

**České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
Katedra fyziky**

Sondová diagnostika plazmatu

Výzkumný úkol

Autor: Bc. Ondřej Šebek
Vedoucí práce: Prof. RNDr. Milan Tichý, DrSc.
Akademický rok: 2008/2009

Chtěl bych zde poděkovat vedoucímu své práce Prof. RNDr. Milanu Tichému, DrSc. za ochotné vedení mé práce, za pomoc s přípravou diagnostického systému a rady při provádění a zpracování experimentu.

Prohlašuji, že jsem svůj výzkumný úkol vypracoval samostatně a použil jsem pouze uvedené podklady.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 30. 6. 2009

Ondřej Šebek

Abstrakt

Název práce: **Sondová diagnostika plazmatu**

Autor: Bc. Ondřej Šebek

Obor: Fyzikální inženýrství

Druh práce: Výzkumný úkol

Vedoucí práce: Prof. RNDr. Milan Tichý, DrSc. Katedra fyziky povrchů a plazmatu MFF UK

Abstrakt: Práce se zabývá diagnostikou nízkoteplotního plazmatu jednoduchou a dvojitou Langmuirovou sondou. V experimentální části práce byly dvojitou sondou měřeny parametry plazmatu buzeného radiofrekvenčním polem (13,56 MHz) v aparatuře pro depozice tenkých vrstev při tlaku pod 0,5 Pa. Experimenty ukázaly, že při nejnižších tlacích a malých výkonech radiofrekvenčního zdroje (jednotky wattů) dosahuje koncentrace elektronů hodnoty 10^{16} m^{-3} a teplota elektronů hodnoty až 25 eV. Teplota elektronů byla z experimentálních dat vyhodnocena jak metodou relevantní pro dvojitou sondu tak vhodným využitím metod určených pro data z jednoduché sondy a bylo zjištěno, že se získané výsledky shodují v mezích přesnosti měření. Koncentrace plazmatu byla určena ze saturovaného iontového proudu s použitím radiálního modelu Chena.

Klíčová slova: Langmuirova sonda, dvojitá sonda

Title: **Probe diagnostic of plasma**

Author: Bc. Ondřej Šebek

Specialization: Physical engineering

Kind of work: Research project

Supervisor: Prof. RNDr. Milan Tichý, DrSc., Charles University in Prague, Faculty of Mathematics and Physics, Department of Surface and Plasma Science

Abstract: The work deals with low temperature plasma diagnostics by means of Langmuir single and double probe. Electron temperature and positive ion concentration of radiofrequency generated plasma (13.56 MHz) were measured in reactor for thin layers deposition at pressures below 0.5 Pa. The measured electron density reached the value 10^{16} m^{-3} and the electron temperature the values up to 25 eV at lowest pressures and small power of radiofrequency source (units of watts). The electron temperature was estimated from experimental data by conventional methods for evaluation of double probe characteristics as well as by smart exploitation of methods for processing data from single probe characteristics. The values of electron temperatures obtained from these methods were in agreement within the experimental error limits. The plasma density was calculated from the saturated ion current using the radial model by Chen.

Keywords: Langmuir probe, double probe

Obsah

Úvod.....	5
1 Teoretická část.....	6
1.1 Metody zpracování dat jednoduché Langmuirovy sondy	6
1.2 Dvojitá sonda.....	9
2 Experimentální část.....	11
2.1 Aparatura.....	11
2.2 Sonda.....	12
3 Výsledky měření	14
3.1 Metoda měření a zpracování	14
3.2 Prostorové závislosti parametrů plazmatu.....	16
3.3 Závislost na tlaku a výkonu.....	18
3.1 Srovnání metod určení elektronové teploty	19
Závěr.....	22
Literatura	23

Úvod

Práce se věnuje diagnostice nízkoteplotního plazmatu jednoduchou a dvojitou Langmuirovou sondou. Langmuirova sonda je široce využívána v nejrůznějších experimentech, bývá používána pro diagnostiku plazmatu v okrajové oblasti tokamaku i pro výzkum kosmického plazmatu. Dvojitá sonda má oproti jednoduché některé důležité výhody, což bylo důvodem jejího použití v předložené práci.

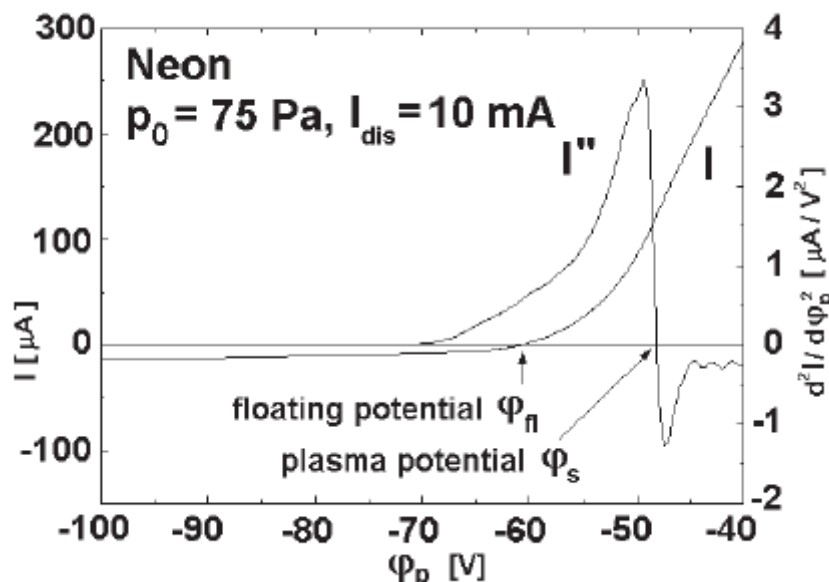
Hlavní náplní práce byla experimentální činnost na aparatuře pro depozice tenkých polymerních vrstev za nízkého tlaku. V rámci práce byla měřena teplota elektronů a koncentrace iontů dvojitou sondou. Pro měření byl použit obvod sondové elektroniky zprovozněný během bakalářské práce.

Práce je rozdělena na tři kapitoly. V první kapitole jsou krátce shrnuty některé teorie sondového proudu jednoduché sondy a teorie dvojité sondy. Ve druhé kapitole je popsáno experimentální uspořádání depoziční aparatury a vyrobená dvojitá sonda. Poslední kapitola je věnována výsledkům měření parametrů plazmatu v aparatuře.

1 Teoretická část

1.1 Metody zpracování dat jednoduché Langmuirovy sondy

Langmuirova sonda je nejstarší metoda diagnostiky nízkoteplotního plazmatu, která poskytuje informaci hlavně o teplotě elektronů, koncentraci elektronů i iontů a potenciálu plazmatu. Metoda spočívá ve změření voltampérové charakteristiky dvojice elektrod vložených do plazmatu. Během let bylo vyvinuto mnoho metod zpracování naměřených dat a určení parametrů plazmatu. Od klasické teorie Langmuira a Mott-Smithe [1] předpokládající pohyb bez srážek ve vrstvě náboje okolo sondy byla teorie rozšířena na podmínky, při kterých už nelze srážky zanedbávat. Detailně o problematice sondové diagnostiky pojednává [2].



Obr. 1: Voltampérová charakteristika jednoduché Langmuirovy sondy a její druhá derivace. Převzato z [2].

Obrázek 1 ukazuje typickou charakteristiku jednoduché sondy a její druhou derivaci podle potenciálu sondy ϕ_p . Důležitým bodem charakteristiky je potenciál plazmatu ϕ_s , při kterém sonda částice plazmatu nepřitahuje ani neodpuzuje. Charakteristika se dělí podle konvence na tři oblasti. Oblast doprava od potenciálu plazmatu se nazývá oblast urychlování elektronů, sondový proud je zde tvořen převážně elektrony. Oblast, která je ohraničena zprava potenciálem plazmatu a v jejímž středu se nachází plovoucí potenciál ϕ_f , nazýváme přechodová. V této oblasti jsou sondou přitahovány kladné ionty, ale výraznou měrou na ní dopadají i elektrony schopné překonat její odpuzování. Část charakteristiky nalevo od přechodové oblasti je oblast urychlování kladných iontů.

