高周波プラズマによる気体原子生成を目的とした 2.45GHz 共振器開発

電気通信大学大学院 情報理工学研究科 基盤理工学専攻 森永 実 研究室 藤田 恭介

本研究では、マイクロ波放電に用いる 同軸共振器を開発した。マイクロ波共振 器を用いたマイクロ波放電は水素原子 に限らずほかの元素の分光用原子源に も有効だと考えられる。例えば希ガス原 子のレーザー冷却をするためには準安 定状態に放電励起する必要があるが、 DC 放電に対して RF 放電は準安定状態 原子の収率が格段に高くなることが知 られている。また、炭素やケイ素のよう に固体から加熱によってガス状原子を 取り出すことで困難な元素は数多くあ るので、本研究で開発しているような小 型で低圧下動作するマイクロ波放電機 構は有効であると期待している。

- 2. 原理
- 2.1 同軸導波路

理想導波路を微小な長さδ*l*に分割する。 δ*l*の伝搬行列を

 $P_{\delta l} = 1 + \delta l T$

と書くと

$$T = \begin{pmatrix} 0 & -jZ_c k \\ -j\frac{k}{Z_c} & 0 \end{pmatrix}$$

であり、 $P_l = e^{lT}$ である。抵抗が有限の 場合は δl ごとに分割された理想導波路 に抵抗 $\rho_0 \delta l$ が挿入されているというモ デルで考える。ここで ρ_0 は同軸導波路の 単位長さ当たりの抵抗である。さらに $s = \rho_0/Z_c$ とおいておく。抵抗 $\rho_0 \delta l$ を直 列に挿入する変換行列は

$$P_{\delta l} = \begin{pmatrix} 1 & -\rho_0 \delta l \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

であるから抵抗込みの長さ*δl*の伝搬行 列(変換行列)は

$$P_{s\delta l} = P_{\delta l} P_{\rho_0 \delta l} = 1 + \delta l T_s$$

と書け、ここで

$$T_{s} = \begin{pmatrix} 0 & -jZ_{c}(k-p_{0}) \\ -j\frac{k}{Z_{c}} & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -jZ_{c}(k-jS) \\ -j\frac{k}{Z_{c}} & 0 \end{pmatrix}$$

である。有限距離*l*の伝搬行列は
$$P_{\delta l} = e^{lT_{s}}$$

なので、これを計算する。

ところで、

$$T_{ab} = \begin{pmatrix} 0 & a \\ b & 0 \end{pmatrix}$$

のとき、

$$T_{ab}^{2} = \begin{pmatrix} ab & 0\\ 0 & ab \end{pmatrix} = abl$$

であり、 $T_{ab}^{2n} = (ab)^{n}I$ 、 $T_{ab}^{2n+1} = (ab)^{n}T_{ab}$
なので

$$\exp(lT_{ab}) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{l^n T_{ab}^n}{n!}$$
$$= \sum_{n=0}^{\infty} \left\{ \frac{l^{2n} (ab)^n}{(2n)!} I + \frac{l^{2n+1} (ab)^n}{(2n+1)!} T_{ab} \right\}$$

$$= \cosh(\sqrt{abl})I + \frac{\sinh(\sqrt{abl})}{\sqrt{ab}}T_{ab}$$
$$T_s は T_{ab} \ ca = -j(k-js), \ b = -jk \ oblashow \ bar{s}$$
合でそのとき $\sqrt{ab} = j\sqrt{k(k-js)}$ である。

$$P_{sl} = e^{tr_s} = \begin{pmatrix} \cos(\sqrt{k(k-js)}l) & -jZ_c\sqrt{\frac{k-js}{k}}\sin(\sqrt{k(k-js)}l) \\ -jZ_c^{-1}\sqrt{\frac{k}{k-js}}\sin(\sqrt{k(k-js)}l) & \cos(\sqrt{k(k-js)}l) \end{pmatrix}$$

$$P_{sl} \mathcal{O} 行列式は1 である。また、抵抗が ない場合、すなわちs = 0 \mathcal{O} ときP_{sl} は$$

$$(1) \mathcal{O} P_l \leftarrow -$$
致する。

2.2 同軸共振器と外部回路とのカップリング

準備として図のような並列回路を考え る。

$$\begin{pmatrix} V'\\ I'_m \end{pmatrix} = P_m \begin{pmatrix} 0\\ I_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{m12}I_m\\ P_{m22}I_m \end{pmatrix}$$

$$\downarrow \emptyset$$

$$I'_{m} = \frac{P_{m22}}{P_{m12}}V'$$
$$I' = \sum_{m=1}^{n} I'_{m} = \sum_{m=1}^{n} \frac{P_{m22}}{P_{m12}}V$$



