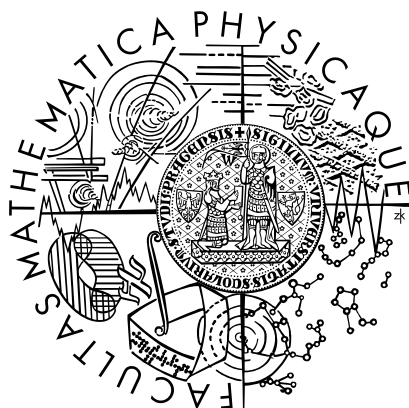


Univerzita Karlova v Praze
Matematicko–fyzikální fakulta

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Jan Klusoň

Experimentální systém pro přípravu tenkých vrstev pro mikrovlnné obvody v pásmu 10 GHz

Katedra elektroniky a vakuové fyziky

Vedoucí bakalářské práce: Prof. RNDr. Milan Tichý, DrSc.

Studijní program: Obecná fyzika

2006

Děkuji svému vedoucímu panu Prof. RNDr. Milanu Tichému, DrSc. za ochotu a pomoc během celé práce. Zvláště důležitá pro mě byla jeho častá a trpělivá pomoc při sestavování spínacího obvodu, neboť do té doby jsem neměl s praktickou elektronikou žádné zkušenosti. Za pomoc při prověřování sestaveného spínacího obvodu děkuji rovněž oponentovi této práce panu Mgr. Pavlu Kudrnovi, Dr. Zvláštní poděkování patří paní Prof. RNDr. Janě Šafránkové, DrSc. a panu RNDr. Janu Wildovi, CSc. za ochotnou průběžnou kontrolu práce v rámci katedrálního semináře. Nechtěl bych opomenout časté rady a asistenci studentů vyšších ročníků v laboratoři.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a s jejím zveřejněním.

V Praze dne 24.5.2006

Jan Klusoň

Obsah

| | |
|---|---------------|
| 1. PŘÍPRAVA TENKÝCH VRSTEV POMOCÍ NÍZKOTEPLNÍHO PLAZMATU | - 4 - |
| 1.1. NANÁŠENÍ PROSTŘEDNICTVÍM NÍZKOTLAKÉHO TRYSKOVÉHO VÝBOJE..... | - 6 - |
| 1.1.1. <i>Experimentální uspořádání</i> | - 6 - |
| 1.1.2. <i>Plazma uvnitř reaktoru</i> | - 7 - |
| 1.1.3. <i>Optická diagnostika tryskového výboje</i> | - 8 - |
| 1.1.4. <i>Buzení tryskového výboje</i> | - 12 - |
| 1.1.5. <i>Vícetrykový systém</i> | - 16 - |
| 1.2. VYSOKOTLAKÝ TRYSKOVÝ SYSTÉM PRO NANÁŠENÍ TENKÝCH VRSTEV | - 18 - |
| 1.3. VÁLCOVÝ MAGNETRON..... | - 20 - |
| 2. TRYSKOVÁ APARATURA NA KEVF MFF UK..... | - 21 - |
| 3. CÍL PRÁCE..... | - 21 - |
| 4. SPÍNACÍ OBVOD PRO GENEROVÁNÍ NAPĚŤOVÝCH PULZŮ | - 22 - |
| 4.1. KONSTRUKCE SPÍNACÍHO OBVODU | - 22 - |
| 4.2. MĚŘENÍ PARAMETRŮ SPÍNACÍHO OBVODU..... | - 24 - |
| 5. ZÁVĚR..... | - 29 - |
| 6. LITERATURA | - 30 - |

Abstrakt

Název práce: Experimentální systém pro přípravu tenkých vrstev pro mikrovlnné obvody v pásmu 10 GHz

Autor: Jan Klusoň

Katedra: Katedra elektroniky a vakuové fyziky

Vedoucí bakalářské práce: Prof. RNDr. Milan Tichý, DrSc.

e-mail vedoucího: milan.tichy@mff.cuni.cz

Abstrakt: Metody využívající plazma představují velmi dobrý nástroj pro nanášení tenkých vrstev. Byla vyvinuta řada technik pro plazmové nanášení. Mezi nejvýznamější patří nanášení tryskou, fungující na principu výboje v duté katodě nebo bariérového výboje, a nanášení technologickým magnetronem. Tato práce seznamuje především s problematikou tryskového nanášení s efektem duté katody. Vlastnosti vznikajících vrstev závisí na parametrech plazmatu, které jsou ve velké míře určeny způsobem buzení výboje. Snahou je vytvořit plazma o vysoké chemické reaktivitě, jež však svou teplotou nenarušuje povrch substrátu. Z tohoto hlediska je perspektivní pulzní buzení výboje, kdy je substrát vystaven velmi intenzivním podmínkám jen během relativně krátké aktivní části cyklu. Hlavním předmětem této práce bylo sestavení spínacího obvodu pro stejnosměrné pulzní buzení výboje.

Klíčová slova: tenká vrstva, výboj v duté katodě, buzení výboje, spínací obvod

Abstract

Title: The Experimental System for Preparation of Thin Layers for Microwave Circuits in the Band of 10 GHz

Author: Jan Klusoň

Department: Department of Electronics and Vacuum Physics

Supervisor: Prof. RNDr. Milan Tichý, DrSc.

Supervisor's e-mail address: milan.tichy@mff.cuni.cz

Abstract: The methods using plasma represent a very good tool for a deposition of thin layers. A number of technologies for the plasma deposition has been developed. Among the most important ones there are plasma jet deposition techniques functioning on the principle of the hollow cathode discharge or barrier torch discharge and deposition by means of a technological magnetron. This thesis gives information about problems related to the jet deposition with the hollow cathode effect above all. Properties of arising layers depend on the plasma parameters which are determined by the excitation mode of discharge extensively. There is an effort to form highly chemically reactive, i.e. high density plasma. Nevertheless, the plasma should not overheat the substrate. From this point of view the pulse excitation mode, when the substrate is exposed to very intensive conditions only during a relatively short active part of the cycle, seems to be forward-looking. The aim of the bachelor project was constructing a switching circuit for the pulse DC discharge excitation.

Keywords: thin layer, hollow cathode discharge, excitation of discharge, switching circuit

1. Příprava tenkých vrstev pomocí nízkoteplotního plazmatu

Nanášení tenkých vrstev lze efektivně provádět metodami, které využívají nízkoteplotní plazma. Aplikací těchto metod je možné deponovat vrstvy materiálů se zajímavými fyzikálními a chemickými vlastnostmi, a proto plazmové nanášení nachází široké průmyslové uplatnění. Plazmovou depozicí lze vytvořit tvrdé ochranné vrstvy, antikoroziční vrstvy, vrstvy se speciálními optickými nebo elektrickými vlastnostmi. Důležitou roli tudíž plazmové metody hrají např. ve strojírenství. Zvláště podstatnou a stále perspektivní oblastí využití jsou aplikace v mikroelektronice, neboť zásadní význam má příprava tenkých vrstev v planární technologii pro výrobu integrovaných obvodů. Důležitá je také skutečnost, že obecně metody využívající plazmatu jsou ekologicky čisté a mohou nahradit některé chemické postupy, které jsou k životnímu prostředí naopak značně nešetrné.

Pro plazmové nanášení tenkých vrstev bylo dosud vyvinuto velké množství různých technologií. Velice významné jsou metody depozice nových materiálů prostřednictvím aparatury s plazmovou tryskou nebo magnetronem. Pomocí plazmové trysky byly například úspěšně nanášeny následující vrstvy:

- tribologické: TiO_2 , TiN , Cu_3N , CN_x
- dielektrické: $\text{Li}_{1-x}\text{Zn}_x\text{O}$
- feroelektrické: $\text{PbZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$, $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ (BSTO), SrTiO_3 (STO)¹
- polovodičové pro sluneční kolektory: Si:H , SiGe:H
- piezoelektrické: ZnO
- LiCoO_2 , LiMn_2O_4 pro výrobu elektrod do Li-ion mikrobaterií

V případě technologického magnetronu se jedná o SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , MgO a další. Jako substráty mohou být použity nejen materiály s vysokou teplotní odolností, ale rovněž citlivější materiály např. polymerního charakteru. To je umožněno skutečností, že plazma ve výboji je neizotermické. Zatímco efektivní teplota neutrálního plynu se pohybuje na úrovni pokojové nebo mírně zvýšené teploty do cca 200°C , elektronová teplota dosahuje hodnot v jednotkách elektronvoltů, tedy několika desítek tisíc stupňů. Další výrazné zvýšení šetrnosti vůči deponovanému substrátu lze získat použitím pulzního buzení výboje. V takové situaci představuje délka pulzu jen malou část pracovního cyklu a substrát je zahříván v podstatně

¹ BSTO a STO představují feroelektrické látky s vysokou relativní permitivitou. Jedná se o perspektivní materiál pro výrobu kondenzátorů a dalších elektronických prvků pro mikrovlnné obvody.



Obr. 1: UHV aparatura pro nanášení tenkých vrstev ve Fyzikálním ústavu AV ČR (obrázek převzat z www stránek <http://www.fzu.cz>)

nižší míře než při buzení kontinuálním. S výhodou lze pomocí plazmové trysky deponovat vrstvy na předměty se složitějšími geometrickými tvary.

Z hlediska kontroly a reprodukovatelnosti dané metody je velmi důležitá diagnostika plazmatu během procesu nanášení. Diagnostika spočívá v určování nejdůležitějších parametrů plazmatu. Mezi tyto parametry patří především chemické složení plazmatu, koncentrace přítomných elektronů a iontů, střední kinetická energie nabitých částic (určuje jejich teplotu) a intenzita působících silových polí. Pro systém s plazmovou tryskou se používají dvě základní diagnostické metody – sondová a optická diagnostika. Sondová diagnostika v podobě elektrostatické Langmuirovy sondy představuje přímé měření voltampérové charakteristiky uvnitř plazmatu. Nevýhoda spočívá v zásahu do

plazmatu samotnou přítomností sondy. Sonda musí být uzpůsobena tak, aby její interakce s plazmatem byla minimální – běžně se jedná o velmi tenký drát z vysoce odolného materiálu (W, Pt). Optickou metodou analyzujeme spektrum vyzařované excitovanými částicemi v plazmatu. V případě molekul musíme při vyhodnocování kromě elektronových kvantových stavů uvažovat ještě stavy rotační a vibrační, což je zpravidla dosti komplikovaná záležitost.

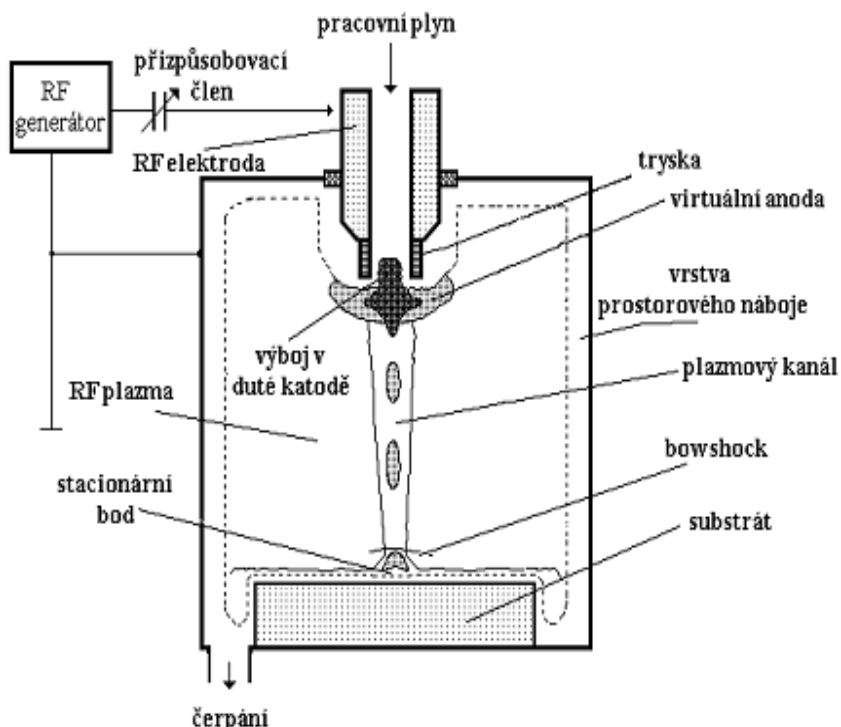
Ústředním tématem této kapitoly je popis nanášení tenkých vrstev prostřednictvím nízkotlakého výboje s efektem duté katody. Aparatura pro realizaci takové metody je na KEVF MFF UK v současné době sestavována. Funkční aparatura se nachází ve Fyzikálním ústavu AV ČR (viz obr.1), kde na ní již byla provedena řada měření. Níže uvedené informace a experimentální výsledky byly získány především tam. V závěru kapitoly se nachází oddíl věnovaný metodě vysokotlakého nanášení a základní popis principu válcového magnetronu. Válcový magnetron je rovněž součástí laboratoře na KEVF MFF UK.

