

東京大学大学院新領域創成科学研究科

複雑理工学専攻

2021 年度

修士論文

誘導結合プラズマ (Inductively Coupled Plasma : ICP) を用
いた観測衛星に搭載する小型参照光源の開発

(Development of the Light Source using Inductively Coupled
Plasma for Observation Satellites)

2022 年 1 月 25 日提出

指導教員 吉川 一朗 教授

楊 軼

目次

第1章 序章

- 1.1 宇宙空間での極端紫外線 (EUV) の観測
- 1.2 極端紫外線を観測した衛星と校正用光源
- 1.3 研究目的

第2章 誘導結合プラズマ (Inductively coupled plasma : ICP)

- 2.1 ICP の生成
- 2.2 ICP の発光
- 2.3 ICP 生成装置

第3章 小型誘導結合 (Inductively coupled plasma) 光源の開発

- 3.1 ICP 光源システムの構成
- 3.2 ICP 光源回路
- 3.3 小型 ICP 光源製作
 - 3.3.1 銅張積層板
 - 3.3.2 エッチング処理
 - 3.3.3 素子の実装

第4章 誘導結合プラズマ (Inductively coupled plasma) の諸特性

- 4.1 実験装置
- 4.2 発光強度と電力の関係
- 4.3 プラズマ着火エネルギー (Plasma initiation power : PIP) と周波数

第5章 小型誘導結合プラズマ (Inductively coupled plasma) 光源の性能評価及び改良

- 5.1 実験装置
- 5.2 小型 ICP 光源の性能評価

5.3 トランジスタ動作点の移動による出力向上

第6章 結論

参考文献

謝辞

第一章 序章

1.1 宇宙空間での極端紫外線 (EUV) の観測

太陽系内惑星は、惑星のもつ固有磁場の強さとプラズマの組成、自転運動によりそれぞれ特徴的な磁気圏を形成している。地球の場合、太陽風の影響を受け、磁気圏に蓄えられたエネルギーが解放されることで、オーロラの出現や磁気嵐・電離圏擾乱を引き起こす。このような自然現象は、長年、地球物理学者の興味をひきつけている。木星や土星においては、地球よりもはるかに強い固有磁場を持ち、惑星の自転速度が速いことも伴い、太陽風の影響は惑星近傍まで届かない。磁気圏プラズマが自転運動に近い角速度で共回転する領域（内部磁気圏）があるからである。さらに、木星の内部磁気圏を満たすプラズマの起源は衛星イオの火山にあり、硫黄、酸素やナトリウムを含む火山ガスが、電子衝突などを経てプラズマとなる。このプラズマが木星の固有磁場に捉えられ、磁場とともに惑星の周辺を自転し、イオの公転軌道に沿ってドーナツ状に分布している（イオ プラズマ トーラス）。このように惑星の磁気圏・大気圏に起こる機序を理解することは、地球環境がいかに特別なものかを理解させてくれる。さらに、太陽系や系外惑星系の形成・誕生・進化の理解にもつながるであろう。

惑星の磁気圏・大気圏の特性を研究するとき、極端紫外線（100～1000 Å）の波長領域によるリモートセンシングが有効である。その理由は、1. 磁気圏・大気圏に存在するイオンや原子は、極端紫外線波長域に輝線を持つ。例えば、水素、酸素イオン、ヘリウムイオン、硫黄イオンはそれぞれ 1216 Å、834 Å と 304 Å と 765 Å に輝線をもち（Nakamura et al. 1999; Yoshikawa et al. 2008; Yamazaki et al. 2002）、2. 天体物理学的相互作用の多くは、104 K から 106 K までのエネルギー等価温度で発生し、極端紫外線のエネルギー範囲内に遷移を生成する（Yamazaki et al. 1996）からである。図 1.1 は地球の内部磁気圏にある He イオンが、太陽光に含まれる波長 304 Å の光子のエネルギーを吸収し、再放出する現象（太陽共鳴散乱）を可視化したものである。地球周辺のプラズマ（ヘリウムイオン）の分布の様子が一望できる。

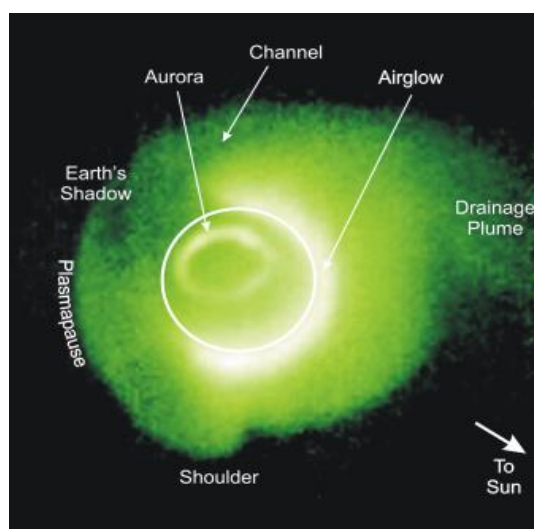


図 1.1. 地球の内部磁気圏にあるヘリウムイオンが発する波長 304 Å の極端紫外線を捉え、写真にした様子 (Sandel et al, 1999)。

1.2 極端紫外線を観測した衛星と校正用光源

惑星や遠くの天体から地球に降り注ぐ極端紫外線（EUV）は地球の大気（主に酸素分子）に吸収され、地上までは届かない。従って、EUV の観測は宇宙空間から行う必要がある。20 世紀末から、天体から放射される EUV を観測するため、水星探査機マリナー10号、天文衛星 EUVE、火星探査衛星「のぞみ」をはじめとする衛星が打ち上げられ、成果が得られている。2013 年には、日本が打ち上げた「ひさき」衛星が長期間に渡る惑星大気の観測を EUV 波長域で行い、2022 年現在でも観測を続け、成果を上げている。「ひさき」衛星は木星の衛星イオから流出する硫黄イオン、酸素イオンからなるイオプラズマトーラスの観測を継続的に行うなど、惑星や彗星の大気・プラズマの観測を行い、惑星科学の分野の研究に貢献している。



図 1.2. ひさき衛星の外観図(JAXA, 2013).

観測が長期間に至ると、観測装置の性能劣化が顕著となり、観測データの解釈にあいまいさを与えることがある。衛星を打ち上げる前の性能較正值を使い、長期に渡る観測データを解釈するには限界があり、宇宙空間を飛行する間に観測装置を再較正する必要がある。宇宙で観測装置の感度を較正するには、光量が比較的安定している恒星の光を使うのが常套であるが、EUV 波長域（100～1000Å）では困難である。図 1.3 は、EUV 波長域で見通せる距離を示している（Raymond Cruddace et al, 1974）。

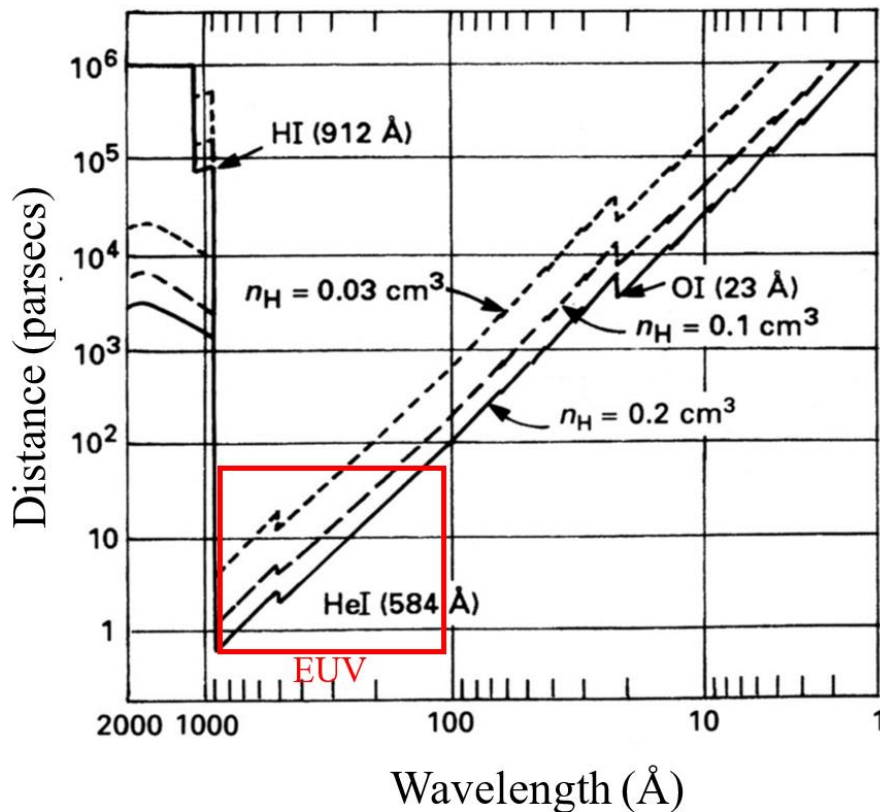


図 1.3. 星間物質の密度を仮定し、光が 90%減衰するまでの距離を計算した結果(Raymond Cruddace et al, 1974)。

図 1.3 の横軸は波長、縦軸は光が星間物質を通るとき、90%減衰するまでの距離をパーセク（1パーセクは約3.3光年）である。三本の線は、恒星間空間の水素原子密度をそれぞれ仮定して計算した結果である。1000Å以下の波長領域になると、光の減衰は極めて速くなる。それは、恒星から放たれた EUV（100~1000Å）は恒星間物質（主に水素原子）を電離し、エネルギーを失うためである。1000Å以下の光は恒星間に存在する水素により通りにくくなる。そのために地球から100パーセク以上離れた恒星からの光はその10%も地球に届かない。

このような状況の中、近傍にある恒星を使い、観測装置の性能較正をするのは、星の数に限られるため難しい。また、較正の度に、観測衛星の視野を恒星に向けることは衛星の運用に大きな制約を与えるため、定期的な較正は難しい。このような制約の中、恒星の放つ光を観測することで、EUV波長領域で観測装置の感度の較正を行った例を図1.4に示す（ひさき衛星延長院査審査会資料からの抜粋, 2022）。GD71(赤経 05 52 27.70、赤緯 15 53 10.46、温度 16692 K)という白色矮星を定期的に観測した結果である。波長による振る舞いが少し異なるが、全体的に感度が変化していることが明らかである。惑星科学の分野では、大気光の量から惑星大気密度を導出し、科学の議論に利用するのが常套である。人工衛星運用の観点から、このような較正の機会を得ることは不可能でないにしろ、定期的にはしか行うことはできない。観測点の間の感度（例えば、2017年末から2018年末の約

1年間は観測点がない)は内掃して定めるしか方法がないが、研究者が観測データを定量的に扱うときにはこの誤差を考えなければならなくなる。そこで解決策として考えているのは小型較正用光源を衛星に搭載することである。他の波長域ではこのような試みは実現している。INTEGRAL 衛星では γ 線観測器のために放射性同位体 ^{22}Na 、Astro-E2 衛星では X 線観測器のために ^{55}Fe 、Cassini 衛星可視光と赤外線観測器では IR flood lamp が参照光源として搭載され、機上での感度較正に供している。

この研究で開発する Inductively Couple は、コイルに高周波電圧を印可して発生した誘導電場を用いて、非接触にエネルギーを伝達する方法である。IC 法を用いれば、容器に封じた気体に非接触にエネルギーを伝達させ、気体を電離・発光させることができる。IC 法を用いた ICP 光源は、小型・軽量化できる可能性が高く、将来、人工衛星に搭載する較正用光源として期待している。本研究では従来の ICP 生成装置の原理を応用した Resonance 社の設計した小型 ICP 光源回路を起点として、小型 ICP 光源を自作し、性能向上を目標として開発を行った。



図 1.4. ひさき衛星が GD71 (赤経 05 52 27.70、赤緯 15 53 10.46、温度 16692 K) 白色矮星を定期的に観測し、感度を較正した結果 (ひさき衛星延長院査審査会資料からの抜粋, 2022) 値は感触当初に規格してある。

1.3 研究目的

本研究では、極端紫外線を宇宙空間から観測する衛星に搭載できる小型校正用光源の開発に向け、小型 ICP 光源の性能向上について研究し、衛星への搭載の可能性を検討した。

第 2 章では、ICP 光源に必要な装置の概要について述べる。

第 3 章では、Resonance 社が設計した小型 ICP 光源回路をもとにして、新たに光源を製作し、性能を評価した。この章では小型 ICP 光源の実現・実用性について述べる。

第 4 章では、ICP の特性を調査した。ICP 光源から光を得る場合、周波数や高周波電力が発光強さを左右する。4 章ではネオンガスを封じたガラス管を使い、発光強度に影響する要因を調べ、発光が最も強くなるパラメータを探索した結果を述べる。