Langmuir a Mott-Smith odvodili za předpokladu bezsrážkového pohybu částic v nábojové vrstvě okolo sondy vztahy pro proud částic na válcovou sondu:

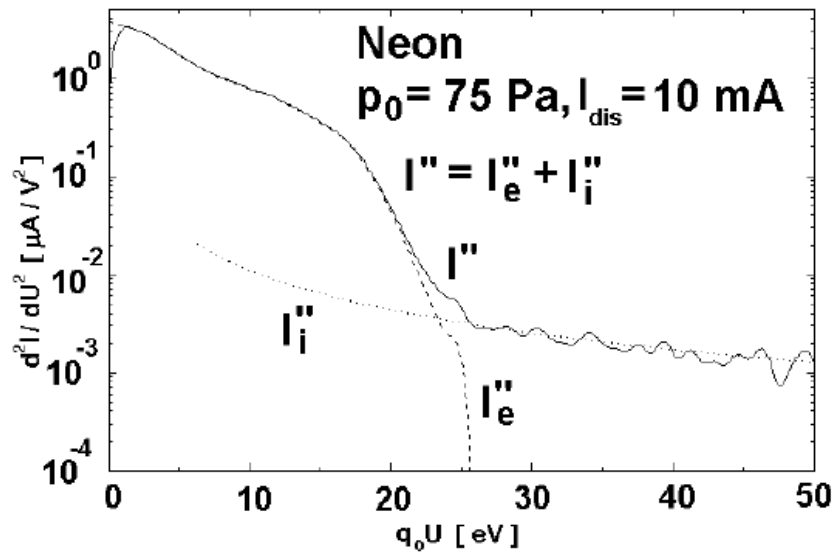
$$I_{p\nu} = \frac{A_p q_\nu n_\nu}{4} \left(\frac{8k_B T_\nu}{m_\nu \pi} \right)^{1/2} \left(1 - \frac{q_\nu U_p}{k_B T_\nu} \right)^{1/2} \quad (1)$$

jsou-li částice druhu ν sondou přitahovány a

$$I_{p\nu} = \frac{A_p q_\nu n_\nu}{4} \left(\frac{8k_B T_\nu}{m_\nu \pi} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{q_\nu U_p}{k_B T_\nu}\right) \quad (2)$$

jsou-li sondou odpuzovány. Ve vztazích (1) a (2) je A_p povrch sondy, q_ν , m_ν , T_ν , n_ν náboj, hmotnost, teplota a koncentrace daného druhu částic, k_B Boltzmannova konstanta a U_p rozdíl potenciálů sondy a plazmatu. Podle této teorie má charakteristika v potenciálu plazmatu inflexní bod. Potenciál plazmatu proto pokládáme tam, kde druhá derivace proudu podle potenciálu prochází nulou (nebo má minimum), jak je to také znázorněno na obrázku 1.

Ze vztahu (2) plyne možnost určení teploty elektronů ze sklonu semilogaritmické závislosti elektronového proudu na napětí mezi sondou a referenční elektrodou v přechodové oblasti charakteristiky. Problém je v určení elektronového proudu ze sondové charakteristiky. Nejjednodušší metodou je odečtení lineární extrapolace proudu z oblasti urychlování iontů od celkového proudu v přechodové oblasti, v oblasti urychlování iontů totiž předpokládáme, že sondový proud je tvořen pouze kladnými ionty. Ze vztahu (1) je ale vidět, že závislost iontového proudu v přechodové oblasti pro válcovou sondu není lineární, uvedený postup určení elektronového proudu tedy není zcela korektní. Teplota elektronů se proto určuje z druhé derivace celkového proudu, bylo totiž prokázáno, že druhá derivace iontové složky proudu je zanedbatelná oproti druhé derivaci složky elektronové. Ukázka druhé derivace sondového proudu a jednotlivých složek je zobrazena v obrázku 2. Semilogaritmická závislost druhé derivace elektronového proudu na napětí je přímka, jejíž sklon udává elektronovou teplotu. Podobnou metodou je určení z druhé derivace samotného elektronového proudu.



Obr. 2: Druhá derivace celkového sondového proudu a elektronové a iontové složky podle napětí.

Koncentrace elektronů se klasickým způsobem počítá z elektronového proudu v potenciálu plazmatu. Další jednoduchá metoda určení koncentrace elektronů vyplývá z lineární závislosti kvadrátu elektronového proudu na napětí v oblasti urychlování elektronů, sklon této závislosti určuje elektronovou koncentraci. Podobný postup pro ionty bohužel dává značně nadhodnocené koncentrace iontů. U jednoduché sondy navíc při vysokých koncentracích často nelze dosáhnout potenciálu plazmatu a takovou charakteristiku není možné klasickým postupem zpracovat. Z těchto důvodů byly vyvinuty teorie sondového proudu umožňující určení iontové koncentrace z oblasti urychlování iontů. Tyto teorie jsou založeny na řešení Poissonovy rovnice pro potenciál v okolí sondy za určitých zjednodušujících předpokladů. Jedním z přístupů je model Allena, Boyda a Reynoldse [3], který uvažuje pouze ionty s nulovou teplotou, tzv. cold ion model. Poissonova rovnice pro kulovou nebo válcovou sondu je bohužel řešitelná pouze numericky. Tvar rovnic je zapsán pomocí normalizovaných veličin: potenciálu η , iontového proudu i_i a vzdálenosti ξ definovaných vztahy

$$\eta = \frac{q_0 U}{k_B T_e} \quad ; \quad \xi = \frac{r}{\lambda_D} \quad ; \quad i_i = \frac{I_i}{I_n} \quad ; \quad I_n = A_p q_0 n_{i0} \left(\frac{k_B T_e}{2\pi m_i} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

kde q_0 je elementární náboj, I_i skutečný iontový proud, A_p povrch sondy a n_{i0} rovnovážná iontová koncentrace. Řešením rovnice je závislost $i_i = i_i(\eta_p, \xi_p)$, kde η_p, ξ_p značí hodnoty na povrchu sondy. Z této závislosti lze určit iontovou koncentraci. Allen, Boyd a Reynolds vyřešili rovnici pro kulovou sondu. Bernstein a Rabinowitz [4] řešili podobný problém pro ionty s nenulovou teplotou, ale monoenergetickým rozdělením. Chen v článku [5] shrnul uvedené případy a cold ion model vyřešil pro válcovou sondu, užitečné závislosti zde předkládá ve formě grafů. Klagge v [6] uvádí analytické vyjádření Chenova řešení:

$$i_i = a \left(-\frac{\eta_p}{b} \right)^{\alpha}, \quad (4)$$

kde

$$a = \zeta_p + 0,6 \zeta_p^{0,05} + 0,04 \quad ; \quad b = 0,09 \left(\exp \left(\frac{1}{\xi_p} \right) + 0,08 \right) \quad ; \quad \alpha = \zeta_p + 3,1 \zeta_p^{0,6}. \quad (5)$$

Vzhledem k tomu, že koeficienty a, b a α závisí na ξ_p a to zase na koncentraci elektronů, jedná se o implicitní problém, který by bylo třeba řešit iterativním postupem. Nutnost iterativního postupu eliminoval Sonin [7] zavedením veličiny

$$\xi_p^2 i_i = \frac{1}{\varepsilon_0} \left(\frac{m_i}{8\pi q_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{q_0}{k_B T_e} \right)^{\frac{3}{2}} I_i, \quad (6)$$

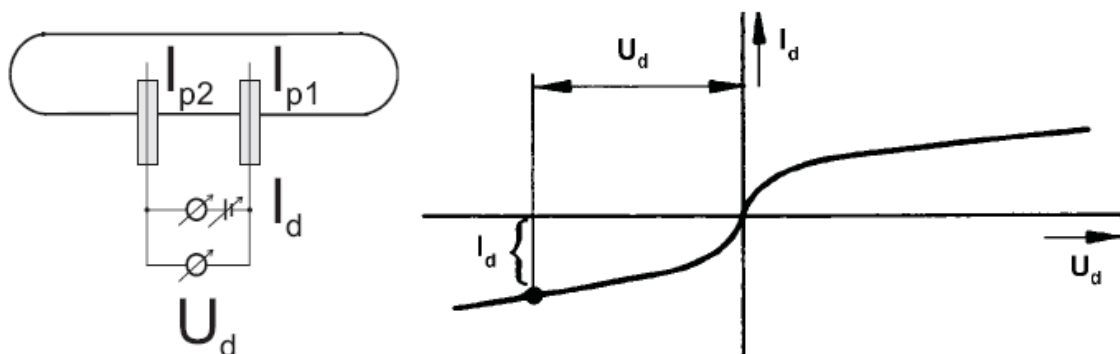
kteřá nezávisí na koncentraci elektronů. Ze závislosti $\xi_p^2 i_i$ na i_i , která se dá z teorie Chena snadno odvodit, je pak možné při znalosti měřeného iontového proudu I_i v tzv. pracovním bodě - typicky pro $\eta_p = 15$ - a teploty elektronů stanovit i_i a ze vztahů (3) pak vypočítat koncentraci elektronů (měřené I_i je známé).