1.1. Nanášení prostřednictvím nízkotlakého tryskového výboje

1.1.1. Experimentální uspořádání

Experiment probíhá v kontinuálně čerpané reaktorové nádobě, přičemž tlak uvnitř bývá udržován na hodnotě v rozmezí $1-10^4$ Pa. Nerezová reaktorová nádoba je uzemněná. Dovnitř je zavedena izolovaná dutá válcová elektroda, na jejímž konci ústícím do reaktoru se nachází tryska. Průměr trysky se pohybuje v řádu několika milimetrů. Elektroda je chlazena destilovanou vodou. Otvorem v elektrodě přes trysku je do aparatury vháněn pracovní plyn. Jako pracovní plyn se standardně používá např. helium, argon nebo dusík. Kolmo k trysce v horizontální rovině je umístěn substrát, aby plazma proudící z trysky dopadalo svisle na povrch určený k nanášení. Substrát je položen na uzemněné elektrodě. Schematické znázornění experimentálního uspořádání pro případ radiofrekvenčního buzení výboje představuje obr.2. Na obrázku jsou rovněž zakresleny fyzikálně zajímavé oblasti, jejichž význam bude vysvětlen níže. Podrobnější popis aparatury je uveden např. v [1].

Ve standardních průmyslových technologiích nanášení tenkých vrstev pomocí plazmatu je zpravidla plazma generováno výbojem mezi rovinnými elektrodami. Výhoda popsaného tryskového systému spočívá ve vysoké chemické aktivitě vzniklého plazmatu a rovněž ve skutečnosti, že díky trysce zformovaný plazmový kanál představuje velmi dobře lokalizované plazma. Za takových podmínek lze deponovat i na povrchy komplikovanějších geometrických tvarů jako jsou např. vnitřní stěny dutin.



Obr. 2: Obrázek převzat z www stránek Fyzikálního ústavu AV ČR (<http://www.fzu.cz>). Schematicky zachycuje uspořádání aparatury pro realizaci nízkotlakého výboje v duté katodě při radiofrekvenčním buzení a s nadzvukovým tokem pracovního plynu.

1.1.2. Plazma uvnitř reaktoru

V rámci nejrůznějších technologií nanášení tenkých vrstev dělíme jednotlivé metody do dvou základních skupin – na metody chemické a metody fyzikální. Prostřednictvím nízkotlakého tryskového výboje můžeme realizovat depozice spadající do obou kategorií. Rozdíl mezi nimi prakticky spočívá ve skutečnosti, zda dochází během průchodu pracovního plynu tryskou k odprašování trysky či nikoliv:

- i. *Metoda chemická* (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition - PECVD). Pracovní plyn představuje chemicky reaktivní směs. Její jednotlivé složky v plazmatu při dopadu na povrch substrátu reagují a vytvářejí tak tenkou vrstvu. Příkladem látky nanášené touto metodou je nitrid křemíku. Směs pracovního plynu se skládá z dusíku a 3% silanu rozpuštěného v argonu.
- ii. *Metoda fyzikální* (Physical Vapour Deposition - PVD). Nanášená látka je obsažena přímo v samotné trysce. Při průchodu pracovního plynu tryskou dochází k odprašování materiálu z trysky. Typickým příkladem užití metody PVD je nanášení tenkých vrstev nitridu germania – Ge_3N_4 , dále např. Cu_3N nebo Al_2O_3 .

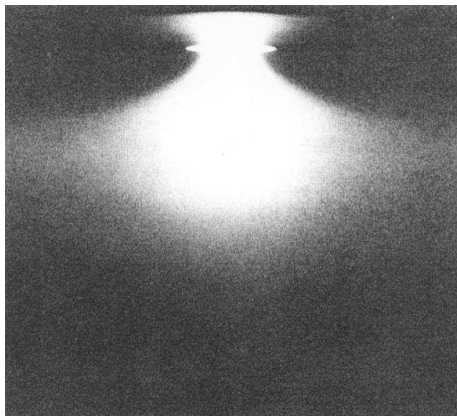
Plazma je v reaktoru generováno prostřednictvím výboje. Na dutou katodu je z generátoru přivedeno napětí. Používají se čtyři odlišné průběhy napětí: střídavé radiofrekvenční (RF), a sice modulované nebo nedomulované (CW), kontinuální stejnosměrné (DC) a pulzní stejnosměrné. Pokud je výkon dodávaný ze zdroje nízký v tom smyslu, že nepřekročí určitou mez (pro RF přibližně 20W), probíhá v reaktoru výboj mezi dutou katodou a elektrodou, na níž je položen substrát. Jakmile však uvolněný výkon dosáhne zmíněné hranice, dojde k zapálení intenzivního výboje přímo uvnitř duté katody. Fyzikální podstata výboje v duté katodě je následující. V bezprostředním okolí duté katody se náboj v plazmatu rozloží takovým způsobem, aby eliminoval elektrické pole vytvořené katodou. Právě toto stínící prostorové rozložení náboje představuje zdroj elektromagnetického pole pro vznik výboje uvnitř duté katody. Superpozici výboje v duté katodě a výboje uvnitř samotné trysky označujeme jako tryskový výboj.

Plazma vytvořené uvnitř katody má dobře definované parametry a vykazuje vysokou chemickou aktivitu. Podle článku [1] bylo experimentálně ověřeno, že chemická aktivita přímo souvisí s intenzitou procesů probíhajících v plazmatu. Procesy v plazmatu je míněna především excitace a ionizace molekul neutrálního plynu. Míru procesů v plazmatu v daném místě je možné určit prostřednictvím studia intenzity světla z tohoto místa emitovaného. Pokud například pomocí elektronového svazku excitujeme neutrální částice pracovního plynu,

pak částice při návratu do základního stavu emitují viditelné světlo. K jeho detekci často stačí pouhé snímání digitální kamerou. Excitace částic pracovního plynu může proběhnout rovněž v důsledku samotného výboje uvnitř reaktoru. Potom je hustota částic emitujících světlo n_{em} úměrná hustotě částic neutrálního plynu n_g a hustotě elektronů s dostatečnou energií k excitaci neutrální částice n_{eH} . Platí: $n_{em} = konst. n_g n_{eH}$.

1.1.3. Optická diagnostika tryskového výboje

V [1] bylo sledováno rozložení intenzity procesů v plazmatu tryskového výboje pro nadzvukovou a podzvukovou rychlost toku pracovního plynu (v tomto případě N_2). Ukazuje se totiž, že obě situace mají odlišný charakter. Celá oblast mezi tryskou a povrchem substrátu v reaktoru byla snímána CCD kamerou (viz ilustrační obr. 3). Snímání probíhalo přes interferenční filtr pro vlnovou délku 400 nm, která odpovídá záření N_2 . Grafické znázornění dosažených výsledků pro oba případy představují obrázky 4, resp. 5. Hlavní rozdíl mezi

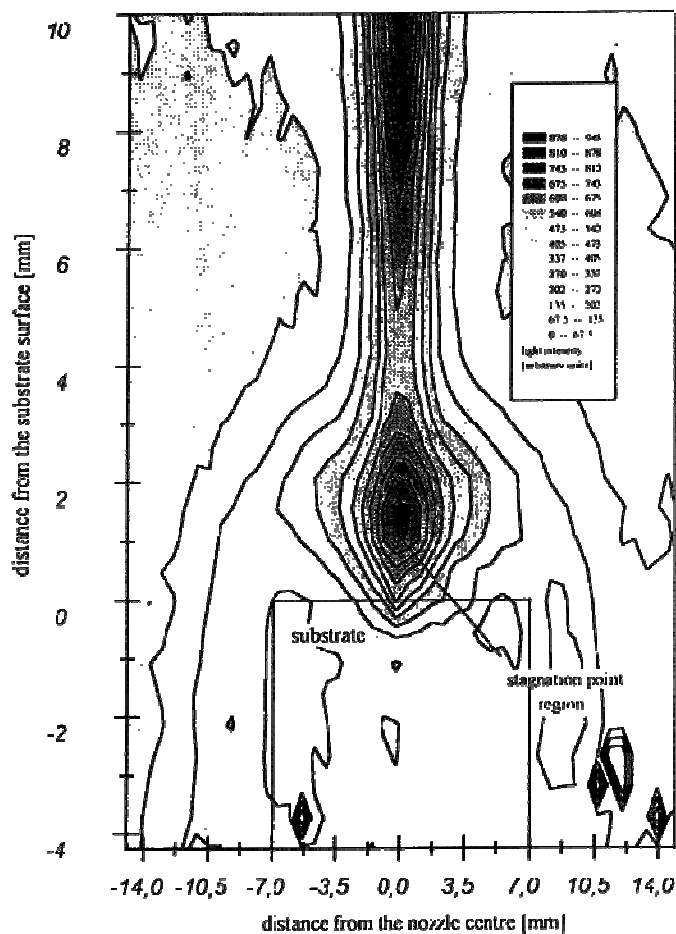
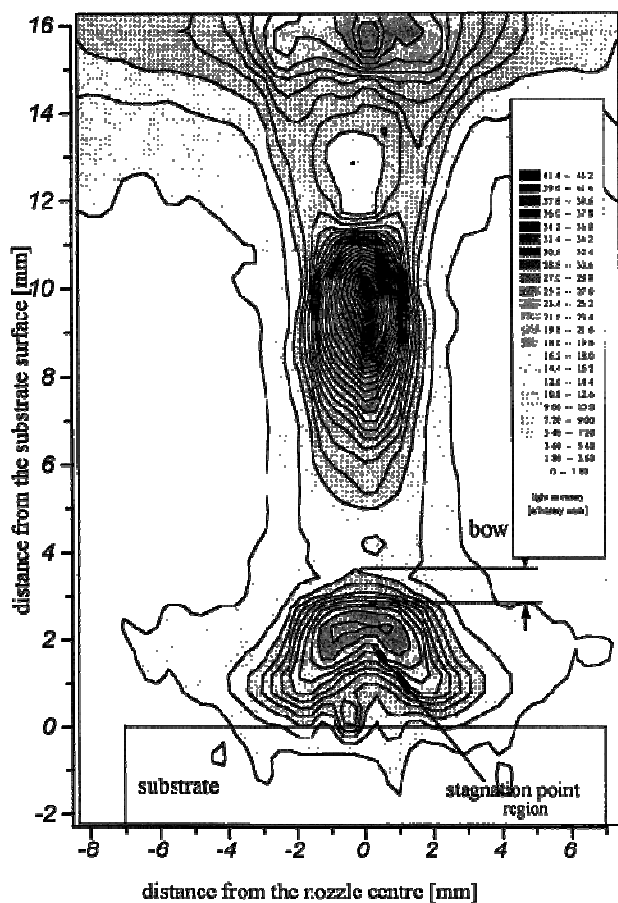


Obr. 3: Tryskový výboj při nulovém toku pracovního plynu do aparatury. Převzato z [2].

oběma situacemi spočívá ve skutečnosti, že v případě nadzvukového proudění se v plazmatu vytvoří rázová vlna (angl. bow shock). Jedná se o oblast, v níž dochází k náhlému poklesu rychlosti proudícího plazmatu a jejímu přechodu z nadzvukové na podzvukovou. Prudký pokles rychlosti je spojen s významným nárůstem tlaku a teploty pracovního plynu. Daná skutečnost ovlivňuje chování plazmatu v prostoru těsně nad substrátem. Jak je patrné z obrázku 4, pro nadzvukové proudění intenzita procesů v plazmatu na ose trysky směrem od rázové vlny k substrátu nejprve stoupá a následně opět klesá. V případě proudění podzvukového se

v těsné blízkosti substrátu vyskytuje oblast vyšší intenzity procesů v plazmatu, neboť tam narůstá tlak pracovního plynu. Tato oblast se nazývá stacionární bod (stagnation point).

Situaci nadzvukového proudění lze vysvětlit následujícím způsobem: Za rázovou vlnou dosahuje tlak v plazmatu vyšší hodnoty, což je příčinou častějších srážek mezi elektrony a molekulami neutrálního plynu. Některé elektrony mají dostatečnou energii, aby neutrální částice excitovaly nebo ionizovaly. Během srážek však kinetickou energii ztrácejí, a tudíž blíže k substrátu ve směru driftu dochází opět k poklesu intenzity plazmatických procesů.



Obr. 4 (vlevo) a 5 (vpravo): Převzato z [1]. Rozdělení světelné intenzity pro nadzvukový, resp. podzvukový tok pracovního plynu, tj N_2 , při použití interferenčního filtru pro vlnovou délku 400 nm. Obrázky byly získány na základě počítačového zpracování obrazu z CCD kamery. Parametry pro nadzvukový tok: průtok 900 sccm, RF výkon 75 W, parametry pro podzvukový tok: průtok 400 sccm, RF výkon 60 W.

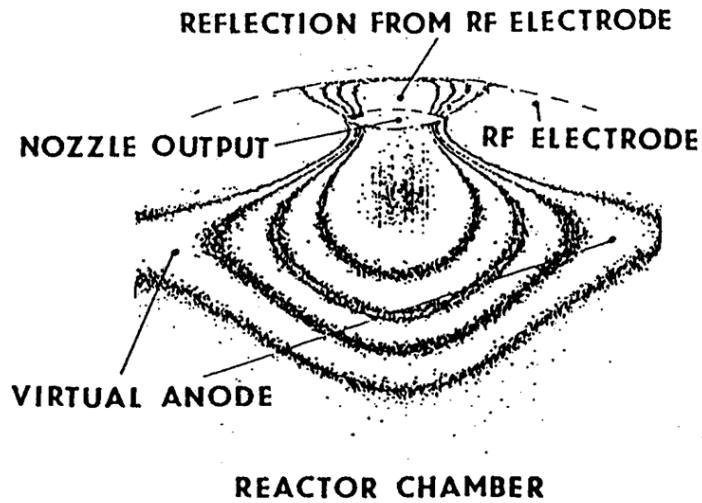
Podrobná optická diagnóza tryskového výboje byla provedena v [2]. Předmětem pozorování bylo chování tryskového výboje v závislosti na toku pracovního plynu do aparatury. Za pracovní plyn byl zvolen dusík, použitá tryska měla průměr 4 mm a výkon dodávaný z vysokofrekvenčního zdroje 27,12 MHz činil přibližně 50 W. Výboj byl monitorován digitální kamerou a získané snímky softwarově zpracovány. Molekuly pracovního plynu emitující světlo nebyly excitovány dopadem elektronového svazku, ale přímo v hořícím výboji. Tok plynu byl postupně zvyšován z nulové hodnoty až na maximum přibližně $3 \cdot 10^{-3} \text{ Pa m}^3/\text{s}$. Tato hodnota je určena tlakem pracovního plynu na vstupu do aparatury a parametry čerpacího systému. Aby bylo možné sledovat probíhající výboj při měnícím se toku pracovního plynu za pevně zvoleného tlaku, musí být součástí aparatury dostatečně výkonný čerpací systém. V opačném případě s tokem plynu přímo souvisí tlak

uvnitř reaktoru. V provedeném experimentu nebyla rozlišena závislost chování tryskového výboje na toku pracovního plynu a na tlaku plynu v reaktoru.

