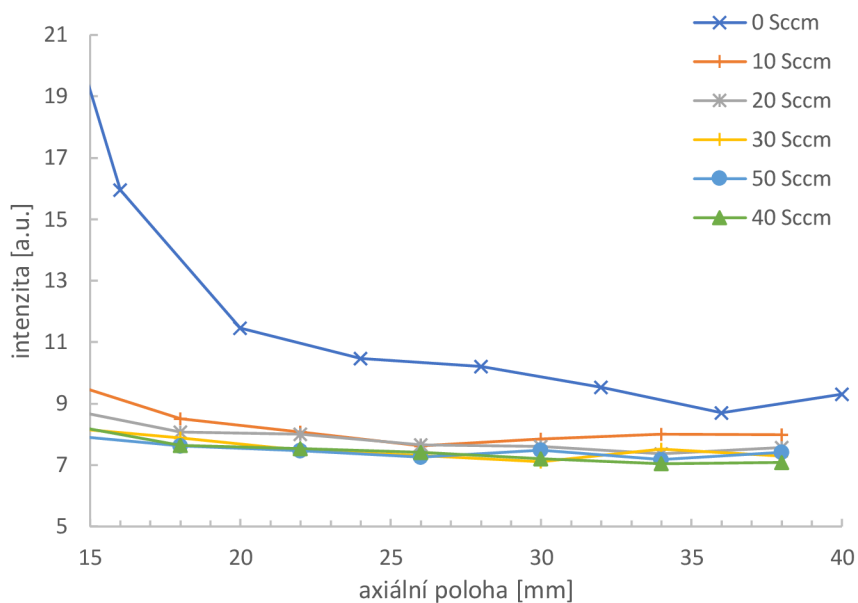
Nerozlišené spektrální čáry neutrálního argonu $2[3/2]^0 \rightarrow 2[3/2]$ při vlnové délce 772,38 nm a $2[1/2]^0 \rightarrow 2[1/2]$ při vlnové délce 772,42 nm byly zvoleny jako zástupci nosného plynu. Závislost intenzity na poloze od konce křemenné kapiláry podél osy je znázorněna v následujícím grafu (viz Obrázek 16).



Obrázek 16 Závislost intenzity nerozlišených spektrálních čar argonu $2[3/2]^0 \rightarrow 2[3/2]$ při vlnové délce 772,38 nm a $2[1/2]^0 \rightarrow 2[1/2]$ při vlnové délce 772,42 nm podél osy výboje při daných průtocích příměsí kyslíku.

Na obrázku 16 vidíme, že výboj postupně klesá a končí, jak je uvedeno na fotografiích (viz Obrázek 14). V grafu se projevuje zkrácení aktivního výboje, respektive v aktivním výboji klesá intenzita argonu. Tento jev je způsoben tím, že do čistého argonu přidáváme příměs kyslíku. Samotný argon potřebuje k excitaci dostatečně rychlé elektrony, ale po přidání příměsí (kyslíku), se objeví molekuly, které mají nižší excitační energie. Tyto molekuly jsou schopny přebrat energii od elektronů, tím pádem ji ztratí dříve a nejsou schopny ji urychlit tak, aby byl argon excitován.

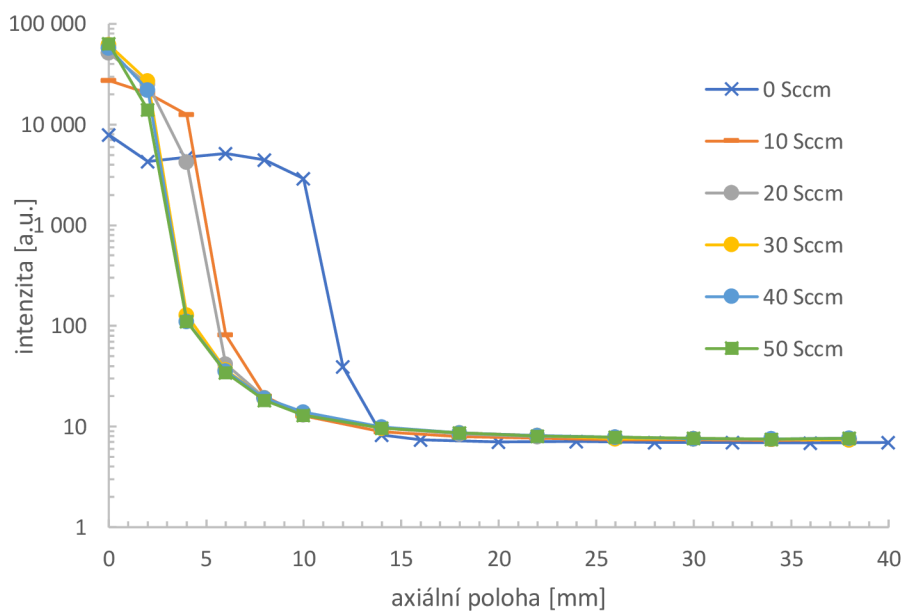
V následujícím grafu (viz Obrázek 17) je zobrazena také závislost intenzity argonu, s tím rozdílem, že graf je zaměřen na dohasínání výboje.



Obrázek 17 Přibližná předchozí závislost (viz Obrázek 17), respektive dohasínající část výboje

