

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra fyziky

Obor: Fyzika a technika termojaderné fúze



PlasmaLab - Rezonanční dutina
PlasmaLab - Resonance cavity

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Daniel Švorc
Vedoucí práce: RNDr. Jana Brotánková, Ph.D.
Rok: 2022



Katedra: fyziky

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: Daniel Švorc

Studijní program: Aplikace přírodních věd

Obor: Fyzika a technika termojaderné fúze

Název práce: PlasmaLab - Rezonanční dutina
(česky)

Název práce: PlasmaLab - Resonance cavity
(anglicky)

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rešerše o šíření mikrovln v rezonátoru. Popis rezonátoru. Popis módů.
- 2) Aparatura Rezonanční dutina v PlasmaLab@CTU.
 - a. Popis aparatury.
 - b. Metodika měření.
- 3) Proměření rezonančních módů za různých tlaků pro různé plyny. Pokud to bude možné, přiřazení změřených módů teoreticky vypočítaným.
- 4) Výpočet hustoty plazmatu z posunu rezonančních frekvencí. Závislosti hustoty plazmatu na tlaku pro různé plyny.
- 5) Diskuze výsledků. Porovnání teorie a experimentu.

Doporučená literatura:

- [1] D. M. Pozar: Microwave Engineering. Wiley, 2012
- [2] J. Oliveira, D. Hachmeister, P. Lourenco, J. Brotankova, H. Fernandes: An accessible microwave cavity experiment for plasma density determination. Eur. J. Phys. 42, 035203 (2021)
- [3] PlasmaLab@CTU - New facilities in support of fusion education, Proceedings of 20th Conference of Czech and Slovak Physicists, 2020
- [4] F. F. Chen: Úvod do fyziky plazmatu, Academia, 1984
- [5] P. Kulhánek: Vybrané kapitoly z teoretické fyziky III, AGA, 2020

Jméno a pracoviště vedoucího bakalářské práce:

RNDr. Jana Brotánková, Ph.D.
Katedra fyziky, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze

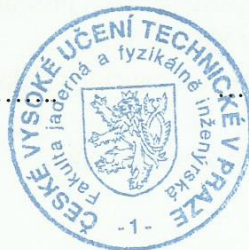
Datum zadání bakalářské práce: 20.10.2021

Termín odevzdání bakalářské práce: 07.07.2022

Doba platnosti zadání je dva roky od data zadání.

.....
garant oboru

.....
vedoucí katedry



.....
děkan

V Praze dne 19.10.2021

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti použití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č. 121/200 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....
Daniel Švorc

Poděkování

Děkuji vedoucí práce RNDr. Janě Brotánkové, Ph.D. za neocenitelné rady a pomoc při tvorbě bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat prof. Horáciu Fernándezovi, který pomohl vysvětlit a vyřešit mnoho problémů s měřením. Na závěr bych rád poděkoval svým rodičům za jejich podporu a trpělivost.

Daniel Švorc

Název práce:

PlasmaLab - Rezonanční dutina

Autor: Daniel Švorc

Obor: Fyzika a technika termojaderné fúze

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: RNDr. Jana Brotánková, Ph.D.

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

Konzultant: –

Abstrakt: Tato práce se zabývá aparaturou Rezonanční dutina v PlasmaLabu@CTU. V práci je popsáno teoretické elektromagnetické pole rezonančních módů dutiny a jejich rezonanční frekvence. Elektromagnetické pole je poté generováno a měřeno uvnitř dutiny a srovnáno s teoretickým modelem. Vytvořením plazmatu uvnitř dutiny dojde k posunu rezonančních frekvencí v závislosti na jeho elektronové hustotě. Tento jev je v práci využit k výpočtu elektronové hustoty plazmatu v závislosti na tlaku. Dále je popsáno vytváření nových antén pro správné generování vybraného módu a vytvoření nové elektrody generující plazma.

Klíčová slova: rezonanční dutina, elektronová hustota, plazma, mikrovlny

Title:

PlasmaLab - Resonance cavity

Author: Daniel Švorc

Abstract: This thesis deals with the Resonant Cavity device in PlasmaLab@CTU. It describes a theoretical electromagnetic field of resonant modes of the cavity and their resonant frequencies. The electromagnetic field is then generated and measured inside the cavity and compared with the theoretical model. By creating a plasma inside the cavity, the resonant frequencies will shift depending on its electron density. This phenomenon is used in this thesis to calculate the electron density of the plasma as a function of pressure. The creation of new antennas for proper generation of the selected mode and the creation of a new plasma generating electrode are also described.

Key words: resonance cavity, electron density, plasma, microwaves

Obsah

Úvod	11
1 Teoretický úvod	13
1.1 Mikrovlnná dutina	13
1.2 Besselovy funkce	16
1.3 Plazma	17
1.4 Permitivita pro elektromagnetické vlny v plazmatu	18
2 Experiment	19
2.1 Mikrovlnná dutina PlasmaLab@CTU	20
2.2 Spektrální analyzátor	20
2.3 Vakuová komora	22
2.4 Generátor mikrovlnného výboje	22
2.5 Webové rozhraní	23
2.5.1 ResonanceCavity	23
2.5.2 ValveBoard	24
2.5.3 Vacuum	24
3 Měření a zpracování dat	25
3.1 I. fáze	25
3.1.1 Měření teploty dutiny	26
3.1.2 Zpracování dat	29
3.2 II. fáze	30
3.2.1 Původní antény	30
3.2.2 Antény 5 cm	34
3.2.3 Antény 2,5 cm a 2,875 cm	38
3.2.4 Antény 1 cm	38
3.3 III. fáze	48
4 Výsledky a diskuze	53
4.1 Rezonanční módy	53
4.2 Elektronová hustota	55
Závěr	61
Literatura	63

Úvod

Plazma představuje unikátní stav hmoty, ve kterém jsou elektrony odtrženy od svých jader. Plazma může být složeno z elektronů, iontů s různým stupněm ionizace, radikálů a také z neutrálních atomů a molekul. Díky elektricky nabitým částicím plazma může vytvářet vlastní elektrická a magnetická pole a také může na vnější elektrická a magnetická pole reagovat. Plazma je však kvazineutrální, tj. navenek je elektricky neutrální, obsahuje stejné množství kladných a záporných nábojů. Díky těmto vlastnostem má plazma nenahraditelnou roli v řadě odvětvích průmyslu např. úprava materiálů, energetika, lékařství, výroba mikroprocesorů a mnoho dalších. K návrhu a řízení technologií využívající plazma je potřeba diagnostických metod pro určení parametrů plazmatu. Jeden z nejdůležitějších parametrů je elektronová hustota.

Aparatura Rezonanční dutina v PlasmaLabu@CTU byla vytvořena pro studium rezonančních módů a jejich využití k určení elektronové hustoty plazmatu uvnitř dutiny. Rezonanční frekvence dutiny závisí na elektromagnetických vlastnostech materiálu vyplňující dutinu. Pokud dutinu vyplňuje plazma, rezonanční frekvence závisí na relativní permitivitě plazmatu, která závisí na elektronové hustotě. Z posunu rezonanční frekvence bez a s plazmatem je tedy možné vypočítat elektronovou hustotu. Cílem této práce je srovnání teoretického modelu šíření vlnění v dutině s experimentem a provedení měření elektronové hustoty v závislosti na tlaku.

Kapitola 1

Teoretický úvod

1.1 Mikrovlnná dutina

Mikrovlnnou dutinou se rozumí objem uzavřený vodivým povrchem, který může uchovávat elektromagnetickou energii [5]. Elektromagnetické vlnění uvnitř rezonátoru se odráží od stěn dutiny a dochází k interferenci. Pro určité frekvence a konfigurace vln vznikají stojaté vlny nazývané rezonanční módy. Mikrovlnné rezonátory lze zkonstruovat z uzavřených úseků vlnovodu. Ztráty záření z vlnovodu z otevřenými konci mohou být značné, tudíž jsou vlnovodové rezonátory na obou koncích uzavřeny a tvoří tak uzavřenou dutinu. Elektromagnetická energie je uložena uvnitř dutiny a ke ztrátám dochází v kovových stěnách a také v dielektrickém materiálu, který může dutiny vyplňovat.[1]

Tato práce se týká pouze válcových rezonančních dutin, tedy dutin vytvořených uzavřením obou konců vlnovodu s kruhovým průřezem. Podle uspořádání elektrického a magnetického pole stojaté vlny v dutině lze rozlišit dva typy módů. V TE módu je elektrické pole kolmé na směr šíření vlny. V TM módu je magnetické pole kolmé na směr šíření vlny. Odvození rezonančních frekvencí a dalších vlastností mikrovlnných dutin je k dispozici v kapitole 6 knihy [1]. Rezonanční frekvence pro TM mód jsou

$$f_{nml} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p_{nm}}{R}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{L}\right)^2}, \quad (1.1)$$

a rezonanční frekvence TE módu jsou

$$f_{nml} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p'_{nm}}{R}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{L}\right)^2}, \quad (1.2)$$

kde c je rychlost světla ve vakuu, μ_r resp. ϵ_r jsou relativní permeabilita resp. relativní permitivita, R je poloměr dutiny, L délka dutiny, p_{nm} označuje m -tý nulový bod Besselovy funkce prvního druhu $J_n(x)$ řádu n , p'_{nm} označuje nulové body její derivace, $n = 0, 1, 2, 3, \dots$, $m = 1, 2, 3, \dots$, $l = 0, 1, 2, 3, \dots$

Elektromagnetické pole TE_{nml} módu v cylindrických souřadnicích (ρ, ϕ, z) lze napsat jako

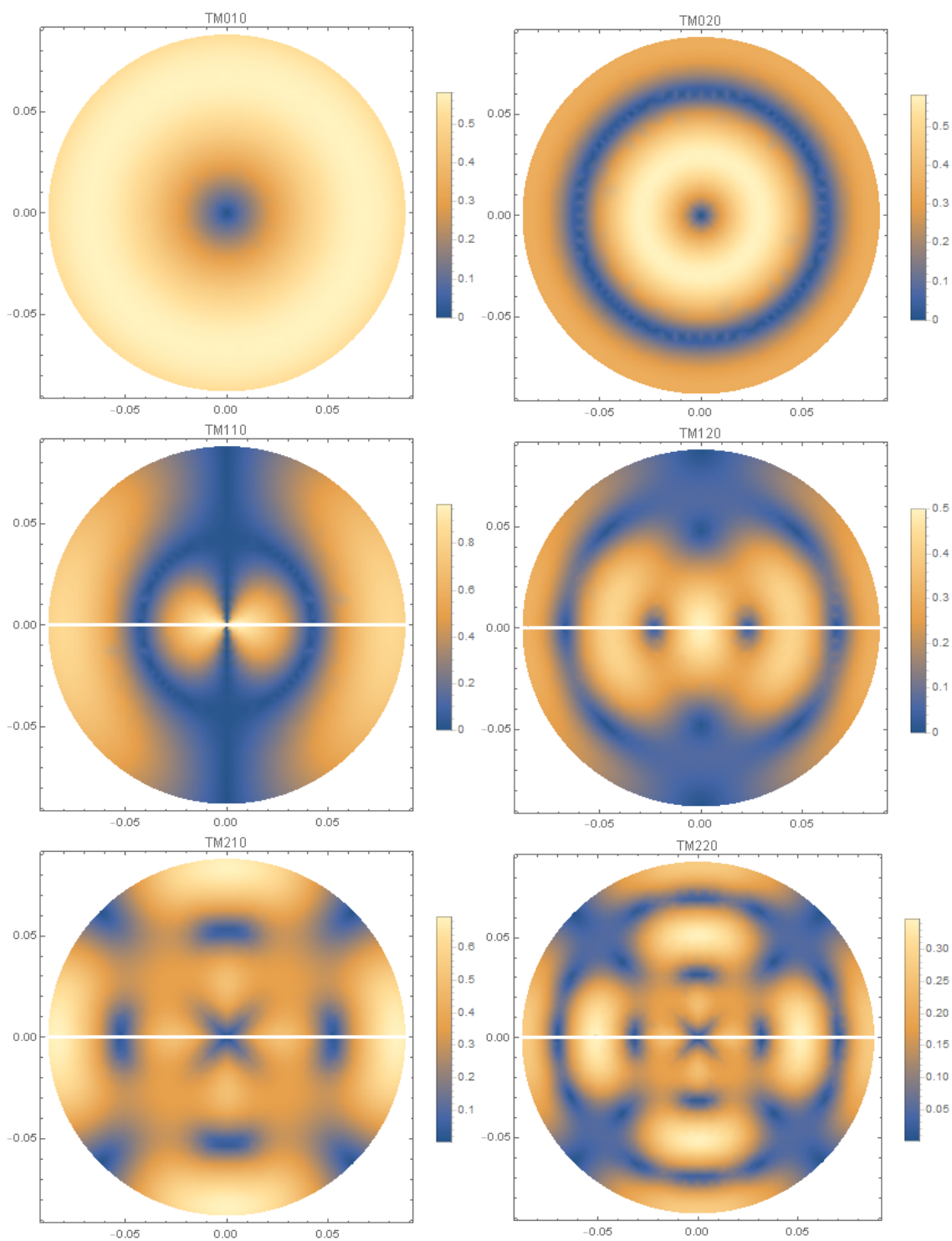
$$\begin{aligned}
H_z &= H_0 J_n \left(\frac{p'_{nm} \rho}{R} \right) \cos n\phi \sin \frac{l\pi z}{L}, \\
H_\rho &= \frac{\beta R H_0}{p'_{nm}} J'_n \left(\frac{p'_{nm} \rho}{R} \right) \cos n\phi \cos \frac{l\pi z}{L}, \\
H_\phi &= \frac{-\beta R^2 n H_0}{(p'_{nm})^2 \rho} J_n \left(\frac{p'_{nm} \rho}{R} \right) \sin n\phi \cos \frac{l\pi z}{L}, \\
E_\rho &= \frac{jk\eta R^2 n H_0}{(p'_{nm})^2 \rho} J_n \left(\frac{p'_{nm} \rho}{R} \right) \sin n\phi \sin \frac{l\pi z}{L}, \\
E_\phi &= \frac{jk\eta R H_0}{p'_{nm}} J'_n \left(\frac{p'_{nm} \rho}{R} \right) \cos n\phi \sin \frac{l\pi z}{L}, \\
E_z &= 0,
\end{aligned} \tag{1.3}$$

kde $\eta = \sqrt{\mu/\epsilon}$, $H_0 = -2jA^+$, $k = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$, $\beta = \sqrt{k^2 - k_c^2}$, $k_c = \frac{p_{nm}}{R}$ [1].

Elektromagnetické pole TM_{nml} módu [1] neuvádí. Vztahy je však možné odvodit stejným postupem jako při odvození pole TE_{nml} módu použitím okrajových podmínek na EM pole vlnovodu viz kapitola 6 v [1]. Dostaneme

$$\begin{aligned}
H_z &= 0, \\
H_\rho &= \frac{H_0 k n R^2}{\eta \rho p_{nm}^2} J_n \left(\frac{p_{nm} \rho}{R} \right) \sin n\phi \cos \frac{l\pi z}{L}, \\
H_\phi &= \frac{H_0 k R}{\eta p_{nm}} J'_n \left(\frac{p_{nm} \rho}{R} \right) \cos n\phi \cos \frac{l\pi z}{L}, \\
E_z &= H_0 J_n \left(\frac{p_{nm} \rho}{R} \right) \cos n\phi \cos \frac{l\pi z}{L}, \\
E_\rho &= \frac{H_0 j \beta R}{p_{nm}} J'_n \left(\frac{p_{nm} \rho}{R} \right) \cos n\phi \sin \frac{l\pi z}{L}, \\
E_\phi &= \frac{H_0 j \beta R^2}{\rho p_{nm}^2} J_n \left(\frac{p_{nm} \rho}{R} \right) \sin n\phi \sin \frac{l\pi z}{L}.
\end{aligned} \tag{1.4}$$

Programem Wolfram Mathematica lze vykreslit pole módů. Na obr. 1.1 je toto pole vykresleno v pohledu na dutiny zhora pro módy: TM_{010} , TM_{110} , TM_{210} , TM_{020} , TM_{120} , TM_{220} . Magnetické pole pro tyto módy nezávisí na souřadnici z .



Obrázek 1.1: Relativní velikost magnetického pole některých TM módů. Graf ukazuje pohled na dutinu zhora. Magnetické pole pro tyto módy nezávisí na souřadnici z .

1.2 Besselovy funkce

Besselova rovnice je dána jako

$$x^2 \frac{d^2 y}{dx^2} + x \frac{dy}{dx} + (x^2 - n^2) y = 0. \quad (1.5)$$

Rovnici lze řešit pomocí mocninných řad. Řešení této rovnice pro $m \in \mathbb{R}$ lze zapsat jako lineární kombinaci Besselových funkcí 1. a 2. druhu.

$$y = AJ_n(x) + BY_n(x) \quad (1.6)$$

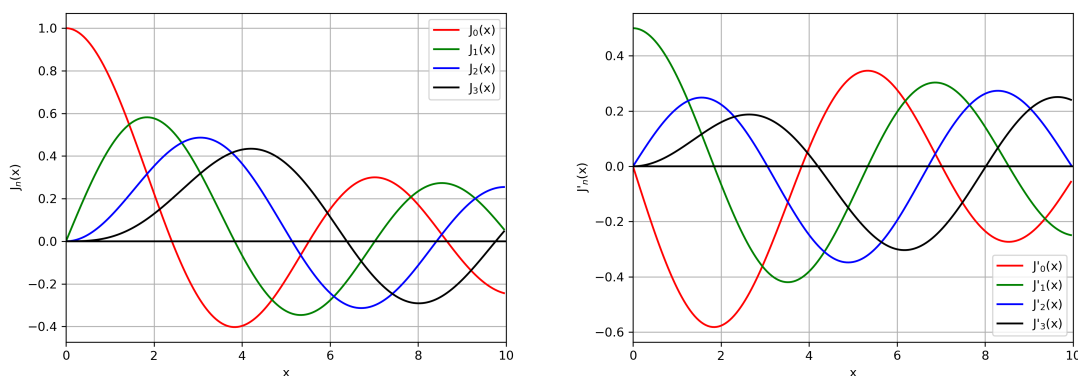
Besselovy funkce prvního druhu mají explicitní zápis

$$J_n(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k (x/2)^{n+2k}}{k! \Gamma(n+k+1)} \quad (1.7)$$

[3]

Pro vykreslení Besselových funkcí je možné použít programovací jazyk Python a knihovnu SciPy. Grafy některých Besselových funkcí resp. jejich derivací jsou na obr. 1.2a resp. 1.2b.

V tabulkách 1.1 resp. 1.2 jsou nulové body p_{nm} resp. p'_{nm} Besselových funkcí $J_n(x)$ resp. jejich derivací $J'_n(x)$ pro některá m, n . [1]



(a) Besselovy funkce prvního druhu $J_n(x)$. (b) Derivace Besselových funkcí prvního druhu $J'_n(x)$.

n	p_{n1}	p_{n2}	p_{n3}
0	2,405	5,520	8,654
1	3,832	7,016	10,174
2	5,135	8,417	11,620

Tabulka 1.1: m-té nulové body Besselových funkcí $J_n(x)$.

n	p'_{n1}	p'_{n2}	p'_{n3}
0	3,832	7,016	10,174
1	1,841	5,331	8,836
2	3,054	6,706	9,970

Tabulka 1.2: m-té nulové body derivací Besselových funkcí $J_n(x)$.