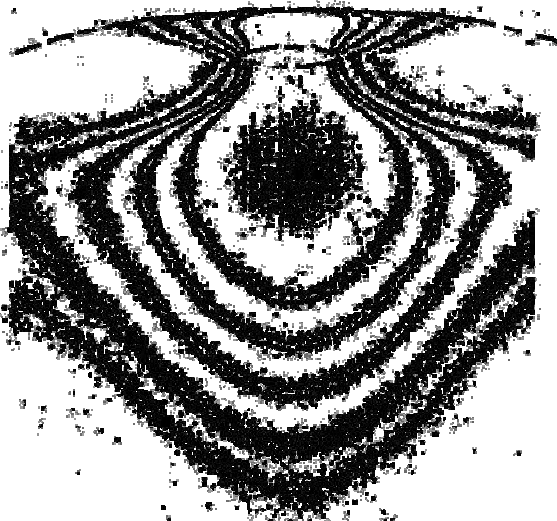
V sérii obrázků 6 až 10 je zachycen postupný vývoj tryskového výboje se vzrůstajícím tokem pracovního plynu. Počítačovým vyhodnocením snímků z digitální kamery byly do obrázků vykresleny čáry spojující místa o stejné intenzitě vyzařování – isodensity (isointensity). Čárkovanou čarou nakreslená elipsa v horní části obrázků symbolizuje ústí trysky. Pokud pracovní plyn v reaktoru vůbec neproudí (odpovídající minimální dosažený tlak asi 1 Pa), je z grafického znázornění jasně patrný difúzní charakter chování plazmatu (situace na fotografii na obr.3). Plazma se v poměrně široké oblasti v okolí trysky jeví jako homogenní, tvar isodensit se blíží půlkružnicím – viz obr.6. Se zvyšujícím se tokem plynu vzrůstá význam konvekčního toku v plazmatu a plynule se objevuje plazmový kanál. Markantní formování plazmového kanálu je znatelné již při toku $6 \cdot 10^{-4}$ Pa m³/s. Isodensity se tak ve vertikálním směru zakřivují a přecházejí ve válcové plochy. Jakmile rychlost toku pracovního plynu překročí rychlost zvuku (obr.9), zaujímá plazmový kanál téměř definitivní podobu. K dosažení rychlosti zvuku došlo při toku plynu přibližně $1 \cdot 10^{-3}$ Pa m³/s a tlaku 70 Pa. S pokračujícím nárůstem toku se již tvar plazmového kanálu kvalitativně nemění. Průměr plazmového kanálu se významně neliší od průměru trysky, směrem od trysky k substrátu se pozvolna zužuje. Hranice mezi plazmovým kanálem a jeho okolím je ostrá. Proudící plazma je tak velmi dobře lokalizované, což v důsledku umožňuje jeho využití rovněž k narušování či úpravě povrchu substrátu.

Na obrázcích je dále zachyceno výrazné výbojové jádro rozložené v horizontální vrstvě kolmo na osu trysky a to v jejím bezprostředním okolí. Šířka tohoto jádra dosahovala nejvyšší hodnoty při minimálním toku plynu a s jeho vzestupem monotónně klesala. Tento jev je pravděpodobně zapříčiněn vzrůstajícím tlakem v reaktorové nádobě, a tedy vzrůstajícím tokem plynu (v popisovaném experimentu nebyla možnost měnit nezávisle tlak v reaktoru a proud plynu). Samotná existence pozorovaného výbojového jádra je způsobena přítomností tzv. virtuální anody. Protože střídavý vysokofrekvenční signál je ke katodě veden přes sériově zapojený kondenzátor, nemůže stejnosměrná složka výbojového proudu téci přes vnější obvod. Z tohoto důvodu se v prostoru pod katodou vytvoří virtuální anoda. Přes ni dále protéká i střídavá složka výbojového proudu.

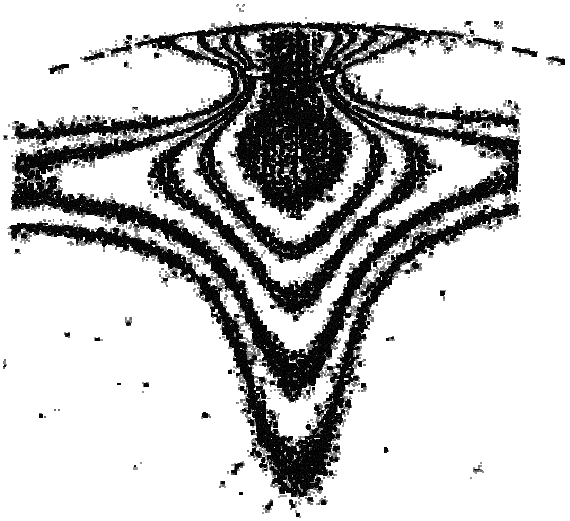
Nakonec si lze z fotografie na obrázku 3 všimnout šířky stínění prostorovým nábojem u vnitřního povrchu trysky, tj. oblasti odkud není detekováno žádné světlo. Šířka se během experimentu znatelně neměnila, pro všechny hodnoty toku pracovního plynu do reaktoru představovala zhruba jednu osminu šířky trysky.



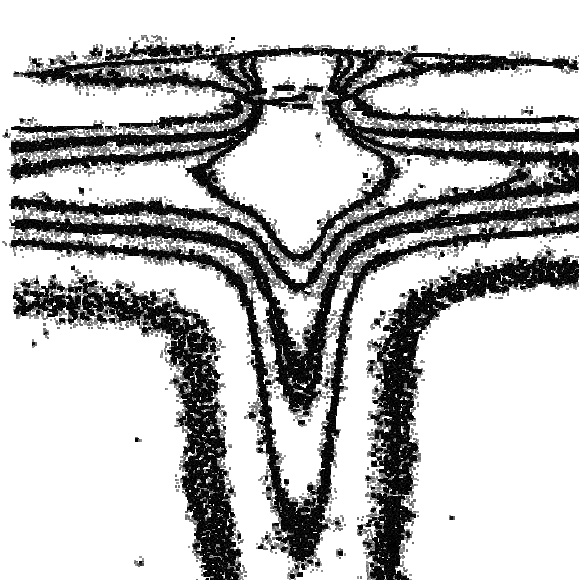
Obr. 6 – 10. Převzato z [2]. Vývoj tryskového výboje při postupném zvyšování toku pracovního plynu – znázornění pomocí spojnic míst se stejnou intenzitou vyzařovaného světla. Čárkovanou čarou nakreslená elipsa na obrázcích symbolizuje ústí trysky – šířka trysky 4 mm. Použitý pracovní plyn N_2 . Obr.6 odpovídá situaci s nulovým tokem pracovního plynu Φ , tlak v reaktoru $p = 1$ Pa. Následující obrázky zachycují stav při zvyšujícím se tlaku a toku plynu.



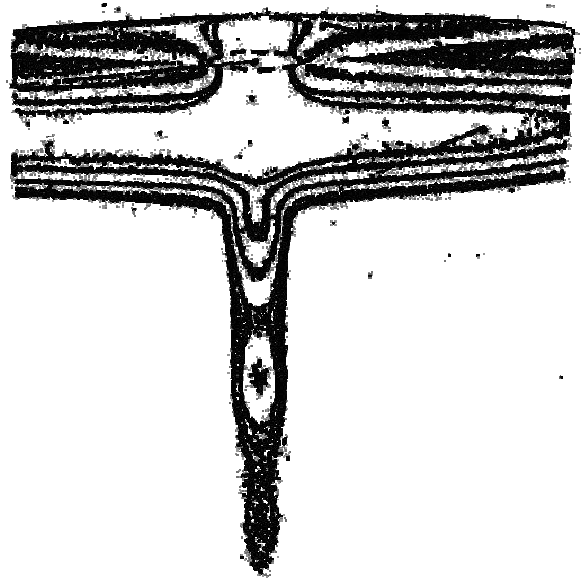
Obr. 7: $\Phi = 3 \cdot 10^{-4}$ Pa m³/s; $p = 30$ Pa



