

# Spatial Plasma Distribution in a Rectangular-Shape Microwave Plasma Source

Yusuke KUWATA\*, Shu ITO\*, Toshiro KASUYA\*, Naoki MIYAMOTO\* and Motoi WADA\*

(Received July 10, 2015)

A power supply network at 2.45 GHz frequency coupled to a field produced by permanent magnets excited an Ar plasma in a rectangular-shape long-slot plasma source. Data measured with an array of Langmuir probe were utilized to construct the two dimensional spatial distribution of electron density and temperature. The arrangement of permanent magnets affected the distribution while the distance of the microwave antenna to the magnets changed the power reflection of the system. Structure of the magnetic field suitable to form homogeneous plasma is discussed.

**Key words** : microwave plasma, plasma source, Langmuir probe

**キーワード** : マイクロ波プラズマ, プラズマ源, ラングミュアプローブ

## 長方形マイクロ波プラズマ源内のプラズマ空間分布

鎌田雄介, 伊藤修, 粕谷俊郎, 宮本直樹, 和田元

### 1. はじめに

現代の文明社会において「プラズマ」は加速器等の基礎研究だけでなく、医療<sup>1)</sup>や、照明等<sup>2)</sup>、の日常生活で使用される製品にも利用され、現代の社会を支える重要な利用価値を持っている。

その中でも半導体・液晶パネルの製造においては多数の工程においてプラズマが利用されており、現在では大量生産の要求に応えるべく、処理基盤の大型化によって高い生産性を実現しようとしている。この状況において半導体製造装置の一つであるイオン注入装置では基盤の大型化に伴い、長尺・高強度・均一なプラズマイオンビームの生成が要求<sup>3)</sup>されている。これらの要求は半導体プラズマプロセスの多様化とともに、用途に

応じた性能実現と云う新たな課題を形成する。特にプラズマ源をプロセス空間の空間電荷効果中和用のフラッドガン<sup>4)</sup>として使用する場合は基板上のデバイスへのダメージを軽減するために電子温度が低く保つことが望ましい。本研究では上記のようなイオン注入装置で大型基盤を処理する際に必要な長尺・均一なプラズマの生成のための基礎研究として2本のアンテナと永久磁石を備えた長方形のマイクロ波プラズマ源を製作及びプラズマ密度や電子温度の測定を行った。

### 2. マイクロ波によるプラズマ生成

$z$ 方向のみの成分を持った一様な磁場  $B_0$  中で電荷  $q$ 、質量  $m$  の荷電粒子が磁場に直交する方向

\*Graduate School of Science and Engineering, Doshisha University, Kyoto

Telephone:+81-774-65-6349, FAX:+81-744-65-6801, E-mail: euo1304@mail4.doshisha.ac.jp, mwada@mail.doshisha.ac.jp

に初速度  $v_0$  で運動する場合その  $x, y$  方向の変位は以下の式で表される. <sup>5, 6)</sup>

$$\begin{aligned} x - x_0 &= \frac{v_0}{\omega_c} \sin \omega_c t \\ y - y_0 &= \pm \frac{v_0}{\omega_c} \cos \omega_c t \end{aligned} \quad (1)$$

このとき  $x_0, y_0$  は旋回中心であり,  $\omega_c$  は以下の式で表され,

$$\omega_c = \frac{|q|B_0}{m} \quad (2)$$

荷電粒子の旋回運動の周波数である.

電子が周波数  $\omega$  の変動電場中に存在するとき, 電子は電場の方向に単振動する. このとき電子の運動方向すなわち電場と直交する方向に一様な磁場  $B_0$  がある場合, ローレンツ力により電子は旋回運動をしようとするが, 電子の単振動運動の周波数  $\omega$  が  $\omega_c$  の時に, 電子は, 変動電場と磁場によって軌道半径を拡大し続ける. 『この状態を電子サイクロトロン共鳴 (ECR : Electron Cyclotron Resonance) と呼び』, そのときの電場の周波数  $\omega_{ce}$  は

$$\omega_{ce} = \frac{|q|B_0}{m_e} \quad (3)$$

で表され,  $m_e$  は電子の質量である. 周波数 2.45 GHz のマイクロ波の場合 ECR の起こる磁場の強さは  $B_0 \approx 87.5$  mT である.