1.2 Dvojitá sonda

Jednou z modifikací klasické Langmuirovy sondy je takzvaná dvojitá sonda vyvinutá Johnsonem a Malterem [8]. Od jednoduché se liší tím, že obě elektrody mají řádově stejné rozměry, celou dvojsundu tvoří například dvojice jednoduchých válcových sond. Obvod dvojité sondy a její charakteristika jsou zobrazeny na obrázku 3. Vlevo je obvod s dvojicí válcových sond, U_d je napětí mezi sondami, I_d proud obvodem. Vpravo je charakteristika, která je symetrická, mají-li obě sondy stejný povrch a předpokládáme-li, že plazma má v okolí obou sond stejné vlastnosti. Oblast prudkého růstu okolo nulového napětí nese informaci o teplotě elektronů.

Dvojitá sonda má oproti jednoduché některé výhody:

- Celý systém plave s potenciálem okolního plazmatu. Díky tomu naměřená charakteristika vždy obsahuje strmou oblast okolo nulového napětí.
- Proud obvodem je limitován saturevaným iontovým proudem, který je mnohem menší než elektronový saturevaný proud u jednoduché sondy, sonda tak mnohem méně narušuje okolní plazma.
- Původní teorie [8] předpokládá pohyb bez srážek ve vrstvě okolo sond a stejně jako u teorie jednoduché sondy byly odvozeny korekce zahrnující vliv srážek. U dvojité sondy bylo však experimentálně zjištěno, že srážky v okolí sond nemají na měřená data výrazný vliv [9].



Obr. 3: Obvod dvojité sondy a její voltampérová charakteristika. Převzato z [2].

Pro určení elektronové teploty z charakteristiky dvojné sondy existují dva základní postupy. První je založen na určení sklonu semilogaritmické závislosti poměru elektronových proudů na napětí mezi sondami. Lze odvodit [8], že platí vztah

$$\ln\left(\frac{I_{e1}}{I_{e2}}\right) = -\frac{q_0 U_d}{k_B T_e} + \ln \sigma, \quad (7)$$

kde I_{e1} a I_{e2} jsou elektronové proudy na jednotlivé sondy. Koeficient σ závisí na velikostech obou sond a vlastnostech plazmatu v jejich okolí. Je-li plazma u obou sond stejné a sondy mají stejný povrch, je člen $\ln \sigma$ roven nule, tento člen nicméně na sklon křivky nemá vliv.

Druhý postup je uveden například v [10]. Teplotu lze spočítat ze vztahu

$$\frac{k_B T_e}{q_0} = \left(2 \left(\frac{dI_d}{dU_d} \right)_{fl} - \frac{1}{2} \left(\frac{dI_{i1}}{dU_d} + \frac{dI_{i2}}{dU_d} \right) \right)^{-1} \cdot \frac{2 \cdot \overline{I_{i1}}_{fl} \cdot \overline{I_{i2}}_{fl}}{\overline{I_{i1}}_{fl} + \overline{I_{i2}}_{fl}}, \quad (8)$$

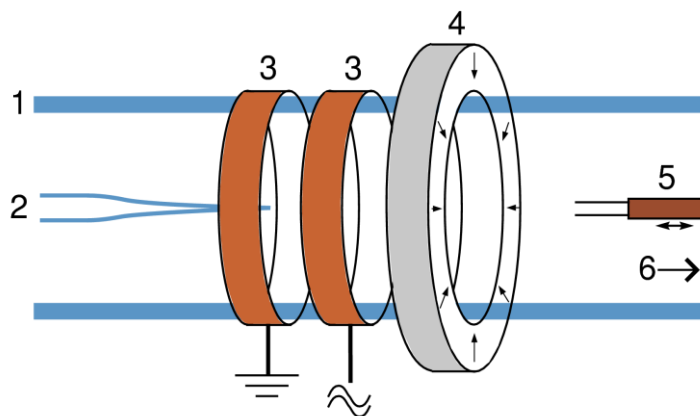
kde I_{i1} a I_{i2} jsou iontové proudy na jednotlivé sondy, které lze určit lineární extrapolací z oblastí hodně kladných a záporných napětí. Index fl označuje, že daná veličina je počítána v bodě, kde charakteristika prochází nulou.

Kromě teploty elektronů lze dvojnou sondou měřit elektrické pole v plazmatu, které je úměrné napětí mezi plovoucími sondami (sondami odpojenými od sondové elektroniky) měřenému voltmetrem s dostatečně vysokým vstupním odporem. Měříme tím vlastně rozdíl plovoucích potenciálů obou sond, nikoliv rozdíl potenciálů plazmatu. Pokud lze předpokládat, že v místě obou sond mají elektrony Maxwellovo rozdělení energií a stejnou teplotu, je rozdíl plovoucích potenciálů roven rozdílu potenciálů plazmatu v místech obou sond. Podle práce [11] lze část charakteristiky dvojité sondy, kdy na sondu dopadají převážně kladné ionty, využít i ke stanovení koncentrace kladných iontů.

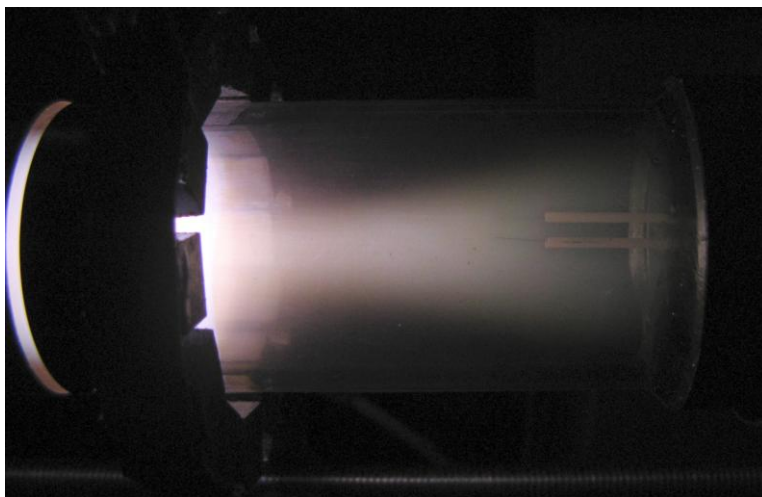
2 Experimentální část

2.1 Aparatura

Měření parametrů plazmatu byla prováděna na aparatuře instalované na katedře makromolekulární fyziky MFF UK. Na aparatuře se provádí experimenty s depozicí tenkých vrstev s význačným směrem dopadajících částic. K tomu slouží kapilární tryska a magnetické pole usměrňující pohyb částic plazmatu. Kvůli dosažení dostatečně velké střední volné dráhy částic probíhá depozice za velmi nízkých tlaků, obvykle při 0,06 Pa. Plazma v aparatuře je buzeno radiofrekvenčním polem. Schéma výbojové trubice je na obrázku 4. Kapilární tryska (2) s vnitřním průměrem 0,7 mm přivádí pracovní plyn do válcové skleněné trubice (1) s vnějším průměrem 40 mm. Na tuto trubici navazuje přibližně ve vzdálenosti 10 cm od trysky kovová uzemněná část aparatury. Vně trubice jsou umístěny prstencové elektrody (3) napojené na generátor s frekvencí 13,56 MHz. Za nimi přibližně ve vzdálenosti 4 cm od trysky je umístěn prstenec magnetů (4), který tvaruje okolní plazma. Na obrázku 5 je vidět tvar plazmatu v trubici, vlevo je prstenec magnetů, vpravo začátek kovové části aparatury. Při vysokém tlaku a výkonu (cca od 0,25 Pa při 20 W) hoří plazma výrazně podél celé aparatury. Při nižších tlacích a výkonech je však plazma lokalizováno hlavně ve skleněné části aparatury, vyzařující objem plazmatu končí přibližně v místech, kde kovová část aparatury začíná. Za takových podmínek není možné parametry plazmatu měřit metodou jedné sondy, neboť sonda nemá přes plazma dostatečný kontakt se svou referenční elektrodou (kovovou částí aparatury). Proto byla pro měření vyrobena dvojité sonda (5) pohyblivá podél osy trubice. Aparatura je čerpána rotační a difúzní vývěvou.