第 5 章では、Resonance 社が設計した小型 ICP 光源回路をもとに、私が改良を加えた ICP 光源の性能向上について述べる。ICP 光源回路ではトランジスタの作動点が出力、出力効率を大きく左右する。性能向上、効率向上を実現するトランジスタの作動点を探索した結果を記述する。

第2章 誘導結合プラズマ (Inductively coupled plasma : ICP)

2.1 ICP の生成

Inductively coupled plasma (ICP) とは、高周波電波をアンテナから発射し、コンテナ内部の中性ガスを電離させたプラズマである。使用するアンテナの種類によって、いくつかのタイプが存在する (J Hopwood , 1992) 。

- ・ソレノイドアンテナによる円筒放電
- ・螺線形アンテナによる平面放電
- ・浸漬アンテナによる円筒状/平面放電

ICP 光源が使用する非浸漬ソレノイドアンテナによって、プラズマを生成させる原理の概略を図 2.1 に記す。

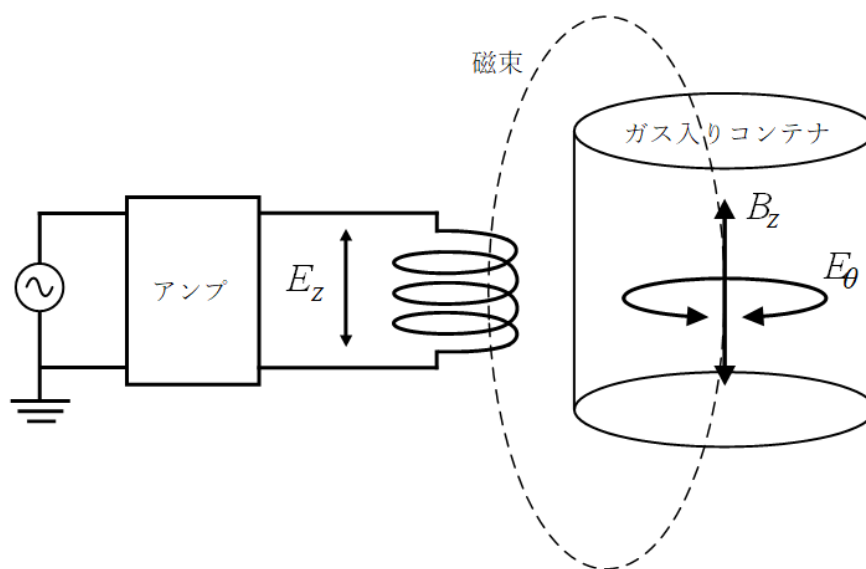


図 2.1. ICP の生成原理

ガスをコンテナに充填し、高周波発生器からの交流電流をアンプで増幅し、ソレノイドアンテナから電磁波を発射する。コンテナ内のガスは、電磁波が加速した電子によってイオン化される。コンテナは誘電材料で作られているため、電磁波はガスまで到達することができる。アンテナに流れる高周波電流はマクスウェル・ファラデー方程式に従って、磁界と電場(図 2.1 の B_z と E_θ)を生成する。

$$\nabla \times E_\theta = -\frac{\partial B_z}{\partial t} \quad (2.1)$$

コンテナ内の電子がこの誘導電場の作用で加速され、電力の一部が中性ガス中に存在する

電子の運動エネルギーに変換される。加速された電子はガス原子と衝突し、ガス原子を電離・励起する。衝突によるガス原子に与えられたエネルギーが原子のイオン化エネルギーより大きい場合は原子を電離し、小さい場合は内部電子の励起を引き起こす。第一イオン化エネルギーは電離の容易さを表し、第一イオン化エネルギーの大小と発光の強弱は一致しない。測定結果のS/N比を改善するため、同気圧のHe、Ne、Kr、Xeの中に一番発光強度が強いNeを本研究の実験ガスとして採用した。

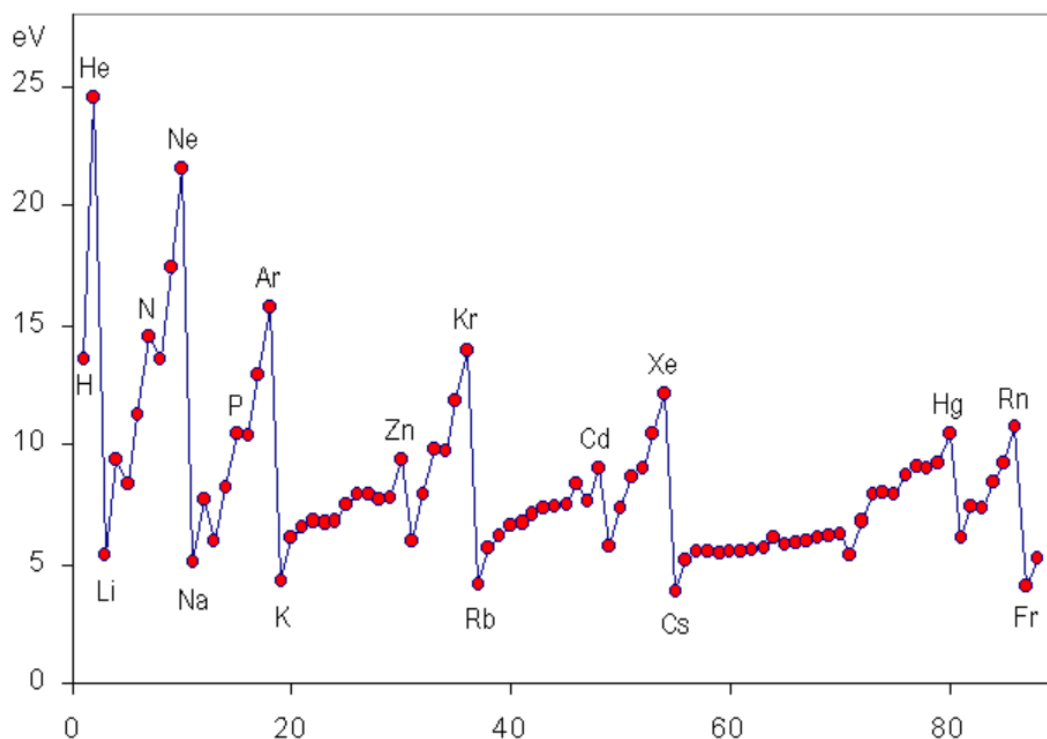
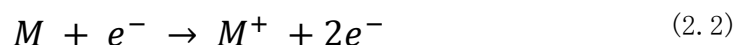


図 2.2. 元素順の第一イオン化エネルギー。アルカリ金属で最も小さく、貴ガスで最も大きくなる周期的な変化が見られる。

M をガス原子とすると、(2.2)式の電離過程から自由電子が生成される。



新しく生成された電子は再び加速され、ガス原子と衝突し、自由電子が増える。この反応が電子の消失速度率と等しくなるときにプラズマの密度は平衡状態に落ち着く。電子の消失過程は主に以下の二つが存在する。

- ・コンテナ壁面との衝突による損失（表面損失）
- ・ガスイオンとの衝突による損失（再結合損失）

本研究では、ICP 光源として、低気圧ネオンガスを封じたガラス管を使用し（0.1～1 torr）、電離度は低い（約1%前後）。ネオンガスの圧力を 0.1 torr とすると、平均自由行程が約 0.0098 m であり、この距離を電子が飛翔する間に、ネオンの第一イオン化エネルギー（約 22 eV）まで加速する必要な均一電場強度は約 22 V/cm である。

2.2 ICP の発光

原子は原子核とこれを囲む電子雲から構成されている。電子雲は電子が空間中に存在する確率を表し、式 2.3 のシュレーディンガー方程式を解くことで求めることができる。

$$-\frac{\hbar^2}{8\pi^2} \sum \frac{1}{m_k} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x_k^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y_k^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z_k^2} \right) + V\psi = \frac{i\hbar}{2\pi} \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (2.3)$$

ここでは、 $\psi \cdot \psi^*$ が電子の空間分布確率を表している (Gerhard herzeberg, 1937)。境界条件を満足する ψ の解は複数存在し、 ψ_1 ψ_2 ψ_3 \dots を固有関数すれば、 $\psi = \sum C_i \psi_i$ もシュレーディンガー方程式の解である。ここでは C_i は振幅を意味するのではなく、電子を ψ_1 もしくは ψ_2 もしくは ψ_3 \dots で与えられる状態に見出す相対的確率が $|C_1|^2 : |C_2|^2 : |C_3|^2 \dots$ という比になっている。固有関数が属している各固有値を計算することで、各エネルギー準位を求めることができる。

図 2.3 に本実験に使うネオン原子のエネルギー準位を示す (Grabarnik et al, 2007)。光の照射、粒子の衝突などにより、イオン化エネルギーより低いエネルギーが与えられると、一定の確率で各エネルギー準位に励起される（衝突励起過程）。与えられたエネルギーが、イオン化エネルギーより高い場合には、電子が原子核の束縛から離れ、自由電子になる。その後は、励起された原子が一定の確率で各低いエネルギー準位に戻り、その分のエネルギー差は光という形で放出される。

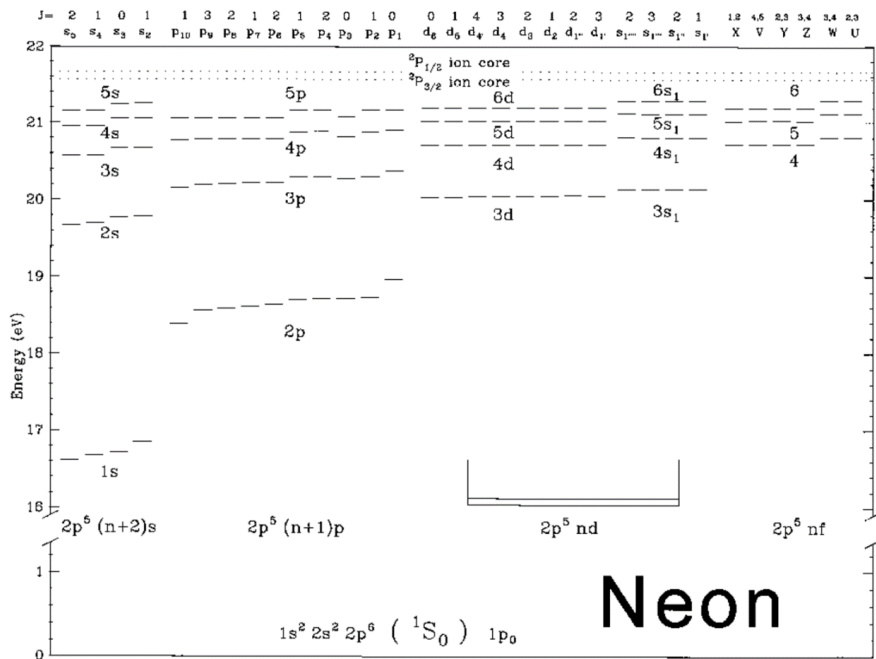


図 2.3. ネオン原子のエネルギー準位図 (Grabarnik et al, 2007)

エネルギー準位はシュレーディンガー方程式の各固有値を計算することで求めることができるので、原子から放出する光の波長も計算することができる。また、各準位が離散的になっているので、光も連続光ではなく、離散的な輝線分布が存在している。図 2.4 はネオン原子の発光スペクトル図である (Grabarnik et al, 2007)。第 4 章では、ネオンガスを使用し、測定するとき、他の輝線と混同しないために、周囲の波長域 $\pm 100 \text{ \AA}$ に他の輝線が少なく、相対的に明るい波長 7032 \AA の輝線 ($2s^2 2p^5 ({}^2P^{\circ}_{3/2}) 3s - 2s^2 2p^5 ({}^2P^{\circ}_{3/2}) 3p$) を採用した。ここでは、 $2s^2 2p^5 3s$ および $2s^2 2p^5 3p$ はネオンの電子がシュレーディンガー方程式の固有関数に従う分布状態を表す。 ${}^2P^{\circ}_{3/2}$ については、電子の分布状態による軌道角運動量 $L=0, 1, 2, 3 \dots$ に対して、それぞれ S、P、D、F \dots という記号で表す。スピン角運動量を S とし、L の記号 (S、P、D、F \dots) の左上に $2S+1$ を記し、L と S のベクトル和である総角運動量 J を L の記号の右下に表記することになっている。以上の記号から電子の分布、スピン状態とそれらに対応する角運動量が分かる。フントの法則により、この遷移は許容である。

