

MASARYKOVA UNIVERZITA

PEDAGOGICKÁ FAKULTA

Katedra fyziky, chemie a odborného vzdělávání



Elektrické výboje v plynech

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce

Mgr. Lukáš Pawera

Autor bakalářské práce

Martina Tunová

Brno 2015

Bibliografický záznam

TUNOVÁ, Martina. *Elektrické výboje v plynech : bakalářská práce*. Brno: Masarykova univerzita, Fakulta pedagogická, Katedra fyziky, chemie a odborného vzdělávání, 2015.
Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Lukáš Pawera.

Výboje v plynech

Martina Tunová

ANOTACE

Bakalářská práce se skládá ze dvou částí. První část je zaměřena na shrnutí základních fyzikálních poznatků o výbojích v plynech a jejich možném využití v praxi.

V druhé části je hlavním cílem návrh a konstrukce vlastního jednoduché aparatury pro vytvoření specifického bariérového výboje s možností modifikovat povrchy materiálů, případně analyzovat základní fyzikální parametry výboje za atmosférického tlaku. Dalším cílem je vytvoření výboje za sníženého tlaku pomocí spektrálních trubic i vytvoření vlastního zařízení s možností měření spekter plynů.

Klíčová slova: plazma, plazmatické výboje, spektrální trubice, modifikace

The discharge in gases

ANNOTATION

This bachelor work is composed of two parts. First part of the bachelor work is focused on basic physical findings about discharges and their usage in practice.

The design and construction of the simple device for making specific barrier discharges for modification of the material surface is main target of the second bachelor work and analyse of basic physic parameters of discharge during atmospheric pressure. Discharges making during vacuum by help of spectral tubes and self- making device for measuring of the gas spectral is another target of the bachelor work.

Key words: plasma, plasmatic discharge, spectral tubes, modification

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a použila jen prameny uvedené v seznamu literatury v souladu s Disciplinárním řádem pro studenty Pedagogické fakulty Masarykovy univerzity a se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů.

V Brně dne 25. 3. 2015

.....
Martina Tunová

Poděkování

Dovoluji si touto cestou poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Mgr. Lukáši Pawerovi za jeho odbornou pomoc při vypracování bakalářské práce, za cenné rady, nápady a připomínky nejen k textu práce a za jeho trpělivost, kterou projevil v experimentální části této bakalářské práce.

Také bych ráda poděkovala mému manželovi Ing. Jaroslavu Tunovi za pomoc při úpravách parametrů sestrojeného zařízení. Veliké díky pak patří mé nejbližší rodině za ohleduplnost a rovněž projevenou trpělivost při vypracování bakalářské práce.

OBSAH:

1	Úvod	8
2	Plazma	9
3	Elektrické výboje v plynech	10
3.1	Nesamostatný výboj	10
3.2	Samostatný výboj	11
3.2.1	Obloukový výboj	11
3.2.2	Jiskrový výboj, koróna	11
3.2.3	Doutnavý výboj	12
3.3	Bariérové výboje.....	13
3.3.1	Plošný výboj – SD	13
3.3.2	Objemový výboj – VD	14
3.3.3	Koplanární výboj – CD	15
4	Aplikace elektrických výbojů v plynech	16
4.1	Výbojková svítidla.....	16
4.1.1	Nízkotlaká.....	16
4.1.2	Vysokotlaká.....	16
4.2	Modifikace povrchu materiálu	17
4.2.1	Samočisticí materiály	17
	Hydrofilní, hydrofobní a superhydrofobní materiály	17
4.2.2	Nanášení tenkých vrstev	19
4.2.2.1	Metoda PVD	20
4.2.2.2	Metoda CVD	21
4.2.2.3	PECVD – plazmatem urychlená depozice.....	22
4.3	Využití plazmatu pro generování ozónu a ve zdravotnictví	22
5	Praktická část.....	24
5.1	Spektrální trubice.....	24
5.1.1	Ukázky spekter vybraných plynů	26
5.1.2	Vytvoření vlastního doutnavého výboje.....	31
5.2	Návrh a sestavení vlastního zařízení.....	34
5.2.1	Charakterizace elektrických parametrů zařízení a výboje.....	36
5.2.2	Doprovodné jevy při výboji.....	38

5.3	Modifikace povrchu vlastním výbojem.....	38
6	Závěr.....	41
	Literatura	42
	Seznam obrázků:.....	43
	Seznam příloh:	44

1 Úvod

Cílem této bakalářské práce je návrh a sestavení zařízení, které bude sloužit k vytvoření bariérového výboje, při němž se tvoří nízkoteplotní nerovnovážné plazma. Pomocí tohoto zařízení bude možné modifikovat povrch materiálů např. nanesením tenké vrstvy. Tímto způsobem je možné opracovat i materiály, které mají nízkou teplotu tání (polymery). Tenké vrstvy lze nanášet i jinými způsoby, ty jsou ale finančně náročné, protože většinou vyžadují vytvoření nízkých tlaků v okolí opracovávaného materiálu. Při modifikaci povrchu takto upravené povrchy pak změni své vlastnosti – dřevo se může stát výrazně hydrofobním/hydrofilním materiálem. Při bariérovém výboji vzniká jedovatý ozón. Tyto tříatomové molekuly kyslíku mají široké spektrum využití nejen v lékařství. Zařízení, které vytváří bariérový výboj, může sloužit jako zdroj ozónu, jenž by musel být odsáván a hromaděn v jiné nádobě, aby pak mohlo dojít k jeho využití. Rovněž generované nízkoteplotní plazma má celou škálu možností využití, kromě již zmiňovaného působení na povrchy materiálů.

2 Plazma

Až 99% látek vyskytujících se ve vesmíru je tvořeno plazmatem. Například sluneční těleso při své teplotě přibližně 6000 K vytváří rovnovážné plazma. Při interakci elektronů s atmosférou dochází k ionizaci molekul plynů v atmosféře a vzniká plazma, které vnímáme jako jev označovaný názvem polární záře. Dalším příkladem přirozeně se vyskytujícího plazmatu u nás na Zemi je oheň (nízkoteplotní nerovnovážné plazma) nebo blesk (vysokoteplotní rovnovážné plazma).

Při některých druzích samostatného výboje bývá stupeň ionizace plynu poměrně vysoký. Pak plyn, který se nachází v silně ionizovaném stavu za podmínky, že celkový náboj elektronů a iontů je v každém elementárním objemu roven (nebo velmi blízký) nule, nazýváme plazmatem. Právě vlastnost, že prostorový náboj elektronů a iontů je roven nule se nazývá kvazineutralita. O tomto silně ionizovaném plynu – plazmatu - také říkáme, že se jedná o tzv. čtvrté skupenství látek. [7]

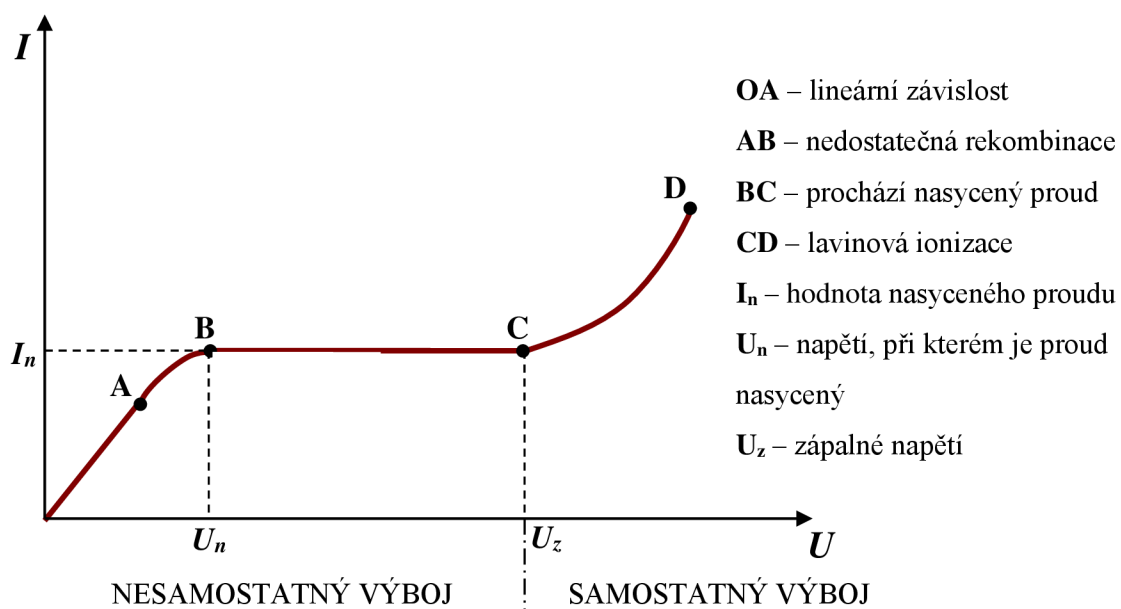
Plazma dělíme na vysokoteplotní a nízkoteplotní. Je-li ionizace plynu jen částečná, pak se plyn splňující výše popsanou podmínku nazývá nízkoteplotní plazma. To vzniká například ve výbojkách. Čím vyšší je teplota výboje, tím více atomů ionizuje a vzniká vysokoteplotní plazma.

Dále můžeme plazma dělit na izotermické a neizotermické. V izotermickém plazmatu platí, že všechny částice, které toto plazma tvoří, mají stejnou teplotu. U neizotermického plazmatu teplota elektronů převyšuje teplotu ostatních částic. Vznik jednoho nebo druhého druhu závisí především na způsobu, jakým byla plazmatu dodávána energie. Izotermicita bývá obvykle spojena s vysokou teplotou plazmatu, není to ale podmínkou. Platí však, že neizotermické plazma v přírodě samovolně zaniká, musí se tedy udržovat uměle. [9]

Plazma je charakterizované lineárními a plošnými útvary, které jsou u sebe drženy vlastním magnetickým polem. Nabité částice, které tvoří plazma, jednak rotují kolem magnetických siločar a jednak driftují napříč magnetickým polem. V plazmatu tedy existuje vysoké množství módů vlnění, tedy plazma výrazně ovlivňuje i šíření elektromagnetických vln. [5]

3 Elektrické výboje v plynech

Obecně se rozumí pod pojmem elektrický proud usměrněný pohyb volných, elektricky nabitých částic (v kovech je tento tok zajištěn elektrony, v elektrolytech pak ionty). Protože plyny jsou tvořeny neutrálními molekulami, je vedení proudu podmíněno ionizováním těchto molekul dodáním energie. Je-li tento zdroj energie odstraněn, dochází k rekombinaci iontů zpátky na neutrální molekuly. Pokud se stane, že ionizace převyšuje rekombinaci, začne se lavinově zvyšovat vodivost plynu. Základní druhy výbojů v plynech rozdělené podle Volt-Ampérové charakteristiky jsou znázorněny na obr. 1.



Obr. 1 Volt-Ampérová charakteristika

3.1 Nesamostatný výboj

Jedná se o výboj, kterého dosáhneme dodáním ionizační energie, ale po odstranění tohoto zdroje převyšuje rekombinace ionizaci a výboj tedy vymizí.

Chování nesamostatného výboje se dá pozorovat na elektrickém obvodu, který je přerušen ionizační komorou (ve své podstatě se jedná o kondenzátor izolovaný od okolního prostředí). V této komoře je umístěn plyn, který lze ionizovat dodáním energie (např. tepelné). Pokud energii přestaneme dodávat, výboj zaniká.

3.2 Samostatný výboj

Pokud dojde k lavinovité ionizaci (zvýšením napětí na hodnotu tzv. zápalného napětí), pak i přes nepřítomnost zdroje ionizační energie probíhá v plynech výboj, který se nazývá samostatný. Podle velikosti hodnoty tlaku daného plynu pak může mít samostatný výboj různý charakter.

Charakter samostatného výboje v plynech závisí na chemickém složení plynu, jeho teplotě a tlaku, na kvalitě elektrod a jejich vzájemné vzdálenosti a na dalších parametrech vnějšího obvodu [5].

3.2.1 Obloukový výboj

Jestliže k sobě přiblížíme dvě uhlíkové elektrody a připojíme k nim stejnosměrné napětí o velikosti asi 40 V, pak se v místě dotyku konce elektrod zahřejí vlivem průchodu proudu na vysokou teplotu (~3500 °C), a po následném oddálení vzniká mezi hroty elektrod elektrický oblouk, neboli obloukový výboj [8]. Vysoká teplota obloukového výboje se používá při obloukovém svařování kovů

3.2.2 Jiskrový výboj, koróna

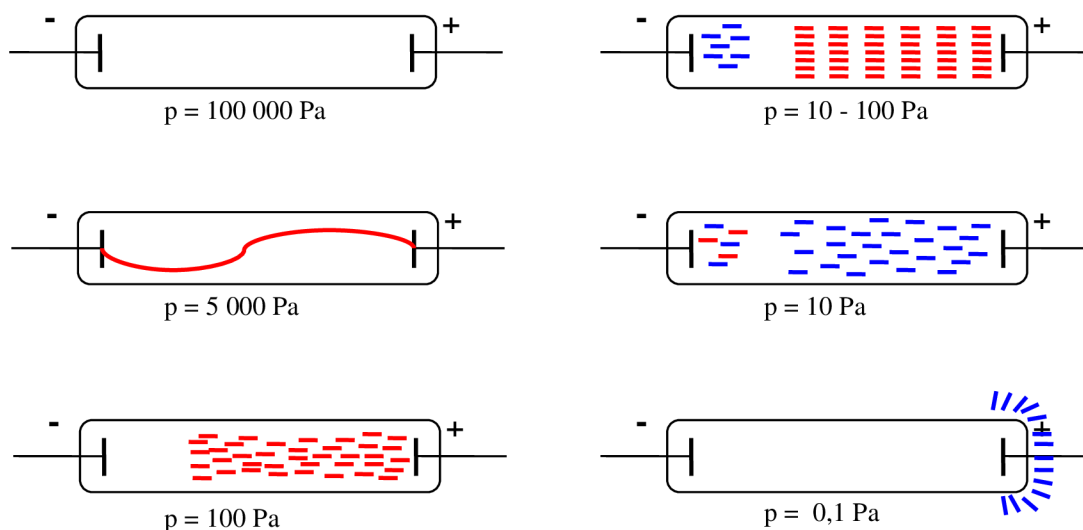
Jiskrový výboj vzniká tehdy, když intenzita elektrického pole dosáhne kritické hodnoty. Projevem jiskrového výboje je vznik svítícího kanálu, například blesku. Blesk může mít délku až 10 km, průměr vodivého kanálu se pohybuje kolem 0,4 m, teplota je kolem 50 000 K a doba trvání výboje desetina milisekundy.

Pokud má alespoň jedna z elektrod, mezi kterými vzniká jiskrový výboj, malý poloměr křivosti vznikne koróna. Ta ale při zvyšování napětí přejde v obloukový nebo poté i jiskrový výboj [7].

3.2.3 Doutnavý výboj

Doutnavý výboj vzniká ve zředěném plynu při sníženém tlaku (za atmosférického nelze), přibližně při hodnotě $6,6 \cdot 10^2$ Pa. Při nižších tlacích je doba mezi jednotlivými srážkami elektronů s molekulami plynu delší než při podmínkách za atmosférického tlaku. Dojde k vytvoření vhodnějších podmínek pro vznik samostatného výboje – elektron získá mezi srážkami vyšší rychlost, větší kinetickou energii, se kterou narazí do molekuly zředěného plynu. Při deexcitaci elektronů do základních stavů dochází k vyzařování fotonů. [5]

Na obr. 2 je pak znázorněn doutnavý výboj pro různé hodnoty tlaků.



