

# 卒業研究報告

## 題目

小容積放電セルにおける高周波プラズマの発生

---

## 指導教員

八田章光助教授

---

## 報告者

学籍番号:1030166

氏名:青木祐典

---

平成 15年 1月 27日

高知工科大学 電子・光システム工学科

第一章 序論	2
第二章 従来のプラズマ装置との比較	3
2-1 はじめに	3
2-2 生産現場におけるプラズマ装置	4
2-3 研究室におけるプラズマ装置	4
2-4 本研究の放電セル	5
第三章 整合回路	7
3-1 はじめに	7
3-2 整合回路の必要性	7
3-3 放電セルのプラズマインピーダンス測定	10
3-4 整合回路の設計	14
3-5 整合回路の製作	17
3-5-1 コイルの製作	17
3-5-2 バリアブルコンデンサーの製作	20
3-5-3 整合回路の組み立て	22
3-6 整合実験	23
3-7 整合実験結果	24
3-8 まとめ	26
第四章 放電特性の計測	27
4-1 はじめに	27
4-2 放電による放電セルの温度変化	27
4-3 放電電圧、電力及び発光スペクトルの特性	28
4-3-1 実験装置と手順	28
4-3-2 空気の放電特性	28
4-3-3 空気の発光スペクトル	30
4-3-4 アルゴンの放電特性	32
4-3-5 アルゴンの発光スペクトル	34
第五章 結論	37
謝辞	38
参考文献	39

## 第一章 序論

「物」の変化の流れには小型化、大型化という二つの流れがある。例えば小型の道をたどった物で馴染み深い物の例をあげると携帯電話、デジタルカメラ、ノート型パソコンなどがある。これについては携帯するということから「小型化」する必要性があったため、発展、普及するたびに小さくなっていった。逆に大型化していったものといえばどういったものがあるのか。それは飛行機、運搬船などである。これらはものの運搬に使用され、一度に運べる量を多くするために「大型化」する必要性があったためである。

近年 LSI は微細化の道をたどっている、それにより 1 枚のウェハーで作られる量も増加している。その反面ウェハーサイズは大型のもが使用されるようになった。小型のウェハーで同数の LSI を作るのと大型のウェハーで同数作るとを比較すると、大型の方が低コスト、不良率の低下などのメリットがあるためである。最近ではウェハーサイズが 8 インチから 12 インチ（最先端では 16 インチ）に変化している。またそれにともない、大型のウェハーを入れるために装置は大型化になっている。これからもウェハーが大型になっていくにつれ、それを扱う装置は大型になっていくであろう。

しかし本研究ではそれに対し装置の小型化を研究テーマとしている。本研究はプラズマを利用することにより薄膜を堆積させるプラズマ CVD 装置（化学気相堆積法 Chemical Vapor Deposition = CVD）、もしくは薄膜を削るプラズマエッチング装置の小型化がテーマである。

このテーマを選んだ理由は生産レベルでは大量に生産し、コストを下げる必要があるため装置が大型になっているが、研究室レベルではそれは要求されていない。むしろ大型になると設置するのに大面積を必要とし邪魔、また装置の改造が困難といったデメリットの方が目立ってくる。よって本研究では、研究室に現存するプラズマ装置よりもさらに小型の装置を製作することを研究テーマとした。

具体的な手順としては、使用する放電セルのインピーダンスを測定し、整合回路の設計を行う。空気とアルゴンで放電を行い、それぞれの特性を調べる。

本論分の構成は、第二章で生産現場におけるプラズマ装置や、研究室にあるプラズマ装置との比較を行い、小型化することについての利点を述べる。第三章では整合回路の必要性から、プラズマインピーダンスの測定方法、整合回路の設計、整合回路の製作、及び整合実験について述べる。四章では大気、アルゴンにおける放電特性を測定し考察する。最後に五章で結論を述べる。

## 第二章 従来のプラズマ装置との比較

### 2-1 はじめに

プラズマには様々な用途があるが、半導体分野においても広く使われている。半導体の製造には簡単に言うと 3 つのプロセスがある。パターン転写、薄膜堆積、薄膜除去である。そのなかでプラズマは薄膜堆積、薄膜除去に使用されており、現在主流の手法である。

薄膜堆積にはプラズマ CVD 装置やスパッタ装置、蒸着装置が使用されている。プラズマ CVD はつくる薄膜の種類に応じて原料を気相状態で供給し、化学的な触媒反応を利用することにより膜を堆積する技術である。

薄膜除去にはプラズマエッチング装置が使用されている。エッチングすべき対象に合わせたエッチングガスを導入した後、高周波電圧などを印加し、ガスをプラズマ化する。プラズマ中ではその元になった気体が電離され、電子、イオン、ラジカルなどの励起活性種ができており、化学的に見ると極めて活性である。プラズマ中に置かれたエッチング対象物は励起活性種を吸着し、表面化学反応をおこす。そして、その反応によってエッチング生成物がガスとなり排気される。これがプラズマエッチング法の原理である<sup>(1)</sup>。

### 2-2 生産現場におけるプラズマ装置

生産現場では第一に如何にコストを下げるかが問われる。1-1 でも述べたように大型のウェハーを使用するとコストを大幅に削ることができる。例をあげると 8 インチで  $1\text{cm}^2$  のチップをつくる場合 1 枚で約 110 個/ウェハーつくることができる。12 インチだと約 300 個/ウェハーで、8 インチにくらべ約 2.5 倍の量が 1 度のプロセスで作ることが可能である。8 インチと 12 インチを比較すると、8 インチのほうが時間、原料ガス、消費電力などが約 2.5 倍となり、コストが余計にかかる。また歩留り（最終良品数 / 有効チップ数  $\times 100\%$ ）も高くなる。また現在の装置では一度に装置に入れるウェハーの枚数は 1 枚ではなく 4~6 枚ほど入れることから少なくともその分大面積となるが、時間、原料ガス、消費電力のコストをさらに削ることができる。こういった理由から半導体生産現場におけるプラズマ装置は、ウェハーの大口径化にともない大型化していった。例をあげると A 社の 12 インチウェハーに対応したプラズマ装置の平均設置面積

は約  $9\text{m}^2$  である。

また大型化しなければ造れない、といった理由から大型化していったものもある。液晶の薄膜を堆積させるための装置である。液晶を作るための装置は少なくとも液晶の大きさ分は必要である。半導体と同じように、一度に装置に入れる枚数は1枚ではないため、かなりの面積が必要になってくるが、半導体についてのメリットと同じように、時間、原料ガス、消費電力の点でコストを削ることができる。

### 2-3 研究室におけるプラズマ CVD 装置

生産現場では 2-2 で述べた理由から、必然的に装置は大型になっていった。では研究室レベルにおいても、それほどの大きさが必要になるか？と言うとそうでない場合も考えられる。

研究室で盛んに行われていることは、新たな何かをすることである。すなわち生産効率などは別に考えるとして「実験」を行うだけの面積があればよい。むしろ 1-1 でも述べたように巨大な物は邪魔になるといったデメリットさえある。図 2-3-1(a) (b) は現在高知工科大学 A-252 実験室で稼動しているプラズマ装置である。



(a) 汎用放電セル



(b) DLC 成膜用放電セル

図 2-3-1 : 高周波プラズマ CVD 装置

(a) (b) は高周波を電力源とした装置である。(a) の放電セル部分の大きさは縦  $0.4\text{m}$ 、横  $0.5\text{m}$ 、設置面積は約  $0.3\text{m}^2$ 、(b) の放電セル部分の大きさは縦  $0.5\text{m}$ 、横  $0.6\text{m}$ 、設置面積は約  $0.4\text{m}^2$  である。生産現場の装置と大きさを比較してみると、わずか  $1/30$  の大きさである。しかしこの大きさでも研究室で見ると巨大であるし、装置を設置場所から動かすことは容易でない。よって本研

究ではこれらの装置よりもさらに小型で持ち運びが可能である装置の製作を目的とした。なお、本研究で使用する電力源は上記の装置と同じ高周波の電源（13.56MHz）である。

## 2-4 小容積放電セルプラズマ装置

図 2-4-1 が実際に使用する放電セルの写真である。直径は 50mm、高さは 20mm、容積は約 1500mm<sup>3</sup>、同じ高周波の電源を使用している装置の放電セルと外形を比較してみても図 2-3-1 ( a ) なら約 1/50、( b ) なら 1/60 となり、かなりの小型であることが解る。



図 2-4-1：小容積放電セル写真

図 2-4-2 が放電セルの断面図である。

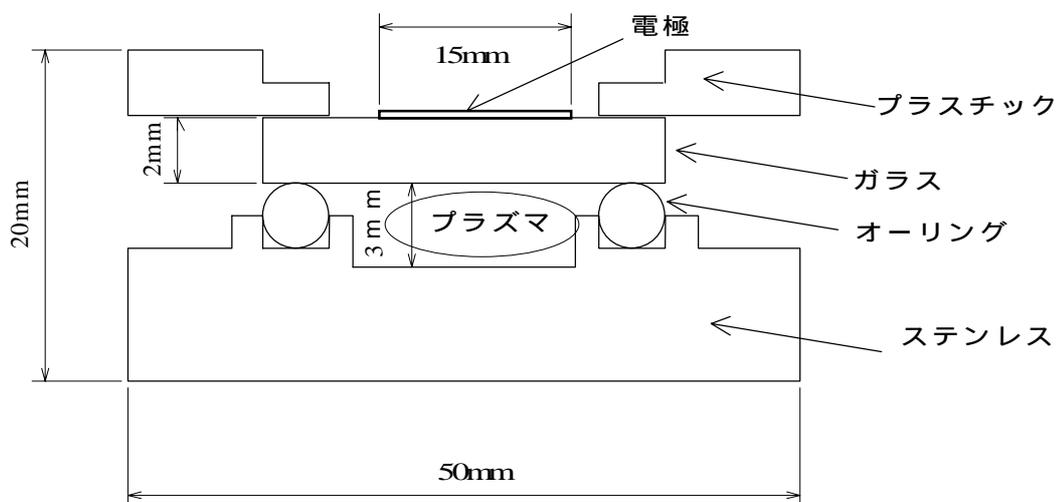


図 2-4-2：放電セル断面図

厚さ 2mm のガラスに縦横 15mm の銅電極がついている。ガラスとステンレスはオーリングに接触しており、この間にプラズマが発生する構造となっている。

この放電セルのメリットは小設置面積、移動性の高さだけではない。放電セルが小容積なので低真空まで引く時間も短く、原料となるガスの量も少なくなる。また大容積で、数種類のガスを流すと図 2-4-2 のようにガス濃度に分布が起こる場合があり、生成物の純度に不良が出る場合がある。しかし、この放電セルなら小容積という特性上、粘性流領域の圧力で原料ガスを混合した場合、原料ガスの混合が速く、生成物の純度も向上すると考えられる。

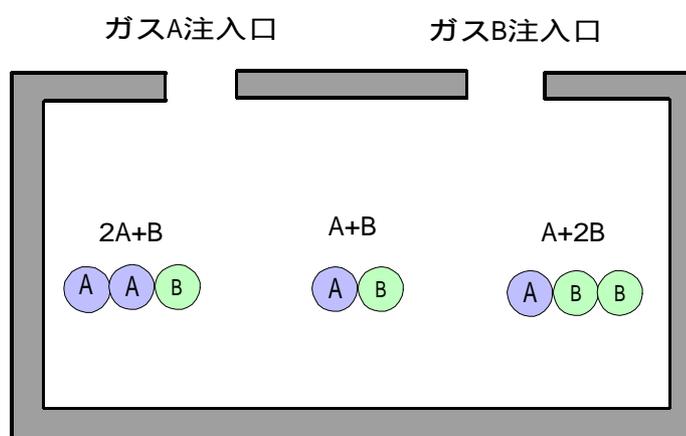


図 2-4-2 : ガス混合不良の概念図

しかしデメリットも存在する。放電制御の難しさは高圧力と小容積になるほど難しくなるため次章で述べる整合回路は高い精度を要する。当然のことながら一度に生成できる量はわずかである。しかし前にも述べたように、大量生産を求めているのは生産現場においての問題であり、研究室レベルにおいてそれは求められていない。そのため、生産量についてここでは問題にしないこととする。