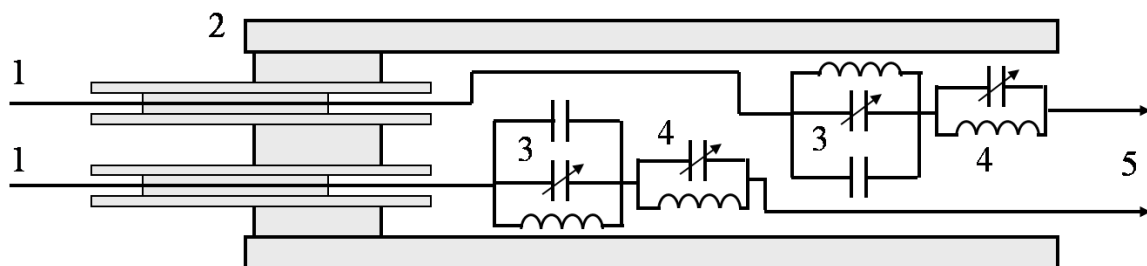
Obr. 4: Aparatura pro depozice vrstev: 1 – skleněná trubice, 2 – kapilární tryska, 3 – prstencové elektrody napojené na generátor 13,56 MHz, 4 – prstenec držící sadu magnetů, 5 – dvojité Langmuirova sonda pohyblivá podél osy trubice, 6 – čerpání.



Obr. 5: Tvar plazmatu v blízkosti magnetů, vpravo je vidět dvojité sonda.

2.2 Sonda

Pro měření parametrů plazmatu v aparatuře byla vyrobena dvojité Langmuirova sonda. Konstrukce sondy je zobrazena na obrázku 6. Sonda je držena na kovové trubicové vakuové průchodce (load-lock), která je posunovatelná podél osy výbojové trubice. Na konci průchodky je nasazena keramická trubička nesoucí samotnou dvojsondu. Uvnitř jsou za sebou umístěny dvě dvojice frekvenčních filtrů, přičemž každá z dvojic je napojena na jednu ze sond. Ve dvojici je vždy filtr pro frekvenci 13,56 MHz tvořený tlumivkou, kondenzátorem a kapacitním trimrem a filtr pro druhou harmonickou frekvenci 27,12 MHz tvořený tlumivkou a kapacitním trimrem. Na konci směřujícím do plazmatu je trubička uzavřena zátkou, ze které ve vzdálenosti asi 4 mm vystupují dvě tenké keramické trubičky držící jednotlivé sondy. V každé trubičce je ještě jedna tenčí trubička zasunutá dovnitř o 2 mm. V té je vsunut wolframový drátek o průměru 50 μm tak, že se nedotýká vnější trubičky. Tento způsob konstrukce má zabránit spojení sondy s vodivou vrstvou, která by mohla vzniknout na povrchu vnější keramické trubičky naprašováním během výboje. Drátek přechází přes okraj vnější trubičky asi o 7 mm.



Obr. 6: Konstrukce použité dvojité sondy: 1 – válcové sondy, 2 – keramická trubička nesoucí dvojsondu, 3 – filtry pro frekvenci 13,56 MHz, 4 – filtry pro frekvenci 27,12 MHz, 5 – sondová elektronika.

Sondy jsou připojeny na obvod sondové elektroniky. Hlavní části tohoto obvodu jsou labkarta generující sondové napětí a snímající sondový proud, vysokonapěťový operační zesilovač a převodník proud napětí. Celý obvod je podrobně popsán v bakalářské práci [12]. Pro napájení převodníku proud napětí byly použity dva olověné 12 V akumulátory. Pro napájení operačního zesilovače byl použit zdroj s baterií velkokapacitních kondenzátorů nabitých na cca ± 80 V, které jsou schopny napájet sondový obvod během měření. Tak je umožněno měření sondové charakteristiky v rozsahu cca (-65 V; $+65$ V) bez nutnosti používat na toto relativně vysoké napětí drahé a nespolehlivé akumulátorové články. V mnoha případech bylo však nutné charakteristiku měřit i při nižších a vyšších napětích. Z tohoto důvodu byl vyroben dodatečný napěťový zdroj ze série 9 V akumulátorů. Tento zdroj umožňuje posunout rozsah měřené charakteristiky o cca 50 respektive 100 V do nižších i vyšších napětí. Sondový obvod byl řízen a charakteristiky byly měřeny pomocí programu v jazyce VEE verze 8 firmy Agilent, který je také popsán v bakalářské práci [12]. Naměřená data byla vyhodnocována pomocí programu START, který byl popsán v disertační práci P. Kudrny [13].