Kyslík

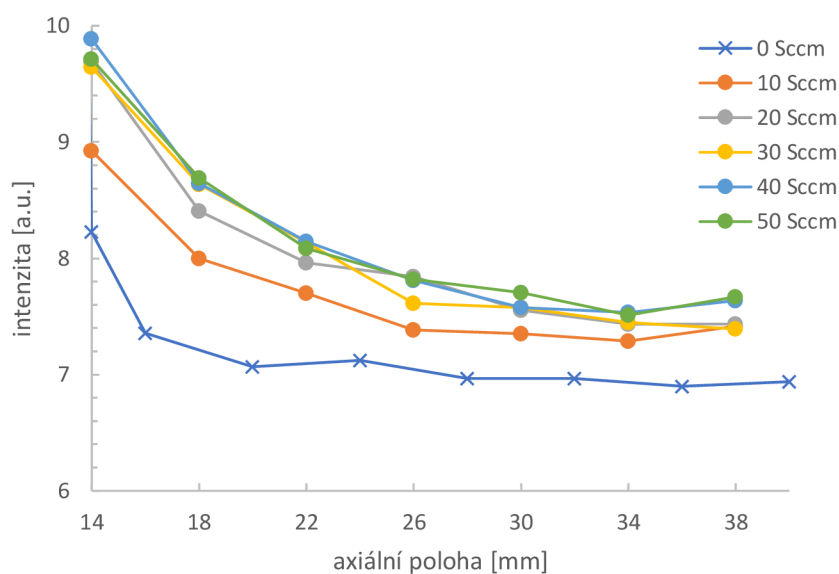
Profil intenzity čáry neutrálního kyslíku ${}^5S^0 \rightarrow {}^5P$ je znázorněn v následujícím grafu (viz Obrázek 19). První spektrální čára tripletu byla při vlnové délce 777,19 nm. Protože nejintenzivnější byla právě první spektrální čára tripletu, je její závislost uvedena na obrázku 18. Závislost intenzity kyslíku podél osy výboje druhé a třetí spektrální čáry tripletu je uvedena v příloze.



Obrázek 18 Závislost intenzity první spektrální čáry neutrálního kyslíku ${}^5S^0 \rightarrow {}^5P$ při vlnové délce 777,19 nm podél osy výboje při daných průtocích příměsí kyslíku.

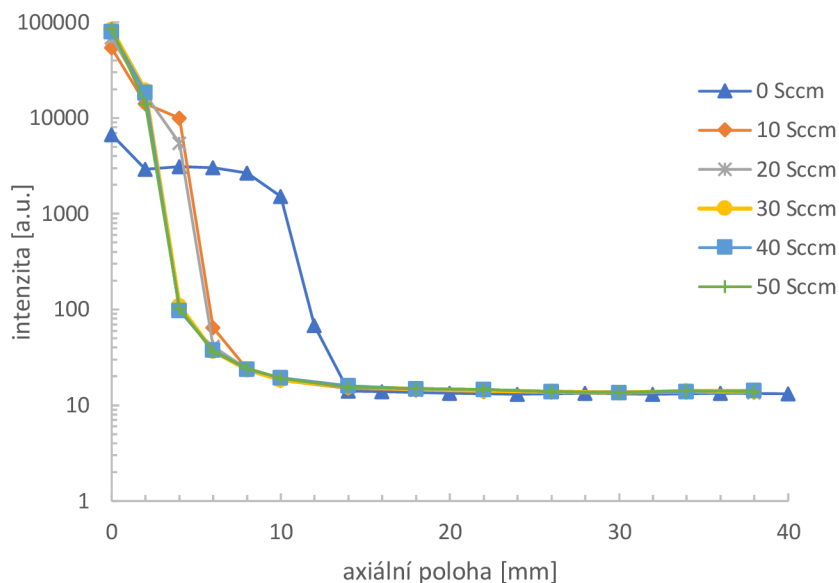
Na obrázku 18 je znázorněna závislost intenzity kyslíku podél osy výboje. V grafu si můžeme povšimnout, že intenzita kyslíku neklesá v aktivním výboji příliš prudce, naopak má celkem konstantní průběh. Tento konstantní průběh je způsoben tím, že do výboje vstupuje kyslík z okolního vzduchu, který interaguje s výbojem, tím pádem jeho koncentrace se zvyšuje a zároveň jeho intenzita postupně slábne podél osy výboje. Dalším faktem, kterého si můžeme povšimnout, je že intenzita kyslíku, oproti intenzitě argonu, s rostoucí příměsí roste.

V následujícím grafu (viz Obrázek 19) je zobrazena závislost intenzity kyslíku, respektive dohasínání výboje.

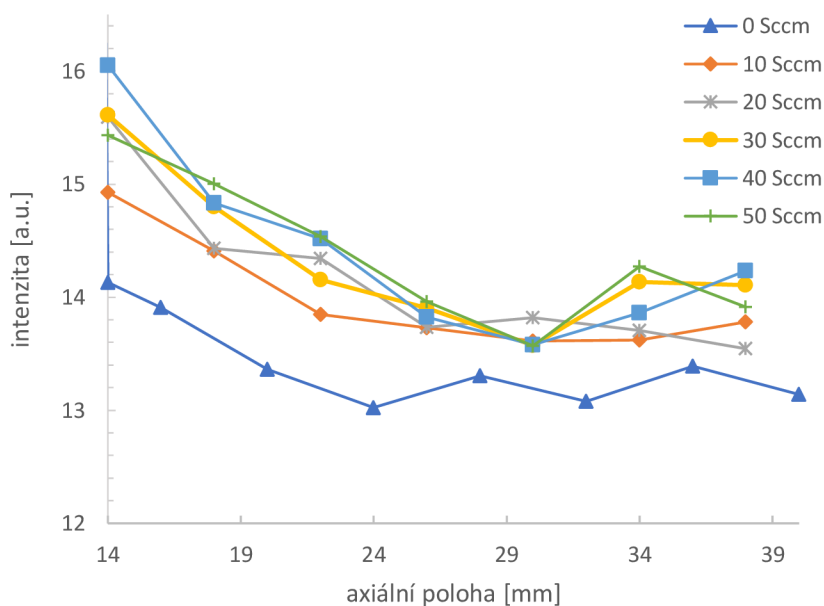


Obrázek 19 Přibližná předchozí závislost (viz Obrázek 19), respektive dohasínající část výboje.

Podobné výsledky můžeme pozorovat také při vlnové délce 844 nm. V této vlnové délce se nachází nerozlišený triplet kyslíku. Přesněji řečeno tento triplet se nachází v rozmezí 844,6–844,7 nm. V následujícím grafu (viz Obrázek 20) je zobrazena závislost intenzity nerozlišeného tripletu kyslíku podél osy výboje při daných příměsí kyslíku.



Obrázek 20 Závislost intenzity nerozlišeného tripletu kyslíku, který se nacházel při vlnové délce 844 nm podél osy výboje při daných průtocích příměsí kyslíku.