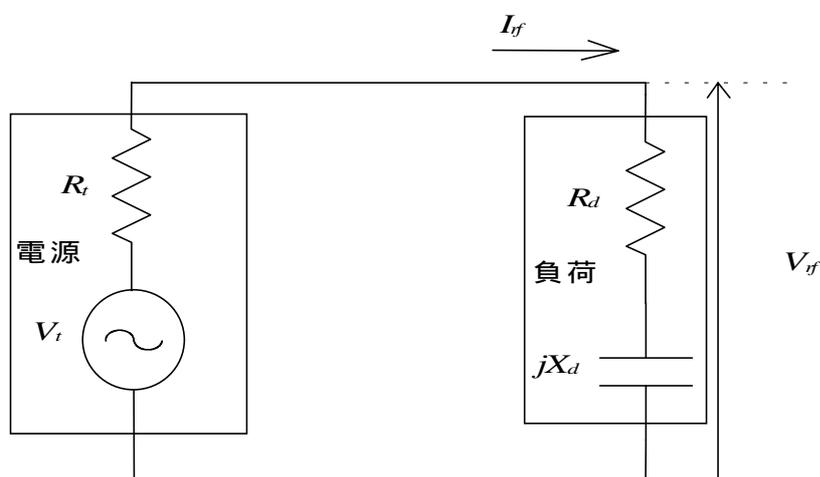
## 第三章 整合回路

### 3-1 はじめに

本章では出力インピーダンス 50 の RF 電源 (RF : Radio Frequency、周波数 13.56MHz) から、50 の同軸ケーブルで電力を送り、放電セルで、高周波プラズマを発生させるために必要な、インピーダンス整合回路の製作について述べる。

### 3-2 インピーダンス整合回路の必要性

一般的に RF 電源で負荷を駆動する場合、電力は必ずしも効率よく電源から負荷へ伝送されない。負荷をインピーダンス ( $Z = R_d + jX_d$ ) でモデル化すると図 3-2-1 のようになる。ここで負荷として容量結合型の放電プラズマを考えると、一般に放電抵抗  $R_d$  とリアクタンス  $X_d$  で表される。



$R_d$  : 放電抵抗  $X_d$  : 放電リアクタンス  $R_t$  : 電源の内部抵抗  
 $V_t$  : 電圧源の複素電圧  $I_{rf}$  : 複素電流  $V_{rf}$  : 負荷の複素電圧

図 3-2-1 : 電源、放電プラズマ等価回路図

放電によって消費される時間平均電力は

$$P = \frac{1}{2} (\overline{V_{rf} I_{rf}} + \overline{V_{rf} I_{rf}})$$

$$I_{rf} = \frac{V_t}{R_t + R_d + jX_d} \quad V_{rf} = I_{rf}(R_d + jX_d)$$

となる。I<sub>rf</sub> と V<sub>rf</sub> を電力に代入すると

$$P = |V_t|^2 \frac{R_d}{(R_t + R_d)^2 + X_d^2}$$

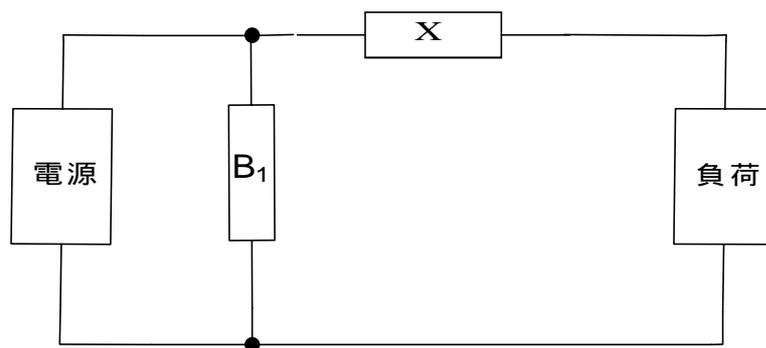
となる。

電源のパラメーターである V<sub>t</sub>、R<sub>t</sub> が一定ならば、伝達電力の最大値は X<sub>d</sub> = 0、かつ R<sub>t</sub> = R<sub>d</sub> のときであり P<sub>max</sub> は

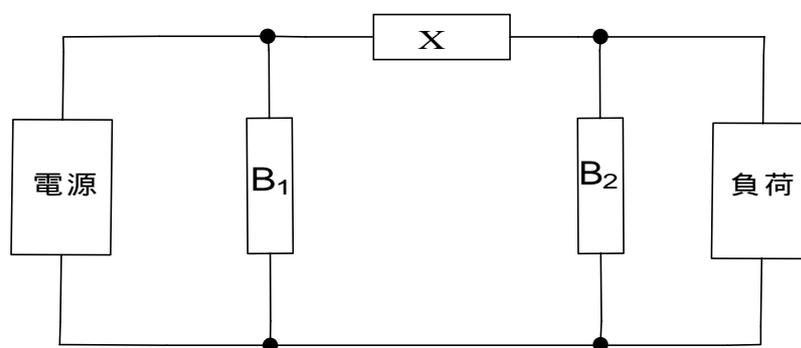
$$P_{max} = |V_t|^2 \frac{R_t}{(2R_t)^2} = \frac{1}{4} \frac{|V_t|^2}{R_t}$$

となる。放電セルの電極間はコンデンサーになっているため、X<sub>d</sub> は 0 ではない。よって、電力 P は P<sub>max</sub> に比べるとはるかに小さな値となる。<sup>(2)</sup>

電力 P を P<sub>max</sub> までひきあげるには、負荷のインピーダンスを電源のインピーダンスに一致させればよいので、これをインピーダンス整合と呼ぶ。負荷のインピーダンスを電源に整合させるために、無損失の整合回路をくわえる必要がある。よく使われる整合回路には図 3-2-2 (a) の L 型回路と、(b) の π 型回路がある。<sup>(2)</sup>



(a)L型回路



(b) 型回路

図 3-2-2 整合回路図

一般的に L 型にくらべて  $\pi$  型の整合精度が高い。今回設計する整合回路は、負荷が容量性で、リアクタンスの値は負になっている。そのためリアクタンスが正の整合用インダクタであるコイルを直列に挿入して、インピーダンスをある程度整合させる。そして負荷側のサセプタンス  $B_2$  で共振整合の微調整をする。放電が発生した後に、電源側のサセプタンス  $B_1$  で反射を制御する。

また高周波では伝送用同軸ケーブルについても、インピーダンスの整合が必要である。模式図を図 3-2-3 に示す

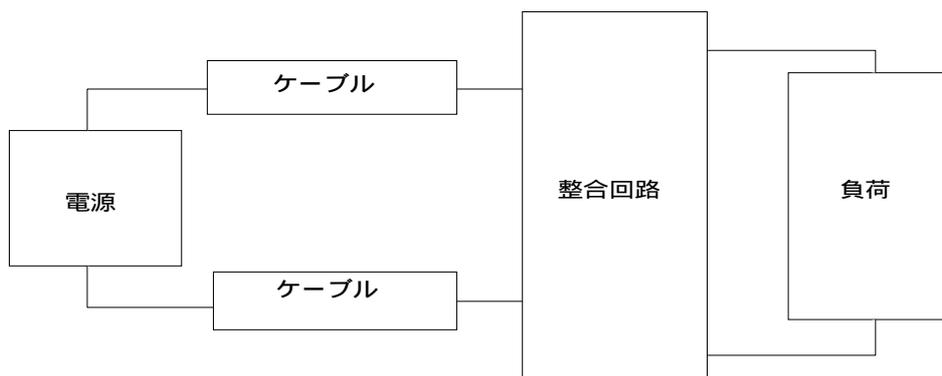


図 3-2-3 : 電源と整合回路接続の模式図

ケーブルは電源と同じで、50 Ω を用いることにして、負荷側のインピーダンスを 50 Ω に合わせるように整合回路を設計する。

### 3-3 放電セルのプラズマインピーダンス測定

整合回路の素子の値を決定するには、使用する放電セルのインピーダンスや、プラズマのインピーダンスを求めなければならない。

図 2-4-2 の断面図から、放電セル部分を等価回路で表すと、図 3-3-1 のような回路で図示される。電極、ガラス間のキャパシタ  $C_1$  と直列に放電セルとプラズマインピーダンスの等価回路であるキャパシタ  $C_2$  と抵抗  $R$  の並列回路が繋がっている。ただし  $R$  は放電によりプラズマが発生したときのみであり、発生していないときには  $C_1$ 、 $C_2$  の直列のみを考える。