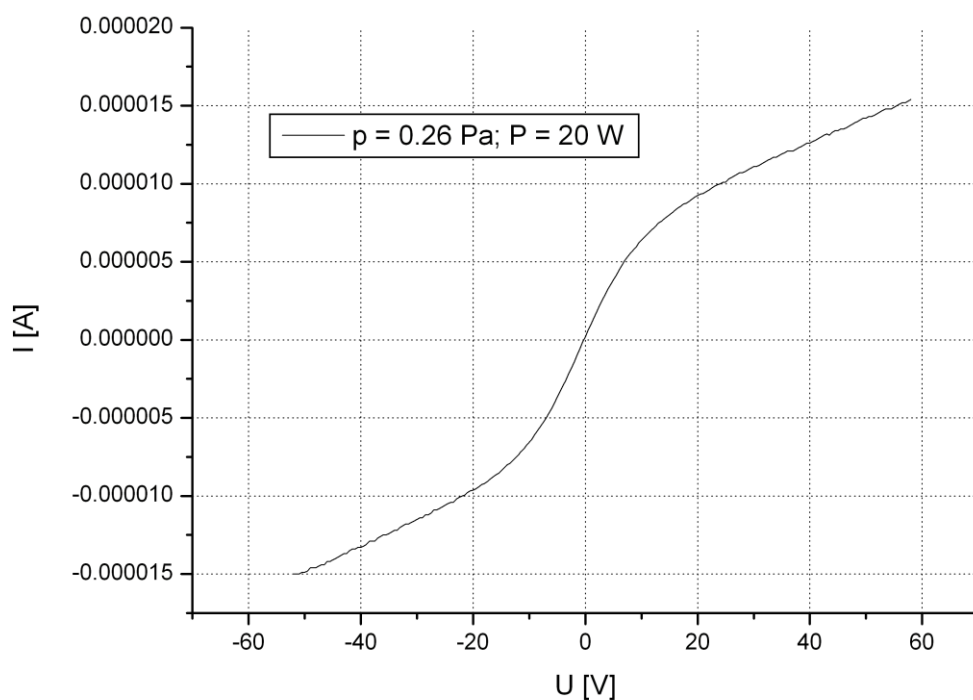
3 Výsledky měření

3.1 Metoda měření a zpracování

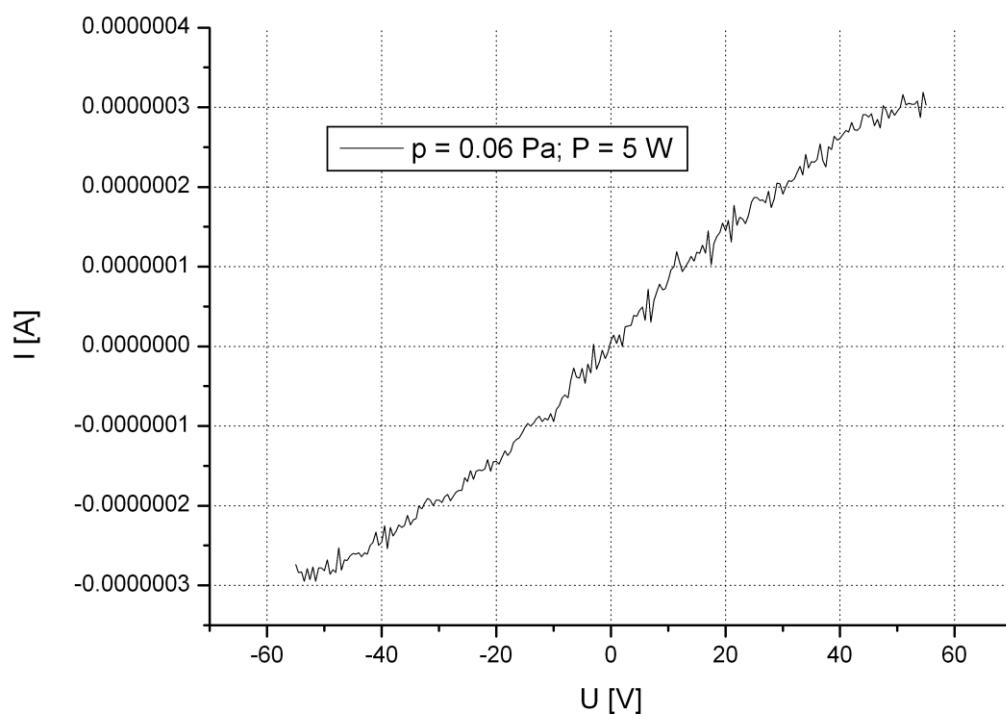
V rámci práce byly dvojitou sondou systematicky proměřeny parametry plazmatu ve výbojové trubici aparatury v závislosti na různých faktorech: poloze sondy v trubici, tlaku v aparatuře a výkonu. Pro všechny polohy byly charakteristiky měřeny pro čtyři kombinace tlaků 0,06 Pa resp. 0,26 Pa a výkonů 5 W resp. 20 W. Pro polohy 4 a 16 cm od roviny magnetu byla provedena další měření pro různé tlaky a výkony. Charakteristiky byly většinou měřeny s krokem 0,5 V v rozsahu (−55 V; +55 V). Pro podmínky, při kterých nebyla sondová charakteristika dostatečně výrazná v tomto rozsahu, byly změřeny i charakteristiky vhodně posunutě o 50 či 100 V do nižších i vyšších napětí. Ukázky „výrazné“ a „nevýrazné“ charakteristiky jsou po řadě v grafech 1 a 2.

Při každém měření byl určen rozdíl potenciálů mezi sondami odpojenými od sondového obvodu. Tento rozdíl je úměrný elektrickému poli v plazmatu ve směru mezi sondami. Z měřených dat byla dále určována teplota elektronů a koncentrace iontů pomocí programu START pro zpracování charakteristiky Langmuirovy sondy [13]. I když byl tento program původně určen jen pro zpracování dat jednoduché Langmuirovy sondy, bylo možné vhodnou volbou rozsahu zpracovávaných dat jej využít i pro data z dvojité sondy. Ověření takového postupu bylo provedeno srovnáním elektronové teploty spočítané podle (8) s hodnotou elektronové teploty vypočítané programem START. Když bylo na dostatečném počtu vzorků dat dosaženo shody (v mezích přesnosti měření), byla další data vyhodnocována pouze programem START. Podrobnější diskuse určení teploty je uvedena v odstavci 3.3. Program START umožňuje určit teplotu elektronů z druhé derivace celkového proudu, ze sklonu elektronového proudu a z druhé derivace elektronového proudu. Uváděné hodnoty teploty elektronů jsou určeny z druhé derivace celkového proudu sondou. Program START navíc umožňuje stanovit koncentraci iontů z části sondové charakteristiky, kde jsou ionty urychlovány (iontový „saturovaný“ proud). Podmínkám experimentu nejlépe vyhovovalo vyhodnocení koncentrace kladných iontů podle teorie Chena (kapitola 1.1).

V následujících kapitolách jsou shrnuty výsledky měření elektrického pole mezi sondami, teploty elektronů a koncentrace iontů ve formě závislostí na poloze, tlaku a výkonu. Poslední kapitola obsahuje srovnání teplot určených různými metodami. Výsledky experimentů se připravují k prezentaci na konferenci IWEP 2009.



Graf 1: Výrazná charakteristika dvojité sondy ve vzdálenosti 12 cm od roviny magnetu. Rozsah proudu činí 30 μA .



Graf 2: Nevýrazná charakteristika sondy ve 12 cm od magnetů. Oproti předešlému případu je zde téměř nepatrný typický tvar charakteristiky dvojité sondy. Data jsou také relativně mnohem více zašuměna, jelikož rozsah proudu je zde pouze 0,6 μA , tedy padesátkrát menší než v minulém případě.

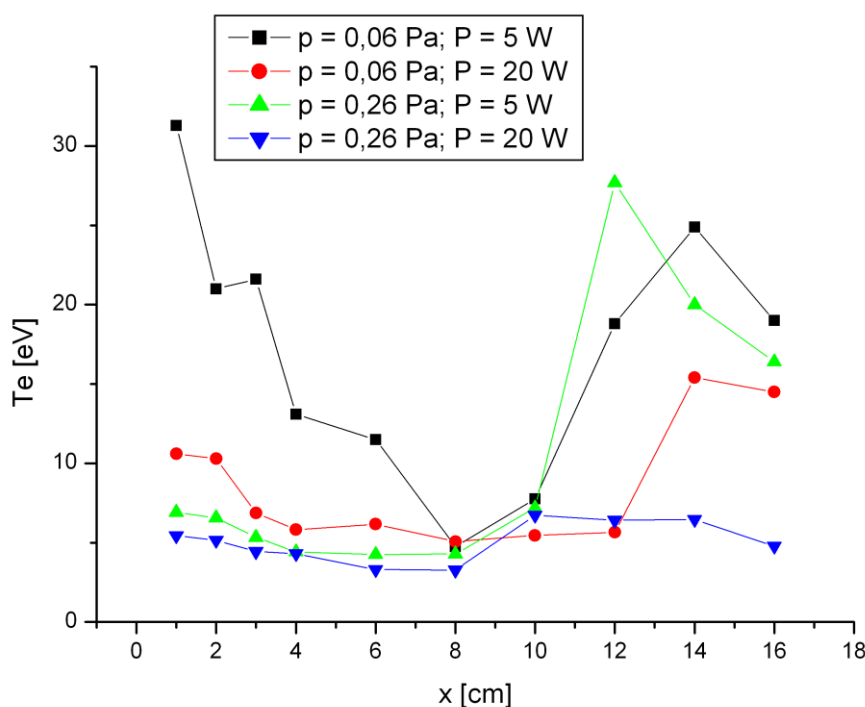
3.2 Prostorové závislosti parametrů plazmatu

Za účelem zjištění prostorových závislostí parametrů plazmatu byly proměřeny charakteristiky v deseti polohách sondy podél osy výbojové trubice. Krajiní polohy byly 1 cm a 16 cm od roviny magnetu (5 cm a 20 cm od ústí trysky). V každé poloze byla změřena data pro tlaky 0,06 Pa resp. 0,26 Pa a výkony 5 W resp. 20 W. V grafech 3, 4 a 5 jsou zobrazeny závislosti teploty elektronů, koncentrace iontů a napětí mezi sondami na axiální prostorové souřadnici – vzdálenosti od roviny magnetů.