Obr. 8: $\Phi = 6 \cdot 10^{-4}$ Pa m³/s; $p = 50$ Pa



Obr. 9: $\Phi = 1,2 \cdot 10^{-3}$ Pa m³/s; $p = 70$ Pa

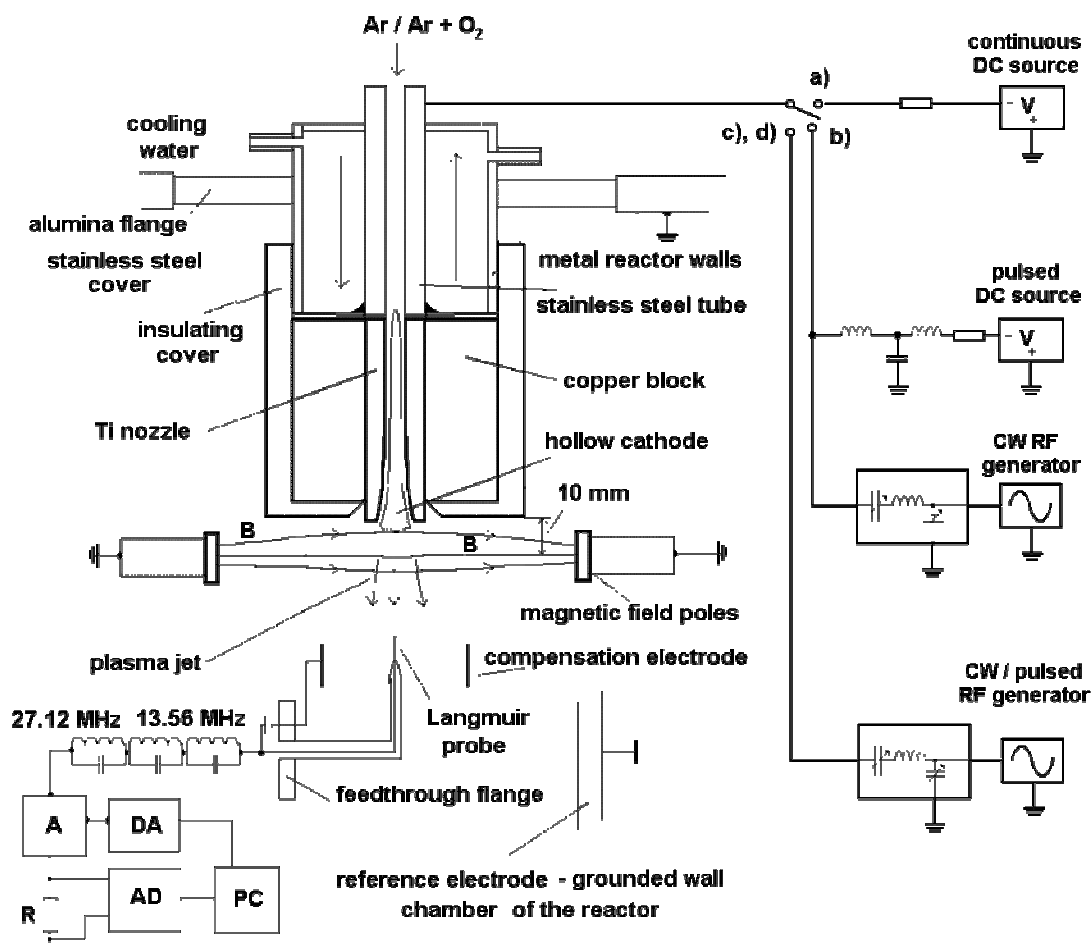


Obr. 10: $\Phi = 2,7 \cdot 10^{-3}$ Pa m³/s; $p = 200$ Pa

1.1.4. Buzení tryskového výboje

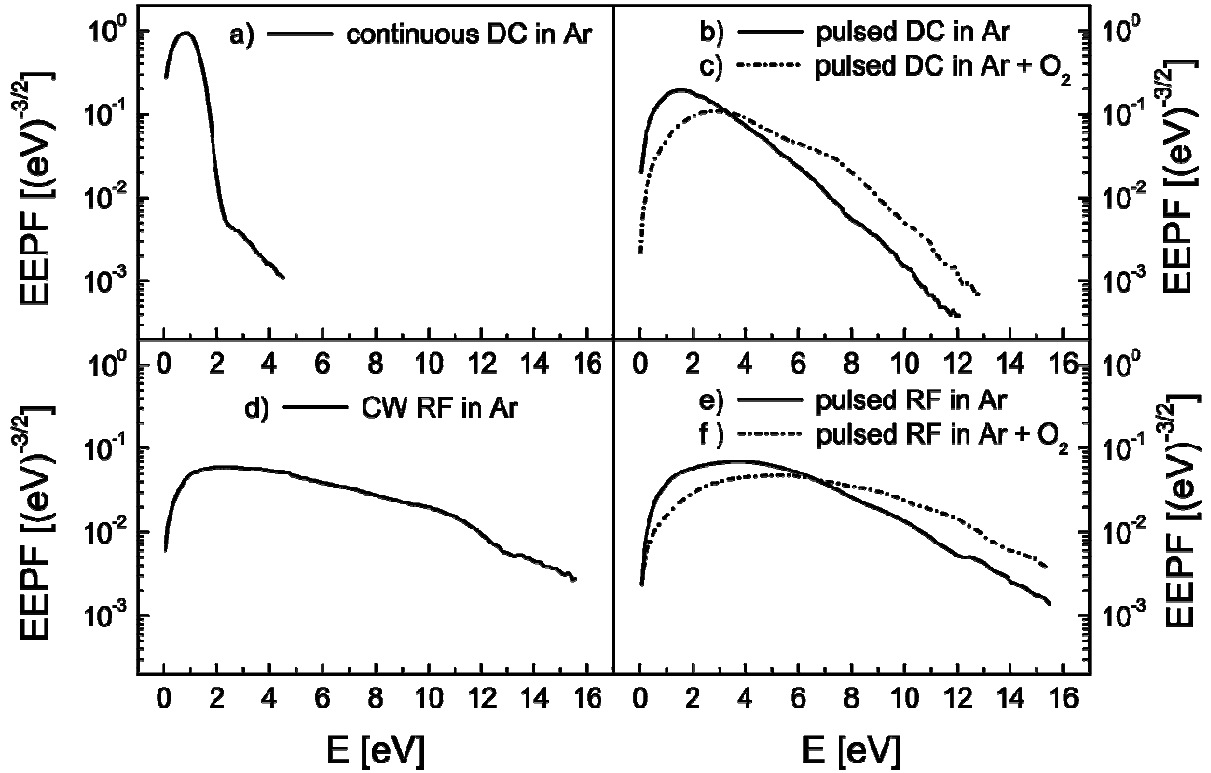
Nízkotlaký tryskový výboj může být iniciován prostřednictvím různých průběhů napětí přiváděných na katodu. Standardně se používají tři způsoby buzení – průběh přivedeného napětí je: radiofrekvenční (RF), impulsně modulovaný radiofrekvenční nebo kontinuální stejnosměrný (DC). V současnosti se dále provádějí experimenty s pulzním stejnosměrným buzením, které se díky některým svým vlastnostem jeví jako perspektivní. Především je během pulzu dosaženo uvnitř katody vysoké proudové hustoty, jež má za následek výraznější odprašování katody a celkově intenzivnější podmínky pro nanášení. Důležitá je rovněž skutečnost, že substrát je vystaven hustému plazmatu pouze po malou část periody pracovního cyklu, a je tedy méně tepelně namáhán.

Předmětem studie [3] bylo porovnat fyzikální podmínky v reaktoru ustavené během výboje generovaného pulzním DC zdrojem s podmínkami při aplikaci ostatních dosud používaných typů buzení. Schéma experimentální aparatury ukazuje obr.11. Uspořádání je principiálně totožné s výše uvedeným uspořádáním pro realizaci nízkotlakého výboje v duté katodě. Novým prvkem je přiložení magnetického pole ($B = 0,02$ T) do oblasti okolo trysky, ve směru k ní kolmém. Tímto způsobem je v dané oblasti dosaženo vyšší hustoty plazmatu. Do prostoru dále od trysky však magnetické pole prakticky nezasahuje. K dispozici byly generátory pro všechny čtyři zmíněné excitační módy. Během pulzního DC buzení byl ke katodě připojen ještě slabý RF zdroj z důvodu stabilizování výboje. Vysokofrekvenční generátory pracovaly na frekvenci 13,56 MHz. V případě pulzního buzení byly pulzy generovány s frekvencí 100 Hz až 1 kHz, přičemž délka aktivní části cyklu se pohybovala v rozmezí od 500 μ s do 1 ms. Střední výkon činil 0-500 W, okamžitý výkon v pulzu překročil hodnotu 1 kW. Jako pracovní plyn byl do aparatury vháněn čistý Ar nebo směs Ar s O₂. Tlak uvnitř reaktoru byl udržován na hodnotě 6 Pa během všech provedených měření. Titanová tryska byla procházejícím pracovním plynem kontinuálně odprašována. Pokud by byl do aparatury vložen substrát, docházelo by tak na jeho povrchu k depozici oxidů titanu. Kolmo k siločarám magnetického pole proti trysce byla umístěna Langmuirova sonda. Napětí na sondě bylo měřeno vzhledem k uzemněné reaktorové nádobě. Při pulzních měřeních byla sonda synchronizována s generátorem, aby bylo možné získat sondovou charakteristiku s požadovaným časovým zpožděním oproti vysílaným pulzům.

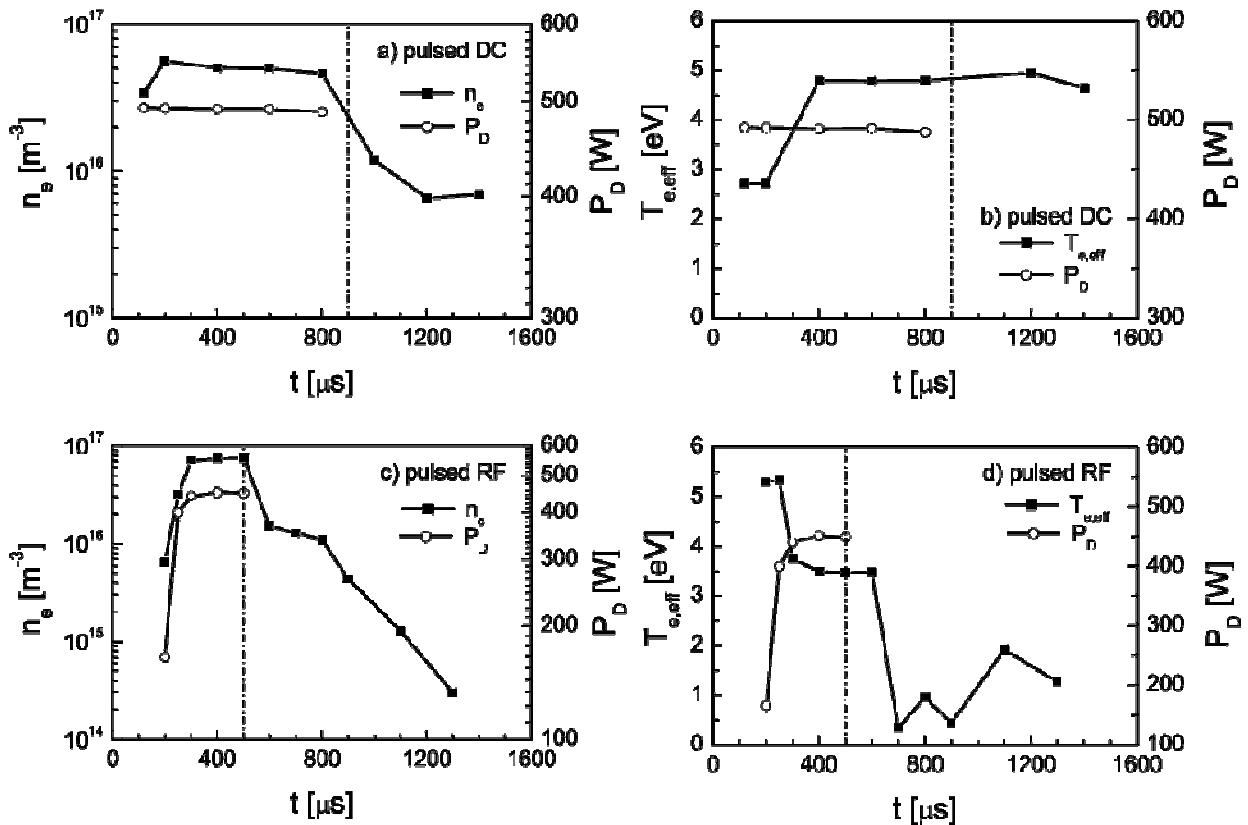


Obr. 11. Schéma uspořádání experimentu z [3]. Aparatura umožňuje provést srovnání parametrů plazmatu generovaného čtyřmi druhy excitačních módů.

Pomocí Langmuirovy sondy byla zjištěna elektronová rozdělovací funkce, elektronová hustota a efektivní elektronová teplota ve zkoumaném plazmatu. Na obrázku 12 vidíme elektronové rozdělovací funkce pro jednotlivé excitační módy. Elektronovou rozdělovací funkci lze určit z druhé derivace sondové charakteristiky. Tvar rozdělovací funkce pro RF a obě pulzní buzení se příliš neliší od tvaru Maxwell-Boltzmannova rozdělení. Kvalitativně odlišná je rozdělovací funkce u kontinuálního DC buzení, kde se jedná o tzv. bi-maxwellovské rozdělení. V této situaci se v plazmatu nacházejí dvě skupiny elektronů s rozdílnou efektivní teplotou. Zjištěná efektivní teplota chladnější skupiny činila 0,2 eV. Asi o řád vyšší byla efektivní teplota druhé skupiny, která se přibližně shodovala s efektivní teplotou elektronů v případě všech ostatních typů buzení. Bi-maxwellovské rozdělení bylo pozorováno i v jiných experimentech, a to nejen při kontinuálním stejnosměrném budícím módu. Pravděpodobným vysvětlením vzniku skupiny chladných elektronů jsou neelastické srážky s částicemi odprašovanými z katody. Hustota těchto částic je nejvyšší právě v plazmatu generovaném stejnosměrným napětím.



Obr. 12, převzato z [3]. Naměřené elektronové rozdělovací funkce (EEPF – elektron energy probability function) pro různé druhy excitačních módů. Grafy pro pulzní módy odpovídají situaci v polovině aktivní části pulzu.



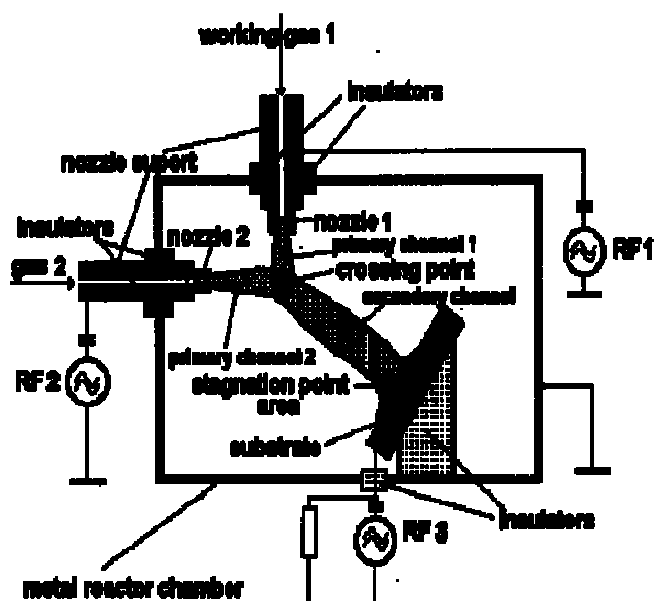
Obr. 13, převzato z [3]. Časový průběh elektronové koncentrace (vlevo) a efektivní elektronové teploty (vpravo) v plazmatu při pulzních budících módech. Jako pracovní plyn byl použit Ar: $\Phi = 82$ sccm. Časová osa je synchronizována se začátkem pulzů, konec pulzů je vyznačen svislou čerchovanou čarou.

Další zjišťovanou závislostí byla závislost proudové hustoty v trysce a výkonu absorbovaného ve výboji na okamžitém výbojovém proudu při stejnosměrném buzení. Protože proudová hustota uvnitř trysky není konstantní, byla v rámci srovnávání jednotlivých budících módů porovnávána její střední hodnota. Naměřená proudová hustota odpovídající pulznímu buzení $j = 11 \text{ kAm}^{-2}$ byla výrazně vyšší než při buzení kontinuálním, kdy dosahovala střední hodnoty $j = 2,5 \text{ kAm}^{-2}$. Kvalitativně shodné chování vykazoval absorbovaný výkon. Na základě takového výsledku lze u pulzního módu očekávat rovněž výrazně vyšší koncentraci elektronů v závislosti na okamžitém výbojovém proudu. Získané průběhy elektronové koncentrace n_e (byla vypočtena z elektronové části sondového proudu) se však od těchto předpokladů lišily. Elektronová koncentrace byla výrazně vyšší v případě kontinuálního buzení. Pozorovaný jev lze vysvětlit tím způsobem, že během měření nebylo dosaženo stacionárního stavu. Jestliže bychom prodloužili aktivní část pulzu (během experimentu $900 \mu\text{s}$), elektronová hustota by se zvýšila. Zároveň by pravděpodobně elektronová rozdělovací funkce přešla od maxwellovské na bi-maxwellovskou, jaká byla zjištěna u stejnosměrného DC módu.