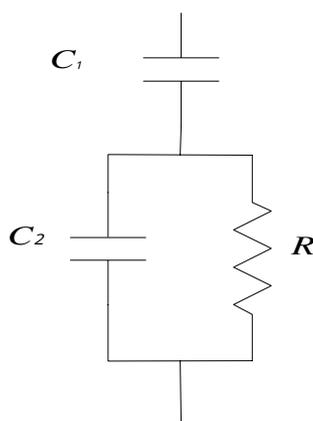


図 3-3-1 : 放電セル等価回路図

プラズマインピーダンスの目安を求めるため、交流で放電を発生し、電圧、及び電流を測定した。測定回路を図 3-3-2 に示す。

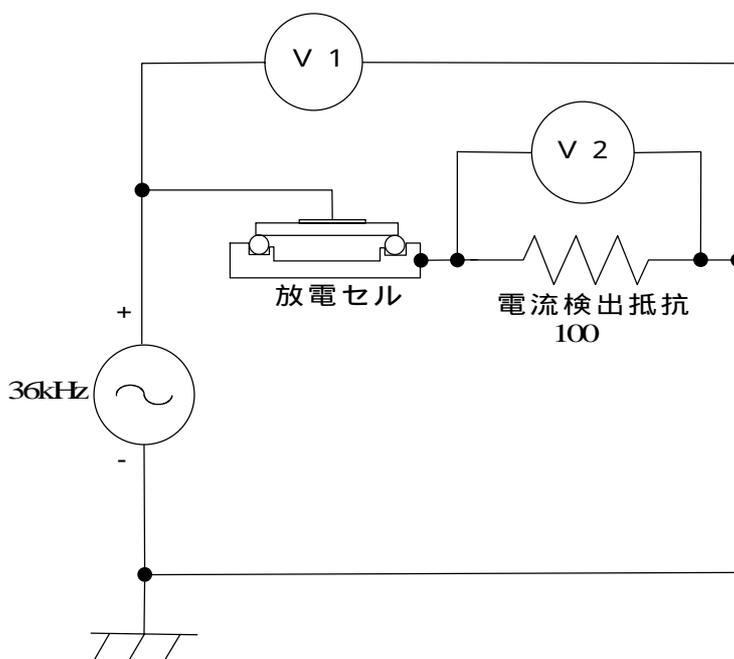
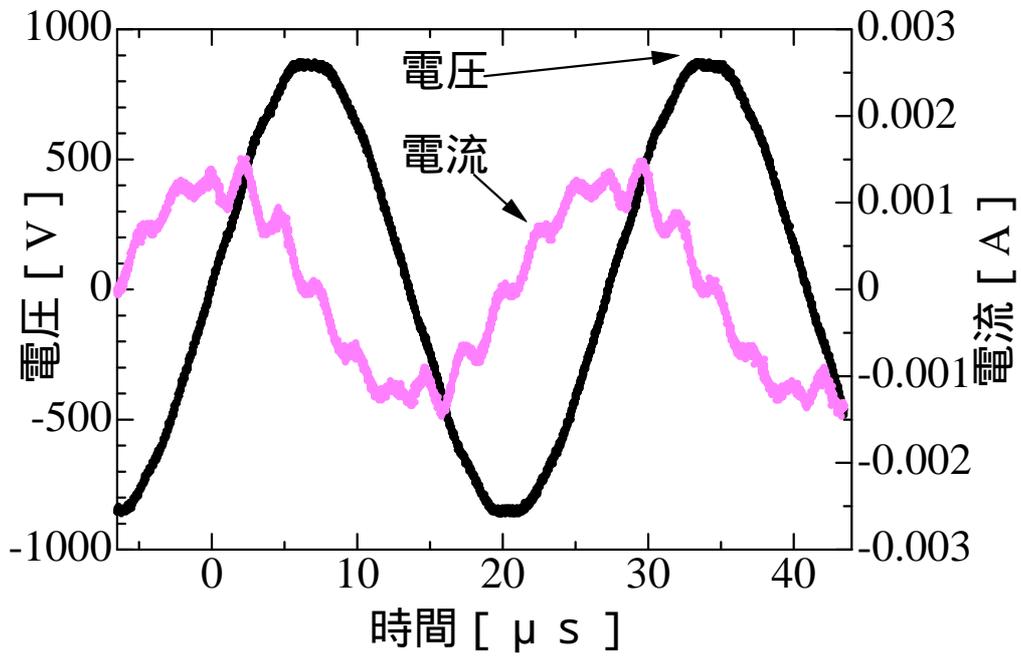
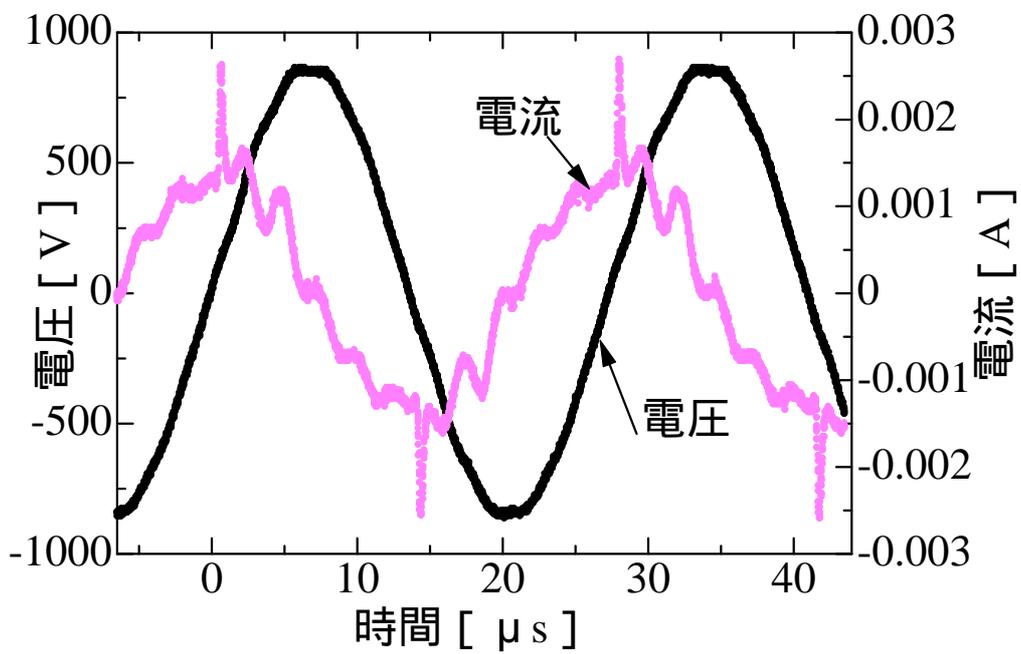


図 3-3-2 : プラズマインピーダンス測定回路図

電源の周波数は 36 k H z である。V1、V2 はオシロスコープに繋がっている。V2 には高電圧がかかるため、高圧プローブ（内部抵抗 50M 、コンデンサー 6pF）を使用した。抵抗部分の電圧から電流を測定し、全体の電圧との時間変化からプラズマインピーダンスを測定する。実験結果を図 3-3-3 に示す。



(a) 3000Pa



(b) 300Pa

図 3-3-3 : 放電セルの電圧、電流の時間変化 (a) 3000Pa (b) 300Pa

ガスは空気で、(a)が 3000Pa で放電しない場合、(b)が 300Pa でプラズマが発生した場合の電圧、電流の時間変化である。プラズマが発生している圧力をいくつか測定したが、300Pa の放電が最も安定していたため、この圧力をプラズマインピーダンスの計算の目安として使用することにした。

(a)のグラフから、電流は電圧に比べて、位相が約  $+\pi/2$  となっているのが解る。よってこの放電セルが容量性であり、コンデンサーになっていることが確認できる。

(b)のグラフで、ある一定まで電圧が上がると瞬間的に電流が流れているのが解る。この電流のピークから(a)のコンデンサーに流れている電流を引いたものが放電電流である。この放電電流と放電開始電圧からおおよそそのプラズマ抵抗が計算できる。また(b)の電圧と電流のピークからおおよそ  $C_1$  と  $C_2$  の直列コンデンサー容量を求めることができる。グラフから放電開始電圧  $V_r = 113V$ 、放電電流  $I_r = 1.59mA$ 、コンデンサー電圧  $V_c = 866V$ 、コンデンサー電流  $I_c = 1.43mA$  から

$$V_r = I_r R$$

$$V_c = I_c \frac{1}{C}$$

$f = 200kHz$  より、 $R = 70k\Omega$ 、また図 3-3-1 の  $C_1$ 、 $C_2$  の合成容量は、 $C = 7.5pF$  となった。

### 3-4 整合回路の設計

3-3 節の実験からプラズマの抵抗、及び放電セルとガラスの直列コンデンサー容量の目安を導くことができた。プラズマ抵抗はそのままで計算することができるが、図 3-3-2 の等価回路から、コンデンサーは直列容量しか得られず、それぞれの容量はわからない。また放電セルの内部は凸凹があるため、形状から正確な容量を求めることも困難である。そこでコンデンサー容量は得られた直列容量から適当に 3:1 ~ 1:3 に値を振り分け、その変化が整合回路の調整範囲に収まるように設計することにした。

放電セルとプラズマのインピーダンスを  $Z_p$  としてモデル化した場合の整合回路を図 3-4-1 に示す。

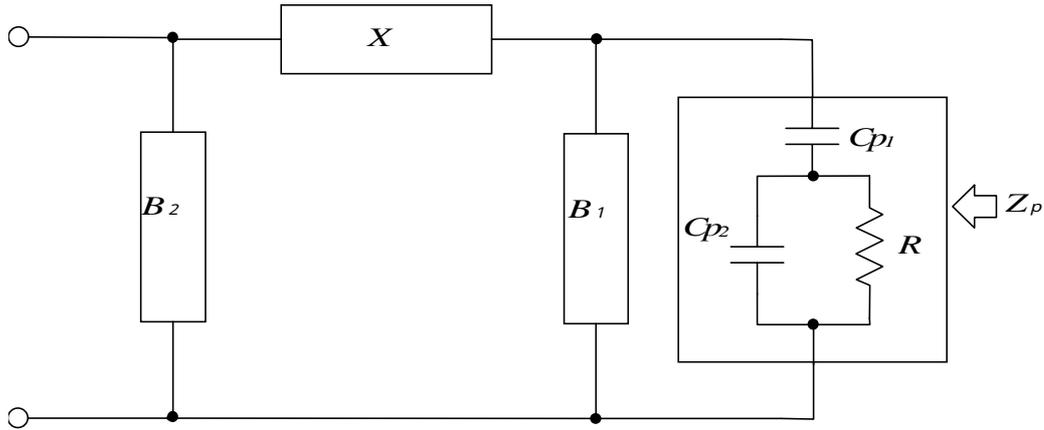


図 3-4-1：整合回路のリアクタンス、サセプタンス図

この回路の合成インピーダンスの計算を示す。

$Z_p$  を放電セルのインピーダンスとすると のようになる。

$$Z_p = \frac{\frac{1}{R}}{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + (\omega C_{p2})^2} + j\left(\omega C_{p1} - \frac{\omega C_{p2}}{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + (\omega C_{p2})^2}\right) \dots\dots\dots$$

次に  $B_1$  を加えるために、インピーダンス  $Z_p$  をアドミタンス  $Y_p$  に直す。  $Y_p$  に  $B_1$  を加えたものを  $Y_1$  とおくと が  $Y_1$  の式である。

$$Y_p = \frac{1}{Z_p}$$

$$Y_1 = Y_p + jB_1 \dots\dots\dots$$

同様に  $X$  を加えるために、アドミタンス  $Y_1$  をインピーダンスに直す。  $Y_1$  に  $X$  を加えたものを  $Z_1$  とおくと が  $Z_1$  の式である。

$$Z_1 = \frac{Y_p}{Y_p^2 + B_1^2} + j\left(X - \frac{B_1}{Z_p^2 + B_1^2}\right) \dots\dots\dots$$

$B_2$  を加えるために、インピーダンス  $Z_1$  をアドミタンスに直す。その値と  $B_2$  を加えたものを  $Y_{all}$  とおくと が  $Y_{all}$  の式である。

$$Y_{all} = \frac{\frac{Y_p}{Y_p^2 + B_1^2}}{\left(\frac{Y_p}{Y_p^2 + B_1^2}\right)^2 + \left(X - \frac{B_1}{Y_p^2 + B_1^2}\right)^2} - j \frac{\frac{Y_p}{Y_p^2 + B_1^2}}{\left(\frac{Y_p}{Y_p^2 + B_1^2}\right)^2 + \left(X - \frac{B_1}{Y_p^2 + B_1^2}\right)^2} + jB_2 \dots\dots\dots$$

式から、全体のアドミタンスが計算できた。最後にアドミタンス  $Y_{all}$  をインピーダンスに直す。その値を  $Z_{all}$  とした。 が  $Z_{all}$  の式である。

$$Z_{all} = \frac{1}{Y_{all}} \dots\dots\dots$$

$Z_{all}$ の実部が 50、虚部が 0 になれば、負荷側のインピーダンスが、ケーブル、及び電源と整合する。

放電セルが容量性であることから、 $X$  は正の整合用インダクタであるコイルである。本研究のテーマは小型化であるため、コイルはできるだけ小さくしたい。数  $\mu\text{H}$  のコイルならそれほど大型にはならないため、 $L=3.5 \mu\text{H}$  とし、 $X = L(\omega = 2\pi f, f = 13.56\text{MHz})$  から、リアクタンス  $X = 300$  とした。

$Z_{all}$  にプラズマインピーダンスの実部である  $R = 70 \text{ k}$ 、直列合成容量が  $7.5\text{pF}$  になるように振り分けた 2 つの容量  $Cp_1$ 、 $Cp_2$ 、固定リアクタンス  $X = 300$  を代入すると  $B_1$ 、 $B_2$  の値が決定される。計算結果を表 3-4-1 に表記する。

表 3-4-1：整合回路、サセプタンス計算結果

$Cp_1:Cp_2$	$Cp_1$ [ F ]	$Cp_2$ [ F ]	$B_1$	$Cb_1$ [ F ]	$B_2$	$Lb_2$ [ F ]
1:1	1.50E-11	1.50E-11	1.97E-03	2.31E-11	-1.15E-01	1.02E-07
2:1	2.25E-11	1.13E-11	1.33E-03	1.56E-11	-1.20E-01	9.79E-08
1:2	1.13E-11	2.25E-11	2.29E-03	2.69E-11	-1.16E-01	1.01E-07
1:3	3.75E-11	9.38E-12	5.00E-05	5.87E-13	-1.17E-01	1.00E-07
3:1	9.38E-12	3.75E-11	2.45E-03	2.88E-11	-1.17E-01	1.00E-07