図1 並列回路



図2 外部入力と結合した同軸共振器



図3 ブロック化した同軸共振器

を得るので、この並列回路のインピーダ ンスは

$$Z = -\frac{V'}{I'} = -\left(\sum_{m=1}^{n} \frac{P_{m22}}{P_{m12}}\right)^{-1}$$

となる。

外部入力端子を持った図 5 のような同 軸共振器を考える。これはブロック化す ると図 6 のように書け、インピーダンス 整合用キャパシタC'を除いた部分は前 述の並列回路でn = 2、 $P_1 = P_{sl_1}$ 、 $P_2 = P_{sl_2}P_C$ としたものとなる。ここで P_C は $Z = (j\omega C)^{-1}$ とした P_{pZ} である。

$$P_C = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{j\omega C} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

3. 方法

3.1 同軸共振器

自研究室が作製した共振器と Opthos 社 の Evenson cavity(2.45GHz マイクロ波共振 器)である。

これらの共振器の目標として、2.45GHz で共振し伝送したマイクロ波の反射がゼロ になることを設定した。このように設定し たのは、気体を放電する際に伝送した電力 を最大限に無駄なく消費できるからである。 今回用いる伝送線路の特性インピーダンス $Z_0(=50\Omega)$ であり、共振器のインピーダンス が50Ωになるとき、マイクロ波の反射がゼ ロになる。ここで、Z = R + jXと表記したと きのレジスタンスRが50になり、リアクタ ンスjXが0になることが好ましい条件とし た。これらの条件を満たすためには、共振器 の設計や調節を行った。

これらの共振器の特徴として、

- 内部導体の長さを変えることで、 共振周波数を調節できる。
- アンテナと内部導体との距離を変 えることで、インピーダンス整合 が行える。

が挙げられ、内部の共振周波数が 2.45GHz となるように内部導体の長さを 設定し、インピーダンス整合を行った。





図4 開発した共振器





図 5 Opthos 社共振器

以下、この2つの共振器について RLC 回 路とブロック化した同軸共振器とみなした 上で、計算を行い、実際にネットワークアナ ライザ(機種名: Nano VNA)より得たデータ と比較し、評価した。

3.2 RLC 回路

この共振器の構造を RLC 回路の共振回路 とみなし、その等価回路として以下のよう なケースを考えた。



図6 共振器簡略図および等価回路

円柱の中心を通る内部導体をインダクタン スL、内部導体の終端と壁面の間をキャパ シタンスC、共振器全体の内部抵抗がR、 共振器側面からマイクロ波を伝送するアン テナと内部導体との間をキャパシタンスC' とした。

まず、共振器を図 16 の等価回路として、 全体のインピーダンスZの算出を行った。

$$Z = \left(\frac{1}{j\omega L + R} + j\omega C\right)^{-1} - j\frac{1}{\omega C'}$$

3.3 ブロック化した同軸共振器 図のように、 $P_1 \ge P_2$ に分割しブロック化 した同軸共振器について考えた。 P_1, P_2 について、式(28)から

$$P_1 = P_{sl_1} = \begin{pmatrix} \cos\left(\sqrt{k(k-js)}l_1\right) & -jZ_c\sqrt{\frac{k-js}{k}}\sin\left(\sqrt{k(k-js)}l_1\right) \\ -jZ_c^{-1}\sqrt{\frac{k}{k-js}}\sin\left(\sqrt{k(k-js)}l_1\right) & \cos\left(\sqrt{k(k-js)}l_1\right) \end{pmatrix}$$

 $P_2 = P_{sl_2}P_C$

$$= \begin{pmatrix} \cos\left(\sqrt{k(k-js)}l_2\right) & -jZ_c\sqrt{\frac{k-js}{k}}\sin\left(\sqrt{k(k-js)}l_2\right) \\ -jZ_c^{-1}\sqrt{\frac{k}{k-js}}\sin\left(\sqrt{k(k-js)}l_2\right) & \cos\left(\sqrt{k(k-js)}l_2\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{j\omega C} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} \cos\left(\sqrt{k(k-js)}l_2\right) & -\frac{1}{j\omega C}\cos\left(\sqrt{k(k-js)}l_2\right) - jZ_c\sqrt{\frac{k-js}{k}}\sin\left(\sqrt{k(k-js)}l_2\right) \\ -jZ_c^{-1}\sqrt{\frac{k}{k-js}}\sin\left(\sqrt{k(k-js)}l_2\right) & \frac{1}{\omega C}Z_c^{-1}\sqrt{\frac{k}{k-js}}\sin\left(\sqrt{k(k-js)}l_2\right) + \cos\left(\sqrt{k(k-js)}l_2\right) \end{pmatrix} \end{pmatrix}$$

