

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Přírodovědecká fakulta

Charakterizace reaktivního plazmatu s využitím vysokofrekvenční sondy

Bakalářská práce

Aleš Pospíchal

Školitel: Mgr. Martin Čada, Ph.D.

České Budějovice 2020

Bibliografické údaje:

- A. Pospíchal, 2020: Charakterizace reaktivního plazmatu s využitím vysokofrekvenční sondy [Characteristics of reactive plasma using a high frequency probe, Bc. Thesis, in Czech] – 48 pp., Institute of physics, Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic.

Anotace

Bakalářská práce byla zaměřena na sestavení, kalibraci a testování měřicího přístroje, který by mohl být použit v Laboratoři fyziky plazmatu na PřF. Toto zařízení sestávalo z vysokofrekvenčního napěťového a proudového senzoru založených na principu kapacitního senzoru a Rogowského cívice. V této práci jsou uvedeny výsledky ze všech kroků konstrukce a použití měřicího přístroje.

Annotation

The bachelor thesis was focused on the proces of construction, calibration and testing of measuring gadget, which might be used in Laboratory of plasma physics at Faculty of Science. This device was consisting of high frequency voltage and current sensor based on a capacitive sensor and Rogowski coil respectively. Results from all steps of making and usage of measuring gadget are submitted in this thesis.

Abstrakt

Bakalářská práce byla zaměřena na sestavení, kalibraci a testování měřicího přístroje, který by mohl být použit v Laboratoři fyziky plazmatu na PřF. Toto zařízení sestávalo z vysokofrekvenčního napěťového a proudového senzoru založených na principu kapacitního senzoru a Rogowského cívce.

Protože se Rogowského cívka běžně používá pro měření střídavého proudu v širokém rozsahu frekvencí, lze ji v kombinaci se sondou umístěnou v plazmovém výboji použít jako užitečný nástroj v diagnostice plazmatu. Sobolewského sonda sestávala z plochého šroubu s aktivním povrchem 1 cm^2 a s vodičem pokrytým teflonem, což má schopnost měřit iontový tok. Tato sonda je připojena k Rogowského cívce, která je v podstatě toroid s vinutím. Cívkou prochází vysokofrekvenční (radiofrekvenční – RF) signál, který je schopen indukovat napětí a proud uvnitř vinutí cívky. Díky této elektromagnetické indukci může Rogowského cívka měřit změny tohoto RF signálu pokud bude v kontaktu s plazmovým výbojem. Měřicí zařízení bylo zkalibrováno pro frekvence 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 6; 7; 8; 9 a 10 MHz a následně byly jeho měřicí schopnosti úspěšně testovány na popis nereaktivního plazmatu (čistý argon) a taktéž pro dva různé reaktivní plazmatické výboje (směs argon/dusík a směs argon/kyslík). Další parametry ve vakuové komoře byly následující: tlak: $p = 1 \text{ Pa}$, výkon zdroje pro zapálení plazmatu: $P = 200 \text{ W}$, frekvence zdroje pro zapálení plazmatu: $f = 13,56 \text{ MHz}$. V této práci jsou uvedeny výsledky ze všech kroků konstrukce a použití měřicího přístroje. Na základě výsledků lze říci, že budoucí použití tohoto zařízení jako diagnostického nástroje v Laboratoři fyziky plazmatu na Přírodovědecké fakultě je možné.

Abstract

The bachelor thesis was focused on the process of construction, calibration and testing of measuring gadget, which might be used in Laboratory of plasma physics at Faculty of Science. This device was consisting of high frequency voltage and current sensor based on a capacitive sensor and Rogowski coil respectively.

Because the Rogowski coil is commonly used for measuring of alternate current in wide range of frequencies, in combination with probe placed in plasma discharge can be used as an useful instrument in plasma diagnostics. The Sobolewski probe consisted of planar screw with active surface of 1 cm^2 with conductor covered by teflon, which was able to measure the ion flux. This probe is connected to Rogowski coil, which is basically toroid with winding. Through the coil, the RF (radio frequency – high frequency) signal flows and is able to induce the voltage and current in the coil's winding. Thanks to this electromagnetic induction, the Rogowski coil can measure changes of this RF if it is in contact with plasma discharge. The measuring device was calibrated for frequencies 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 6; 7; 8; 9 and 10 MHz. Consequently, its measuring abilities was successfully tested for description of non-reactive plasma (pure argon) and two different reactive plasma (mixture of argon/nitrogen and mixture of argon/oxygen) was used. The other parameters in vacuum chamber were as follows: pressure: $p = 1 \text{ Pa}$, power of discharge source: $P = 200 \text{ W}$, frequency of discharge source: $f = 13,56 \text{ MHz}$. Results from all steps of making and usage of measuring gadget are submitted in this thesis. According to results, the future usage of this device as a diagnostic instrument in Laboratory of plasma physics at Faculty of Science might be possible.

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

Prohlašuji, že v souladu s § 47 b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů.

V Českých Budějovicích,

dne

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce, panu Mgr. Martinu Čadovi, Ph.D. za věcné rady a za vedení mé práce. Dále bych rád poděkoval kolegům Mgr. Petru Rozhoňovi a Mgr. Petru Sezemskému za cenné technické připomínky při stavbě cívky. V neposlední řadě bych také rád poděkoval své rodině za podporu během studia.

Obsah

1. Teoretický úvod.....	8
1.1. Teorie plazmatu	8
1.2. Vlastnosti plazmatu.....	9
1.3. Využití reaktivního plazmatu a techniky využití plazmatu	10
1.4. Diagnostika plazmatu	13
1.5. Rogowského cívka.....	14
1.6. Cíle práce	17
2. Materiál a metodika.....	17
2.1. Návrh cívky.....	17
2.2. Stavba cívky.....	18
2.3. Měřicí kabely	22
2.4. Kalibrace Rogowského cívky	23
2.5. Sobolewského sonda a měření v plazmatu	25
3. Řešení a výsledky.....	28
3.1. Kalibrace	28
3.1.1. Konstanty úměrnosti.....	28
3.1.2. Fázové posuny	33
3.2. Měření v plazmatu	36
4. Závěr.....	40
5. Literární přehled.....	42
6. Seznam obrázků, tabulek a grafů	47
I. Seznam obrázků:.....	47
II. Seznam tabulek:.....	48
III. Seznam grafů:	48

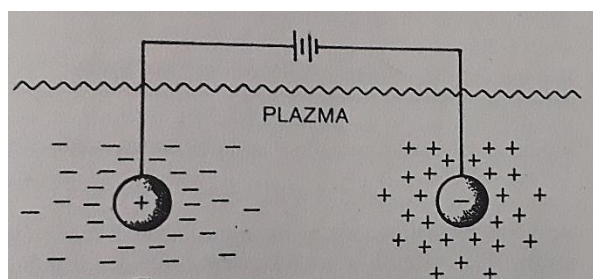
1. Teoretický úvod

1.1. Teorie plazmatu

Plazma – někdy označované jako tzv. čtvrté skupenství – je definováno jako elektricky vodivé médium, které obsahuje záporně nabité elektrony, kladně nabité ionty, neutrální atomy či molekuly, nebo nabité částice včetně atomů i molekul zároveň (Li a kol., 1997). Samotný pojem plazma byl zaveden v roce 1928 Langmuirem, který tak označil vnitřní část elektrického výboje, na který neměly vliv stěny a elektrody výbojky (Martišoviš, 2004).

Základem pro existenci plazmy je ionizovaný plyn vzniklý z atomů či molekul přítomných mezi elektrodami jejich ionizací tak, že na elektrodách měníme potenciál. Vzniklé částice (elektrony, kladně a záporně nabité ionty) se pohybují náhodně, přičemž dochází k jejich srážkám. Jejich pohyb může být také lokálně ovlivněn elektrickým polem. Toto lokální elektrické pole způsobí přemísťování nabitých částic (kladné ionty směřují k záporné elektrodě; elektrony a záporné ionty směřují ke kladné) a postupně tak dojde k odstínění vnějšího elektrického pole uvnitř ionizovaného plynu (Martišoviš, 2004).

Tento proces se nazývá Debyeovo stínění, a platí, pokud je hustota nábojů dostatečně vysoká a v takovém plazmatickém systému, jehož rozměry (L) jsou mnohem větší než tzv. Debyeova délka (λ_D) popisující míru stínící vzdálenosti plazmatu (Chen, 1984).



Obrázek 1: Znáornění Debeyova stínění (převzato z Chen, 1984).

Nutno podotknout, že z hlediska elektrického náboje je plazma tzv. kvazineutrální (tedy hustota kladně a záporně nabitých částic v plazmatu je stejná, avšak na lokální úrovni zde mohou existovat místa s přebytkem náboje) a částice uvnitř plazmatu vykazují kolektivní chování, což znamená, že elektromagnetické síly působí na částice nejenom v „lokálních podmínkách“ uvnitř plazmatu, ale také ve „vzdálených oblastech“ – na okrajích plazmového oblaku (Chen, 1984).

1.2. Vlastnosti plazmatu

Jak je řečeno výše, základní vlastností plazmatu je přítomnost nabitých částic, kvazinetutralita, kolektivní chování částic a schopnost odstínění vloženého elektrického náboje (Chen, 1984; Li a kol., 1997; Martišovitš, 2004). Plazma také disponuje vyšší energií částic ve srovnání s částicemi tvořící zbylá tři skupenství (Li a kol., 1997). Podle střední velikosti energie částic plazmatu rozlišujeme vysokoteplotní a nízkoteplotní plazma, přičemž jak uvádí Martišovitš (2004) je toto rozdělení spíše otázkou konvence, protože v obou dvou případech mohou teploty elektronů dosahovat vysokých hodnot. Např. elektrony ve vysokoteplotním plazmatu pro termonukleární syntézu dosahují teploty řádově 10^6 K, přičemž v nízkoteplotním plazmatu je teplota elektronů až 10^5 K. Těžké (neutrální) částice v nízkoteplotním plazmatu mají ve srovnání s lehkými elektrony podstatně nižší teplotu (vakuová komora se neroztaví, i když teplota elektronů může být desítky eV). Na rozdíl od obloukového výboje pro svařování (vysokoteplotní plazma), které je opravdu horké (atomy, molekuly či ionty mají vysokou teplotu) takže jím můžeme tavit železo (Martišovitš, 2004).

Vysokoteplotní plazma je typické právě pro experimenty termonukleární syntézy či pro vesmírná tělesa (Slunce, hvězdy), kdežto s nízkoteplotním plazmatem se setkáme v technologické oblasti zahrnující přístroje, jako jsou žárovky, výbojky či reklamní světelné výbojky (Martišovitš, 2004). Po úspěšném rozvoji plazmatických technologií ve vědeckém výzkumu se s nízkoteplotním plazmatem setkáme také při přípravě především různých druhů materiálů v oblasti metalurgie, elektroniky, kompozitních materiálů (např. plasty), textilií či biotechnologií (Li a kol., 1997; Virostko, 2009).

Jak bylo řečeno, plazma obsahuje nabitě částice a je tedy elektricky vodivé. To má také významný praktický dopad na využití plazmatu v technické oblasti. Míra vodivosti plazmatu je dána tím, jestli je plazma silně či slabě ionizováno, přičemž k určení tohoto stavu nepřispívá pouze množství nabitých částic, ale také teplota. Pokud teplota (elektronů) roste, pak roste i vodivost, a to s exponentem $3/2$ (Martišovitš, 2004).

Díky přítomnosti elektrické vodivosti a nabitých částic působí na plazma také magnetické pole, které spolu s Lorentzovou silou ovlivňuje pohyb částic uvnitř plazmatu snižováním jejich difúze magnetickým polem, což může vést ke vzniku vysokoteplotního plazmatu o takových teplotách, které dokáží roztavit prakticky jakýkoli materiál (využíváno při plazmovém řezání a sváření) (Chen, 1984; Martišovitš, 2004).

Pro základní procesy v plazmatu a pro zajištění jeho existence je nejpoužívanějším plynem pro ionizaci, vznik plazmatu a iontové bombardování vzácný plyn – argon (Lieberman

a Lichtenberg, 2005). Pakliže je v plazmatu kromě argonu, který je jinak nereaktivní (Räsänen, 2014), přítomen i jiný, avšak reaktivní plyn (typicky kyslík, dusík, acetylen či jiné), hovoříme o tzv. reaktivním plazmatu nebo také reaktivních plazmatických výbojích (Lieberman a Lichtenberg, 2005; Sezemský a kol., 2019)

1.3. Využití reaktivního plazmatu a techniky využití plazmatu

Chemicky reaktivní plazmové výboje se široce používají k úpravě povrchových vlastností materiálů tam, kde jiné komerční metody nejsou natolik efektivní, jsou časově náročnější nebo jsou neekologické. Také jsou nezbytné pro výrobu integrovaných obvodů používaných v elektronickém průmyslu, jsou klíčové pro letecký, automobilový, ocelářský, biomedicínský či toxický odpad likvidující průmysl (Lieberman a Lichtenberg, 2005).

Rovněž byly vyrobeny jedinečné materiály, jako jsou diamantové filmy a amorfní křemík pro solární články; krom toho je plazma také využíváno ke tvorbě biologicky kompatibilních povlaků chirurgicky implantovaných kyčelních kloubů či součástek obráběcích strojů (Lieberman a Lichtenberg, 2005).

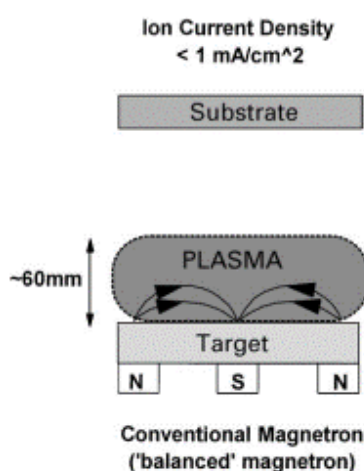
Významná úloha reaktivního plazmatu je například za účelem velmi efektivního čištění povrchů kovů s využitím kyseliny chlorovodíkové (např. reaktivní plasma obsahující 95 % Ar a 5 % HCl pro 90 minutové čištění titanu využívající vysokofrekvenční výboj s napětím 500 V a výkonem 30 W) (Kominiak a Mattox, 1977). Bývá dále používáno při přípravě nanokrystalických sloučenin jako jsou oxidy hliníku, titanu či zirkonu (Sreekumar a kol., 2010).