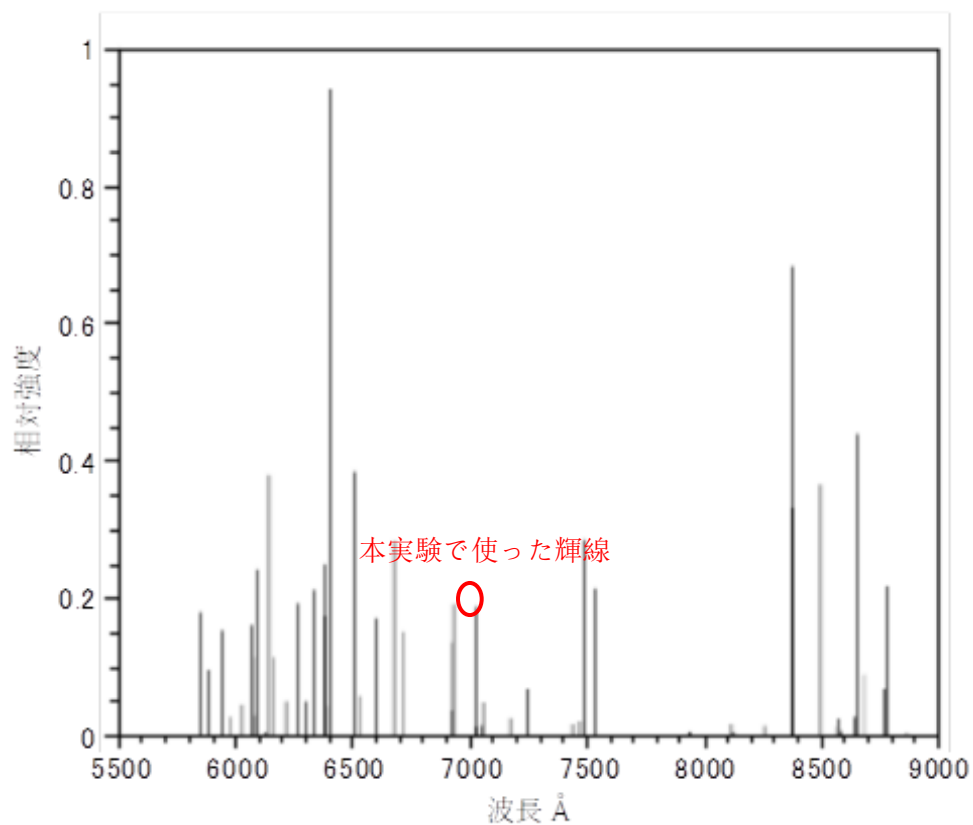


図 2.4. ネオン原子の発光スペクトル（可視から赤外のみ）（P. Nuno, 2006）

異なるエネルギー準位間の遷移に伴うエネルギーの放射（光の放射）は赤外から極端紫外の波長域に広がる。必要な波長の光だけを光学素子（分光器など）を用いて取り出せば、必要な波長で較正実験ができる。

2.3 ICP 生成装置

ICP を生成するには、通常、図 2.5 のような 4 要素が必要である。

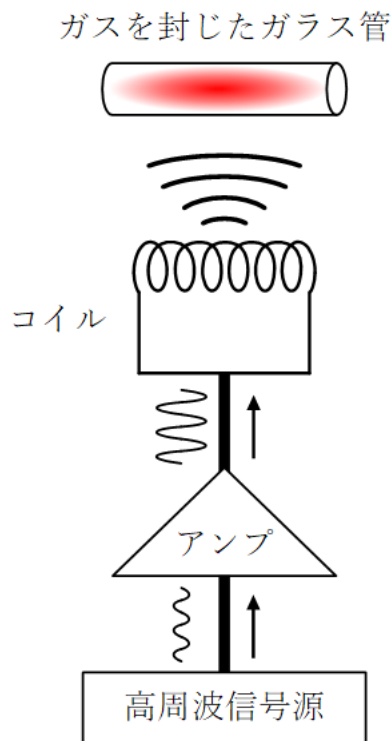


図 2.5. ICP 生成装置の四要素

高周波信号源から得られた信号はアンプを通り必要な出力まで増幅される。コイル（ソレノイドアンテナ）を使って目標物に誘導結合で電力を伝達する。ICP に関する実験では一般的にシグナルジェネレータを信号源として使い、シグナルジェネレータ-アンプ-コイルという ICP 生成装置を使用する。このような ICP 生成システムはシグナルジェネレータからの出力を調整ができ、アンプの増幅率とアンテナ損失を使って計算すれば、アンテナから放出する電力を計算から求めることができる。定量性を求める ICP 実験ではよくこのようなシステムを使う。

第3章 小型誘導結合 (Inductively coupled plasma) 光源の開発

3.1 ICP 光源システムの構成

小型 ICP 光源は、第2章で述べた IC 法により生成するプラズマからの発光を利用している。従って、本システムは高周波発生部と増幅部、エネルギー伝達コイル、ガス入りコンテナから構成される。図 3.1 は小型 ICP 光源システムの構成図である。

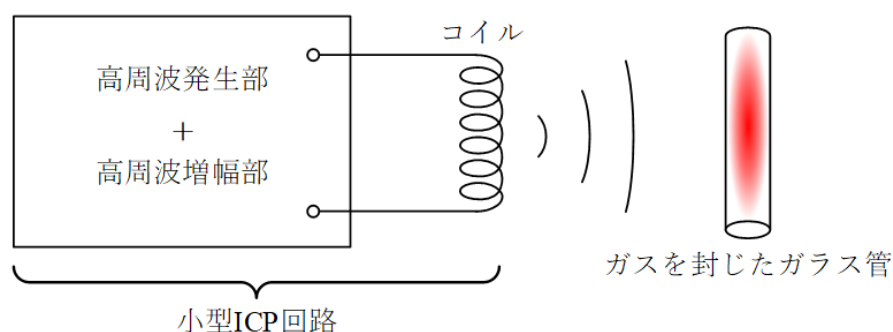


図 3.1. 小型 ICP 光源の構成

本研究では、Resonance 社が設計した Electrodeless Flow EUV Light Source (図 3. 2) を参考に開発を始めた。これは高周波発生部と増幅部、エネルギー伝達コイルが一体化になっている。ほぼ特注に近く入手が困難なトランジスタを使うことで、小型軽量に反し、高い出力が得られることが特徴である。私は、Resonance 社が設計した ICP 光源の回路を参考とし、一般に入手しやすい安価なトランジスタを用い、トランジスタの作動条件の最適化によって性能の改良を行った。検証した結果は第 5 章にまとめる。本論文で紹介する改良手法はトランジスタの種類に強くは依存しない有効な方法である。



図 3.2. Resonance が販売している ICP 光源の外観図 (上) と内蔵する回路 (下) (Resonance, 2021)

Resonance 社の回路設計は図 3.3 に示す。

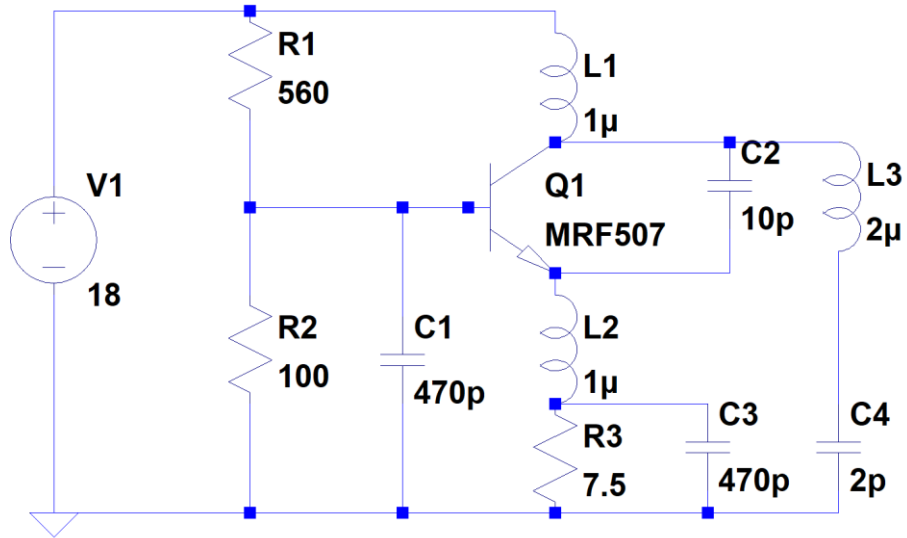


図 3.3. Resonance 社が設計した ICP 光源回路図

3.2 ICP 光源回路

ICP 光源回路は図 3.4 のように、高周波信号発生部（緑）と増幅部（赤）、エネルギー伝達コイル（L3）から構成されている。

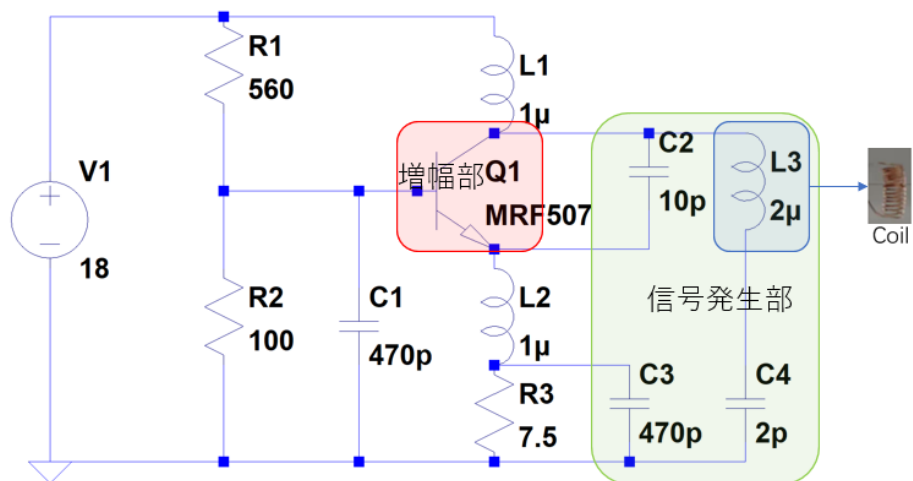


図 3.4. ICP 光源回路の機能構成図

高周波発生部は LC 回路を採用する。LC 回路は直流電圧を印加するとき、微小な高周波信号を発生する特性がある。LC 回路の共振周波数は理論的には式(3.1)から計算できる。

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_3 \cdot C_4}} \quad (3.1)$$

高周波増幅部にはフィードバック増幅回路を採用する。帰還増幅回路は増幅した信号の一部を入力に戻す役目を担い、比較的大きい出力が得られる。図 3.5 にブロック図を示す。

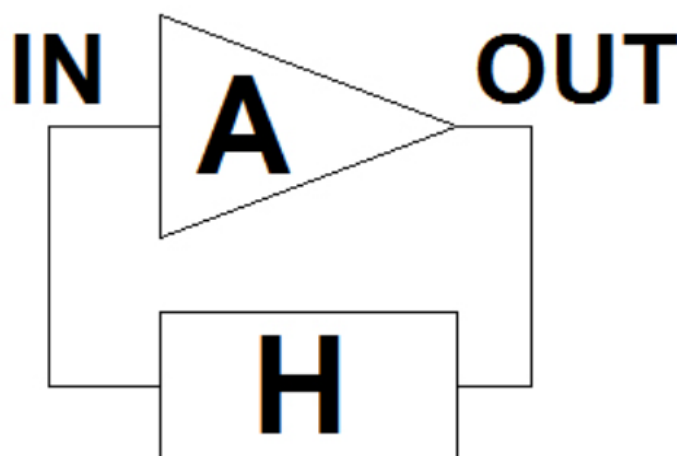


図 3.5. 一般的なフィードバック増幅回路のブロック図

図 3.5 中の A は増幅素子の増幅倍率、H は出力から帰還する信号の割合を表す。ここで、 $A \cdot H > 1$ を満たすと、帰還信号の位相が入力と同位相である場合には、増幅回路として動作する。ICP 光源回路では増幅素子がトランジスタであるフィードバック増幅回路を採用した。

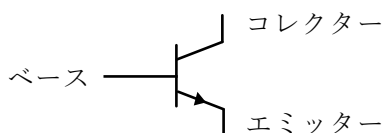


図 3.6. トランジスタ概略図

トランジスタは図 3.6 のように、ベース、コレクタ、エミッターの三つの端子がある半導体素子で、コレクタ電流がベース電流の β 倍になるという電流増幅特性がある。この電流増幅特性を利用して図 3.7 のように発生した高周波信号はコンデンサーによって、ベース極に帰還し、フィードバック増幅される。