Na obrázku 13 jsou zachyceny časové průběhy elektronové koncentrace a efektivní elektronové teploty v plazmatu při pulzních excitačních módech. Použitým pracovním plynem byl argon. Elektronové koncentrace byly vypočteny ze sondového elektronového proudu a efektivní elektronové teploty ze středních energií elektronů získaných integrací elektronových rozdělovacích funkcí z obr. 12. Začátek měření byl synchronizován s náběhem pulzu, zánik pulzu je v grafech vyznačen svislou čerchovanou čarou. Do všech grafů na obrázku je pro srovnání zakreslen rovněž časový vývoj výkonu absorbovaného ve výboji. Z grafů je patrné, jak probíhá změna parametrů plazmatu na začátku aktivní části pulzu. V případě pulzního DC buzení začala elektronová koncentrace po asi $100 \mu\text{s}$ prudce narůstat a během dalších $100 \mu\text{s}$ dosáhla cílové hodnoty. Chování elektronové koncentrace při pulzním RF buzení bylo kvalitativně stejné, lišilo se pouze v přibližně dvojnásobné reakční době. Změna elektronové koncentrace se promítla do průběhu efektivní elektronové teploty. Elektronová teplota u pulzního DC módu skokově stoupla, zatímco u pulzního RF módu naopak skokově klesla. Ostré změny obou sledovaných veličin pravděpodobně souvisí s inicializací výboje v duté katodě (S jistým časovým odstupem od začátku pulzu přejde klasický výboj na výboj tryskový). Zajímavá je skutečnost, že absorbovaný výkon u pulzního DC módu byl po celou dobu aplikace pulzu téměř konstantní.

1.1.5. Vícetryskový systém

Jestliže zavedeme do reaktoru dvě nebo více nezávisle napájených trysek, můžeme pozorovat plazma vzniklé složením výbojů v několika dutých katodách. Za takovéto situace jsou zvláště významné chemické reakce, jež v reaktoru probíhají. Nejedná se již pouze o reakce mezi pracovním plynem a látkami odprašovanými z povrchu trysky, ale rovněž o reakce mezi pracovními plyny z jednotlivých trysek, které mohou být v principu odlišné. Jejich zásluhou lze nanášet v podobě tenkých vrstev komplikovanější chemické sloučeniny nebo na povrchu substrátu vytvářet vícevrstvé struktury.



Obr. 14 schéma experimentálního uspořádání dvoutryskového systému. Každá ze tří elektrod je napájena ze samostatného RF generátoru. Převzato z [4].

Na obrázku 14 je zobrazeno schematické uspořádání dvoutryskového systému, jaké bylo použito v experimentu podle [4]. Napětí bylo na každou dutou katodu přivedeno ze samostatného RF generátoru. Tím je umožněno snáze dosáhnout požadovaných podmínek v reaktoru a měnit parametry plazmatu v jednotlivých výbojích nezávisle na sobě. Elektroda spojená se substrátem byla izolována od reaktorové nádoby a rovněž připojena k samostatnému RF zdroji. Výkonem tohoto generátoru bylo možné ovlivňovat stejnosměrné záporné předpětí substrátu. Řízení předpětí na substrátu umožňuje regulovat energii na

substrát dopadajících kladných iontů, a tím i vlastnosti deponovaných vrstev. Pracovní plyn vytékal z obou trysek nadzvukovou rychlostí, a tudíž došlo k žádoucímu výše popsanému zformování plazmových kanálů. Cílem experimentu [4] bylo zjistit chování neutrálního plynu v místě setkání obou plazmových kanálů a poblíž substrátu. Studium probíhalo užitím schlierové metody (viz [1]) doplněné snímáním prostřednictvím CCD kamery. Grafické znázornění získaných dat představuje obr.15, kde jsou zakresleny spojnice shodných hodnot gradientu hustoty pracovního plynu. Z obrázku je zřejmé, že v místě setkání dvou plazmových kanálů přibližně stejných parametrů dojde k vytvoření rázové vlny, oba kanály se stočí do jednoho směru daného výslednicí vektorového součtu rychlostí obou kanálů a vytvoří sekundární plazmový kanál. Bylo zjištěno, že směr sekundárního kanálu závisí výhradně na

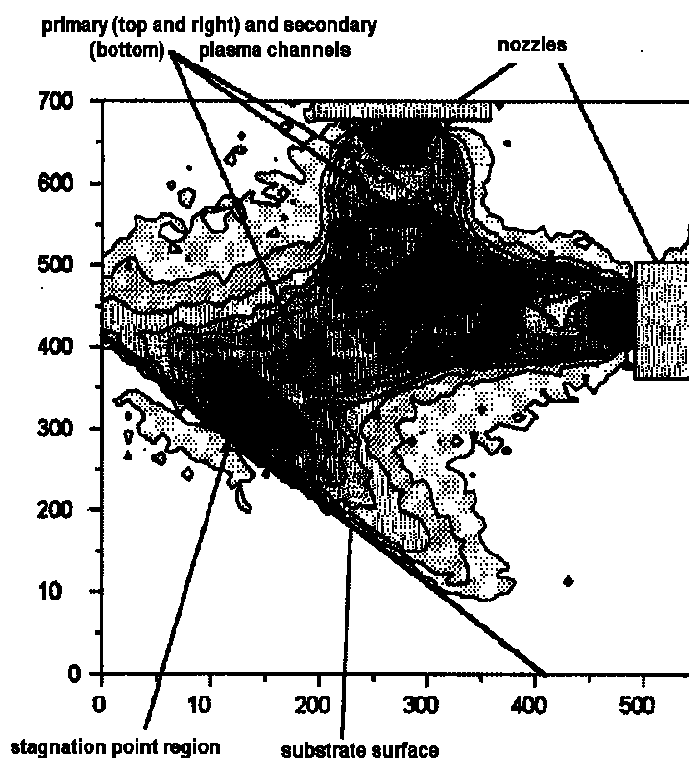
velikosti a směru toků plazmatu v kanálech primárních. Jednoduše lze tedy směr sekundárního kanálu ovládat a nanášet vrstvy do přesně určených pozic. Tato vlastnost je zvláště významná pro depozici geometricky komplikovanějších povrchů, jako jsou např. vnitřní stěny dutin. Co se týče homogenity plazmatu v sekundárním kanálu, bylo změřeno, že ta se postupně zvyšuje směrem od místa střetu primárních kanálů. V konkrétním případě při použití Ar a N₂ jako pracovních plynů bylo plazma v blízkosti povrchu substrátu pro účely nanášení dostatečně homogenní.

Jak bylo výše uvedeno, kvalitativním přínosem víceryskového systému jsou v objemu a na povrchu substrátu probíhající chemické reakce. Z hlediska řízení nanášení tenkých vrstev je důležité znát koncentraci produktů chemických reakcí v místě, kde se plazma stýká se substrátem. Chemických reakcí se účastní částice pracovních plynů i částice odprášené z trysek, oba typy částic v základním, excitovaném a ionizovaném stavu. Pro ilustraci uvažujme reakci probíhající mezi ionty A⁺ a molekulami neutrálního plynu B. Nadzvuková rychlost plynu způsobuje zcela zanedbatelný vliv difúze vzhledem k velikosti konvekčního toku částic v plazmatu. Dále změna koncentrace neutrálního plynu [B] v důsledku interakce s ionty je minimální, neboť koncentrace neutrálních molekul je běžně o několik řádů větší než koncentrace iontů. Za těchto předpokladů se koncentrace iontů vniklých do sekundárního kanálu vyvíjí v čase podle následujícího vztahu:

$$\frac{d[A^+(t)]}{dt} \approx -k_r[A^+(t)][B], \quad (1)$$

kde $[A^+(t)]$, $[B(t)]$ představují koncentrace uvažovaných částic a k_r je koeficient udávající rychlost reakce. Řešením rovnice (1) je exponenciální závislost na čase t :

$$[A^+(t)] \approx [A^+(0)]\exp(-k_r[B]t) \quad (2)$$



Obr. 15. Rozložení gradientu hustoty plazmatu v dvoutryskovém systému. Převzato z [4].

Uvážíme-li, že plazma se pohybuje driftovou rychlostí v_D , přičemž nulový čas odpovídá místu zformování sekundárního kanálu a kanál má délku x , lze vyjádřit čas v němž proběhne interakce se substrátem velmi jednoduše:

$$t \approx \frac{x}{v_D} \quad (3)$$

1.2. Vysokotlaký tryskový systém pro nanášení tenkých vrstev

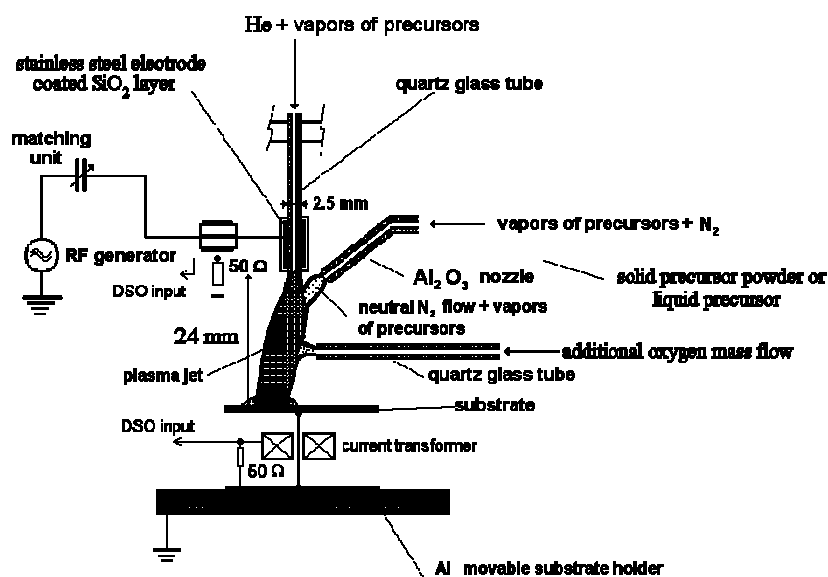
Díky metodě výše popsaného nízkotlakého tryskového výboje jsme schopni nanášet tenké vrstvy prostřednictvím velmi dobře definovaného a lokalizovaného plazmatu. Nicméně tuto metodu je nezbytné realizovat uvnitř uzavřené reaktorové nádoby, kde tlak dosahuje dostatečně nízkých hodnot – tj. řádově max. 10^4 Pa. Nelze ji tedy uplatnit na některé aplikace, které vyžadují vyšší tlak nebo dokonce provedení v otevřeném prostoru. Příkladem jsou konzervační práce na archeologických předmětech nebo standardní nanášení na substráty větších rozměrů, které se nedají umístit do evakuované aparatury. Pro tyto účely je naopak možné použít radiofrekvenční bariérový pochodňový výboj (RF barrier-torch discharge). Zde v elektrodě nedochází k výboji s efektem duté katody, samotného výboje se účastní pouze okraj elektrody. Metoda bariérového výboje je ovšem schopná vytvořit plazmový kanál podobných vlastností jako metoda nízkotlakého tryskového výboje v duté katodě. K uvedeným aplikacím potom může být použita rovněž jako tzv. „plazmová tužka“. Dále lze metodu kromě nanášení použít také k čištění a upravování povrchů různých průmyslových materiálů namísto současných metod chemických a elektrochemických.

Na obrázku 16 vidíme schematické uspořádání pro realizaci RF bariérového pochodňového výboje z experimentu popsaného v [5]. Bariérový výboj probíhá uvnitř tenké trubičky z křemenného skla. Její vnitřní průměr činí 1-2 mm, délka se pohybuje v řádu centimetrů. Zvnějšku je trubička obepnuta kovovou elektrodou, jež je zakončena ostrým okrajem, podstatným pro zapálení bariérového výboje. V jiném provedení může být elektroda umístěna dovnitř skleněné trubičky. Elektrodu kontinuálně chladí cirkulující destilovaná voda. Z RF generátoru je v CW nebo pulzně modulovaném módu dodáván výkon pro ustavení podmínek nutných k průběhu bariérového výboje. Proud směsi pracovních plynů (např. He + O₂) vhaněný do trysky stabilizuje vytvořené plazma, tj. parametry plazmatu jsou dobře definované a zároveň dochází ke zformování žádoucího plazmového kanálu. Na obrázku je dále zakreslena jedna přídavná tryska a jedna přídavná skleněná trubička. Jimi proudí do reaktoru další látky za účelem dosažení požadovaného chemického složení nanášené tenké vrstvy (v případě trysky dochází též k odprašování jejího povrchu). Pro deponování vrstev na rozměrnější substráty je možné použít uspořádání několika trysek vedle sebe se společnou

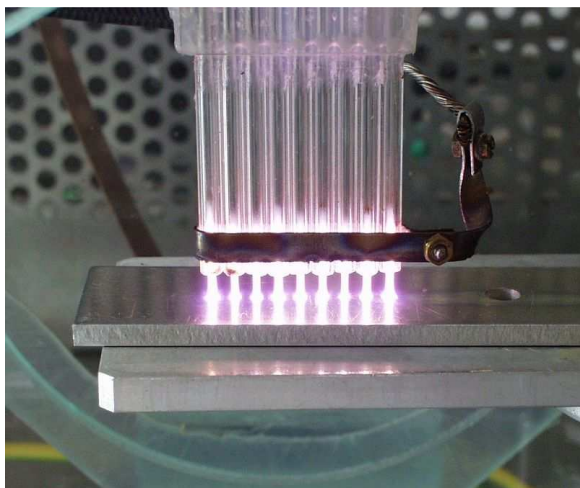
vnější elektrodou (viz obr. 17). V tomto případě se ještě připojuje pomocná RF elektroda, která obepíná víceryskový systém nad hlavní elektrodou. Slouží k zapalování a prostorovému usměrnění výboje. Diagnostické metody vysokotlakého výboje jsou shodné s metodami pro nízkotlaký výboj – používá se především měření emisních spekter a sondových charakteristik.