$Cp_1$ 、 $Cp_2$  はそれぞれ放電空間とガラスのコンデンサー容量である。 $B_1$  の値は正であることからコンデンサーで実現できる。 $Cb_1$  は  $B_1$  に必要な容量を示す。 $B_2$  の値は負であることからインダクタが必要である。 $Lb_2$  は  $B_2$  に必要な自己インダクタンスを示す。

以上の結果から  $B_1$  は約  $0 \sim 30 \text{ pF}$  のバリアブルコンデンサーで調整可能である。 $B_2$  は負になることからインダクタが必要であるが、コイルの自己インダクタンスの可変は困難である。そこで一定のリアクタンスのコイルとバリアブルコンデンサーを使用し全体で可変させる。

コイルとコンデンサーを直列に繋ぐと共振して電圧が上がり、コンデンサーの極板間で放電する恐れがある。しかし並列でこのインピーダンスを得るには非常に大きな容量が必要であり、現実的ではない。

コイルとコンデンサーを直列に繋いだ場合、コイルを大きくすればコンデンサー容量は少なくてすむが、本研究のテーマは小型化ということから、使用す

る整合回路もできるだけ小さくしたい。よって、物理的に大きな素子を使用するのは避けたい。また  $B_2$  は電源側なので共振させなければ電圧はあまり高くない。そのためコンデンサーなら大容量にしても物理的な大きさはたいして変わらない。そこで共振する危険はあるが  $B_2$  はコイル  $1.5 \mu\text{H}$ 、 $0 \sim 150\text{pF}$  の可変コンデンサーを直列に繋ぐことにより制御することとした。

以上の計算結果から導き出した、整合回路図を図 3-4-2 に示す。

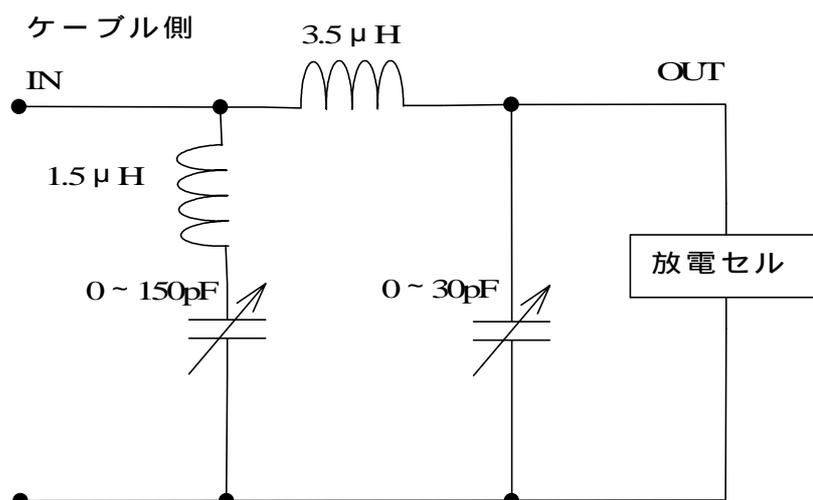


図 3-4-2 : 設計した整合回路図

必要な素子の値を求めることができ、整合回路の設計は完了した。

### 3-5 整合回路の作製

3-4 にてそれぞれ必要な素子の値を計算することができた。よって次はそれぞれの素子を作製し、整合回路を作る。

#### 3-5-1 コイルの作製

整合回路に必要なコイルは 2 つで、自己インダクタンスは  $3.5 \mu\text{H}$ 、 $1.5 \mu\text{H}$  のものである。コイルの自己インダクタンスは巻数、半径の 2 乗に比例し長さに反比例する。本研究の目的は装置を如何に小さくするかが目的になっていることから、長さ、半径はなるべく小さくしたい。よってこの 2 つの要素はある程度固定し巻数を変化させることにより必要なインダクタを作製することとした。

有限長単層ソレノイドコイルの自己インダクタンス  $L$  は

$$L = \frac{K\mu_0 N^2 \pi a^2}{l}$$

透磁率：  $\mu_0 = 4 \times 10^{-7}$  巻数：  $N$  半径：  $a$  長さ：  $l$

長岡係数：  $K$  (長岡係数は長さが、半径に比べてあまり長くない場合に生じる磁束の漏れをあらわしたもので、 $2a/l$  の関数である。0 に近づくにつれ大きくなる) と表されるから<sup>(3)</sup>  $L=3.5 \mu\text{H}$  の場合、現実的に扱いやすい程度の半径 2.5cm、長さ 8cm とし

$$\frac{2a}{l} = 0.6$$

長岡係数  $K=0.9$  を代入した結果、巻数  $N$  11 となった<sup>(3)</sup>。これならば問題なく製作することができる。

同様に  $L=1.5 \mu\text{H}$  の場合、半径は同様に 2.5cm、長さを 5cm とし

$$\frac{2a}{l} = 1$$

から、長岡係数  $K=0.8$  を代入した結果、巻数  $N$  6.1 となった<sup>(3)</sup>。こちらについても問題なく製作できると考えられ、コイルは以上の寸法と巻数で作製することとした。

直径 5cm の円筒に、直径 1mm の銅線をまきつけ、円筒を抜いて作製した。

図 3-5-1 の (a) が  $3.5 \mu\text{H}$ 、(b) が  $1.5 \mu\text{H}$  のコイルである。



(a)  $3.5 \mu\text{H}$  コイル



(b)  $1.5 \mu\text{H}$  コイル

図 3-5-1 : コイル写真 (a) $3.5 \mu\text{H}$  (b) $1.5 \mu\text{H}$

次に LCR 共振回路で自作したコイルの自己インダクタンスを測定した。回路図を 3-5-2 に示す。

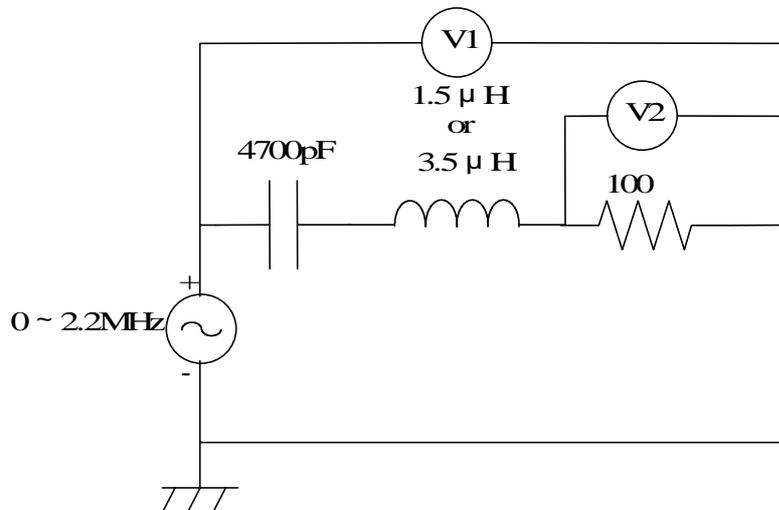


図 3-5-2 : LCR 共振回路図

V1、V2 はオシロスコープに繋がっている。V1 で LCR の直列電圧を測定し、V2 で抵抗の電圧を測定する。コイルとコンデンサーが共振するとき、V1 と V2 は等しくなる。共振条件は

$$\frac{1}{\omega C} = \omega L$$

$$= 2\pi f$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{CL}} \quad \text{である。}$$

この実験では発振器の周波数を変化させることにより共振周波数を測定したが、発振器の最大周波数は 2.2 MHz であったため、コンデンサーは表示値 4700pF を用いて、計算上 3.5 μH では約 1.2MHz で、1.5 μH では約 1.9MHz で共振が取れるように実験を行った。

実測した共振周波数を表 3-5-1 に示す。

表 3-5-1 : コイル共振周波数測定表

コイル[μH]	共振周波数[MHz] (計算値)	共振周波数[MHz] (実験値)	測定コイル値[μH]
3.50	1.24	1.19~1.27	3.34~3.80
1.50	1.89	1.92~2.03	1.31~1.46

オシロスコープでV1、V2の電圧の位相、ピークを見て共振周波数を測定したが、オシロスコープの位相表示値は常に変化し、一定にならないことから共振周波数を一つに絞ることは不可能であった。そのため目測で、共振していると見られた範囲を共振周波数の実験値とした。

設計値  $3.5 \mu\text{H}$  のコイルの共振周波数はある程度計算値と似通っていたが、設計値  $1.5 \mu\text{H}$  のコイルの共振周波数は計算値より高く、コイルの自己インダクタは小さくなっていた。しかし  $1.5 \mu\text{H}$  のコイルは、コンデンサーを直列に繋ぎサセブタンスを可変させるため、それほどの精度は要求されない。よってコイルはそのまま用いることにした。

### 3-5-2 バリابلコンデンサーの作製

電源側のバリابلコンデンサーはコイルと直列に繋いで使用することから共振させないために高い可変精度が必要である。よって図 3-5-3 の市販品を使用した。



図 3-5-3 : バリابلコンデンサー写真

このバリابلコンデンサーは極板を回転させ面積を変化させることにより  $0 \sim 150\text{pF}$  まで可変可能なものである。

放電セル側のコンデンサーは高電圧になり高耐圧が必要であり、また  $0 \sim 30\text{pF}$  の小容量であることから自作することにした。構造図を図 3-5-3 に示す。

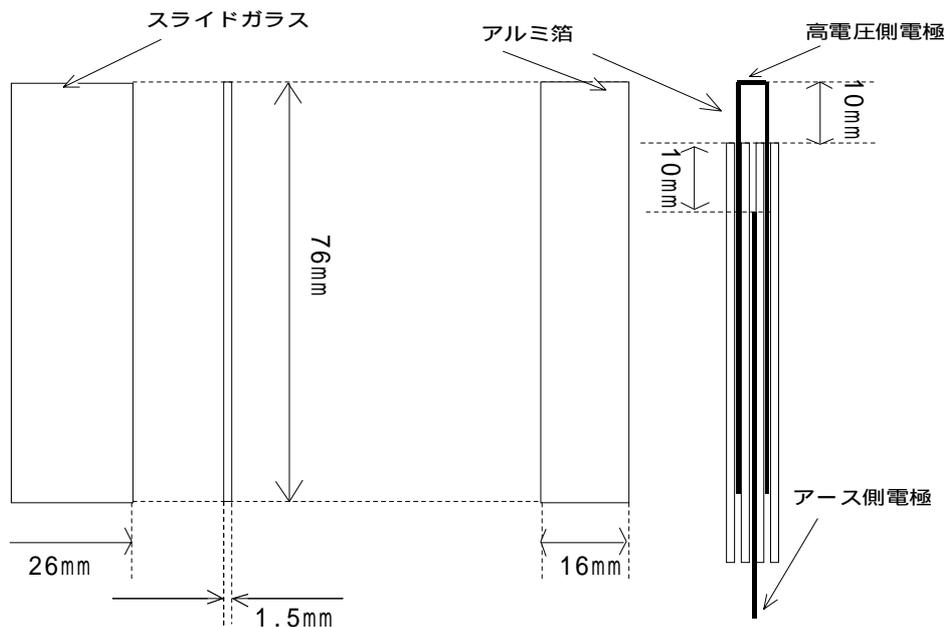


図 3-5-5 : バリابلコンデンサー構造図

極板間を空気にした場合、耐圧が低く極板間で放電する恐れがある、また比誘電率が 1 ということから大型になってしまう。よって極板間には高耐圧で、比誘電率が高い(3~5 程度<sup>(3)</sup>)ガラスを使用した。極板の面積は図面から  $8.8\text{cm}^2$  で、高圧側の極板はコの字型になっていることから、その 2 倍の面積となる。また極板間距離は  $B_1 1.5\text{mm}$  ということから、コンデンサー容量は

$$C = \epsilon \frac{S}{d}$$

より  $\epsilon$  を 3 として計算すると  $C = 32\text{pF}$  となる。計算上は必要な容量が得られる。これが実際に作製したコンデンサーの写真を図 3-5-6 に示す