1.3 Plazma

Plazma je často označováno jako čtvrté skupenství hmoty. Je to stav, ve kterém jsou některé či všechny elektronové obaly odtrženy od jader. Plazma se tedy skládá ze záporně nabitých elektronů, kladně nabitých iontů a neutrálních neionizovaných atomů.

Název plazma pro ionizovaný plyn poprvé použil Irving Langmuir (1881-1957) v roce 1928. Jako plazma chápal Langmuir oblast výboje v plynu, které není ovlivněna stěnami nebo elektrodami a má následující vlastnosti:

1. V plazmatu jsou volné nosiče elektrického náboje.
2. Plazma vykazuje kolektivní chování, tj. jako celek reaguje na elektrická a magnetická pole a také je vytváří.
3. Plazma je kvazineutrální, tj. v makroskopickém objemu je stejné množství kladných a záporných iontů. [2]

Díky těmto vlastnostem vznikají plazmové oscilace a vlny. Narušením kvazineutrality vychýlením elektronů vůči iontům vzniká elektrické pole, které působí proti vychýlení. Vznikají tak oscilace o úhlové frekvenci

$$\omega_p^2 = \omega_{pe}^2 + \omega_{pi}^2, \quad (1.8)$$

kde pro elektronovou plazmovou frekvenci ω_{pe} a iontovou plazmovou frekvenci ω_{pi} platí

$$\omega_{pe}^2 = \frac{n_{e0}e^2}{m_e\varepsilon_0}, \quad \omega_{pi}^2 = \frac{n_{i0}Z^2e^2}{m_i\varepsilon_0}, \quad (1.9)$$

kde n_{e0} resp. n_{i0} je elektronová resp. iontová hustota, e je elementární náboj, Z označuje Z -násobnou ionizaci, m_e resp. m_i je hmotnost elektronu resp. iontu a ε_0 je permitivita vakua. Kvadrát plazmové frekvence elektronů je o tři řády vyšší než u iontů. Druhý člen na pravé straně představuje jen nepatrnou korekci na hmotnost iontů a většinou se vůbec neuvažuje.[2]

1.4 Permittivita pro elektromagnetické vlny v plazmatu

Na rozdíl od plynu nebo jiného dielektrického prostředí se v plazmatu vyskytují volné nabitě částice. Důsledkem je, že plazma jako prostředí nelze popsat pomocí permitivity nezávislé na frekvenci. Nabitě částice plazmatu reagují na elektromagnetické pole vlny a plazma vytváří vlastní pole. Pro průchod elektromagnetické vlny plazmatem lze prostředí popsat pomocí tenzoru permitivity, která při absenci vnějšího magnetického pole přechází na skalární permitivitu ε_r . Pro relativní permitivitu pro vlnu o frekvenci ω platí vztah

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}. \quad (1.10)$$

[2]

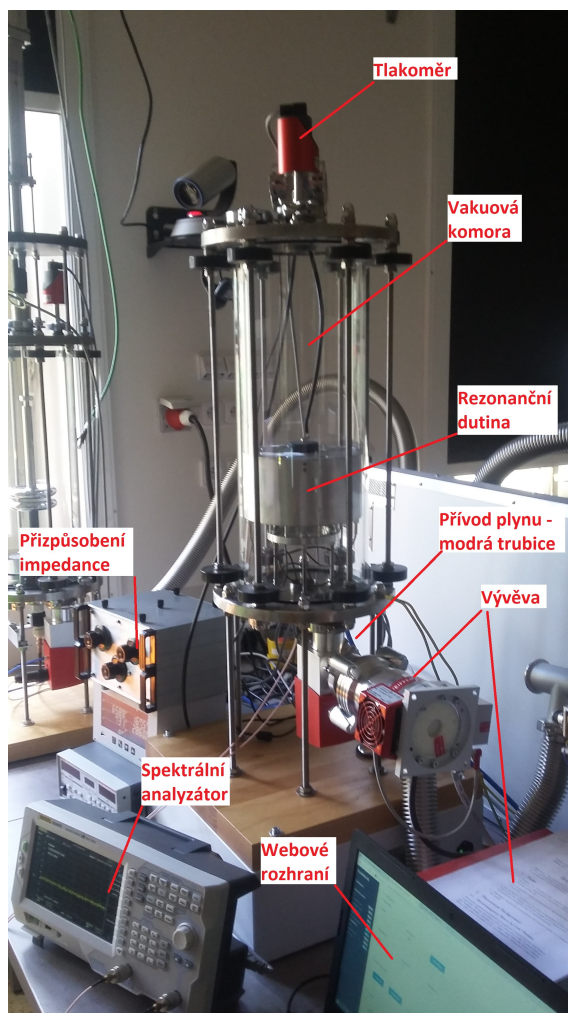
Vidíme, že relativní permitivita závisí na plazmové frekvenci (1.8), která závisí na elektronové hustotě. Díky těmto závislostem lze prostým dosazením vytvořit vztah pro závislost elektronové hustoty n_e na rozdílu kvadrátů rezonančních frekvencí v plazmatu f a v neionizovaném plynu f_0

$$n_e = \frac{4\pi^2 m_e \varepsilon_0 (f^2 - f_0^2)}{e^2}. \quad (1.11)$$

Kapitola 2

Experiment

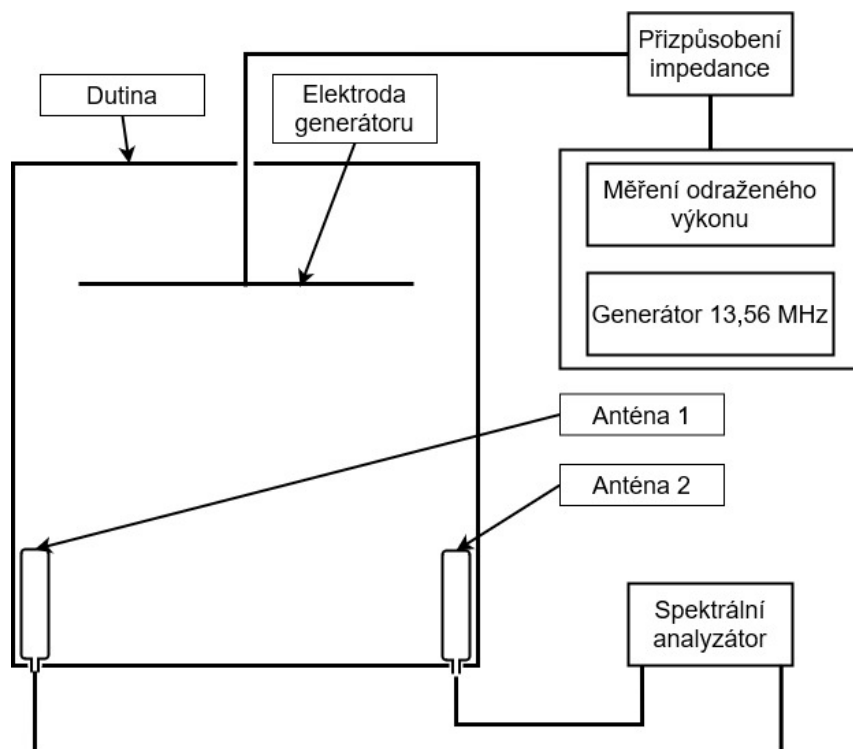
V této kapitole jsou popsány jednotlivé části aparatury Rezonanční dutina viz fotografie obr. 2.1.



Obrázek 2.1: Aparatura Rezonanční dutina s popisem viditelných částí.

2.1 Mikrovlnná dutina PlasmaLab@CTU

Dutina je nerezová, válcová nádoba. Vnitřní poloměr její podstavy je $R = 88$ mm a výška vnitřku je $L = 95$ mm. Rezonanční frekvence TM resp. TE módu jsou podle vztahů (1.1) resp. (1.2) vypočítány viz tab. 2.1 resp. 2.2. Dutina byla vyrobena tak, aby byl generován mód TM_{020} při frekvenci 3 GHz. Horní podstava je oddělitelná a pro jednoduchost se nazývá poklice. Nachází se v ní 8 otvorů, které umožňují vyčerpání vnitřku dutiny. Na vnitřní stranu poklice je připevněna hliníková elektroda generátoru mikrovlnného výboje viz obr. 2.3. Elektroda má kruhový tvar s poloměrem 63 mm, tloušťkou 2 mm a je upevněna ve vzdálenosti 23 mm od horní podstavy. Elektroda má poloměr srovnatelný s poloměrem podstavy dutiny a výrazně zasahuje do vnitřního prostoru. Pokud je vlnění rezonuje mezi elektrodou a spodní podstavou, může být za výšku takového rezonátoru považována délka 70 mm. Schéma dutiny je na obr. 2.2. Ve spodní části dutiny se nachází dva otvory k zavedení antén ke generování a k detekci rezonantních módů.



Obrázek 2.2: Schéma rezonátoru a zapojení.

2.2 Spektrální analyzátor

Spektrální analyzátor Rigol DSA 875 slouží dvěma účelům: generování rezonantních módů a jejich měření a spektrální analýzu.

Analýzátor kontinuálně prochází jednotlivé frekvence vstupního signálu přes zvolené rozmezí a měří jejich výkon v jednotkách dBm. Funkce Tracking Generator



Obrázek 2.3: Poklice s hliníkovou elektrodou.

n	f_{n10} (GHz)	f_{n20} (GHz)	f_{n30} (GHz)
0	1,30	2,99	4,69
1	2,08	3,80	5,52
2	2,78	4,56	5,29
3	3,46	5,29	7,06

n	f_{n11} (GHz)	f_{n21} (GHz)	f_{n31} (GHz)
0	2,05	3,38	4,95
1	2,61	4,12	5,74
2	3,20	4,83	6,50
3	3,80	5,52	7,23

n	f_{n12} (GHz)	f_{n22} (GHz)	f_{n32} (GHz)
0	3,41	4,35	5,65
1	3,78	4,94	6,36
2	4,21	5,55	7,05
3	4,68	6,16	7,73

Tabulka 2.1: Rezonanční frekvence dutiny pro TM módy.

(TG) vytváří signál na výstupu zařízení ve stejném rozmezí frekvencí jako zvolených pro analýzu vstupního signálu [8]. Připojením vstupu k anténě 1 (viz obr. 2.2) uvnitř rezonanční dutiny lze analyzovat spektrum signálu detekovaného anténou. K výstupu je připojena anténa 2, která díky TG vysílá mikrovlnné záření ve zvoleném rozsahu frekvencí. Mikrovlnné záření poté generuje rezonanční módy dutiny. Umístění antén a jejich parametry udávají výkon předávaný jednotlivým módům a výkon naměřený pro jednotlivé frekvence.

n	f_{n10} (GHz)	f_{n20} (GHz)	f_{n30} (GHz)
0	1,83	3,80	5,52
1	0,99	2,89	4,63
2	1,66	3,64	5,41
3	2,28	4,35	6,15

n	f_{n11} (GHz)	f_{n21} (GHz)	f_{n31} (GHz)
0	2,42	4,12	5,74
1	1,87	3,29	4,89
2	2,29	3,96	5,63
3	2,77	4,62	6,35

n	f_{n12} (GHz)	f_{n22} (GHz)	f_{n32} (GHz)
0	3,65	4,94	6,36
1	3,31	4,28	5,60
2	3,56	4,81	6,26
3	3,89	5,37	6,91

Tabulka 2.2: Rezonanční frekvence dutiny pro TE módy.

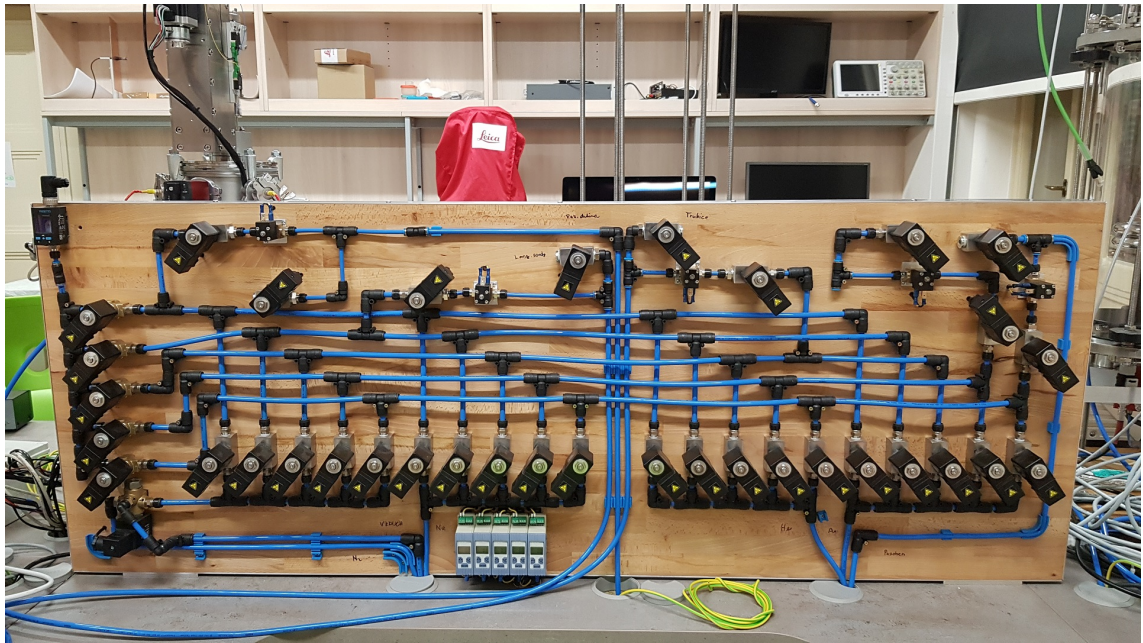
2.3 Vakuová komora

Vakuová komora slouží k udržení vakua nebo plynu o nízkém tlaku a je do ní uložena rezonanční dutina. V horní části se nachází tlakoměr Pfeiffer CMR 363. Komora je čerpána vývěvovou stanicí HiCube 80, kombinující membránovou a turbomolekulární vývěvu. Stanice může čerpat více zařízení v PlasmaLabu najednou, je ji však možné připojit přímo na ventil vakuové komory a vyhnout se tím čerpání celé společné struktury.

Napouštění komory probíhá pomocí struktury tlakových trubic a ventilů (ValveBoard) viz fotografie obr. 2.4. Tato struktura umožňuje otevření pouze ventilů mezi zvoleným plynem a zařízením viz diagram na obr. 2.5. Komora je s ValveBoard spojena jehlovým ventilem.

2.4 Generátor mikrovlnného výboje

Pro zapálení plazmatu je využit RF generátor, který vytváří střídavé napětí o frekvenci 13,56 MHz. Generátor je spojen s diskovou elektrodou umístěnou v horní části uvnitř dutiny. Pro snížení odraženého výkonu je mezi anténu a generátor zapojeno zařízení pro přizpůsobení impedance. Pomocí přepínačů indukčnosti, kapacity a pomocí otočného kondenzátoru lze nastavit a vyladit největší přenášený výkon. Schéma zapojení je na obr. 2.2.



Obrázek 2.4: Trubice a ventily pro přívod vybraného plynu do vybraného zařízení (ValveBoard). Každé zařízení má vlastní trubici, do které jsou připojeny všechny plyny.

2.5 Webové rozhraní

Většinu potřebných zařízení lze v PlasmaLabu ovládat přes webové rozhraní. U některých to ani není jinak možné. Pro dutinu je výjimkou zařízení pro přizpůsobení impedance a vývěva, které je nutné ovládat přímo. Pro přihlášení do rozhraní ze vzdálené či místní sítě PlasmaLabu musí být uživateli vytvořen účet administrátorem. Z bezpečnostních důvodů administrátor také musí povolit uživateli přístup k ovládání experimentu na omezenou dobu.

Ovládání tohoto experimentu je rozděleno do tří karet: ResonanceCavity, ValveBoard, Vacuum. Každá karta je dále rozdělena do sekcí ovládacích prvků se související funkcí.

2.5.1 ResonanceCavity

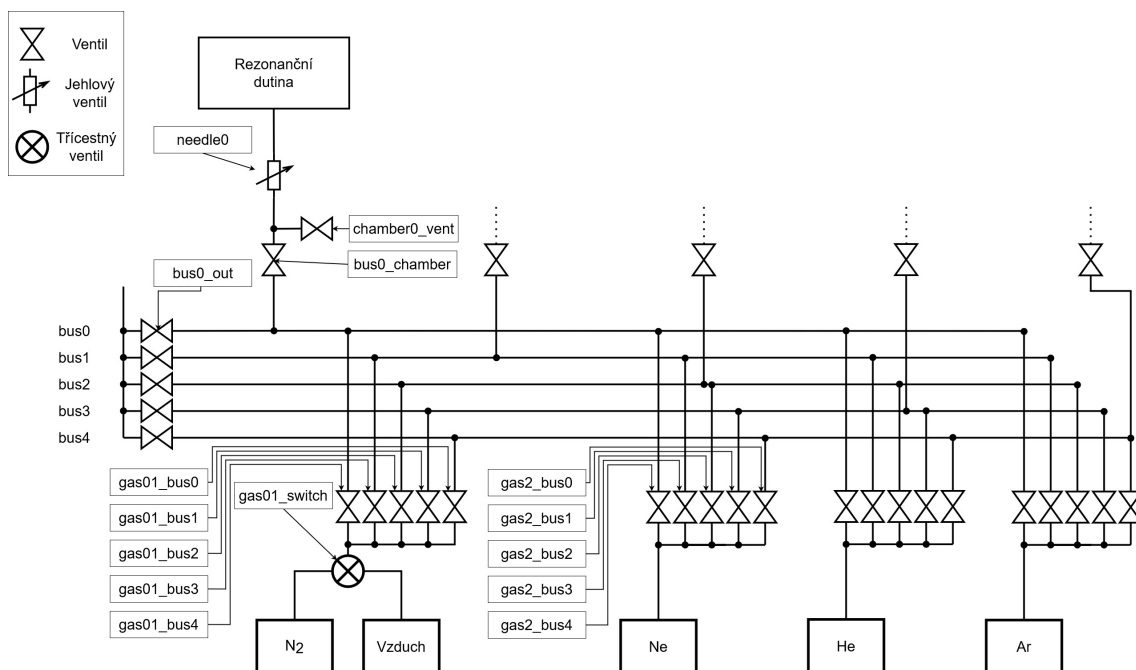
Na této kartě se nacházejí ovládací prvky rezonanční dutiny.

Output: obsahuje nastavení výkonu generátoru, délky výboje a tlačítko pro spuštění.

Simple commands: tlačítka pro aktivaci/deaktivaci generátoru a spektrálního analyzátoru, otevření/uzavření ventilu komory.

Values: zobrazení stavu ventilu, stavu generátoru, přenášeného a odraženého výkonu generátoru.

Po připojení a aktivaci spektrálního analyzátoru se objeví ovládací prvky umožňující nastavení rozmezí frekvencí, zobrazení a uložení dat ze spektrálního analyzátoru. Výstupní data spektra jsou textové soubory. Jejich název obsahuje čas uložení.



Obrázek 2.5: Nákres struktury trubic a ventilů zvaný ValveBoard. Ventily jsou označeny názvy, které umožňují jejich ovládání přes webové rozhraní.

2.5.2 ValveBoard

Tato karta obsahuje prvky pro ovládání ventilů ValveBoardu.