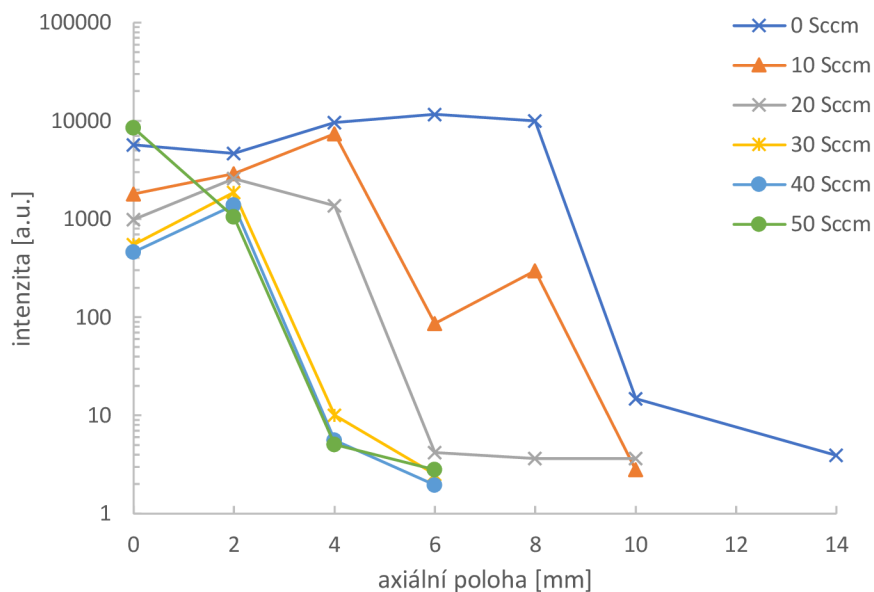


Obrázek 21 Přibližná předchozí závislost (viz Obrázek 20), respektive dohasínající část výboje

Dusík

Dusík lze detekovat pouze v aktivním výboji. V průběhu aktivního výboje je intenzita dusíku konstantní, protože dusík vstupuje do výboje z okolní atmosféry a zároveň samotný výboj slábne podél osy.

Intenzita dusíku byla zjištěna pomocí druhého pozitivního systému ($\text{N}_2(\text{C}^3\Pi_u) \rightarrow \text{N}_2(\text{B}^3\Pi_g)$). Hlava pásu byla 0–2 byl při vlnové délce 380 nm.



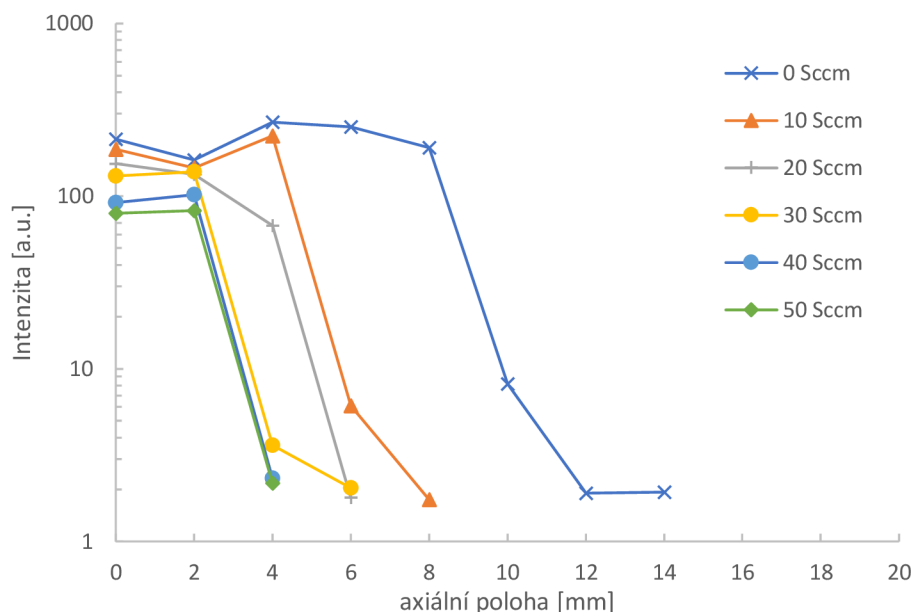
Obrázek 22 Závislost intenzity dusíku, který byl detekován druhým pozitivním systémem ($N_2(C^3\Pi_u) \rightarrow N_2(B^3\Pi_g)$), podél osy výboje při daných průtocích příměsí kyslíku. Nacházel se v pásu 0–2 při vlnové délce 380 nm.

Na obrázku 22 si můžeme povšimnout, že jeho intenzita výrazně klesá. Tento jev je způsoben tím, že jeho intenzita klesá společně s intenzitou argonu, který je důležitý pro excitaci dusíku.

Iont dusíku

Iont dusíku je jediná iontová částice, která byla stanovována. Tato částice dokáže určit celkovou koncentraci elektronů.

Pro detekci tohoto iontu byl použit první pozitivní systém ($N_2^+(B^2\Sigma_g^+) \rightarrow N_2^+(X^2\Sigma_u^+)$), který se nacházel v hlavě pásu 0–0 při vlnové délce 391,4 nm. V následujícím grafu (viz Obrázek 23) je zobrazena závislost intenzity dusíku podél osy výboje.



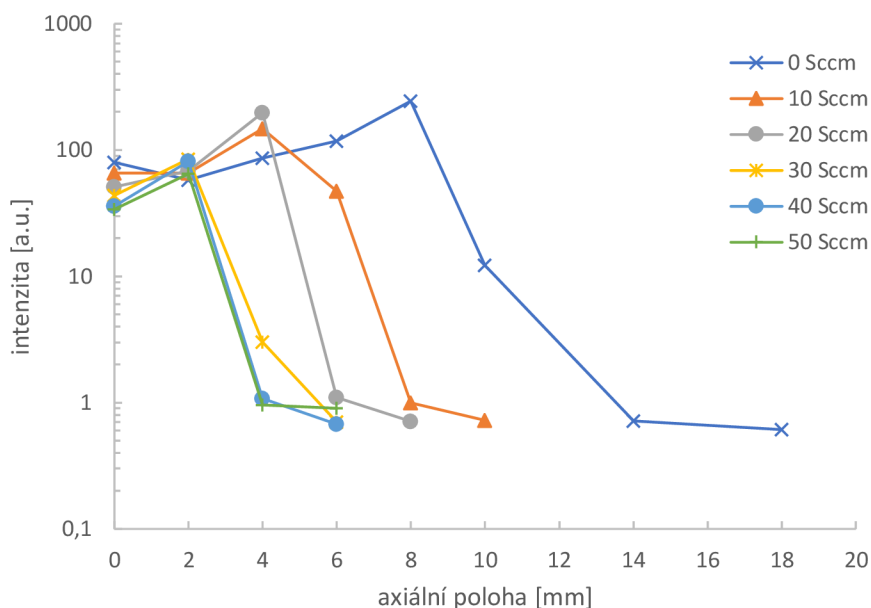
Obrázek 23 Závislost intenzity dusíku, který byl detekován prvním pozitivním systémem ($N_2^+ (B^2\Sigma_g^+) \rightarrow N_2^+ (X^2\Sigma_u^+)$), podél osy výboje při daných průtocích příměsí kyslíku. Nacházel se v pásu 0–0 při vlnové délce 650 nm.