となるので、

共振器のインピーダンスZは式(44)より

$$Z = -\left\{\frac{P_{122}}{P_{112}} + \frac{P_{222}}{P_{212}}\right\}^{(-1)}$$
$$= -\left\{\frac{\cos(\sqrt{k(k-js)}l_1)}{-jz_c\sqrt{\frac{k-js}{k}}\sin(\sqrt{k(k-js)}l_1)} + \frac{\frac{1}{\omega c}Z_c^{-1}\sqrt{\frac{k}{k-js}}\sin(\sqrt{k(k-js)}l_2) + \cos(\sqrt{k(k-js)}l_2)}{-\frac{1}{j\omega c}\cos(\sqrt{k(k-js)}l_2) - jZ_c\sqrt{\frac{k-js}{k}}\sin(\sqrt{k(k-js)}l_2)}\right\}^{-1}$$

と計算できた。ここで、kは波数、 ω は角周 波数、内部導体の長さ $l = l_1 + l_2 = \lambda/4$ 、同 軸共振器の特性インピーダンス Z_c とした。

4. 結果

同軸共振器についてネットワークア ナライザを用いて測定を行った。この時、 主にスミスチャートを観察し、2.45GHz 付近で共振するようにグラフを得た。次 の図 21・22 に関して、上図が VSWR(水 色)とスミスチャート(黄色)、下図がイ ンピーダンスの実部(青色)と虚部(赤 色)をプロットしている。



図7 開発した共振器した結果

このデータより、2.45GHz で共振してい るときにスミスチャートの中心(*Z* = 50 + *j*0[Ω])付近を通っていることから、 目標となる共振器が作製できたといえ る。



それぞれの Q 値は 84,369 となった。 この違いの大きな違いとしては、材質 の違いで異なっている。

5. まとめ・今後の展望

今回開発した同軸共振器には再考の 余地はあるが、実際にワットレベルのマ イクロ波を共振器に挿入することで水 素ガスの放電をおこなう。また、放電が 起こると共振器の特性を示す Q 値が変 化し、共振周波数もシフトするとされる。 すると放電が止まる可能性があるが、内 部導体の長さを調節することで、放電環 境下においても放電起こし続けると期 待し、次の実験に移る予定である。 放電により解離した水素原子を用いて 飽和分光を行う。放電により水素原子を 含んだガスは温度や圧力が上昇してし まうため、液体窒素または液体ヘリウム で冷やされたノズルを通して真空槽に 噴出させることにより、低温の原子線を 作り真空層内で分光を課題としている。 飽和分光はドップラー広がりに制約さ れない分光法だが、水素原子ではその波 長に沿った光源を作るのが大変難しい とされていたため、今まで実装されてい ない。この光源を同大学院の桂川研究室 で開発が進んでおり、今後は連携してい く予定である。

6. 参考文献

[1] Choi J, Iza F, Do H J, Lee J K and Cho M H 2009 "Microwave-excited atmospheric-pressure microplasmas based on a coaxial transmission line resonator" Plasma Sources Sci. Technol. 18 025029

[2] Ming Zeng, Hui Liu , Hongyan Huang and Daren Yu "Magnetic confinement less microwave discharge gridded ion thruster" Plasma Sources Sci. Technol. 32 (2023) 095014

[3] F Iza and J Hopwood "Split-ring resonator microplasma: microwave model, plasma impedance and power efficiency" Plasma Sources Sci. Technol. 14 (2005) 397–406

[4] Pozar D M 2005 Microwave Engineering 3rd edn. (New York: Wiley) chapter 2

[5] WANG Zhongli, TANG Yunying,ZHU Liang , SHAN Jiafang , WANGYaoyao "Novel Cavity Resonator-

based Microwave Plasma Spark Plug" Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031 [6] Iza F 2004 Atmospheric microplasma source based on а microstrip split-ring resonator PhD Thesis Northeastern University, Boston-Massachusetts, Appendix C [7] 「マイクロ波技術」 阿部英太郎 著 (東京大学出版会 1979) [8] 「光・電波伝送入門」 F.R.コナー 原著 (森北出版株式会社 2005) [9] 「高周波・マイクロ波回路」小西良 弘著 1,3,4 章(ケイラボ出版 2013) [10] Bruce McCarroll "An Improved Microwave Discharge Cavity for 2450 MHz" Review of Scientific Instruments 41, 279 (1970) [11] F. C. Fehsenfeld; K. M. Evenson; H. Ρ. Broida "Microwave Discharge Cavities Operating at 2450 MHz." Sci. Instrum. 36, 294–298 (1965)