Obr. 2 Doutnavý výboj

3.3 Bariérové výboje

Teplý (nebariérový) výboj vznikne, pokud k sobě přiblížíme kovové elektrody napojené na zdroj stejnosměrného proudu. Pokud mezi elektrodami dojde k dostatečné ionizaci plynu (vysoké napětí), elektrony emitované z katody interagují s molekulami přítomného plynu. Vysoké zahřívání plynu je důsledkem přeměny kinetické energie pohybujících se částic. Teplota těžkých částic (kationtů) a lehkých částic (elektronů) je stejná, vzniká tedy vysokoteplotní (10^4 K) rovnovážné plazma.

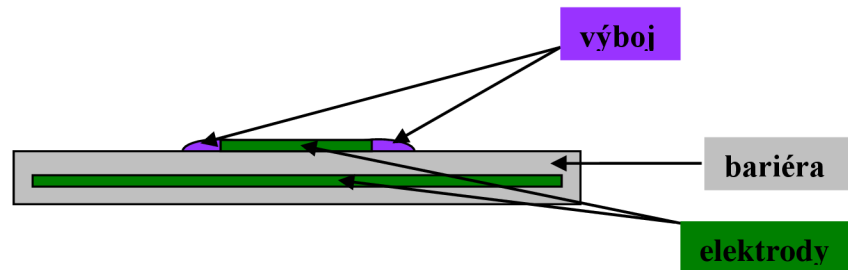
Vložíme-li mezi kovové elektrody dielektrickou bariéru, dojde k omezení průchodu nabitých částic mezi elektrodami a zároveň se sníží intenzita elektrického pole mezi elektrodami. Opět dochází k interakci elektronů s molekulami přítomného plynu mezi elektrodami. Tyto elektrony putují k anodě, na které ovšem kvůli bariéře nevyraží další elektrony z anody, tudíž dochází k ulpívání elektronů na povrchu bariéry do té doby, než se elektrický potenciál na obou elektrodách vyrovná a dojde k vyhasnutí výboje. Kdybychom použili jako zdroj napětí stejnosměrné, nedošlo by k opětovnému zapálení elektrického výboje. Bariéru můžeme umístit jednak na jednu elektrodu nebo na obě anebo ji můžeme umístit mezi elektrody. Jako dielektrikum se nejčastěji používá keramika (např. korund - Al_2O_3 , použitý v praktické části mé bakalářské práce) z důvodu svých vhodných dielektrických vlastností. Dielektrická pevnost je pro korund udávána v rozmezí $(10-35) \cdot 10^6 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1}$ a relativní permitivita 9,0 – 10,1. Další důležitou vlastností pro výběr dielektrika je vysoká homogenita materiálu a nízká tepelná vodivost. Dané požadavky splňuje korund, křemičité sklo nebo polymerní materiály. Napětí mezi elektrodami může být v rozsahu 1 – 100kV a frekvencí řádu kHz. Podle uspořádání elektrod rozlišujeme základní druhy bariérových výbojů - povrchový (surface discharge), objemový (volume discharge) a koplanární (coplanar discharge) výboj.

3.3.1 Plošný výboj – SD

Elektrodotový systém povrchového bariérového výboje je tvořen planární elektrodou, která je pokryta dielektrikem. Druhá elektroda je umístěna z druhé strany dielektrika a může mít prakticky jakýkoli tvar, nejčastěji se setkáváme s elektrodou ve formě pásku,

válečku, kruhu atd. Tohoto typu výboje bylo poprvé použito roku 1983 Japoncem Matsudou pro vytvoření generátoru ozónu s vyšší účinností. [1]

Protože výsledné plazma se tvoří na povrchu, nedotýká se elektrod a nedochází tak rychle k opotřebení elektrod. Uspořádání plošného výboje je na obr. 3.



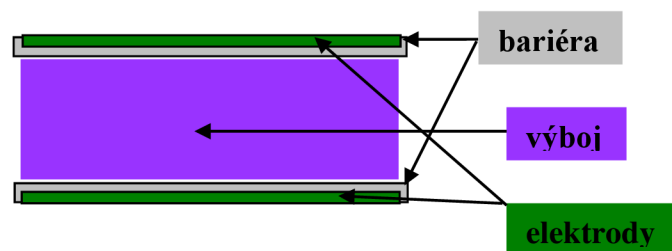
Obr. 3 Plošný výboj

3.3.2 Objemový výboj – VD

Objemový výboj vzniká mezi dvěma elektrodami, které mají bariéru umístěnou buď na svém povrchu (ať už na jedné nebo na obou elektrodách) nebo je mezi nimi.

Generované plazma tvoří filamentární výboje, které vznikají v celém mezelektrodevém prostoru. Výbojové filamenty mají orientaci kolmou na rovinu dielektrika a jejich počet narůstá se zvětšováním budícího napětí. Vytvořené plazma se nachází v nehomogenním stavu [1].

Uspořádání objemového výboje je na obr. 4.

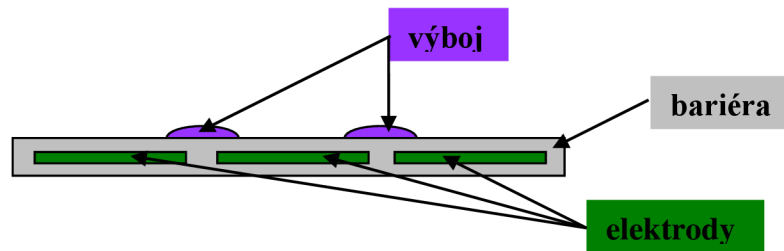


Obr. 4 Objemový výboj s bariérou na obou elektrodách

3.3.3 Koplanární výboj – CD

Elektrody tvoří tenké pásky stejných rozměrů, které jsou pokryté dielektrickou vrstvou. Na povrchu dielektrika se vytvoří krátké mikrovýbojové kanálky, jejichž počet je úměrný napětí. Délka kanálu je konstantní a je určena šířkou a vzdáleností elektrod. [1]

Uspořádání koplanárního výboje je na obr. 5.



Obr. 5 Koplanární výboj

4 Aplikace elektrických výbojů v plynech

4.1 Výbojková svítidla

Výbojková svítidla fungují buď na principu doutnavého výboje, který je podrobněji popsán v kapitole 12.2.3, nebo existují výbojky pracující na principu obloukového výboje (vysokotlaké výbojky). Sodíkové výbojky, které vydávají intenzivní žluté světlo, se používají například pro osvětlení veřejných prostor, protože se jedná o jedno z nejúčinnějších zdrojů umělého osvětlení (36%). [5]

4.1.1 Nízkotlaká

Nízkotlaká výbojková svítidla zahrnují tři typy svítidel: zářivku, neonku a doutnavku. Zářivka je nízkotlaká rtuťová výbojka, skládá se ze skleněné trubice, která je naplněna zředěným argonem a rtuťovými parami. Vnitřní stěny trubice jsou pokryty luminoforem, protože zářivka produkuje světlo převážně v ultrafialové oblasti. Pokud připojíme zářivku přímo na síťové napětí, tak se zářivka hned nerozsvítí (zápalné napětí zářivky je vyšší než napětí v síti). Pro zapálení výboje v zářivce, je nutné připojit do obvodu speciální startovací obvod, který dokáže vytvořit dostatečně vysoké zápalné napětí.[8]

U doutnavky není potřeba speciálního startovacího obvodu, protože je konstrukčně řešena tak, že funguje už i při napětí 70V (zkoušečky). Mezi elektrodami září pouze katodové světlo.

4.1.2 Vysokotlaká

Jedná se o světelné zdroje s provozním tlakem v rozmezí $3 \cdot 10^3 - 60 \cdot 10^3 \text{ Pa}$. Měrný výkon těchto výbojek dosahuje hodnoty až $200 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$. Při rostoucím tlaku par ve výbojce vzniká silné spojitě záření. Při dodržování provozních podmínek dosahuje životnost výbojek 16 000 – 30 000 hodin.¹

¹ DVOŘÁČEK, Vladimír: *Světelné zdroje – vysokotlaké sodíkové výbojky*. [2009], [cit. 2015-22-03].
Dostupné na World Wide Web www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39197.pdf

4.2 Modifikace povrchu materiálu

Povrch je citlivou částí materiálu, protože se nachází na rozhraní dvou fyzikálně odlišných prostředí. Povrch se dá definovat do tloušťky řádu nanometrů a jeho vlastnosti dokáží ovlivnit chování materiálu jako celku.

Modifikací povrchu materiálu rozumíme změnu fyzikálních a chemických vlastností daného povrchu materiálu, jakou jsou například odolnost proti korozi, tvrdost, odolnost proti opotřebení nebo samočisticí funkce materiálu. Některé vlastnosti samočisticích materiálů a samotná podstata této vlastnosti je popsána v následující kapitole.

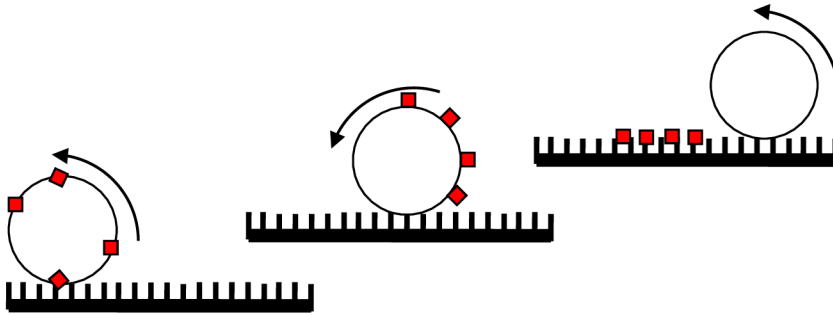
4.2.1 Samočisticí materiály

Základním předpokladem pro samočisticí funkci materiálu je, aby nedocházelo k ulpívání nečistot. Pokud už dojde k ulpění nečistoty, musí také dojít i k odbourání této nečistoty za pomoci chemických procesů. Povrch materiálu by tedy měl splňovat alespoň jeden ze dvou základních požadavků. Těmi jsou nesmáčivost povrchu (hydrofobita) a schopnost povrchu odbourávat nečistoty.

Hydrofilní, hydrofobní a superhydrofobní materiály

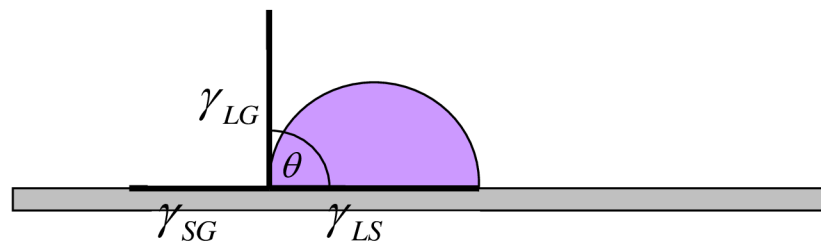
Hydrofilita a hydrofobita jsou základními vlastnostmi povrchu. Udávají míru jeho smáčivosti. Molekuly takového materiálu energeticky výhodně interagují s molekulami vody pomocí chemických vazeb a vytváří vodíkové můstky. Naopak hydrofobní stav povrchu znamená, že tento povrch silně odpuzuje vodu a ostatní nečistoty. Základním požadavkem povrchu s takovou vlastností je nízká povrchová energie materiálu a vysoká drsnost povrchu nebo mikro-nanostrukturální povrchový reliéf. Tento reliéf je znázorněn na obr. 6.

Jeden z nejznámějších příkladů takového povrchu můžeme nalézt v přírodě v podobě lotosového listu. Lotosové listy jsou známé pro svoji nesmáčivost a samočisticí schopnost díky své nízké povrchové energii a stupňovitě rozvrstvenému povrchu listu. Pod názvem „Lotosový efekt“ je tento samočisticí fenomén znám. Hydrofobita je umocněna i povlakem vosku na lotosovém listu. [6]



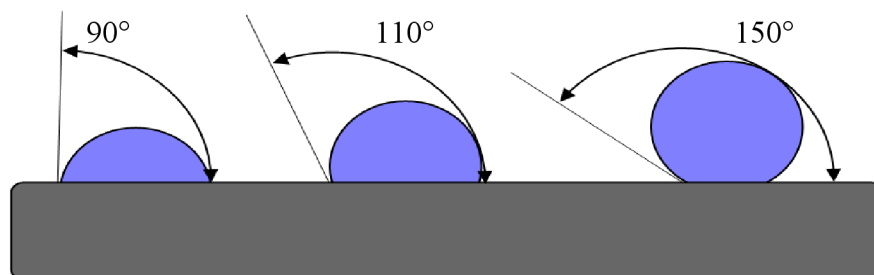
Obr. 6 Povrchový reliéf hydrofobního materiálu

Míra smáčivosti povrchu je dána kontaktním úhlem kapky vody a povrchu. Kontaktní úhel mezi povrchem a kapalinou závisí na povrchovém napětí vyskytujícím se na rozhraní a platí pro něj tento vztah: $\cos \theta = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}}$, kde γ_{LS} představuje povrchové napětí na rozhraní kapalina/pevná látka, γ_{SG} rozhraní pevná látka/plyn a γ_{LG} rozhraní kapalina/plyn, což je znázorněno na obr. 7. [4]



Obr. 7 Povrchové napětí na rozhraní kapaliny

Hydrofilní povrch je takový povrch, jehož kontaktní úhel je menší než 90° . Hydrofobní povrch je charakterizován kontaktním úhlem větším než 90° a superhydrofobní povrch je charakterizován úhlem větším než 150° . Příklady určitých hodnot kontaktních úhlů jsou na obr. 8. [13]



Obr. 8 Kontaktní úhly

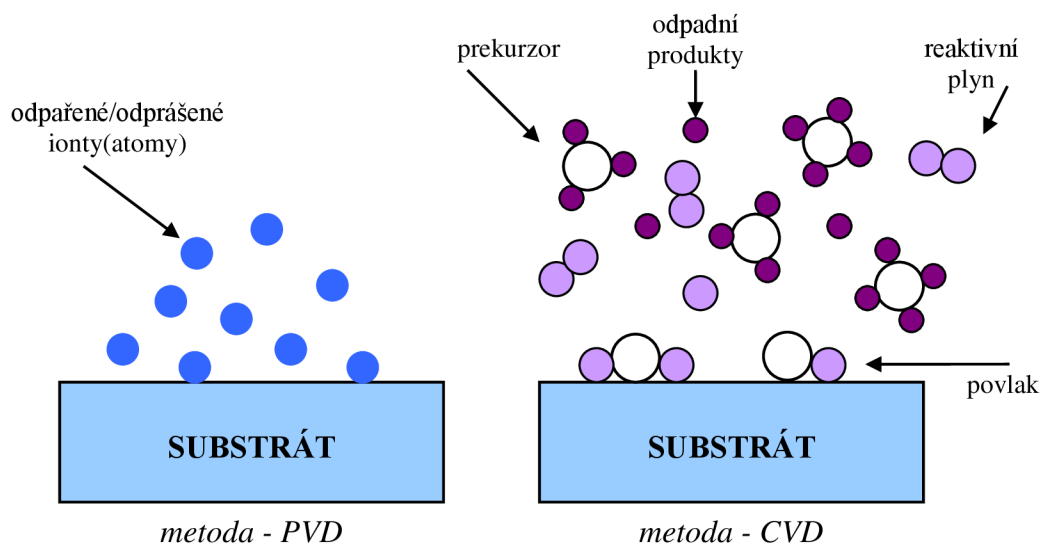
Samočisticí efekt lotosového listu je důsledkem přitáhnutím nečistot do valící se kapky vody po povrchu listu. Na základě nízké povrchové energie lotosového listu jsou tyto nečistoty odstraněny z povrchu pohybem kapky přes list. Aby tento efekt nastal, vodní kapky by se měly pohybovat volně po povrchu jen působením tíhové síly. Schopnost kapky pohybovat se tímto způsobem se nazývá úhel klouzání. Velikost tohoto úhlu musí být menší než 10° . [13]

4.2.2 Nanášení tenkých vrstev

Pomocí nanášení tenkých vrstev měníme vlastnosti chemické (smáčivost, odolnost proti korozi), mechanické (tvrdost, odolnost proti opotřebení) nebo třeba elektrické. Rovněž životnost materiálu je závislá na stavu povrchu, protože povrch je významnou funkční částí daného materiálu.