ECR 状態の電子が原子と衝突して原子を電離した場合にその電子は運動エネルギーを失うが, 再度マイクロ波の振動電場によって加速されて他の原子を電離することができる. このことから ECR 状態の電子が存在する領域に原子を導入することで, 連続的に原子を電離することが可能となり, プラズマを生成することができる.

### 3. プラズマ源と測定系

#### 3.1 長方形マイクロ波プラズマ源

##### 3.1.1 長方形マイクロ波プラズマ源

長方形マイクロ波プラズマ源の断面図を Fig. 1 に示す.

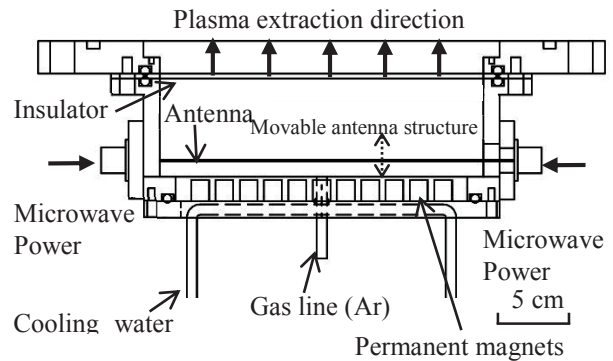


Fig. 1. Cross section of the rectangular-shape plasma source.

今回製作した長方形マイクロ波プラズマ源のプラズマ室はアルミ製の直方体で 20 cm×10 cm×6 cm の容積を持つ. プラズマ室の底部壁面大気側に永久磁石を並べて配置し, その磁力線を横切る方向に 2 本のアンテナを設置した. 2 本のアンテナには単一のマイクロ波電源から分岐した同軸線より 2.45 GHz のマイクロ波を導入し, ガス配管から導入するガスをマイクロ波と永久磁石による電子サイクロトロン共鳴によって電離し, プラズマを生成する. またこのプラズマ源は開口部が測定用チャンバーに接続される. 接続部は絶縁用テフロン板によって絶縁され, チャンバーには  $\phi 0.5$  mm の錫被覆軟銅線の金網が設置されており, プラズマ源外部へのマイクロ波の漏洩を防いでいる. またチャンバーとプラズマ源間に電圧を印可し上述の金網をグリッド状の引出電極とすることでイオンや電子を積極的に引き出すことも可能である.

##### 3.1.2 プラズマ源アンテナ部

2 本のアンテナはそれぞれ磁石の設置された壁面からの距離を 7.5 mm から 12.5 mm まで動かせる構造になっており, アンテナとプラズマ源底部との距離を変えられるようになっている. マイクロ波は, 2 本の同軸ケーブルを介して, 2 つの N 型レセプタクルに導入され, N 型レセプタクルに半田付けされた, 2 本のアンテナに達する.

アンテナは銅製,  $\phi 1.8$  mm で, レセプタクル先端から 212 mm の長さで, プラズマからの保護のため

に、アルミナの絶縁管で覆われている。絶縁管は外径3.0 mm、内径2.0 mmである。

### 3.1.3 プラズマ源磁石設置部

プラズマ源底部の磁石固定用の底板の形状をFig. 2に示す。

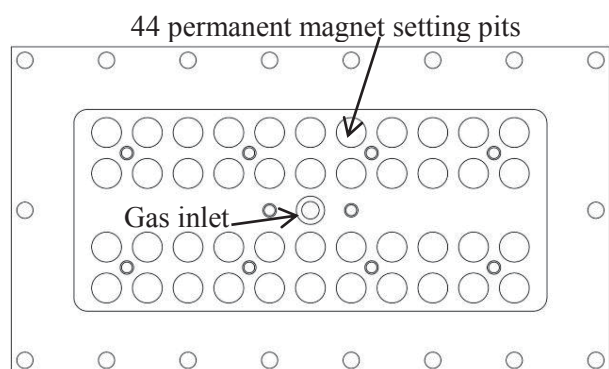


Fig. 2. Drawing of magnet setting plate.