Valves: umožňuje otevření či uzavření vybraných ventilů.

Switch gas 0/1: přepínání mezi plynem 0 a 1 viz diagram na obr. 2.5.

Set needle: výběr a nastavení otevření jehlového ventilu.

Needle puff: krátké otevření vybraného jehlového ventilu na vybranou dobu.

Simple commands: tlačítka pro uzavření všech nebo vybraných ventilů.

Values: stav ventilů.

2.5.3 Vacuum

Na této kartě je možné ovládat měření tlaku.

Log data: spuštění průběžného měření tlaku s vybraným intervalem mezi měřeními a dobou celého měření.

Simple commands tlačítko pro předběžné ukončení měření tlaku.

Po uplynutí doby měření je možné uložit textový soubor obsahující naměřená data tlaku. Název souboru obsahuje čas uložení.

Kapitola 3

Měření a zpracování dat

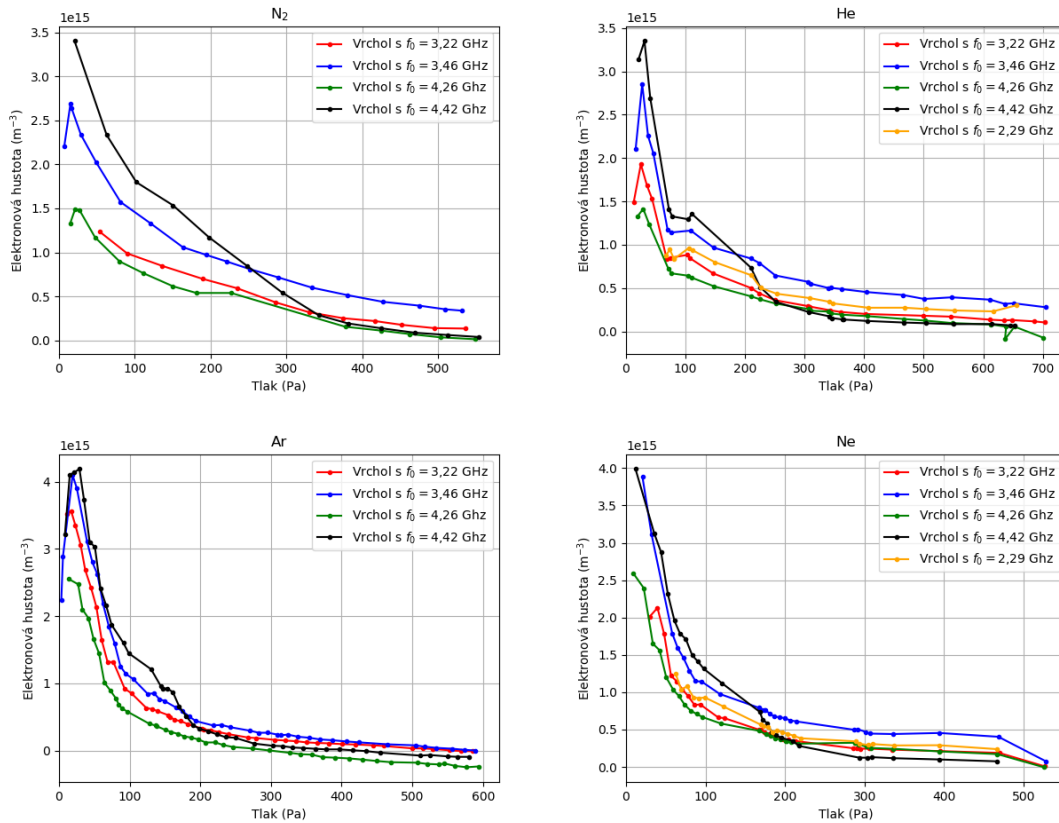
Měření v rámci této bakalářské práce lze rozdělit na tři fáze. V I. fázi byly prováděny všechny úkony, které vyžadovaly udržení nízkého tlaku uvnitř vakuové komory, tedy úkony pracující s plazmatem. Odmontováním vakuové komory byl poté umožněn přístup k rezonantní dutině. Ve II. fázi bylo tedy možné blíže studovat rezonátor. III. fáze proběhla ve spolupráci s prof. Horáciem Fernandesem. Byly vytvořeny a umístěny nové antény pro generování módu TM_{010} a poté provedena testovací měření v plazmatu.

3.1 I. fáze

V první řadě bylo nutné vybrat rezonantní módy, jejichž frekvenční posun v plazmatu bude sloužit k výpočtu elektronové hustoty. Spektrálním analyzátozem se zapnutou funkcí Tracking Generator bylo možné zobrazit spektrum naměřené uvnitř dutiny. Ve spektru byly nalezeny čtyři vrcholy o frekvencích 3,22 GHz, 3,46 GHz, 4,26 GHz a 4,42 GHz, jejichž posun v plazmatu byl dobře měřitelný. Poloha rezonantních vrcholů by neměla být ovlivněna tlakem plynu v dutině, díky permitivitě prostředí blízké permitivitě vakua. To bylo ověřeno vyčerpáním komory a pozorováním poloh vrcholů.

Po vyčerpání komory byl pomalu přiváděn zvolený plyn přes jehlový ventil a bylo nastaveno průběžné měření tlaku s periodou 0,5 s. Přes webové rozhraní bylo možné zvolit rozsah frekvencí obsahující jeden z vybraných vrcholů a jeho okolí. Rozsah byl vždy volen tak, aby byl vrchol vždy nejvyšším bodem grafu. Tento výběr značně usnadňoval další zpracování dat. RF generátorem poté bylo vytvořeno plazma s výkonem 70 W a dobou trvání 5-10 s. V době, kdy bylo plazma vytvořené bylo možné uložit spektrum ve zvoleném rozsahu frekvencí. Poté byl nastaven rozsah frekvencí pro další vrchol a postup byl opakován. Při zvyšujícím se tlaku tedy bylo možné dokola měřit čtyři zvolené vrcholy. Po dosažení určitého tlaku přestalo být možné plazma zapálit a měření bylo ukončeno. Měření probíhalo postupně v plynech N_2 , Ar, He, Ne přičemž při měření v He, Ne byl přidán pátý vrchol 2,29 GHz.

Po vytvoření grafů závislosti elektronové hustoty na tlaku pro různé plyny se

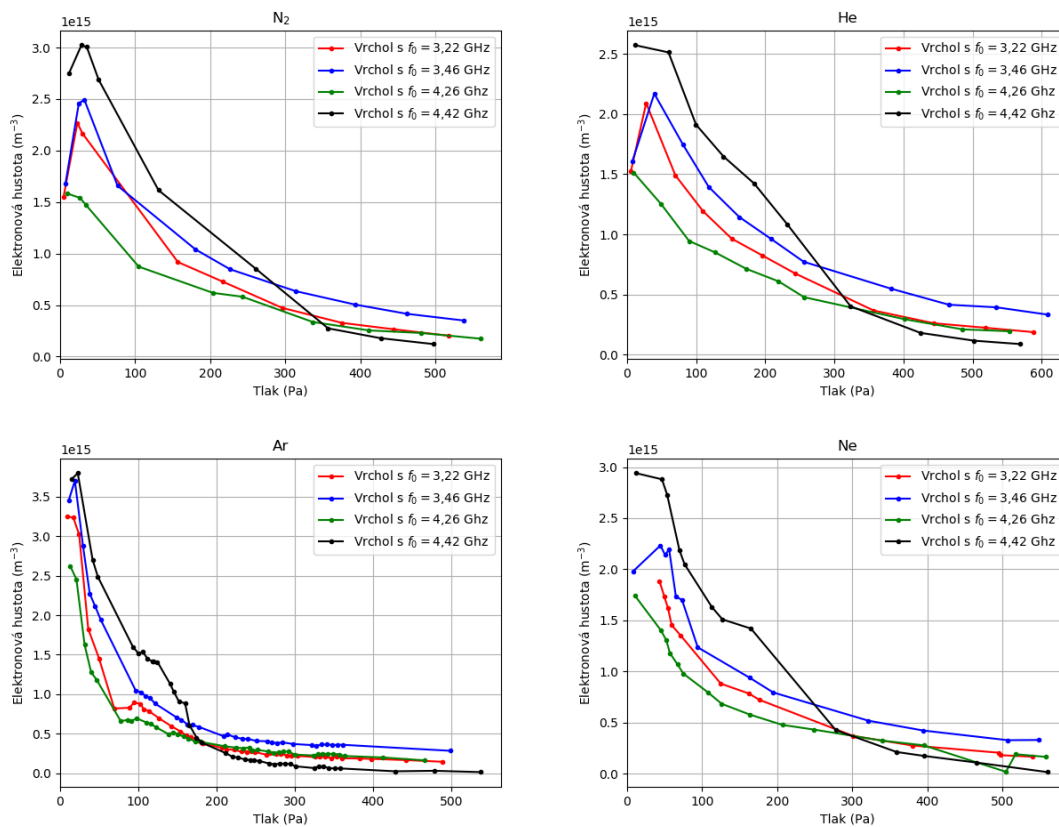


Obrázek 3.1: Elektronová hustota plazmatu jako funkce tlaku při prvním měření v a) dusíku b) heliu c) argonu d) neonu. K měření posunu frekvencí byly využity rezonanční vrcholy s frekvencemi mimo plazma: 3,22 GHz, 3,46 GHz, 4,27 GHz, 4,45 GHz, 2,29 GHz. Některé hodnoty ukazují zápornou elektronovou hustotu.

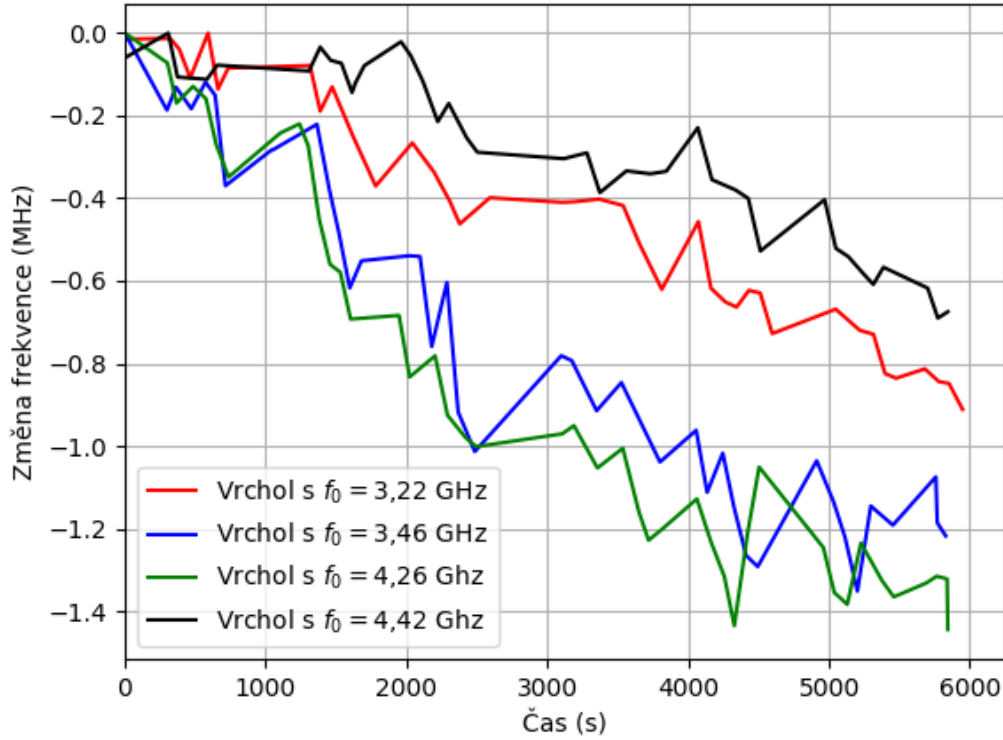
ukázalo, že pro některá měření vychází záporná elektronová hustota. Tyto grafy jsou na obr. 3.1. Ukázalo se, že po opakovaném měření se rezonanční vrcholy bez plazmatu posouvají k nižším frekvencím. Měření elektronové hustoty byla následně zopakována tak, že mezi každým měřením rezonančního vrcholu v plazmatu byla naměřena i jeho výchozí pozice bez plazmatu. Tímto způsobem byla získána data potřebná k určení správné elektronové hustoty ale i data časového vývoje výchozí pozice rezonančních vrcholů. Hodnoty elektronové hustoty vypočtené z těchto dat jsou na grafech v závislosti na tlaku obr. 3.2. Graf časového vývoje rezonančních vrcholů je na obr. 3.3.

3.1.1 Měření teploty dutiny

Na obr. 3.3 je vidět, že frekvence rezonančních vrcholů klesá s rostoucím časem. Při měření elektronové hustoty bylo plazma vytvářeno generátorem o výkonu 70 W. Tento výkon, porovnatelný s výkonem klasické žárovky, mohl zahřívat rezonanční dutinu a díky tepelné roztažnosti zvětšovat její vnitřní prostor. Rostoucí poloměr a délka dutiny by podle (1.1) a (1.2) skutečně znamenala klesající rezonanční frekvence módů.



Obrázek 3.2: Elektronová hustota plazmatu jako funkce tlaku při druhém měření v a) dusíku b) heliu c) argonu d) neonu. K měření posunu frekvencí byly využity rezonanční vrcholy s frekvencemi mimo plazma: 3,22 GHz, 3,46 GHz, 4,27 GHz, 4,45 GHz.



Obrázek 3.3: Změna frekvence rezonančních vrcholů v závislosti na čase při druhém měření elektronové hustoty argonovém plazmatu. Resonanční vrcholy s frekvencí v počátku měření: 3,22 GHz, 3,46 GHz, 4,27 GHz, 4,45 GHz.

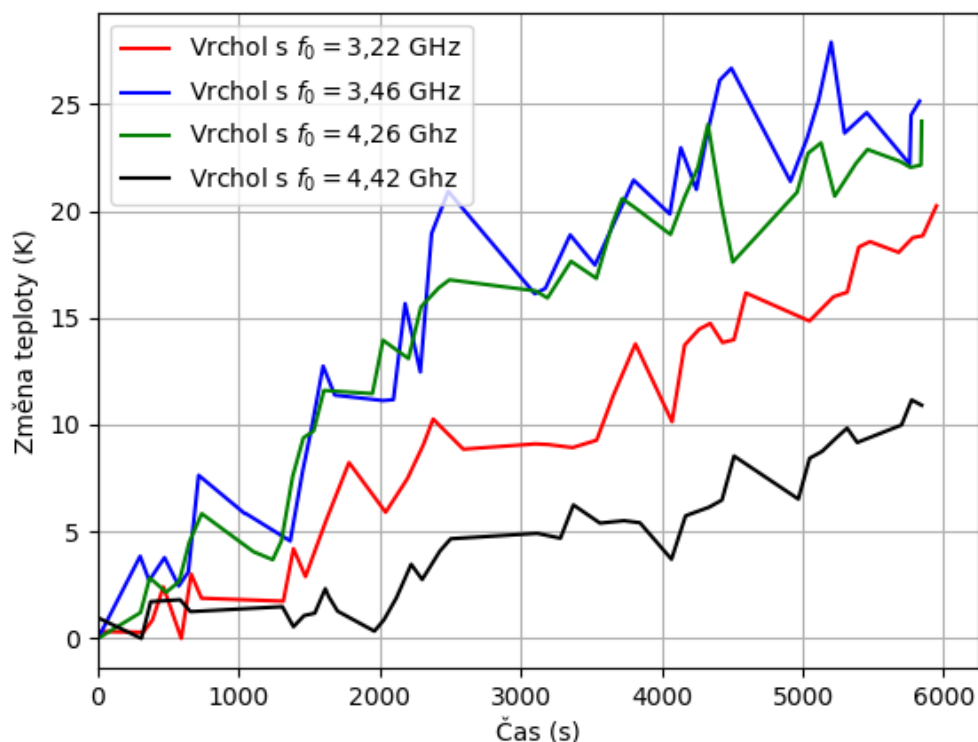
Z posunu rezonančních frekvencí je možné vypočítat změnu teploty dutiny. Pro malé změny teploty platí následující vztah lineární teplotní roztažnosti

$$l = l_0 (1 + \alpha \Delta T), \quad (3.1)$$

kde l_0 je délka tělesa při teplotě T_0 , l je délka tělesa při teplotě $T_0 + \Delta T$ a α je koeficient teplotní délkové roztažnosti [4]. Dosazením tohoto vztahu do (1.2) a (1.1) za poloměr a délku dostaneme dva stejné vztahy

$$\Delta T = \frac{1}{\alpha} \frac{f(T_0) - f(T_0 + \Delta T)}{f(T_0 + \Delta T)}, \quad (3.2)$$

kde $f(T_0)$ je rezonanční frekvence při teplotě T_0 a $f(T_0 + \Delta T)$ je rezonanční frekvence při teplotě $T_0 + \Delta T$. K výpočtu změny teploty tedy není nutné znát TE/TM konfiguraci módu nebo parametry n, m, l . Přesný koeficient teplotní délkové roztažnosti rezonanční dutiny není známý. Dutina je vyrobena z neznámého typu nerezové oceli. Byl tedy předpokládán typ ČSN 17 240, AISI 304. Dosazením koeficientu podle [7] a naměřených dat (viz obr. 3.3) do vztahu (3.2) lze získat časový vývoj teploty dutiny viz obr. 3.4.



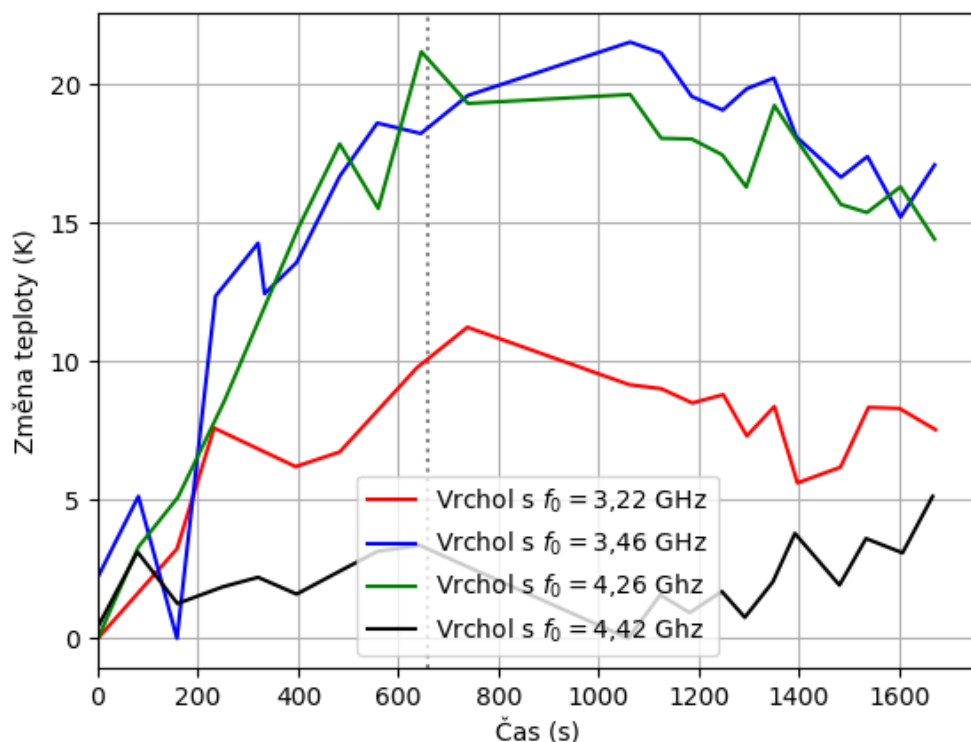
Obrázek 3.4: Teplota dutiny v závislosti na čase vypočtená z dat viz. 3.3 použitím vztahu (3.2). Počáteční frekvence rezonančních vrcholů použitých k výpočtu: 3,22 GHz, 3,46 GHz, 4,27 GHz, 4,45 GHz.