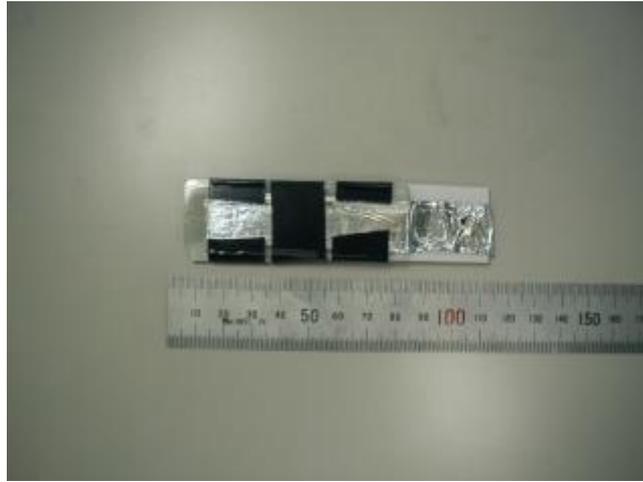


図 3-5-6 : 32pF 自作バリャブルコンデンサー写真

完成後の大きさは、縦が約 3cm、横が約 10cm となった。アース側極板部分のガラス間に、コの字型のテフロン樹脂をはさみ、極板を固定できる構造をとった。

次にコイルと同様、LCR 共振回路で自作したコンデンサー容量を測定する。測定回路を図 3-5-7 に示す。

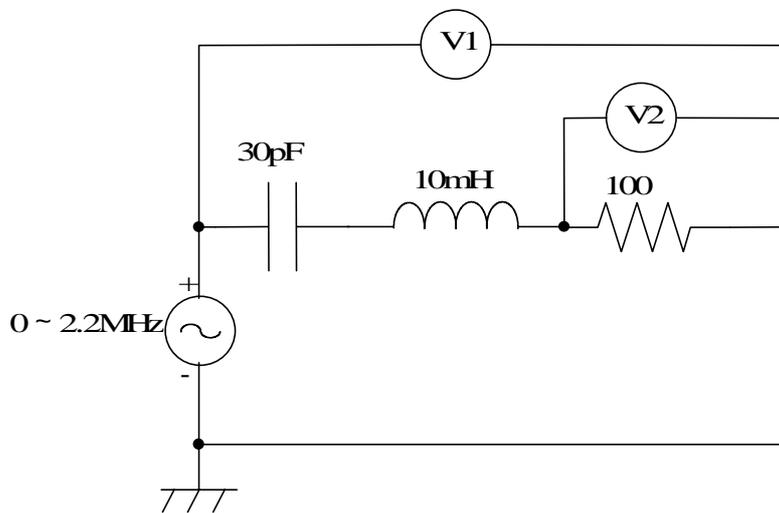


図 3-5-7 : L C R 共振回路図

原理は 3-5-1 のコイル測定と同様である。

作製したコンデンサーが 32pF とすると、既知のコイル 10mH とはコンデンサーは 290kHz で共振する計算である。実験結果を表 3-5-2 に示す。

表 3-5-2：コンデンサー共振周波数測定表

コンデンサー[pF]	共振周波数[kHz] (計算値)	共振周波数[kHz] (実験値)	測定コンデンサー容量[pF]
32	290	280~289	30.3~32.3

コイルと同様に共振周波数を一つに絞ることは不可能であった。必要な最大コンデンサー容量は 30pF である。測定値は 30pF を上回っていることから、放電セル側コンデンサーは、この自作品を用いることとした。

### 3-5-3 整合回路の組み立て

整合回路に必要な素子の作製は全て完成した。よって素子を接続し、整合回路を作製する。設計図を 3-5-8 に示す

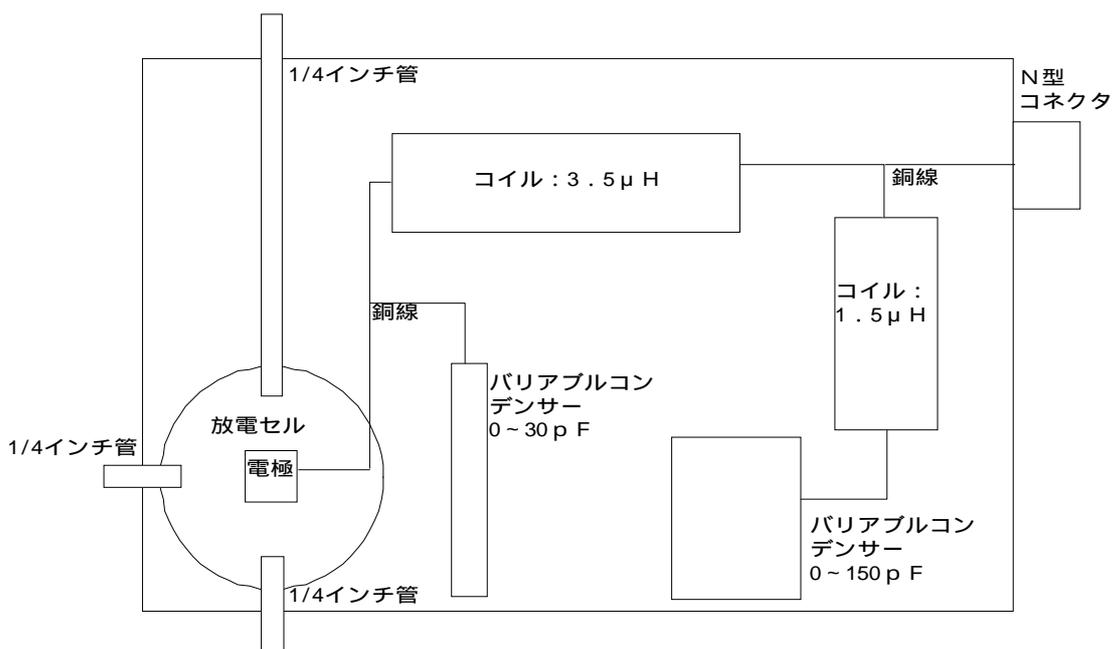


図 3-5-8：整合回路設計図

それぞれの素子を並べてみた結果縦 20cm、横 30cm の箱に収まる。高周波で放電する場合、素子から電磁波が発生するため、通常は導体の中に回路を作製しシールドする。シールドに最もよく使われているのはアルミである。しかしアルミよりも加工しやすく、絶縁性にも優れているダンボールをアルミ箔でコ

ーティングし、上部には金網を被せることで、電磁波を遮断することにした。

整合回路の出力から長い同軸ケーブルで放電セルに給電した場合、ケーブルで電力が損失されるのみならず、整合条件が狂ってしまう。よって、ケーブルを使用せず、放電セルを整合回路の内部に組み込んだ。

作製後、導通、絶縁、及びアースのチェックをした。これらのチェックは感電する恐れがあるため、入念に行った。

### 3-6 整合実験

作製した装置に RF 源、ロータリーポンプ、真空計を繋ぐ。RF 電源と整合回路 放電セルの接続ケーブルには 50 の同軸ケーブル（型番：RG-58 A/U）を使用する。放電セル部分の電圧を測定するため、電極部分に高圧プローブ（内部抵抗 50M 、コンデンサー容量 6pF）を繋ぐ。ロータリーポンプで真空を引き、クリスタル真空計で圧力を確認する。放電セルには図 3-6-1 のようなバルブが二つついておりそのうち、(a)側で放電セル内の圧力を調整し、(b)側でガスの注入を開閉する。またこちら側で流量を調整する。



(a) 圧力調整用バルブ



(b) ガス流量調整、開閉用バルブ

図 3-6-1 : バルブ写真 (a) 圧力調整用 (b) 流量調整開閉用

RF 電源のメインスイッチを入れ入力電力を調整しつつ整合を調整する。電源側のサセプタンスは、共振条件よりコンデンサーが約 90pF で共振してしまう。このサセプタンスは負なので、90pF よりも小さい容量にしておく必要があることから、対向する極板面積を半分にし、おおよそ 75pF を初期値とした。回路図を図 3-6-2 に示す。

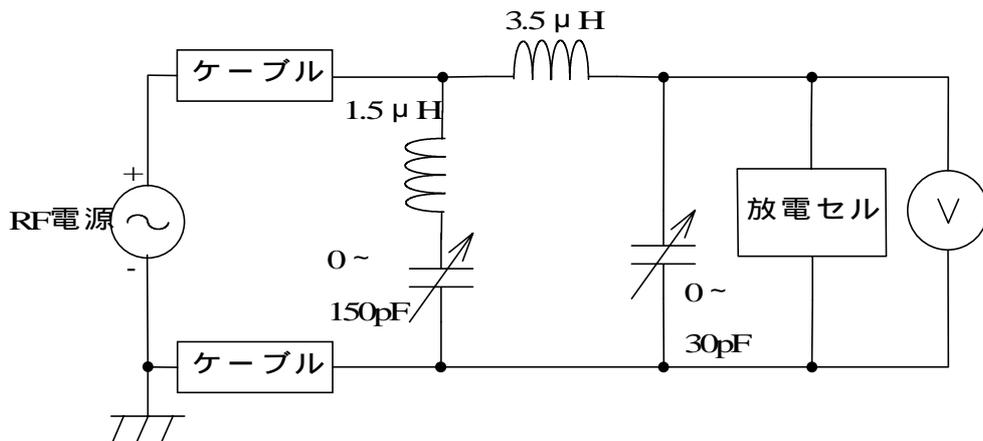


図 3-6-2：整合実験回路図

なおこの実験目的は実際にこの回路で整合可能かどうかの見極めることにある。

### 3-7 整合実験結果

ガスは大気を使用し、圧力はプラズマインピーダンス測定の計算に使用した 300Pa で行った。

放電セル側のバリャブルコンデンサーで電圧を調整してみたところ、コンデンサー容量を最大にしても、放電開始電圧は得られなかった。高圧プローブのコンデンサー容量を加えると、共振させるために必要な容量は少なくとも 36pF 以上であることが解った。そこで、放電セル側に固定容量のコンデンサーを追加することにした。

全く同じ極板面積で可変性を持たないコンデンサーを、放電セル側に並列に追加することにより、容量を増加させた。回路図を図 3-7-1 に示す

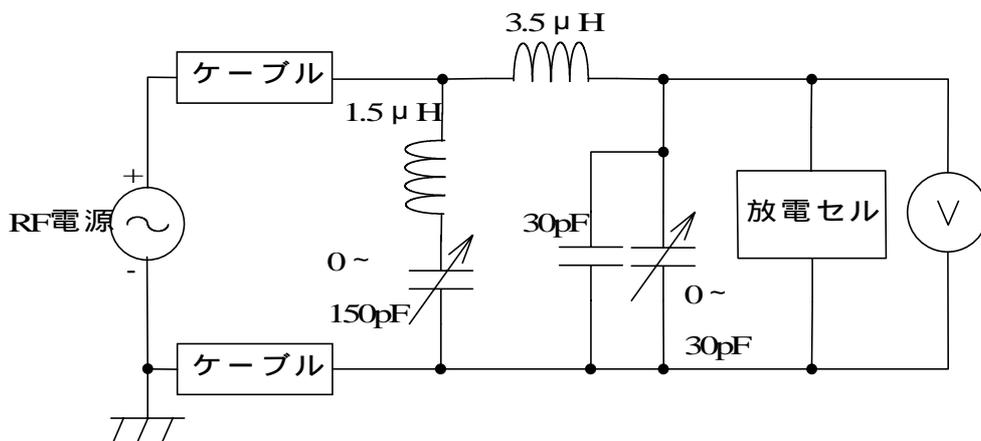


図 3-7-1：放電セル側にコンデンサーを追加した整合回路図

放電セル側のコンデンサーを増加させていくと、1/4 ほど電極を入れた所で電圧が最大値となった。よって共振させることはできた。放電セル側のコンデンサーを固定したまま、電源からの電力を増やしていくと、入力 30W、反射 13W、約 850V で放電が開始した。図 3-7-2 が放電の写真である。