永久磁石を固定しているプラズマ源の底板は 11 個の磁石の設置穴が 4 列あり、プラズマ室内の 2 本のアンテナを挟むように 2 列ずつ配置されている。中心にはガス導入用の穴が開いており、Swagelok 1/4 インチステンレス鋼チューブを通し、Ar ガスを導入する。永久磁石は、φ10 mm×10 mm の丸型ネオジウム磁石を 44 個配置する。永久磁石の N 極、S 極の向きを変えることにより、プラズマ室内の磁場構造を変えることができる。熱減磁を防ぐため、永久磁石は、水冷用銅管により冷却する。

### 3.2 ラングミュアプローブ

測定に使用したラングミュアプローブの設置状況をFig. 3に示す。実験に使用したラングミュアプローブはφ0.6 mmの銅線で、先端の長さは5.2 mm、外部をφ2.0 mmのアルミナ絶縁管で覆っている。プローブは4 cm間隔で7本設置され、プラズマ源の長手方向のプラズマパラメータを測定でき、中央の1本の位置が、プラズマ源の長手方向の中央にくるよう設置されている。7本のプローブはプローブ固定用の金属棒に固定されている。金属棒は、メインチャンバーの扉に固定されており、プラズマ源の短手

方向に可動し、プラズマ源内全体のプラズマパラメータを測定できる。

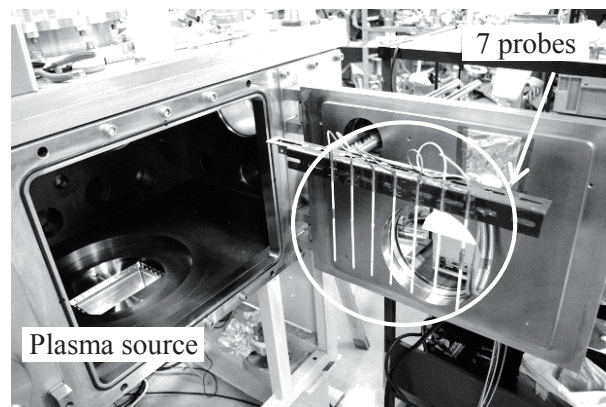


Fig. 3. Picture of Langmuir probes.

プローブ測定には、ファンクションジェネレータより出力した 1.75 Hz の三角波をアンプで -40 V から 40 V まで増幅し、25.4 kΩ の抵抗の両端をオシロスコープで測定した。

### 3.3 測定系

実験時の機器の構成をFig. 4に示す。

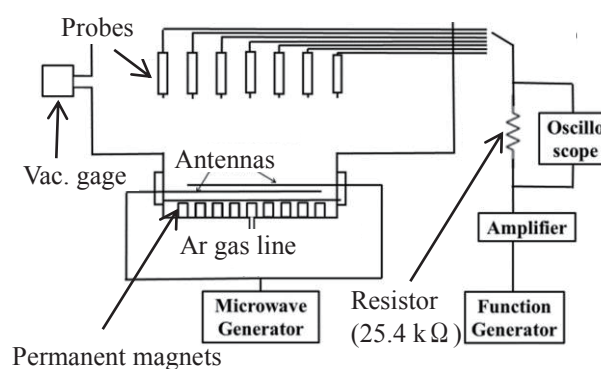


Fig. 4. Experimental setup.