Princip bariérového pochodňového výboje

Po přivedení vysokofrekvenčního signálu na elektrodu se v okolí ostrého hrotu elektrody vytvoří silné elektromagnetické pole. Výpočtem na základě teoretického modelu v [6] byla řádová hodnota intenzity v bezprostředním okolí okraje elektrody odhadnuta na 10^6 V/m. V důsledku srážek urychlovaných elektronů s molekulami neutrálního plynu dochází k jejich excitaci a ionizaci. Tato situace se označuje jako korónový výboj. Jestliže vzrůstá výkon disipovaný ve výboji, stoupá zároveň vibrační a rotační energie excitovaných molekul a stále častěji dochází k termální ionizaci. Následkem tohoto jevu je opět pokles intenzity pole a s ním spojený pokles ionizace urychlenými elektrony. Postupně se ustanoví rovnováha, při níž je shodná teplota elektronů a excitovaných molekul, korónový výboj přejde ve výboj pochodňový (angl. torch discharge). Pokud nadále vzrůstá dodávaný výkon, překročí teplota hrotu elektrody jistou hranici, při níž je materiál z povrchu elektrody odpařován. Tehdy sestává plazma v reaktoru ze směsi pracovního plynu a odpařených částic. Svými vlastnostmi se plazma blíží plazmatu generovanému obloukovým výbojem. Výboj za popsaných podmínek potom označujeme jako bariérový pochodňový výboj (barrier torch discharge). Částice odpařované z elektrody přispívají ke stabilizaci podmínek v plazmatu, což hraje pro realizaci nanášení za vysokých tlaků významnou roli.



Obr. 16: Schema aparatury pro nanášení tenkých vrstev užitím vysokotlakého bariérového výboje. Experiment byl proveden panem Z. Hubičkou z fyzikálního ústavu AV ČR. Převzato z [5].



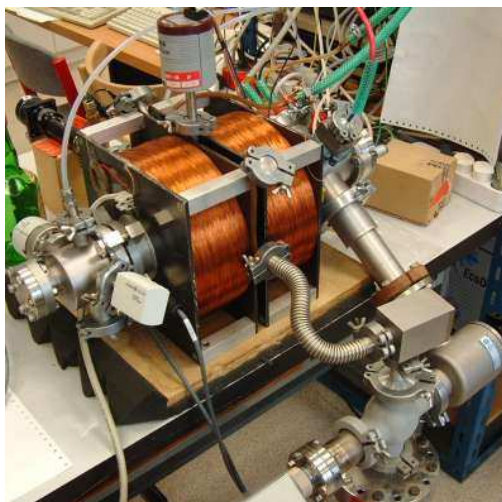
Obr. 17: Nanášení tenkých vrstev vysokotlakým vícetryskovým systémem. Převzato z www stránek FÚ AV ČR.

V experimentu podle [7] bylo provedeno atmosferické nanášení tenkých vrstev ZnO na povrch polymerní fólie, křemíku a křemenného skla. Jako pracovní plyn bylo použito He s přimíchanými parami Zn-acetylacetonátu $Zn(C_5H_7O_2)_2$. Pomocí automatického x-y posunu bylo testováno plošné nanášení. Celková nanášecí doba se pohybovala v řádu desítek minut. V závislosti na její délce a dodaném výkonu bylo dosaženo vrstev o tloušťce okolo 300 nm. Při vyšších výkonech jsou vrstvy deponovány kvalitněji,

ovšem hrozí poškození substrátu. Nanesené ZnO vrstvy mají hexagonální krystalickou strukturu, jsou průhledné. Jejich elektrická vodivost je přibližně 0,1 – 1 S/cm. Takový materiál je velmi perspektivním z hlediska využití v přípravě solárních článků.

1.3. Válcový magnetron

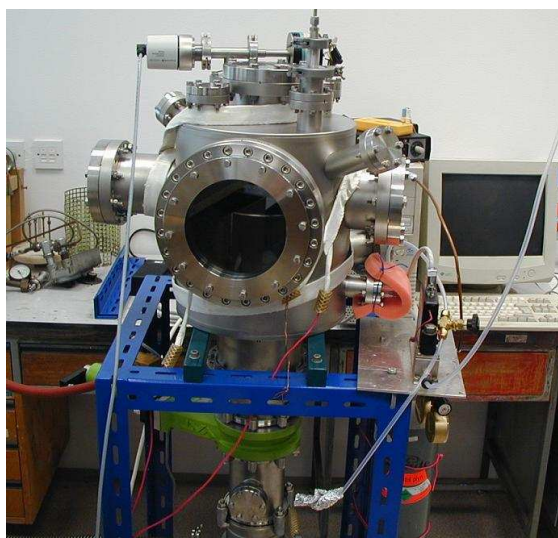
Válcový magnetron (viz foto na obr. 18) v jednoduchosti sestává z válcové anody, v jejíž ose je podélně umístěna katoda. Katoda bývá běžně chlazena destilovanou vodou. Válec anody je obklopen nádobou, která je evakuována a posléze napuštěna pracovním plynem (např. argonem). Na nádobu jsou nasunuty cívky, pomocí nichž je uvnitř ustaveno homogenní magnetické pole rovnoběžné s osou válce. Jakmile je na elektrody přivedeno napětí, vykonávají elektrony a ionty v důsledku působící Lorentzovy síly kruhový pohyb. Během pohybu však dochází k vzájemným srážkám, a částice tak pomalu pronikají k opačně nabitě elektrodě. Probíhající elektrický výboj způsobuje odprašování částic (angl. sputtering) z povrchu elektrod. Pokud vložíme dovnitř aparatury nějaký předmět, mohou být odprašené částice vázány k jeho povrchu. Podrobné informace o magnetronovém nanášení tenkých vrstev obsahuje např. [8] nebo [9].



Obr. 18: Krátký magnetron v laboratoři KEVF MFF UK.

2. Trysková aparatura na KEVF MFF UK

V současnosti je na KEVF MFF UK sestavována experimentální aparatura pro realizaci nízkotlakého tryskového výboje s efektem duté katody. Uspořádání připravované aparatury zachycuje fotografie na obrázku 19. Základem systému je nově vyrobená vakuová komora. Čerpání zajišťuje skupina vývěv sestávající z Rootsovy vývěvy, rotační vývěvy a turbomolekulární vývěvy. K dispozici je kvadrupólový hmotový spektrometr, součástí vybavení jsou rovněž vakuometry. Vakuová část aparatury je již kompletní, byly změřeny efektivní čerpací rychlosti použitých vývěv a stanoveno hmotnostní spektrum. Posledním krokem je umístění samotné plazmové trysky. Tryska byla vyrobena ve Fyzikálním ústavu AV ČR.



Obr. 19: aparatura pro realizaci nízkotlakého tryskového výboje v laboratoři KEVF MFF UK

3. Cíl práce

Předmětem teoretické části bakalářské práce bylo studium literatury týkající se nanášení tenkých vrstev metodami plazmatu, zejména prostřednictvím plazmové trysky. Cílem praktické části práce bylo sestavit spínací obvod pro vytváření stejnosměrných napěťových pulzů pro impulzní režim plazmové trysky. Požadované parametry takového spínacího obvodu jsou: spínací napětí do 2 kV, spínací proud do 20 A. Tento spínací obvod by měl být později použit ke generování výboje v nízkotlakém tryskovém systému pro nanášení tenkých vrstev na KEVF MFF UK. Spínací obvod měl být vyroben podle návrhu pana Mgr. Zdeňka Hubičky, Ph.D., který obdobný obvod zkonstruoval a aplikuje při buzení výboje v experimentálním zařízení používaném ve Fyzikálním ústavu AV ČR. Na sestaveném spínacím obvodu mělo být provedeno základní měření jeho vlastností, tj. především měl být změřen průběh generovaných napěťových pulzů.

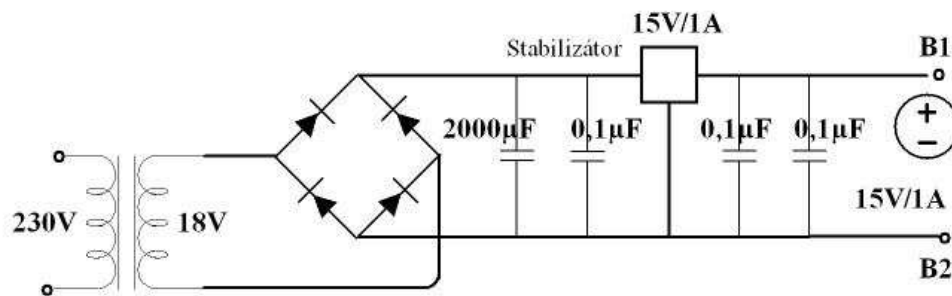
4. Spínací obvod pro generování napěťových pulzů

4.1. Konstrukce spínacího obvodu

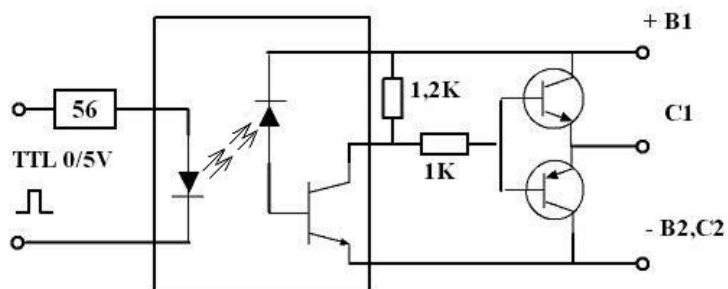
Základem spínacího obvodu je skupina 3x3 vysokonapěťových elektrolytických kondenzátorů 500 μF /500 V, ve kterých se střeďává náboj pro následné uvolnění během pulzu. Tyto kondenzátory jsou napájeny ze zdroje stejnosměrného napětí o hodnotě až 2 kV s uzemněným kladným pólem. Paralelně ke každému kondenzátoru je zapojen rezistor o odporu 3 M Ω . Rezistory v obvodu zastávají bezpečnostní funkci, neboť po odpojení přístroje je přes rezistory odváděn zbytkový náboj z kondenzátorů. Ten může být s ohledem na vysokou kapacitu kondenzátorů značný. Rezistory rovněž dělí celkové napětí tak, že na každém ze tří do série zapojených kondenzátorů je právě třetina tohoto napětí. Skupině kondenzátorů je v obvodu předřazen vstupní filtr, aby nedocházelo k vytváření nežádoucího elektromagnetického pole, jež by mohlo interagovat s okolím přístroje. Schéma výše popsané části obvodu představuje obr.22.

Náboj nahromaděný na kondenzátorech se vybíjí přes dva paralelně zapojené výkonové tranzistory IGBT (viz obr.23). Výrobní parametry použitých součástek jsou 1200 V, 52 A a 300 W. Vybíjení probíhá, pokud je mezi bázi a emitor tranzistoru přivedeno dostatečné spínací napětí z budicího obvodu. Během vybíjení dochází ke vzniku požadovaných napěťových pulzů na výstupu. Těsně před výstupem jsou ještě paralelně zařazeny dvě ochranné diody, které brání průchodu proudu v opačném směru. Taková situace by způsobila přepólování elektrolytických kondenzátorů a jejich možné zničení. Průrazné napětí použitých diod činí 1500 V.

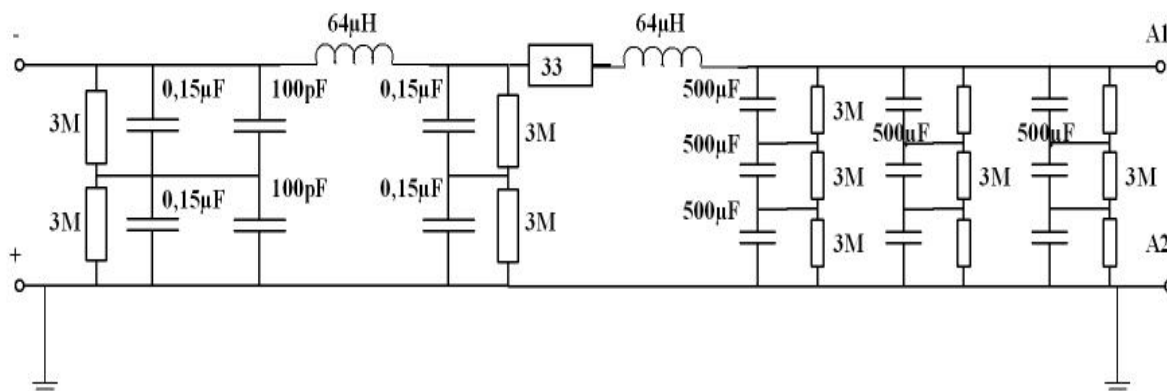
Otevírání a uzavírání výkonových tranzistorů je řízeno budicím obvodem (schéma viz obr.20). Pro napájení budicího obvodu je použito síťové napětí 230 V, které je transformováno na 18 V. Toto napětí je dále usměrněno pomocí Graetzova můstku a filtrováno kondenzátorem 2 mF. Stabilizační obvod je tvořen tzv. třibodovým stabilizátorem, typ 7815. Tři menší kondenzátory s kapacitami 100 nF jsou keramické, jejich úkolem je upravit frekvenční charakteristiku zesilovače v třibodovém stabilizátoru tak, aby nekmital. Hodnota napětí na výstupu napájecího obvodu činí 15 V stabilizovaného napětí. Takové napětí je zhruba zapotřebí přivést na řídicí elektrodu výkonových tranzistorů IGBT, abychom dosáhli jejich sepnutí. Spínací signál výkonových tranzistorů je řízen vstupním signálem, který se pohybuje mezi úrovněmi 0 V a +5 V (úroveň typické pro logiku TTL: 0 V-sepnuto, +5 V-vypnuto). Mezi zdroj tohoto vstupního signálu (typicky impulsní nebo funkční generátor) a výkonový spínač je z bezpečnostních důvodů zařazen optočlen, neboť tak jsou oba přístroje galvanicky odděleny. Použitý optočlen 6N136 má výrobcem uvedené průrazné



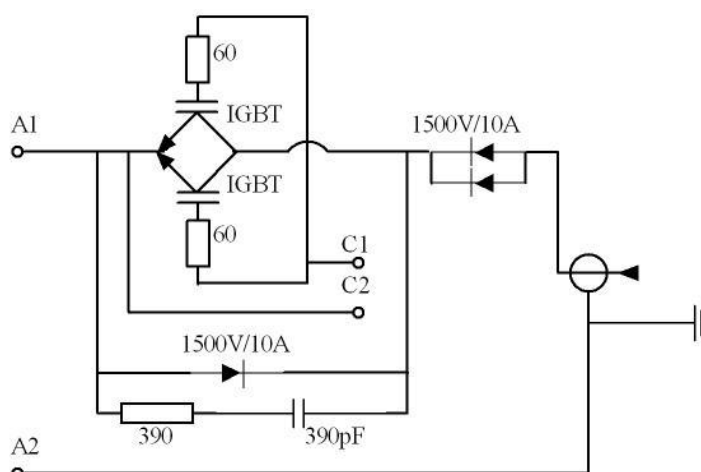
Obr.20: Napájecí obvod. Převádí síťové střídavé napětí na napětí stejnosměrné o hodnotě 15 V.