Z obrázku 23 je patrné, že jeho intenzita je v aktivní části výboje konstantní. Díky kvazineutralitě víme, že tato jediná iontová částice odráží celkový počet elektronů. Protože je tato závislost celkem konstantní, víme, že i koncentrace elektronů se výrazně nemění.

Oxid dusnatý

Molekuly oxidu dusnatého vznikaly spojením atomárního dusíku a kyslíku v čistém argonu. Molekuly dusíku a kyslíku se musely nejprve v plazmatu disociovat, aby vytvořily molekulu oxidu dusnatého. Oba molekulární atomy byly ve vzduchu a mohly interagovat s výbojem. Kyslík byl navíc přidáván do výboje v podobě příměsí, takže hned od začátku byl ve výboji atomární kyslík. Jediné, co chybělo k vytvoření molekuly oxidu dusnatého, bylo disociovat dusík. Vzhledem k tomu, že dusík má větší disociační energii než kyslík, tak intenzita této molekuly klesala společně s příměsí.

Oxid dusnatý byl určen pomocí NO^+ systému ($NO (A^2\Sigma^+) \rightarrow NO (X^2\Pi)$), který se nacházel v hlavě pásu 0–0. Závislost intenzity oxidu dusnatého podél osy výboje je zobrazena v následujícím grafu (obrázek 24).

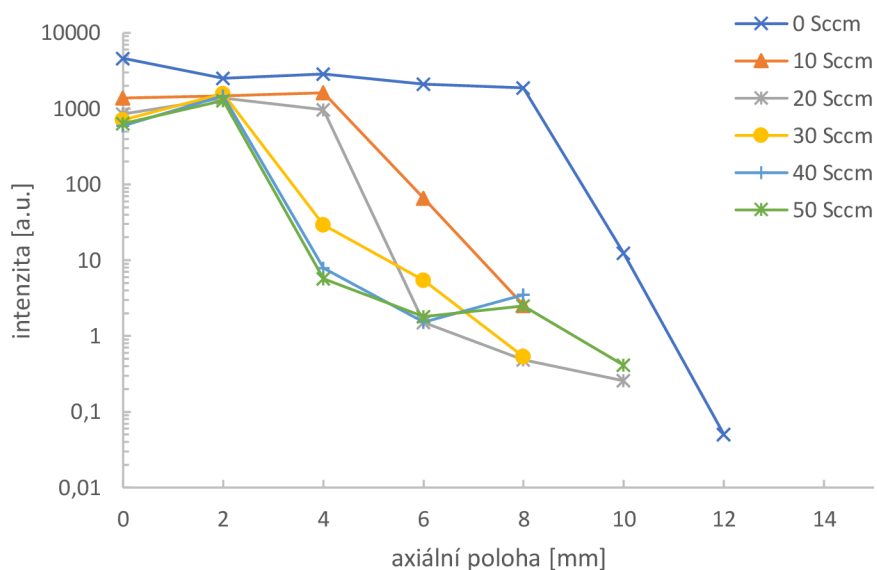


Obrázek 24 Závislost intenzity oxidu dusnatého, který byl detekován gama systémem ($NO (A^2\Sigma^+) \rightarrow NO (X^2\Pi)$), podél osy výboje při daných průtocích příměsí kyslíku. Nacházel se v pásu 0–0 při vlnové délce 247,9 nm.

Hydroxylový radikál

Poslední detekovanou částicí byl hydroxylový radikál. Tento radikál byl určen pomocí systému ($OH (A^2\Sigma) \rightarrow OH (X^2\Pi)$), který se nacházel v hlavě pásu 0–0 v rozsahu vlnových délek 306,0 až 310,8 nm

Jeho vznik byl způsoben spojením atomárního kyslíku a vodíku. Atomární kyslík je ve výboji hned ze začátku, díky tomu, že je součástí příměsí. K vytvoření hydroxylového radikálu bylo potřeba disociovat vodík, aby mohl reagovat s kyslíkem.



Obrázek 25 Závislost intenzity hydroxylových radikálů ($OH (A^2\Sigma) \rightarrow OH (X^2\Pi)$), podél osy výboje při daných průtocích příměsí kyslíku. Nacházel se v pásu 0–0.

Na obrázku 25 si můžeme všimnout, že pokles intenzity v aktivní části výboje není tak prudký. To je způsobeno tím, že z jedné molekuly vodní páry mohou díky přítomnosti atomárního kyslíku vzniknout dva hydroxylové radikály. Díky krátké době životnosti tohoto radikálu (desítky nanosekund) nejsou vidět v dohasínání výboje. Z toho vyplývá, že hydroxylový radikál rychle zaniká.