図 3-7-2：300Pa、出力 12W の放電写真

放電後、電源側のバリャブルコンデンサーで反射を制御した。初期値よりも極板面積を増加させると反射が増加していった。よって初期値より極板面積を減らしていったところ、徐々に反射が減少していき最終的には 0W となり整合は取れた。完成した装置の写真を図 3-7-3 に示す。

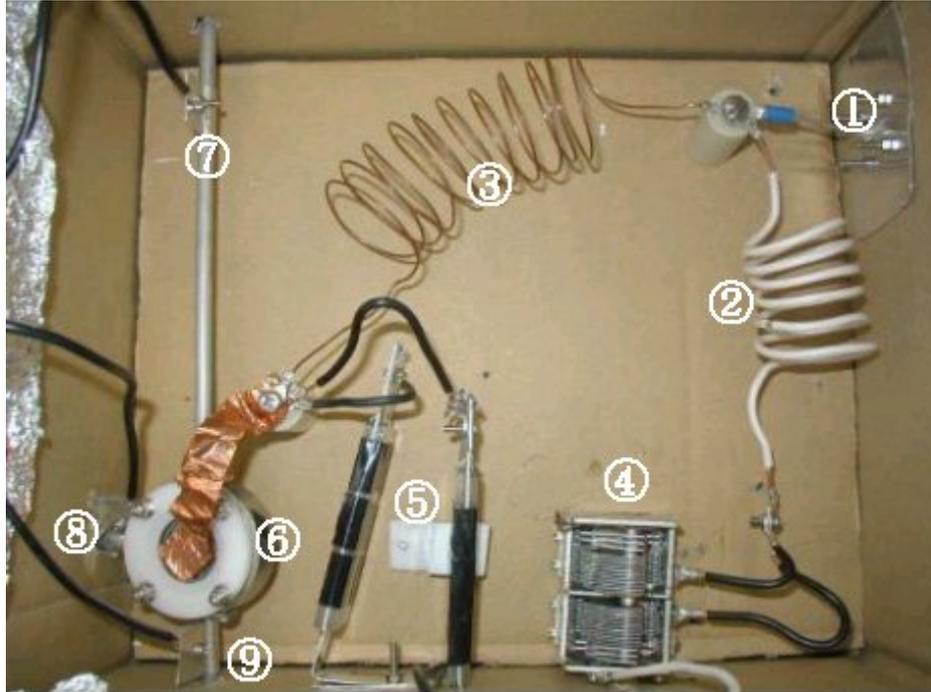


図 3-7-3：作製した放電セル、整合回路写真

～ はそれぞれ ：電力の入力部分、 ：コイル  $1.5 \mu\text{H}$ 、 ：コイル  $3.5 \mu\text{H}$ 、  
 H、 ：バリャブルコンデンサー  $150\text{pF}$ 、 ：バリャブルコンデンサー  $60\text{pF}$ 、  
 放電セル、 ：真空計への配管、 ：ロータリーポンプへの配管、 ：ガス  
 の注入口への配管、をそれぞれ表している。

この装置で整合は取れたので整合回路は完成とした。

### 3-8 まとめ

整合回路の作製は、放電セルのプラズマインピーダンスの目安を測定することが最も重要と考えられる。整合回路製作の手順として、まず放電セルの等価回路を考える。そして何らかの方法で放電させ、プラズマインピーダンスを測定する。その値をもとに、整合回路のリアクタンス、サセプタンスを計算し、それぞれに対応した素子を用意する。整合実験では、まず放電セル側のサセプタンスで電圧の調整を行い、最大値となる部分で電力を入れていく。プラズマの発生後、電源側のサセプタンスで反射を制御する。この手順ならば、どのような放電セルを使用したとしても、高周波用の整合回路は作製可能であると考えられる。

## 第四章 放電特性の計測

### 4-1 はじめに

本章では、作製した装置を使用し、長時間放電した場合の放電セルの温度変化、及び注入するガスを変え、ガスによる放電特性を測定する。

### 4-2 放電による放電セルの温度変化

この装置は後にプラズマ CVD、エッチング装置として使用する。そのためには長時間にわたり放電する必要がある。長時間放電させることによって、放電セルの温度が上昇した場合、ガラス部分が割れる恐れがある。よって長時間放電させ、放電セルの温度変化を測定することにした。

圧力は前回放電を確認することができた 300Pa でおこなった。電源からの出力は入射 12W、反射 0W とした。これより電力を下げた場合、プラズマの発生に偏りが見られるためである。放電を開始した瞬間から 5 分毎に放電セルの温度を放射温度計で測定する。放射温度計では金属部分の温度が測定できないので、放電セルに黒のビニールテープを貼り、その部分の温度を測定することにした。測定結果を図 4-2-1 に示す。

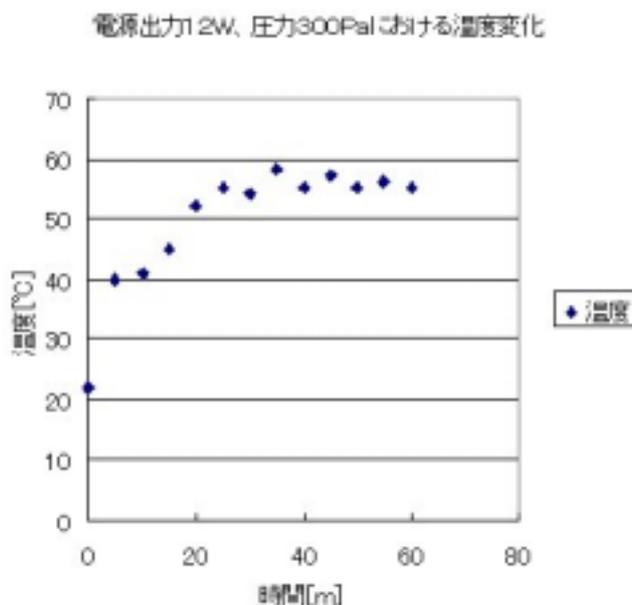


図 4-2-1：放電による温度の時間変化

0～20分にかけて温度は上昇していったが、それ以降の温度はほとんど一定であった。一定になってから40分間、計60分測定したが、たいした温度変化は見られなかったため、出力12Wならば長時間の放電も特に問題は無いと考えられる。

### **4-3 放電電圧、電力及び発光スペクトルの特性**

空気とアルゴンで放電電圧、電力、及び発光スペクトルを測定する。アルゴンの発光スペクトルでは空気で見られたスペクトルが発光していないかどうか調べ、放電セルのリークを確認する。

#### **4-3-1 実験装置と手順**

回路は図3-7-1と同じである。発光のスペクトルを測定するため放電セルの近くに分光器を設置する。分光器はマルチチャンネル型(Ocean Optics社のUSB2000)を使用した。この分光器は入口スリットから入射された光をコリメイトミラーで収束し、その光を回折格子に入射させることにより波長を分散させ、CCD(入力された光の明暗に比例した電流を発生させる素子)ポートに入力させることにより測定する<sup>(4)</sup>。使用した分光器では200～1100×10<sup>-9</sup>mまでの波長を分光することが可能である。

実験手順は放電が開始できる、最も低い圧力を測定する。その値から圧力を変化させ、測定圧力ごとに放電を発生させる。目で見て放電が安定した圧力で、分光器を使い光のスペクトルを測定する。

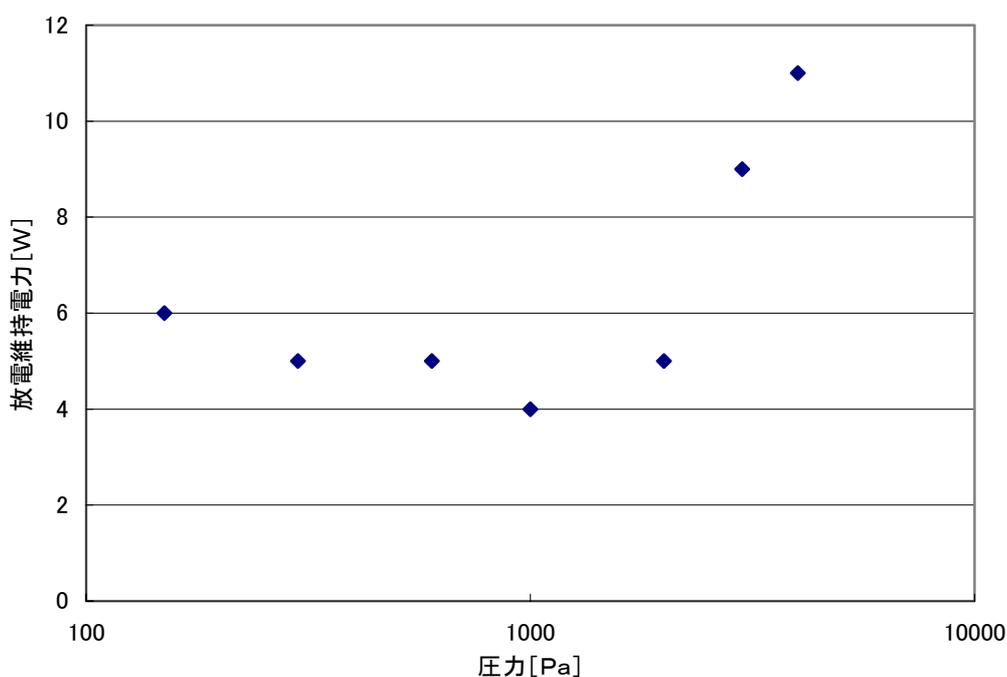
オシロスコープに表示される波形のピークから電圧を読み取る。プラズマが発生していない場合、オシロスコープには約13.56MHzの正弦波が表示される。プラズマが発生した瞬間、一瞬波形が乱れるがすぐにもとの正弦波に戻る。乱れた後、もとの戻った正弦波のピークから電圧を読み取る。その値を放電開始電圧とする。

放電開始後、整合をとり電源からの出力を小さくしていく。放電が消える寸前の波形のピークをオシロスコープから目測で読み取る。その値を放電維持電圧とする。それと同時に電源の電力表示値から電力を読み取る。その値を放電維持電力とする。

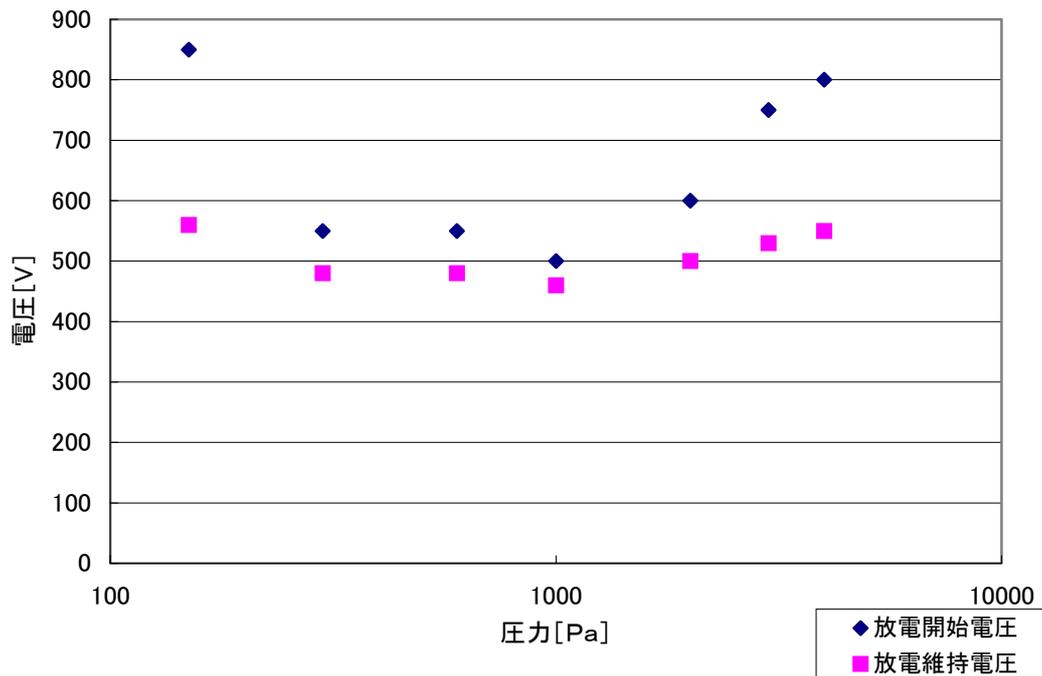
### 4-3-2 空気の放電特性

空気を流しながら真空排気して圧力を 100 ~ 150Pa に調整し、高周波を入力すると、150Pa ではプラズマが発生し、また発生後整合もとれたが、それ以下の圧力では電源の出力を最大値にしてもプラズマの発生は確認できなかった。また、放電セル側のコンデンサーの極板間で放電が起きたため、それ以上の実験は行わなかった。よって大気による最低放電可能圧力は 150Pa とした。この圧力以上で放電特性を測定することとした。