Obr. 21: Tvarovací obvod řídicích impulsů. Spínací signál je na výkonové tranzistory veden přes optočlen.



Obr. 22: Vstupní filtr a skupina 3x3 vysokonapěťových kondenzátorů. Obvod je připojen ke zdroji stejnosměrného napětí o hodnotě dosahující až 2 kV.



Obr. 23: Zapojení výkonových tranzistorů IGBT a ochranných diod.

napětí 5 kV. Připojení budicího obvodu k výkonovým tranzistorům je provedeno podle schématu na obr.21. Zvolené zapojení využívající dvou tranzistorů umožňuje dosáhnout vyššího spínaného proudu. Snahou je dosáhnout co nejkratší doby sepnutí i rozepnutí výkonových tranzistorů.

Na základě uvedených schémat byl spínací obvod sestaven. Fotografie přístroje jsou na obrázcích 24 a 25. Protože výkonovými tranzistory IGBT a ochrannými diodami prochází vysoké proudy, jsou tyto součástky umístěny na chladičích a přístroj je chlazen ventilátorem. Z krytu spínače je vyveden BNC konektor pro vstupní řídicí signál, dva konektory pro koaxiální kabel vstupu a výstupu a síťová vanička k napájení ventilátoru a obvodu stabilizátoru. Koaxiální kabel sloužící k propojení spínacího obvodu s tryskovou aparaturou a zejména správné připojení konektoru na něj bylo prověřeno pomocí nedestruktivního měřiče izolace. Tento přístroj umožňuje přivést mezi vnitřní a vnější vodič koaxiálního kabelu vysoké napětí a pomocí akustického signálu zjišťovat, při jaké hodnotě tohoto napětí dochází k průrazu izolace. Činnost spínacího obvodu byla nejprve ověřena osciloskopickým měřením při spínání napětí do 60 V, poté byl připojen k vysokonapětovému zdroji.

4.2. Měření parametrů spínacího obvodu

Průběh výstupního napětí na spínacím obvodu byl měřen pomocí osciloskopu s vysokonapětovou sondou. Spínací obvod byl připojen ke zdroji stejnosměrného napětí s uzemněným kladným pólem. Výstup byl zatížen čtyřmi paralelně zapojenými drátovými rezistory v keramickém pouzdře. Každý z použitých rezistorů měl odpor 100 Ω , celkový odpor zatěžovacího rezistoru činil tedy 25 Ω . Výhodou tohoto typu rezistoru pro dané použití je nízká indukčnost. Indukčnost zátěže totiž hraje významnou roli v přechodových jevech spojených se spínáním proudu do zátěže a vytvářené pulzy negativně ovlivňuje. Ukázalo se, že indukčnost klasického posuvného potenciometru sestávajícího z navinutého drátu je výrazně vyšší než indukčnost použitého rezistoru. Každý ze zapojených rezistorů zátěže byl dimenzován na výkon 20 W, celkový maximální ztrátový výkon kombinace čtyř rezistorů byl tedy 80 W. Vzhledem k tomu, že při zkoušce bylo třeba krátkodobě tento výkon překročit, byly rezistory zátěže chlazeny samostatným ventilátorem.

Postupně bylo zvyšováno vstupní napětí až na hodnotu 800 V při šířce spínacího impulsu 20 μ s a opakovací frekvenci 1 kHz. Při tomto napětí dosahoval střední výkon do zátěže hodnoty 450W. Vzhledem k tomu, že zdroj byl dimenzován na střední výkon 500 W, nebylo možné napětí dále zvyšovat. V tabulce 1 jsou uvedeny hodnoty napětí, proudu a výkonu dodávané ze zdroje pro změny spínaného napětí po 50 V. Spínání výkonových

tranzistorů bylo řízeno signálem TTL 0/5 V z funkčního generátoru. Během experimentu odpovídalo napětí 0 V otevřenému stavu tranzistorů, 5 V stavu uzavřenému. Uvedená opakovací frekvence znamenala sepnutí po 2% periody cyklu.

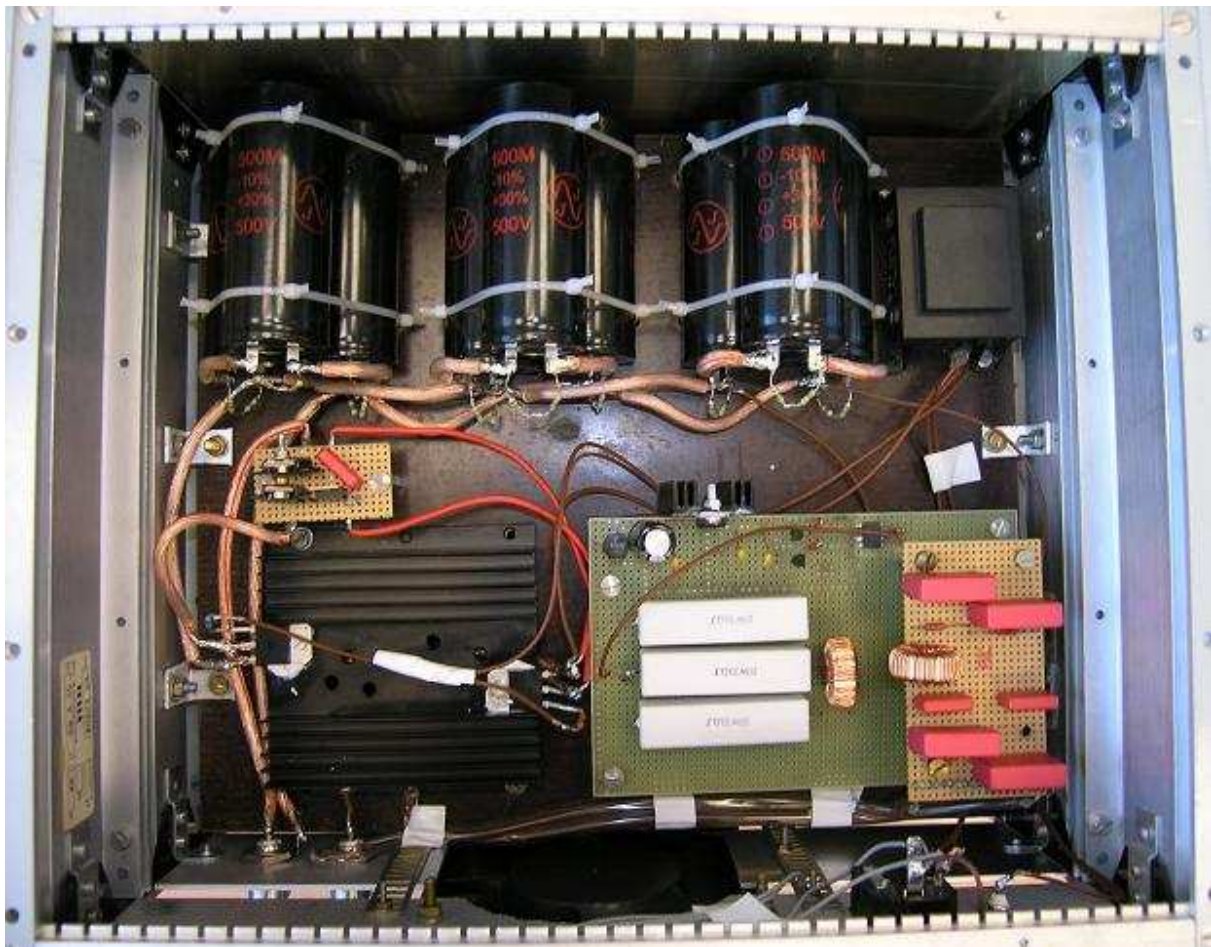
Průběh napětí po dobu jednoho pulzu zjištěný osciloskopem je zachycen v grafech na obrázcích 26 a 27. Situace na obr.26 odpovídá vstupnímu napětí 200 V, na obr.27 napětí 700 V. Z hlediska kvality pulzu je klíčový tvar náběžné a výstupní hrany pulzu. Detail náběžné hrany zachycuje obr.28, detail výstupní hrany obr.29 (v obou případech při vstupním napětí 400 V). Z grafů je patrné, že reakční doba spínače (zpoždění začátku spínání vzhledem k začátku řídicího impulsu) činí přibližně 300 ns, náběžná hrana napěťového impulsu (doba od začátku spínání do stavu, kdy výstupní napětí dosáhne hodnoty spínaného stejnosměrného napětí) je asi 400 ns. Hodnota výstupního napětí je potom v celém průběhu pulzu prakticky stabilní, což je důsledkem dostatečné kapacity pracovních kondenzátorů. Jednoduchým výpočtem zjistíme, že pro maximální napětí 700 V je proud v impulsu zhruba 25 A. Tento proud teče z kondenzátorů po dobu 20 μ s. Z kondenzátorů se tedy odvede náboj o velikosti $25 \times 20 \cdot 10^{-6} \text{ C} = 500 \mu\text{C}$. Tento náboj vytvoří úbytek napětí na kondenzátorech o celkové kapacitě 500 μF rovný $U = Q/C = 500 \cdot 10^{-6} / 500 \cdot 10^{-6} = 1 \text{ V}$. To je skutečně zanedbatelné napětí vzhledem k velikosti vstupního napětí 700 V. Reakční doba spínače na výstupu je delší než na vstupu; dosahuje přibližně 1400 ns a úběžná hrana impulsu trvá asi 3 μ s. Při zániku pulzu se navíc vlivem nežádoucí indukčnosti v obvodu vytvoří výrazný napěťový pík s opačnou polaritou než má původní pulz. Ze srovnání píků z grafů pro vstupní napětí 200, 400 a 700 V je patrné, že výška píku je vstupnímu napětí zhruba přímo úměrná.

| <i>U[V]</i> | <i>I[mA]</i> | <i>P[W]</i> |
|--------------------|---------------------|--------------------|
| 50 | 7 | 2 |
| 100 | 68 | 7 |
| 150 | 104 | 16 |
| 200 | 141 | 21 |
| 250 | 179 | 45 |
| 300 | 216 | 65 |
| 350 | 249 | 88 |
| 400 | 282 | 114 |
| 450 | 316 | 143 |
| 500 | 352 | 177 |
| 550 | 388 | 215 |
| 600 | 425 | 257 |
| 650 | 460 | 302 |
| 700 | 493 | 347 |

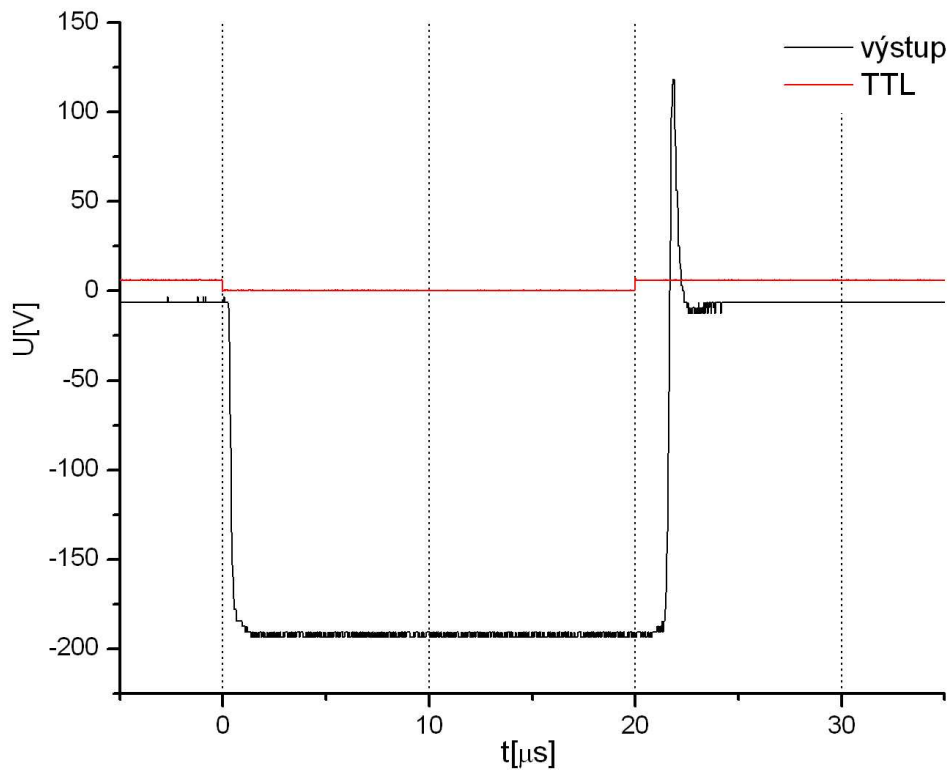
Tabulka 1: Napětí, proud a výkon dodávané ze zdroje během testování spínacího obvodu.