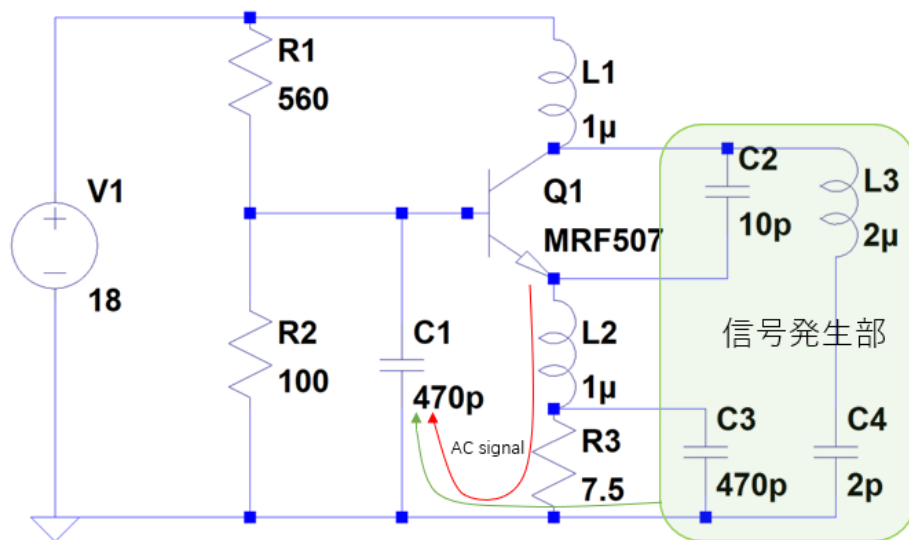


図 3.7. ICP 光源回路フィードバック経路

エネルギー伝達コイルは、外部と誘導結合が強いコアなし巻き線コイル (L3) を採用し、同時に LC 回路の一部となっている。

3.3 小型 ICP 光源製作

3.3.1 銅張積層板

本研究で使用する小型 ICP 光源の基板は銅張積層板を採用し、化学エッチングという手法で回路の配線を作る。銅張積層板の構造は図 3.8 のようになる。

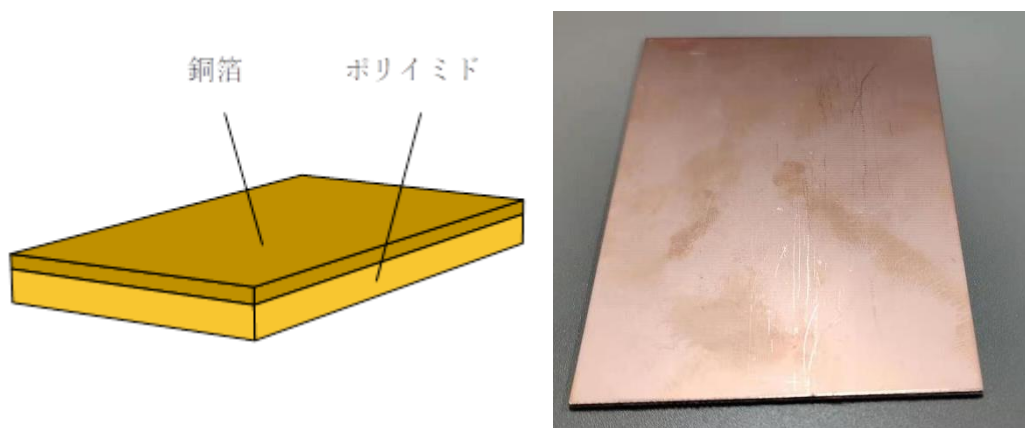


図 3.8. 銅張積層板：紙やガラスなどの基材に樹脂を含浸させたシート（プリプレグ）を重ね、加圧加熱処理して得た絶縁板の表面に銅箔を施したものである。

3.3.2 エッチング

3.1 節の ICP 光源回路に基づき、配線図を図 3.9 のように作る。

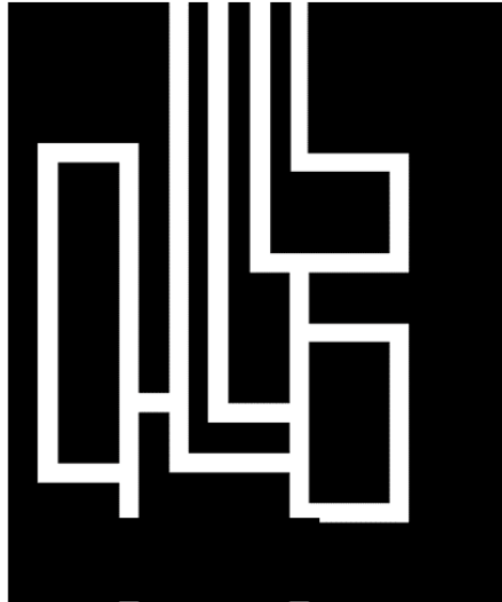


図 3.9. ICP 光源回路配線図（黒い部分は配線となる）。

配線図と ICP 光源回路の対応関係は図 3.10 に示す。

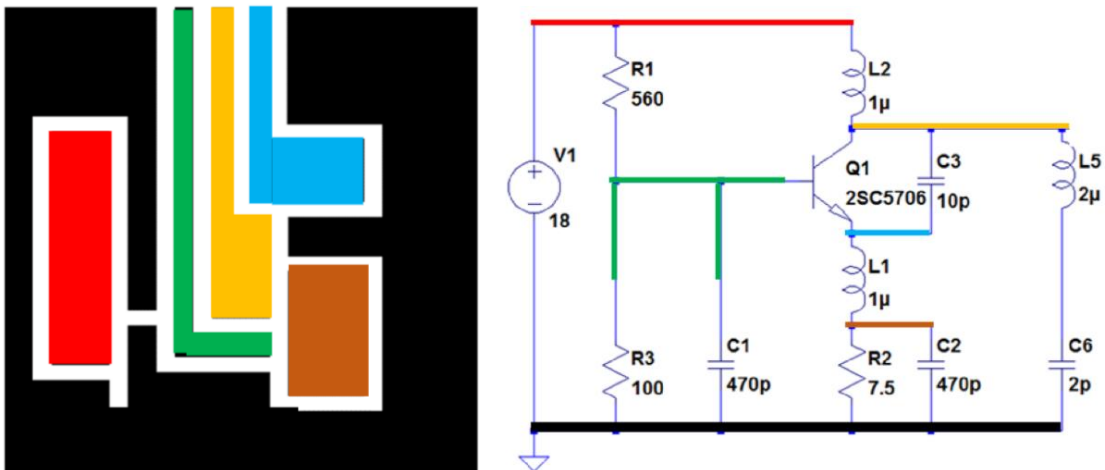


図 3.10. ICP 光源回路配線図と回路図の対応関係

次は、ICP 光源回路基板を化学エッチング法で製作する。万能基板上に素子を半田付け

する場合、素子間の配線の工夫に個体差が出てしまい、実験結果に影響を及ぼす可能性がある。上記の方法により、配線図をプリントすることができれば、完成品の個体差を極力小さくすることができる。

まず、配線図を熱転写紙に印刷し、インク面を銅張積層板に向けて貼り付ける。

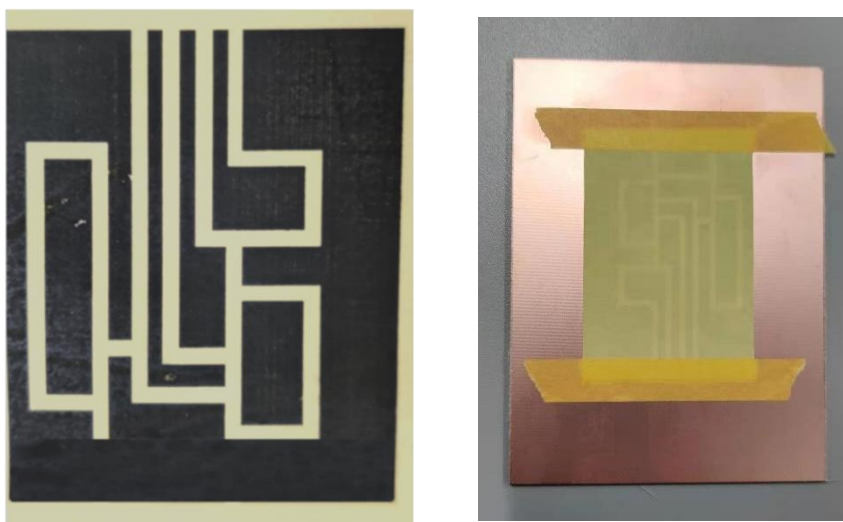


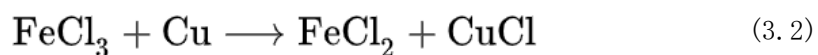
図 3.11. 銅張積層板と熱転写紙

銅張積層板を図 3.12 のような熱転写プリンターに入れ、熱と圧力をかける。その後は、インクが溶け、配線図を銅張積層板に転写する。



図 3.12. 熱転写紙を銅張積層板に貼り付け、熱転写プリンターに入れる。

エッチング液は塩化第二鉄液を使う。エッチング液が銅と接触すると、式 3.2 の反応が起る。



従って、配線図が付いている銅張積層板をエッチング液に浸けると、インクが覆っていない銅が腐蝕され、残った部分は ICP 光源回路配線になる。



図 3.13. インクを銅張積層板に転写する様子

最後に、銅張積層板に付いているインクはアセトンを用いて洗浄し、ICP 回路基板が完成となる。



図 3.14. ICP 回路基板の完成品

3.3.3 素子実装

コンデンサーは様々な種類があり、常用なものは表 3.1 にまとめる。

表 3.1. 常用なコンデンサー

種類	容量	極性	高周波特性
セラミックコンデンサー	0.1pF-100 μ F	なし	良い
タンタルコンデンサー	0.1pF-1000 μ F	あり	普通
フィルムコンデンサー	1nF-100 μ F	なし	良い
アルミ電解コンデンサー	1 μ F-10mF	あり	悪い

2 章の実験結果から、ICP 光源は 100MHz 以上の高周波帯域で点灯しやすいことを考慮し、かつ RESONANCE 社の回路設計の中に 1pF-1000pF コンデンサーの使用が多いことを参考し、容量範囲が 0.1pF-100 μ F、高周波特性が良いセラミックコンデンサーを採用する。

インダクタについて、L3 はコアなし巻き線コイルを使用し、それ以外は回路素子関のカプリングを低減するため、磁束漏れが少ないアキシアルリード型コイルを採用する。

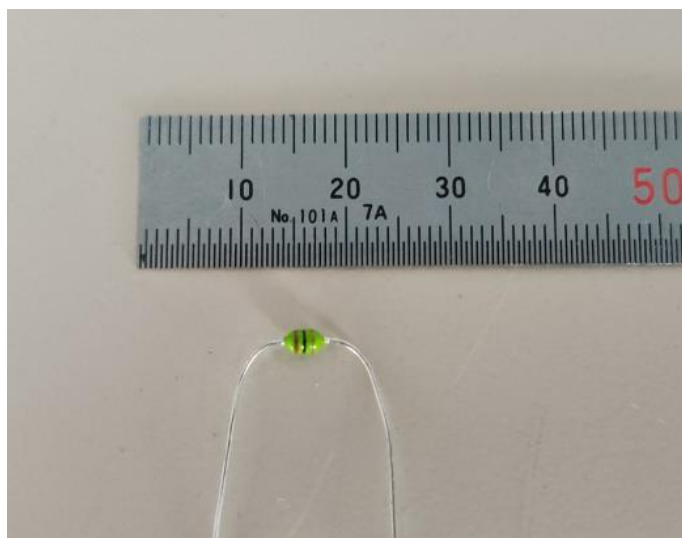


図 3.15. アキシアルリード型コイル実物図

ICP 光源回路では抵抗体に比較的に大電流 (0.5~2A) が流れるので、耐熱性が高くかつ大電力に耐える抵抗体を採用する。条件を満たす抵抗体として以下に示す三種類が代表的である。

表 3.2. 中電力と大電力用抵抗器

通称	抵抗体	特徴・用途
金属皮膜抵抗器	金属被膜蒸着	温度係数が小さく、精度が良い。数 W の電力回路用
酸化金属皮膜抵抗器	金属酸化物被膜蒸着	高温に耐えられる。数 W の電力回路用
セメント抵抗器	抵抗ユニットをセラミックケースに入れたもの。セメントで封止	高温に耐える。大電力回路用 (10W [~])