Obzvláště významným způsobem jak použít plazma v průmyslové výrobě je nanášení (depozice) různých druhů tenkých vrstev na podklady (také nazývané substráty podle anglického názvu „substrate“) (Virostko, 2009) například za účelem výroby nevodivých tenkých vrstev (Sezemský a kol., 2019). Tenké vrstvy mohou být nanášeny na podklad metodou PVD (physical vapour deposition) využívající naprašování pevného materiálu z katody bombardováním iontů z plazmového výboje na substrát pomocí magnetronu (Kelly a Arnell, 2000; Virostko, 2009; Hubička, 2012). Tímto je na substrát deponována tenká vrstva kýženeho materiálu z katody – terče (dle anglické terminologie tzv. target) (Virostko, 2009; Hubička, 2012).

Stručně popsany proces nanášení tenké vrstvy pomocí magnetronu uvnitř vakuové (depoziciční komory) spočívá ve vytvoření magnetického pole uvnitř komory v těsné blízkosti samotného magnetronu. V okolí terče působí na nabitě částice Coulombovy síly a výše

zmíněná Lorentzova síla. Zkřížené magnetické a elektrické pole funguje pro lehké elektrony jako past, což vede k prodlužování jejich dráhy letu, zvyšování počtu srážek s neutrálními atomy a následně i k vyšší pravděpodobnosti ionizace plynu včetně zvyšování hustoty elektronů v okolí terče. To bývá v případě použití vakuových komor podpořeno i nízkým tlakem a relativně nízkým napětím (Tichý, 2014).

Jak je zmíněno výše, součástí magnetronu je terč (target). Na tento terč je při depozici přivedeno záporné napětí a funguje tak tedy jako katoda. Další součástí bývají vhodně uspořádány magnety, pomocí jejichž polohy lze dosáhnout požadované kontroly nad nabitými částicemi v plazmatu, čímž lze ovlivnit tok plazmatu mezi terčem a substrátem (Tichý, 2014).

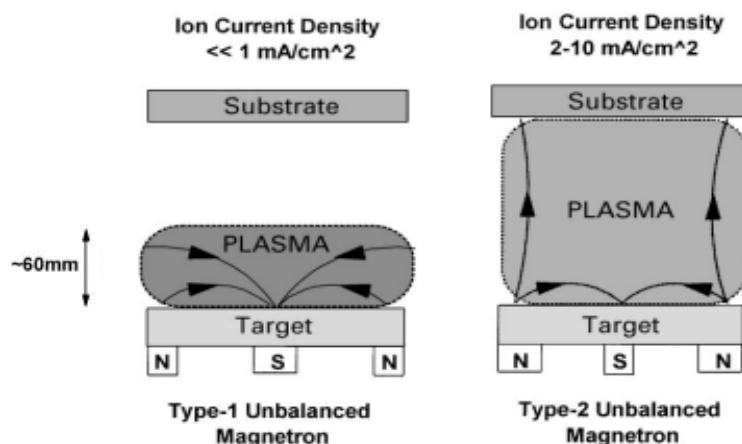


Obrázek 2: Schématické znázornění konvenčního magnetronu pro naprašování s ukázkou tloušťky plazmového oblaku včetně údaje hustoty iontového proudu (převzato z Kelly a Arnell, 2000).

Základní naprašovací systémy využívající výše popsané „konvenční“ planární vyvážené (balanced) magnetrony jsou hojně v technické praxi využívány, navzdory tomu jsou však často limitovány: např. silným zahříváním targetu s nutností jeho chlazení; odpadním teplem zahřívající substrát a jeho následnými defekty v nanesené vrstvě a v neposlední řadě také nízkou účinností ionizace rozprášených částic (Nishikawa a kol., 1984; Kelly a Arnell, 2000; Mattox, 2002, 2010).

To vedlo k rozvoji tzv. nevyvážených („unbalanced“) magnetronů, které našly využití v systémech CFUBMS (closed-field unbalanced magnetron sputtering) umožňující depozici vrstev z různých druhů materiálů (slitiny kovů, nitridy, uhlíkové vrstvy) tvořící tak vysoce kvalitní produkt s odolnými povrchy (Kelly a Arnell, 2000; Teer a kol., 2003). Pro porovnání s vyváženým magnetronem je rozdíl v tom, že vyvážený magnetron váže plazma do blízkosti terče (Kelly a Arnell, 2000) a nevyvážený magnetron naopak umožňuje transport nabitých

částic blíže k substrátu (obrázek 3), což umožňuje lepší kontrolu nad mikrostrukturou vznikající tenké vrstvy (Tichý, 2014).



Obrázek 3: Schéma nevyváženého magnetronu s měřítkem velikosti plazmového oblaku a jeho polohou vůči substrátu. Zajímavostí je hodnota hustoty iontového proudu v těchto uspořádáních (převzato z Kelly a Arnell, 2000).

Další možností využití naprašování je použití pulzního magnetronového naprašování (PMS), kdy je využito pulzního stejnosměrného buzení výboje na targetu, které sice poskytuje vysoce kvalitní vrstvy (Belkind a kol., 2005), nicméně s nižší rychlostí depozice (Kelly a Arnell, 2000). Díky komplikovanému designu bylo jejich využití (např. v komerční sféře) omezené (Kelly a Arnell, 2000), avšak dnes již v průmyslu hojně využíváno (Zhao a kol., 2006; Paulitsch a kol., 2010)

Odlišnou variantou k výše zmíněným systémům je metoda nesoucí označení PECVD (plasma enhanced chemical vapour deposition), kdy je nanášení materiálu na substrát prováděno pomocí vhodných plynných prekurzorů, jejichž chemická reakce na povrchu substrátu je podpořena (iniciována) plazmatem (Mattox, 2010; Hubička, 2012).

Nevýhodou konvenčního magnetronového naprašování je kromě výše zmíněného také nízká elektronová a iontová hustota a tím pádem i nízký iontový tok na podložku (Hubička, 2012). Také zde hraje roli použití samotného magnetronu, jehož využití při nanášení vrstev na substráty komplikovaných tvarů či na substráty s dutinami je omezené, protože v dutinách nedosahuje tak kvalitního pokrytí (Virostko, 2009). Z tohoto důvodu byly vyvinuty jiné typy zdrojů nízkoteplotního plazmatu s vyšší hustotou plazmatu (Hubička a kol., 2012) jako je například aplikace plazmatického tryskového systému s efektem duté katody (Virostko, 2009; Hubička, 2012). Tryskový systém s efektem duté katody je výhodnější, protože umožňuje nanášení tenkých vrstev na tvarově rozmanité substráty (např. s dutinami), kde je magnetron

hůře použitelný (Virostko, 2009). Příkladem použití plazmatického tryskového systému je v případě depozic vrstev jako je TiN_x – nitrid titanu (Bardoš a kol., 1993), Cu_3N – nitrid mědi (Soukup a kol., 1999) či CN_x – nitrid uhlíku (Hubička a kol., 2001).

1.4. Diagnostika plazmatu

Za účelem zajištění reprodukovatelnosti nanášených vrstev během procesu depozice je prováděna tzv. diagnostika plazmatu, jejímž cílem je změření důležitých parametrů, které pomáhají objasnit charakter výboje nebo mají za úkol sledovat mechanismy procesů, které v plazmatu probíhají a jsou jím i indukovány (Virostko, 2009; Pu a Czarnetzki, 2017). Diagnostika plazmatu hraje současně i významnou roli při výzkumu nových metod či při optimalizaci stávajících metod pro depozice modernějších, nových materiálů (Virostko, 2009).

Dnes známé a používané diagnostické metody jsou například mikrovlnná diagnostika, spektroskopická diagnostika a jí podobná laserová diagnostika, sondová diagnostika, z nichž nejznámější je hojně používaná Langmuirova sonda, či diagnostika částicová zaměřená na analýzu neutrálních částic (tzv. NPA – neutral particles analysis) (Donne, 2006; Pu a Czarnetzki, 2017). Kombinací částicové a spektroskopické diagnostiky vznikla metoda označovaná jako „spektroskopie s výměnou náboje“ (charge exchange recombination spectroscopy – CXRS) poskytující informace o teplotě, hustotě a rotaci iontů či navíc informace o fluktuaci hustoty elektronů a vlastnostech vnitřního magnetického pole plazmatu (Donne, 2006).

K diagnostice iontového toku a impedance vrstvy prostorového náboje poblíž substrátu slouží planární sonda připojená ke zdroji předpětí vysokofrekvenčního (VF) signálu (Lundin a kol., 2016). Správná analýza měřených signálů umožňuje určit právě iontový tok na povrchu sondy. Tuto metodu původně navrhl Sobolewski v 90. letech (Sobolewski, 1992), což vedlo k ustálení výrazu pro takový typ sond jako tzv. Sobolewského sonda (Lundin a kol., 2016). Měření prostorového náboje poblíž deponované vrstvy (substrátu) bylo touto metodou použito například v pracích (Sobolewski, 1992; Sobolewski, 2001). Metoda s použitím VF sondy nevyžaduje vložení dalšího hardwaru do plazmatu, protože k tomuto účelu plně postačuje držák substrátu, na který je předpětí přivedeno (Lundin a kol., 2016). Jak dále popisuje (Sobolewski, 1992), iontový tok je získán z průběhu RF (radiofrekvenčního – vysokofrekvenčního) proudu v místě, kde je RF napětí minimální. Tímto způsobem je také možné zaznamenat iontový tok na dielektrických substrátech, kde běžně ostatní sondové techniky (jako sonda měřící iontovou saturaci či Langmuirova sonda) selhávají

(Sobolewski, 2001). V praxi se s touto technikou můžeme setkat i v průmyslových plazmatických procesech, protože zde růst tenkých vrstev nebo kontaminace substrátu používaná ke sběru informací o iontovém toku neovlivní sběr dat (Lundin a kol., 2016).

Posledním druhem diagnostické metody je magnetická diagnostika používaná v rozsahu 100 Hz až několik MHz odpovídající frekvenčnímu rozsahu mnoha plazmových procesů. Protože detekuje elektromagnetické pole generované plazmatem, je vhodná pro měření základních parametrů v plazmatu jako je například plazmatický proud, tvar plazmatu a jeho tlak či nestabilita uvnitř plazmatu (Donne, 2006).

Nejjednodušším zařízením magnetické diagnostiky je v podstatě cívka, jejíž měřené výstupní napětí je měřítkem síly magnetického pole uvnitř cívky. Modifikací takové cívky je kupříkladu Rogowského (či Rogowskiho) cívka (Donne, 2006), jejíž modifikace byla použita v této bakalářské práci a jejíž obecná teorie je detailně rozebrána v následující kapitole.

1.5. Rogowského cívka

Jak bylo řečeno výše, Rogowského cívka je typ induktoru (cívky s indukčností) (Ramboz, 1996), které má namísto feromagnetického jádra jádro vzduchové (Samimi a kol., 2014). Zařízení bylo pojmenováno podle německého fyzika Waltera Rogowského (v prvním pádě Walter Rogowski), který s původní cívkou přišel spolu se svým spolupracovníkem W. Steinausem v roce 1912 (Samimi a kol., 2014; Nanyan a kol., 2018).

V technické praxi se cívka využívá jako senzor měřící střídavý a přechodný proud v rozsahu desítek mA až tisíců ampér (Ramboz, 1996; Nanyan a kol., 2018). Nemusí být tedy využita pouze jako diagnostické zařízení plazmatu, ba dokonce i častěji jako senzor pro měření výše zmíněných parametrů v široké elektrotechnické branži (Kubáč, 2009; <https://automatizace.hw.cz/co-je-k-cemu-je-jak-funguje-rogowskeho-civka>). Ve své podstatě je zařízení toroid z vhodného dielektrika (nejčastěji jím bývá křemičitá guma), kolem něhož je navinut vodič (Ramboz, 1996; Virostko, 2009; Kubáč, 2009). Postupným vinutím vodiče těsně kolem dielektrika se vytváří závity podél obvodu toroidu, přičemž je vhodné, po návratu na začátek vinutí vést v protisměru po obvodu dielektrika další smyčku (Ramboz, 1996; Virostko, 2009; Samimi a kol., 2014). Důvodem zavedení této smyčky opačné orientace je kompenzace parazitních indukovaných proudů, které mohou být způsobeny díky přítomnosti jiných magnetických polí v okolí cívky vyvolané jinými vodiči ležící mimo střed toroidu (např. vodič tzv. napěťového čidla, vyvedené od středu toroidu mimo cívku, jehož napětí je dále sledováno pomocí osciloskopu) (Ramboz, 1996; Virostko, 2009). Co je však potřeba při

navíjení vodiče na dielektrikum cívky dodržet je rovnoměrný rozestup mezi závity vinutí (Musil, 2006; Kubáč, 2009). V opačném případě vzniká relativně velká chyba vyvolaná změnou polohy vodiče procházejícího cívku a také tím dochází ke zvýšení citlivosti na okolní elektromagnetické rušení (Musil, 2006; Kubáč, 2009). Jedna z možných podob Rogowského cívky (senzoru) je znázorněna na obrázku 4.



Obrázek 4: Podoba Rogowského cívky s různě velkým toroidem pro různé technické účely (převzato z https://taehwa.en.ec21.com/Rogowski_Coil-3789127_1447085.html).

Jak je patrné z obrázku 4 a jak popisuje Kubáč (2009) cívky mohou mít různou povrchovou úpravu podle jejího využití sloužící jako elektromagnetický štít. Příkladem jsou cívky bez ochranného povrchu (vhodné na izolované vodiče, ke kterým je cívka přichycena lepicí páskou a odstíněna elektrikařskou páskou), plasticky spletené (poskytuje dobrou mechanickou ochranu bez ztráty ohebnosti; je však náchylná na čistotu prostředí, kde je použita), cívky s tepelně smrštitelnými kryty (vykazují menší ohebnost než předchozí typ, ale poskytuje lepší ochranu proti nečistotám) a nakonec cívky s elektrostatickou stínící sítí (ty jsou vhodné pro měření velice malých proudů či v situacích, kde existuje možnost kapacitních vazeb s vysokofrekvenčním – VF napětím) (Kubáč, 2009).