容積約350 lのアルミ製メインチャンバーの底部に上述したプラズマ源を接続した。メインチャンバーには電離真空計とターボ分子ポンプも接続されている。ラングミュアプローブの先端はプラズマ源の上方213 mmの位置にあり、電子密度と電子温度を測定する。

#### 4. 結果

4パターン of 磁石の配置でプラズマ室内にArガスを導入し、圧力 $8.5 \times 10^{-2}$  Pa, アンテナと磁石設置壁面との距離7.5 mm, アンテナ2本へ接続されたマイクロ波電源の出力合計100 Wの条件でプラズマを生成し、その分布がある程度プラズマ源内の長尺方向に均一な磁石の配置を確認し、その磁石配置で磁石とアンテナの距離を変えて電子密度と電子温度の測定を行った。

##### 4.1 プラズマ分布

プラズマ室に磁石の極性をそれぞれ変えて4列44個設置したときの磁極の配置パターンをFig. 5に示す。

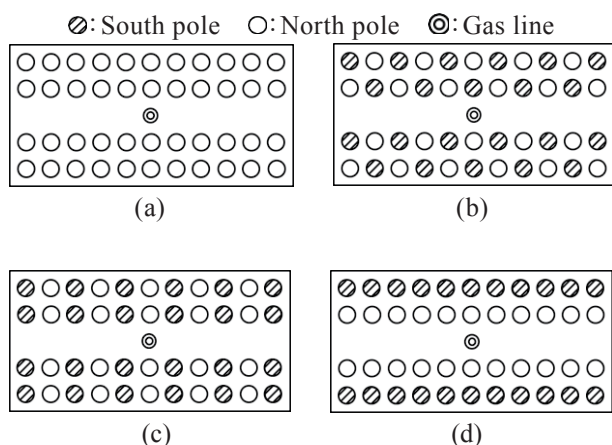


Fig. 5. Arrangement pattern of permanent magnets.

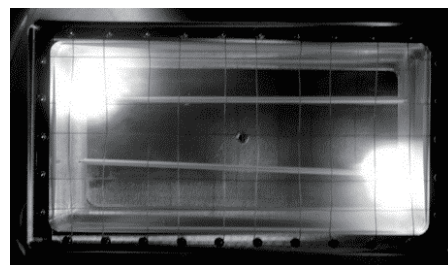
Fig. 5のそれぞれの磁石配置でプラズマを生成したときの分布をFig. 6に示す。

Fig. 6の(a)~(d)の発光領域の分布をプラズマの分布として比較すると(d)が最もプラズマ室内で均一に分布している。

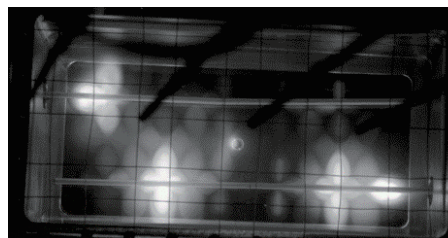
##### 4.2 電子密度と電子温度

生成されたプラズマの分布が最も長尺方向に均一であったFig. 5(d)の磁石配置でプラズマ源内の圧力や、マイクロ波の発信強度を変えずにアンテナのプラズマ室壁面からの距離を7.5 mm, 10 mm, 12.5 mmと変更したときのプラズマの発光分布、電子密度分布、電子温度分布をそれぞれFig. 7

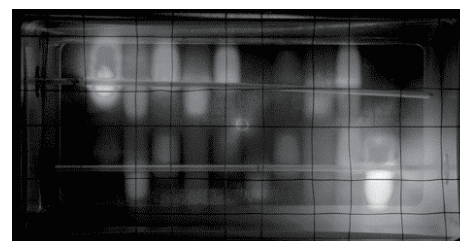
~9に示す。また、アンテナとプラズマ室壁面の距離毎のパラメータをTable 1に示す。



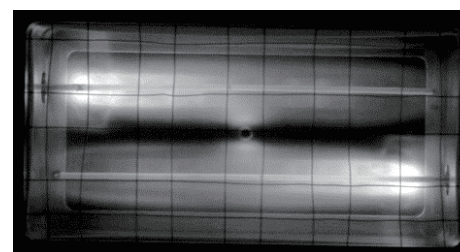
(a)



(b)

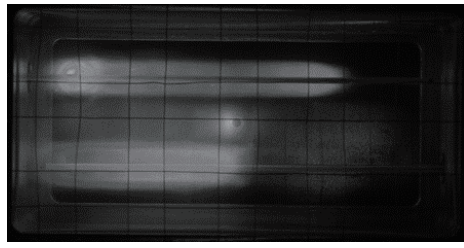


(c)