Pro lepší porozumění tohoto jevu bylo provedeno další měření. Generátorem bylo v dutině vytvářeno plazma s dobou trvání 30 s a výkonem 70 W, následované měřeními rezonančních frekvencí vrcholů. Po jedenácti opakováních byly rezonanční frekvence měřeny průběžně po dobu 15 minut. Použitím vztahu (3.2) a stejné hodnoty koeficientu teplotní délkové roztažnosti byl získán graf na obr. 3.5.

3.1.2 Zpracování dat

K přesnému určení výchozí polohy vybraných vrcholů bylo využito prokládání křivkou (fitování). K tomuto účelu byl použit programovací jazyk Python a knihovny NumPy a SciPy. Fitování mohlo být použito přímo na uložená data bez úpravy rozmezí díky tomu, že rozmezí bylo snadné nastavit na spektrálním analyzátoru již při ukládání dat.

Zpracování dat vrcholů v plazmatu bylo složitější. Rozsáhlé naměřené rozmezí frekvencí znamenalo, že uložené spektrum obsahovalo nejen samotný rezonanční vrchol, ale i nežádoucí data kolem něj. Velký počet naměřených dat znamenalo, že bylo nutné vytvořit skript omezující oblast fitování. Toho bylo docíleno nalezením argumentu maximální hodnoty v grafu, která vždy ležela na rezonančním vrcholu, a



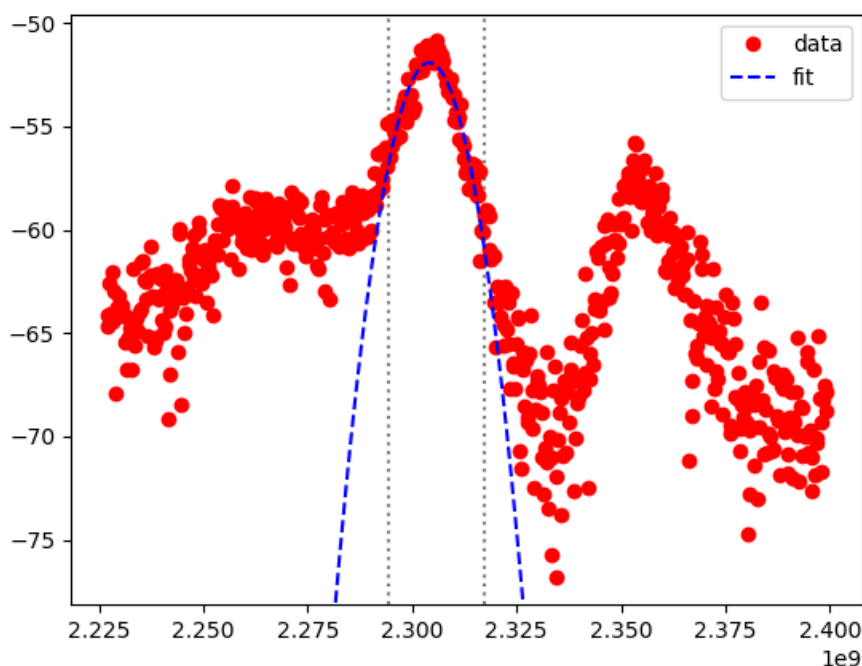
Obrázek 3.5: Teplota dutiny v závislosti na čase při kontrolovaném ohřevu. Počáteční frekvence rezonančních vrcholů použitých k výpočtu: 3,22 GHz, 3,46 GHz, 4,27 GHz, 4,45 GHz. Ohřev přestal 660 s po začátku měření.

omezením rozmezí fitování vpravo a vlevo od ní o pozorovanou šířku vrcholu. Příklad je na obr. 3.6. Každý soubor spektra obsahuje přesný čas měření, který byl použit k přiřazení naměřené hodnoty ke tlaku v okamžiku měření.

3.2 II. fáze

3.2.1 Původní antény

V jednom z úkolů v zadání této práce je pokus o přiřazení změřených módů teoreticky vypočítaným. Na obr. 3.8 je změřené spektrum uvnitř dutiny s vyznačenými vypočítanými módy. Na první pohled je vidět, že jen málo rezonančních módů je v blízkosti vypočítaných a není jasné, zda se skutečně jedná o stejné módy nebo zda se jedná jiný jev. Dutina byla zkonstruována a antény umístěny tak, aby byl generován především mód TM_{020} . Na pozici tohoto módu se však nenachází žádný významný vrchol. Nejnižším TM módem je TM_{010} , má jednoduché EM pole a mělo by tedy být snadné ho generovat. Tento mód se při měření objevoval a mizel náhodně. Při měření elektronové hustoty bylo pozorováno, že po vyhasnutí plazmatu se tento mód občas na několik sekund ve spektru objevil. Tento jev nebylo možné



Obrázek 3.6: Příklad fitování pro určení polohy vrcholu. Tečkované čáry označují interval fitování.

spolehlivě zopakovat.

Odmontováním vakuové komory byla umožněna bližší práce s rezonantní dutinou. Na fotografii na obr. 3.7 je vnitřek dutiny a pozice antén. Antény jsou ve vzdálenosti přibližně 1 cm od stěny a nasměrovány tak, aby směr vytvářeného a měřeného magnetického pole byl azimutální. Antény by měly být umístěny v bodě maximálního azimutálního magnetického pole módu. Nahlédnutím na obr. 1.1 a na vztahy pro elektromagnetické pole uvnitř dutiny (1.4) je vidět, že antény nejsou umístěny v bodě globálního maxima pro žádný z vykreslených módů.

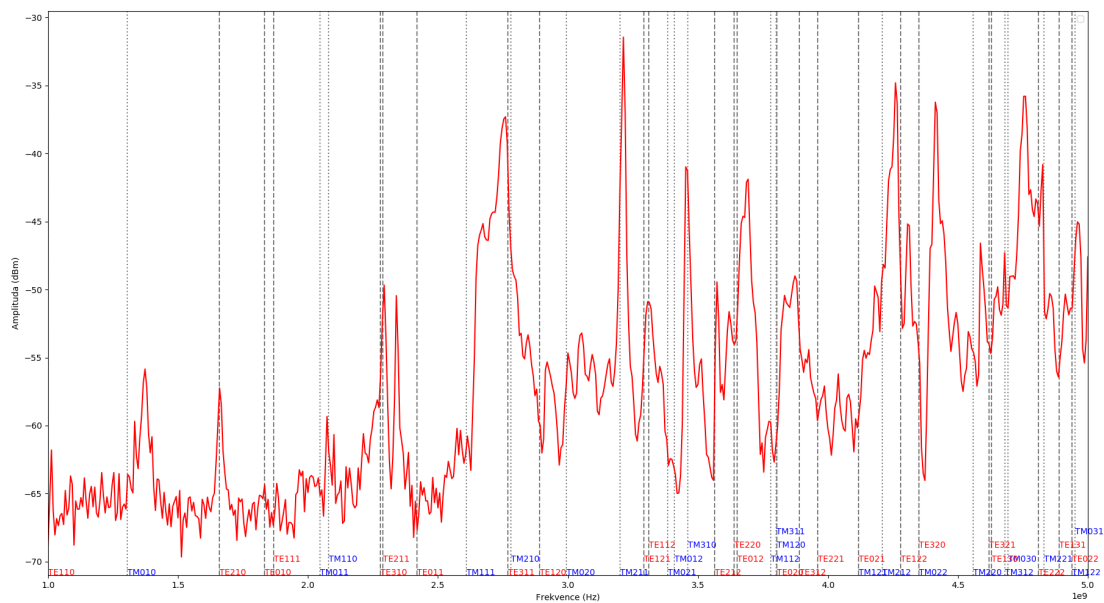
Jeden z prvních pokusů o vysvětlení chaotického spektra však byl zachytávání vnějších mikrovlnných signálů. Na fotografii na obr. 2.3 lze vidět otvory, které se nacházejí v horní podstavě dutiny a slouží k čerpání vnitřního prostoru dutiny. Otvory o průměru 1,5 cm by neměly propouštět mikrovlny o měřené frekvenci 1 GHz až 5 GHz, kterým odpovídají vlnové délky 6 cm až 30 cm. Otvory se však nacházejí na kruhu o průměru přibližně 14 cm. Zakrytím otvorů hliníkovou deskou (viz fotografie na obr. 3.9) bylo možné tento nedostatek odstranit. Graf porovnávající spektrum naměřené bez a se zakrytými otvory je na obr. 3.10. Z grafu je zřejmé, že vnější mikrovlnné signály nejsou uvnitř dutiny zachytávány.

Horní podstavu, pro zjednodušení zvanou poklice, lze odmontovat. Je tedy také možné změřit spektrum otevřeného rezonátoru. Na obr. 3.13 je porovnání spektra otevřeného rezonátoru bez a s aktivním TG.

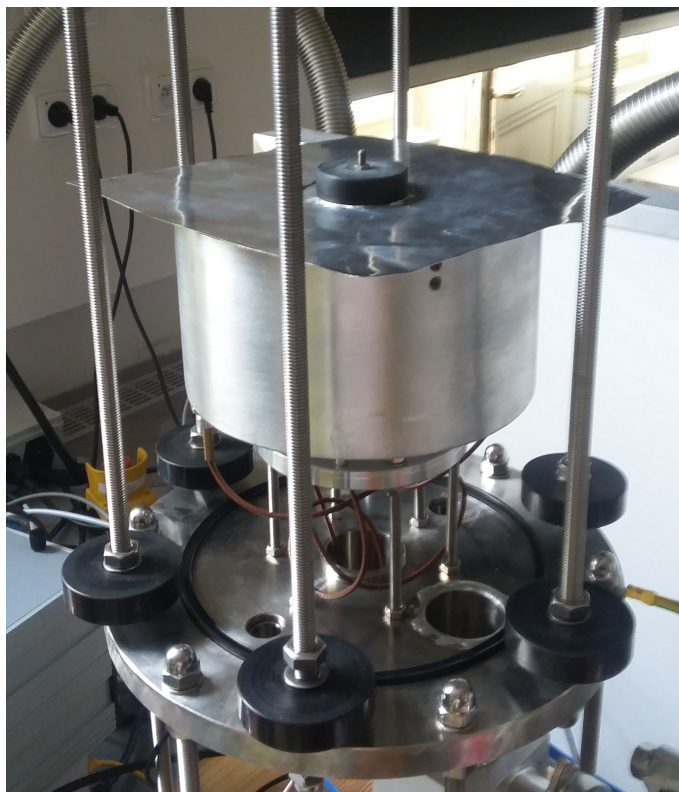
Na spodní část poklice je připevněna elektroda generátoru plazmatu. Elektroda



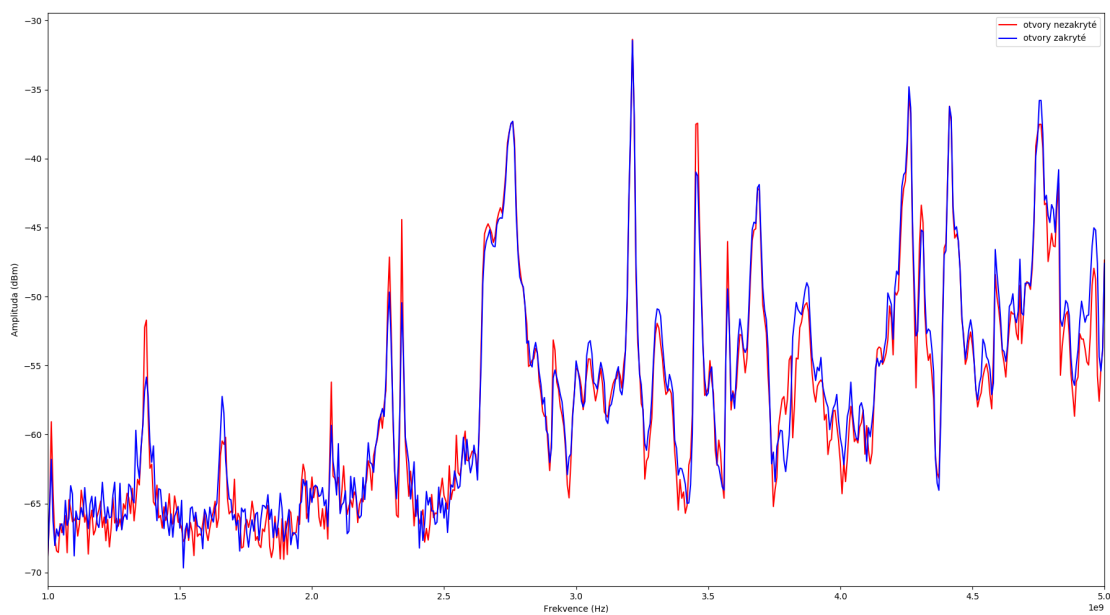
Obrázek 3.7: a) Poloha původních antén v dutině. b) Jedna z původních antén zblízka.



Obrázek 3.8: Spektrum změřené s původními anténami a poklicí s elektrodou. V grafu jsou vyznačeny teoretické rezonanční frekvence.



Obrázek 3.9: Fotografie rezonanční dutiny. Otvory v poklici jsou zakryté hliníkovou deskou.



Obrázek 3.10: Srovnání spektra změřeného se zakrytými a nezakrytými otvory v poklici.

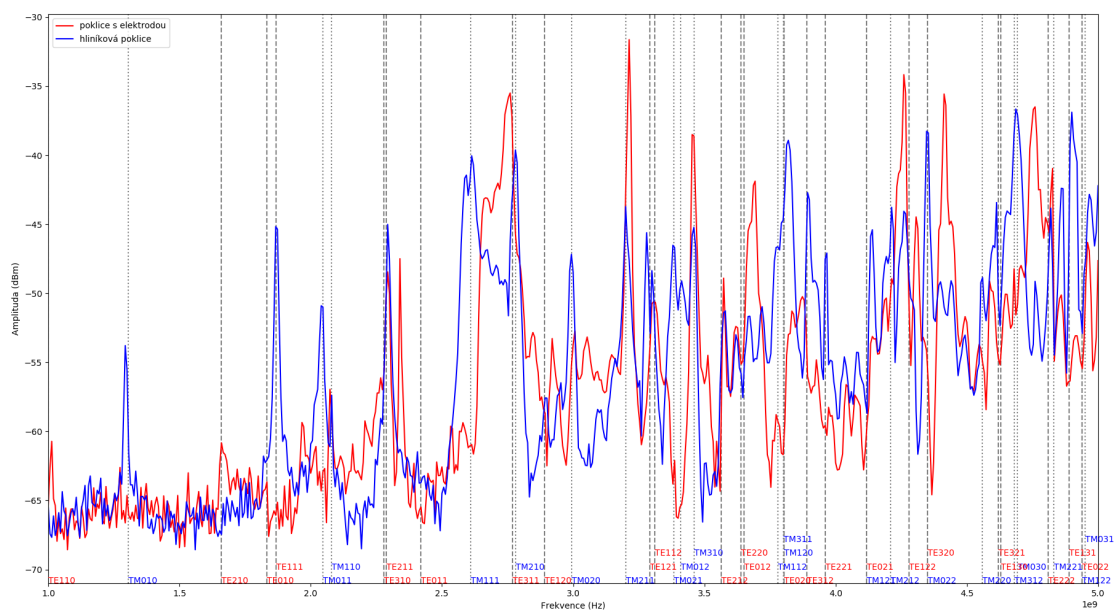


Obrázek 3.11: Rezonanční dutina s provizorní hliníkovou poklicí.

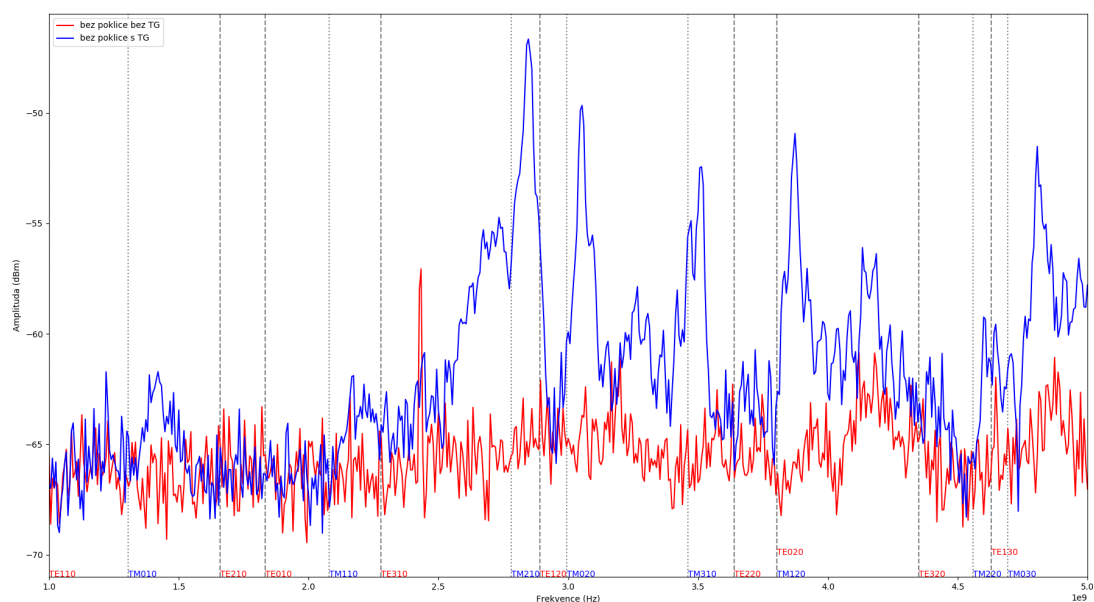
a upevňující struktura (viz obr. 2.3) mění elektromagnetické pole módů a může výrazně měnit rezonanční vlastnosti dutiny. Nahrazením původní poklice rovnou hliníkovou deskou by se rezonanční dutina měla více blížit teoretickému modelu. Dutina s novou hliníkovou poklicí je na fotografii na obr. 3.11. Porovnání spektra naměřeného s původní a s hliníkovou poklicí je na obr. 3.12.

3.2.2 Antény 5 cm

Neideální tvar původních smyčkových antén (viz obr. 3.7) byl další možnou příčinou chaotického spektra. Z tohoto důvodu byl vytvořen další pár antén (viz fotografie na obr. 3.14) s obvodem smyčky 5 cm, stejným jako původní antény. Tyto antény sloužily pouze pro testování jejich vlastností v dutině a nebyly myšleny jako náhrada původních antén. Pro jejich konstrukci tedy byl využit vakuově nekompatibilní koaxiální kabel. Spektrum bylo nejdříve změřeno pro polohu antén v blízkosti stěny, v polovině výšky dutiny, nasměrované do azimutálního směru viz obr. 3.15. Spektrum antén v této poloze je na obr. 3.16 s porovnáním obou poklic. Antény poté byly přemístěny do polohy se smyčkou uprostřed výšky dutiny, uprostřed poloměru dutiny, nasměrované do azimutálního směru viz fotografie na obr. 3.17. Spektrum této polohy s původní a hliníkovou poklicí je na obr. 3.18.