Rozeznáváme dvě odlišné metody nanášení tenkých vrstev. Jednou metodou je chemické nanášení tenkých vrstev (Chemical Vapour Deposition – CVD). Druhou často používanou metodou je fyzikální napařování (Physical Vapour Deposition – PVD). Obě metody jsou popsány v následujících podkapitolách a znázorněny na obr. 9.

Kombinací obou metod je PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition)



Obr. 9 Metody nanášení tenkých vrstev

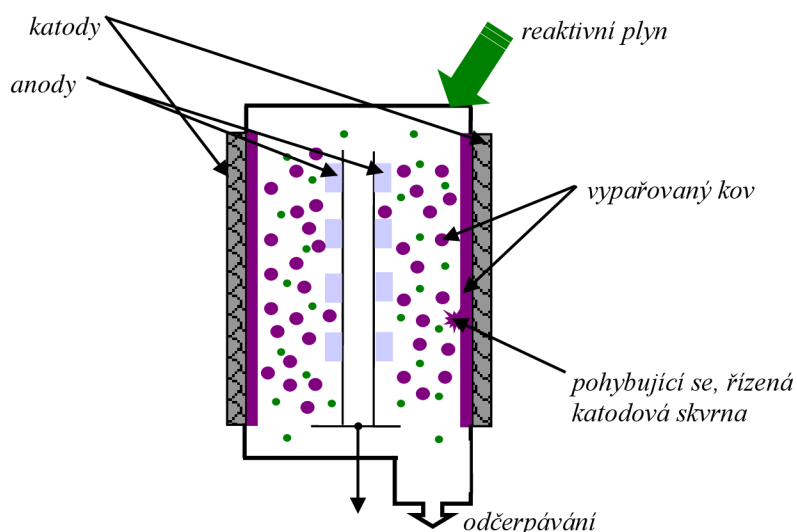
4.2.2.1 Metoda PVD

Jedná se o fyzikální metodu, která je charakteristická nízkými povlakovacími teplotami (pod 500 K). Avšak při této metodě je nutná pečlivější příprava povrchu daného materiálu před depozicí, aby došlo k dostatečnému přilnutí nanášené vrstvy k materiálu. Jednou z nevýhod je směrový účinek povlakování, tzn. u této metody dochází ke stínovému efektu - plochy odvrácené od místa odpařování nebo odprašování povlakového kovu nebudou napovlakovány, pokud se substrát nebude pohybovat. [3]

Jsou známy dvě metody nanášení PVD, jedná se o napařování a napařování.

Napařování

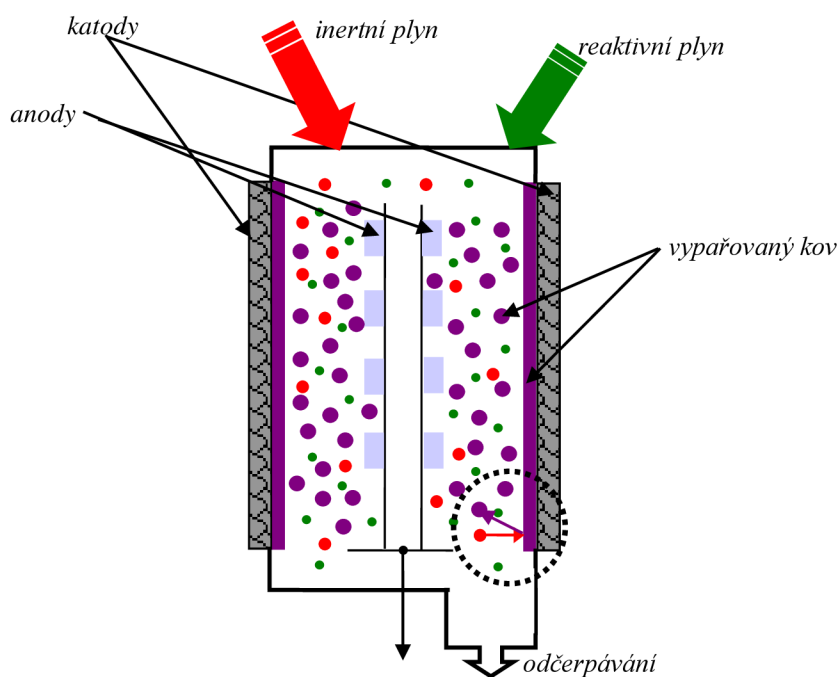
Jedná se o metodu, při které dochází k odpařování budoucího materiálu povlaku z kapalné nebo pevné fáze a jeho páry kondenzují na chladnějším povrchu substrátu. Protože se většinou jedná o materiál s vysokou teplotou tání, je nutné použít vysoké vakuum (10^{-8} Pa). Materiál, který odpařujeme se nazývá terč. Ten musí být elektricky vodivý, protože při odpařování dochází k rozkladu sloučenin. To ale některé sloučeniny nesplňují, tudíž se používá tzv. reaktivní napařování, při kterém je do vakuové komory připouštěn reaktivní plyn, s nímž může odpařovaný materiál reagovat (při odpařování čistého hliníku se použije čistý kyslík, a tak dojde k depozici vrstvy korundu). Schéma této metody je na obr. 10. [3]



Obr. 10 Napařování

Naprašování

Naprašovací metody jsou založené na mechanismu odprašování terče. Účinkem elektrického výboje (nejčastěji účinkem doutnavého výboje) ve vakuu se odprašované částice dostávají na povrch substrátu bez interakce s molekulami v prostoru mezi zdrojem a substrátem. Odprašovat lze jakýkoliv materiál bez ohledu na jeho teplotu tání. Výhodnější je neodprašovat přímo materiál, který má vytvářet povrchovou vrstvu, ale základní materiál, jenž reaguje s atmosférou obsahující reaktivní plyn - reaktivní naprašování. Schéma metody naprašování je znázorněno na obr. 11. [3]



Obr. 11 Naprašování

4.2.2.2 Metoda CVD

Jedná se o metodu založenou na chemickém napařování z plynné fáze. V bezprostřední blízkosti povlakovaného povrchu dochází k rozkladu chemických sloučenin (např. $TiCl_4$). Základním požadavkem je, aby počáteční plyny obsahovaly stabilní, ale zároveň prchavou (snadná disociace) sloučeninu, která se v důsledku přivedené energie (ohřev, laser) chemicky rozkládá. Produkty této reakce jsou ukládány na ohřátý povrch povlakovaného předmětu, na kterém působí zároveň jako katalyzátor. Aby proběhla požadovaná chemická reakce, musí být v přiváděných plynech zastoupeny i plyny nekovové a reaktivní (N_2). Poměrně velkým

procentech je v přiváděných plynech zastoupen též inertní nosný plyn (argon), který „dopravuje“ danou směs plynu k povlakovanému předmětu, čímž umožňuje řízení celého procesu a výrazně ovlivňuje rychlost růstu vrstvy povlaku. [3]

Chemické rovnice, při kterých vznikají základní CVD povlaky:

Vznik vrstvy Al₂O₃:

- 1) chlorid hlinitý $\text{Al} + 3\text{HCl} + \text{H}_2 \rightarrow \text{AlCl}_3 + 3\text{H}_2$
- 2) vylučování oxidu hlinitého $2\text{AlCl}_3 + 3\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \boxed{\text{Al}_2\text{O}_3} + 3\text{CO} + 6\text{HCl}$

Nevýhodou této metody je vznik poměrně silné kyseliny jako odpadního produktu, proto je nutné přizpůsobit konstrukci celého zařízení. Dalším omezením je i vysoká teplota (900 – 1200 K), která nám znemožňuje povlakování materiálů s nižší teplotou tání (hliník).

4.2.2.3 PECVD – plazmatem urychlená depozice

Metoda PECVD je kombinací chemické a fyzikální metody povlakování. Touto metodou dochází k vytváření povlaků pomocí plazmatu (CVD je metodou bez použití plazmatu). PECVD je založena na chemickém procesu, který bude probíhat v plazmatu za sníženého tlaku, tedy se sníží teplota potřebná pro ukládání povlaku.

Tato metoda povlakování se používá i za pomoci dielektrického výboje. Odstraňuje tak nevýhody obou metod (nutnost použití vakuové komory, vysoká teplota při depozici). Přesto má svoji nevýhodu; podmínky pro vytvoření vrstvy na substrátu významně závisí na složení atmosféry, které je proměnné.

4.3 Využití plazmatu pro generování ozónu a ve zdravotnictví

Při bariérovém výboji za atmosférických podmínek vzniká tříatomová molekula kyslíku – ozón, což je vysoce reaktivní plyn charakteristického zápachu, ve vyšších koncentracích je pro člověka jedovatý (způsobuje tvorbu volných radikálů v lidském těle, tyto radikály jsou pro člověka karcinogenní). Vdechování ozónu vede ke snižování vitální kapacity plic Ozón lze získávat třemi způsoby. Vzniká tedy buď za působení ultrafialového záření, nebo elektrolýzou vody, nebo elektrickým výbojem. Koncentrace takto vzniklého ozónu je nejvyšší u poslední možnosti vzniku, která je nejpoužívanější. Ozón se využívá v

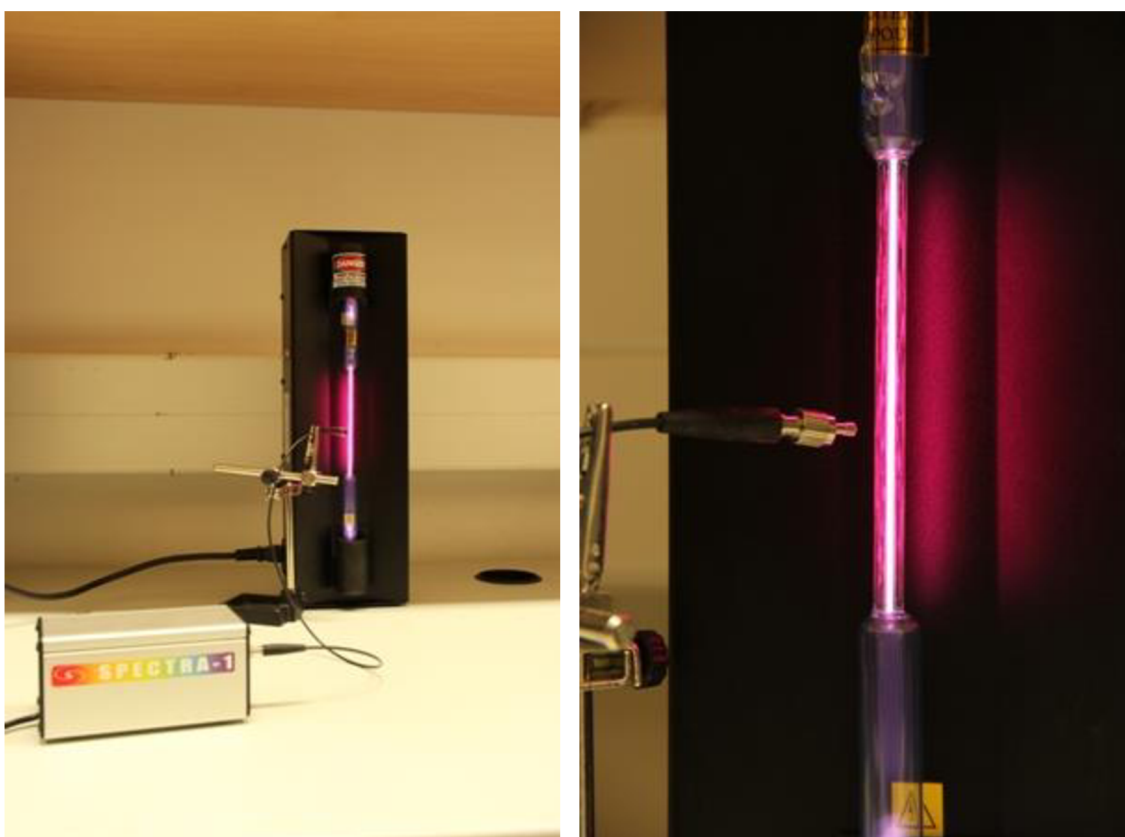
chemii k odželezování a odmanganování, k dezinfekci vody, ve zdravotnictví k odstranění mutagenních a karcinogenních sloučenin a ke sterilizaci operačních nástrojů (lze jej použít i ve stomatologii k ošetření zubního kazu), dříve se používal ozón probublávající přes vodu k inhalaci pacienty s vleklými chorobami horních cest dýchacích.

Dezinfekce a sterilizace materiálů je ve zdravotnictví zásadní. Dezinfekce je soubor opatření, které zbavují materiály mikroorganismů. Probíhá za pomoci chemických prostředků vyráběných průmyslově nejčastěji v tekuté formě. Sterilizace je soubor opatření, které ničí kromě mikroorganismů i jejich zárodky. Sterilizace rozdělujeme na chemickou a fyzikální. Do fyzikálních metod patří sterilizace horkou parou pod tlakem, varem pod tlakem, horkým vzduchem a sterilizace zářením. Chemické metody pak zahrnují sterilizaci ethylenoxidem, formaldehydem a sterilizaci plazmatem vzniklým ve vysokofrekvenčním elektromagnetickém poli. Sterilizace plazmatem je rychlejší a vhodnější pro nástroje citlivé na teplo. Prekurzorem plazmatu je 58% peroxid vodíku. Molekula peroxidu vodíku je při sterilizačním procesu rozdělena vysokofrekvenčním vlněním. Volné radikály - hydroxyl, hydroperoxyl a UV záření jsou tři základní složky celého procesu. Jedinými odpadními látkami při této metodě jsou kyslík a voda, proto je sterilizace plazmatem nejšetrnější metodou.

5 Praktická část

5.1 Spektrální trubice

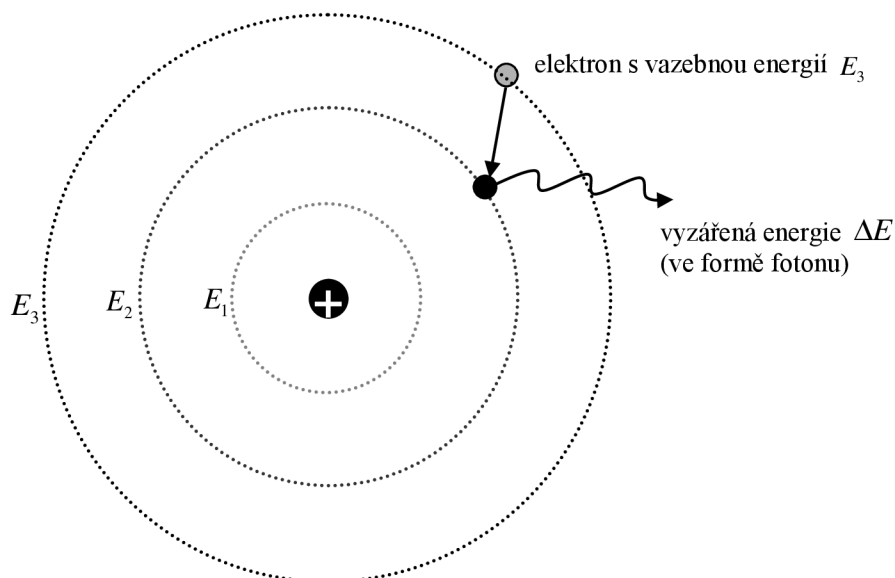
Nejčastější aplikací doutnavého výboje jsou výbojková svítidla, ve školním prostředí zastoupená výukovou pomůckou známou jako spektrální trubice. Pro experiment byla použita sada třinácti spektrálních trubic s různými plyny od firmy HELAGO-CZ s.r.o. a držák na spektrální trubice s vysokonapěťovou budící jednotkou. Experimentální uspořádání a zapojení je na obr. 12.