Co se týká samotného tvaru toroidu, několik studií (Ramboz, 1996; Rezaee a Heydari, 2008; Shafiq a kol., 2014) věnovalo pozornost této vlastnosti a porovnávali parametry cívek s různým tvarem, vinutím či dalšími vlastnostmi (Weibo a kol., 2006; Rezaee a Heydari, 2008). Jak uvádí Weibo a kol. (2006), kruhový průřez je lepší než obdélníkový (či čtvercový – respektive jakýkoli pravoúhlý tvar) díky přesnosti měření proudu touto cívku a díky nižší relativní chybě vlastní indukčnosti cívky L_C ve srovnání s cívkami s pravoúhlým průřezem toroidu. Avšak Weibo a kol. (2006) dále dodává, že pokud je poměr výšky toroidu k jeho

vnitřní šířce (tloušťce) menší než 0,04, je pravoúhlý průřez lepší než kruhový, což je dáno výrobním omezením toroidu kruhového průřezu. Krom toho obdélníkový tvar také umožňuje vyšší magnetický tok než kruhový průřez (Rezaee a Heydari, 2008).

Při samotném měření prochází středem toroidu (cívky) vodič, kterým protéká měřený vysokofrekvenční střídavý proud, který vyvolává magnetické pole, které se v průběhu času mění (Virostko, 2009). Toto magnetické pole indukuje v cívce napětí (Hlaváček a kol., 2008) a následně i proud, jenž je měřen jako úbytek napětí na rezistoru s odporem připojeným mezi konce vinutí cívky (Virostko, 2009). Konečné napětí je tedy úměrné změně magnetického toku skrze cívku a tudíž i hodnotě střídavého proudu, který ho vyvolal (Kubáč, 2009). Je však důležité podotknout, že výsledný signál reprezentující časový průběh tvaru vlny původního proudu vodiče se dostane až následnou integrací na základě získaného napěťového signálu (Ramboz, 1996; Kubáč, 2009). Ramboz a kol. (1996) uvádí řešení výše zmíněné situace pomocí následujících vztahů:

- i. Napětí U_0 (v Ramboz a kol. (1996) značeno jako e_0) generované cívkou je úměrné vzájemné indukčnosti cívky M a časové změně procházejícího proudu $di(t)/dt$:

$$U_0 = M \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

- ii. Ze vztahu (1) je proud následně vypočten integrací napětí vztahem:

$$i(t) = \int di(t) = \frac{1}{M} \int U_0(t) dt \quad (2)$$

Výsledný signál je tedy přímo úměrný proudu, který teče primárním vodičem (Kubáč, 2009). Nutno podotknout, že výše zmíněný početní postup je však v dnešní době přenechán moderní digitální elektronice – osciloskopu, který zpracovává napětí cívky na výstupu (Ramboz, 1996).

Protože je výstupní napětí na Rogowského cívce určeno derivací primárního proudu za čas (viz rovnice 1), dojde ke změně fáze signálu. Pro ustálený stav tak platí fázový posun mezi primárním proudem a napětím na Rogowského cívce o 90° (tedy $\pi/2$) (Kubáč, 2009). K popsanému fázovému posunu dochází také u přechodových jevů, které se také eliminují integrováním napětí na výstupu cívky (Kubáč, 2009).

Rogowského cívka disponuje celou řadou výhod (Ramboz, 1996; Metwally, 2010; Nanyan a kol., 2020). Právě díky zmíněnému vzduchovému jádru, má cívka lineární magnetizační charakteristiku v širokém rozsahu proudů bez nasycení, díky čemuž může být

kalibrována již při nízkých proudech (Ramboz, 1996; Kubáč, 2009). Pro její praktické využití je dále výhodné její odolnost vůči dlouhodobé zátěži (tedy dlouhotrvající velké napětí); snadné používání díky kompaktním rozměrům; nízká hmotnost a jednoduchost; nepotřebuje ke své funkci napájení od zdroje elektrické energie, s čímž souvisí i nízké provozní náklady, či nízké náklady na samotnou výrobu a bezpečný provoz (je v podstatě izolována od měřeného obvodu) (Metwally, 2010; Samimi a kol., 2019).

Na druhou stranu mezi její nevýhody patří výše zmíněná nutnost integrace a také, že přenosová funkce je rezonanční kvůli kapacitanci a vlastní induktanci cívky (Robles a kol., 2018). Díky přítomnosti vzduchového jádra cívky je její vzájemná induktance různá s ohledem k tomu, jak je různě navržen tvar cívky (Rezaee a Heydari, 2008). Citlivost Rogowského cívky je také ovlivněna změnou polohy vodiče měřeného proudu uvnitř cívky jak prokázal Rezaee a Heydari (2008) či Myška (2011).

1.6. Cíle práce

Hlavním cílem bakalářské práce je sestavit Sobolewského sondu a měřící zařízení na bázi Rogowského cívky pro studium nízkoteplotního plazmatu se směsí reaktivního plynu. Kromě samotné konstrukce výše zmíněné sondy a cívky bylo cílem i její kalibrace a následná implementace měřícího zařízení do plazmatických reaktorů v Laboratoři fyziky plazmatu Ústavu fyziky PřF JU, měření parametrů plazmatu pro různé depoziční podmínky a nakonec vyhodnocení naměřených dat pomocí softwarových nástrojů.

2. Materiál a metodika

2.1. Návrh cívky

Jako vzor pro stavbu Rogowského cívky sloužila cívka vyrobená Virostkem (2009). Vlastní cívka byla v této bakalářské práci poupravena tak, aby se celé zařízení vešlo do krycí konstrukce (kovové krabičky pro elektroniku), jejíž rozměry nebyly identické s těmi popsanými v práci Virostka (2009). Samotná realizace toroidu s vinutím vodiče využila jako užitný vzor pro konstrukci vědeckou publikaci, jejímž autorem je Ramboz (1996). Tato publikace obsahuje souhrn technických parametrů přímo určených pro vlastní výrobu Rogowského cívky.

Tvar toroidu pro stavbu cívky je tedy kruhového průřezu. Dalším důležitým parametrem pro správnou funkci cívky bylo navinutí dostatečného počtu závitů s konstantním, rovnoměrným odstupem mezi sebou, což zajišťuje vysoký stupeň odolnosti proti rušení ze

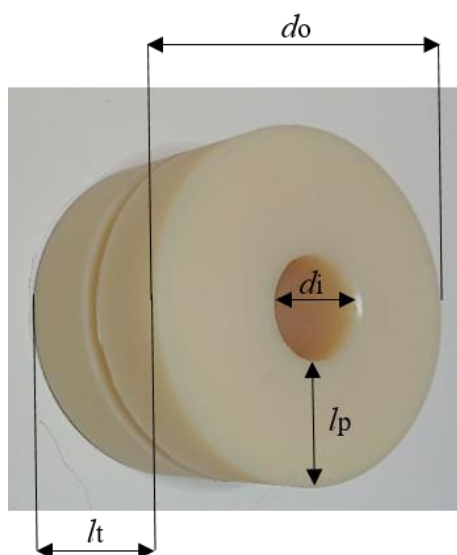
sousedních vodičů jak je zmíněné v kapitole 1. Na základě těchto vlastností je možné vypočítat vzájemnou indukčnost cívky podle Ramboz (1996) vztahem:

$$M = \frac{\mu_0}{2\pi} nW \ln \frac{b}{a}, \quad (3)$$

kde M je vzájemná indukčnost cívky, μ_0 je permeabilita vakua ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$), n je počet závitů cívky, W je tloušťka toroidu, rozměr b je vnější průměr cívky a rozměr a je vnitřní průměr cívky.

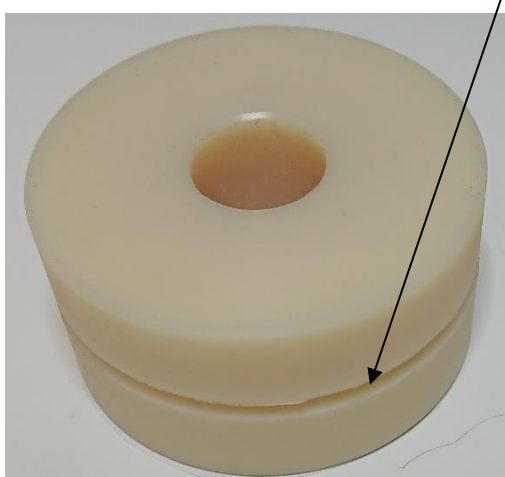
2.2. Stavba cívky

Jako materiál dielektrikum cívky byl zvolen silon. Ten byl následně opracován do podoby na obrázku 5 a 6. Zároveň bylo dbáno na to, aby dielektrikum toroidu zaujímalo kruhový průřez. Rozměry toroidu bez vinutí jsou následující. Vnější průměr: $d_o = 60 \text{ mm}$, tloušťka: $l_t = 30 \text{ mm}$, vnitřní průměr: $d_i = 18 \text{ mm}$. Tloušťka prstence dielektrika $l_p = 21 \text{ mm}$. Z boční strany silonového dielektrika byl následně prohlouben otvor, který měl plnit funkci „žlabu“ pro vhodné umístění zpětného vinutí vodiče cívky, tak jak je popsáno v kapitole 1.4 a tak jak je popsáno ve Virostko (2009) a Ramboz (1996). Popsané rozměry jsou pro lepší představu znázorněny na obrázku 5. Výsledná podoba cívky před započítáním vinutí vodiče je znázorněna na obrázcích 6 a 7.



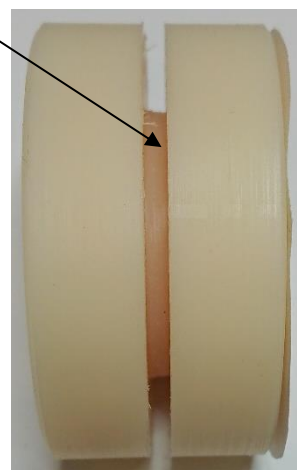
Obrázek 5: Konečná podoba toroidu dielektrika s naznačenými rozměry.

Pro lepší manipulaci při vinutí vodiče byly na hrany toroidu, podél vnějšího obvodu a podél vnitřního obvodu vyříznuty malé rýhy, které zajišťovaly pevné přichycení drátu k silonu a zabraňovaly tak jeho sklouznutí během omotávání. Pro přesné vyříznutí těchto rýh sloužil náčrt (šablona) budoucího rozmístění závitů drátu. Výhodou těchto rýh je nejenom výše popsaná stabilita, ale také i fakt, že tak byla zajištěna tolik významná konstantní vzdálenost mezi jednotlivými závitů vodiče.



Obrázek 6: Svrchní pohled

Centrální žlábk pro
zpětné vinutí

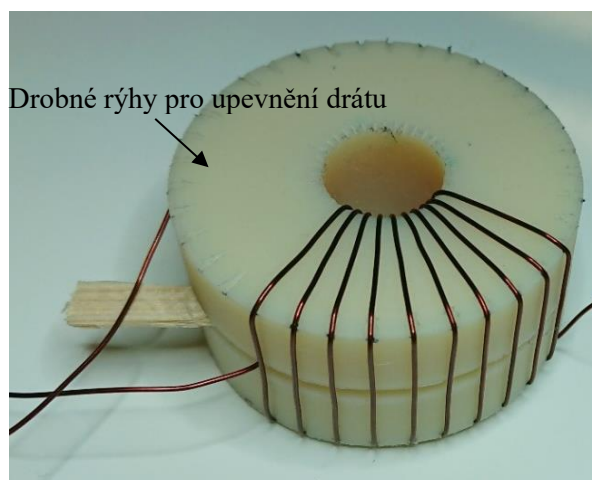


Obrázek 7: Boční pohled

Materiálem pro vinutí byl zvolen lakovaný měděný drát pro elektrotechnické využití o tloušťce $l = 0,77$ mm, což mělo za následek zmenšení původního vnitřního průměru d_i na přibližný konečný průměr $d_i \approx 1,6$ mm. Okolo dielektrika byl vinut v počtu 36 závitů – tedy odstup mezi jednotlivými závitů činil 10° . Postup omotávání drátu je znázorněn na obrázku 8, 9 a 10.

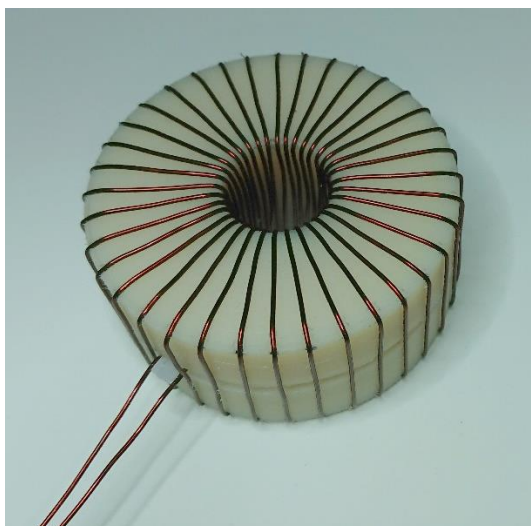


Obrázek 8: Šablona pro naznačení drobných rýh



Drobné rýhy pro upevnění drátu

Obrázek 9: Ukázka postupu vinutí drátu



Obrázek 10: Finální podoba Rogowského cívky před nasunutím na centrální vodič RF proudu

Aby mohla být výsledná namotaná cívka použita pro svou funkci senzoru, je nutné, aby byla nasunuta svým vnitřním otvorem na vodič RF proudu, který jí tudíž prochází. Za tímto účelem byl dovnitř krabičky vsunut drát pocházející z koaxiálního kabelu o definované impedanci $Z = 50 \Omega$. Na drátu byla ponechána vnitřní teflonová izolace, na koncích byl drát odizolován, aby mohl být vsunut a posléze připájen do konektorů typu N na obou koncích krabičky.

Na té straně drátu, kde měla být umístěna cívka, bylo po jeho obvodu v délce šířky namotané cívky, nasunuto měděné opletení s připájeným měděným drátkem, jehož konec směřoval do jednoho ze dvou BNC výstupů. Toto opletení plnilo funkci tzv. napětového kapacitního čidla. Napětové čidlo se v podstatě chová jako kondenzátor složený z teflonového dielektrika a vzduchu a dvou elektrod, kdy jedna elektroda je připojena na osciloskop a druhá je uzemněná. Následně, bylo toto opletení obmotáno teflonovou páskou kvůli izolaci a pro pevné uchycení k teflonu drátu ještě jednou překryto elektrikářskou páskou a samotný drátek směřující do konektoru byl vsunut do umělohmotné bužírky kvůli izolaci.