設計した回路の出力が小さい場合は精度が良い金属皮膜抵抗器を使い、大きい場合は大電力用のセメント抵抗器と使う。

以上から適切な素子を私は選び、図 3.14 (上) に示す配線を設計し、素子をはんだ付けすることで ICP 光源を完成させた (図 3.16 (下))。

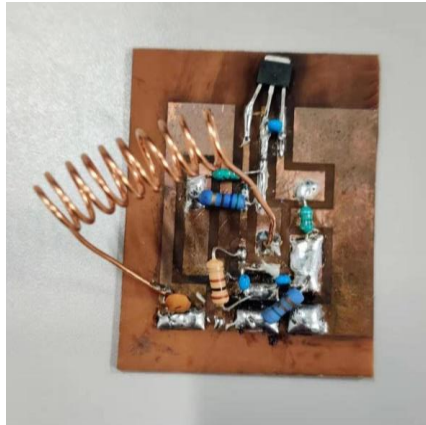
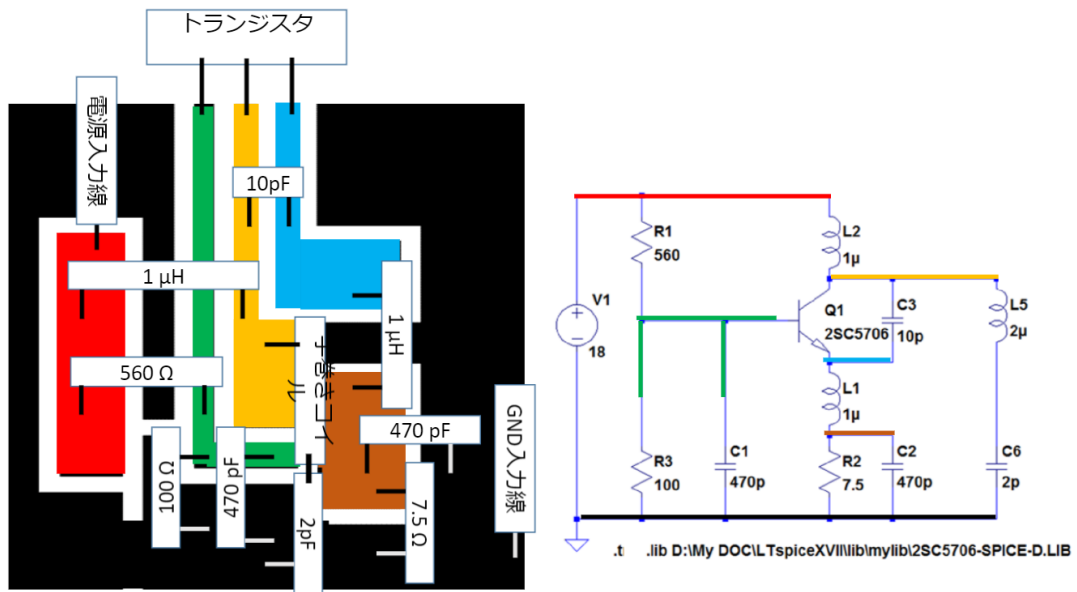


図 3. 16. ICP 光源回路素子対応関係と実物図

第四章 誘導結合プラズマ (Inductively coupled plasma) の諸特性

4.1 実験装置

ICPの発光強度に影響する要素は多数報告されている (J. Hopwood et al. 1992)。その中では、コイルに印加する電力、周波数とガス圧力が発光強度と深く関わっている。本章では以下の実験装置を使ってコイルに印加する電力、周波数と発光強度との関係を調べた。

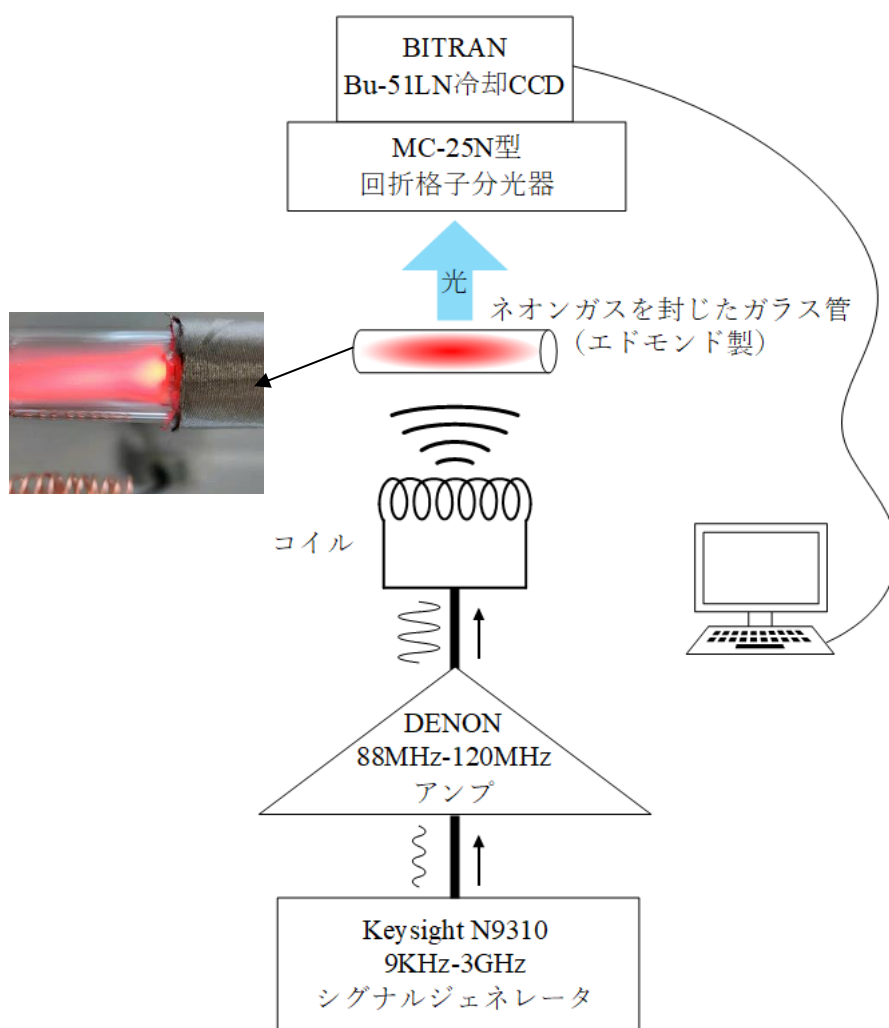


図 4. 1. 実験装置概略図

図 4. 1 のように、シグナルジェネレータから高周波信号を出し、アンプによって増幅し、コイルに電圧を印加し、外界に電磁波としてエネルギーを放出するというシステムである。シグナルジェネレータの設定出力、測定したアンプの増幅率とコイルの反射損失を使って、

外界に放出する電力は式 4.1 のように計算できる。

$$\text{送信電力} = \text{シグナルジェネレータ信号強度} \times \text{アンプ増幅倍率} \times \text{コイル} \quad (4.1)$$

反射損失

コイルのインピーダンスと伝送線路インピーダンス (50 Ω) が完全一致しない場合はコイルの反射損失が存在し、送信電力が低下する。送信電力が十分であれば、ガラス管中のガスが光る。図 4.2 はガラス管中のガス (ネオンと水銀蒸気) が光る様子である。

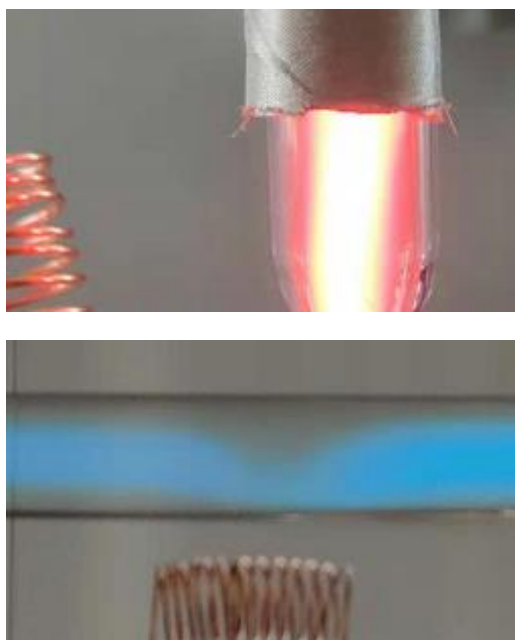


図 4.2. ガスを封じたガラス管が光る様子 (ネオン管 : 上 水銀蒸気管 : 下)

4.2 発光強度と電力

図 4.1 の実験装置を使って ICP の発光強度とコイルから放出電力との関係を調べた。ガラス管にはネオンが充填してある。周囲の波長域 ($\pm 100 \text{ \AA}$) に輝線が少なく、相対的に明るい波長 7032 \AA の輝線を用いて測定した。

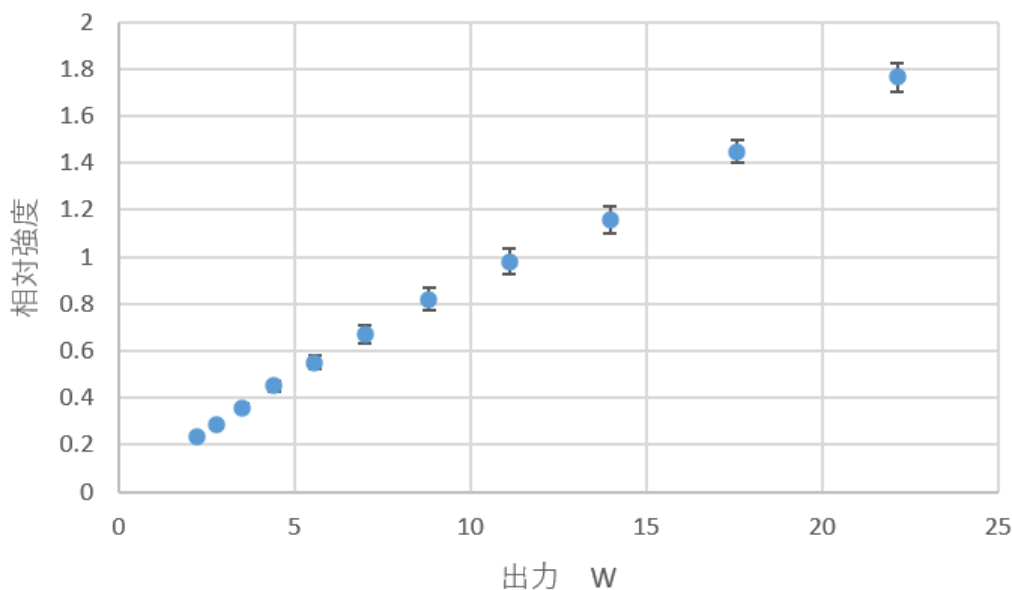


図 4.3. コイルから放出する電力と波長 7032 Å の輝線の相対強度の関係（3回の測定結果を平均し、標準偏差を記入した。）

図 4.3 に示した測定結果から、波長 7032 Å の輝線の強度はコイルから出力電力とおおよそ比例していることがわかる。従って、ICP 光源の性能を評価するとき、ガスから放出される光の強度変化とコイルから放出される高周波信号の強度変化は比例関係にあることがわかる。

また、大電力 (>70W) の領域では、ICP の光放射のモード変化 (E-H mode transition) が多数報告されている (A.M. Daitrini et al. 2007)。この場合、発光強度は不連続に変化することとなる。この成因はいくつかの推論があるが、我々が求めている観測衛星用光源は小電力 (<10W) で運用するので、E-H mode transition の影響が無視できるものとする。

4.3 プラズマ着火エネルギー (Plasma initiation power : PIP) と周波数

プラズマ着火エネルギー (Plasma initiation power) とは ICP を生成するには必要な最小電力のことである。つまり、ICP 光源を点灯させるための最小電力となる。PIP は ICP 光源を運用するために必要な電力の下限を示しているため、観測衛星という電力が制限されている環境に使用するには非常に重要なパラメータである。図 4.4 はネオンガスを封じたガラス管（以後、ネオン管と呼ぶ）を使い、PIP を測定した結果である。