Obr. 12 Fotografie zapojení

Spektrální trubice obsahuje jeden nebo více prvků v atomární nebo molekulární formě. Při srážkách dochází k excitaci elektronů na vyšší energetické hladiny. Jelikož excitované stavy jsou nestabilní, atom samovolně přechází zpět do základního stavu. Elektron s vysokou energií E_3 se vrátí do nižšího energetického stavu E_2 při souběžné emisi fotonu energie $E_3 - E_2 = \Delta E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$; kde $h = 6,63 \cdot 10^{-30} \text{ J} \cdot \text{s}$ je Planckova konstanta, $c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ je rychlost světla ve vakuu a λ představuje vlnovou délku (schematicky znázorněno na obr. 13).

Každý excitovaný atom vysílá charakteristickou vlnovou délku určenou rozdíly energetické hladiny ΔE .²



Obr. 13 Excitace elektronů

Pro měření spekter byl použit spektrometr Spectra-1, který je navržen na zkoumání viditelné části světelného spektra. Světelný signál vstupuje do přístroje flexibilním optickým vláknem. Datové spojení s počítačem je realizované přes rozhraní USB 2.0.³

² Návod k obsluze od firmy HELAGO s.r.o. přiložený u sady spektrálních čar

³ Popis zařízení; Dostupné na World Wide Web:

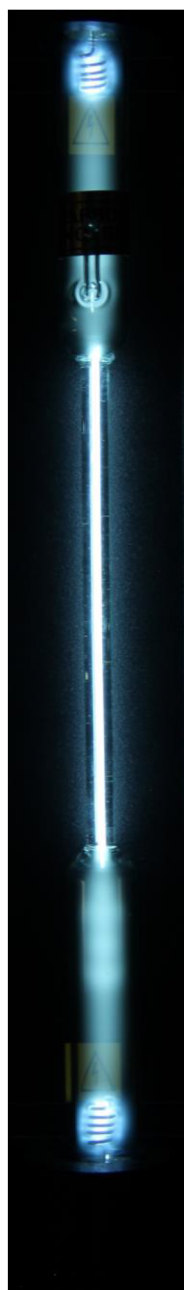
<http://www.ucebnipomucky.net/katalog/zbozi/fyzika/demonstracni-soupravy/produkt/spektrometr-spectra-1>. [cit. 22.3.2015]

5.1.1 Ukázky spekter vybraných plynů

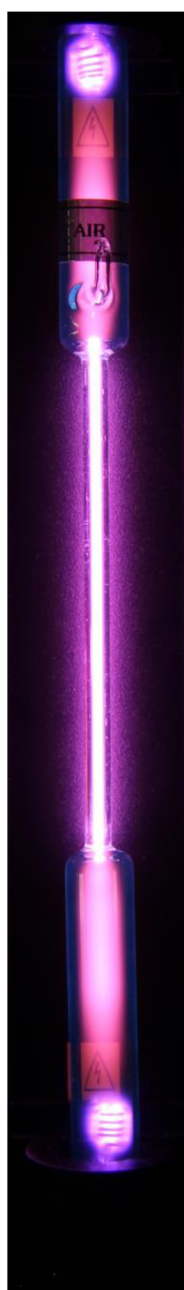
Ze třinácti různých plynů (kyslík, oxid uhličitý, vzduch, helium, vodní pára, dusík, neon, argon, vodík, brom, rtuť, jód, krypton) použitých v experimentu, byly vybrány čtyři, jejichž analýzu čárového spektra můžeme vidět na následujících obrázcích.

Z experimentu byly pořízeny fotografie, které jsou na obr. 14. Vnímaná barva výboje v trubici odpovídá příslušným emisním čarám konkrétního plynu.

a) oxid uhličitý



b) vzduch



c) vodík

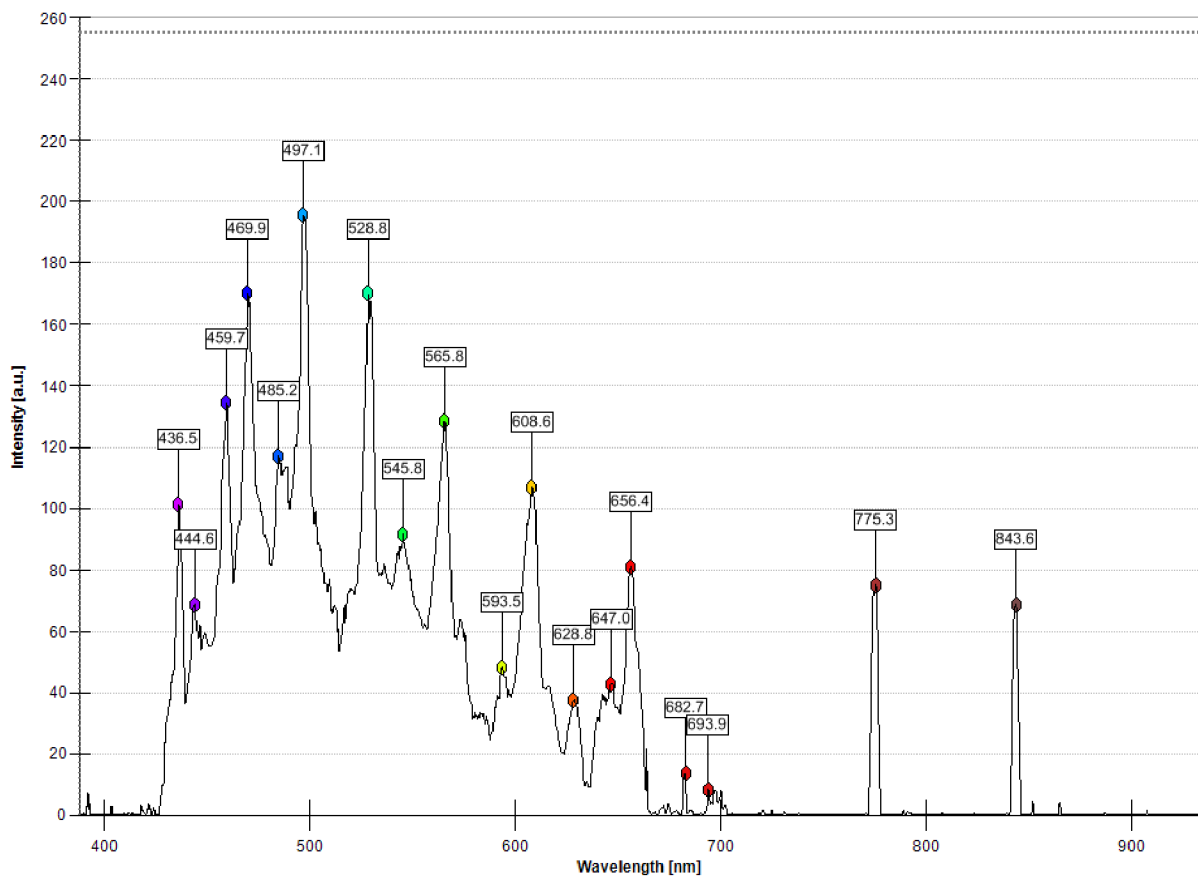
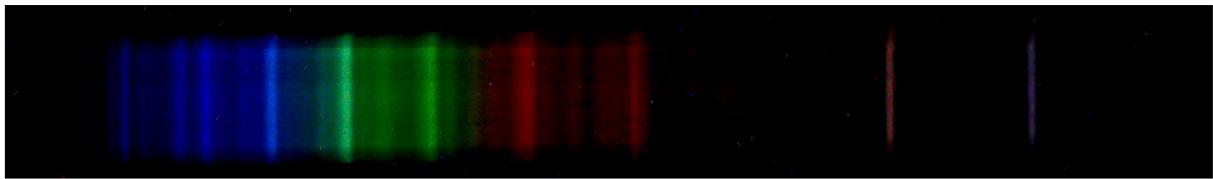


d) vodní pára



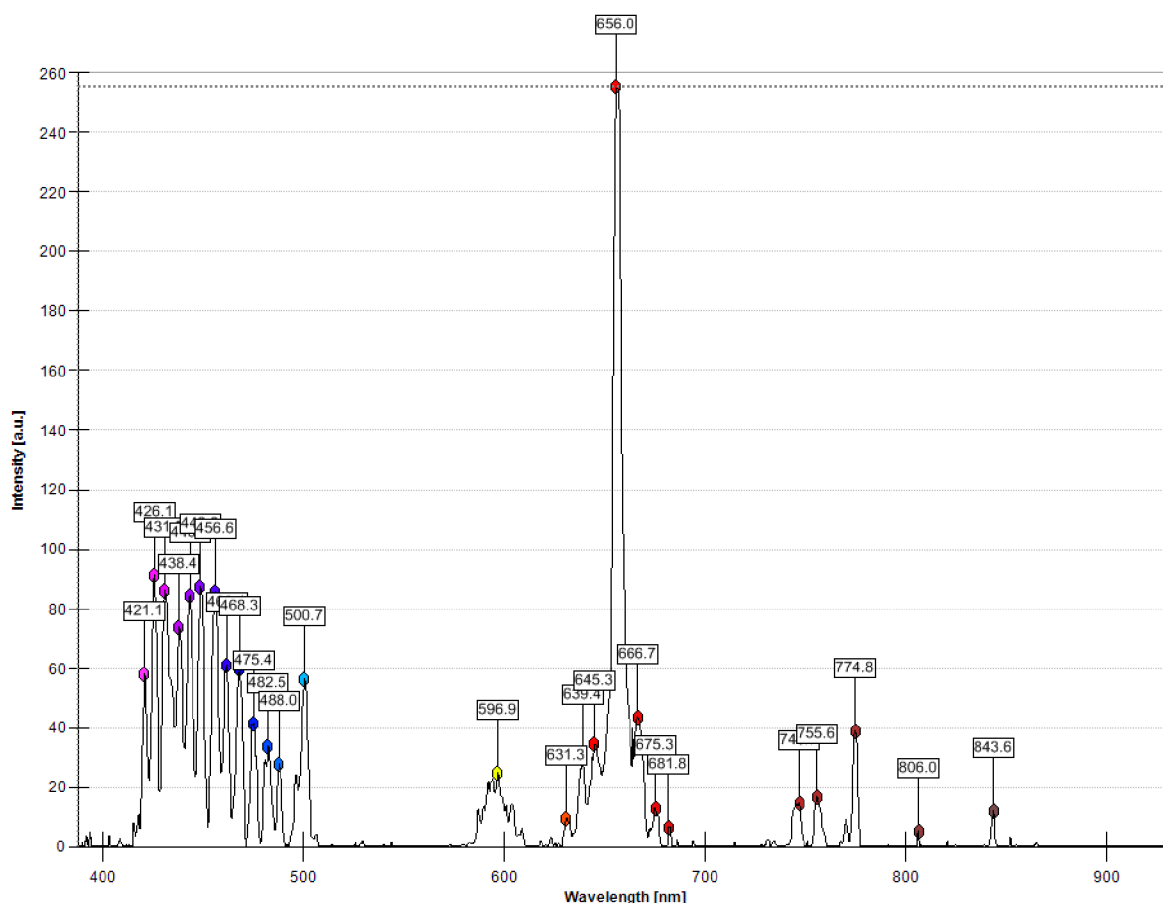
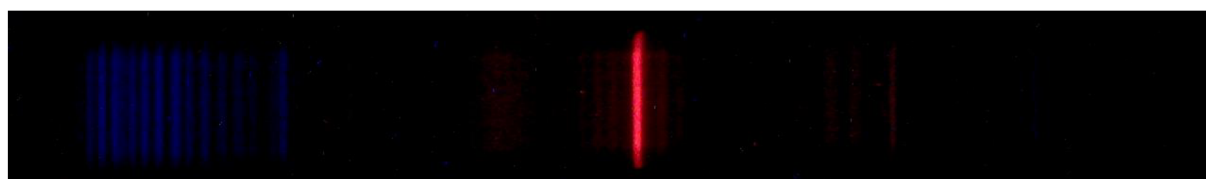
Obr. 14 Fotografie různých plynů

Spektrum oxidu uhličitého (bezbarvý plyn bez chuti a zápachu, nejedovatý, nedýchatelný plyn, běžnou součástí zemské atmosféry, významně se podílí na skleníkovém efektu) představuje nejen celá škála viditelného světla o vlnové délce od $436,5 \cdot 10^{-7} m$ do $775,3 \cdot 10^{-7} m$ (přičemž nejintenzivnější je modrozelená o $\lambda = 497,1 \cdot 10^{-7} m$), ale také v oblasti infračerveného záření najdeme spektrální čáru, jak je vidět na obr. 15. Podle příložených materiálů firmy bychom měli v trubici pozorovat asi šest intenzivních čar z uhlíku navrstveného na spektrální formě kyslíku.



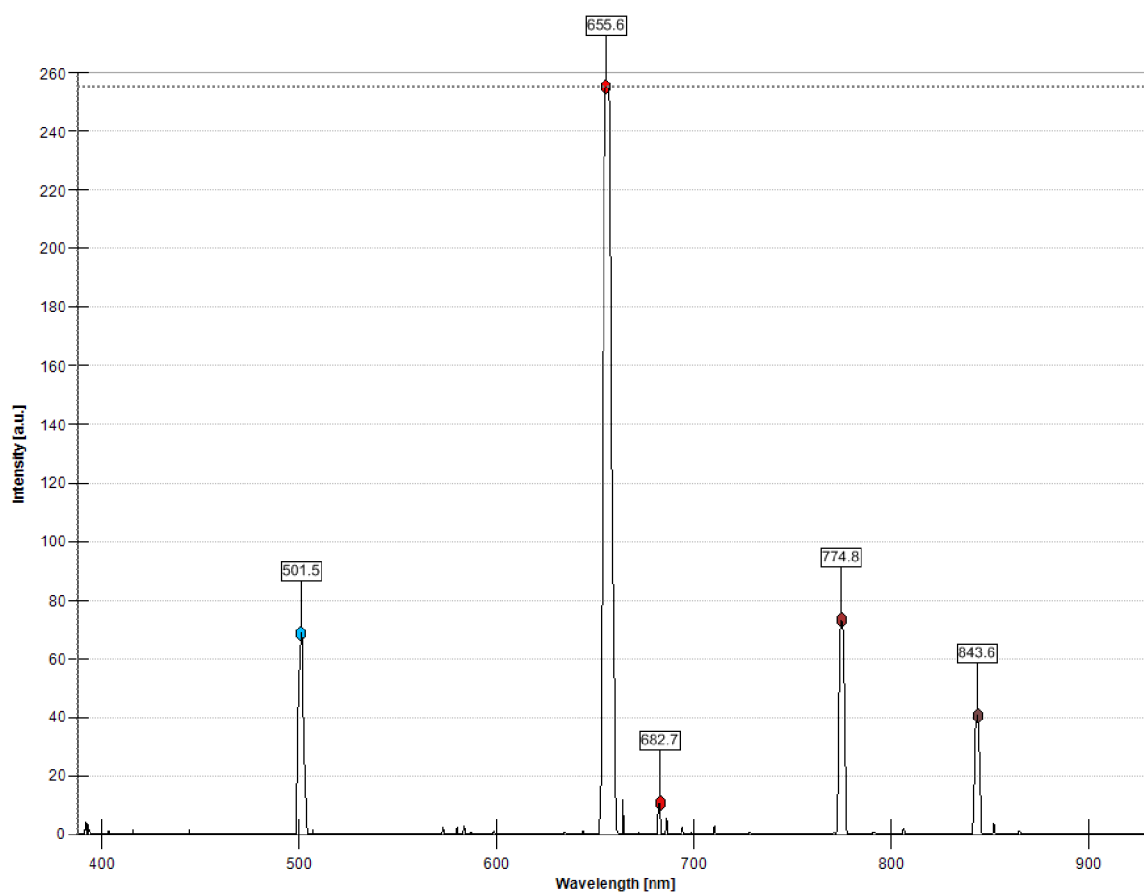
Obr. 15 Oxid uhličitéý

Spektrum vzduchu, jehož složení je přibližně 78% dusíku, 21% kyslíku a 1% vzácných plynů, představuje viditelné světlo o vlnové délce od $421,1 \cdot 10^{-7} m$ do $774,8 \cdot 10^{-7} m$ (nejintenzivnější je červená o $\lambda = 656,0 \cdot 10^{-7} m$). Rovněž i v oblasti infračerveného záření najdeme spektrální čáry o vlnových délkách $\lambda_1 = 806,0 \cdot 10^{-7} m$; $\lambda_2 = 843,6 \cdot 10^{-7} m$. Spektrum i graf spektra vzduchu jsou na obr. 16. Podle přiložených materiálů firmy bychom měli pozorovat spektrum stejné jako u molekulárního dusíku (N_2), což při experimentu nebylo pozorováno.