Obrázek 3.12: Porovnání spektra změřeného s poklicí s elektrodou a s hliníkovou poklicí. V grafu jsou vyznačeny teoretické rezonanční frekvence.



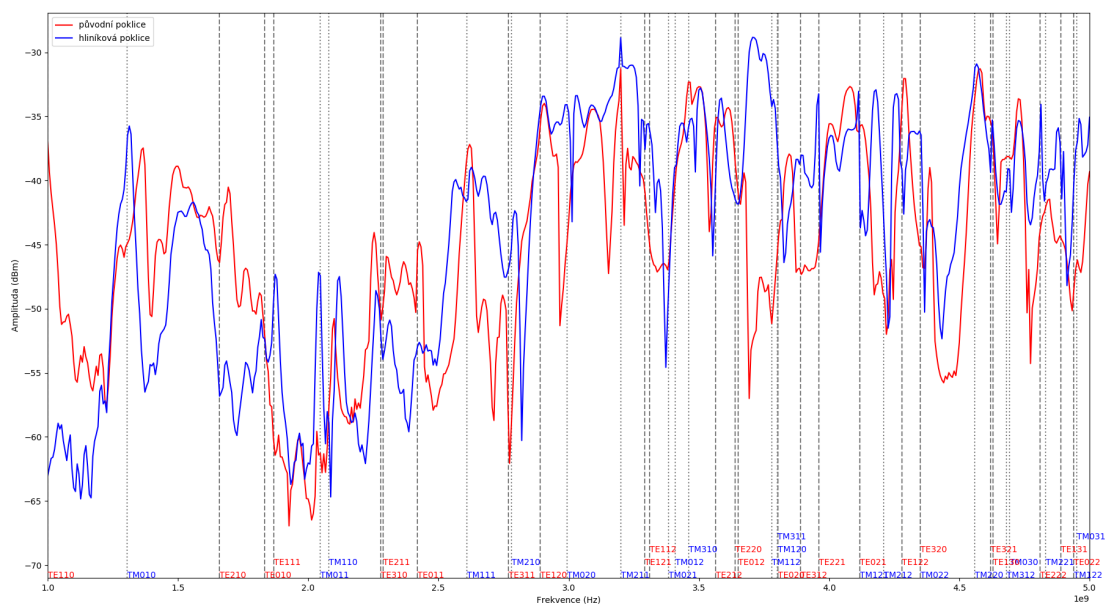
Obrázek 3.13: Porovnání spektra otevřeného rezonátoru (bez horní poklice) bez a s aktivním TG. V grafu jsou vyznačeny teoretické rezonanční frekvence.



Obrázek 3.14: Nové antény s obvodem smyčky 5 cm.



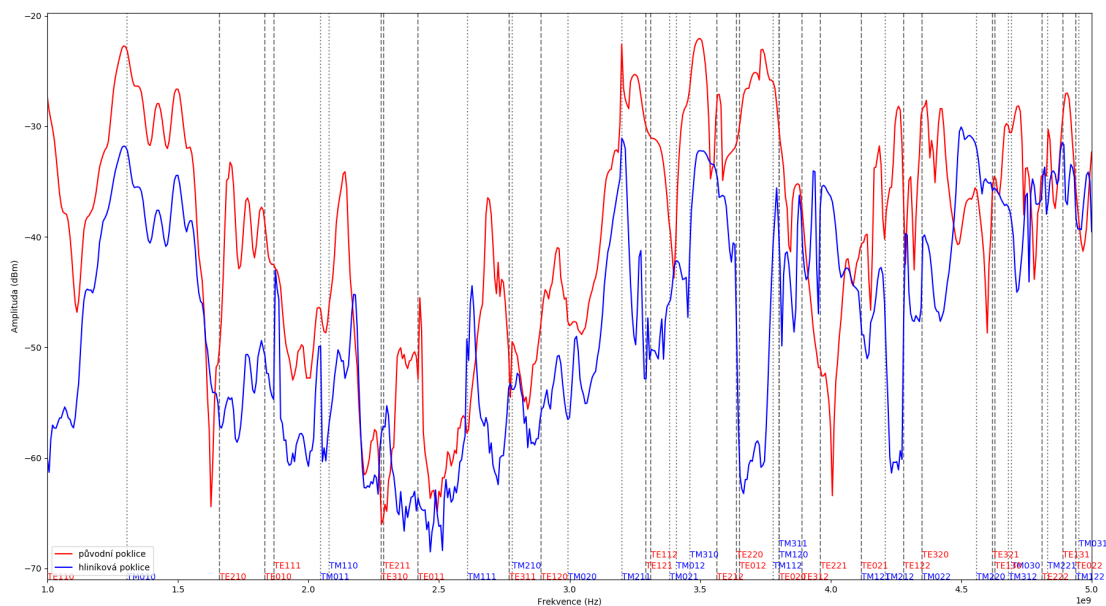
Obrázek 3.15: Poloha nových 5 cm antén: uprostřed výšky, v blízkosti stěny dutiny. Antény natočeny tak, aby vytvářené/detekované magnetické pole bylo v dutině azimutální.



Obrázek 3.16: Porovnání spekter s poklicí s elektrodou a s hliníkovou poklicí. Antény s obvodem smyčky 5 cm v poloze: uprostřed výšky, v blízkosti stěny dutiny, nasměrované do azimutálního směru viz obr. 3.15. V grafu jsou vyznačeny teoretické rezonanční frekvence.



Obrázek 3.17: Poloha nových 5 cm antén: uprostřed výšky, uprostřed poloměru dutiny. Antény natočeny tak, aby vytvářené/detekované magnetické pole bylo v dutině azimutální.



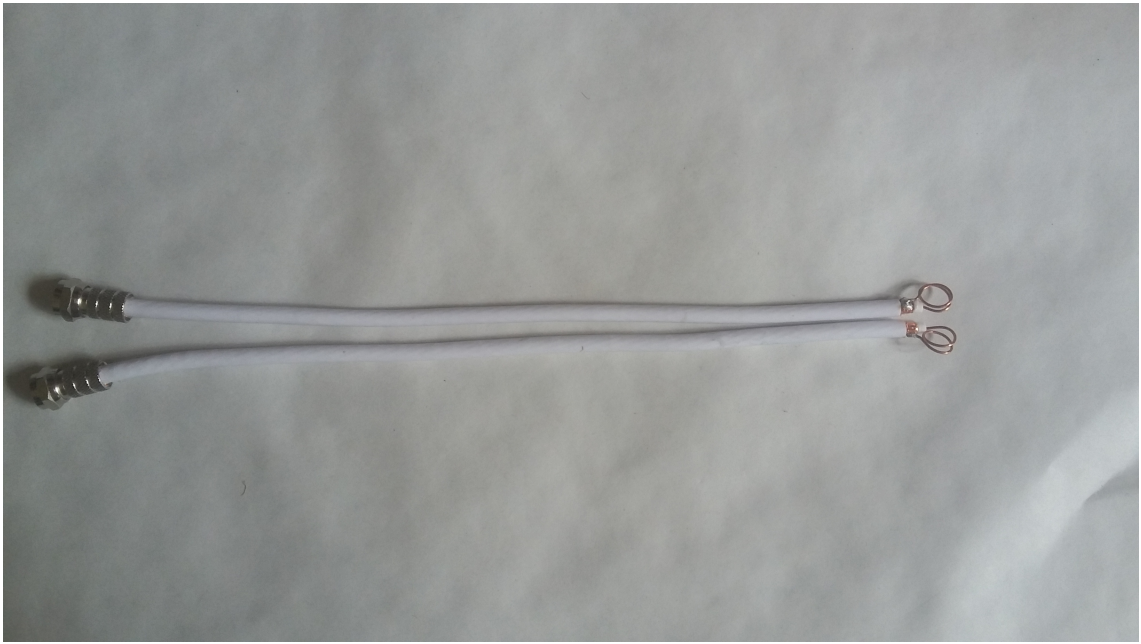
Obrázek 3.18: Porovnání spekter s poklicí s elektrodou a s hliníkovou poklicí. Antény s obvodem smyčky 5 cm v poloze: uprostřed výšky, uprostřed poloměru dutiny, nasměrované do azimutálního směru viz obr. 3.17. V grafu jsou vyznačeny teoretické rezonanční frekvence.

3.2.3 Antény 2,5 cm a 2,875 cm

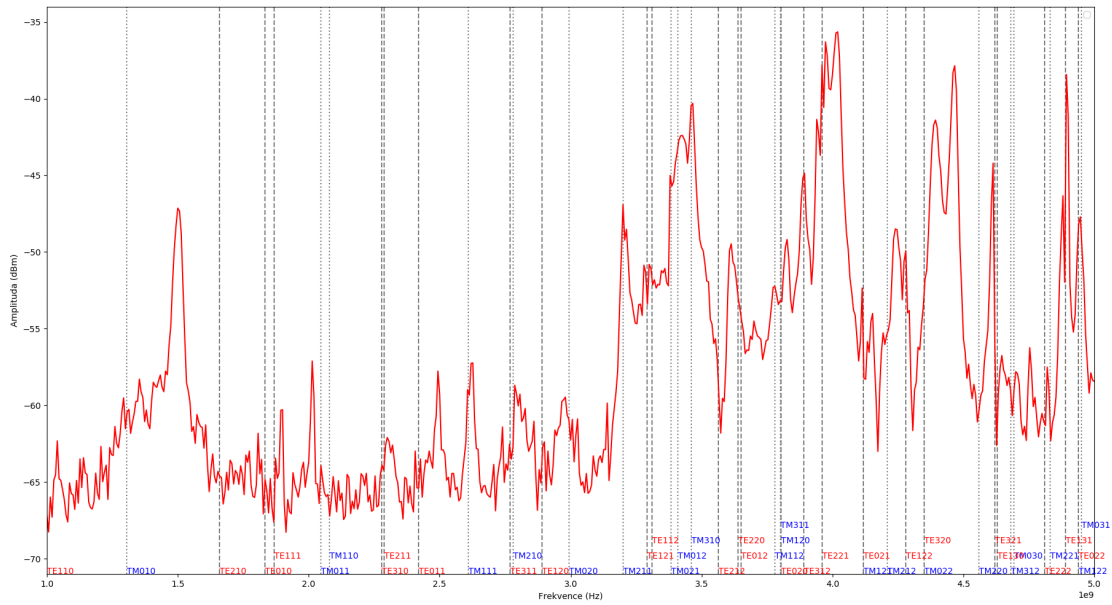
Další myšlenkou bylo, že zdroj elektromagnetického pole vytvářeného anténou nelze považovat za bodový díky velkému průměru v porovnání s dutinou a vytvářené resp. detekované spektrum tedy není podle očekávání. Byl tedy vytvořen pár antén s polovičním obvodem oproti ostatním 2,5 cm z 5 cm dlouhého drátu dvěma závitů viz obr. 3.19. Antény byly umístěny přibližně do třetiny výšky dutiny, doprostřed poloměru dutiny a nasměrovány do azimutálního směru. Změřené spektrum s hliníkovou poklicí je na obr. 3.20. Ve spektru je viditelný významný vrchol s frekvencí 1,5 GHz. V této oblasti se nenachází žádný teoreticky vypočítaný mód, této frekvenci však odpovídá vlnová délka 20 cm, která je přesně čtyřnásobkem délky drátu antény. Není jisté zda se jedná o náhodu, byl tedy vyroben pár antén z drátu dlouhého 5,75 cm viz obr. 3.21, čtyřnásobkem je 23 cm což odpovídá frekvenci 1,3 GHz, tedy frekvenci módu TM_{010} . Spektrum s anténami ve stejné poloze je na obr. 3.22.

3.2.4 Antény 1 cm

Dále byly vytvořeny antény s co nejmenším obvodem. Z koaxiálního kabelu bylo možné vytvořit antény s obvodem 1 cm. Spektrum bylo změřeno v sedmi různých polohách antén. Na obr. 3.23-3.29 jsou různé polohy antén a spektrum změřené s původní poklicí, s hliníkovou poklicí a bez poklice.



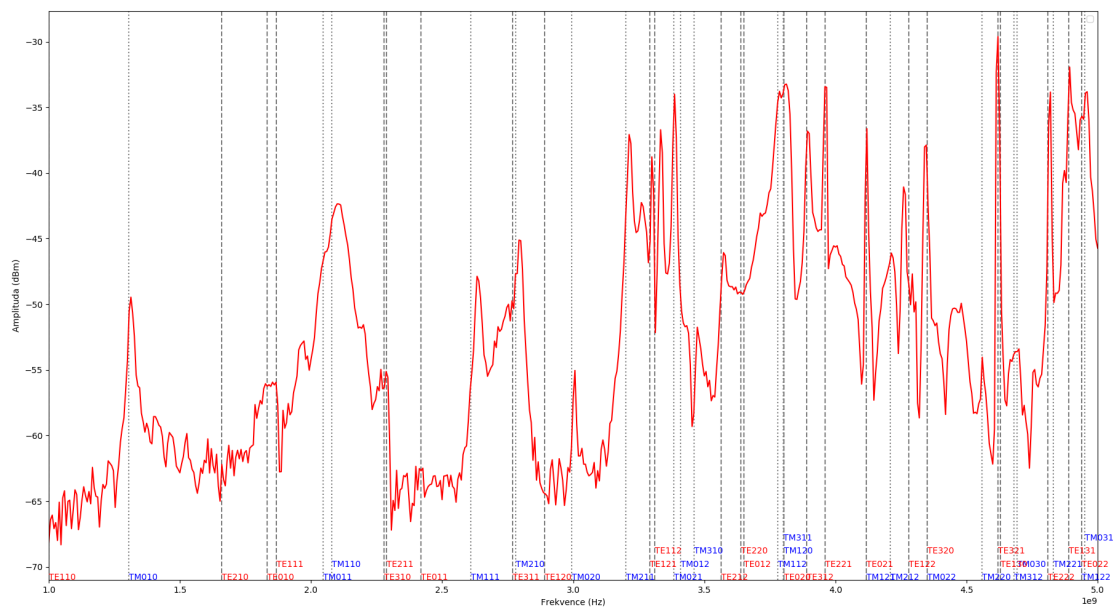
Obrázek 3.19: Nové antény s obvodem smyčky 2,5 cm.



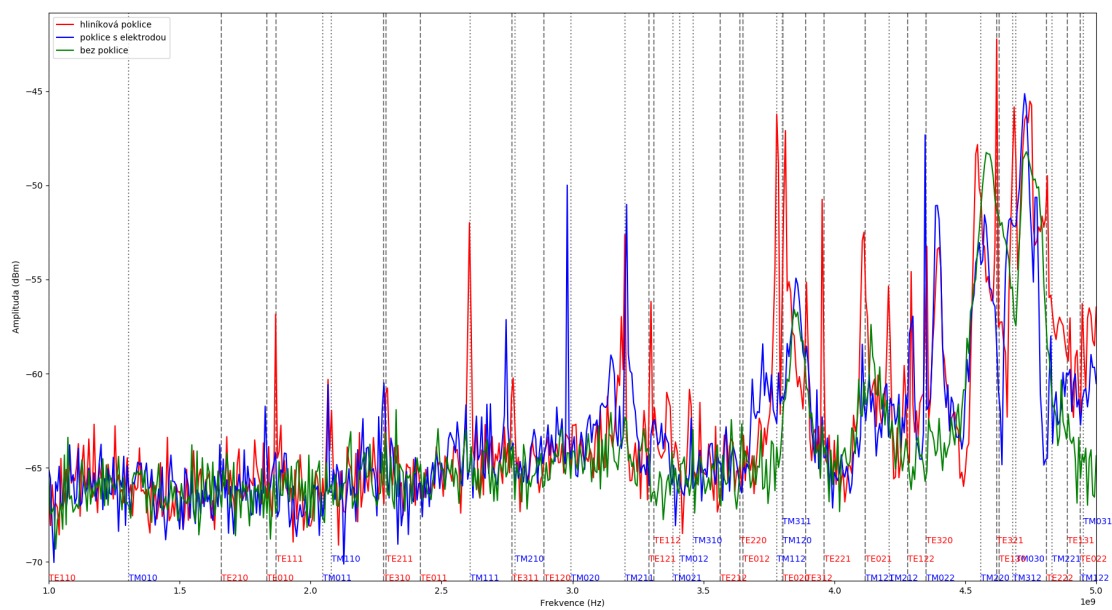
Obrázek 3.20: Spektrum s hliníkovou poklicí a 2,5 cm anténou v poloze: ve třetině výšky, uprostřed poloměru dutiny, nasměrované do azimutálního směru. V grafu jsou vyznačeny teoretické rezonanční frekvence.



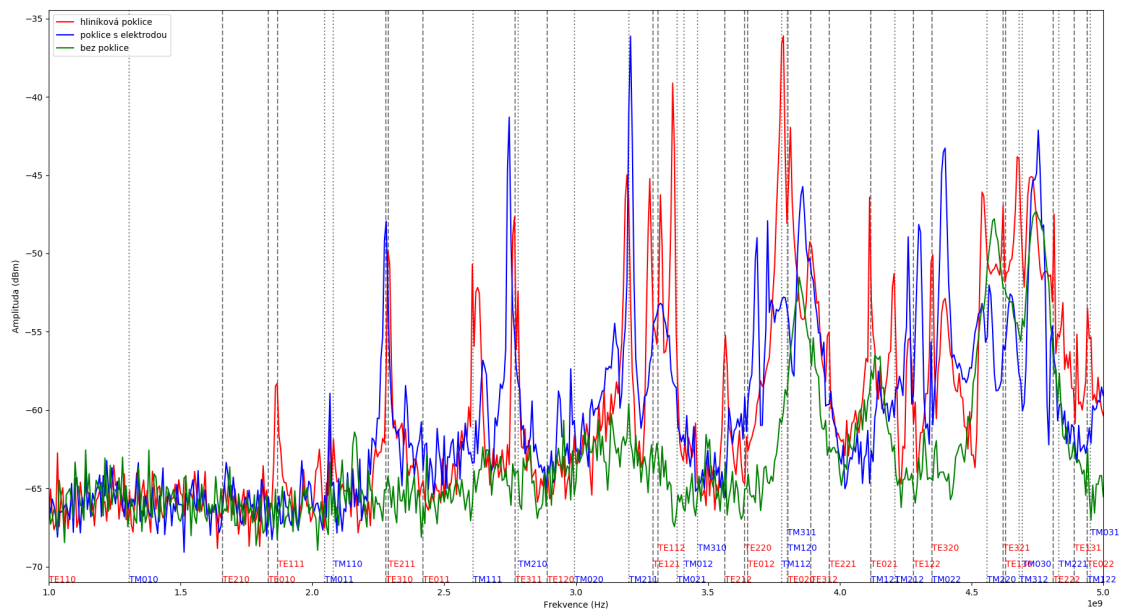
Obrázek 3.21: Antény s obvodem smyčky 2,5 cm.