Zbývá část drátu včetně konce s elektrikářskou páskou byla obmotána hliníkovou fólií za účelem stínění signálu. K této fólii byl připájen měděný štít kruhového tvaru o průměru odpovídajícímu průměru cívky taktéž za účelem stínění, který byl navíc z vnitřní strany přiléhající k cívce oblepen kaptonovou lepicí páskou. Poloha tohoto štítu byla asi ve dvou třetinách délky centrálního drátu od konektoru vstupu RF signálu.

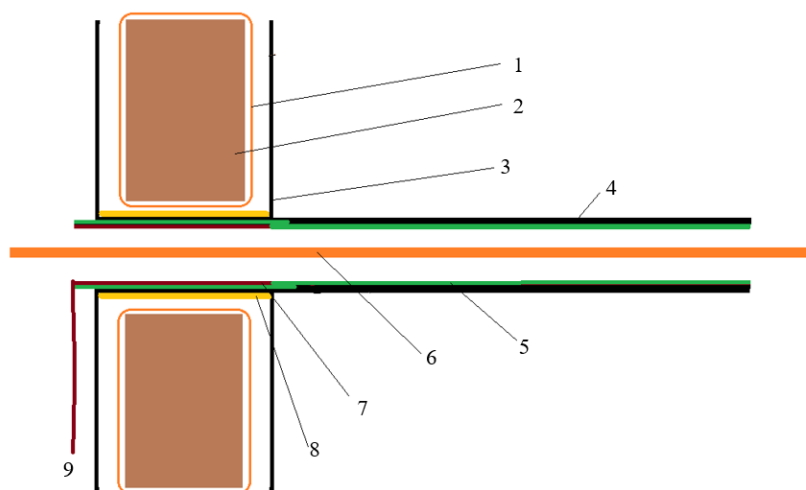
Za tímto štítem byl prostor pro nasunutí cívky. Před samotným nasunutím však bylo potřeba tuto část opět obmotat izolačním materiálem, aby nedošlo ke kontaktu drátu s hliníkem. Po nasunutí cívky tak, aby konce jejího vinutí směřovaly směrem vpravo dolů

k druhému BNC konektoru, byla cívka „uzavřena“ dalším měděným štítem. Ten byl z vnitřní strany směrem k cívce také oblepen kaptonovou páskou a pevně připájen k alobalovému nosiči. Tím se vytvořil kompaktní celek, který mohl být zasunut do konektorů typu N na vstupu a na výstupu umístěných ve stěnách kovové krabičky.

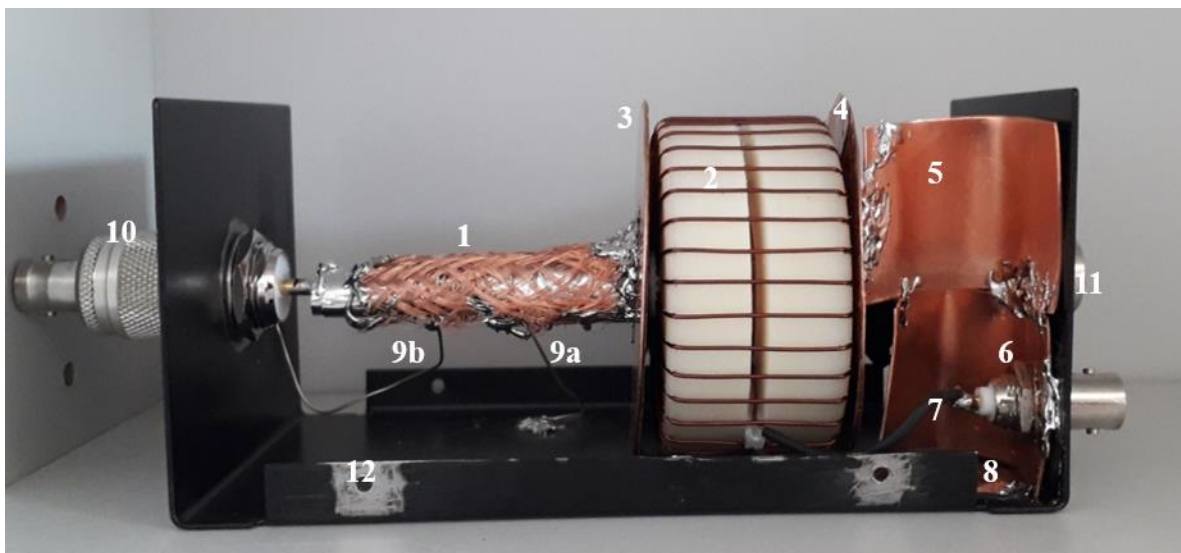
Aby bylo celé měřicí zařízení řádně uzemněno, byly stěny okolo N a BNC konektorů oškrábány kvůli odstranění práškové barvy, aby byl kovový materiál krabičky v kontaktu s konektory. Dále byl kolem stínění cívky připájen drát, jenž byl ke stínění pevně připájen a uzemněn ke dnu cívky, ke stěně cívky u vstupního N konektoru. Pomocí měděného plechu byla následně uzemněna zbylá část stínění na straně krabičky s BNC konektory. Ve všech místech, kde bylo stínění uzemněno, byla barva z krabičky taktéž odstraněna.

K uzemnění cívky posloužil jeden konec jejího vinutí, který byl po odstranění laku z vodiče připájen ke kovovému dnu krabičky. Druhý konec vinutí cívky byl vsunut do umělohmotné bužírky kvůli izolaci a odhalený konec – opět po odlakování – byl vsunut do BNC konektoru a pevně připájen. Tímto způsobem byla připravena proudová sonda.

Aby bylo uzemnění celého přístroje kompletní, bylo také zapotřebí zbavit barvy ze všech stran místa pro vstup šroubků pro uchycení krytu krabičky. Pro lepší představu celkového vzhledu měřicí aparatury slouží obrázek 11 a 12. Shrnutí rozměrů cívky včetně hodnoty její vlastní indukčnosti vypočtené ze vztahu (3) je uvedeno v tabulce 1.



Obrázek 11: Schématický obrázek řezu měřicího zařízení: 1 – vinutí cívky, 2 – dielektrikum toroidu, 3 – měděný kruhový štít, 4 – hliníkové stínění vodiče RF signálu, 5 – vnitřní teřlonová izolace s elektrickářskou páskou, 6 – vodič RF signálu, 7 – měděné opletení (napěťové čidlo), 8 – izolace stínění procházející středem cívky, 9 – měděný drátek napojený na napěťové čidlo.



Obrázek 12: Kompletní a konečná podoba měřicího zařízení Rogowského cívky umístěného v kovové krabici (1 – stínění centrálního RF vodiče, 2 – cívka, 3 – elektromagnetický štít I, 4 – elektromagnetický štít II, 5 – elektromagnetický štít III, 6 – BNC konektor pro proudovou sondu, 7 – vinutí cívky pro proudovou sondu, 8 – uzemnění druhého konce vinutí cívky, 9a – zemnicí drát ke dnu krabičky; 9b – zemnicí drát ke stěně krabičky, 10 – konektor typu N (vstup), 11 – konektor typu N (výstup), 12 – osmirkovaná zemnicí místa kovové krabičky).

Tabulka 1: Konečné parametry cívky

Veličina	Značka	značka *	hodnota	jednotka
Vnější průměr	d_o	b	0,06	[m]
Vnitřní průměr	d_i	a	0,018	[m]
Počet závitů	N	n	36	–
Tloušťka toroidu	L	W	0,03	[m]
Vzájemná indukčnost cívky	M	M	0,26 [†]	[μH]

* značky podle Ramboz (1996) uvedené ve vzorci (3); [†] výpočet podle vztahu (3)

2.3. Měřicí kabely

Jak pro kalibraci přístroje, tak i pro jeho následné používání byly použity koaxiální kabely s BNC konektory na obou stranách (tzv. jumpery) – oba o stejné délce dva metry a definované impedanci $Z = 50 \Omega$. Pro vedení RF signálu bylo použito také dvou koaxiálních kabelů o impedanci $Z = 50 \Omega$ se zakončením konektory typu N, přičemž jeden byl veden ze zdroje RF signálu do vstupu Rogowského cívky a druhý z výstupu měřicího zařízení. Každý z kabelů byl označen pro jednotlivý výstup z měřicího zařízení (tedy U čidlo, I cívka), aby nedošlo k jejich budoucí záměně a také proto, aby pro další měření byly zachovány vždy stejné

podmínky. Aby nebyla tato impedance nižší a tudíž aby byla zachována přesnost měření, byly na oba konce BNC konektorů obou kabelů nainstalovány otevřené krabičky s připájenými odpory pro vysokofrekvenční aplikace o odporu $R = 50 \Omega \pm 1 \%$. Tyto krabičky byly taktéž řádně popsány pro jednotlivé měřené parametry Rogowského cívky vylučující jejich budoucí záměnu. Celkové provedení kabeláže včetně krabiček je zobrazeno na obrázku 13a; obrázek 13b je detailní foto samotného rezistoru.



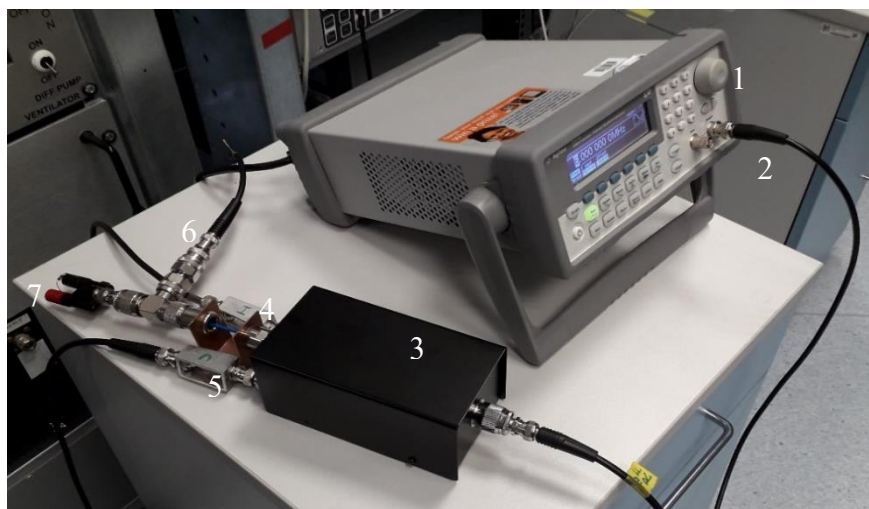
Obrázek 13: a – krabičky s připájenými rezistory pro vysokofrekvenční aplikace (zelená šipka; reálná velikost); b – detail rezistoru (zvětšeno přibližně 4x).

2.4. Kalibrace Rogowského cívky

Ke kalibraci měřícího zařízení byl použit signálový generátor Agilent 33210 A generující sinusový signál v rozsahu 1 mHz až 10 MHz. Cívka byla kalibrována pro frekvence: 0,5; 1, 1,5; 2; 2,5; 3; 3,5; 4; 4,5; 5; 6; 7; 8; 9 a 10 MHz. Ke kalibraci byly použity výše zmíněné a řádně označené kabely včetně stejně popsáných krabiček s vysokofrekvenčními odpory. Měřený signál byl veden a vyhodnocován v osciloskopu Tektronix MDO 3024 se vzorkovací frekvencí 1 GSa.

Zapojení aparatury pro kalibraci bylo následující: do vstupu typu N byl veden kabel ze signálového generátoru, do výstupu typu N byl zapojen T člen, na jehož jednom konci byl připojen rezistor o $R = 51,1 \Omega \pm 5 \%$ a na druhém konci byl vyveden koaxiální kabel vedoucí do kanálu číslo jedna osciloskopu. Z výstupu BNC pro napěťové čidlo byl veden výše zmíněný kabel do kanálu číslo dva a z druhého BNC výstupu pro proudovou sondu byl veden kabel do kanálu číslo tři osciloskopu. Na osciloskopu byla měřena napětí z jednotlivých kanálů a ukládána na flash paměť spolu s časem, kdy byly jednotlivé parametry měřeny. Na displeji

osciloskopu byl pro každou frekvenci zobrazen maximální měřicí rozsah, který mohl být zobrazen s největším množstvím sinusových vln pro jednotlivá napětí měřených parametrů včetně s největšími možnými amplitudami. Data byla následně vyhodnocena na PC ke stanovení konstant úměrnosti a fázových posunů. Uspořádání měřicí aparatury s dílčími přístroji je zobrazeno na obrázcích 14 a 15.



Obrázek 14: Ukázka zapojení Rogowského cívky při kalibračním měření (1 – generátor RF signálu, 2 – jumper pro přenos RF signálu do centrálního vodiče, 3 – Rogowského cívka, 4 – krabička s rezistorem pro VF aplikace zapojená na proudové sondě, 5 – krabička s rezistorem pro VF aplikace zapojená na napěťové čidlo, 6 – T-člen s výstupem RF signálu vedoucí do osciloskopu, 7 – zátěž – rezistor o známém odporu).



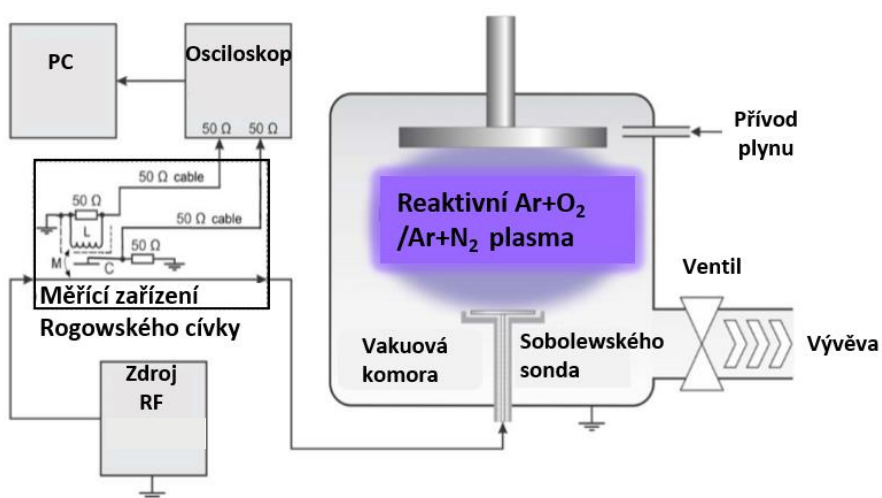
Obrázek 15: Ukázka zapojení krabiček s rezistory pro VF aplikace na druhé straně jumperů.