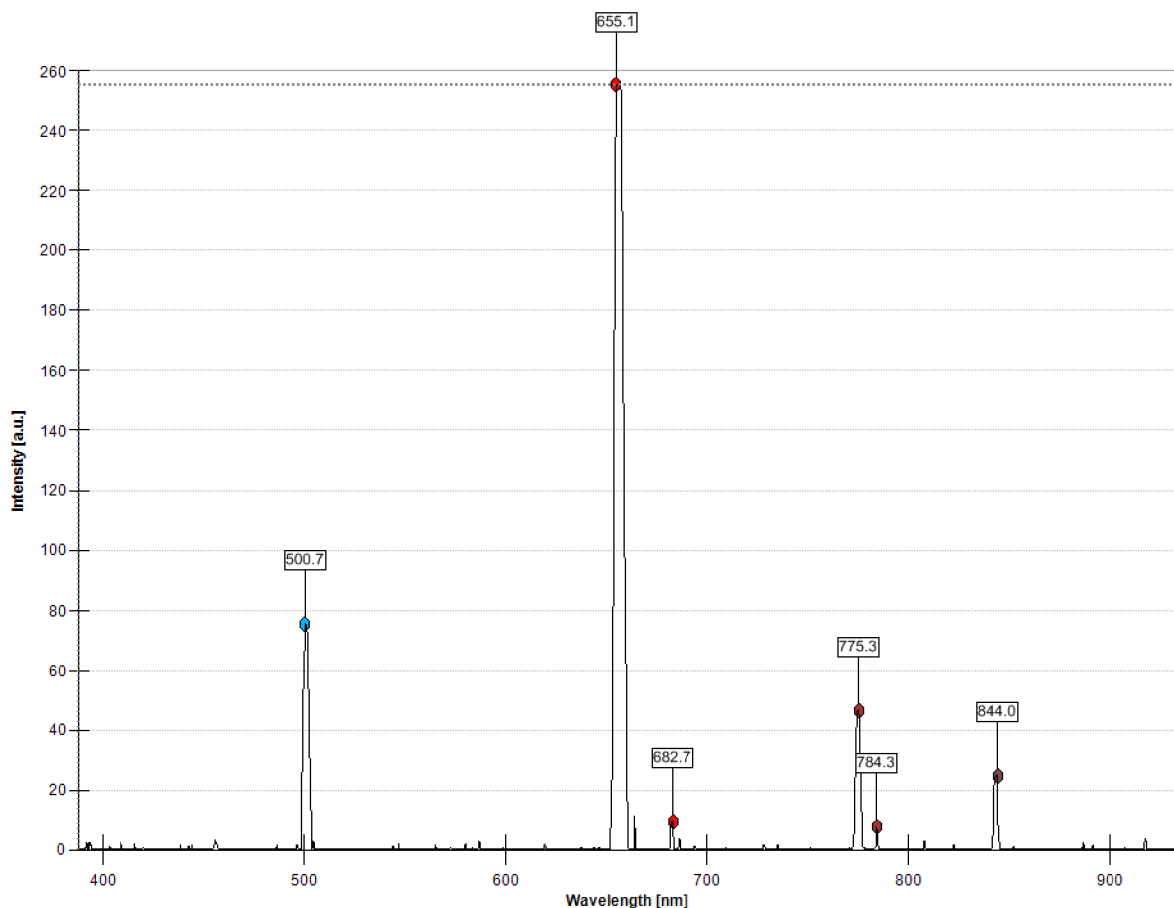
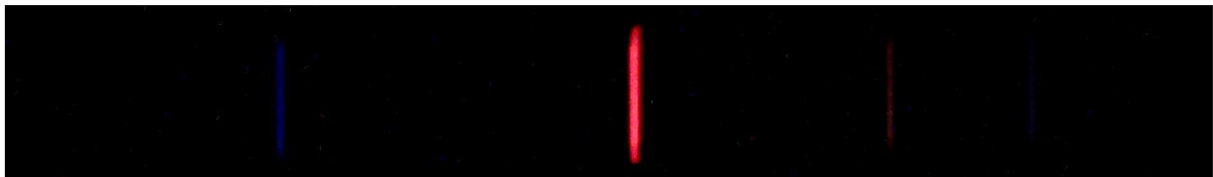
Obr. 16 Vzduch

Spektrum vodíku (nejlehčí, nejjednodušší prvek, bezbarvý, bez chuti a zápachu, na Zemi přítomen jen vzácně) je zdánlivě podobné spektru vzduchu. Viditelné světlo je zde zastoupeno čtyřmi výraznými čarami o vlnových délkách odpovídajícím červené a modré (přičemž tou intenzivnější je červená o $\lambda = 655,6 \cdot 10^{-7} m$). V oblasti infračerveného záření pak nacházíme i spektrální čáru o vlnové délce $\lambda = 843,6 \cdot 10^{-7} m$. Graf spektra i spektrum samotné je na obr. 17. Podle příložených materiálů firmy bychom měli pozorovat silné fialové, modré a červené čáry.



Obr. 17 Vodík

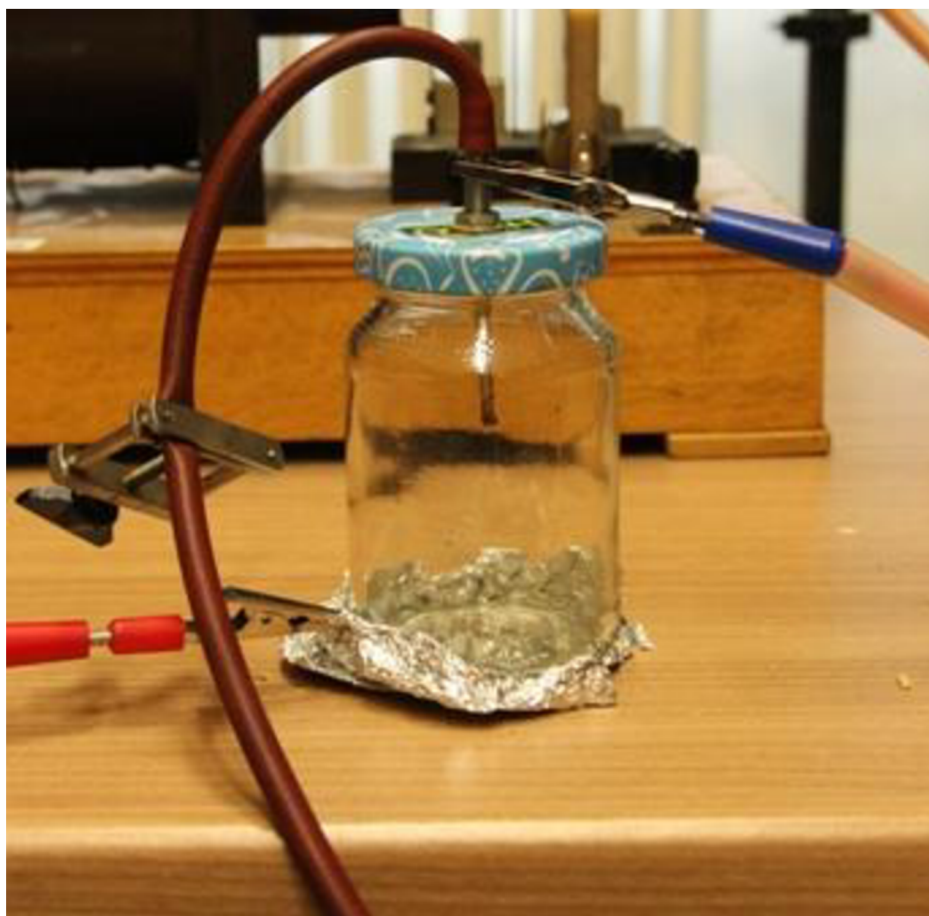
Spektrum vodní páry (plynné skupenství vody – chemické sloučeniny velmi reaktivního kyslíku a vodíku) téměř odpovídá spektru vodíku. I zde je viditelné světlo zastoupeno čtyřmi výraznými čarami o podobných vlnových délkách odpovídajícím červené a modré (intenzivnější je červená o $\lambda = 655,1 \cdot 10^{-7} m$). V oblasti infračerveného záření pak nacházíme jednu spektrální čáru o vlnové délce $\lambda = 844,0 \cdot 10^{-7} m$. Na obr. 18 najdeme spektrum a graf spektra. Podle přiložených materiálů firmy bychom měli pozorovat tři silné vodíkové čáry a slabé spektrum z kyslíku.



Obr. 18 Vodní pára

5.1.2 Vytvoření vlastního doutnavého výboje

Základem této výbojové komory je tlustostěnná sklenice (např. sklenice od dětské přesnídávky). Jednu elektrodu tvoří hliníková fólie (alobal), kterou je pokryto dno sklenice, druhou elektrodu, která je dutá pro možnost odsávání vzduchu tvoří měděná trubička o průměru $d = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, která byla vsunuta do vyvrtaného otvoru ve víku sklenice a utěsněna. Na obr. 19 je vyfocena takto upravená sklenice.



Obr. 19 Zařízení pro doutnavý výboj

Do sklenice bylo aplikováno malé množství rtuti pro vytvoření rtuťových par, následovalo odsátí vzduchu z trubice, aby došlo ke snížení tlaku uvnitř sklenice (za atmosférického tlaku doutnavý výboj nemůže vzniknout). Pak byly elektrody napojeny na výstupní svorky vysokonapěťového transformátoru. Ve sklenici došlo k vytvoření doutnavého výboje, který

byl v blízkosti měděné elektrody zabarvený bíle, v prostoru sklenice byl výboj zbarven fialově, což ukazuje na malou koncentraci rtuťových par a na stále nezanedbatelné množství vzduchu ve sklenici, které je zřejmě způsobeno nedokonalým odsátím. Fotografie vzniklého výboje je obr. 20.



Obr. 20 Výboj ve spektrální sklenici – rtuť

Do sklenice se rtuť bylo připuštěno další množství vzduchu a mírně zvýšen tlak uvnitř. Sklenice byla opět připojena do obvodu. Zabarvení výboje se změnilo, jak je názorně vidět na obr. 21. Dochází k intenzivnější interakci elektronů s molekulami plynů, což se projevuje intenzivnějším zářením.



Obr. 21 Výboj ve spektrální sklenici– vzduch

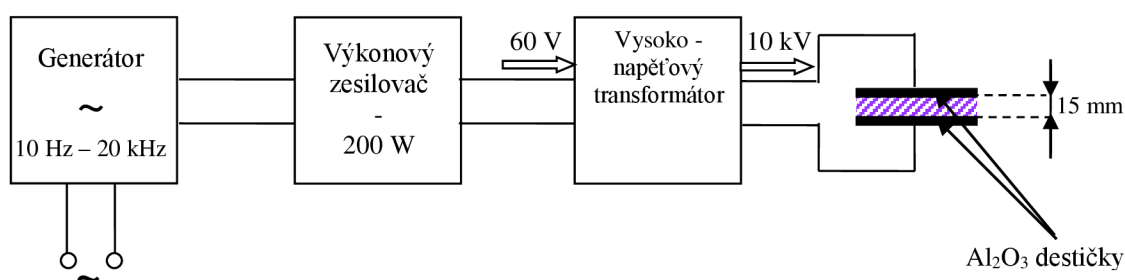
Nakonec byl proveden experiment se spektrální sklenicí naplněnou oxidem uhličitým. Na obr. 22 je znatelné zabarvení výboje do bílé barvy; to znamená, že obsahuje celé spektrum viditelného světla, což odpovídá i naměřenému spektru CO₂ ve spektrální trubici dodané firmou HELAGO s.r.o..



Obr. 22 Výboj ve spektrální sklenici – CO₂

5.2 Návrh a sestavení vlastního zařízení

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a sestavit zařízení, které by umožnilo vytvoření objemového bariérového výboje (DBD) za atmosférických podmínek. Toto zařízení se skládá z generátoru napojeného na střídavý zdroj napětí (síťový). Generátor usměrní elektrický proud, stejnosměrný elektrický proud je přiváděn do výkonového zesilovače, ze kterého dále vychází pulzní napětí o vysoké frekvenci (řádově kHz), jehož velikost je regulována autotransfornátorem. Na autotransfornátor už jsou přímo napojeny dvě elektrody s připevněnými bariérami. Zapojení těchto částí je schematicky znázorněno na obr. 23.

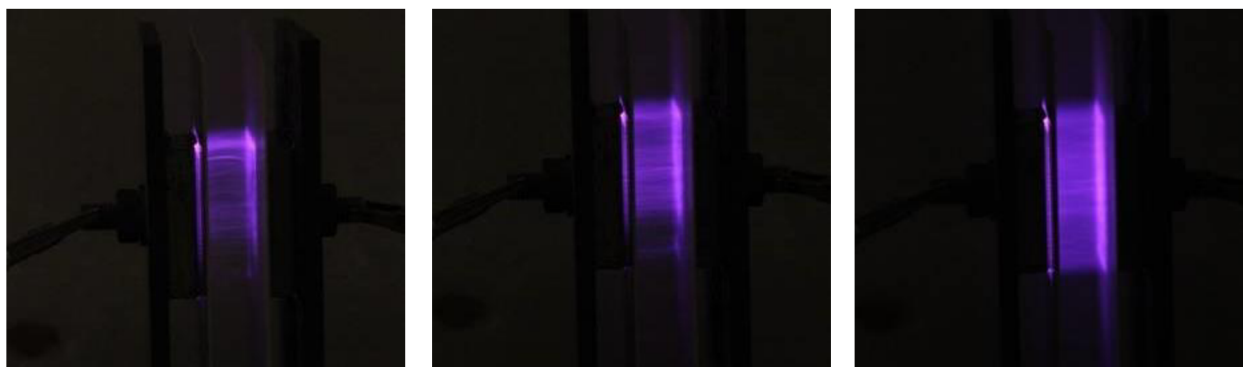


Obr. 23 Schéma zapojení

K vytvoření stabilního bariérového výboje je zapotřebí generovat vysoké napětí ($\sim 10^3 V$) o frekvenci ($\sim 10^3 Hz$). Výboj vzniká už při frekvenci o velikosti $50 Hz$, ale dochází k tzv. prázdným místům tedy k vyhasínání výboje. Zdrojem signálu pro vybuzení výboje je generátor sinusového signálu s možností změny frekvence. Regulaci velikosti napětí mezi elektrodami nám umožní vysokonapěťový transformátor napájený z výkonového zesilovače.