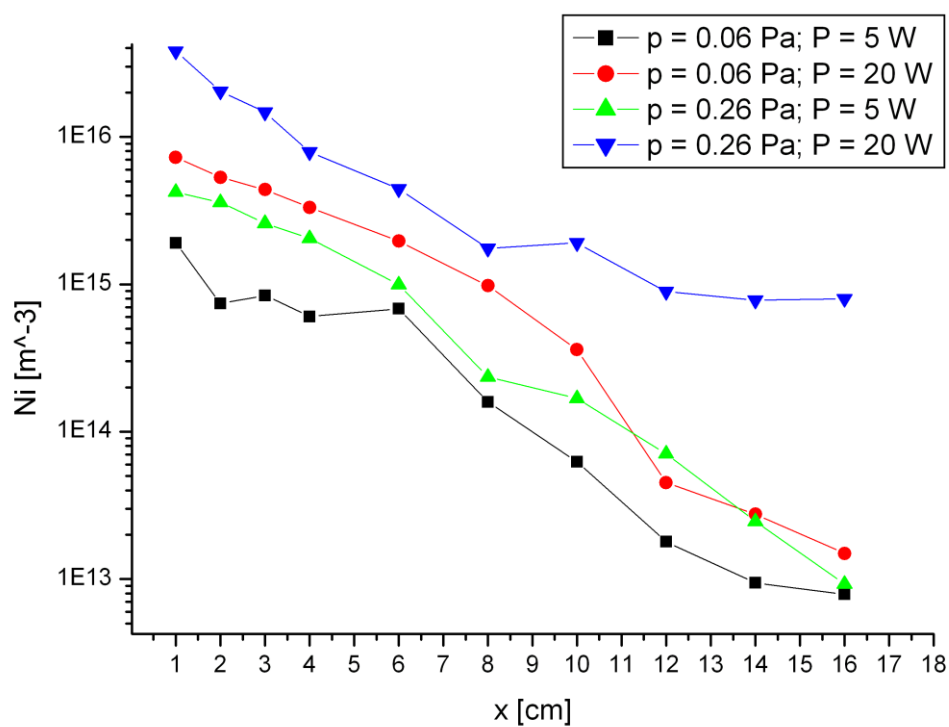
Teplota má při tlaku 0,06 Pa a výkonu 5 W na začátku trubice blízko magnetu velmi vysoké hodnoty (kolem 20 až 30 eV) a ke středu trubice prudce klesá. Minimální hodnota je 4,75 eV v 8 cm. Poté teplota ke konci trubice opět prudce roste až k hodnotě 24,9 eV. Při ostatních podmínkách teplota klesá od začátku trubice ke středu jen mírně, minimum má ve všech případech také kolem 5 eV ve vzdálenosti 8 cm. Ke konci trubice také teplota roste, pro tlak 0,06 Pa při výkonu 20 W a tlak 0,26 Pa při výkonu 5 W výrazně, pro tlak 0,26 Pa při výkonu 20 W jen mírně.

Koncentrace zřejmě ve všech případech klesá prakticky exponenciálně se vzdáleností od magnetů. U tlaku 0,26 Pa a výkonu 20 W dochází na konci trubice k ustálení koncentrace, to je pravděpodobně důsledkem toho, že plazma při těchto podmínkách hoří výrazně i v kovové části aparatury, která začíná ve vzdálenosti 6 cm od magnetů.

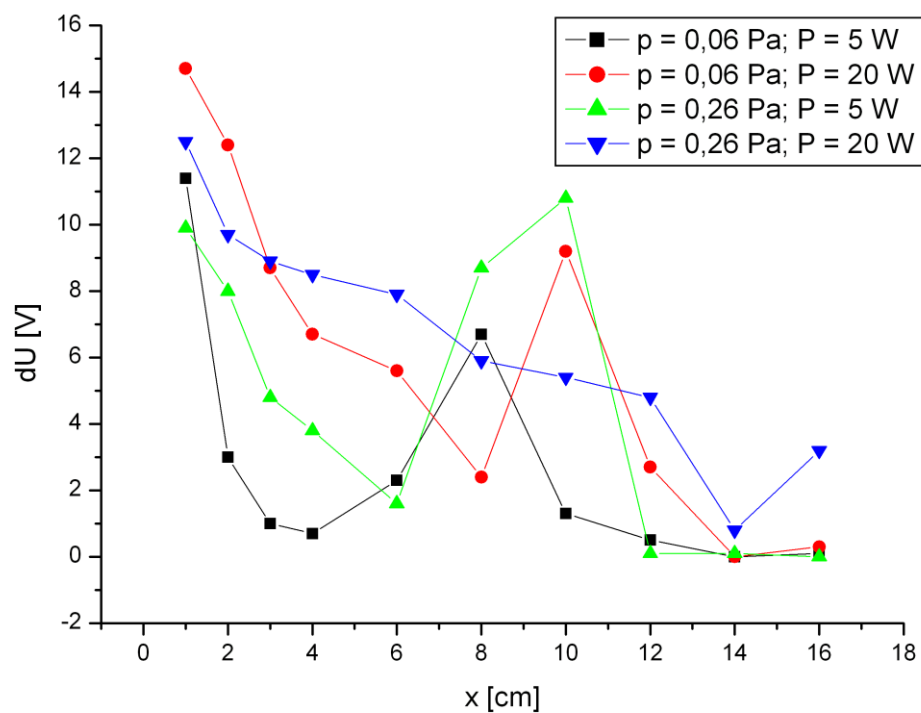
Napětí mezi sondami je nejvyšší blízko magnetů, poté prudce klesá, ve středu trubice má výrazné maximum v místě, kde má teplota minimum. Na konci trubice, kde je už velice nízká koncentrace, je napětí téměř nulové. Uvedené výsledky platí pro oba výkony při tlaku 0,06 Pa a výkon 5 W při tlaku 0,26 Pa. Výboj při 0,26 Pa a 20 W se od ostatních výrazně liší. Na rozdíl od ostatních případů je napětí výrazné i na konci trubice, což souvisí patrně s tím, že tento výboj má i na konci trubice velkou koncentraci. Napětí při těchto podmínkách navíc celkem rovnoměrně klesá se vzdáleností od magnetů, není zde maximum ve středu trubice.



Graf 3: Závislost elektronové teploty na poloze sondy podél osy výbojové trubice; nulová poloha odpovídá rovině magnetů.



Graf 4: Závislost koncentrace iontů podle Chena na poloze; nulová poloha odpovídá rovině magnetů.

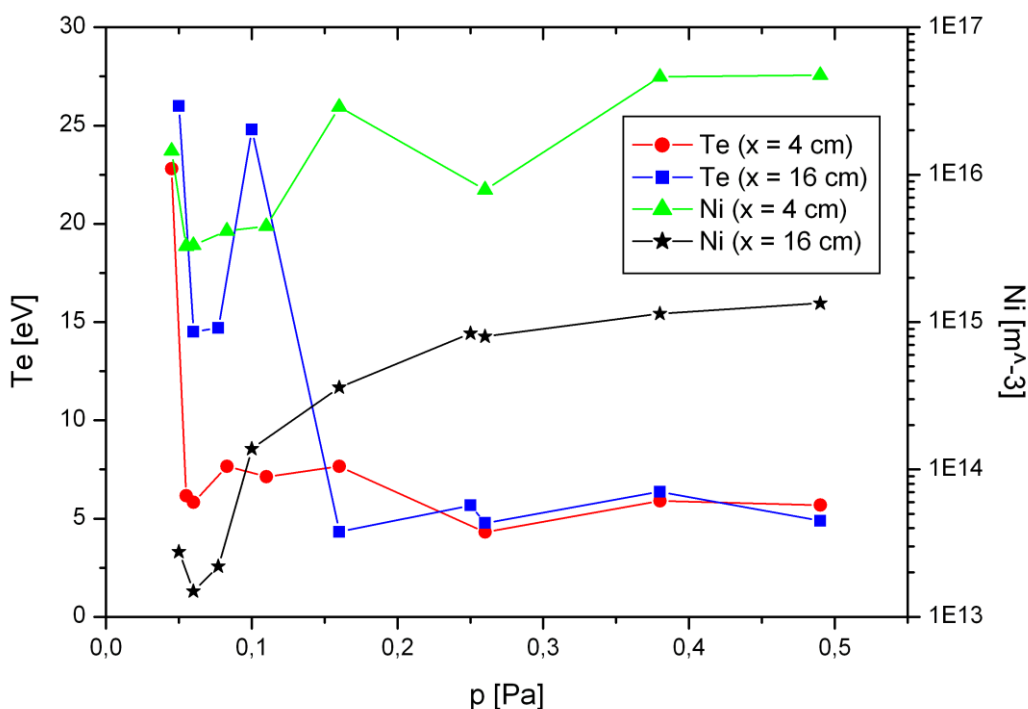


Graf 5: Závislost rozdílu potenciálů mezi sondami na poloze; nulová poloha odpovídá rovině magnetů.