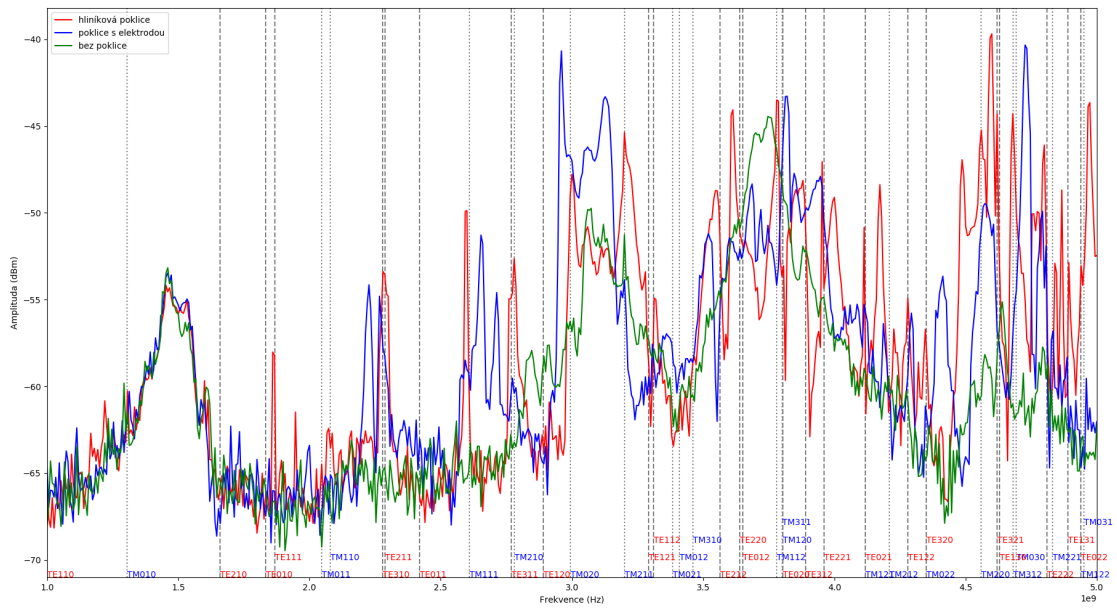
Obrázek 3.22: Spektrum s hliníkovou poklicí a 2,875 cm anténou v poloze: ve třetině výšky, uprostřed poloměru dutiny, nasměrované do azimutálního směru. V grafu jsou vyznačeny teoretické rezonanční frekvence.



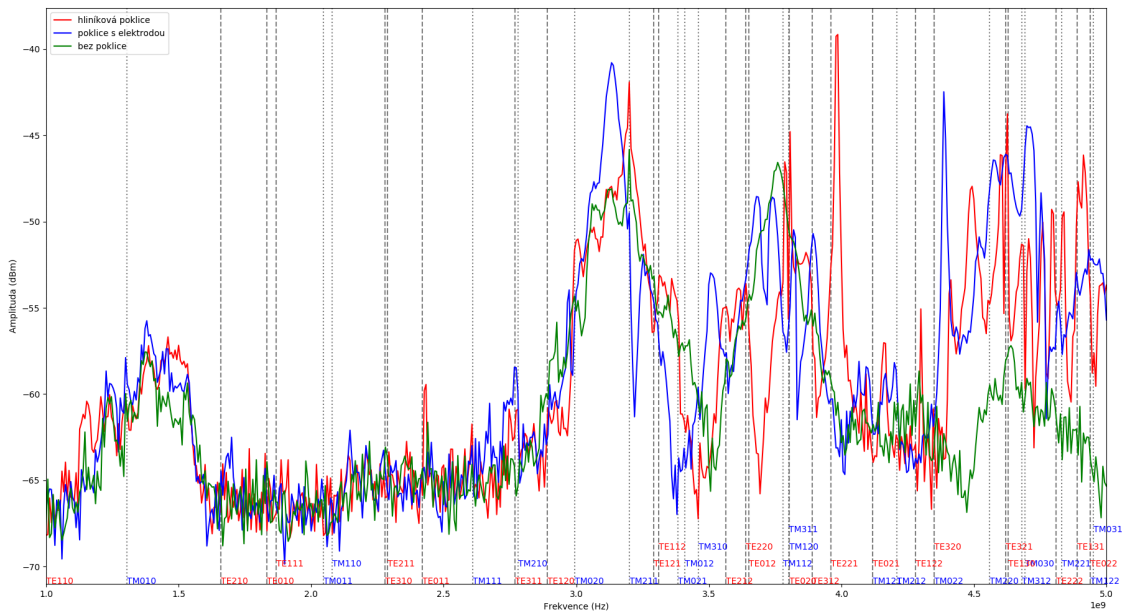
Obrázek 3.23: a) Poloha antén s obvodem smyčky 1 cm v poloze: v blízkosti stěny, v blízkosti dolní podstavy dutiny, nasměrovány do radiálního směru. b) Porovnání spekter změřených s touto polohou antén a s poklicemi: původní poklice s elektrodou, hliníková poklice, bez poklice. V grafu jsou vyznačeny teoretické rezonanční frekvence.



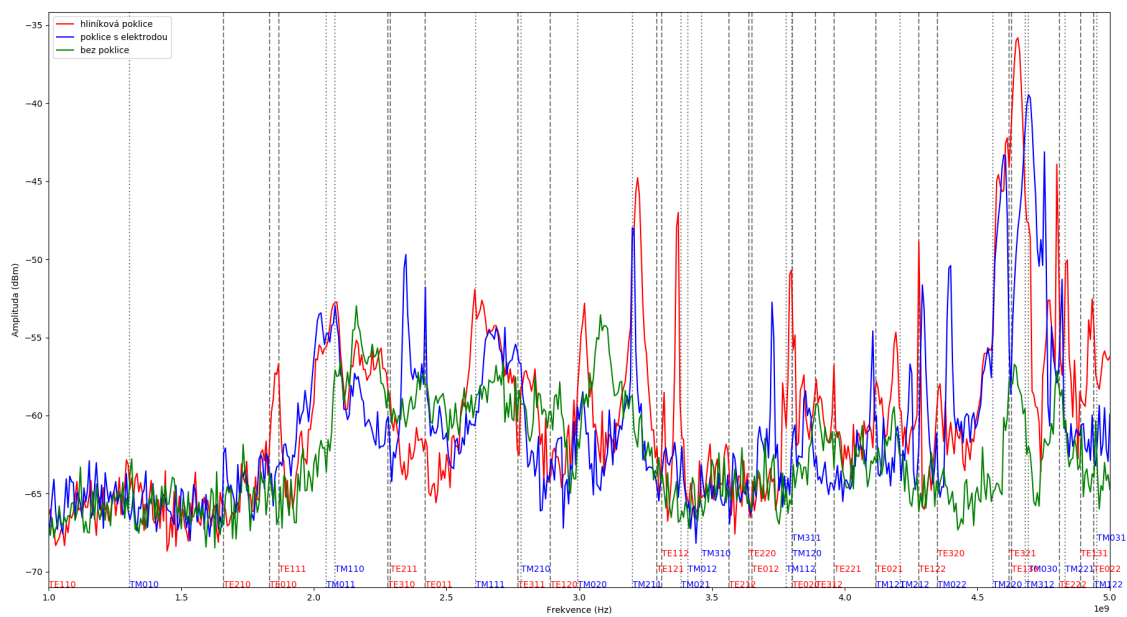
Obrázek 3.24: a) Poloha antén s obvodem smyčky 1 cm v poloze: v blízkosti stěny, v blízkosti dolní podstavy dutiny, nasměrovány do azimutálního směru. b) Porovnání spekter změřených s touto polohou antén a s poklicemi: původní poklice s elektrodou, hliníková poklice, bez poklice. V grafu jsou vyznačeny teoretické rezonanční frekvence.



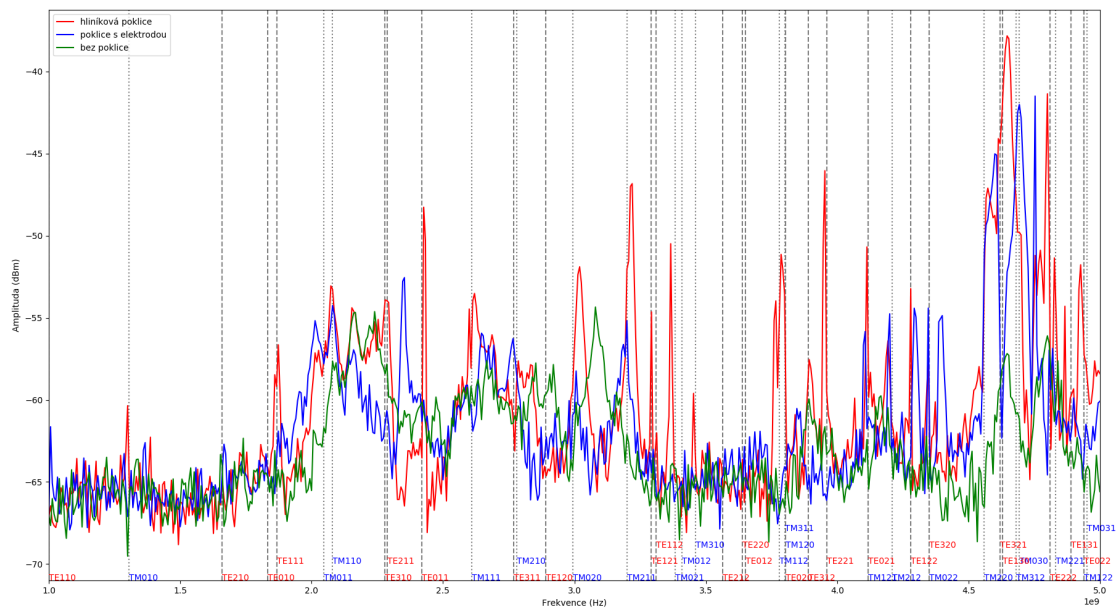
Obrázek 3.25: a) Poloha antén s obvodem smyčky 1 cm v poloze: v polovině poloměru, v polovině výšky dutiny, nasměrovány do radiálního směru. b) Porovnání spekter změřených s touto polohou antén a s poklicemi: původní poklice s elektrodou, hliníková poklice, bez poklice. V grafu jsou vyznačeny teoretické rezonanční frekvence.



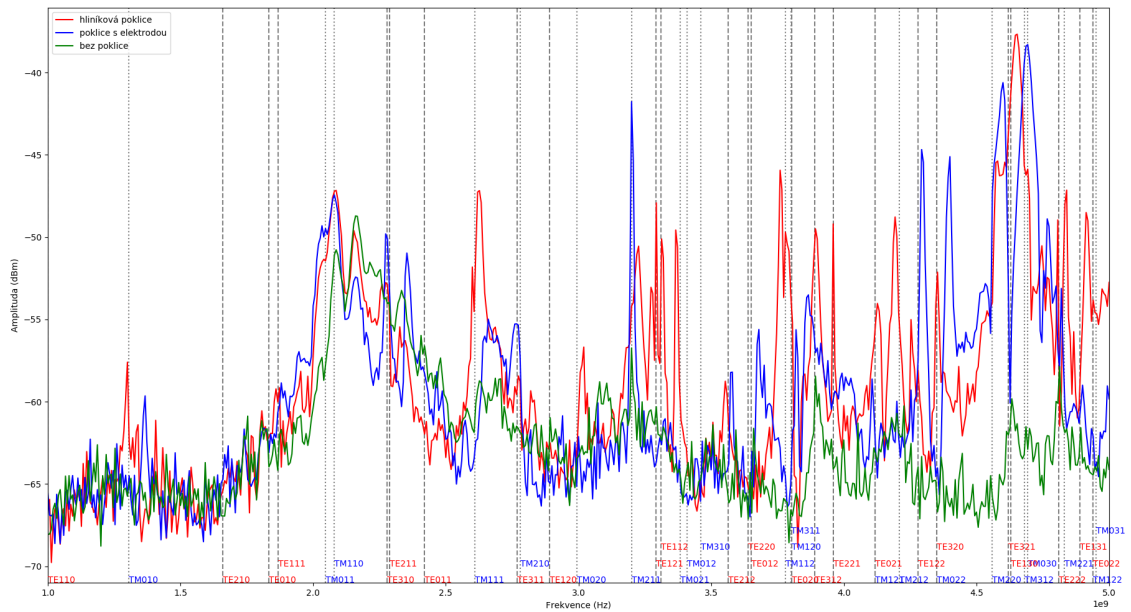
Obrázek 3.26: a) Poloha antén s obvodem smyčky 1 cm v poloze: v polovině polo-
měru, v polovině výšky dutiny, nasměrovány do azimutálního směru. b) Porovnání
spekter změřených s touto polohou antén a s poklicemi: původní poklice s elektro-
dou, hliniková poklice, bez poklice. V grafu jsou vyznačeny teoretické rezonanční
frekvence.



Obrázek 3.27: a) Poloha antén s obvodem smyčky 1 cm v poloze: v polovině polo-
měru, v polovině výšky dutiny, nasměrovány do směru mezi radiálním a azimutálním.
b) Porovnání spekter změřených s touto polohou antén a s poklicemi: původní pok-
lice s elektrodou, hliníková poklice, bez poklice. V grafu jsou vyznačeny teoretické
rezonanční frekvence.



Obrázek 3.28: a) Poloha antén s obvodem smyčky 1 cm v poloze: v blízkosti stěny, přibližně v polovině výšky dutiny, nasměrovány do radiálního směru. b) Porovnání spekter změřených s touto polohou antén a s poklicemi: původní poklice s elektrodou, hliníková poklice, bez poklice. V grafu jsou vyznačeny teoretické rezonanční frekvence.



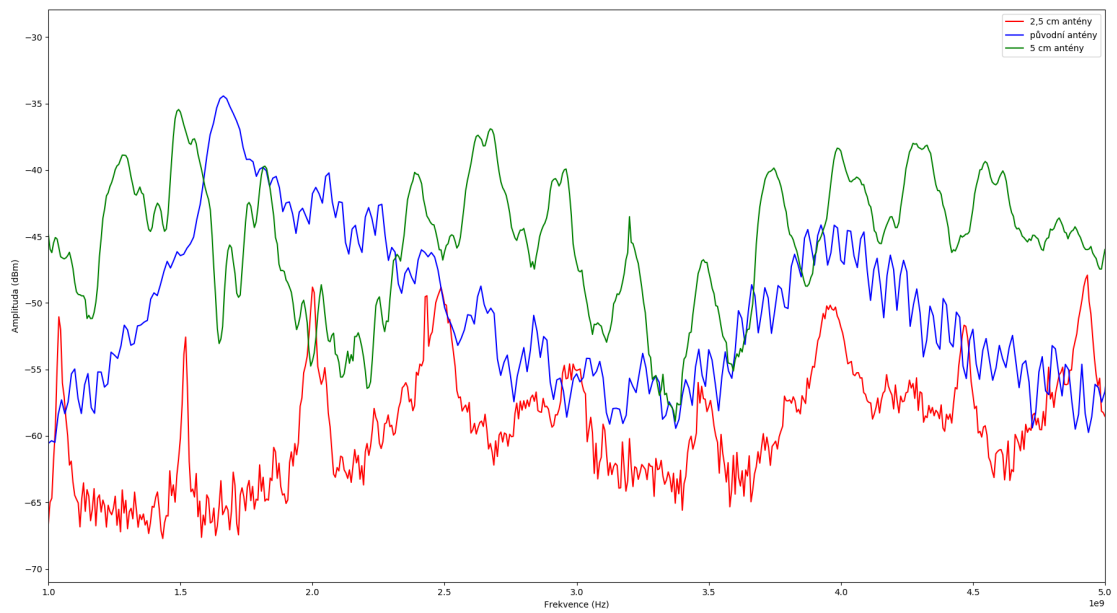
Obrázek 3.29: a) Poloha antén s obvodem smyčky 1 cm v poloze: v blízkosti stěny, přibližně v polovině výšky dutiny, nasměrovány do azimutálního směru. b) Porovnání spekter změřených s touto polohou antén a s poklicemi: původní poklice s elektrodou, hliníková poklice, bez poklice. V grafu jsou vyznačeny teoretické rezonanční frekvence.

3.3 III. fáze

Třetí fáze proběhla za pomoci prof. Horácia Fernandese. Experimenty s anténami ukázaly, že koaxiální kabel propojující spektrální analyzátor s anténou je nutné považovat za vedení. Různá impedance analyzátoru a kabelu s anténou znamená odraz signálu a vytvoření stojatého vlnění uvnitř kabelu. Přenesený výkon tedy závisí na frekvenci signálu. Toto chování je možné ukázat změřením spektra pro antény vyndané z rezonátoru. Na obr. 3.30 je toto spektrum pro některé antény. Impedanční přizpůsobení, a tedy maximalizování přenášeného výkonu, by bylo možné zapojením pahýlu, toto zařízení však nebylo k dispozici. Další možností bylo zkracování kabelu a porovnávání přeneseného výkonu. Každé zkrácení kabelu by samozřejmě vždy vyžadovalo vytvoření nových antén. Tento postup byl využit k maximalizaci přeneseného výkonu pro frekvenci módu TM_{010} , tedy 1,3 GHz. Nové antény, o obvodu 2 cm, byly umístěny tak, aby generovali především mód TM_{010} tedy do poloviny výšky dutiny, 2 cm od stěny, natočené do azimutálního směru. Po uzavření komory a jejím vyčerpání byl na spektrálním analyzátoru pozorován výrazný pokles výkonu pro mód TM_{010} . Po opětovném otevření vakuové komory bylo pozorováno, že jeden z kabelů, ohnutý tak, aby anténa byla umístěna ve správné pozici, se posunul. Aby bylo možné antény umístit do správné pozice bez ohýbaní kabelu, bylo nutné do spodní podstavy vyvrtat nové otvory. Na obr. 3.31 je změřené spektrum.

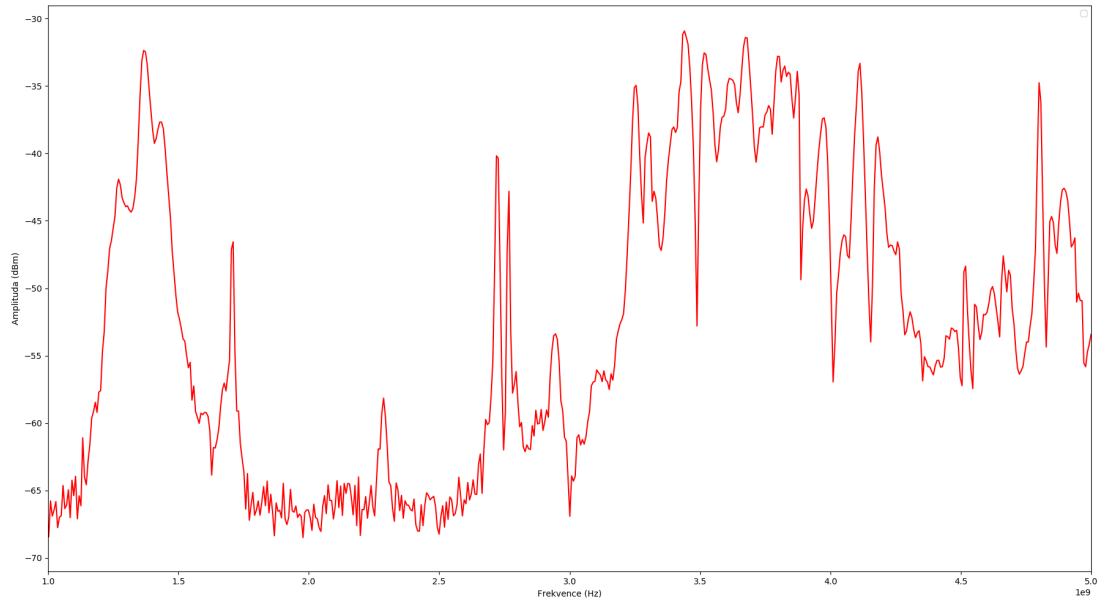
Dalším diskutovaným tématem byla možná nehomogenita vytvářeného plazmatu. Generátor vytváří elektrické pole o frekvenci 13,56 MHz mezi diskovou elektrodou v horní části dutiny a samotnou dutinou. Kvůli velkému průměru disku elektrody nebylo možné horními otvory sledovat celý vnitřek dutiny. Je tedy možné, že plazma bylo vytvářeno především v horní části dutiny, blízko elektrody. Byla tedy vytvořena nová elektroda tvaru disku o průměru 6,1 cm, která by měla umožnit sledovat dění uvnitř dutiny. Menší vzdálenost mezi okraji elektrody a stěnami dutiny by měla znamenat více homogenní vytváření plazmatu. Fotografie elektrody upevněné k poklici je na obr. 3.32.