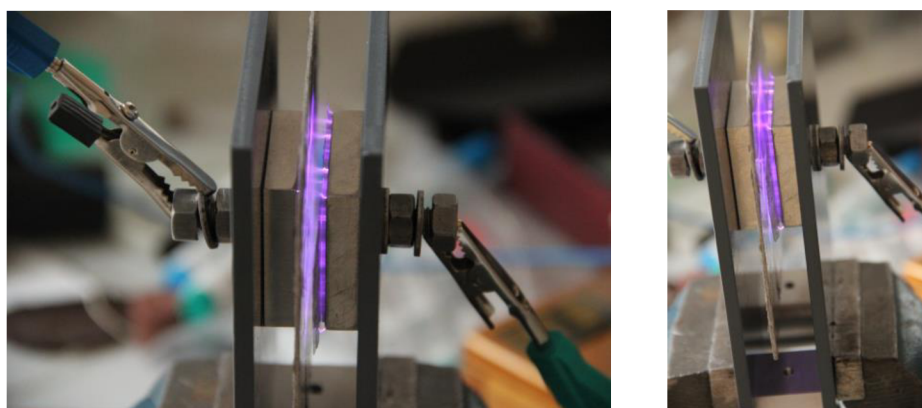
Samotný výboj vzniká mezi elektrodami s připevněnou bariérou. Elektrody byly vyrobeny z duralu (AlCu), jejich rozměry byly navrženy tak, aby bariéra (rozměry bariéry byly omezeny nabídkou dodavatele) dostatečně překrývala plochu samotné elektrody, aby se eliminoval vznik elektrických svodů. Konečné rozměry elektrod tedy jsou: $38 \times 38 \times 8,5$ mm. Samotné elektrody pak byly připevněny k deskám z nevodivého materiálu (plast). Jako bariéry elektrického výboje byly zvoleny korundové destičky (Al_2O_3) z důvodu svých vhodných fyzikálních vlastností, kterými jsou: průrazné napětí ($10 \cdot 10^6 - 30 \cdot 10^6 V \cdot m^{-1}$),

tepelná vodivost $28-35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a teplota tání $2000 \text{ }^\circ\text{C}$.⁴ Korundové destičky byly dodány s rozměry $108 \times 108 \times 0,8 \text{ mm}$. Vzdálenost mezi elektrodami je 15 mm , tato vzdálenost byla experimentálně zvolena tak, aby výboj byl co nejhomogennější, a aby bylo možné vložit do generovaného plazmatu předmět určený k modifikaci svého povrchu. Vznik výboje při použití korundových destiček jako bariéry, je na obr. 24.



Obr. 24 Buzení bariérového výboje s korundovým dielektrikem

Kromě korundových destiček plnících funkci bariéry byly vyzkoušeny i jiné materiály. Slídové desky (obsah slídy asi 90%) se nejprve jevily jako vhodné dielektrikum, ale z důvodu své nehomogenity docházelo k částečnému průrazu materiálu. Bariéra z křemičitého skla se neosvědčila, protože průrazné napětí křemičitého skla je nižší a má nedostatečnou homogenitu, proto docházelo k mechanickému poškození. Bariérový výboj se slídou jako dielektrikem je na obr. 25.



Obr. 25 Bariérový výboj se slídou

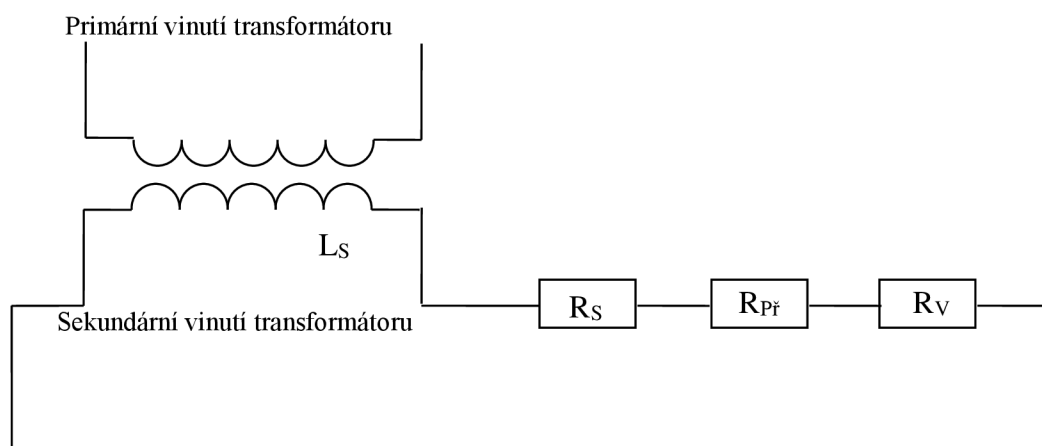
⁴ <http://www-ferp.ucsd.edu/LIB/PROPS/PANOS/al2o3.html>

5.2.1 Charakterizace elektrických parametrů zařízení a výboje

V průběhu trvání výboje byly zjišťovány jeho základní parametry: frekvence, proud, napětí. Tyto parametry byly měřeny z důvodu zajištění co nejpřesnější reprodukovatelnosti podmínek výboje, aby byla zaručena stejná kvalita opracovaného materiálu.

Frekvence byla měřena osciloskopem v primárním obvodu vysokonapěťového transformátoru. Nejlepších parametrů výboje z hlediska homogenity dosahovalo konkrétní zařízení pro bariérový výboj při frekvenci budícího proudu $f = 1,4 \cdot 10^3 \text{ Hz}$

Dále byl měřením zjištěn a následně vypočten převodní poměr vysokonapěťového transformátoru, který je důležitý pro orientační hodnoty napětí a proudu a výkonu v sekundárním obvodu s připojenými elektrodami. Měření transformačního poměru transformátoru bylo prováděno při zapojení naprázdno přes speciálně zkonstruovaný předřadník (hodnota odporu $408 \cdot 10^6 \Omega$, max. krátkodobé napětí $80 \cdot 10^3 \text{ V}$). Sestava pro měření pak tvořila složený RL obvod, jehož parametry byly změřeny pomocí RLC můstku. Schéma obvodu je na obr. 26.



Obr. 26 Schéma RL obvodu

Naměřené parametry sekundárního vinutí transformátoru při pracovní frekvenci $f = 1,4 \cdot 10^3 \text{ Hz}$: $L = 1166 \text{ H}$; $Q = 5,66$; $R_S = 1,26 \cdot 10^6 \Omega$, vnitřní odpor voltmetru: $R_V = 11,2 \cdot 10^6 \Omega$ a odpor předřadníku: $R_{Př} = 408 \cdot 10^6 \Omega$.

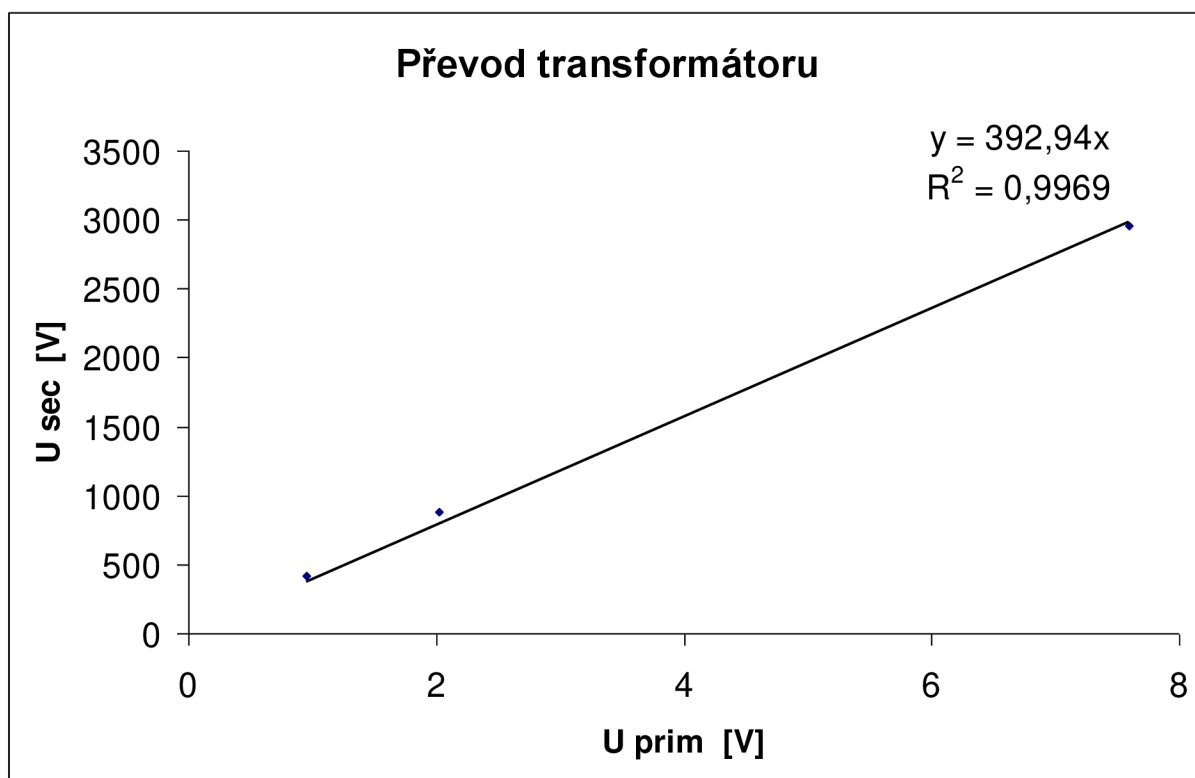
Abychom určili transformační poměr transformátoru, musíme nejprve určit skutečné napětí na sekundárním vinutí měřené pomocí předřadníku. Proud, který teče měřicím obvodem

zapojeným do série určíme z Ohmova zákona: $I = \frac{U_V}{R_V}$, pokud bude voltmetr ukazovat 1V,

bude obvodem protékat proud $I = \frac{1}{11,2 \cdot 10^6}$ A. Skutečné napětí na svorkách sekundárního

vinutí bude: $U = I \cdot (R_V + R_{p\bar{r}})$, tedy $U = 37$ V. Napětí bude 37×vyšší než je hodnota měřená voltmetr.

Pro zjednodušené určení převodního poměru budeme vynášet závislost skutečného napětí na sekundárním vinutí v závislosti na napětí přivedené na primární vinutí transformátoru, jak je vidět na následujícím obrázku obr. 27.



Obr. 27 Graf převodního poměru transformátoru

Ze směrnice určíme transformační poměr - 393. Z jednoho voltu přivedeného na vstup máme pro dané podmínky 393 voltů na sekundárním vinutí. Pomocí takto získaného převodního poměru, můžeme přibližně určit napětí na elektrodách. Velikost napětí se může lišit podle zatížení v sekundární části. Vzhledem k nedostupnosti vysokonapěťových měřících sond při měření, je to aspoň přibližné určení napětí na elektrodách způsobem měření napětí v primární části. Vzhledem k tomu, že zesilovač je schopen spolehlivě napájet transformátor

napětím s amplitudou 60V (maximální dodaný výkon 150W), je maximální efektivní napětí na elektrodách 24kV.

Práce s vysokým napětím podléhá přísným bezpečnostním opatřením. Není dovoleno se při zapojené obvodu s napětím o velikosti $(10-35) \cdot 10^3 V$ přibližovat k obvodu na více než 90 cm.

5.2.2 Doprovodné jevy při výboji

Při bariérovém výboji za atmosférických podmínek vzniká ozón - vysoce reaktivní plyn charakteristického zápachu, ve vyšších koncentracích je pro člověka jedovatý (způsobuje tvorbu volných radikálů v lidském těle). Využití koncentrovaného ozónu je popsáno v kapitole 4.3.

Při sestavování zařízení pro výrobu bariérového výboje bylo požadavkem i změření parametrů výboje. Měřit vysoké napětí je poměrně složité. Dá se odhadnout z délky výboje, což ale není přesné. V této bakalářské práci bylo napětí na elektrodách spočítáno z dostupných hodnot ostatních parametrů, což už je přesnější. Abychom mohli měřit vysoké napětí, potřebujeme vhodný měřicí přístroj. Vysokonapěťové měřicí přístroje jsou poměrně drahou záležitostí, takže je vhodné rozšířit rozsah voltmetru pomocí předřadníku s dostatečně velkým odporem.

5.3 Modifikace povrchu vlastním výbojem

Modifikací povrchu rozumíme změnu fyzikálních vlastností povrchu. Povrch může upravit tak, že na něj nanese tenkou vrstvu povlaku (viz kapitola 4.3.19). V této bakalářské práci však byl použit jiný způsob modifikace materiálu, a to aktivace povrchu materiálu působením nízkoteplotního nerovnovážného plazmatu. Snahou bylo vytvořit hydrofilní materiál z materiálu, jehož povrch byl hydrofobní. Aktivací povrchu materiálu plazmatem dojde ke změně působení sil na rozhraní kapaliny, plynného prostředí a povrchu (výslednice těchto sil ovlivňuje smáčivost povrchu).

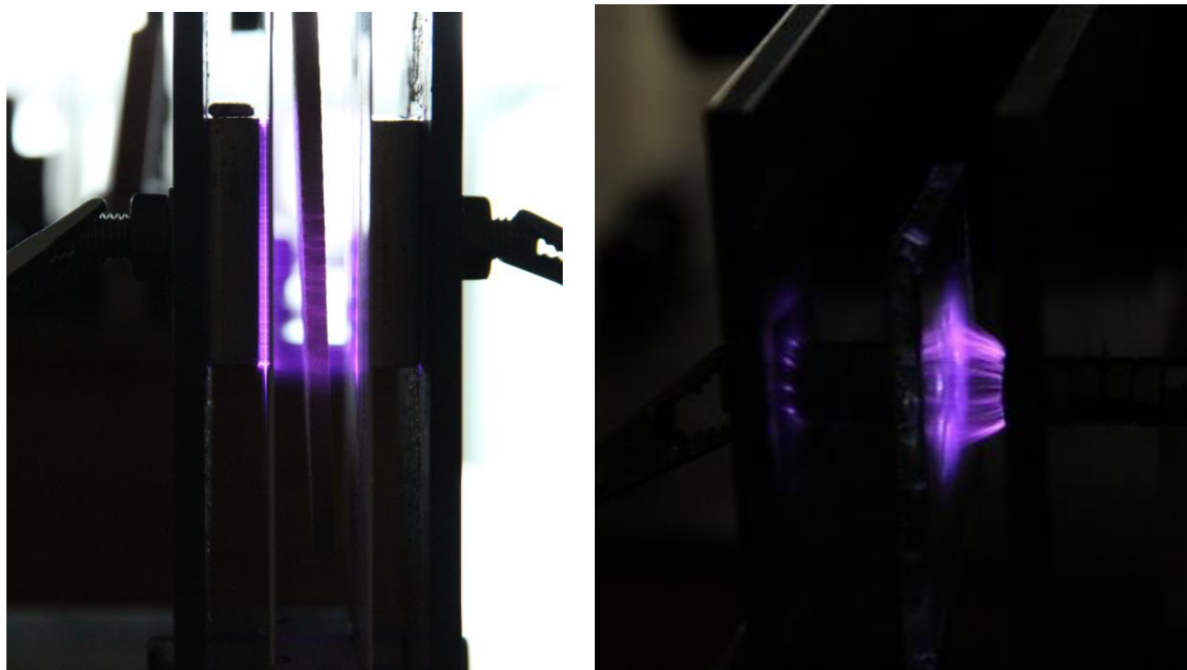
Pro modifikaci povrchu bylo využito dvou materiálů – skla a dřeva. Oba materiály vykazovaly před modifikací plazmatem hydrofobní vlastnosti. Po aktivaci části povrchu plazmatem došlo ke změně povrchových vlastností – povrch se stal hydrofilním. Doba aktivace povrchu u dřeva byla nejprve 30s, ale experimentem bylo zjištěno, že se povrch stává hydrofilním už po pouhých dvou sekundách v nízkoteplotním nerovnovážném plazmatu. U

skla byla doba aktivace povrchu 120s, experimentem bylo opět potvrzeno, že pro změnu povrchových vlastností stačí kratší doba aktivace – přibližně 30s. Změna míry smáčivosti obou povrchů je na obr. 28.