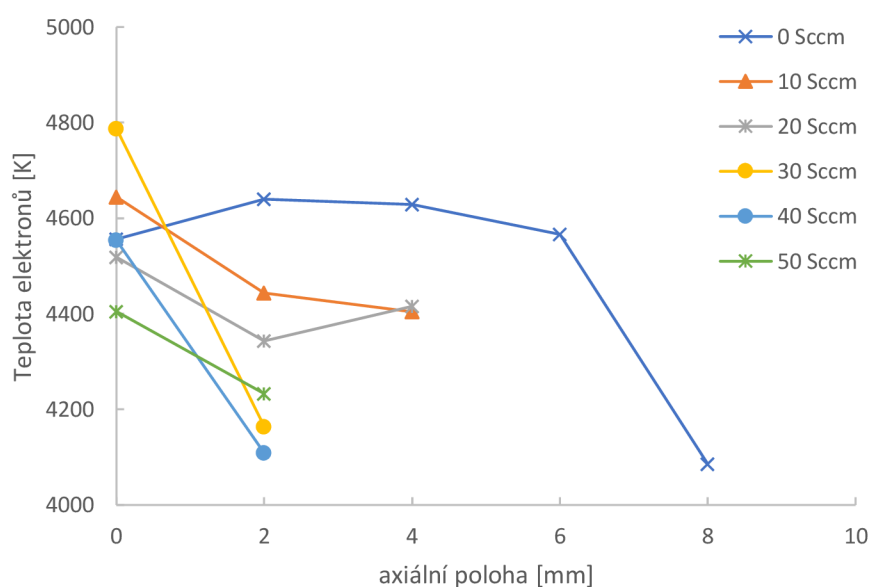
Díky reakci hydroxylového radikálu společně s oxidem dusnatým vzniká peroxyinitril, ze kterého následnou reakcí vzniká peroxyinitrilová kyselina, která má silné sterilizační účinky.

4.3 Distribuce parametrů plazmatu

Na základě naměřených optických emisních spekter byly vypočteny vybrané parametry plazmatu. Mezi tyto parametry patří teplota elektronů, rotační a vibrační teploty.

Teplota elektronů

Teplota elektronů byla vypočítána Boltzmannovou grafickou metodou, za využití intenzity spektrálních čar argonu. Tento výpočet byl možný pouze pro aktivním výboji, protože v dohasínající části výboje byly intenzity spektrálních čar. Výsledky jsou zobrazeny v následujícím grafu.

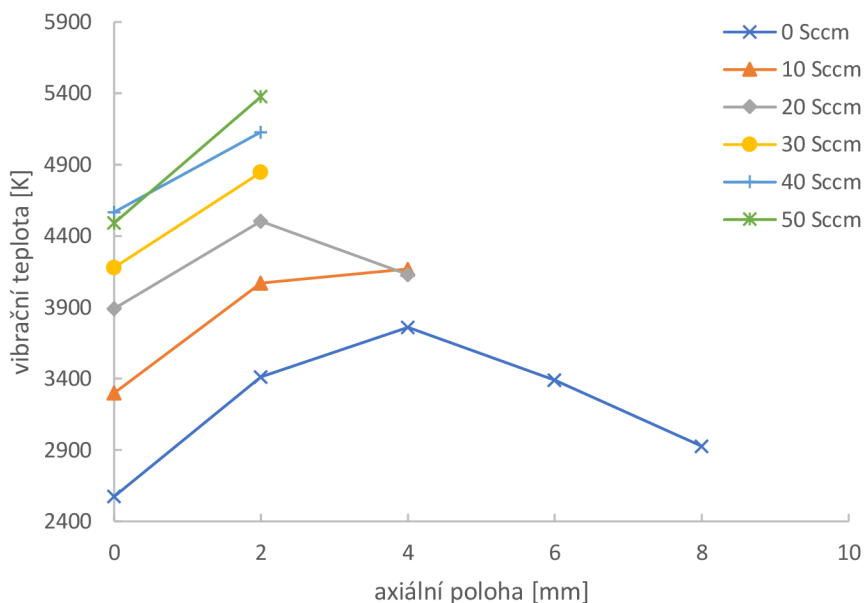


Obrázek 26 Teplota elektronů byla vypočítána z intenzit spektrálních čar argonu v závislosti na průtocích příměsí kyslíku. V grafu je zobrazena závislost teploty elektronů na průtocích příměsí kyslíku. Experimentální chyba, která se pohybovala kolem 250 K nebyla zahrnuta kvůli přehlednosti do grafu.

Z obrázku 26 je patrné, že teplota elektronů klesala podél osy výboje a pohybovala se kolem 4500 K.

Vibrační teplota

Vibrační teplota byla získána pomocí druhého negativního systému dusíku. Příčinu zvyšování vibrační teploty nemůžeme momentálně určit. V následujícím grafu můžeme vidět závislost vibrační teploty podél osy výboje.

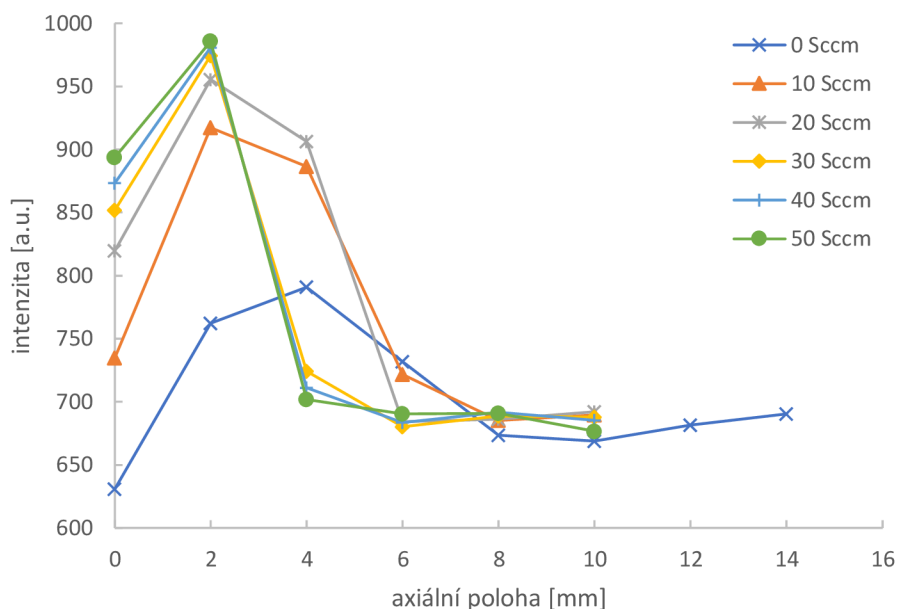


Obrázek 27 Vibrační teplota byla získána z intenzity dusíku, který byl určen druhým pozitivním systémem. V grafu je zobrazena závislost vibrační teploty na průtocích příměsí kyslíku. Experimentální chyba se pohybovala okolo 100 K, kvůli přehlednosti nebyla zahrnuta do grafu.