2.5. Sobolewského sonda a měření v plazmatu

Sobolewského sonda byla v podstatě šroub s plochou hlavou o definované aktivní ploše $S = 1 \text{ cm}^2$. Aby mohla být aktivní plocha lépe definována, bylo samotné tělo sondy obaleno teflonem. Její konec byl vodivě propojen s BNC výstupem na přírubě komory, přičemž vodič signálu ze Sobolewského sondy uvnitř komory byl také kryt teflonovým obalem. Sobolewského sonda byla ve vakuové komoře připevněna k držáku a improvizovanému stojanu spolu s Langmuirovou sondou jakožto referencí. Držák s oběma sondami byl umístěn ve vzdálenosti $l = 75 \text{ mm}$ pod středem targetu (katody). Toto umístění znázorňuje obrázek 16. Zapojení Sobolewského sondy a RF napěťového a proudového senzoru znázorňuje schéma na obrázku 17.



Obrázek 16: Umístění Sobolewského sondy (1) pod magnetronem (2) ve vakuové komoře.



Obrázek 17: Schéma zapojení VF Sobolewského sondy spolu s Rogowského cívkou při experimentálním měření vlastností reaktivního plazmatu (upraveno a převzato ze Sezemský a kol., 2019).

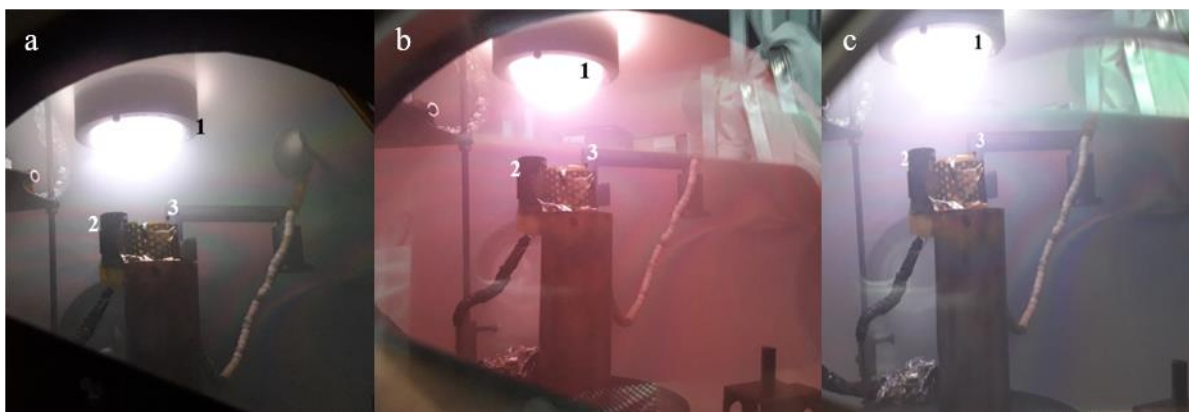
Pro tvorbu plazmatu ve vakuové komoře byl použit zdroj RF proudu o frekvenci 13,56 MHz, který byl připojen ke katodě s magnetronem a terčem z materiálu FTO (Fluorine-doped Tin Oxid). Výkon byl postupně zvyšován ze zápalné hodnoty 40 W ke konečné hodnotě $P = 200$ W pro každé měření. Pro pokusná měření byly zvoleny následující depoziční podmínky:

- i) Nereaktivní plazma – pouze čistý argon (průtok = 100 SCCM), tlak: $p = 1,00$ Pa,
- ii) Reaktivní plazma – argon s dusíkem v poměru 90:10 SCCM, tlak $p = 1,00$ Pa,
- iii) Reaktivní plazma – argon s kyslíkem v poměru 90:10 SCCM, tlak $p = 1,00$ Pa.

Při samotném měření bylo zapojení přístrojů podobné jako při kalibraci s tím rozdílem, že zátěž (při kalibraci rezistor o $R = 51,1 \Omega$) byla nahrazena plazmatem. Všechny kabely, které byly použity, byly koaxiální a měly stejnou impedanci $Z = 50 \Omega$, přičemž byly použité tytéž kabely jako při kalibraci. Z výstupu BNC konektoru na přírubě vakuové komory byl veden kabel o impedanci do výstupu napěťového a proudového senzoru. Do vstupu senzoru byl veden kabel o stejné impedanci do jednoho z výstupů t-členu v signálovém generátoru Agilent 33210 A. Navíc mezi t-člen a vstup senzoru byl zapojen do série keramický kondenzátor zajišťující kapacitní oddělení Sobolewského sondy od signálového generátoru RF napětí. Z druhého výstupu t-členu byl veden kabel do kanálu č. 1 osciloskopu Tektronix MDO 3024. Ze zbylých BNC výstupů na senzoru určených pro napěťové čidlo a pro proudovou sondu byly veden kabely stejně jako při kalibraci do kanálu č. 2 (napěťové čidlo) a do kanálu č. 3 (proudová sonda). Data měřená na osciloskopu představovala napětí a byla sbírána v čase s frekvencí $f = 1 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. Měřeným parametrům byl hardwarově na osciloskopu odstraněn šum s vestavěnou funkcí Average pro 512 bodů. Následně byla data uložena na flashdisk a vyhodnocena v PC. Celkový pohled na zapojení měřících přístrojů a pohled na reaktivní plazmatické výboje znázorňují obrázky 18, 19a,b,c.



Obrázek 18: Celkový pohled na měřící aparaturu: 1 – Langmuirova sonda, 2 – grafický výstup z Langmuirovy sondy, 3 – vakuová komora, 4 – osciloskop, 5 – zdroj RF napětí pro plazmatický výboj, 6 – Rogowského cívka, 7 (a,b,c,d) – měřící kabely, 8 – zdroj RF napětí pro měření signálu na Rogowského cívce, 9 – ventil plynu.



Obrázek 19: Vzhled různých plazmových výbojů: a – plazmový nereaktivní výboj (pouze argon); b – plazmový reaktivní výboj (argon s dusíkem); plazmatický reaktivní výboj (argon s kyslíkem). Pro všechny obrázky společně: 1 – výboj u katody s magnetronem, 2 – Sobolewského sonda, 3 – senzitivní konec Langmuírový sondy.

3. Řešení a výsledky

3.1. Kalibrace

3.1.1. Konstanty úměrnosti

Data naměřená na osciloskopu při kalibraci byla získána z následujících výstupů na napěťovém a proudovém senzoru:

- i. z RF signálu (konektor typu N)
- ii. z napěťového čidla (konektor typu BNC s označením U)
- iii. z proudové sondy (konektor typu BNC s označením I)

Grafické znázornění měřících schopností senzoru pro jednotlivé veličiny během kalibrace znázorňuje obrázek 20. Protože data získaná z osciloskopu jsou napětí, bylo potřeba mít na paměti následující fakta. Díky elektromagnetické indukci, kdy dochází ke změně magnetického indukčního toku přes průmět Rogowského cívky vyvolaného RF proudem tekoucím vodičem vloženým do toroidu Rogowského cívky, se podle Faradayova zákona na konci vedení Rogowského cívky indukuje elektromotorické napětí (Halliday a kol., 2008):

$$U_{\text{cívka}} = - \frac{d\Phi}{dt}, \quad (4)$$

kde $d\Phi$ je změna magnetického indukčního toku a dt je čas, během kterého změna magnetického indukčního toku nastala.

Vzhledem k tomu, že magnetický indukční tok je přímo úměrný proudu tekoucího vodičem, lze vztah (4) zjednodušit:

$$U_{\text{cívka}} = - \frac{dI_{RF}}{dt} \quad (5)$$

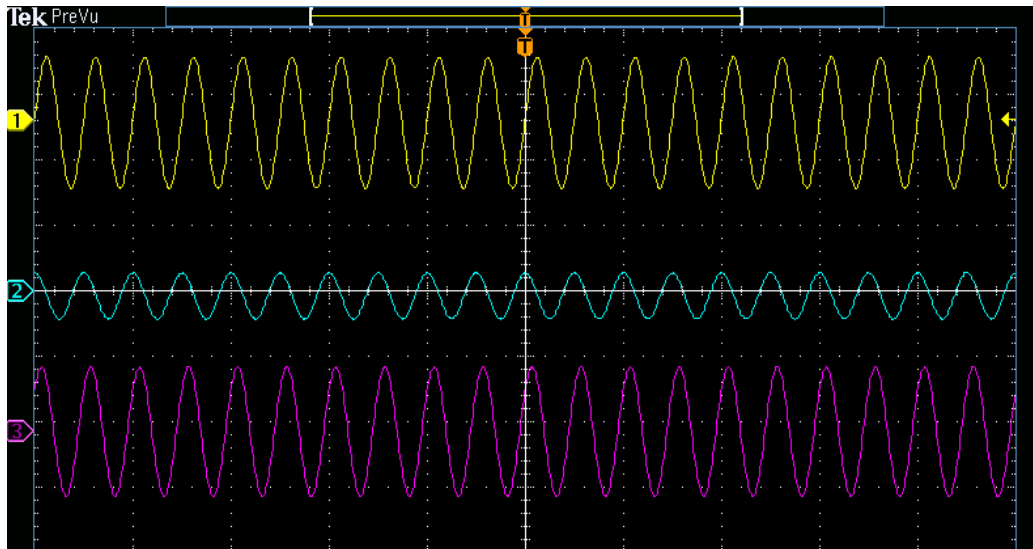
Pro výpočet proudu I_{RF} však potřebujeme znát odpor – tedy známou zátěž. Ten byl součástí obvodu při kalibraci a jeho odpor činil: $R = 51,1 \Omega$. Výpočet velikosti I_{RF} proudů pro jednotlivé frekvence tedy vycházel z Ohmova zákona:

$$I_{RF} = \frac{U_{RF}}{R} \quad (6)$$

Hodnoty I_{RF} pro jednotlivé frekvence jsou shrnuty v tabulce 2.

Tabulka 2: Vypočtené průměrné hodnoty I_{RF} proudů pro dílčí frekvence.

f [MHz]	$\overline{I_{RF}}$ [A] $N = 10000$
0,5	$7,35 \cdot 10^{-4} \pm 0,07$
1	$3,33 \cdot 10^{-4} \pm 0,07$
1,5	$3,23 \cdot 10^{-4} \pm 0,05$
2	$5,24 \cdot 10^{-4} \pm 0,07$
2,5	$6,21 \cdot 10^{-4} \pm 0,07$
3	$3,79 \cdot 10^{-4} \pm 0,07$
3,5	$1,72 \cdot 10^{-4} \pm 0,06$
4	$8,78 \cdot 10^{-5} \pm 0,07$
4,5	$4,42 \cdot 10^{-4} \pm 0,07$
5	$2,33 \cdot 10^{-4} \pm 0,07$
6	$1,16 \cdot 10^{-4} \pm 0,07$
7	$4,02 \cdot 10^{-4} \pm 0,08$
8	$3,57 \cdot 10^{-4} \pm 0,08$
9	$8,57 \cdot 10^{-4} \pm 0,08$
10	$10,20 \cdot 10^{-4} \pm 0,08$



Obrázek 20: Veličiny naměřené Rogowského cívkou: žlutá barva – U_{RF} z generátoru, modrá barva – $U_{čidlo}$, fialová barva – $U_{cívka}$ (napětí naměřené z vinutí Rogowského cívky – proudová sonda).

Vysokofrekvenční proud I_{RF} vypočítaný ze vztahu (6) je harmonickou funkcí času (cosinus) stejně jako vysokofrekvenční napětí U_{RF} , tudíž je indukované napětí $U_{cívka}$ přímo úměrné proudu I_{RF} . Míra úměrnosti mezi jednotlivými veličinami byla určena právě z kalibrace a lišila se napříč měřenému frekvenčnímu rozsahu. Tyto tzv. faktory (úměrnosti) K_V a K_I pro amplitudy se lišily podle toho, mezi kterými parametry byly vypočteny. K_V faktor byl vypočten z poměrů amplitud kladných a záporných půlvln napětí RF signálu (tedy U_{RF}) k amplitudám kladných a záporných půlvln napětí na napěťovém čidle. K_I faktor byl vypočten analogicky, avšak s amplitudami kladných a záporných půlvln pro I_{RF} a pro proudovou sondu cívky. Vztahy pro výpočet zmíněných faktorů:

$$K_V = \frac{\bar{y}_{URFmax} - \bar{y}_{URFmin}}{\bar{y}_{Umax} - \bar{y}_{Umin}} [-], \quad (7)$$

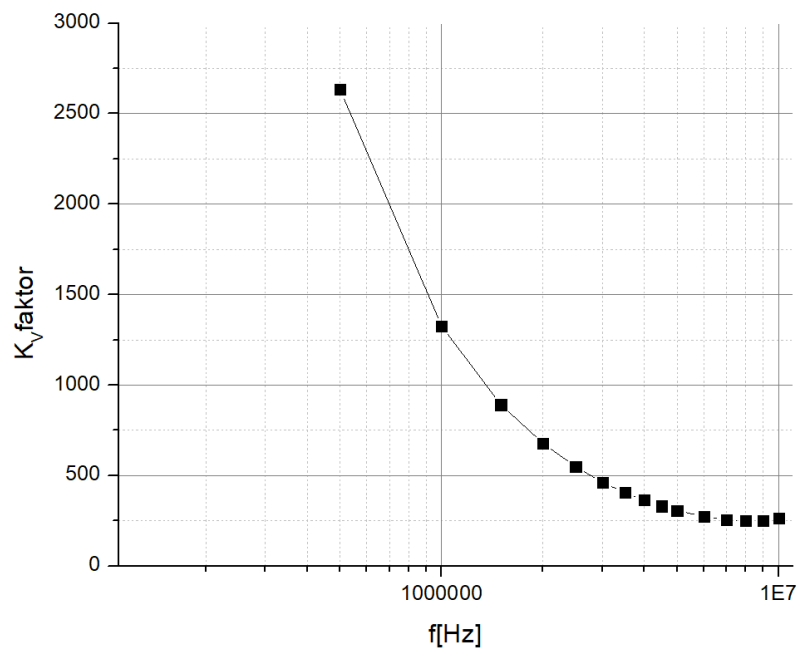
$$K_I = \frac{\bar{y}_{IRFmax} - \bar{y}_{IRFmin}}{\bar{y}_{Imax} - \bar{y}_{Imin}} [A/V], \quad (8)$$

kde \bar{y}_{URFmax} je průměrná hodnota maxim napětí U_{RF} kladných půlvln a \bar{y}_{URFmin} je průměrná hodnota minim napětí U_{RF} ze záporných půlvln . Dále pak \bar{y}_{Umax} je průměrná hodnota maxim napětí kladných půlvln z napěťového čidla a \bar{y}_{Umin} je průměrná hodnota minim všech záporných půlvln z napěťového čidla. Analogicky ve vztahu (8) je kde \bar{y}_{IRFmax} průměrná hodnota maxim proudů I_{RF} kladných půlvln a \bar{y}_{IRFmin} je průměrná hodnota minim proudů I_{RF}