Obr. 28 Modifikovaná část povrchu – dřevo (vlevo), sklo (vpravo)

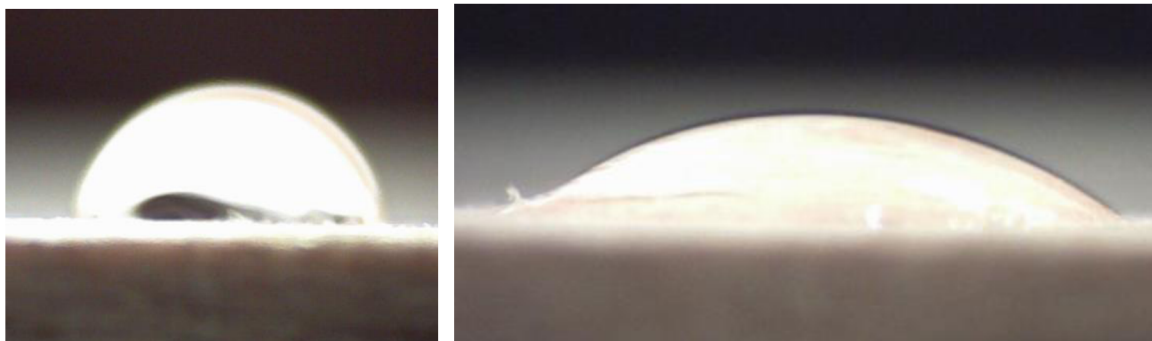
Z experimentu byly pořízeny fotografie samotné modifikace povrchu, které jsou na obr. 29. Modifikace probíhala vždy za stejnou aktivační dobu – 30s.



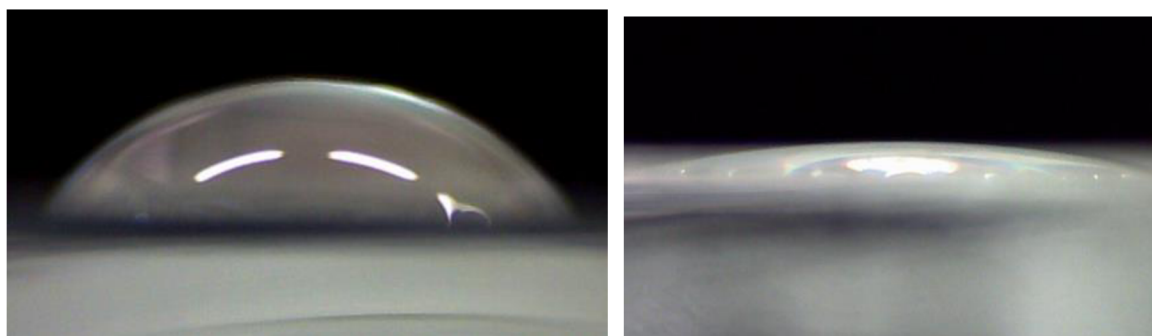
Obr. 29 Proces modifikace dřeva (vlevo) a skla (vpravo)

Při experimentu byl využit See System pro měření kontaktního úhlu. Tímto přístrojem byly vyfoceny povrchy s právě aplikovanou kapkou vody před modifikací a po modifikaci. Kromě

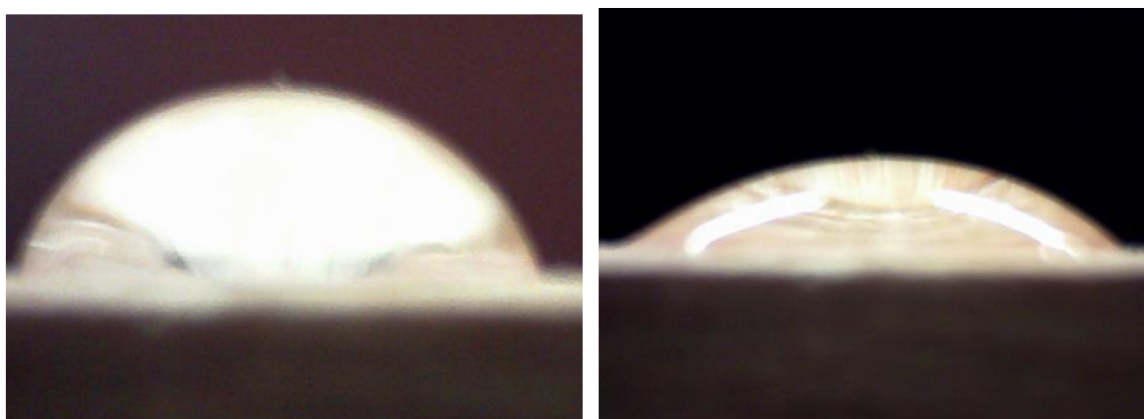
dřeva a skla byla modifikovaná i textilie. Modifikace všech materiálů jsou na následujících obrázcích 30, 31, 32. Jak je z obrázku vidět, všechny vyzkoušené povrchy po aktivaci plazmatem jeví vyšší smáčivost než před modifikací.



Obr. 30 Povrch dřeva před (vlevo) a po (vpravo) ošetření plazmatem



Obr. 31 Povrch skla před (vlevo) a po (vpravo) ošetření plazmatem



Obr. 32 Povrch textilie před (vlevo) a po (vpravo) ošetření plazmatem

6 Závěr

Náplní práce bylo podat základní informace o možnostech využití elektrických výbojů a prakticky se pokusit proniknout do této tematiky s vlastní experimentální sestavou. Jedním z největších problémů se ukázalo najít vhodné běžné dostupné dielektrikum pro vytvoření bariéry u bariérového výboje. Sklo standardní kvality vykazovalo při provozu defekty s následným průrazem a mechanickým poškozením, slídové dielektrikum bylo zase příliš nehomogenní a výboj hořel nerovnoměrně.

Další poměrně složitým úkolem bylo měření elektrických veličin ve vysokonapěťových obvodech s napětím až desítek kilovoltů a s frekvencí řádu kilohertzů. Napětí takových parametrů vyžaduje speciální přístroje, které nejsou běžně dostupné. Z toho to důvodu se musely určovat hodnoty jen přibližně pomocí výpočtu.

Výsledky experimentů využívající bariérový výboj k opracovávání povrchů materiálů jsou pro běžného člověka velmi překvapivé, jak rychle a jednoduše lze dosáhnout změny. Průmyslové využití je ovšem mnohem složitější nejen z důvodu přesného nastavení vstupních parametrů pro přesnou reprodukovatelnost výsledků, ale také pro nesnadné nastavení počátečních podmínek konkrétní modifikace určitého materiálu.

Literatura

- [1] BUDÍK, Martin. *Charakterizace dielektrických bariérových výbojů za atmosférického tlaku*. Brno, 2011. 62 s. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [2] HOŠEK, Tomáš. *Využití bariérových výbojů při přípravě fotokatalytických TiO₂ vrstev*. Brno, 2008. 36s. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta.
- [3] HUMÁR Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, s.r.o., 2008. 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2
- [4] KŘÍŽ, Martin. *Hydrofilita a hydrofobicita jako klíč k řízení vlastností povrchů*. Brno, 2009. 70s. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta.
- [5] KULHÁNEK, Petr. *Teorie plazmatu*. 2009. 261 s. Studijní text pro FJFI ČVUT.
- [6] MAŠLÍK, Jan. *Superhydrofóbní povrchy na bázi křemíku, příprava a aplikace*. Zlín, 2011. 59 s. Bakalářská práce. Univerzita Tomáš Bati ve Zlíně, Fakulta technologická.
- [7] NAVRÁTIL, Vladislav. Doplněk učebnice Halliday, D., Resnick, R., Walker, J.: Fyzika. In PhDr. Jiřina Novotná, PhD. *Moderní trendy ve výuce matematiky a fyziky*. 1. vydání Brno: MU Brno, 2011. s. 78 - 84, 7 s. ISBN 978-80-210-5652-7.
- [8] OPAVA, Zdeněk. *Elektřina kolem nás*. 1981. 304 s. ISBN 13-864-81
- [9] SCHMIEDT, Lukáš. *Úvod do fyziky plazmatu* [online]. [2006] [cit. 2014-11-25]. dostupné na World Wide Web: <http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/s4r/plazma/?p=0>
- [10] ŠTAHEL, Pavel. *Plazmové Dielektrické bariérové výboje a jejich aplikace*. Brno, 2012. 25 s. Habilitační práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta.
- [11] SVOBODA, Emanuel, et al. *Přehled středoškolské fyziky*. 2006. 517 s. ISBN 80-7196-307-0
- [12] TUNA, Jaroslav. *Plazmové nanášení tenkých vrstev za atmosférických podmínek*. Liberec, 2009. 63 s. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní.
- [13] *Self-Cleaning / Superhydrophobic Surfaces* [online]. [cit. 2014-11-25]., dostupné na World Wide Web: <http://www.rolith.com/applications/self-cleaning>

Seznam obrázků:

Obr. 1 Volt-Ampérová charakteristika.....	10
Obr. 2 Doutnavý výboj.....	12
Obr. 3 Plošný výboj.....	14
Obr. 4 Objemový výboj s bariérou na obou elektrodách	14
Obr. 5 Koplanární výboj.....	15
Obr. 6 Povrchový reliéf hydrofobního materiálu	18
Obr. 7 Povrchové napětí na rozhraní kapaliny	18
Obr. 8 Kontaktní úhly.....	18
Obr. 9 Metody nanášení tenkých vrstev	19
Obr. 10 Napařování	20
Obr. 11 Naprašování	21
Obr. 12 Fotografie zapojení	24
Obr. 13 Excitace elektronů.....	25
Obr. 14 Fotografie různých plynů	26
Obr. 15 Oxid uhličitý	27
Obr. 16 Vzduch	28
Obr. 17 Vodík.....	29
Obr. 18 Vodní pára.....	30
Obr. 19 Zařízení pro doutnavý výboj	31
Obr. 20 Výboj ve spektrální sklenici – rtuť.....	32
Obr. 21 Výboj ve spektrální sklenici– vzduch	32
Obr. 22 Výboj ve spektrální sklenici – CO ₂	33
Obr. 23 Schéma zapojení	34
Obr. 24 Buzení bariérového výboje s korundovým dielektrikem	35
Obr. 25 Bariérový výboj se slídou	35
Obr. 26 Schéma RL obvodu.....	36
Obr. 27 Graf převodního poměru transformátoru	37
Obr. 28 Modifikovaná část povrchu – dřevo (vlevo), sklo (vpravo).....	39
Obr. 29 Proces modifikace dřeva (vlevo) a skla (vpravo).....	39
Obr. 30 Povrch dřeva před (vlevo) a po (vpravo) ošetření plazmatem	40
Obr. 31 Povrch skla před (vlevo) a po (vpravo) ošetření plazmatem	40
Obr. 32 Povrch textilie před (vlevo) a po (vpravo) ošetření plazmatem	40

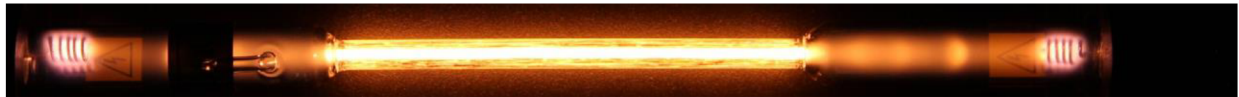
Seznam příloh:

	Počet stran:
1. Fotografie všech zkoumaných plynů ve spektrální trubici	1
2. Měřená spektra všech plynů ve spektrálních trubicích	5

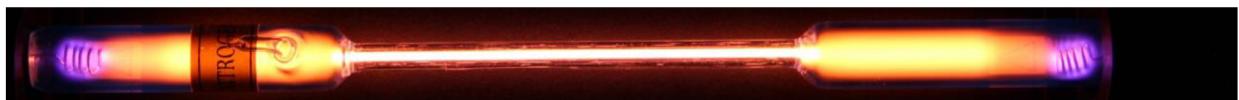
Fotografie všech zkoumaných plynů ve spektrální trubici



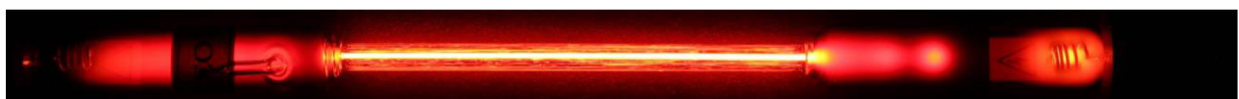
Kyslík



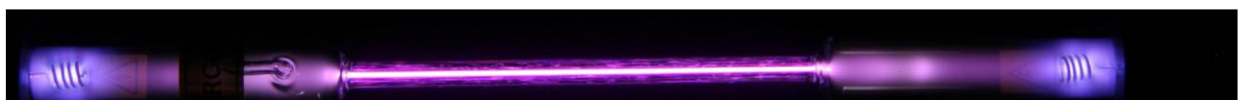
Helium



Dusík



Neon



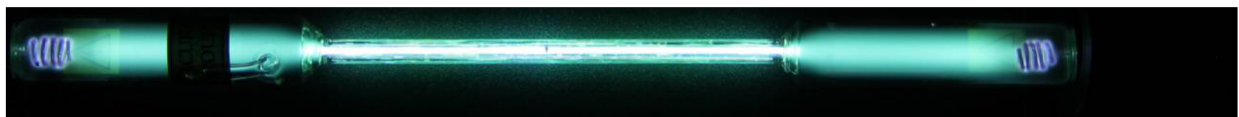
Argon



Krypton



Brom

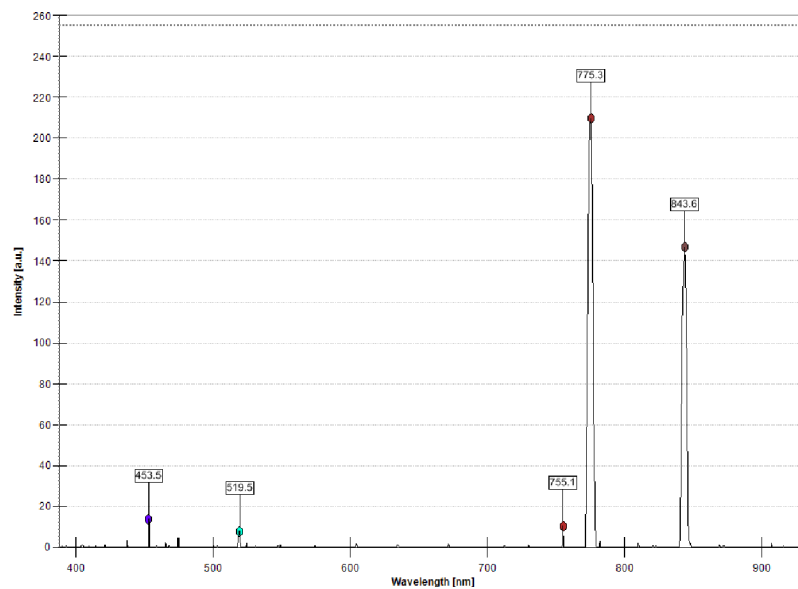


Rtuť

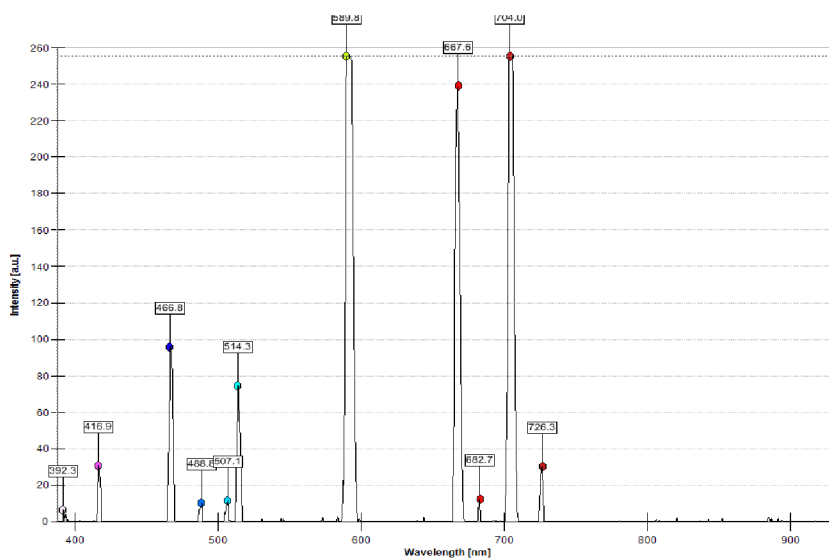
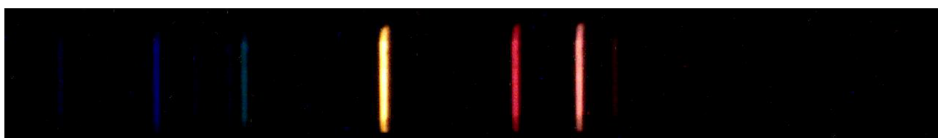