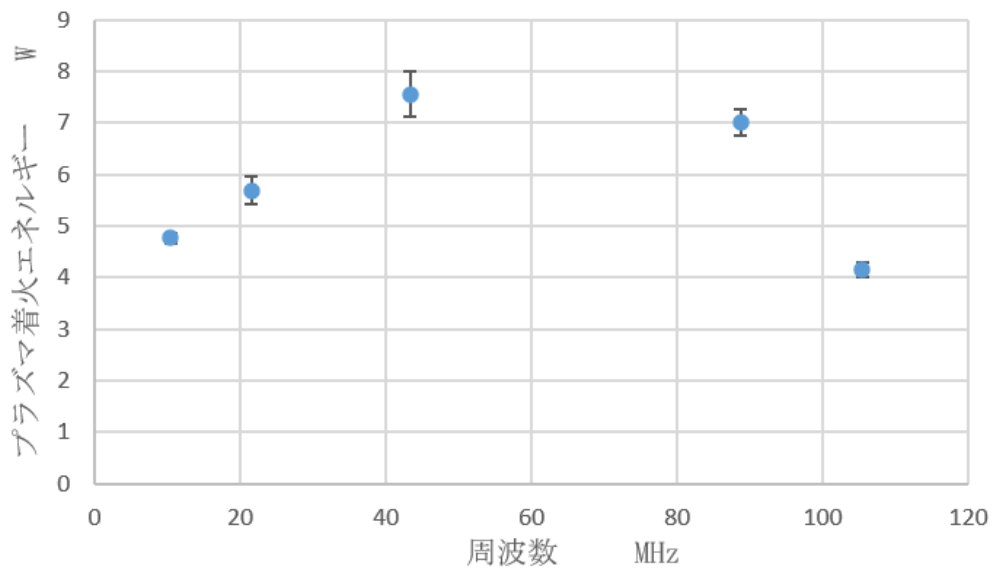


図 4.4. プラズマ着火エネルギーと周波数の関係 (3 回の測定結果を平均し、標準偏差を記入した。)

図 4.1 の実験装置を用い、周波数が一定の条件で式 4.1 から計算した送信電力を、2 W から 0.2 W ずつ上げていき、点灯したときの送信電力を PIP とした。電力出力測定結果から、10~110 MHz の周波数帯域では、ネオン管は、測定範囲の上限と下限 (10 MHz と 110 MHz) において PIP が低下し、ICP が点灯しやすいことが解る。ICP 光源を設計するとき、PIP が低い周波数を使うことは点灯しやすいために重要な条件となる。

第五章 小型誘導結合プラズマ (Inductively coupled plasma) 光源の性能評価及び改良

5.1 実験装置

第4章の実験結果から、22 W以下のとき、発光強度がコイルから放出される高周波信号強度と比例することが分かる。従って、特定の輝線強度を測定することより、コイルから放出される高周波信号の強度を用いて ICP 光源の性能を評価することも可能である。

高周波信号の強度を測定するには、図 5.1 のような測定システムを採用した。

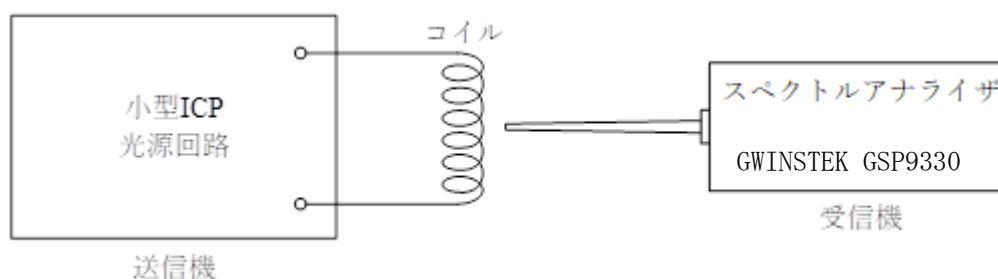


図 5.1. 小型 ICP 光源が放出する高周波電力の測定装置概略図

ここでは、スペクトルアナライザで読み取る受信電力は次式のように計算できる。

$$\begin{aligned} \text{受信電力} = & \text{送信電力} + \text{送信アンテナ反射損失} + \text{受信アンテナ絶対利得} \\ & - \text{自由空間基本伝搬損失} - \text{ケーブル損失} \end{aligned} \quad (2.1)$$

ロングポールアンテナとコイル間の距離を固定しているので、自由空間基本伝搬損失は一定であり、ケーブル損失も一定である。送信回路の出力インピーダンスが送信アンテナのインピーダンスが一致しないとき反射損失が発生する。固定周波数の場合、送信回路と送信アンテナのインピーダンスが一定であるため、反射損失も一定である。受信アンテナ利得は周波数依存であり、固定周波数の場合、アンテナ利得も一定値と考えられる。以上より、

という関係が導ける。つまり、本測定システムが測定した受信電力はコイルに印加する高周波電力と比例であり、相対的に小型 ICP 光源の性能変化を評価することができる。

5.2 小型 ICP 光源の性能評価

本研究では Resonance 社が設計した回路をもとにして、性能向上の改良法を探索することが目的の一つである。そのために、まず、Resonance 社が設計した回路の性能を測定した。また、第 4 章で得られた 100 MHz 前後が点灯しやすい結果に基づいて 108 MHz を採用した。適切なトランジスタを選ぶには、トランジション周波数が重要であり、この周波数よりも高い周波数では増幅率が 1 を下回る。従って、トランジスタは電流を増幅していないことになる。本実験では、トランジション周波数が 108 MHz 以上のトランジスタを選ぶことが必須である。現在でも簡単に入手可能なトランジスタ三種類を用いて出力の測定を行った。

表 5.1. 各トランジスタを使った場合の ICP 光源回路の諸性能

型番	トランジション周波数 MHz	直流電圧 V	消費電力 W	受信電力 dBm	等価高周波電力 W	出力効率 %
2sc5706	400	18	5.2	12	2.4	46
scr572	300	18	5.1	12	2.3	45
2sd1802	150	18	5.3	10	1.5	28

直流電圧は ICP 光源回路に印加する電圧のことである。今回の実験は Resonance 社が設計した 18V を基準電圧として測定した。消費電力は直流電圧を供給する直流電源の電流値を読み取り、計算したものである。受信電力はスペクトルアナライザで読み取った値であり、コイルから放出する電力と比例する。等価高周波電力は第四章の装置を用いて小型 ICP 光源で点灯する場合、波長 7032 Å の輝線の強さを測定し、図 4.3 で求めた輝線の強さと電力の比例関係を仮定して換算した電力である。測定結果から、三種類のトランジスタの中では、電流値増幅率が高い 2sc5706 を使った回路が、最も等価高周波電力が高くなり、効率がよい回路と言える。また、トランジスタの発熱に消費される無駄な電力を低減する観点から、出力効率（等価高周波電力/消費電力）を計算し、回路性能を評価するパラメータとして採用する。2sc5706 を使った場合 2.4 W の出力と消費電力の中 54 % がトランジスタの放熱に使われているので、改良する余地があると考えられる。

5.2 トランジスタ動作点の移動による出力向上

図 3.2 の ICP 光源回路の直流通路だけを考えると、図 5.2 のようになる。

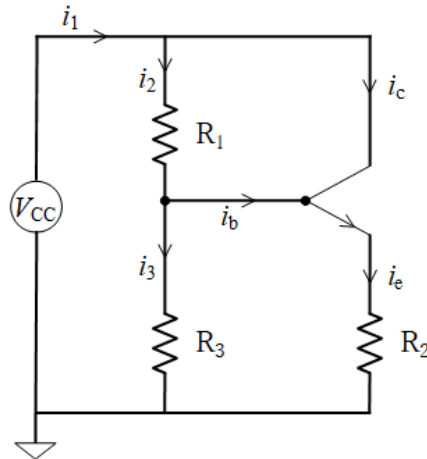


図 5.2. 小型 ICP 光源回路の直流通路

回路において 4 つの閉回路に対して回路方程式を立てる。ここでは、 β をトランジスタの電流増幅率とする。トランジスタは元来、ベース-エミッタ間電圧 (V_{be}) の変化は少ない。本実験で用いるトランジスタ (2sc5706) も、コレクタ電流の 0~1 A の変動に対して、 V_{be} は約 0.63~0.75 V と変化が少ない。ここでは、計算を簡単にするため、 V_{be} を固定値 (0.7 V) と近似して計算するが結果には影響しない。

$$i_3 \cdot R_3 = 0.7 + \beta i_b \cdot R_2 \quad (2.3)$$

$$i_c \cdot R_2 + V_{ce} = V_{cc} \quad (2.4)$$

$$i_2 \cdot R_1 + i_3 \cdot R_3 = V_{cc} \quad (2.5)$$

$$i_2 \cdot R_1 + 0.7 + \beta i_b \cdot R_2 = V_{cc} \quad (2.6)$$

(2.3) から (2.6) の 4 式から、各電流 (i_1, i_2, i_3, i_b) を求めることができ、各素子に印可される電圧を計算することができる。

つまり、各閉回路に流れる電流値と各素子の電圧値は $\beta, R_1, R_2, R_3, V_{cc}$ によって決まる。また、抵抗値が一定の場合、 β とコレクタ電流の関係を調べると、

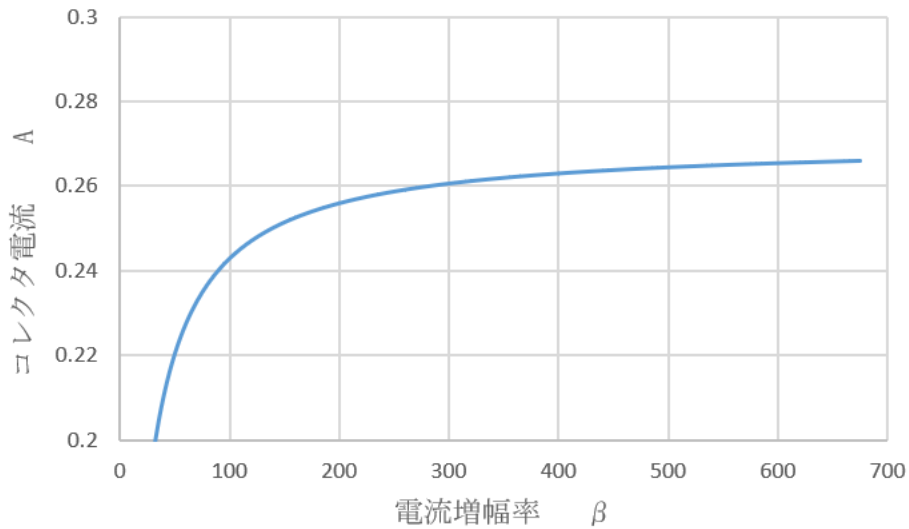


図 5.3. R_1 、 R_2 、 R_3 、 V_{CC} がそれぞれ 560Ω 、 7.5Ω 、 100Ω と 18 V の場合、直流増幅率とコレクタ電流の関係

図 5.3 から、電流増幅率 β が 200 以上になると、コレクタ電流値の変動が小さく (< 5%) なることが解る。正確な直流増幅率を測定することはトランジスタの個体差もあるために難しいが、本実験条件 ($I_c < 1\text{A}$) では、2sc5706 の直流増幅率が 200 以上という記載があるため、コレクタ電流値への影響が小さいと判断した。従って、 β として固定値 (=200) として扱う。

以下の実験は 2sc5706 トランジスタを用いて行う。2sc5706 の増幅率特性に着目すると、図 5.4 のように、コレクタとエミッタ 間電圧 V_{ce} 、コレクタ電流 I_c は電流増幅率 β ($I_c = \text{ベース電流 } I_b \cdot \beta$ の関係を満たす) に大きく影響するということが分かる。右下の領域にいくほど β が大きくなる。

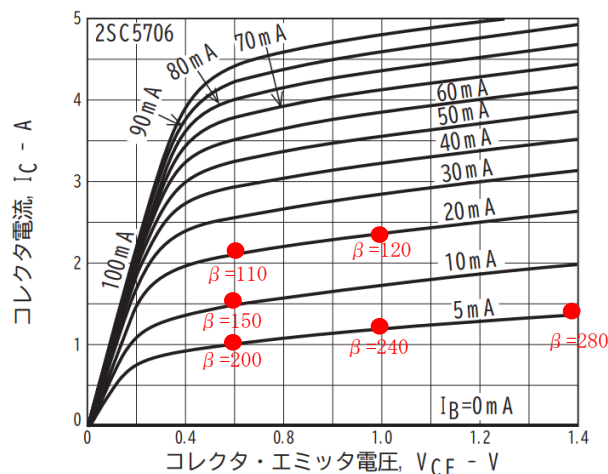


図 5.4. 2sc5706 トランジスタの V_{ce} - I_c 特性 (onsemi, 2022)

ここでは、式 2.4 中の V_{cc} と抵抗値 (R_2) を固定した場合、 V_{ce} と I_c の間の関係が求まり、図 5.4 中に直線を描くことができる (これは負荷線と呼ぶ)。交流信号を増幅する場合、 I_c は負荷線の上に変動する。