一方、圧力を徐々に高くして実験を行っていくと 4000Pa まではプラズマが発生し整合が取れたが、それ以上の圧力ではプラズマが発生しなかったため、測定圧力は 4000Pa までとした。放電開始電圧、放電維持電圧、放電維持電力の測定結果を図 4-3-1 に示す。



(a) 空気による放電維持電圧測定結果



(b) 空気による放電開始電圧、放電維持電圧測定結果

図 4-3-1：空気による放電特性測定結果 (a)放電維持電力 (b)放電電圧

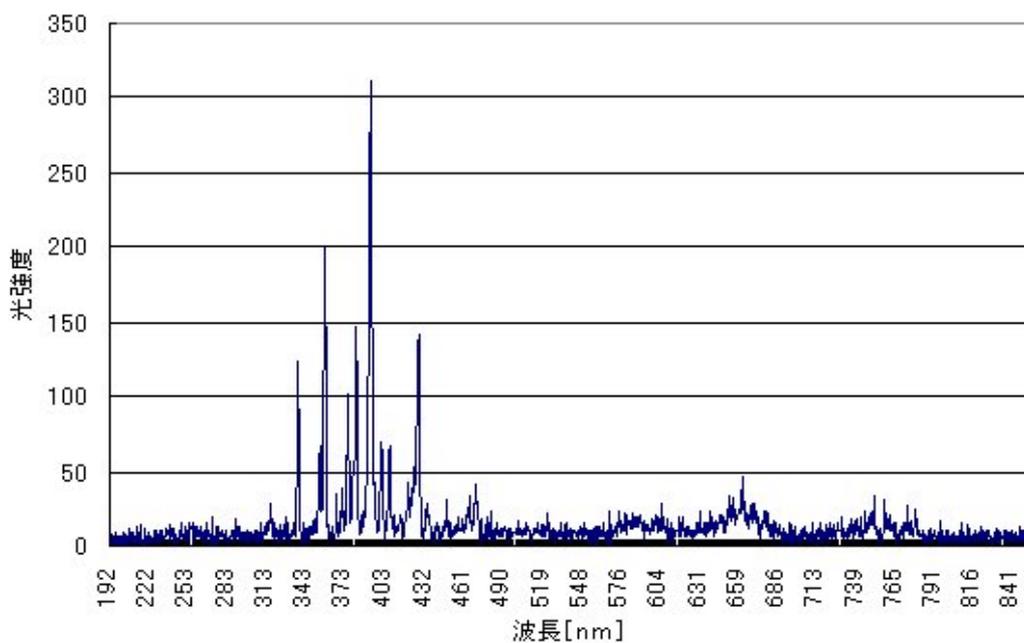
(a)は放電維持電力のグラフである。横軸は圧力、縦軸は電力を表している。150～1000Pa まで放電維持電力は減少し、それ以上の圧力になると増加した。

(b)は放電開始電圧、及び放電維持電圧のグラフである。放電維持電力の結果と同様に、150～1000Pa まで電圧は減少していき、それ以上の圧力になると増加していった。また、グラフから極板間距離が一定である圧力まで電圧が下がり、それ以上になると電圧が上がる現象から、パッシェンの法則と似た結果が得られた。

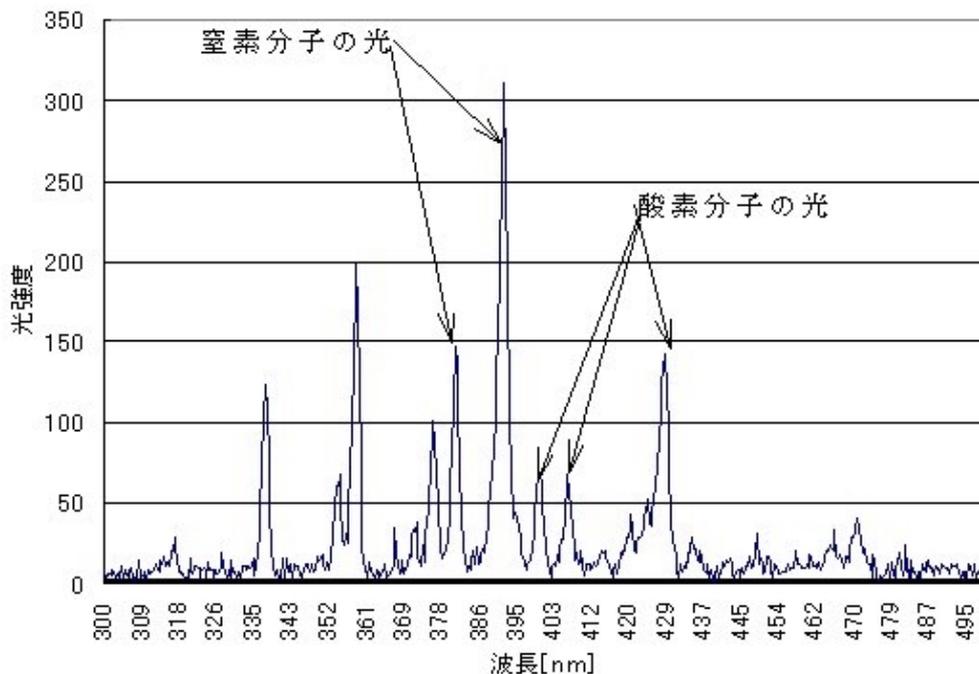
### 4-3-3 空気の発光スペクトル

4-2 項の実験で、出力 12W ならば長時間放電させても装置が壊れないことが確認できたので、電源の出力は 12W で一定にし、プラズマが綺麗に見える圧力を調べた。300Pa、600Pa のプラズマが、電極の下に均一に広がっており綺麗にみえた。300Pa 未満の圧力では整合も取りにくく、電極の角にプラズマが集中して発生するなど、安定しているように見えなかった。また 1000Pa 以上の測定値においても同様の結果が得られた。300Pa と 600Pa のプラズマを見比べてみた結果、300Pa の方がより均一にプラズマが発生しているように見えた

ので、この圧力がスペクトルの測定値に最適であると判断した。よって空気の発光スペクトル測定は、電源出力 12W、300Pa で行った。空気の発光スペクトルの測定結果を図 4-3-2 に示す。



(a) 空気の発光スペクトル (190 ~ 860nm)



(b) 空気の発光スペクトル (300 ~ 500nm)

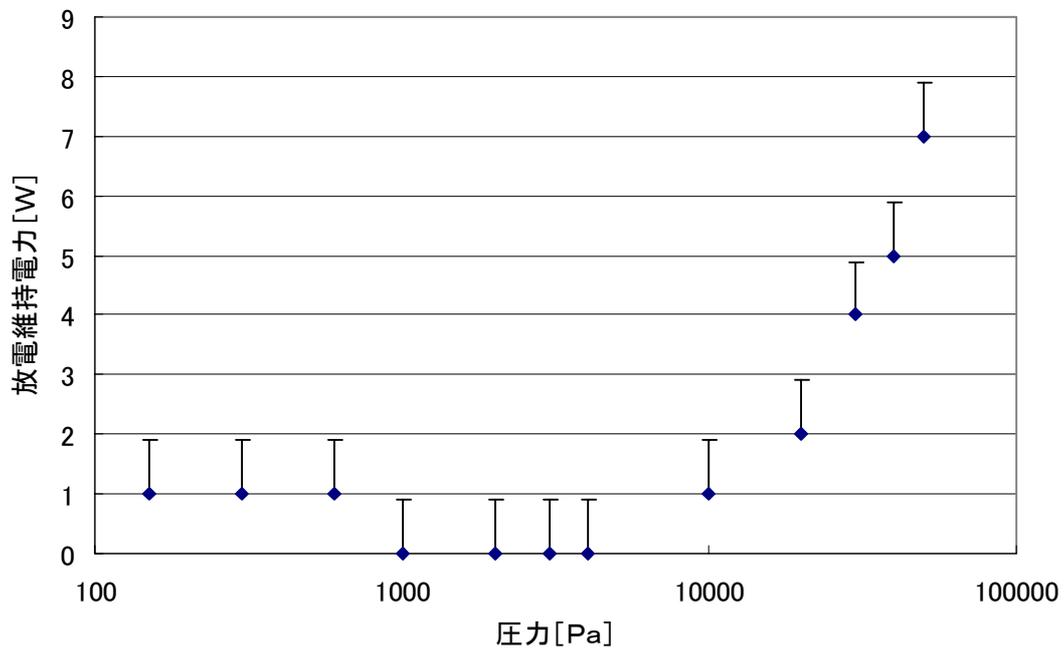
図 4-3-2: 出力 12W、圧力 300Pa における空気の発光スペクトル (a)180 ~ 860Pa  
(b)300 ~ 500nm

(a)は電源出力 12W、空気の 300Pa における放電の発光スペクトルである。300 ~ 500nm に強い光が測定された。

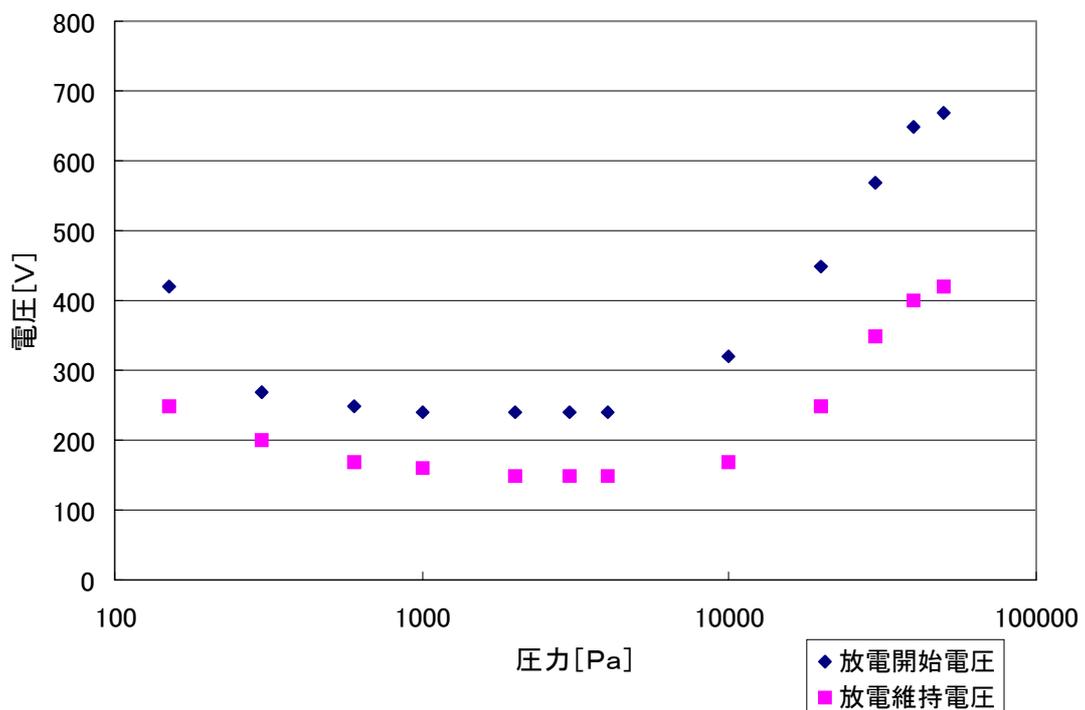
(b)が 300 ~ 500nm 分を拡大したグラフである。空気を注入していることから窒素分子と酸素分子の波長が確認できるはずである。文献<sup>(5)</sup>と照らし合わせた結果、グラフに記入した部分が窒素と酸素の光であることが確認できた。