Po opětovném uzavření a vyčerpání komory byla provedena dvě testovací měření elektronové hustoty v dusíku resp. v neonu použitím módu TM_{010} , jejich grafy jsou na obr. 3.33 resp. 3.34. Dále byly vzneseny obavy z kontaminace vstříkovaného plynu. Plyn je do komory vpouštěn z trubice společné pro více plynů. Otevřením ventilu mezi plynem a společnou trubicí je trubice naplněna zvoleným plynem. V trubici se však může nacházet plyn z předchozího měření a kontaminovat tak používaný plyn. Přestože v I. fázi měření byl zbylý plyn vpuštěn do komory před jejím čerpáním, malé množství mohlo v trubici zůstat. Možným řešením by bylo plné otevření ventilu mezi komorou a trubicí a jejich důkladné vyčerpání. Trubice a konektory však nejsou vytvořeny tak, aby vydrželi vakuum a v nízkém tlaku by mohli vytvořit dočasnou netěsnost. Lepší řešení se však nevyskytlo, trubice byla vyčerpána a následovně rychle naplněna argonem o tlaku vyšším než atmosférickém. Netěsnosti by tedy měly umožňovat plynu unikat ven, raději než dovnitř. V argonu byla provedena dvě další měření elektronové hustoty, jejich grafy jsou na obr. 3.35 a 3.36. Díky novým otvorům a menší elektrodě nezakrývající pohled dovnitř dutiny bylo možné

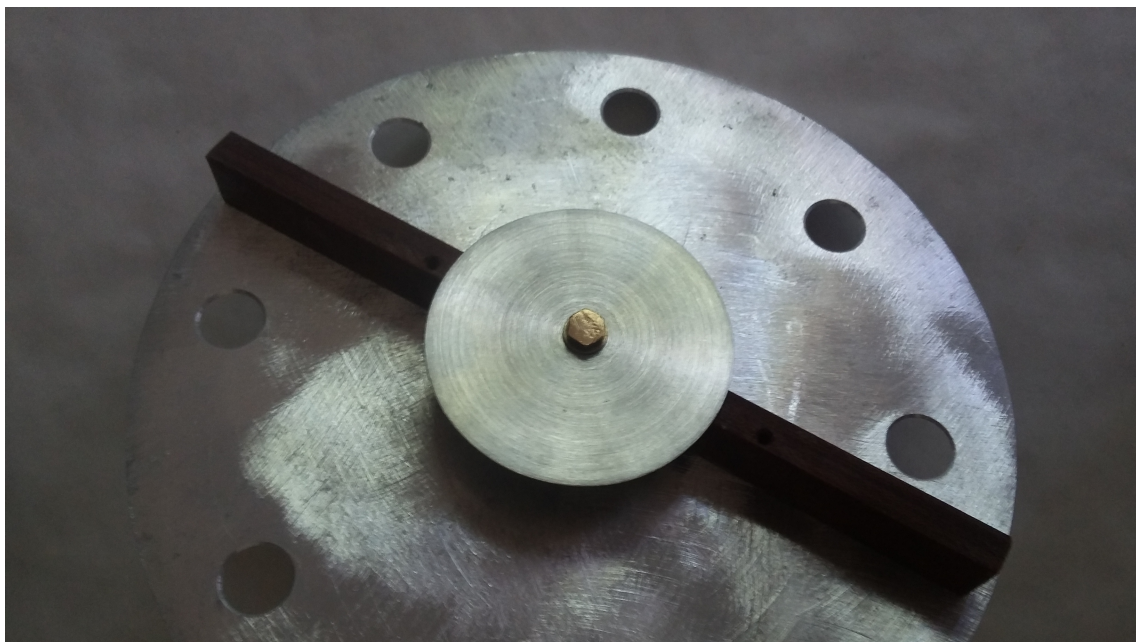


Obrázek 3.30: Spektrum některých antén mimo rezonátor.

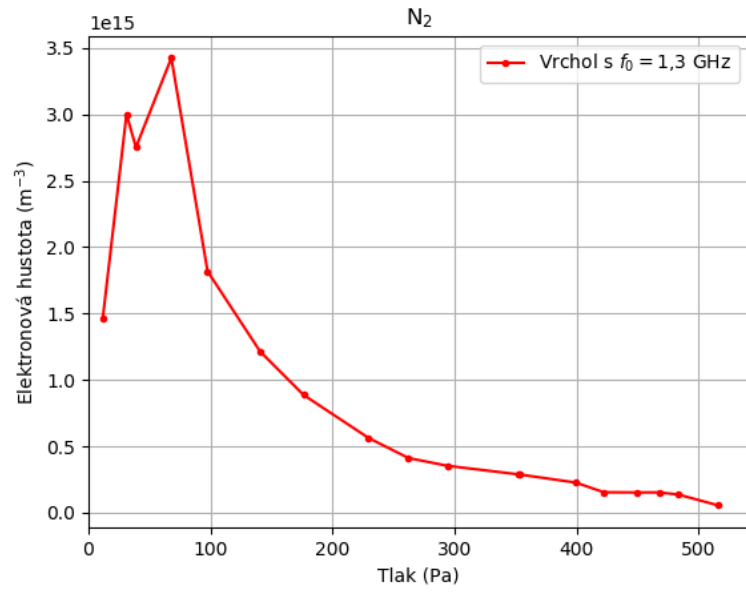
pozorovat, že plazma je skutečně nehomogenní pro tlak vyšší než přibližně 200 Pa. Pro nižší tlak se plazma dostatečně rozšíří po dutině díky difuzi.



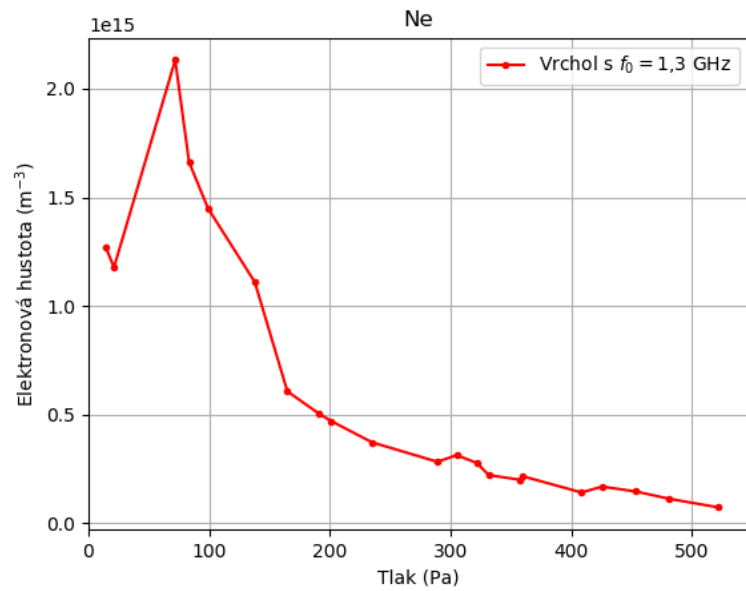
Obrázek 3.31: Spektrum změřené finálními anténami, s poklicí s novou elektrodou.



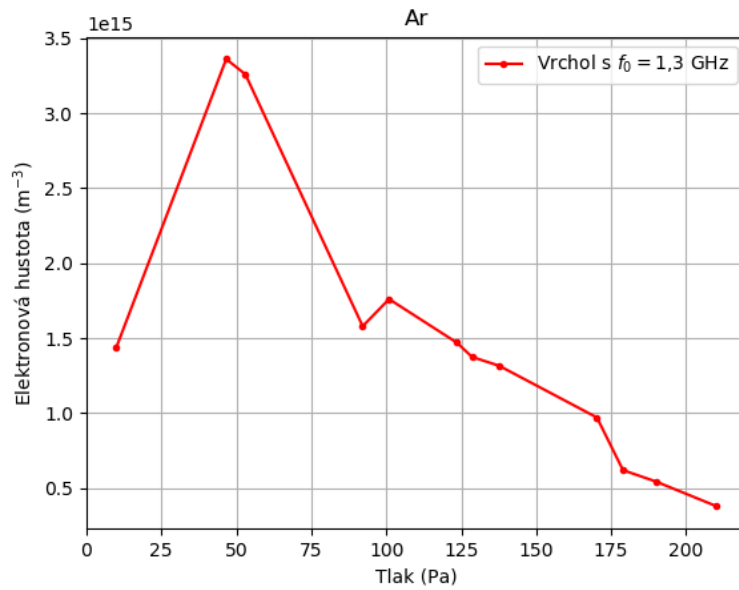
Obrázek 3.32: Nová elektroda upevněná na poklici.



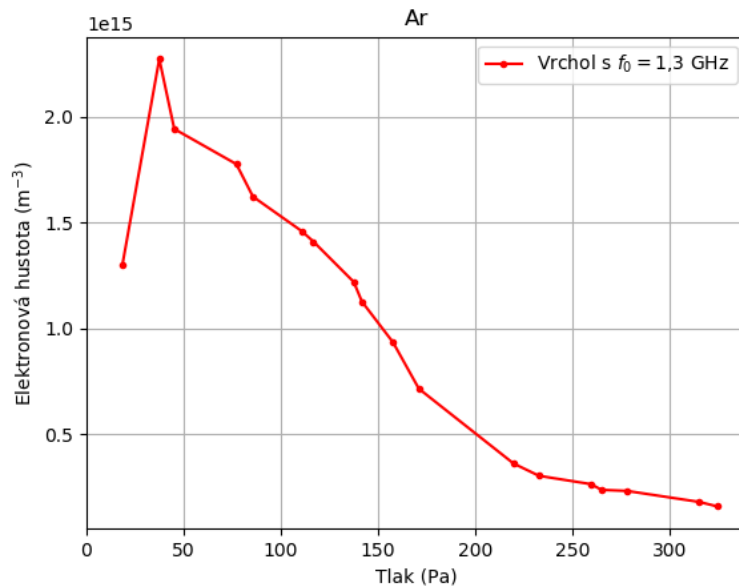
Obrázek 3.33: Elektronová hustota plazmatu jako funkce tlaku při měření s finálními anténami a novou elektrodou v dusíku.



Obrázek 3.34: Elektronová hustota plazmatu jako funkce tlaku při měření s finálními anténami a novou elektrodou v neonu.



Obrázek 3.35: Elektronová hustota plazmatu jako funkce tlaku při měření s finálními anténami a novou elektrodou. První měření po vyčerpání trubice přívodu plynu společné pro více plynů a naplnění čistým argonem. Od 200 Pa bylo plazma viditelně nehomogenní, měření tedy bylo zastaveno.



Obrázek 3.36: Elektronová hustota plazmatu jako funkce tlaku při měření s finálními anténami a novou elektrodou. Druhé měření po vyčerpání trubice přívodu plynu společné pro více plynů a naplnění čistým argonem. Od 200 Pa bylo plazma viditelně nehomogenní.

Kapitola 4

Výsledky a diskuze

V této kapitole budou nejdříve představena a diskutována data týkající se rezonančních módů a antén, které je generují. Správné generování a měření rezonančních módů je důležité pro měření elektronové hustoty, kterému se bude věnovat druhá část této kapitoly.

4.1 Rezonanční módy

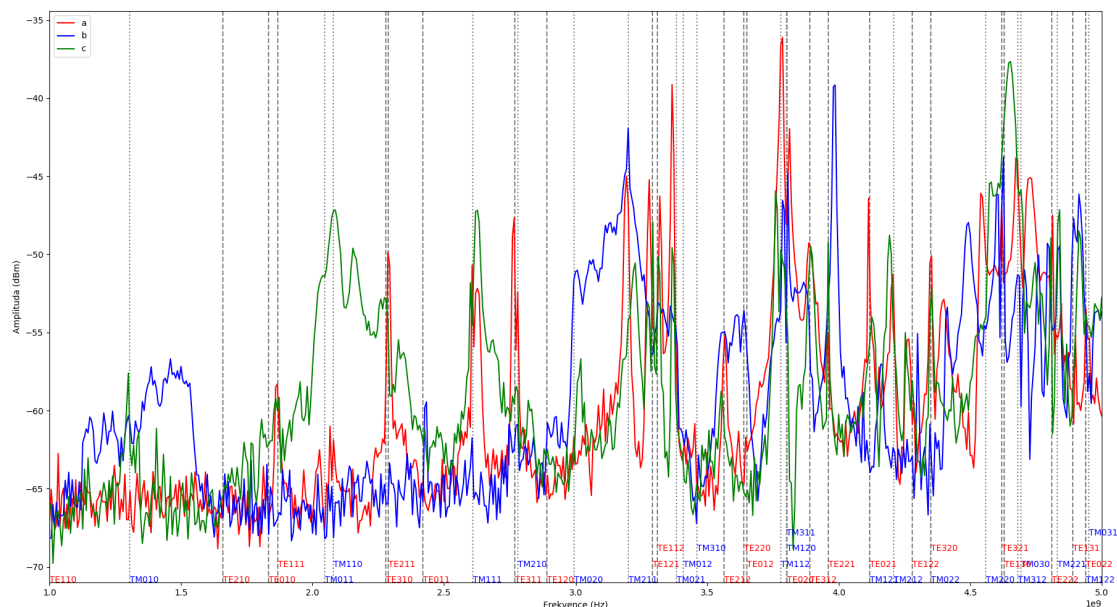
V I. fázi měření byly používány původní antény vytvořené a umístěné výrobcem celého experimentu. Podle výrobce experimentu byla dutina navržena tak, aby byl generován mód TM_{020} a to při 3 GHz. Antény jsou umístěny ve spodní části dutiny, v blízkosti stěny a jsou natočené v azimutálním směru. Jejich umístění a tvar je na obr. 3.7. Ze vztahů (1.4) je vidět, že závislost azimutálního magnetického pole na radiální souřadnici je dána Besselovou funkcí J'_n . Pro mód TM_{020} a rozměry dutiny lze tuto závislost ukázat na grafu na obr. 4.1. Je vidět, že extrém této funkce a tedy i azimutální složky magnetického pole se nachází 2,93 cm od středu dutiny. Druhý extrém se nachází 8,5 cm od středu neboli 0,3 cm od stěny, tedy přibližně ve stejné poloze jako antény. Azimutální složka magnetického pole pro mód TM_{020} nezáleží na souřadnici z , na umístění antén ve výšce dutiny tedy příliš nezáleží. Ve spektru v dutině s rovnou hliníkovou poklicí viz obr. 3.12 je tento mód výrazný, je tedy skutečně generován. Ve spektru v dutině s poklicí s elektrodou však není vidět vůbec. Tento jev platí i pro ostatní TM módy. Ve spektru s hliníkovou poklicí jsou TM módy dobře rozpoznatelné téměř všechny, ve spektru s poklicí s elektrodou téměř žádné. Elektroda tedy pravděpodobně výrazně mění elektromagnetické pole a tím i rezonanční vlastnosti dutiny. Tento fakt by mohl být ověřen simulací elektromagnetického pole v dutině. Měření v I. fázi tedy ukázala, že poklice s elektrodou má na elektromagnetické pole neznámý vliv. Dále budou tedy diskutována pouze spektra s rovnou hliníkovou poklicí, která se více blíží teoretickému modelu.

Ve II. fázi bylo vytvořeno několik nových antén a spektrum změřeno pro mnoho různých poloh. Na obr. 4.2 je porovnání spektra pro 5 cm antény (obvod smyčky je 5 cm) s různými polohami. Spektrum pro 2,5 cm resp. 2,875 cm antény je na obr. 3.20 resp. obr. 3.22. Porovnání spektra pro 1 cm antény je rozděleno na natočení

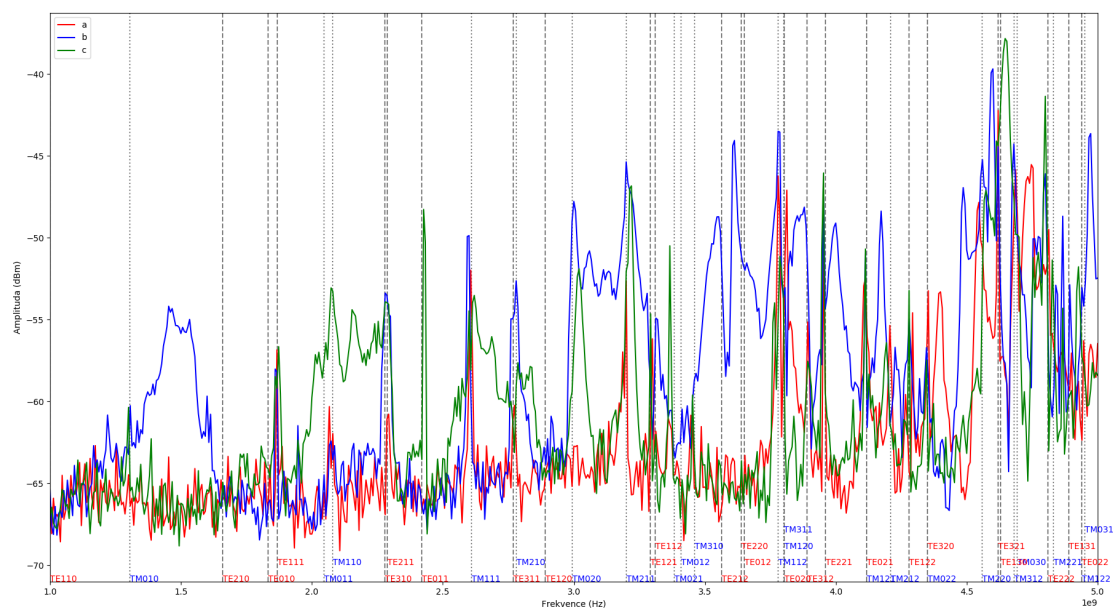
do azimutálního směru viz obr. 4.3 a do radiálního směru viz obr. 4.4. V grafech jsou vyznačeny frekvence módů. Díky tomu, že impedance antén a kabelů nebyla vyladěna pro přenos specifické frekvence, některé teoretické rezonanční frekvence mohou ve spektru chybět nebo být nevýrazné. Zároveň se ve spektru objevují další vlivy způsobené interakcí kabelů a konektorů, neočekávanou interakcí antén, zachytávání vnějších signálů na kabelech a konektorech (vnitřek dutiny by měl být vůči těmto signálům chráněn) jako např. WiFi, GSM a dalších. Přiřazení rezonančního vrcholu ve spektru k teoretickému rezonančnímu módu pouze na základě blízkosti frekvencí tedy není dobře možné. Podívejme se na příklad na obr. 4.2. Jeden z nejvýraznějších vrcholů pro obě polohy antén se nachází ve frekvenci 3,2 GHz, přesně v místě teoretického módu TM_{211} . Po dosazení parametrů tohoto módu $n = 2$, $m = 1$, $l = 1$ a z -tové souřadnice složky antén $z = \frac{L}{2}$ (stejně pro obě polohy antén) do vztahů pro elektromagnetické pole TM módů (1.4) je patrné, že kvůli $\cos \frac{l\pi z}{L}$ bude azimutální složka magnetického pole H_ϕ nulová. Mód by tedy neměl být anténami vůbec generován. Dále je patrné z grafu Besselovy funkce $J_2'(x)$ (viz obr. 4.5), která udává závislost H_ϕ na radiální souřadnici ρ , že poloha antén uprostřed poloměru $\rho = 0,044$ cm také není pro tento mód ideální. Není tedy jisté zda se skutečně jedná o TM_{211} . Podívejme se ještě na jeden příklad tentokrát pro 1 cm antény v různých polohách a v azimutálním směru viz obr. 4.3. Módu TM_{010} odpovídá rezonanční frekvence 1,3 GHz. Dosazením jeho parametrů do vztahu (1.4) získáváme informaci, že azimutální magnetické pole H_ϕ nezávisí na z -tové souřadnici, tedy by jeho generování nemělo záviset na z -tové souřadnici antén. Dále je radiální závislost dána Besselovou funkcí $J_0'(\frac{p_{01}}{R}\rho)$ viz obr. 4.6 a tedy antény přibližně 1 cm od stěny by měly mód generovat stejně nebo trochu lépe než antény uprostřed poloměru dutiny. Na obr. 4.3 je vidět, že vrchol pro antény v polovině výšky, v blízkosti stěny je skutečně vyšší než pro antény v polovině výšky, uprostřed poloměru. Mód však není generován vůbec pro antény ve spodní části dutiny. Tyto příklady ukazují, že vytváření a umístování antény do různých poloh a následné hledání módů ve spektru je nepraktické. Postup je třeba otočit, tedy vybrat mód a podle něj vytvořit a umístit antény tak, aby byl generován. Ve III. fázi byl tedy vytvořen pár antén pro generování módu TM_{010} , jak je popsáno v kapitole 3. Na obr. 4.7 je porovnání spekter s různými poklicemi. Rezananční vrchol je výrazný pro všechny poklice.