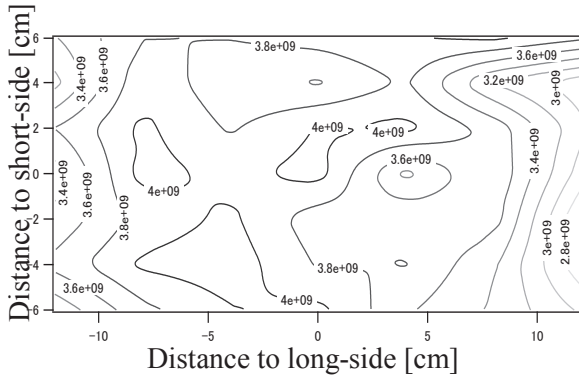


(d)

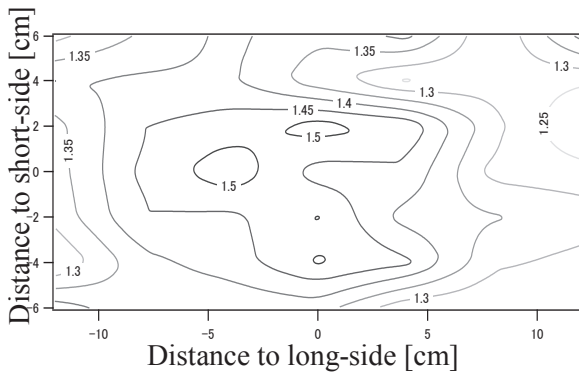
Fig. 6. Pictures showing plasma luminous distributions for (a): magnet arrangement shown in Fig. 5(a), (b): magnet arrangement shown in Fig. 5(b), (c): magnet arrangement shown in Fig. 5(c), and (d): magnet arrangement shown in Fig. 5(d).



(a) Plasma distribution



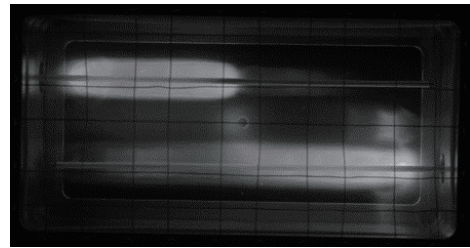
(b) Electron density distribution



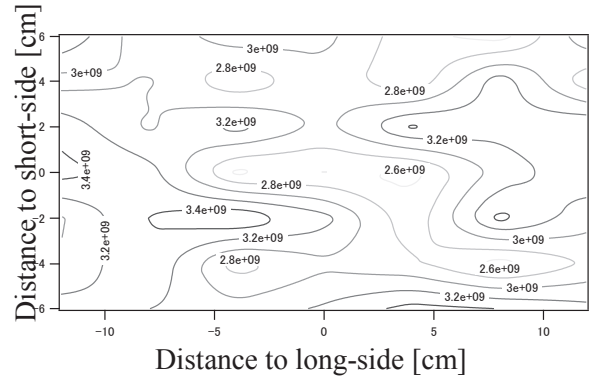
(c) Electron temperature distribution

Fig. 7. Plasma parameters at antenna distance 7.5 mm.

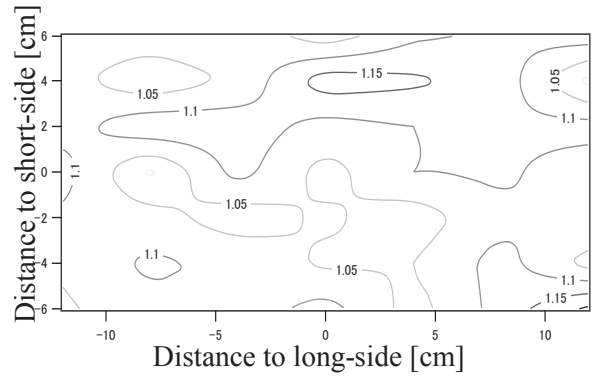
アンテナとプラズマ室壁面の距離毎の形状、電子密度、電子温度を比較するとアンテナと壁が最も近い7.5 mmでは最大電子密度、最高電子温度の値が他の距離に比べて最も高く、また、電源へのマイクロ波の反射も少ない。アンテナと壁の距離が10 mmと12.5 mmでは最大電子密度と最高電子温度の値は大きな差は無いが電源へのマイクロ波の反射が12.5 mmの方が多く、実質的に少ないマイクロ波の入力で同程度の密度、温度のプラズマが生成されている。



(a) Plasma distribution



(b) Electron density distribution



(c) Electron temperature distribution

Fig. 8. Plasma parameters at antenna distance 10 mm.