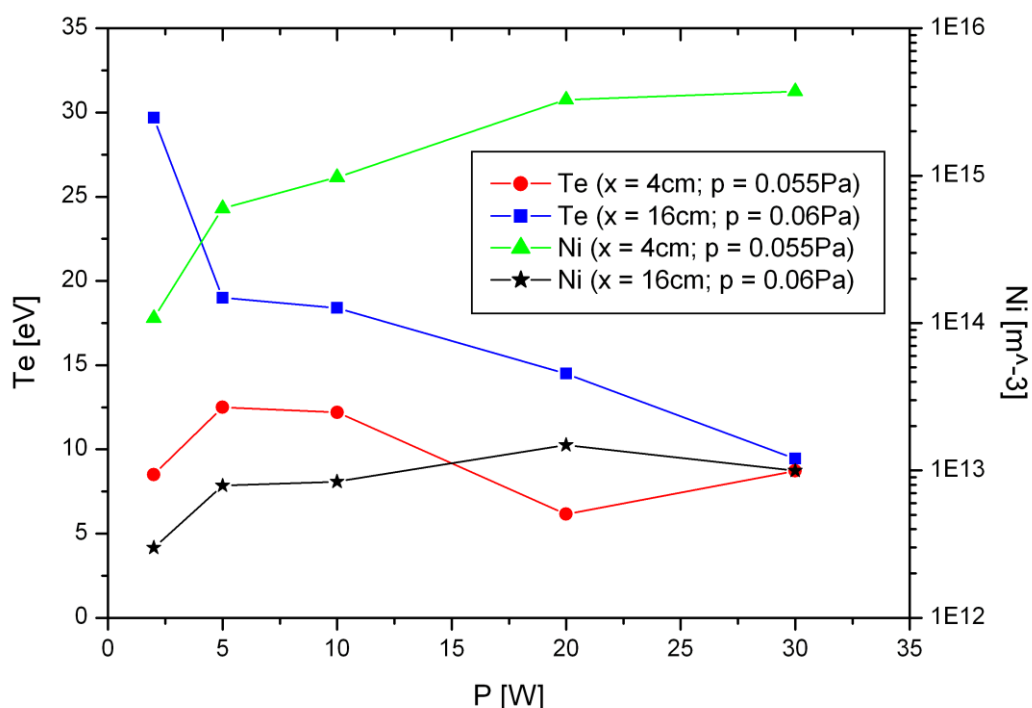
3.3 Závislost na tlaku a výkonu

Závislost parametrů plazmatu na tlaku a výkonu byla zkoumána ve dvou polohách, ve vzdálenosti 4 cm a 16 cm od roviny magnetu. Při výkonu 20 W byly proměřeny charakteristiky při devíti různých tlacích v rozmezí 0,045 Pa – 0,49 Pa. Závislost na výkonu byla měřena při nízkém tlaku okolo 0,06 Pa pro 5 výkonů od 2 W do 30 W. Závislosti teploty elektronů a koncentrace iontů na tlaku a výkonu jsou zobrazeny v grafech 6 a 7.

Teplota má vysokou hodnotu při nejnižších tlacích, ale při tlaku kolem 0,1 Pa klesne na hodnotu kolem 5 eV a dále se s rostoucím tlakem příliš nemění. Koncentrace nejdříve poněkud klesá a poté s rostoucím tlakem roste. S rostoucím výkonem teplota elektronů mírně klesá, koncentrace naopak vzrůstá.



Graf 6: Závislost teploty elektronů a koncentrace iontů na tlaku ve výbojové trubici pro dvě různé vzdálenosti od magnetů.

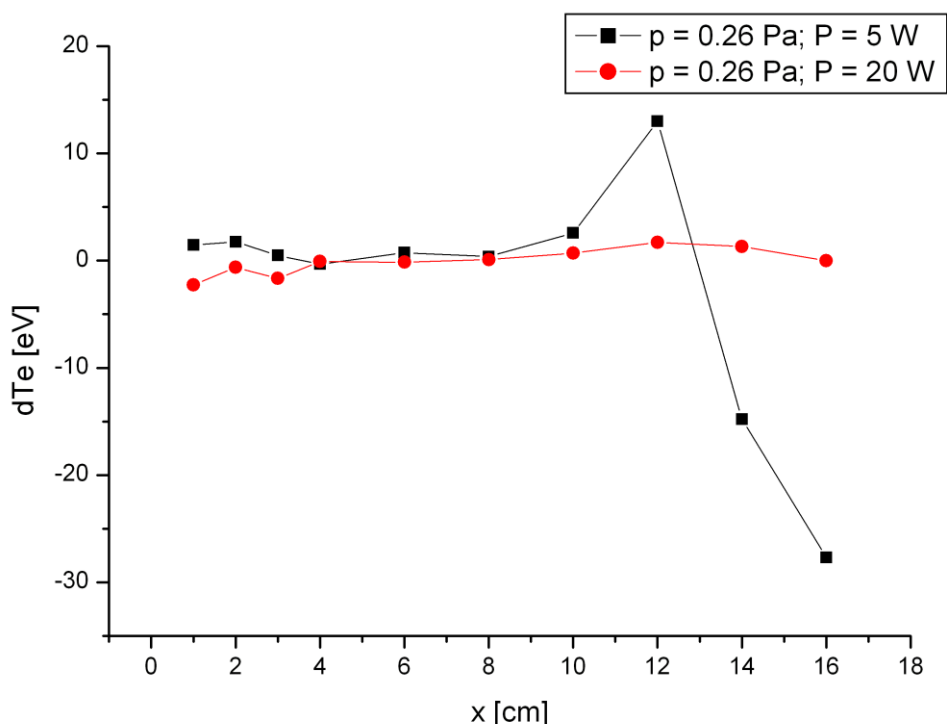


Graf 7: Závislost teploty elektronů a koncentrace iontů na výkonu.

3.3 Srovnání metod určení elektronové teploty

Všechny dosud uváděné teploty byly určeny z druhé derivace sondového proudu pomocí programu START na zpracování charakteristiky jednoduché sondy. Pro některé případy byla však teplota elektronů určena z charakteristiky dvojité sondy i dle vztahu (8). V grafu 8 je srovnání obou metod v závislosti na poloze sondy a výkonu. Na svislé ose je vyneseno rozdílné teploty určené programem z druhé derivace sondového proudu a teploty elektronů spočtené ze stejných dat dle (8). Obě metody se začínou výrazně lišit při malém výkonu pro velké vzdálenosti, kdy už je charakteristika velmi roztažená, nevýrazná. Je to způsobeno hlavně velkým šumem v naměřených datech, který ztěžuje zpracování charakteristiky oběma metodami. Pro srovnání jsou určeny teploty pro tři poslední vzdálenosti při výkonu 5 W uvedeny v tabulce. Metodou (8) tak byla spočtena elektronová teplota až 44,1 eV. Pro ostatní případy, kdy jsou charakteristiky dostatečně výrazné, se teploty určené oběma metodami liší průměrně o 1 eV.

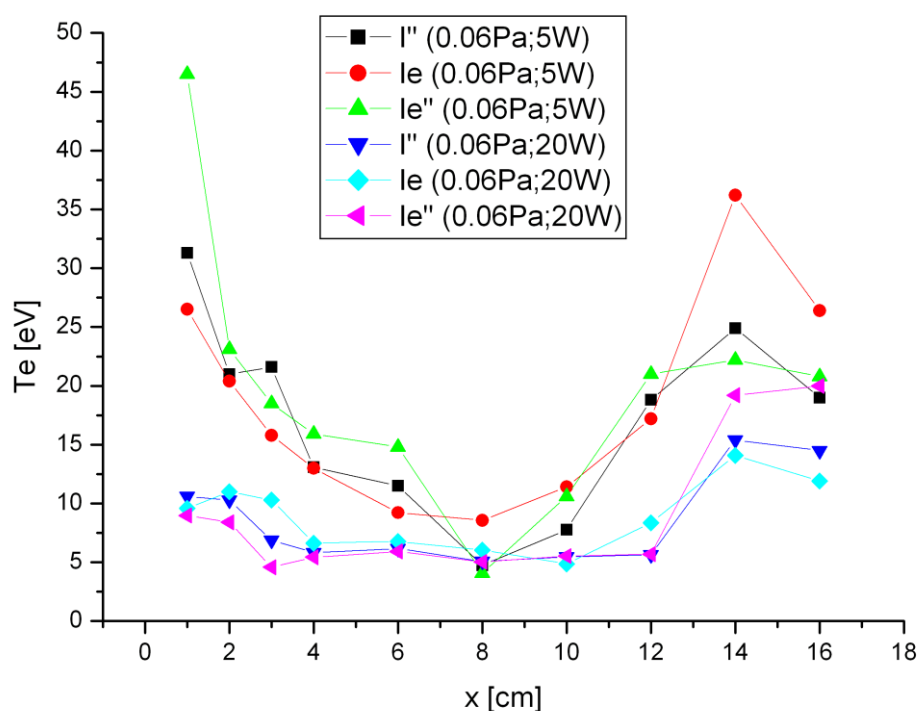
x [cm]	T_e z I'' [eV]	T_e z (5) [eV]
12	27,7	14,7
14	20	34,8
16	16,4	44,1



Graf 8: Srovnání teplot určených z druhé derivace sondového proudu a ze vztahu (8). Obě metody se poměrně dobře shodují, pokud je charakteristika výrazná.