Na obrázku 27 můžeme vidět, že díky přiváděnému kyslíku, který byl ve směsi argonu, docházelo v každém případě ke zvýšení vibrační teploty, která při nejvyšších průtocích přesahovala 5500 K. Tato teplota by neměla dosahovat této velikosti, protože by mohla mít negativní vliv na biologické objekty.

Rotační teplota

Rotační teplota byla zjištěna pomocí intenzity nejnižší rotační čáry hydroxylového radikálu, který se nacházel v pásu 0–0. V následujícím grafu je zobrazena závislost rotační teploty podél osy výboje.



Obrázek 28 Rotační teplota byla vypočítána ze spektrálních čar hydroxylového radikálu, pomocí systému OH ($A \rightarrow X$), který se nacházel v pásu 0–0. V grafu je zobrazena závislost rotační teploty na průtocích příměsí kyslíku. Experimentální chyba se pohybovala okolo 80 K, kvůli přehlednosti nebyla zahrnuta do grafu.

Z obrázku 28 vyplývá, že rotační teplota roste společně s příměsí kyslíku. Důvodem může být ubývání vysokoenergetických elektronů, kdy pak naopak přibývá koncentrace nízkoenergetických elektronů. Tato teplota by neměla být tak vysoká, protože poté má negativní účinky na biologické objekty.

5 ZÁVĚR

Cílem práce bylo prostudovat aktivní částice, které byly generované nízkoteplotním plazmatem ve směsi argonu s kyslíkem. Zkoumané aktivní částice byly hydroxylové radikály, radikály oxidů dusíku, excitovaných molekul dusíku, atomárního dusíku, argonu a kyslíku. Experimentální výsledky byly získány pomocí optické emisní spektroskopie. Byl využit mikrovlnný výboj, který budil elektromagnetickou vlnu dodávající energii elektronům. Tato energie byla nadále použita k ionizaci a excitaci neutrálních atomů a iontů. Spektra byla snímána v aktivní a dohasínající části výboje v rozsahu vlnové délky, která byla specifická pro zkoumanou aktivní částici.

Zvoleným zástupcem nosného plynu byl argon. Z vytvořené závislosti intenzity záření excitovaného atomu argonu na koncentraci příměsi (a částečně i z pořízených fotografií) bylo zjištěno, že díky příměsi kyslíku byla ovlivněna jak aktivní, tak i dohasínající část výboje.

Přidaná příměs kyslíku vedla ke změně rozdělení aktivních částic. Bylo zaznamenáno zvýšení intenzity záření hydroxylového radikálu. Toto zvýšení bylo způsobeno právě příměsí kyslíku, kde byl atomární kyslík přítomen v počátku výboje. Dva atomární vodíky vznikly disociací vody. Díky těmto vytvořeným částicím pak mohly vznikat hydroxylové radikály. Oproti tomu byla snížena intenzita záření radikálu oxidu dusnatého, kde byl atomární dusík získán z okolního vzduchu. Interakcí hydroxylového radikálu a radikálu oxidu dusnatého vzniká peroxynitril. Následujícími reakcemi může vznikat peroxynitrilová kyselina, která má silné sterilizační účinky. Na základě stanovení přítomnosti aktivních částic byly určeny vybrané parametry samotného plazmatu. Mezi tyto parametry patří teplota elektronů, rotační a vibrační teplota.

V takto vytvořeném plazmatu může být pozorováno ultrafialové záření, elektrické pole, reaktivní formy kyslíku (ozon) i dusíku, které vedou protizánětlivé a antimikrobiální účinky.

Všechny zkoumané aktivní částice jsou velmi důležité při léčbě plazmatem. Hlavním důvodem jsou jejich sterilizační a proliferační účinky. Díky kombinaci těchto účinků by se mohlo plazma využívat při hojení ran. Choroboplodné zárodky by byly usmrceny sterilizací a proliferace by podpořila růst nových buněk.

6 POUŽITÉ REFERENCE

- [1] MARTIŠOVITŠ, Viktor, 2006. Základy fyziky plazmy: učebný text pre magisterské štúdium. Bratislava: Vydavateľstvo UK. ISBN 80-223-1983-X.
- [2] BENOVA, Evgenia, Mariana ATANASOVA, Todor BOGDANOV, Plamena MARINOVA, Frantisek KRCMA, Vera MAZANKOVA a Lukas DOSTAL, 2016. Microwave Plasma Torch at a Water Surface. Plasma Medicine. 6(1), 59-65. DOI: 10.1615/PlasmaMed.2016015862. ISSN 1947-5764. Dostupné také z: <http://www.dl.begellhouse.com/journals/5a5b4a3d419387fb,2cf1e1a94009b3e1,47feca8a1e434cea.htm>
- [3] EMMERT, Steffen, Franziska BREHMER, Holger HÄNßLE, et al., 2013. Atmospheric pressure plasma in dermatology: Ulcus treatment and much more: Clinical Plasma Medicine, Volume 1, Issue 1. 24-29. ISSN 2212-8166.
- [4] von WODTKE, Th., S. REUTER, K. MASUR a K.-D. WELTMANN, Plasmas for medicine [online]. 291-320 [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157313001634>
- [5] OPVK-Plazmochemie-Historický vývoj v oblasti fyziky plazmatu [online], [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/plazmochemie/PCH_01.pdf
- [6] WOEDTKE, Th. von, S. REUTER, K. MASUR a K.-D. WELTMANN, 2013. Plasmas for medicine: Physics Reports[online]. 530(4), 291-320 [cit. 2018-04-24]. ISSN 0370-1573.
- [7] SCHOLTZ, V., Nízkotepelná plazma I: Čo je to. Aldebaran bulletin [online]. 2012(12) [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2012_22_pla.php
- [8] BO, Jiang, Zheng JINGTANG, Qiu SHI, Wu MINGBO, Zhang QINHUI, Yan ZIFENG a Xue QINGZHONG, Reriew on electrical discharge plasma technology for wastewater remediation. Chemical Engineering Journal [online]. 236, 348-368 [cit. 2018-04-24]. ISSN 1358-8947. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2013.09.090>