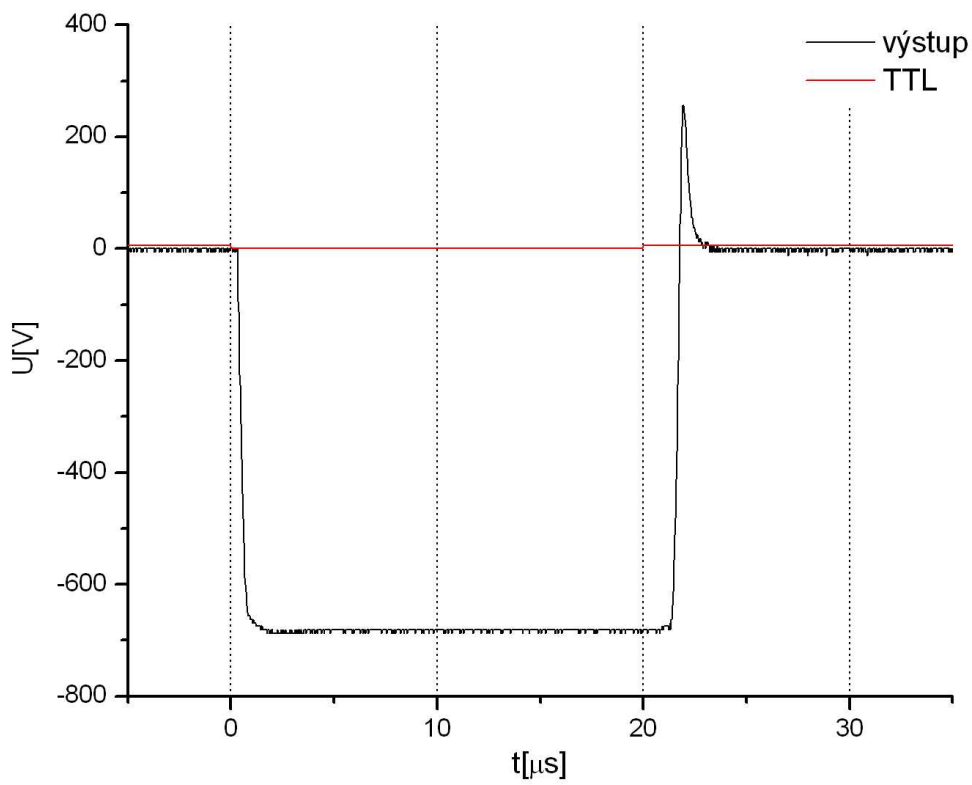
Obr. 24: Celkový pohled na sestavený spínací obvod (vlevo) a zatěžovací jednotku (vpravo). Zátěž představují čtyři paralelně zapojené drátové rezistory.



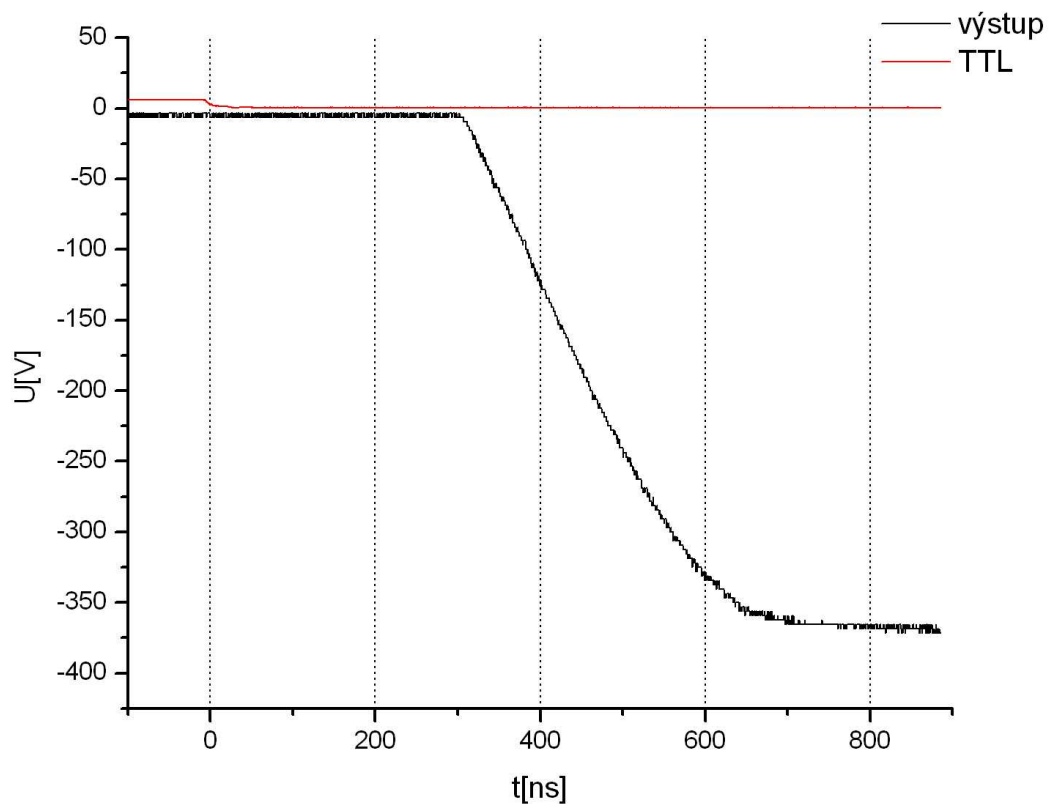
Obr. 25: Uspořádání spínacího obvodu. V horní části fotografie se nachází zleva skupina 3x3 vysokonapěťových kondenzátorů a zcela vpravo transformátor. Vpravo dole je na plošném spoji umístěn vstupní filtr (skupina kondenzátorů červené barvy) a napájecí obvod. Výkonové IGBT tranzistory jsou připojeny ke společnému chladiči vlevo dole.



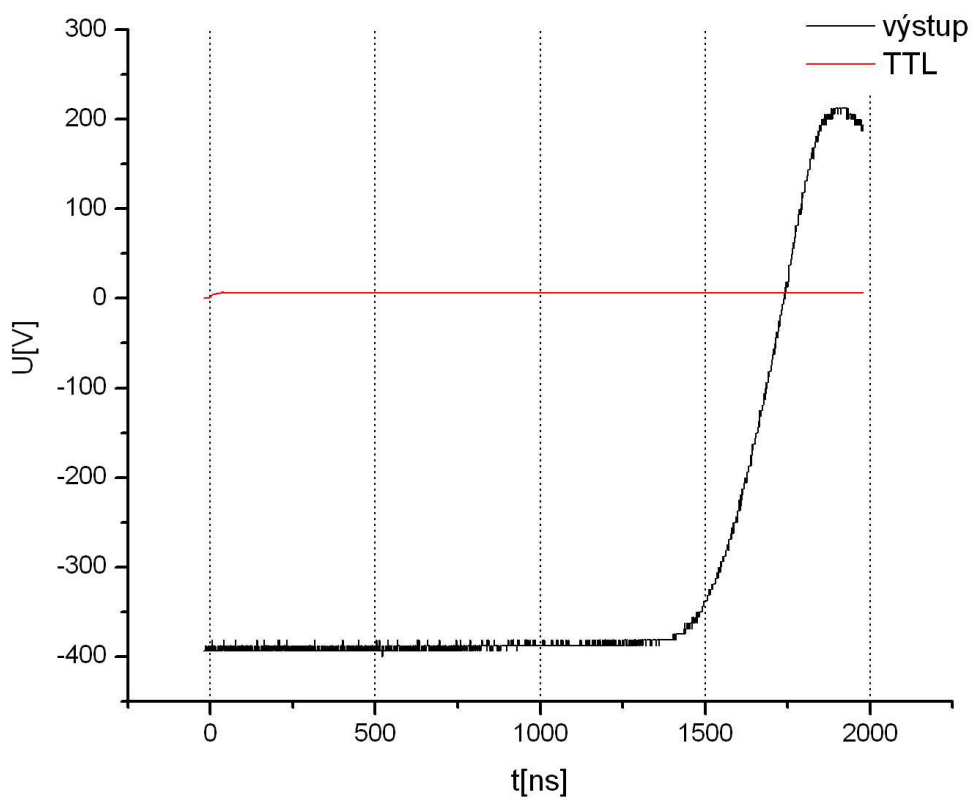
Obr. 26: Průběh napěťového pulzu při vstupním napětí 200 V.



Obr. 27: Průběh napěťového pulzu při vstupním napětí 800 V.



Obr. 28: Náběžná hrana pulzu při vstupním napětí 400 V.



Obr. 29: Výstupní hrana pulzu při vstupním napětí 400 V.

5. Závěr

V rámci teoretické části bakalářské práce byla na základní úrovni popsána problematika nanášení tenkých vrstev pomocí metod využívajících nízkoteplotního plazmatu. Významnou roli mezi těmito metodami hrají metoda plazmové trysky a technologického magnetronu. Plazmovou tryskou lze realizovat nanášení nejen při nízkých tlacích dosažených uvnitř vakuového systému, ale v odlišném uspořádání i za atmosferického tlaku, což má značný praktický význam. Práce je zaměřena především na metodu využívající aparatury s nízkotlakou plazmovou tryskou.

Obecně platí, že plazmové technologie nanášení tenkých vrstev představují velmi efektivní prostředek úpravy materiálů v mnoha průmyslových oblastech. Plazmachemické depozice různých ochranných vrstev jsou standartně prováděny ve strojírenství. Velmi významnou a stále perspektivní oblastí využití jsou aplikace metod v mikroelektronice. V planární technologii výroby integrovaných obvodů je příprava tenkých vrstev naprosto klíčová. V neposlední řadě je důležitý fakt, že popisované metody jsou rozdílné od některých chemických a elektrochemických postupů, které mohou nahradit, ekologicky nezávadné.

Úlohou praktické části bakalářské práce bylo sestavení spínacího obvodu pro vytváření stejnosměrných napětíových pulzů. Pomocí tohoto obvodu by měl být generován výboj v tryskové aparatuře pro nanášení tenkých vrstev na KEVF MFF UK. Spínací obvod byl sestaven za použití vysokonapětíových elektrolytických kondenzátorů a výkonových tranzistorů IGBT. Spínání napětí je řízeno vstupním signálem přivedeným z funkčního generátoru. Činnost obvodu byla ověřena při vstupních napětích o velikosti do 800 V, délce pulzů 20 μ s a opakovací frekvenci 1 kHz. Střední výkon dodávaný ze zdroje při uvedené hodnotě napětí činil 450 W, což u použitého zdroje představuje horní dosažitelnou mez. Napětí přiváděné na katodu během nanášení tenkých vrstev standardně nepřekračuje hodnotu 2 kV. Parametry všech součástek použitých v obvodu v pulzním režimu napětí takové velikosti spínat dovolují. Osciloskopickým měřením byl změřen průběh vytvářených napětíových pulzů, jejich náběžná a úběžná hrana. Rovněž byla stanovena reakční doba spínače vzhledem k řídicímu signálu při sepnutí a vypnutí.

6. Literatura

- [1] Šícha M., Hubička Z., Tichý M., Novák M., Soukup L., Jastrabík L., Behnke J. F., Kapička V., Kapoun K., Šerý M., *Contrib. Plasma Phys.* 36 (1996) 605.
- [2] Tichý M., Šícha M., Bárdoš L., Soukup L., Jastrabík L., Kapoun K., Touš J., Mazanec Z., Soukup R., *Contrib. Plasma Phys.* 34 (1994) 765.
- [3] Virostko P., Hubička Z., Adámek P., Čada M., Olejníček J., Tichý M., Šícha M., Measurement of plasma parameters in low temperature high density hollow cathode plasma jet working in magnetic field, v tisku
- [4] Novák M., Šícha M., Kapička V., Jastrabík L., Soukup L., Hubička Z., Klíma M., Slavíček P., Brablec A., *J. Phys. IV France* 7 (1997) 331.
- [5] Tichý M., Hubička Z., Čada M., Chichina M., Deyneka A., Chvostová D., Olejníček J., Churpita O., Šíchová H., Šícha M., Jastrabík L., Virostko P., Adámek P., Low Pressure and Atmospheric Pressure Plasma-Jet Systems and Their Application for Deposition of Thin Films, ICPIG XXVII, Eindhoven 2005
- [6] Kapička V., Šícha M., Klíma M., Hubička Z., Touš J., Brablec A., Slavíček P., Behnke J.F., Tichý M., Vaculík R., *Plasma Sources Sci. Technol.* 8 (1999) 15-21
- [7] Chichina M., Churpita O., Hubička Z., Tichý M., Holdová M., Virostko P., *Acta Physica Slovaca* 55 (2005) 429
- [8] Musil J., Baroch P., Vlček J., Nam K.H., Han J.G., *Thin Solid Films* 475 (2005) 208-218
- [9] Vlček J., Pajdarová A.D., Musil J., *Contrib. Plasma Phys.* 44 (2004) 426