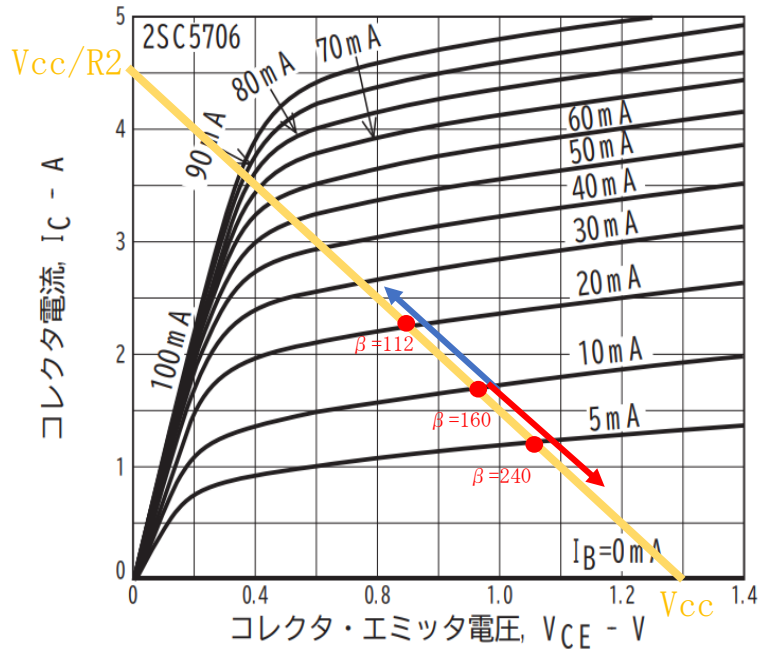


図 5.5. 2sc5706 トランジスタの V_{ce} - I_c 特性と負荷線 (onsemi, 2022)

I_c は常に止の値であり、トランジスタは I_c の変化から交流信号を作る素子であることを考慮 (図 5.6) すると、交流信号を増幅する前に、コレクタに適切な直流電流 (コレクタバイアス電流) が必要となるのが解る。

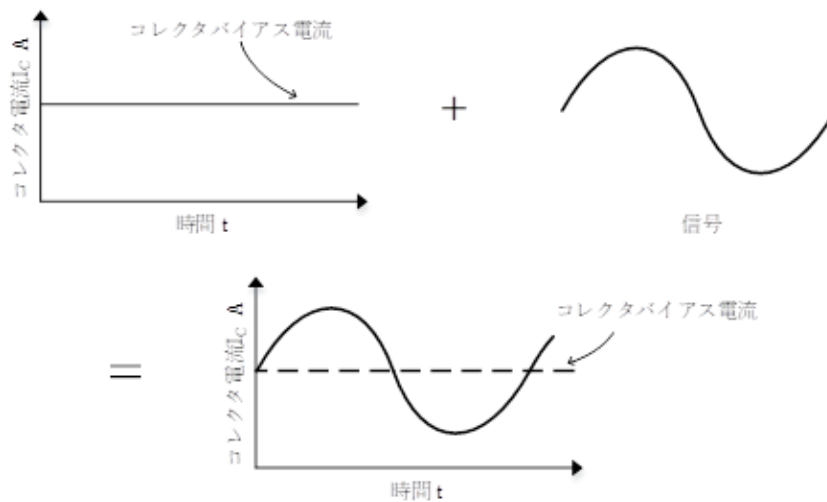


図 5.6. コレクタバイアス電流の変化により交流電流を出力する。

ここでは、コレクタ電流 I_c は増幅率に大きく影響するので、交流信号を入れる前にコレクタに流れるコレクタバイアス電流は増幅率と関わり、出力を左右する。ここで、コレクタバイアス電流値が負荷線と交わる点がトランジスタの動作点となる。この動作点の図 5.4 上の位置によって、トランジスタの特性曲線が違い、増幅率が違うことは分かる。

負荷線を固定 ($V_{cc} = 18 \text{ V}$ 、 $R_2 = 7.5 \text{ } \Omega$) し、動作点と ICP 光源回路出力の関係を調べた結果を図 5.7 に記す。この図では、計測した電波の背景ノイズの標準偏差を A (0.23 dBm) とし、スペクトルアナライザの読み取り誤差が B (0.2dBm) とした場合の不確かさ $\sqrt{A^2 + B^2}$ は誤差として表記した。A を軽減するには電波暗室に実験を行うことが必要であり、B の軽減には測定器の精度を高める必要がある。

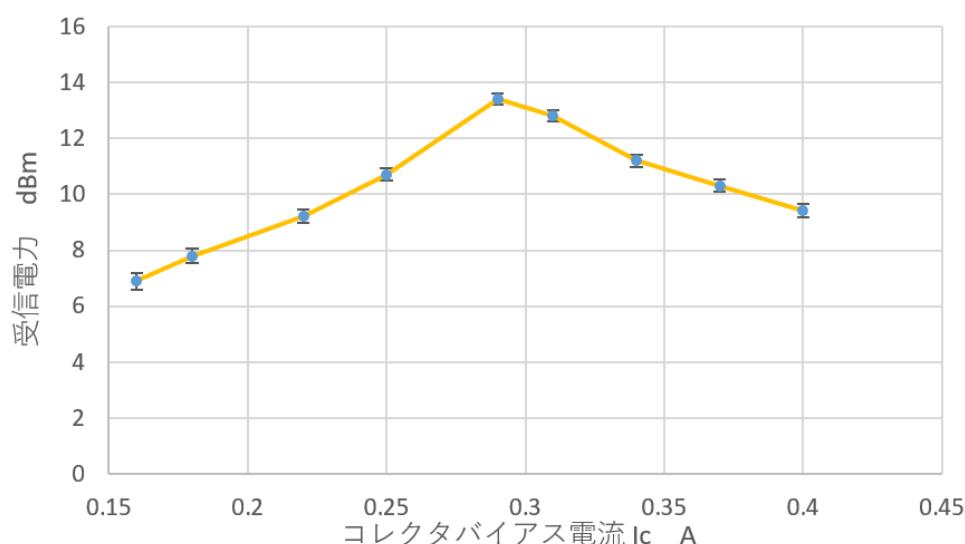


図 5.7. 負荷線を固定する場合 ($V_{cc} = 18 \text{ V}$, $R_2 = 7.5 \text{ } \Omega$)、コレクタバイアス電流と受信電力の測定結果 (電波の背景ノイズの標準偏差とスペクトルアナライザの読み取り誤差 0, 2dBm の二乗和平方を測定誤差とした。)

負荷線を固定する場合、コレクタバイアス電流が動作点の位置を決め、これが高くなる場合には、動作点は負荷線に沿って左上に移動する (図 5.5 中の青矢印)。動作点の電圧が低くなる場合、動作点は負荷線に沿って右下に移動する (図 5.5 中の赤矢印)。5.1 節で述べたように、受信電力は小型 ICP 光源回路の出力と比例するので、小型 ICP 光源回路の出力の大小で性能を想定的に評価することができる。そして、コレクタバイアス電流が大きくなると、作動点は図 5.5 中の左上方向に移動し、出力は低下する。これは作動点を左上領域に設定した方がトランジスタの増幅率が低くなることが原因である。理論の上では、作動点が図 5.5 中の右下方向に移動するほど、増幅率が大きくなり、出力が大きくなるはずであるが、図 5.7 から、コレクタバイアス電流がある閾値より小さくなると、出力が低下することが解っているので、右下への移動には限界がある。コレクタバイアス電流が高周波信号の振幅より小さくなると、図 5.8 のように、 I_c が負にはなれない為結、その結果として信号強度は下がる。従って、出力を最大するバイアス電流値に対応する動作点

を見つけることが賢明である。

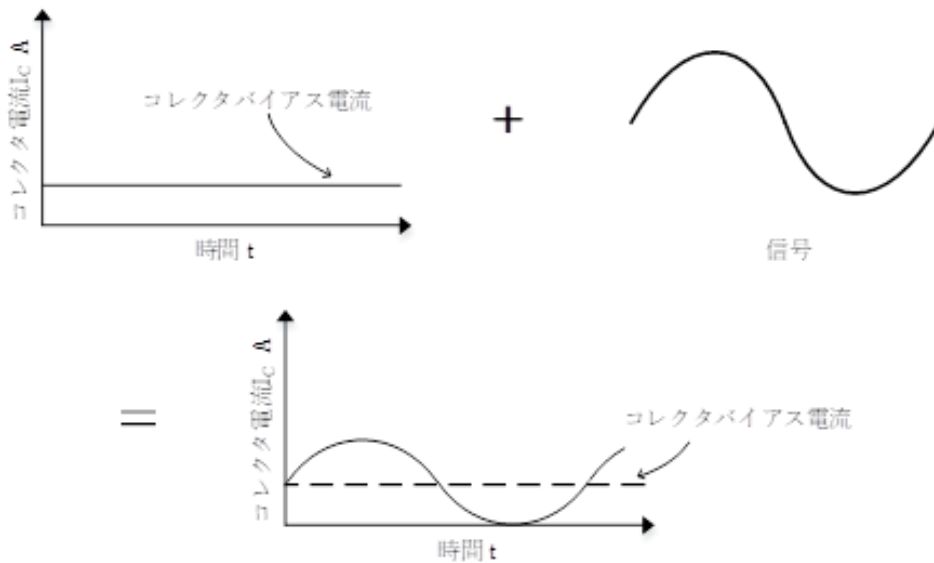


図 5.8. コレクタバイアス電流が信号振幅より小さい場合、出力信号強度が低下になる。

固定の負荷線 (V_{cc} と R_2 を一定値) の上に動作点を移動させる場合は、最大の出力が得られる動作点はその負荷線に対応する最適動作点と呼ぶ。 V_{cc} を大きくなる場合、負荷線が右に移動し、動作点全体も増幅率が大きい右方向にいくので、出力が増大することが予想できる。各負荷線に対応する最適動作点の変化を調べるために、 V_{cc} が 20 V、22 V、24 V、26 V、28 V、30 V の場合、それぞれのコレクタバイアス電流と受信電力の関係を測定した。

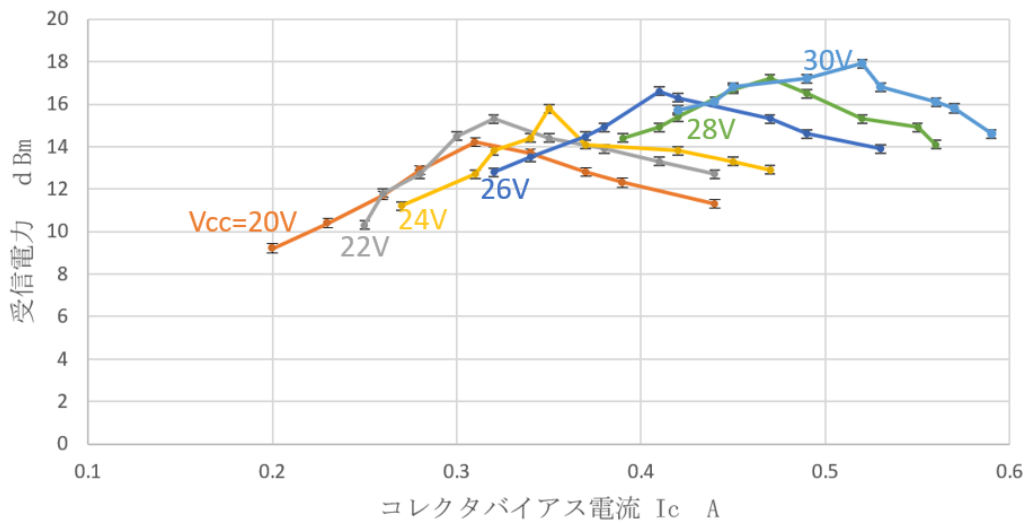


図 5.9. 負荷線を移動させる場合 ($V_{cc} = 20 \sim 30V$, $R_2 = 7.5 \Omega$)、コレクタバイアス電流と受信電力の測定結果(電波の背景ノイズの標準偏差とスペクトルアナライザの読み取り誤差 0, 2dBm の二乗和平方を測定誤差とした。)