- [9] Masarykova univerzita: Studenti experimentovali v kosmické agentuře [online], 15. listopadu 2013 [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <https://www.online.muni.cz/veda-a-vyzkum/3995-studenti-uz-podruhe-experimentovali-v-kosmicke-agenture>
- [10] KHUN, 2012. Nízkoteplotní plazma IV-doutnavý výboj. Aldebaran bulletin [online]. (42) [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2012_22_pla.php
- [11] IVANA, Bc. Ivana, 2009. Vliv mikrovlnného plazmatu vzduchu na smáčivost povrchů syntetických polymerů. Zlín. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. [cit. 2017-05-11]
Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/13850/kupsk%C3%A1_2010_dp.pdf?sequence=1
- [12] BENOVA, E.; MARINOVA, P.; ZHEKOVA, M.; ATANASOVA, M.; BOGDANOV, T.; TOPALOVA, Y.; TODOROVA, Y.; YOTINOV, I.; MAZÁNKOVÁ, V.; KRČMA, F. Microwave Argon Plasma for Water Treatment. ICPL Book of Abstracts. Praha: Ústav fyziky plazmatu, 2017. s. 35-35. ISBN: 978-80-87026-0-6
- [13] BRUGGEMAN, P J, M J KUSHNER, B R LOCKE, et al., 2016. Beneficial effect of gaseous nitric oxide on the healing of skin wounds. Plasma Sources Science and Technology. 25(5), 210-219. DOI: 10.1088/0963-0252/25/5/053002. ISSN 1361-6595. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1089860305000340>
- [14] DOBRYNIN, Danil, Gregory FRIDMAN, Gary FRIEDMAN a Alexander FRIDMAN, 2009. Physical and biological mechanisms of direct plasma interaction with living tissue. New Journal of Physics. 11(11), 115020-. DOI: 10.1088/1367-2630/11/11/115020. ISSN 1367-2630. Dostupné také z: <http://stacks.iop.org/1367-2630/11/i=11/a=115020?key=crossref.518f10daf4439017689fe0b7141d1c29>
- [15] YANG, H., R. LU, Y. XIAN, L. GAN, X. LU, X. YANG, BAREKZI a RAZAVI, 2015. Effects of atmospheric pressure cold plasma on human hepatocarcinoma cell and its 5-fluorouracil resistant cell line. Physics of Plasmas. 22(12), 122006-. DOI: 10.1063/1.4933405. ISSN 1070-664X. Dostupné také z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4933405>
- [16] MOHADES, LAROUSI, SEARS, BAREKZI a RAZAVI, 2015. Evaluation of the effects of a plasma activated medium on cancer cells. Physics of Plasmas. 22(12), 122001-. DOI: 10.1063/1.4933367. ISSN 1070 - 664X. Dostupné také z: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4933367>

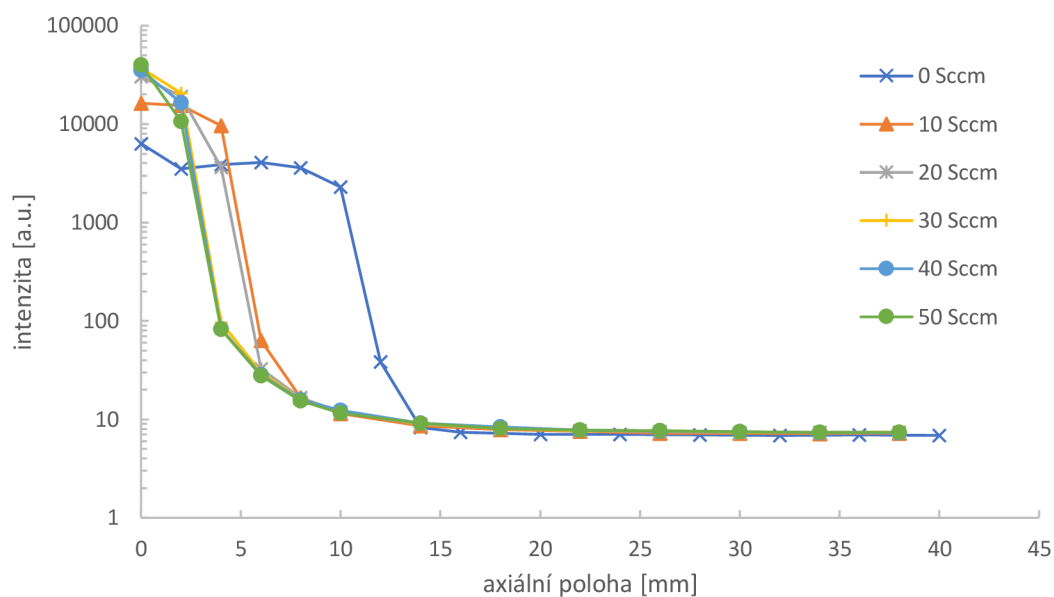
- [17] VANIN, Anatoly F., SHEKHTER, SEREZHENKOV, RUDENKO, PEKSHEV a VANIN, 2005. Beneficial effect of gaseous nitric oxide on the healing of skin wounds. *Nitric Oxide*. 12(4), 210-219. DOI: 10.1016/j.niox.2005.03.004. ISSN 10898603. Dostupné také z:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1089860305000340>
- [18] CHERUTHAZHEKATT, Sadiqali, Mirko ČERNÁK, Pavel SLAVÍČEK a Josef HAVEL, 2010. Gas plasmas and plasma modified materials in medicine. *Journal of Applied Biomedicine*. 8(2), 55-66. DOI: 10.2478/v10136-009-0013-9. ISSN 1214021X. Dostupné také z:
<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1214021X14600107>
- [19] VYBÍHALOVÁ, Bc. Jana, 2009. Sterilizace v dohasínajícím plazmatu. Brno. Diplomová práce. Masarykova univerzita.
- [20] MAROUŠEK, Bc. Rostislav, 2014. Plazma pro biomedicínské a ekologické aplikace. České Budějovice. Diplomová práce. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích.
- [21] Využití plazmatu pro sterilizaci [online], 2012. Brno [cit. 2018-03-28]. Dostupné z:
https://is.muni.cz/th/175183/prif_b/MASARYKOVA_UNIVERZITA_V_BRNE.pdf. Diplomová práce. Masarykova univerzita.
- [22] UV záření a jeho vliv na zdraví, 2009. *HYGIENA*. 54(2), 57-61. Dostupné z:
<http://apps.szu.cz/svi/hygiena/archiv/h2009-2-05-full.pdf>
- [23] VOHLÍDAL, J. a kol., 1982. *Chemické tabulky*. Praha: SNTL.
- [24] TONKYN, R.G., J. WINNICZEK a M.G. WHITE, Rotationally resolved photoionization of O₂ near threshold. In: WINNICZEK, J. *Chem. Phys. Lett.* [online]. National Institute of Standards and Technology, 1989 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z:
<https://webbook.nist.gov/cgi/inchi?ID=C7782447&Mask=20>
- [25] TRICKL, T., E.F. CROMWELL, Y.T. LEE a A.H. KUNG, State-selective ionization of nitrogen in the X² = 0 and v = 1 states by two-color (1+1) photon excitation near threshold. In: WINNICZEK, J. *Chem. Phys. Lett.* [online]. National Institute of Standards and Technology, 1989 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z:
<https://webbook.nist.gov/cgi/inchi?ID=C7727379&Mask=20#ref-2>