Jód

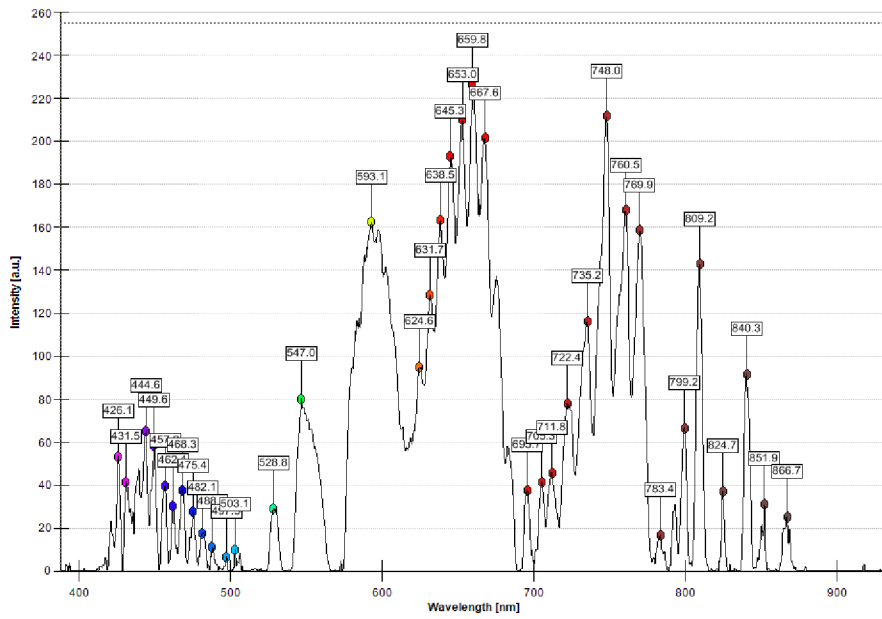
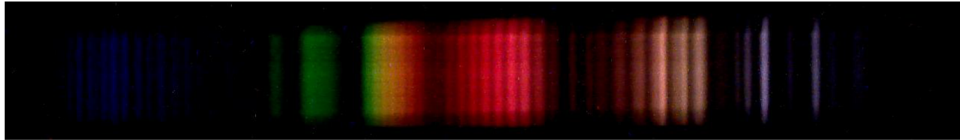
Měřená spektra všech plynů ve spektrální trubici



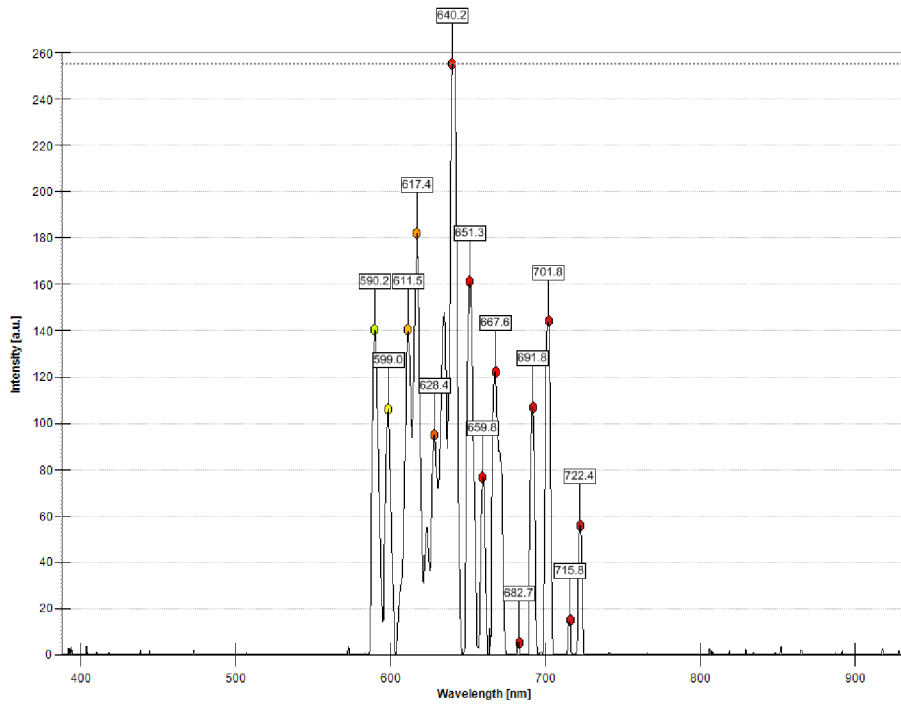
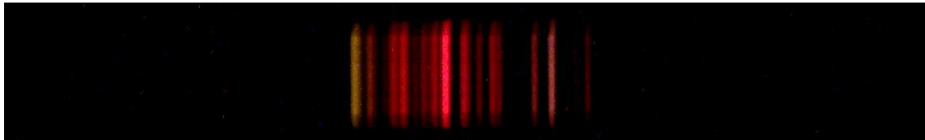
Kyslík



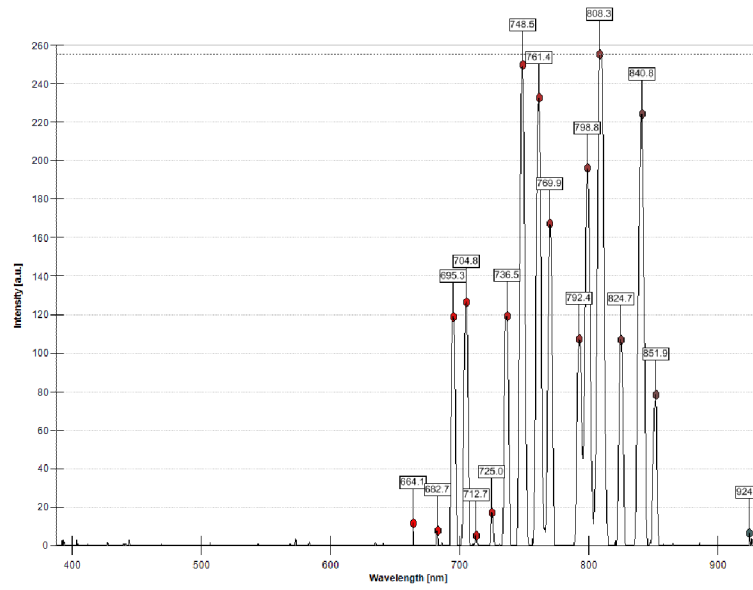
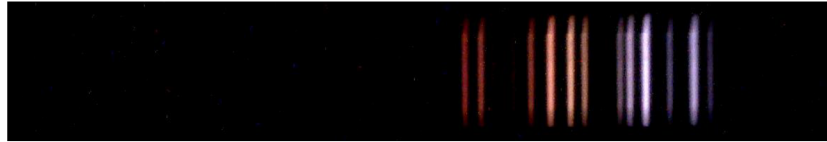
Helium



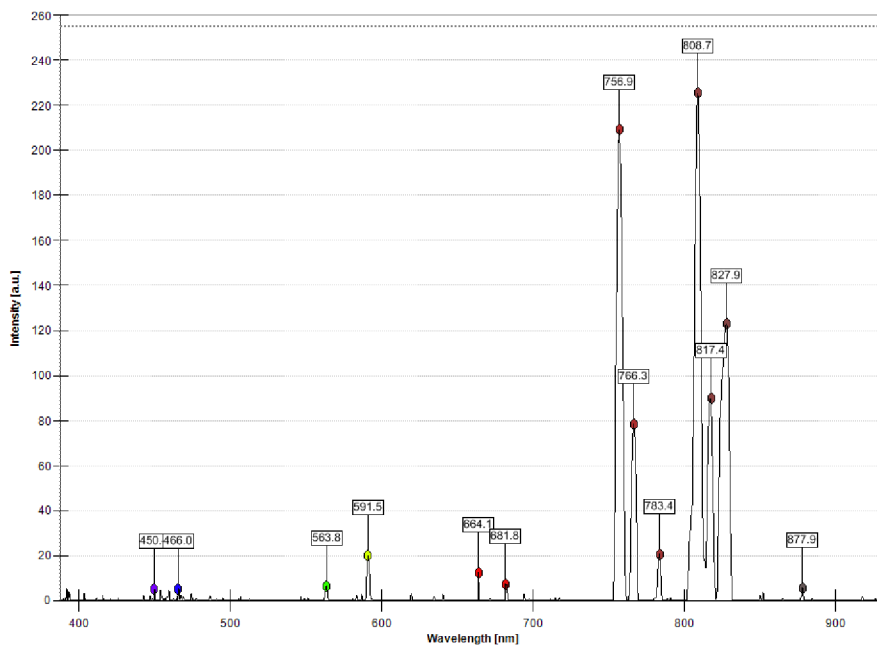
Dusík



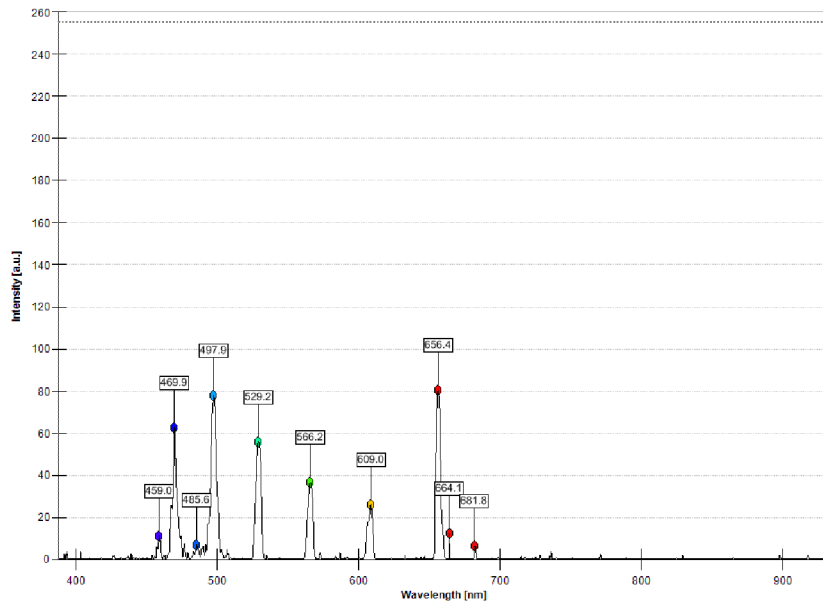
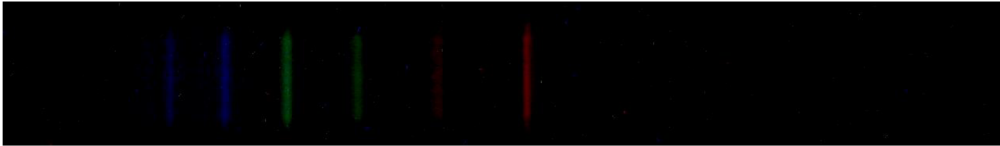
Neon



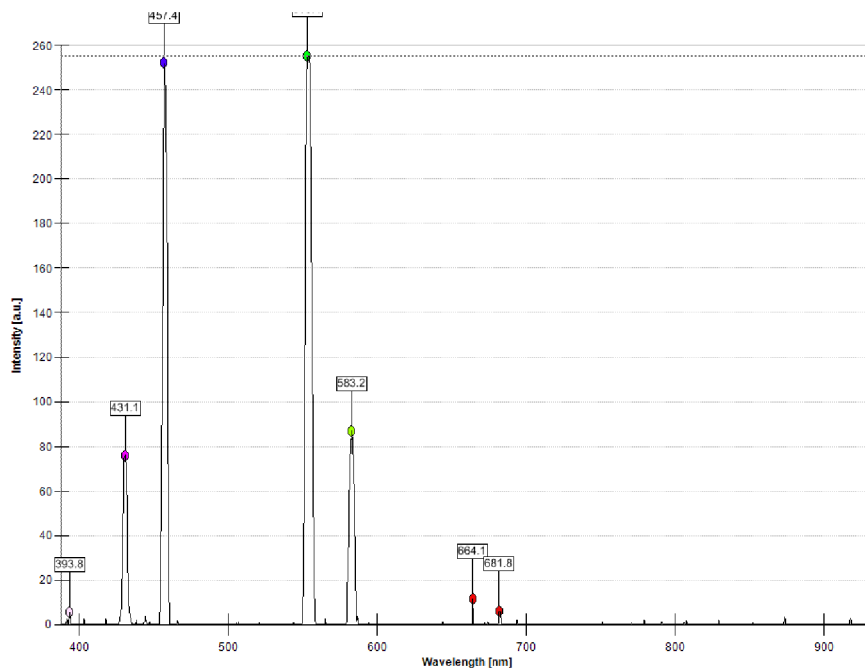
Argon



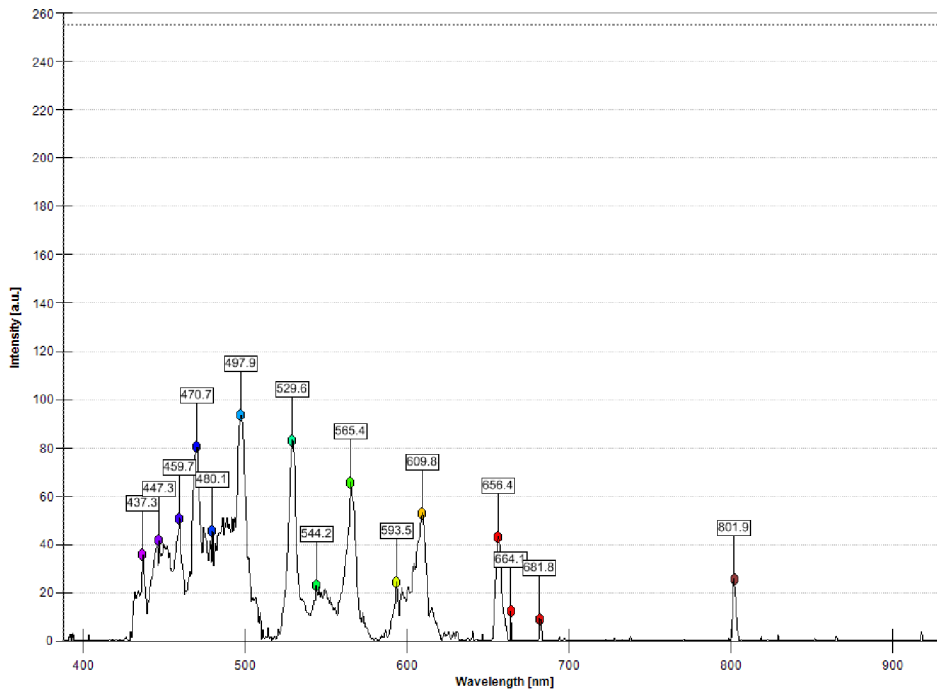
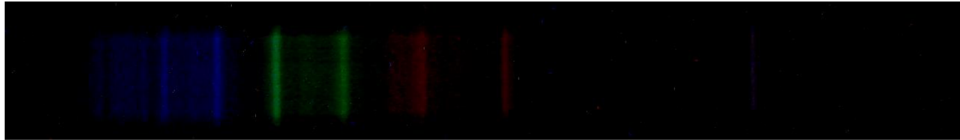
Krypton



Brom



Rtu2



Jód