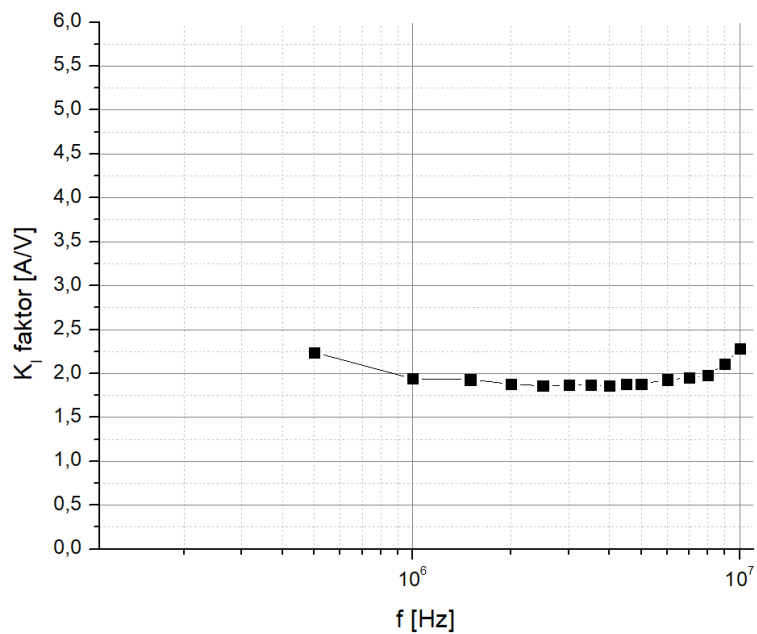
ze záporných půlvln, $\bar{y}_{I_{max}}$ je průměrná hodnota maxim napětí kladných půlvln z proudové sondy a $\bar{y}_{I_{min}}$ je průměrná hodnota minim všech záporných půlvln z proudové sondy. Nutno poznamenat, že v druhém případě je jednotka K_I [A/V] správná, protože na proudové sondě měříme napětí, se kterým se počítá i v samotném vzorci. Vypočítané hodnoty faktorů jsou shrnuty v tabulce 3 a graficky znázorněny v grafech 1 a 2.

Tabulka 3: Sumarizované vypočtené konstanty úměrnosti.

f [MHz]	K_v [-]	K_I [A/V]
0,5	2632,41	2,24
1	1325,40	1,94
1,5	891,00	1,93
2	678,31	1,88
2,5	548,46	1,86
3	463,56	1,87
3,5	404,96	1,87
4	363,33	1,86
4,5	331,28	1,88
5	306,92	1,88
6	273,25	1,93
7	255,45	1,95
8	249,40	1,98
9	251,30	2,11
10	265,46	2,28



Graf 1: K_v faktor pro amplitudu mezi RF napětím a napěťovým čidlem. Frekvence je zobrazena v logaritmické škále.



Graf 2: K_l faktor pro amplitudu mezi RF proudem a proudovou sondou. Frekvence je zobrazena v logaritmické škále.

3.1.2. Fázové posuny

Protože uvnitř Rogowského cívky je přítomno napěťové čidlo (jeho konstrukce a poloha je popsána v kapitole 2.2.), chová se toto čidlo jako kondenzátor (hovoříme také o kapacitní sondě). Když teče vodičem RF proud, tak dochází k nabíjení a vybíjení této kapacitní sondy. Protože na kondenzátoru (a napěťové čidlo jej zde supluje – viz kap. 2.2.) je největší napětí, když nabíjecí proud je nejmenší a naopak, když nabíjecí proud je největší, tak na kondenzátoru je napětí nulové, dochází k tomu, že mezi nabíjecím proudem kondenzátoru a napětím na kondenzátoru musí být fázový posun -90° .

Nabíjecí I_{RF} proud je ve fázi s napětím U_{RF} , protože zátěží je zde pouze zátěžový rezistor zmíněný v kapitole 2.3. Protože tedy napětí $U_{\text{čidlo}}$ měříme kapacitně, musí být fázový rozdíl napětí $U_{\text{čidlo}}$ a U_{RF} také -90° . Pro vyšší frekvence se pak kapacitní sonda chová jako indukčnost (jeden závit cívky) a fázový posun se bude blížit $+90^\circ$.

Pro výpočet fázového posunu bylo tedy potřeba určit referenční veličinu (U_{RF}), vůči níž byl stanoven posun měřeného napětí ($U_{\text{čidlo}}$) na napěťovém čidle. U jednotlivých vln pro každou z frekvencí bylo pomocí skriptu v programu Origin 8.5 (obrázek 21) určen čas, ve kterém jsou naměřené hodnoty jednotlivých veličin s nulovou výchylnou. Z těchto časů byl vypočten rozdíl, který byl následně použit do vztahu pro výpočet fázového posunu. Příklad výpočtu je následující:

Pro $f = 0,5 \text{ MHz}$ ($T = 2 \cdot 10^{-6} \text{ [s]}$):

1) výpočet rozdílu časů (souřadnice x):

$$t(U_{RF}) = -1,89995 \cdot 10^{-5} \text{ [s] pro } y = 0$$

$$t(U) = -1,95417 \cdot 10^{-5} \text{ [s] pro } y = 0$$

$$\Delta t = t(U_{RF}) - t(U) = -1,89995 \cdot 10^{-5} - (-1,95417 \cdot 10^{-5}) = 5,4224 \cdot 10^{-7} \text{ [s]}$$

2) všechny hodnoty rozdílů časů byly zprůměrovány a použity pro výpočet fázového posunu podle vztahu:

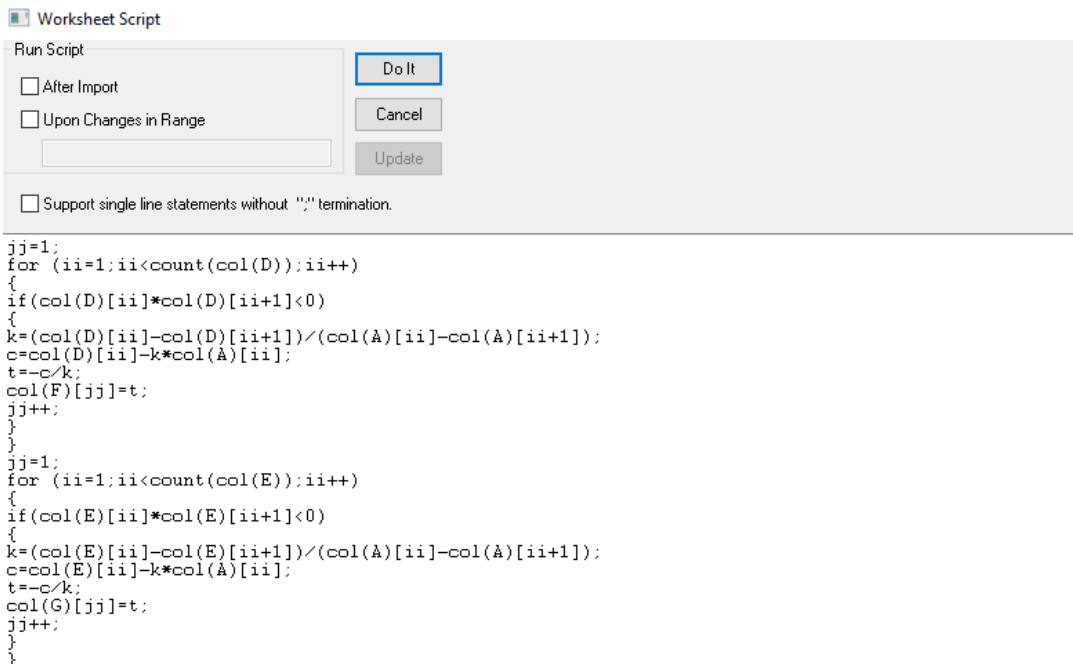
$$\Delta\Phi = \frac{\Delta t}{T} \cdot 360 \quad (9)$$

3) zde je průměrná hodnota: $4,85237 \cdot 10^{-7}$, a tudíž po dosazení:

$$\Delta\Phi = \frac{\Delta t}{T} \cdot 360 = \frac{4,85237 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 10^{-6}} \cdot 360 = 87,34^\circ$$

Tentýž postup platí i v případě výpočtu fázového posunu naměřeného napětí na proudové sondě (měření indukovaného elektromotorického napětí – $U_{\text{cívka}}$), které je úměrně záporně vzaté časové derivaci měřenému proudu I_{RF} .

Je potřeba mít na paměti, že z Faradayova zákona plyne, že časová derivace magnetického indukčního toku je záporná, tudíž je potřeba odečíst 180° . Tedy $U_{\text{cívka}}$ a I_{RF} musí mít opačné fáze (když roste I_{RF} , tak U_{RF} klesá a naopak). Taktéž platí, že nabývají maxim s opačnou amplitudou současně, tudíž pro tyto dvě harmonické funkce s opačnou fází znamená, že jejich fázový posun je 180° . Všechny vypočtené fázové posuny jsou sumarizovány v tabulce 4. Grafické znázornění fázového posunu je patrné v grafech 3 a 4.



```

Worksheet Script
Run Script
 After Import
 Upon Changes in Range
Do It
Cancel
Update
 Support single line statements without ";" termination.

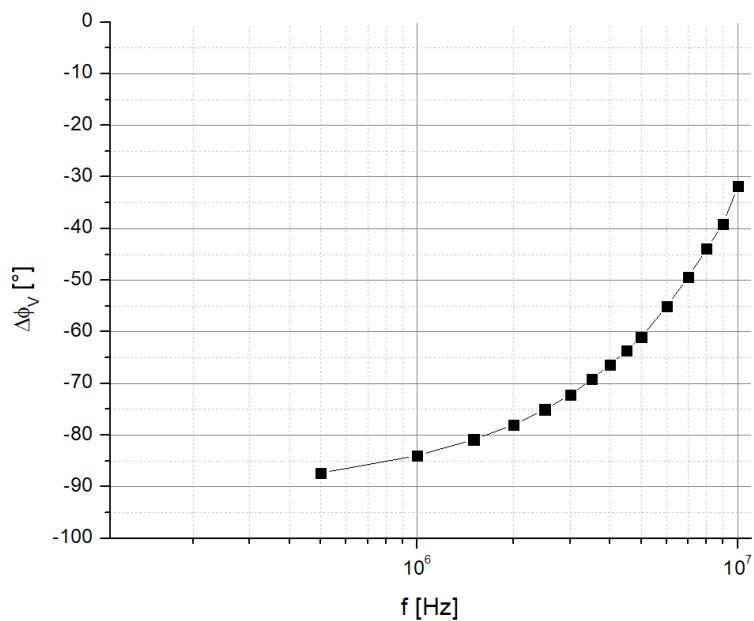
jj=1;
for (ii=1;ii<count(col(D));ii++)
{
if (col(D)[ii]*col(D)[ii+1]<0)
{
k=(col(D)[ii]-col(D)[ii+1])/col(A)[ii]-col(A)[ii+1];
c=col(D)[ii]-k*col(A)[ii];
t=-c/k;
col(F)[jj]=t;
jj++;
}
}
jj=1;
for (ii=1;ii<count(col(E));ii++)
{
if (col(E)[ii]*col(E)[ii+1]<0)
{
k=(col(E)[ii]-col(E)[ii+1])/col(A)[ii]-col(A)[ii+1];
c=col(E)[ii]-k*col(A)[ii];
t=-c/k;
col(G)[jj]=t;
jj++;
}
}

```

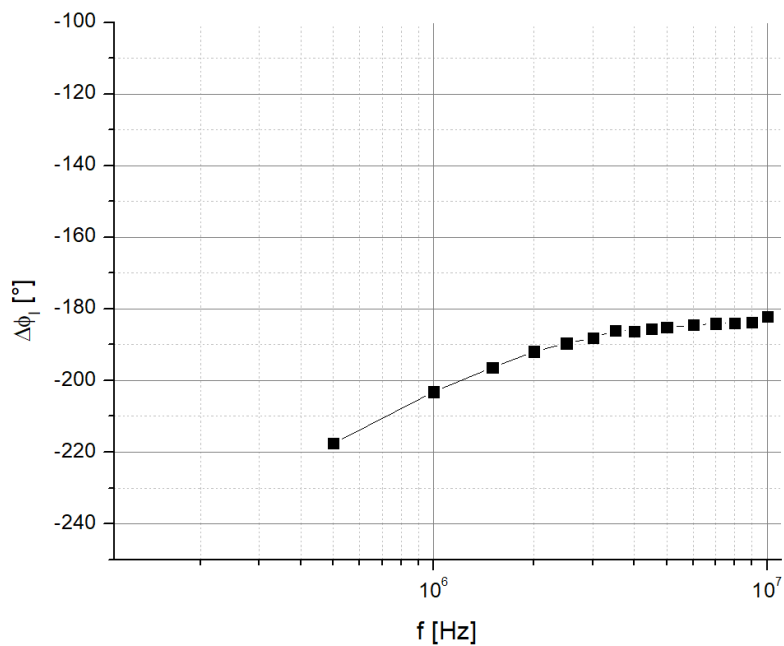
Obrázek 21: Ukázka skriptu pro nalezení času (t) pro pro výchylku proudu či napětí RF signálu včetně měřených signálů z napěťového čidla a proudové sondy Rogowského cívky.