以上に示した各 V_{cc} に対応する最適コレクタバイアス電流と受信電力の変化を図 5.10 と図 5.11 にまとめる。

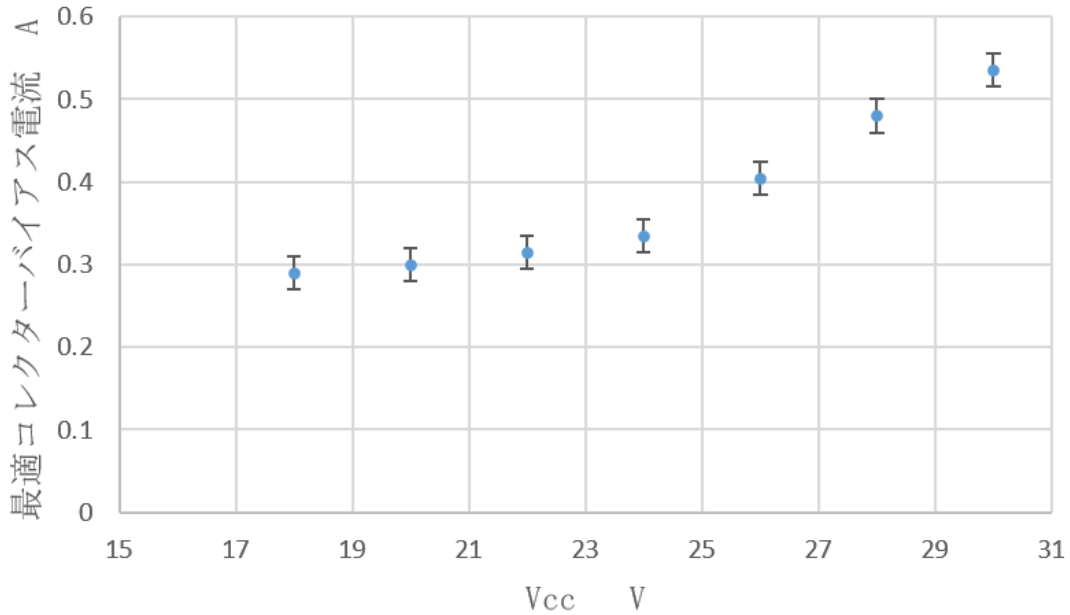


図 5.10. V_{cc} と各 V_{cc} の条件で出力が最大になる最適コレクタバイアス電流の関係（電流計の読み取り誤差 0.03 A を測定誤差とした。）

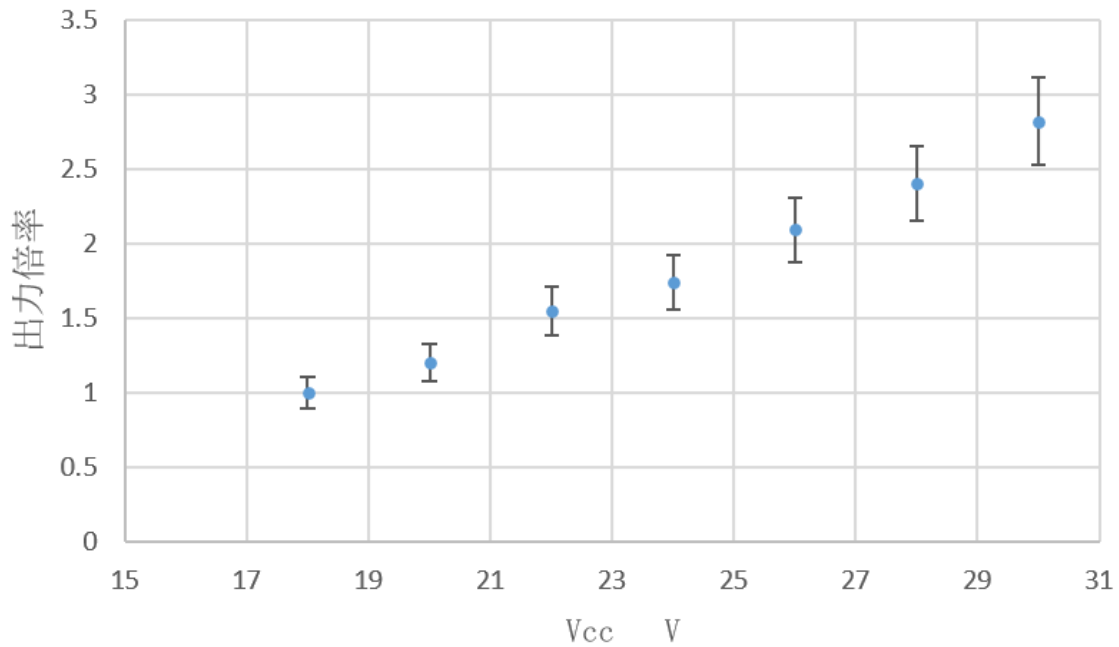


図 5.11. V_{cc} とのそれぞれに対応する最大出力倍率（18 V のときが 1 とする）の関係（各出力の測定誤差を用いて割り算の誤差伝播で計算したものが全誤差とした。）

V_{cc} が大きくなり、動作点が負荷線上の増幅率の大きい方（図 5.5 中の右）に移動する場合、 I_c の振幅が出力信号強度も大きくなる。従って、信号の振幅より必ず大きい最適コレクタバイアス電流が増えたことは理論と一致である。ただし、具体的な関係は各トランジスタの特性によって違うので、違うトランジスタを使う場合、最適コレクタバイアス電流と各負荷線に対応する最大出力を測定する必要がある。出力を大きくしたい場合、負荷線を右に移動させ、最適なコレクタバイアス電流になるように抵抗値を調整すればよいことが解る。

第六章 結論

本研究では、観測衛星への搭載に小型参照光源を搭載することを目的とし、小型誘導結合プラズマ光源（ICP）の素子選択、製造工程、性能向上について開発し、結果を評価した。

第三章では、小型誘導結合プラズマ光源に適正な素子を選択し、完成品の個体差を極力小さくするような製造工程を開発し、評価した。

第四章では、誘導結合プラズマの発光強度に関する特性を調査した。発光強度に影響するコイルから放出する高周波電力とプラズマ着火エネルギーに深く関わる高周波周波数という二つのパラメータを中心としてプラズマ特性を測定した。発光強度はコイルから放出する高周波電力と比例することが分かり、第五章は放出する高周波電力の向上に注目した。また、プラズマ着火エネルギーは 10～110 MHz の領域において 100 MHz 付近極小となり、100 MHz を ICP 光源の運用周波数と設定した方が点灯しやすいことが分かった。

第五章では、Resonance 社が設計した ICP 光源回路をモデルとし、一般的に入手しやすい安価なトランジスタを使って出力高周波電力とトランジスタの動作点との関係を測定した。動作点はコレクタバイアス電流で決め、回路方程式を解くことで各抵抗値とコレクタ電流の関係を計算した。抵抗値の組み合わせを変えること、動作点を移動させることができる。光源に供給する直流電圧 V_{cc} が支配する負荷線を計算し、作動点はいつも負荷線の上に移動することが分かった。異なる V_{cc} に対応する負荷線にそれぞれ出力高周波電力が最大になる最優動作点が存在することが予想でき、それらを測定をした。Resonance 社が設計した回路は電圧を上げるコレクタバイアス電流が正比例で上昇し、最優動作点からずれていく。従って、小型 ICP 光源を各 V_{cc} で動作させるとき、最優動作点の付近で動作するようにコレクタバイアス電流を調整することで、最大限の出力を得られ、性能を改良することができる事が解った。

今後、動作点を移動させることによりトランジスタの増幅率を向上させるという本手法は、小型高性能な高周波増幅回路（PUSH PULL 回路など）を利用することで、さらに高性能・小型化を追究できるであろう。

参考文献

J Hopwood, Review of inductively coupled plasmas for plasma processing. *Plasma Sources Science and Technology*, 1(2):109 (1992)

G. Semen, W. Reinoud, E. Arwin, L. Mikhail, S. Elena, V. Gleb. Planar double-grating microspectrometer. *Optics express*. 15. 3581-8. 10.1364/OE.15.003581 (2007)

S. Shim, W. Lee, J. Woo Park, C. Oh, A study on the E-H mode transition with the line integrated He 23S metastable atom density in an inductively coupled plasma, *Current Applied Physics*, Volume 28, Pages 7-12 (2021)

L. Richard, *Introductory Quantum Mechanics*, Addison-Wesley, ISBN 0-8053-8714-5 (2002)

G. Herzberg, *Atomic spectra and atomic structure*. Prentice-hall, Inc, New York (1937)

P. Nuno, Recent developments on PLASMAKIN - A software package to model the kinetics in gas discharges. *Journal of Physics: Conference Series*. 162. 012006. 10.1088/1742-6596/162/1/01 (2006)

G.Murakami, ひさき衛星延長院査審査会資料からの抜粋 (2022)

S. Fukuda, S. Sawai, S. Sakai, H. Saito, T. Nakagawa, T. Tohma, J. Takahashi, K. Kitade, Flexible standard bus for ISAS/JAXA small scientific satellite series, in 26th International Symposium on Space Technology and Science, ISTS, Hamamatsu, Japan, 2008-f-17 (2008)

T. Yamazaki, Y. Takizawa, K. Kunieda, K. Yamashita, K. Ikeda, K. Misaki, M. Nakamura, I. Yoshikawa, A. Yamaguchi, Normal incidence multilayer telescope for galactic EUV observation. *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.* 80, 299–302 (1996)

A. Yamazaki, I. Yoshikawa, Y. Takizawa, W. Miyake, M. Nakamura, Feasibility study of the O II 83.4-nm imaging of the ionosphere and magnetosphere. *Adv. Space Res.* 32, 441–446 (2003)

A. Yamazaki, F. Tsuchiya, T. Sakanoi, K. Uemizu, K. Yoshioka, G. Murakami, M. Kagitani, Y. Kasaba, I. Yoshikawa, N. Terada, T. Kimura, S. Sakai, K. Nakaya, S. Fukuda, S. Sawai, Field-Of-View guiding

camera on the HISAKI (SPRINT-A) satellite. *Space Sci. Rev* (2014)

I. Yoshikawa, M. Nakamura, M. Hirahara, Y. Takizawa, K. Yamashita, H. Kunieda, T. Yamazaki, K. Misaki, A. Yamaguchi, Observation of He II emission from the plasmasphere by a newly developed EUV telescope on board sounding rocket S-520-19. *J. Geophys. Res.* 102, 19897–19902 (1997)

I. Yoshikawa, A. Yamazaki, K. Shiomi, M. Nakamura, K. Yamashita, Y. Saito, M. Hirahara, Y. Takizawa, W. Miyake, S. Matsuura, Development of a compact EUV photometer for imaging the planetary magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 106, 26057–26074 (2001)

Onsemi, 2SA2039/2SC5706 ON Semiconductor datasheet, onsemi, <https://www.onsemi.com/products/discrete-power-modules/general-purpose-and-low-vcesat-transistors/2sc5706> (2022)

J. H. Keller, J. C. Forster, M. S. Barnes, *J. Vac. Sci. Technol. A* 11, 2487 (1993)

M. A. Lieberman, A. J. Lichtenberg, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, 2nd ed. Wiley, New York (2004)

P. Chabert, N. Braithwaite, *Physics of Radio-Frequency Plasmas*, Cambridge University Press, New York, pp. 200–280 (2011)

R. K. Janev, D. Reiter, and U. Samm, Collision processes in low temperature hydrogen plasmas, Juel-Report No. 4105 (2003)

A. M. Daltrinia, S. A. Moshkalev, M. J. R. Monteiro, E. Bessler, Mode transitions and hysteresis in inductively coupled plasmas *Journal of Applied Physics* 101, 073309 (2007)

C. Wang, X. Lin, F. Li, X. Yu, E-H mode transitions and high-energy electron characteristics of helical antenna coupled plasma. *Journal of Physics D: Applied Physics* 54:31, 315201 (2021)

堀越 源一, 真空技術. 東京大学出版会, pp. 5–121 (2016)

謝辞

私が東京大学大学院 新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻 修士課程に在学中の2年間において、本修士論文を書き上げるにあたり、多くの方から多大なご協力とご指導を賜りましたのでその謝意を著します。まず、Astorocub 株（元 東海大学）横塚先生から実験装置に関する質問に真摯にお答えくださいました。心より感謝申し上げます。東京工業大学修士課程の戴云達様、実験に関する助言を頂き、実験で行き詰った時や発表内容で悩んだときにいつも気にかけてくださいました。心より感謝申し上げます。東京大学大学院 新領域創成科学研究科 複雑理工学専攻 今村研究室と吉川・吉岡研究室に所属する博士課程の千葉翔太様、鈴木雄大様には、日頃から助言を頂き、協力をしてくださいました。心より感謝いたします。同じく修士課程 2年の小杉龍暉様、富宣超様、楊婕様、林暉揚様には日頃から研究に関する貴重な質問と助言してくださいました。心より感謝いたします。同研究室修士 1年の張夢彤様には、実験に協力をしてくださいました。心より感謝申し上げます。また、同研究室出身鈴木文雄様にも多数の指導をしてくださいました。心より感謝申し上げます。篠田裕之教授には将来の展望について有益なコメントを頂きました。心より感謝申し上げます。吉岡和夫講師には日々多くのご指導を賜りました。心より感謝申し上げます。そして、吉川一朗教授には指導教官として研究室配属時から本研究の遂行、執筆指導、発表指導など研究全般においてご指導を賜りました。研究に限らず、多くのことを先生から学ばせていただきました。心より感謝申し上げます。