4.2 Elektronová hustota

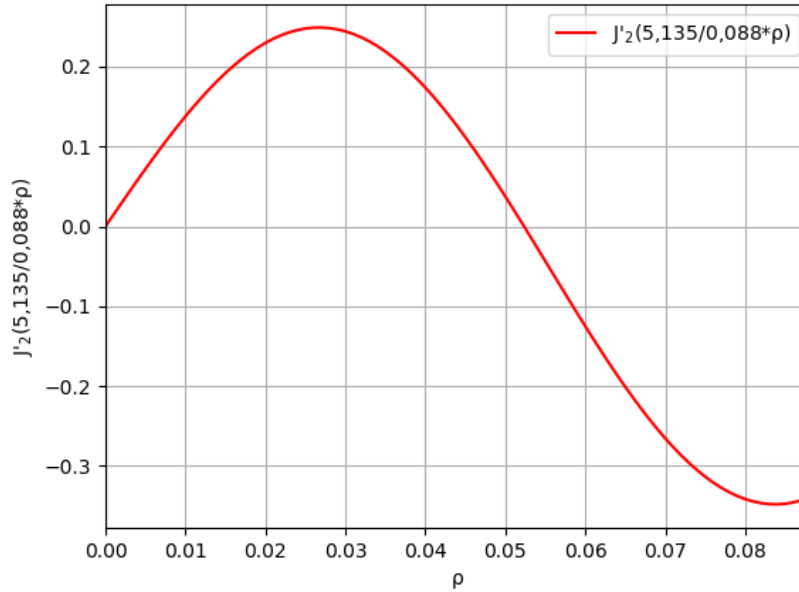
Z prvního měření v plazmatu vycházely záporné hodnoty elektronové hustoty viz obr. 3.1. Předpokládanou příčinou byla tepelná expanze kovové dutiny. Tepelná změna byla vypočítána z posunu rezonančních frekvencí vztahem (3.2) viz obr. 3.4. Tepelnou změnu však lze odhadnout i pomocí kalorimetrie. Dutina je vyrobena z neznámého typu nerezové oceli, byl tedy předpokládán typ ČSN 17 240, AISI 304. Změřením rozměrů a tloušťek všech částí dutiny a použitím hustoty a měrné tepelné kapacity podle [7], byla tepelná kapacita dutiny odhadnuta na 981 J/K. V experimentu viz obr. 3.5 byl ohřev dutiny ukončen po 660 s, pouze 330 s z toho byl ohřev aktivní, zbylý čas sloužil k měření posunu frekvencí. Po 330 s ohřevu s výkonem 70 W by se dutina měla ohřát o 24 °C. Tato hodnota zhruba odpovídá



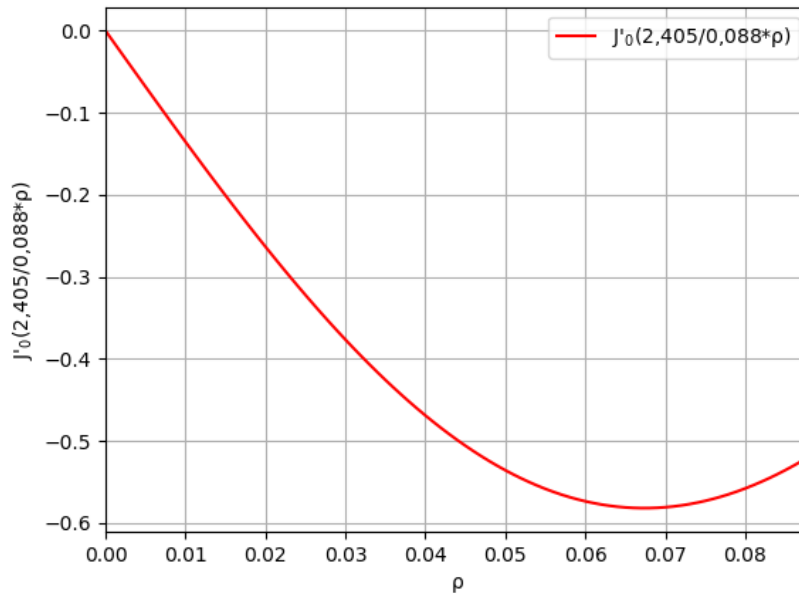
Obrázek 4.3: Porovnání spekter pro tři polohy antén s obvodem smyčky 1 cm: a) v blízkosti dolní podstavy, v blízkosti stěny dutiny, nasměrovány do azimutálního směru b) uprostřed výšky, uprostřed poloměru, nasměrovány do azimutálního směru c) uprostřed výšky, v stěny dutiny, nasměrovány do azimutálního směru. Dutina s hliníkovou poklicí. V grafu jsou vyznačeny teoretické rezonanční frekvence.



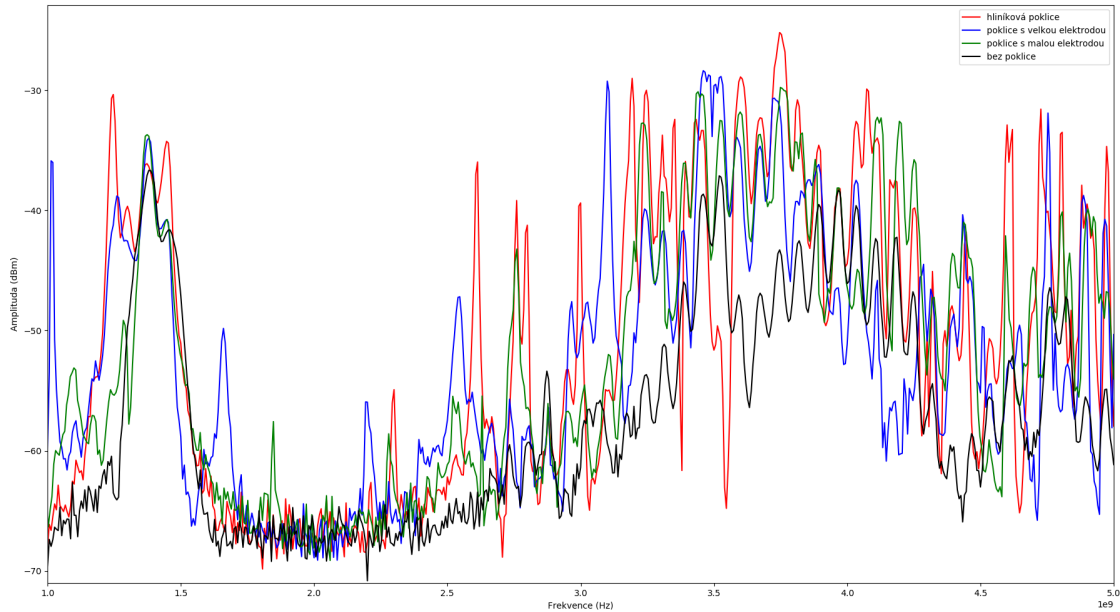
Obrázek 4.4: Porovnání spekter pro tři polohy antén s obvodem smyčky 1 cm: a) v blízkosti dolní podstavy, v blízkosti stěny dutiny, nasměrovány do radiálního směru b) uprostřed výšky, uprostřed poloměru, nasměrovány do radiálního směru c) uprostřed výšky, v stěny dutiny, nasměrovány do radiálního směru. Dutina s hliníkovou poklicí. V grafu jsou vyznačeny teoretické rezonanční frekvence.



Obrázek 4.5: Relativní velikost azimutálního magnetického pole pro mód TM_{211} v závislosti na radiální souřadnici v dutině. Toto magnetické pole je dáno Besselovou funkcí $J'_2\left(\frac{p_{21}}{R}\rho\right)$ viz (1.4).



Obrázek 4.6: Relativní velikost azimutálního magnetického pole pro mód TM_{010} v závislosti na radiální souřadnici v dutině. Toto magnetické pole je dáno Besselovou funkcí $J'_0\left(\frac{p_{01}}{R}\rho\right)$ viz (1.4).



Obrázek 4.7: Porovnání spekter změřených s finálními anténami a různými poklicemi: poklice s původní elektrodou, poklice s novou elektrodou, hliníková poklice, bez poklice. V grafu jsou vyznačeny teoretické rezonanční frekvence.

hodnotě grafu, pokud vezmeme v úvahu tepelné ztráty.

Druhé měření viz obr. 3.2 již vyšlo bez záporné elektronové hustoty díky měření výchozí pozice vrcholu několik sekund před měřením jeho pozice v plazmatu. Na grafech pro všechny plyny je patrné, že každý rezonanční vrchol dává jinou elektronovou hustotu. Bylo zmíněno, že změřené spektrum je kombinací rezonance v dutině, přenášeného výkonu anténami pro danou frekvenci a dalších vlivů. Pokud se tyto vlivy setkají, může být ve spektru vidět pouze část rezonančního vrcholu. Odhad chyby tohoto vlivu předpokladem, že chyba měření polohy vrcholu je jeho šířka v polovině výšky, dává chybu měření elektronové hustoty ve stejném řádu jako samotné měření. Rozdílná elektronová hustota také může být ovlivněna nehomogenitou plazmatu a rozdílným elektromagnetickým polem módů. Pokud je plazma nehomogenní, může být elektromagnetické pole ovlivněno jinak pro každý mód. Ve III. fázi byl první z těchto vlivů vyřešen vyladěním impedance pro mód TM_{010} . Nehomogenitu plazmatu bylo možné sledovat díky nové elektrodě nezakrývající pohled do dutiny. Měření v této fázi proběhla v dusíku resp. neonu (viz obr. 3.33 resp. 3.34) a dvě měření v argonu (viz obr. 3.35 a 3.36). Plazma přestalo být viditelně homogenní pro tlak vyšší než přibližně 200 Pa.

Na grafech některých měření je vidět, že elektronová hustota při nízkém tlaku roste s narůstajícím tlakem. Po dosažení určitého tlaku se vývoj obrátí a elektronová hustota s rostoucím tlakem klesá. Tento jev může být vysvětlen pohledem na dva extrémní případy. Při nízkém tlaku je střední volná dráha elektronů vyšší než dráha nutná k urychlení elektronu na ionizační energii a elektronová hustota tedy roste s hustotou ionizovatelných částic. Při vyšším tlaku je pouze část elektronů urychlována na ionizační energii mezi srážkami a tento podíl klesá s klesající střední volnou

dráhou, a tedy s rostoucím tlakem. Stejný jev byl naměřen např. v [5], [6].

K určení polohy vrcholů byla použito fitování parabolou pomocí funkce `curve_fit` z knihovny SciPy. Tato funkce vrací mimo parametrů fitované křivky i kovarianční matici, ze které je možné získat chybu určení polohy, a tedy chybu výpočtu elektronové hustoty. Tato hodnota se pro všechna měření pohybuje okolo $1 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-3}$. Měření je však ovlivněno dalšími vlivy, které není možné v této době triviálně kvantifikovat jako již zmíněný vliv impedance, nehomogenita plazmatu a také kolísání výkonu generátoru plazmatu. Chyba tedy není v grafech zobrazena.

Závěr

Tato práce se zabývala studiem aparatury Rezonanční dutina v PlasmaLab@CTU. Byla provedena měření elektronové hustoty v závislosti na tlaku v různých plynech, přičemž byl do měření zahrnut vliv změny rezonančních frekvencí způsobený zahříváním dutiny. Dále byl prostudován vliv antén a jejich pozice a vliv poklice na generování rezonančních módů dutiny. Nakonec byly vytvořeny a umístěny nové antény generující mód TM_{010} . Elektroda generátoru byla nahrazena tak, aby byl umožněn pohled do dutiny a plazma bylo více homogenní.

V teoretickém úvodu bylo nejdříve uvedeno seznámení s rezonancí uvnitř mikrovlnné dutiny, byly uvedeny vztahy pro rezonanční frekvence módů a vztahy jejich elektromagnetického pole. Další část se týkala popisu plazmatu a šíření elektromagnetického vlnění v plazmatu. Poté byl představen způsob výpočtu elektronové hustoty plazmatu z posunu rezonančních frekvencí. Část se také zabývala Besselovými funkcemi, které jsou důležitou součástí vztahů elektromagnetického pole dutiny.

V kapitole 2 byly popsány jednotlivé části aparatury Mikrovlnná dutina v PlasmaLab@CTU. V první řadě byla představena samotná dutina a její parametry, ze kterých byly vypočteny rezonanční frekvence módů. Je popsán spektrální analyzátor a jeho role při měření rezonančních frekvencí resp. generování rezonančních módů. Dále je popsána vakuová komora, čerpání, struktura umožňující přívod zvoleného plynu, RF generátor. Je popsáno webové rozhraní a jeho funkce pro vzdálené řízení experimentu.

V kapitole 3 byl popsán postup měření a byl rozdělen na 3 fáze. Na začátku I. fáze byla provedena měření elektronové hustoty pro 4 různé plyny, kde se však ukázalo, že měření jsou ovlivněna rozpínáním dutiny. Po ověření, že rozpínání je způsobeno zvyšováním teploty dutiny byl postup měření upraven a měření byla zopakována. Ve II. fázi bylo potřeba přiřadit měřené rezonanční frekvence teoreticky vypočítaným, to však nebylo dobře možné. Byl proto proměřen vliv antén a poklice dutiny na spektrum. Ve III. fázi byly vytvořeny finální antény a umístěny tak, aby byl generován mód TM_{010} . Byla také vytvořena nová elektroda generátoru plazmatu umožňující sledování vnitřku dutiny. Po uzavření a vyčerpání komory byla provedena další měření elektronové hustoty pomocí módu TM_{010} .

Kapitola 4 obsahovala představení výsledků měření a jejich diskuzi. Nejprve bylo ukázáno, že přestože byly původní antény umístěny pro generování módu TM_{020} správně a mód byl v dutině s hliníkovou poklicí skutečně generován, kvůli vlivu elektrody nebyl ve spektru rozpoznatelný. Hledání rezonančních módů ve spektru pro různé antény a jejich pozice se ukázalo jako nepraktické. Postup byl tedy otočen,

antény vytvořeny a umístěny pro generování módu TM_{010} . Bylo ukázáno, že finální antény jsou umístěny ve správné pozici módu TM_{010} a jeho rezonanční frekvence je ve spektru dobře viditelná pro všechny druhy poklic.

Závislost elektronové hustoty plazmatu na tlaku byla změřena v dusíku, argonu, neonu a v heliu. Kvůli zahřívání dutiny musela být tato měření opakována. Byl také nalezen způsob výpočtu změny teploty dutiny z posunu rezonančních frekvencí. Ukázalo se, že každá rezonanční frekvence a její posun dává jinou hodnotu elektronové hustoty. Jejich křivky v závislosti na tlaku mají také jiný vývoj. Tento efekt byl vysvětlen chybou určení přesné polohy vrcholu v důsledku nevytunované impedance a nehomogenním plazmatem měřeným různým elektromagnetickým polem módů.

Literatura

- [1] POZAR, David M. Microwave Engineering. 4th ed. University of Massachusetts at Amherst: Wiley, 2011. ISBN 978-0470631553.
- [2] KULHÁNEK, Petr. Vybrané kapitoly z teoretické fyziky. Vydání: druhé, aktualizované a změněné. Praha: AGA, 2020. ISBN 978-80-906638-4-8.
- [3] KULHÁNEK, Petr. O vztahu matematiky a fyziky [online]. Vydání: první, 2018. Praha: AGA, 2018 [cit. 2022-6-25]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/studium/math.pdf>
- [4] GUMBLETON, Richard, Jeroma CUENCA, Georgina KLEMENCIC, Nick JONES a Adrian PORCH. Evaluating the coefficient of thermal expansion of additive manufactured AlSi10Mg using microwave techniques. Additive Manufacturing. 2019, 2019(30), 5. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2019.100841
- [5] OLIVEIRA, J., D. HACHMEISTER, P. LOUREN, J. BROTÁNKOVÁ a H. FERNANDES. An accessible microwave cavity experiment for plasma density determination. European Journal of Physics. 2021, 42(3), 11. Dostupné z: doi:10.1088/1361-6404/abe020
- [6] HAVERLAG, M., G.M.W. KROESEN, T.H.J. BISSCHOPS a F.J. HOOG. Measurement of electron densities by a microwave cavity method in 13.56-MHz RF plasmas of Ar, CF₄, C₂F₆, and CHF₃. Plasma Chemistry and Plasma Processing. 1991, 11(3), 14. Dostupné z: doi:10.1007/BF01458916
- [7] 304 Stainless Steel. In: Material Property Data [online]. MatWeb, c1996-2022 [cit. 2022-01-07]. Dostupné z: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=abc4415b0f8b490387e3c922237098da&ckck=1>
- [8] Rigol User Guide: DSA800 Series Spectrum Analyzer [online]. RIGOL TECHNOLOGIES CO., 2022 [cit. 2022-07-07]. Dostupné z: https://beyondmeasure.rigoltech.com/acton/attachment/1579/f-0503/1/-/-/-/-/DSA800_UserGuide.pdf