Tabulka 4: Sumarizované vypočtené fázové posuny pro napětí a pro proud.

f [MHz]	$\Delta\phi_V$ [°]	$\Delta\phi_I$ [°]	f [MHz]	$\Delta\phi_V$ [°]	$\Delta\phi_I$ [°]
0,5	-87,34	-217,59	5	-61,07	-185,16
1	-83,95	-203,13	6	-55,01	-184,47
1,5	-80,87	-196,36	7	-49,44	-184,12
2	-77,99	-191,93	8	-43,94	-183,89
2,5	-75,04	-189,59	9	-39,16	-183,66
3	-72,22	-188,13	10	-31,81	-182,16
3,5	-69,21	-186,03			
4	-66,35	-186,20			
4,5	-63,61	-185,61			



Graf 3: Fázový posun mezi RF napětím a napětovým čidlem. Frekvence je zobrazena v logaritmické škále.



Graf 4: Fázový posun mezi RF proudem a proudovou sondou. Frekvence je zobrazena v logaritmické škále.

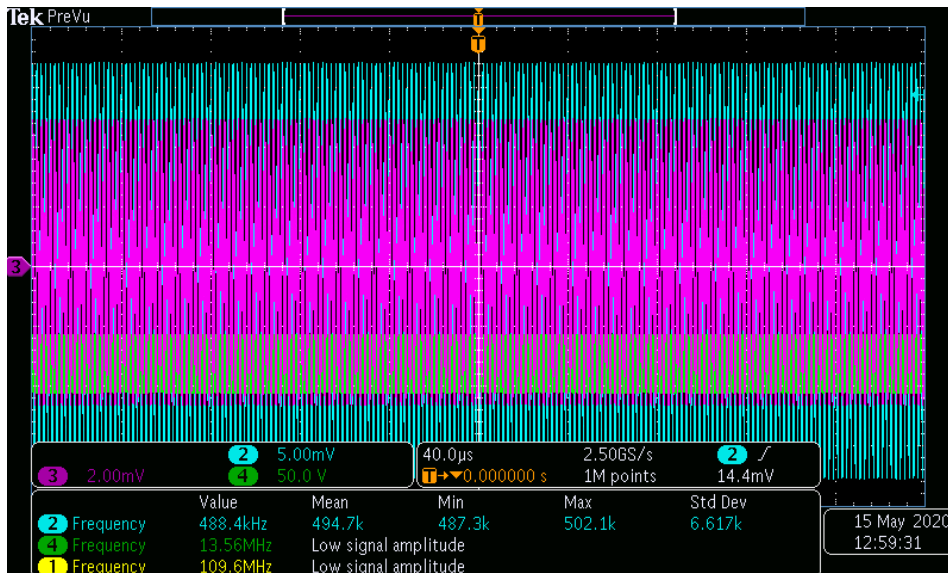
3.2. Měření v plazmatu

Pro vyhodnocení parametrů plazmatu byla využita frekvence 400 kHz pro každou depoziční podmínku. Během měření byly časové průběhy napětí z napěťového čidla a z Rogowského cívky změřeny současně osciloskopem. Získané časové průběhy byly pomocí Fourierovy transformace převedeny do frekvenční domény. Z takto získaných dat byly následně přepočítány amplituda a fázový posun pomocí získaných kalibračních faktorů. Poté byly přepočítané hodnoty zpracovány reverzní Fourierovou transformací, čímž byly získány časové průběhy proudu a napětí. Grafická ukázka změřených veličin při aplikaci plazmatu je znázorněna na obrázku 22.

Aby mohlo být plazma z naměřených veličin charakterizováno, bylo cílem vypočítat iontový tok (tedy tok iontů na podložku Sobolewského sondy). Podle Sobolewského metody je iontový tok dán proudem na sondu (I_s) v čase, kdy je napětí na sondě (U_s) v minimu. Pokud by se proud nedělil plochou sondy, získali bychom tak pouze proud iontů (počet nábojů za jednotku času). Iontový tok je tedy fyzikální veličina představující proud normovaný na plochu. Výše zmíněné vyjadřuje vztah:

$$\Gamma_i = \frac{I_s}{S} [\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}], \quad (10)$$

kde I_s je elektrický proud na sondu v čase a S je velikost plochy Sobolewského sondy.



Obrázek 22: Záznam z osciloskopu během použití Sobolewského sondy a Rogowského cívky při aplikaci reaktivního plazmatu (Ar/N_2): modrá barva – $U_{\text{čidlo}}$, fialová barva – $U_{\text{cívka}}$ (napětí naměřené z vinutí Rogowského cívky – proudová sonda), zelená barva – záporné předpětí naměřené na katodě magnetronu.

Před samotným výpočtem je však potřeba zjistit I_s , které (jak je zmíněno výše) dosahuje maxima v čase, kdy je napětí na sondě. Vzhledem k vyhodnocování naměřených dat v programu Origin 8.5, bylo za tímto účelem využito možnosti tvorby algoritmu založeného na provedení derivace U_s , pak v minimech a maximech U_s je derivace U_s nulová. Následně skript vyhledával taková U_s , která byla blízko nule a zároveň kdy byla U_s záporná (za účelem vyloučení maximální hodnoty U_s , které se po derivování podobají minimální U_s). Tímto způsobem došlo k přiřazení maximální hodnoty sondového proudu I_s k minimální hodnotě sondového napětí U_s . Ukázka kódu tohoto algoritmu v programu Origin 8.5 je na obrázku 23. Dalším krokem pro správné vyhodnocení I_s bylo provedení interpolace získaných hodnot I_s do totožného časového průběhu jako pro proud a napětí naměřeného na cívce. Následně byly interpolované hodnoty děleny velikostí obsahu plochy Sobolewského cívky, čímž byl získán iontový tok I_i . Grafické podoby iontového toku pro jednotlivé druhy plazmatu jsou znázorněny v grafu 5. V tabulce 5 jsou uvedeny vypočtené střední hodnoty iontového toku pro příslušné plazmové podmínky včetně statistické chyby (směrodatné odchyly). Do této chyby nebyla započtena chyba přístrojů ani chyba měření lidského faktoru.

```

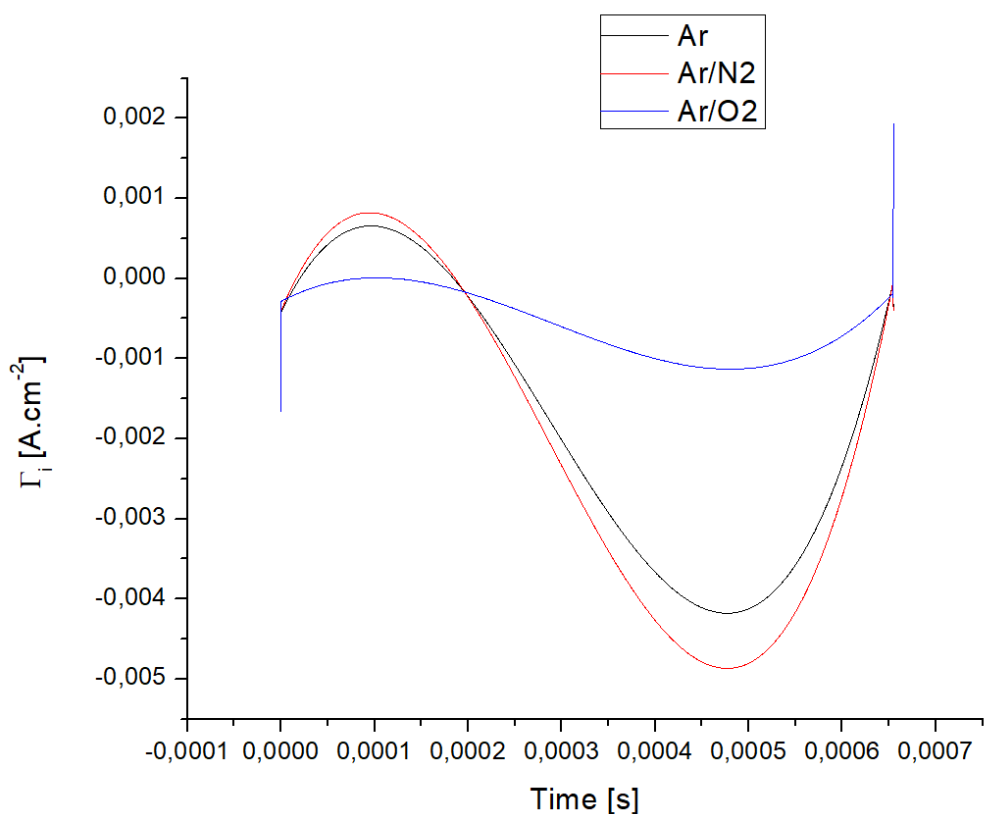
{
p=0;
y=0;
for (ii = 1; ii <= 65536; ii ++)
{
if ((col(dUs)[ii]>-1E6)&&(col(dUs)[ii]<1E6)&&(col(Us)[ii]<-10))
{
col(D)[ii]=col(Is)[ii];
p=p+col(Is)[ii];
y=y+1;
};
else
{
col(B)[ii]=p/y;
y=0;
p=0;
};
};
};
};
}

```

Obrázek 23: Zápís kódu algoritmu pro nalezení minima napětí na Sobolewského sondě (U_s) a následného určení maximální hodnoty maximálního proudu na sondě (I_s).

Tabulka 5: Naměřené iontové toky pomocí Sobolewského sondy a Rogowského cívky pro různé druhy plazmatu.

Depoziční podmínky	Druh plazmatu		
	Nereaktivní	Reaktivní	
Plyn	argon	argon/dusík	argon/kyslík
Poměr plynů [SCCM]	–	90:10	90:10
Výkon zdroje P [W]	200	200	200
Frekvence zápalného zdroje f [MHz]	13,56	13,56	13,56
Tlak p [Pa]	1	1	1
Frekvence zdroje měřeného RF signálu f [kHz]	500	500	500
Vypočtený iontový tok $\bar{\Gamma}_i$ [A·cm ⁻²] pro $N = 65536$	$(-1,76 \pm 1,74) \cdot 10^{-4}$	$(-2,03 \pm 2,05) \cdot 10^{-4}$	$(-5,58 \pm 4,16) \cdot 10^{-4}$



Graf 5: Znáznornění průběhu iontového toku v jednotlivých typech plazmatu z interpolovaných hodnot určených maxim sondového proudu I_s .

Při bližším pohledu na výsledky vypočteného iontového toku v tabulce 5 zjistíme, že směrodatné odchylky u některých plazmatických výbojů (konkrétně argon a argon/dusík) jsou blízké střední hodnotě I_s , či nepatrně vyšší. Tato situace pravděpodobně naznačuje, že hustota těchto plazmatických výbojů byla velmi malá a tudíž i iontový tok byl velmi nízký. Taktéž to poukazuje na nízkou citlivost měřících schopností sondy, které v tomto případě byly na jejích mezích.

4. Závěr

Mnou vyrobený senzor RF proudu a RF napětí využívající Rogowského cívku a kapacitní napěťovou sondu byl inspirován senzorem, který sestrojil Virostko (2009). Zkonstruovaný senzor byl úspěšně zkalibrován a odzkoušen v Laboratoři fyziky plazmatu Přf JU v Českých Budějovicích. Pakliže porovnáme výsledky z kalibrace s výsledky sondy výše zmíněné práce, zjistíme, že si jsou výsledky v daném frekvenčním rozsahu podobné. Tento fakt by mohl naznačovat i na podobnou funkci cívek. Indukčnost cívky vypočtená podle vztahu (3) z kapitoly 2.1 činí $0,26 \mu\text{H}$. Hodnota indukčnosti cívky použité v práci Virostko (2009) však známá není. Nicméně lze ze známých rozměrů této cívky usoudit, že bude pravděpodobně vyšší. Srovnání obou cívek ovšem nebylo cílem předložené práce.

Pakliže bych měl provést zhodnocení dílčích cílů bakalářské práce, pak první cíl – tedy sestavení Sobolewského sondy a měřícího zařízení na bázi Rogowského cívky a kapacitní sondy pro studium nízkoteplotního plazmatu se směsí reaktivního plynu byl úspěšný. Dokladem toho jsou výše zmíněné kalibrační křivky, které vykazují vysokou podobnost s funkčním vzorem z uvedené práce.

Druhý cíl, a to kalibrace, byl splněn rovněž úspěšně. Jak můžeme vidět na obrázcích 20 v kapitole 3.1 a na obrázku 22 v kapitole 3.2, kde jsou záznamy z osciloskopu při kalibraci a při následném měření v plazmatických podmínkách, měřící zařízení poskytuje jasný a pevný signál důležitý pro jeho zamýšlené využití. Nutno podotknout, že celkové zpracování Rogowského cívky v ochranném obalu je natolik robustní, že jakékoli otřesy či nechtěné pohyby krabičky, v níž byla cívka uložena, měly nulový vliv na kvalitu signálu.

Třetí a poslední cíl bakalářské práce představoval implementaci měřícího zařízení (spojení Sobolewského sondy a Rogowského cívky) do plazmatických reaktorů v Laboratoři fyziky plazmatu Ústavu fyziky Přf JU. I zde proběhlo měření úspěšně byť se nevyhnulo komplikacím způsobených nízkým napětím generátoru RF proudu ($f = 400 \text{ kHz}$), které tak vykazovalo nižší negativní předpětí než je žádoucí pro měření přímého parametru plazmatu – iontového toku. Výsledkem měření toku iontů jsou tedy následující hodnoty. Pro argonové plazma: $\bar{I}_i = (-1,76 \pm 1,74) \cdot 10^{-4} [\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}]$; pro reaktivní plazma argon/dusík: $\bar{I}_i = (-2,03 \pm 2,05) \cdot 10^{-4} [\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}]$ a pro reaktivní plazma argon/kyslík: $\bar{I}_i = (-5,58 \pm 4,16) \cdot 10^{-4} [\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}]$. Uvedené hodnoty ilustrují, že sonda bude funkčně schopna iontový tok změřit. Nicméně jak je uvedeno v kapitole 3.2, směrodatné odchylky blízké se střední hodnotě poukazují na nízkou hustotu plazmatu (a tedy i iontů) a na určitou hranici citlivosti této sondy, která mohla být vyvolána zvolenými depozičními podmínkami během testovacího měření.