Další metody určení elektronové teploty poskytuje použitý program START na zpracování charakteristik jednoduché sondy. Teplotu program určuje kromě z druhé derivace sondového proudu také z druhé derivace elektronového proudu a ze sklonu elektronového proudu v přechodové oblasti charakteristiky (viz kapitola 1.1). U jednoduché sondy je tato oblast přibližně vymezena plovoucím potenciálem a potenciálem plazmatu. U dvojité sondy bereme jako odpovídající oblast část mezi začátkem strmého růstu a bodem symetrie, kde by charakteristika měla mít inflexní bod, tj. kde obě sondy jsou na plovoucím potenciálu.

U charakteristiky zobrazené v grafu 1 to znamená určit sklon elektronového proudu v intervalu $(-10 \text{ V}; 0 \text{ V})$. Při vyhodnocování elektronové teploty z druhé derivace sondového proudu tedy předpokládáme (a podle [2] oprávněně), že vliv druhé derivace závislosti iontového proudu sondou na napětí mezi sondami můžeme zanedbat; v ostatních dvou případech je iontový proud z celkového proudu již odečten. V grafu 9 je zobrazeno srovnání tří uvedených metod určení teploty elektronů. Pro tlak $0,06 \text{ Pa}$ a dva výkony jsou v závislosti na poloze vyneseny teploty získané z druhé derivace sondového proudu (I''), ze sklonu elektronového proudu (I_e) a z druhé derivace elektronového proudu (I_e''). Průměrný rozptyl tří metod pro daný bod je okolo 5 eV , přičemž k velkým rozdílům v určení opět dochází hlavně pro menší výkon, který má méně výrazné a více zašuměné charakteristiky. Pro větší výkon se hlavně ve střední části trubice všechny metody dobře shodují. Navíc je vidět, že teplota určená z druhé derivace celkového proudu ve většině případů leží mezi teplotami určenými z dalších dvou metod.



Graf 9: Srovnání metod určení teploty elektronů v programu na zpracování sondové charakteristiky. I'' - určení z druhé derivace sondového proudu, I_e – určení ze sklonu elektronového proudu v přechodové oblasti, I_e'' - určení z druhé derivace elektronového proudu.

Z uvedených srovnání tedy vyplývá, s jakou věrohodností můžeme brát spočítané teploty. U teplot určených přibližně do 15 eV je podle mého názoru přesnost poměrně dobrá, teploty by se v tom případě neměly lišit od skutečnosti o více než přibližně 2 eV. Teploty okolo 20 až 30 eV jsou určeny pravděpodobně s přesností okolo 5 – 7 eV.

Závěr

Předložená práce shrnuje výsledky měření parametrů plazmatu dvojitou sondou v aparatuře pro depozice tenkých vrstev. Studovaný depoziční systém je zajímavý jak z technického, tak i z fyzikálního hlediska. Umožňuje depozici směrově orientovaných polymerních nanovrstev v plazmatu bezelektrodového vysokofrekvenčního výboje v proudu plynu za extrémně nízkého tlaku. Studium parametrů plazmatu pomocí metody jedné sondy je v tomto případě nemožné, neboť generované plazma nemá kontakt s uzemněnou aparaturou a vložení referenční elektrody do stísněného objemu aparatury by její vlastnosti znehodnotilo. V předložené práci byla proto vyvinuta metoda dvou sond, která umožňuje měření základních parametrů plazmatu, teploty elektronů a koncentrace kladných iontů, i v tomto velice speciálním případě s prostorovým rozlišením a s přijatelnou přesností.

Základem práce byla příprava diagnostického systému pro měření: výroba sondy a filtrů pro kompenzaci vysokofrekvenčního pole, výroba napěťového zdroje pro posun sondových charakteristik a úprava programu pro řízení experimentu a sběr dat. Na to navazovalo provedení samotného experimentu, jenž byl hlavní náplní celé práce.

Teplota elektronů byla z naměřených dat určována pomocí programu START pro zpracování charakteristik jednoduché sondy poté, co bylo zjištěno, že se takto určené hodnoty dobře shodují s hodnotami teploty elektronů stanovené z metody relevantní pro dvojitou sondu. Samotný program umožňuje určení teploty elektronů třemi různými metodami. Srovnání všech použitých metod stanovení elektronové teploty je jedním z výsledků této práce. Použití programu navíc umožnilo jednoduché určení koncentrace kladných iontů.

Z naměřených dat byly sestaveny závislosti teploty elektronů, koncentrace iontů a rozdílů potenciálů mezi sondami na poloze dvojsondy, tlaku v aparatuře a výkonu radiofrekvenčního zdroje. Ukázalo se, že studované plazma má zejména při nízkém tlaku a malém výkonu celkem specifické vlastnosti. Teplota elektronů při těchto podmínkách dosahuje až hodnoty kolem 25 eV na začátku a na konci trubice. Ve středu trubice má teplota hodnotu okolo 5 eV, což představuje rozdíl zhruba 20 eV na vzdálenosti 6 cm. Koncentrace iontů podél trubice exponenciálně klesá v rozmezí zhruba dvou až tří řádů.

Studium parametrů plazmatu v systému popsáném v předložené práci bude pokračovat měřeními parametrů plazmatu při depozici polymerních vrstev s malou depoziční rychlostí. Komplikace, která v tomto případě vzniká, je depozice polymerních vrstev rovněž na povrchy sond. Sondy se proto mezi jednotlivými měřeními budou muset čistit, nejspíše pomocí bombardování kladnými ionty při zavřeném přítoku monomeru (n-hexan) do prostoru výboje. V případě, že budou třeba sondová měření při experimentech s vyšší koncentrací monomeru ve výboji (vyšší depoziční rychlost), bude třeba konstrukci sond pozměnit, například použitím ohřívacích sond podobně jako v práci [14].

Literatura

- [1] I. Langmuir, H. M. Mott-Smith, Phys. Rev. **28** (1926) 99.
- [2] R. Hippler, S. Pfau, M. Schmidt, K. H. Schoenbach, M. Tichý, *Low Temperature Plasma Physics Fundamental Aspects and Applications*. WILEY-VCH Verlag Berlin 2000.
- [3] J. E. Allen, R. L. F. Boyd, P. Reynolds, Proc. Phys. Soc. B **70** (1957) 297.
- [4] I. B. Bernstein, J. N. Rabinowitz, Phys. Fluids **2** (1959) 112.
- [5] F. F. Chen, Plasma Phys. **7** (1965) 47.
- [6] S. Klagge, Disertační práce, Univerzita Greifswald, 1988.
- [7] A. A. Sonin, AIAA Journal **4** (1966) 1588.
- [8] E. O. Johnson, L. Malter, Phys. Rev. **80** (1950) 58.
- [9] S. Klagge, M. Tichý, Czech. J. Phys. B **35** (1985) 988.
- [10] P. David, M. Šícha, M. Tichý, T. Kopiczynski, Z. Zakrzewski, Contrib. Plasma Phys. **30** (1990) 167.
- [11] M. Šícha, M. Tichý, V. Hrachová, P. David, T. David, J. Touš, Contrib. Plasma Phys. **34** (1994) 51.
- [12] O. Šebek, Bakalářská práce, FJFI ČVUT, 2008.
- [13] P. Kudrna, Disertační práce, MFF UK, 1996.
- [14] P. Adámek, J. Kalčík, M. Šícha, M. Tichý, H. Biederman, L. Soukup, L. Jastrabík, Czech. J. Phys. **49** (1999) 1685.