#### 4-3-4 アルゴンの放電特性

アルゴンによる放電特性を測定する。圧力は大気と同様に 150Pa から測定することにした。圧力を徐々に高くして実験を行っていくと 50000Pa まではプラズマが発生し整合が取れたが、それ以上の圧力ではプラズマが発生しなかったため、測定圧力は 50000Pa までとした。放電開始電圧、放電維持電圧、放電維持電力の測定結果を図 4-3-3 に示す。



(a) アルゴンによる放電維持電力測定結果



(b) アルゴンによる放電開始電圧、放電維持電圧測定結果

図 4-3-3 : アルゴンによる放電特性測定結果 (a)放電電力 (b)放電電圧

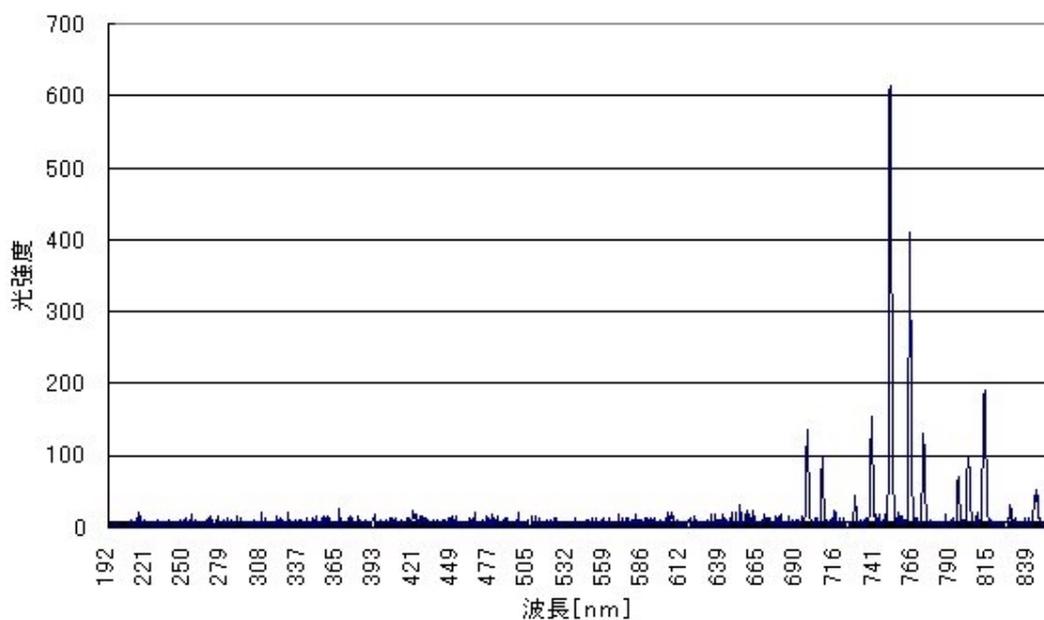
図 4-3-3 (a) は放電維持電力のグラフである。横軸は圧力、縦軸は電力を表している。150 ~ 4000 Pa までの電力は減少していった。1000 ~ 4000 Pa の間で、放電維持電力が 0W となった。使用した電源の出力電力の表示は 1W 未満になると切り捨てられる。そのため 1000 ~ 4000 Pa の間では 1W 未満となり 0W と表示されたと考えられる。よって、電力の有効範囲はプロットされた点(表示値) + 1 未満となる。4000 Pa 以上の圧力になると、空気と同様に放電維持電力は増加していった。

(b) は放電開始電圧、及び放電維持電圧のグラフである。放電維持電力の結果と同様に、150 ~ 4000 Pa まで電圧は減少していき、それ以上の圧力になると増加していった。アルゴンについても空気と同様に、パッシェンの法則に似た結果が見られた。

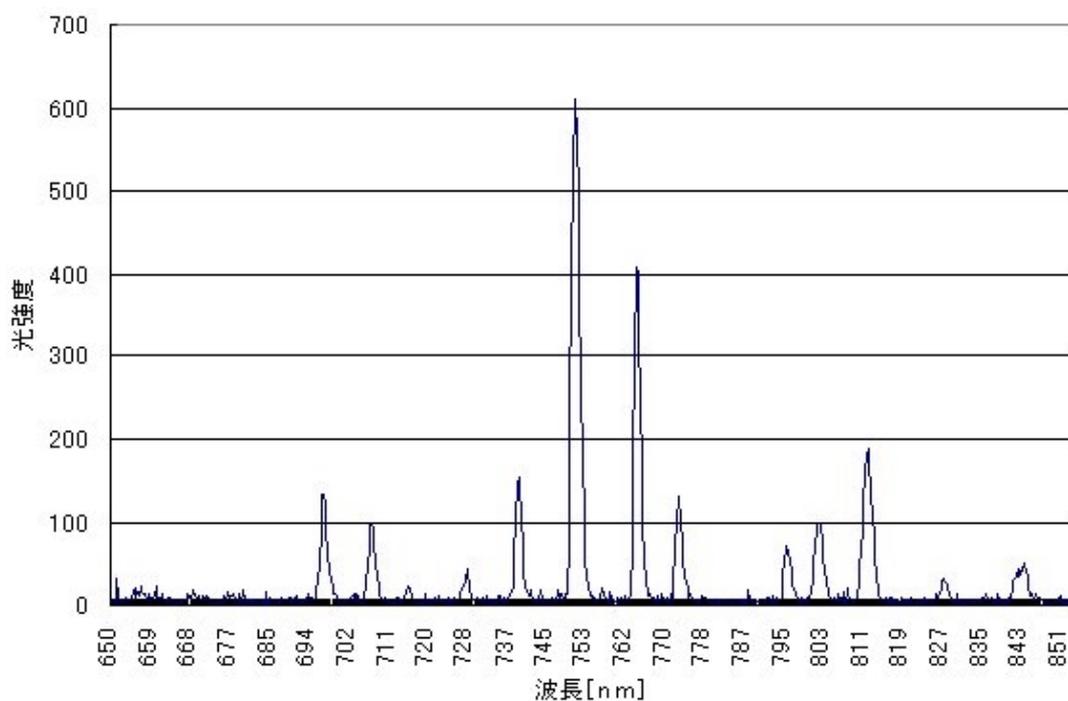
#### 4-3-5 アルゴンの発光スペクトル

アルゴンは空気に比べてプラズマが発生しやすく、3W 程度で、見た目空気と同じぐらいの発光がみられた。よって電源の出力は 3W で一定にし、空気と同様にプラズマが均一に広がっている圧力を調べた。300 ~ 4000 Pa のプラズマが均一に広がっているように見えた。

300 Pa 未満の圧力では空気と同様に整合も取りにくく、電極の角にプラズマが集中して発生するなど、安定しているように見えなかった。また 10000 Pa 以上の測定値においても同様の結果が得られた。目で見て 300 ~ 4000 Pa のプラズマを見比べてみた結果、目立った違いは見られなかったが、600 Pa のプラズマが最も均一に広がっているように見えたため、この圧力がスペクトル測定に最適であると判断した。よってアルゴンの発光スペクトル測定は電源出力 3W、圧力 600 Pa で行った。アルゴンの発光スペクトルの測定結果を図 4-3-4 に示す。



(a) アルゴンの発光スペクトル (190 ~ 860nm)



(b) アルゴンの発光スペクトル (650 ~ 860nm)

図 4-3-4 : 電源出力 4W、圧力 600Pa におけるアルゴンの発光スペクトル  
(a)190 ~ 860nm (b)650 ~ 860nm

(a)は電源出力 3W、アルゴンの 600Pa における放電の発光スペクトルである。650 ~ 850nm に強い光が測定された。

(b)が 650 ~ 850nm 部分を拡大したグラフである。それぞれのピークを文献<sup>(5)</sup>と照らし合わせるとアルゴン分子の波長であることが確認できた。

空気では 300 ~ 500nm に強い光が見られたが、今回の測定ではそれらの光は確認できなかった。よってスペクトルに現れるようなリークは無い。

## 第五章 結論

本研究で得られた重要な工夫、実験の結果及び知見を以下に示す。

- (1)容積 1500mm<sup>3</sup>の放電セルを使用した高周波プラズマ装置を製作し、高インピーダンスに対応した整合回路を設計、製作した。
- (2)空気とアルゴンで放電を実行した。そして放電維持電力、放電開始電圧、放電維持電圧を測定した。空気では 150 ~ 4000Pa、アルゴンでは 150 ~ 50000Pa の圧力で測定を行った。アルゴンと空気を比較すると、アルゴンの方が約 1/5 程度の電力で放電可能であった。
- (3)空気とアルゴンの放電スペクトルを測定した。空気では 300Pa における放電が最も均一に見られたので、この圧力でスペクトルを測定した。実験結果から酸素と窒素の発光波長を確認した。アルゴンでは 600Pa における放電が最も均一に見られたので、この圧力でスペクトルを測定した。実験結果からアルゴンの分子発光の波長を確認した。
- (4)アルゴンの分光時に酸素と窒素の光が確認されなかったことからスペクトルを見る限りリークが無いことが確認できた。

### 今後の課題

- (1)放電セルの大きさに対して、作製した整合回路が大型になった。作製した素子が大型になったためである。全体的に小型化するために素子を作り直す必要がある。もしくは、整合回路を必要としないハイインピーダンスの電源を作製する。
- (2)作製した装置を使用しエッチング、成膜を行い、結果について評価する。

## 謝辞

今回の論文を結ぶにあたり、御親切な御指導、御鞭撻を賜りました高知工科大学工学部電子・光システム工学科 八田章光助教授に深い感謝の意を表します。

常日頃から直接的な御指導、並びに数々の御助力、御助言を頂いた高知工科大学大学院工学研究科基板工学専攻電子・光エレクトロニクスコース修士課程の富士敬司氏、吉村紘明氏、大橋渉氏に感謝の意を表します。

高知工科大学工学部電子・光システム工学科在学中に御指導頂いた原央学科長に心から感謝いたします。

高知工科大学工学部電子・光システム工学科在学中、本研究の実験遂行、各過程で終始御厚志、御協力頂いた高知工科大学工学部電子・光システム工学科、河津哲教授、神戸宏教授、武田光由実験講師、その他の先生方に重ねて感謝の意を述べさせていただきます。

また本研究を進めるにあたり御協力頂いた高知工科大学電子・光システム工学科、朝山淳哉氏、窪内健介氏、松久治可氏、その他の学部の方々に重ねて感謝の意を述べさせていただきます。

## 参考文献

- (1)菊地正典：「半導体のすべて」日本実業出版社、114、134 ページ(1998)
- (2)Michael A .Lieberman、Allan J .Lichtenberg：「プラズマ / プロセスの原理」日本半導体製造装置協会、280 ページ ( 2001 )
- (3)卯本重郎：「電磁気学」昭晃堂、276 ページ(1975)
- (4)澤田啓次：「卒業論文、四重極質量分析法と発光分光法を用いたプラズマ中のガス分析」高知工科大学、6 ページ ( 2001 )
- (5) R.W.B.Pearse ・ A.G.Gaydon The Identification Of Molecular Spectra、299、404、420 ページ