Možným řešením jak zvýšit tuto citlivost pro budoucí diagnostiku by mohlo být například bližší umístění sondy k magnetronu, zvýšení výkonu zdroje pro výboj či zvýšení tlaku ve vakuové komoře.

V čem vidím slabinu a tudíž i podnět k možnému k budoucímu dořešení (aby mohlo být zařízení využito pro přesnější měření a taktéž za účelem zvýšení citlivosti sondy), je dokonalé odstínění Rogowského cívky s co nejlepším uzemněním veškerého stínění kvalitním vodičem, aby nedocházelo k nežádoucímu zkreslení měřeného vysokofrekvenčního signálu. Troufám si tvrdit, že tímto zásahem by se mohla přesnost měřících schopností přístroje ještě zvýšit.

Závěrem bych dodal, že na základě výsledků je budoucí použití tohoto zařízení jakožto diagnostického nástroje v Laboratoři fyziky plazmatu na Přf s menšími zdokonaleními možné.

5. Literární přehled

- Bardoš L., Berg S., Baránková H. (1993). Radio frequency plasma jet applied to coating of internal walls of narrow tubes. *Journal of Vacuum Science and Technology A* 11, 1486–1490.
- Belkind A., Freilich A., Lopez J., Zhao Z., Zhu W., Becker K. (2005). Characterization of pulsed DC magnetron sputtering plasmas. *New Journal of Physics* 7 (90), 16 s.
- Donne A. J. H. (2006). Introduction to plasma diagnostics. *Transactions of Fusion Science and Technology* 45, 349 – 356.
- Halliday D., Resnick R., Walker J. (2008) *Fyzika*. VUTIUM Brno, PROMETHEUS Praha, 576s.
- Hlaváček J., Procházka R., Draxler K., Kvasnička V. (2008). The Rogowski Coil Design Software. 16th IMEKO TC4 Symposium Exploring New Frontiers of Instrumentation and Methods for Electrical and Electronic Measurements Sept. 22-24, 2008, Florence, Italy.
- Hubička Z., Šícha M., Pajasová L., Soukup L., Jastrabík L., Chvostová D., Wagner T. (2001). CN_x coatings deposited by pulsed RF supersonic plasma jet: x hardness, nitrogenation and optical properties. *Surface and Coatings Technology* 142 – 144; 681–687.
- Hubička Z. (2012). The low temperature plasma jet sputtering systems applied for the deposition of thin films. *Univerzita Palackého v Olomouci*. Olomouc, 19 s.
- Chen F. F. (1984). *Úvod do fyziky plazmatu*. Vydání 1., Praha, Academia, 328 s.
- Kelly P. J., Arnell R. D. (2000). Magnetron sputtering: a review of recent developments and applications. *Vacuum* 56, 159 – 172.
- Kominiak G. J., Mattox D. M. (1977). Reactive plasma cleaning of metals. *Thin Solid Films* 40, 141 – 148.

- Kubáč S. (2009). Návrh digitálního optického výstupu – bakalářská práce, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, 33 s.
- Li R., Ye L., Mai Y. W. (1997). Applications of plasma technologies in fibre-reinforced polymer composites: a review of recent developments. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 28A, 73 – 86.
- Lieberman M. A., Lichtenberg A. J. (2005). Principles of plasma discharges and materials processing, Second edition. Wiley Interscience, USA, 800 pp. ISBN: 978-0-471-72001-0
- Lundin D., Čada M., Hubička Z. (2016). Time-resolved ion flux and impedance measurements. *Journal of Vacuum Science and Technology A* 4, 041305-1 – 041305-10.
- Martišovič V. (2004). Základy fyziky plazmy. Fakulta matematiky, fyziky a informatiky, Univerzita Komenského, Bratislava, 216 s.
- Mattox D. M. (2002). Physical vapor deposition (PVD) processes. *Metal Finishing* 1, 394 – 408.
- Mattox D. M. (2010). Handbook of Physical Vapor Deposition Processing, Oxford: Elsevier Inc., 911 s.
- Metwally I. A. (2010). Self-integrating Rogowski coil for high-impulse current measurement. *IEEE transactions on instrumentation and measurement* 2, 353 – 360.
- Musil M. (2006). Využití Rogowskiho cívky při měření proudu a analýza dosažených parametrů – bakalářská práce, Fakulta elektrotechniky, České vysoké učení v Praze, 35 s.
- Myška R. (2011). Měřicí systém impulzního proudového zdroje – diplomová práce. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně, 81 s.

- Nanyan A., Isa M., Abdul H. H., Rohani H., Ismail B. (2018). The Rogowski coil sensor in high current application: a review. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 318. 012054.
- Nishikawa R., Satoyama S., Ito Y., Hidetaka J. (1984). Magnetron sputtering apparatus. United States Patent 4,441,974, 9 s. Dostupné z: [http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO2&Sect2=HITOFF&p=2&u=%2Fnetacgi%2FPTO%2Fsearch-bool.html&r=61&f=G&l=50&co1=AND&d=PTXT&s1=%22MAGNETRON+SPUTTERING+APPARATUS%22.TI.&OS=TTL/"MAGNETRON+SPUTTERING+APPARATUS"&RS=TTL/"MAGNETRON+SPUTTERING+APPARATUS"](http://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO2&Sect2=HITOFF&p=2&u=%2Fnetacgi%2FPTO%2Fsearch-bool.html&r=61&f=G&l=50&co1=AND&d=PTXT&s1=%22MAGNETRON+SPUTTERING+APPARATUS%22.TI.&OS=TTL/)
- Paulitsch J., Schenkel M., Zufraß Th., Mayrhofer P. H., Münz W.-D. (2010). Structure and properties of high power impulse magnetron sputtering and DC magnetron sputtering CrN and TiN films deposited in an industrial scale unit. Thin solid films 19, 5558 – 5564
- Pu Y. K., Czarnetzki U. (2017), kapitola 14: Plasma diagnostics, 32 – 33. In: Adamovich I., Baalrud S., Bogaerts A., Bruggeman P., Cappelli M., Colombo V., Czarnetzki U., Ebert U., Eden J., Favia P., Graves D., Hamaguchi S., Hieftje G., Hori M., Kaganovich I., Kortshagen U., Kushner M., Mason N., Mazouffre S., Vardelle A. (2017). The 2017 Plasma Roadmap: Low temperature plasma science and technology. Journal of Physics D: Applied Physics 50, 323001.
- Ramboz J. D. (1996). Machinable Rogowski coil, design, and calibration. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 2, 511 – 515.
- Räsänen M. (2014). Argon out of thin air. Nature Chemistry 6, 82.
- Rezaee M., Heydari H. (2008). Mutual inductances comparison in Rogowski coil with circular and rectangular cross-sections and its improvement. 1507 – 1511.
- Robles G., Shafiq M., Martínez-Tarifa J. M. (2018). Designing a Rogowski coil with particle swarm optimization. Proceedings 5, 1 – 6.

- Samimi M. H., Mahari A., Farahnakian M. A., Mohseni H. (2014). A Review on the Rogowski coil principles and applications: a review. *IEEE Sensors Journal* 15, 651 – 658.
- Sezemský P., Straňák V. , Kratochvíl J. , Čada M. , Hippler R. , Hrabovský M., Hubička Z. (2019). Modified high frequency probe approach for diagnostics of highly reactive plasma. *Plasma Sources Science and Technology* 28, 10 s.
- Shafiq M., Amjad G. H., Kütt L., Lehtonen M. (2014). Effect on geometrical parameters on high frequency performance of Rogowski coil for partial discharge measurements. *Measurement* 49, 126 – 137.
- Sobolewski M. A. (1992). Electrical characterization of radio-frequency discharges in the Gaseous Electronics Conference Reference Cell. *Journal of Vacuum Science & Technology A* 6, 3550 – 3562.
- Sobolewski M. A. (2001). Measuring the ion current in high-density plasmas using radio-frequency current and voltage measurements. *Journal of Applied Physics* 6, 2660 – 2671.
- Sreekumar K. P., Vijay M., Thiyagarajan T. K., Krishnan K., Ananthapadmanabhan P. V. (2010). Reactive plasma synthesis of nanocrystalline ceramic oxides. *Journal of Physics: Conference Series* 208, 012123.
- Soukup L., Šícha M., Fendrych F., Jastrabík L., Hubička Z., Chvostová D., Šíchová H., Valvoda V., Tarasenko A., Studnička V., Wagner T., Novák M. (1999). Copper nitride thin films prepared by the RF plasma chemical reactor with low pressure supersonic single and multi-plasma jet system. *Surface and Coatings Technology* 116-119, 321 – 326.
- Teer D. G., Camino D., Jones A. H. S. (2003). Carbon coatings, method and apparatus for applying them, and articles bearing such coatings. United States Patent Application Publication US 2003/01294.07 A1, 7 s. Dostupné z: <http://patft.uspto.gov/netacgi/nph/Parser?Sect1=PTO2&Sect2=HITOFF&p=1&u=%2Fnethtml%2FPTO%2Fsearch->

bool.html&r=19&f=G&l=50&co1=AND&d=PTXT&s1=%22Carbon+coatings%22.
TI.&OS=TTL/"Carbon+coatings"&RS=TTL/"Carbon+coatings"

Tichý M. (2014). Vliv délky napětového pulzu na reaktivní vysokovýkonovou pulzní magnetronovou depozici vrstev HfO₂ – bakalářská práce, Fakulta aplikovaných věd, Západočeská univerzita v Plzni, 51 s.

Virostko P. (2009). Studium diagnostických systémů pro plazmové zdroje určené pro depozice tenkých vrstev (s aplikací v plazmachemii) – disertační práce. Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova v Praze, 114 s.

Weibo L., Chengxiong M., Jiming L. (2006). Some considerations of designing a high performance Rogowski coil for pulsed current measurement. Journal of Electrical and Electronics Engineering 1, 7 – 12.

Zhao S., Avendaño E., Gelin K., Lu J., Wäckelgård E., (2006). Optimization of an industrial DC magnetron sputtering process for graded composition solar thermal absorbing layer, Solar energy materials and solar cells 3, 308 – 328.

Internetové zdroje:

<https://automatizace.hw.cz/co-je-k-cemu-je-jak-funguje-rogowskeho-civka>; staženo dne: 1. dubna 2020.

https://taehwa.en.ec21.com/Rogowski_Coil-3789127_1447085.html; staženo dne: 1. dubna 2020.

6. Seznam obrázků, tabulek a grafů

I. Seznam obrázků:

Obrázek 1: Znáznornění Debeyova stínění.....	8
Obrázek 2: Schématické znázornění konvenčního magnetronu pro naprašování s ukázkou tloušťky plazmového oblaku včetně údaje hustoty iontového proudu.....	11
Obrázek 3: Schéma nevyváženého magnetronu s měřítkem velikosti plazmového oblaku a jeho polohou vůči substrátu.....	12
Obrázek 4: Podoba Rogowského cívky s různě velkým toroidem pro různé technické účely	15
Obrázek 5: Konečná podoba toroidu dielektrika s naznačenými rozměry.....	18
Obrázek 6: Svrchní pohled.....	19
Obrázek 7: Boční pohled.....	19
Obrázek 8: Šablona pro naznačení drobných rýh.....	19
Obrázek 9: Ukázka postupu vinutí drátu.....	19
Obrázek 10: Finální podoba Rogowského cívky před nasunutím na centrální vodič RF proudu	20
Obrázek 11: Schématický obrázek řezu měřicího zařízení.....	21
Obrázek 12: Kompletní a konečná podoba měřicího zařízení Rogowského cívky umístěného v kovové krabici.....	22
Obrázek 13: A – krabičky s připájenými rezistory pro vysokofrekvenční aplikace (zelená šipka; reálná velikost); b – detail rezistoru (zvětšeno přibližně 4x).....	23
Obrázek 14: Ukázka zapojení Rogowského cívky při kalibračním měření.....	24
Obrázek 15: Ukázka zapojení krabiček s rezistory pro VF aplikace na druhé straně jumperů	24
Obrázek 16: Umístění Sobolewského sondy (1) pod magnetronem (2) ve vakuové komoře	25
Obrázek 17: Schéma zapojení VF Sobolewského sondy spolu s Rogowského cívkou při experimentálním měření vlastností reaktivního plazmatu.....	25
Obrázek 18: Celkový pohled na měřicí aparaturu.....	27
Obrázek 19: Vzhled různých plazmových výbojů.....	28

Obrázek 20: <i>Veličiny naměřené Rogowského cívkou.....</i>	30
Obrázek 21: <i>Ukázka skriptu pro nalezení času (t) pro výchylku proudu či napětí RF signálu včetně měřených signálů z napěťového čidla a proudové sondy Rogowského cívky.....</i>	34
Obrázek 22: <i>Záznam z osciloskopu během použití Sobolewského sondy a Rogowského cívky při aplikaci reaktivního plazmatu (Ar/N_2).....</i>	36
Obrázek 23: <i>Zápis kódu algoritmu pro nalezení minima napětí na Sobolewského sondě (U_s) a následného určení maximální hodnoty maximálního proudu na sondě (I_s).....</i>	37

II. Seznam tabulek:

Tabulka 1: Konečné parametry cívky.....	22
Tabulka 2: Vypočtené průměrné hodnoty I_{RF} proudů pro dílčí frekvence.....	29
Tabulka 3: Sumarizované vypočtené konstanty úměrnosti.....	31
Tabulka 4: Sumarizované vypočtené fázové posuny pro napětí a pro proud.....	34
Tabulka 5: Naměřené iontové toky pomocí Sobolewského sondy a Rogowského cívky pro různé druhy plazmatu.....	38

III. Seznam grafů:

Graf 1: K_v faktor pro amplitudu mezi RF napětím a napěťovým čidlem.....	32
Graf 2: K_I faktor pro amplitudu mezi RF proudem a proudovou sondou.....	32
Graf 3: Fázový posun mezi RF napětím a napěťovým čidlem.....	35
Graf 4: Fázový posun mezi RF proudem a proudovou sondou.....	35
Graf 5: Znárodnění průběhu iontového toku v jednotlivých typech plazmatu z interpolovaných hodnot určených maxim sondového proudu I_s	38