- [26] SNOW, K.B. a T.F. THOMAS, Mass spectrum, ionization potential, and appearance potentials for fragment ions of sulfuric acid vapor. In: WINNICZEK, J. J. Chem. Phys.[online]. National Institute of Standards and Technology, 1988 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://webbook.nist.gov/cgi/formula?ID=C7732185&Mask=20&Units=CAL#ref-2>
- [27] KRČMA, F., O. SALYK, V. KUDERLE a Z. STARÁ, 2003. Praktikum z plazmochemie, návody k úlohám. Brno.
- [28] OPTICKÁ EMISNÍ SPEKTROSKOPIE DOHASÍNAJÍCÍHO DUSÍKOVÉHO PLAZMATU SE STOPOVOU PŘÍMĚSÍ KOVŮ [online], 2009. Brno [cit. 2018-04-24]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/5912/09-Bockov%C3%A11.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické.
- [29] KRCMA, Frantisek, Ivan TSONEV, Darina TRUCHLA, et al., 2018. Microwave micro torch generated in argon based mixtures for biomedical applications. Journal of physic D: Applied Physics. Article reference: JPhysD-117004.
- [30] BOCKOVÁ, Ivana, 2009. OPTICKÁ EMISNÍ SPEKTROSKOPIE DOHASÍNAJÍCÍHO DUSÍKOVÉHO PLAZMATU SE STOPOVOU PŘÍMĚSÍ KOVŮ. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [31] KRAMIDA, A., Yu RALCHENKO, J. READER a NIST ASD TEAM, 2018. Atomic Spectra Database (ver. 5.5.3): National Institute of Standards and Technology [online]. Gaithersburg, MD [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://physics.nist.gov/asd>

7 PŘÍLOHY

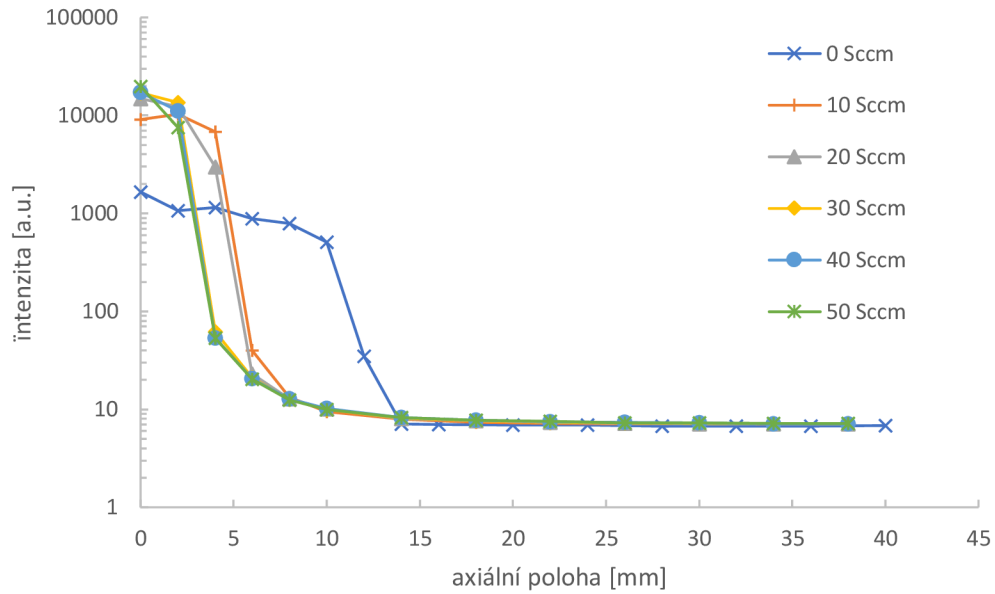
Kyslík

V příloze jsou uvedeny druhé a třetí spektrální čáry tripletu kyslíku. Tyto spektrální čáry se nachází při vlnových délkách 777,42 a 777,54 nm. V následujících grafech je znázorněna závislost intenzity atomárního kyslíku podél osy výboje při různých příměsí.



Obrázek 29 Závislost intenzity druhé spektrální čáry neutrálního kyslíku $^5S^0 \rightarrow ^5P$ při vlnové délce 777,42 nm podél osy výboje při daných průtocích příměsí kyslíku.

Z obrázku 29 je patrné, že s rostoucím množstvím příměsí se zvyšuje intenzita přibližně dvakrát a to v počátku aktivního výboje, respektive v jeho prvním bodě.



Obrázek 30 Závislost intenzity třetí spektrální čáry neutrálního kyslíku $5S^0 \rightarrow 5P$ při vlnové délce 777,54 nm podél osy výboje při daných průtocích příměsí kyslíku.

Z obou předchozích grafů (obrázek 20 a obrázek 21) je patrné, že intenzita kyslíku neklesá příliš prudce, ba naopak dosahuje konstantního průběhu. Tento konstantní průběh je způsoben tím, že do výboje vstupuje kyslík z okolního vzduchu. Ten poté interaguje s výbojem, a tím pádem se jeho koncentrace zvyšuje, a zároveň jeho intenzita postupně slábne podél osy výboje.