Table 1. Plasma parameters and antenna distance from chamber wall.

Antenna distance [mm]	7.5	10	12.5
Reflectance [W]	6	39	54
Maximum electron density [ $10^9 \text{ cm}^{-3}$ ]	4.0	3.4	3.4
Maximum electron temperature [eV]	1.50	1.15	1.20

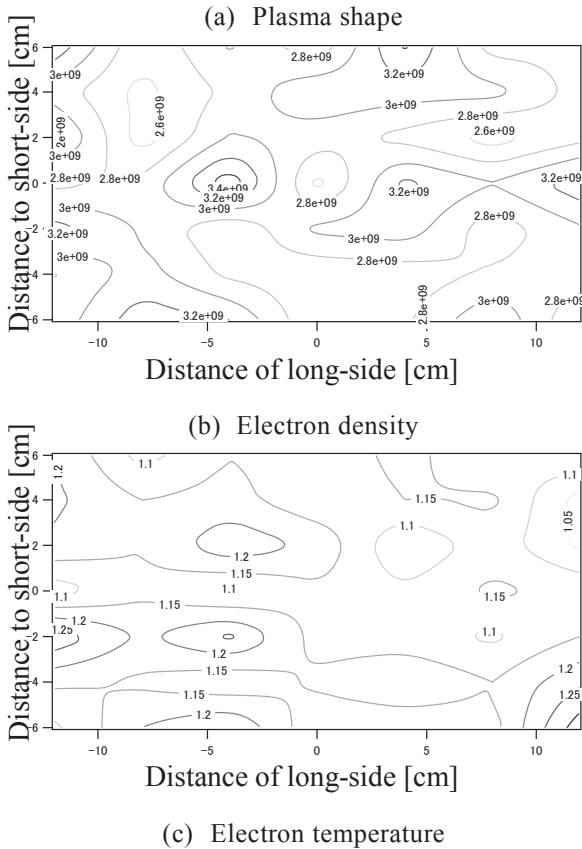
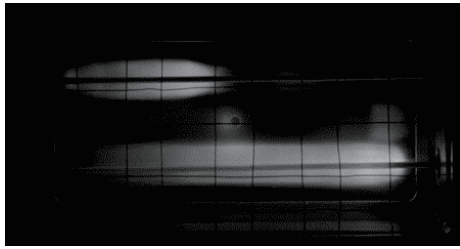


Fig. 9. Plasma parameters at antenna distance 12.5 mm.

### 5. 考察

#### 5.1 磁場分布とプラズマ強度分布

Fig. 5, 6より磁石の配置とプラズマの分布を比較する. まず(a)の配置は最もプラズマが空間的に偏在しており, 2本のアンテナのマイクロ波導入側の端部2ヶ所にしかプラズマが存在していない. 電場と磁場によってプラズマが移動する場合の速度  $\vec{v}_E$  は

$$\vec{v}_E = \frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2} \quad (4)$$

で表される<sup>6)</sup>. (a)の磁石配置でのマイクロ波の電

場と永久磁石からの磁場の関係はFig. 10の様に電場と磁場が並行となっており  $\vec{v}_E$  は0となりプラズマは拡散しない. (a)の磁石配置では伝搬損失が少なく, 最もアンテナからの電場の強い導入直後の領域ではマイクロ波で加速された電子によってArガスが電離され, プラズマが生成される. しかしマイクロ波の電場と永久磁石の磁場が並行なため, プラズマは拡散せずに生成された領域に留まり続けると考える.

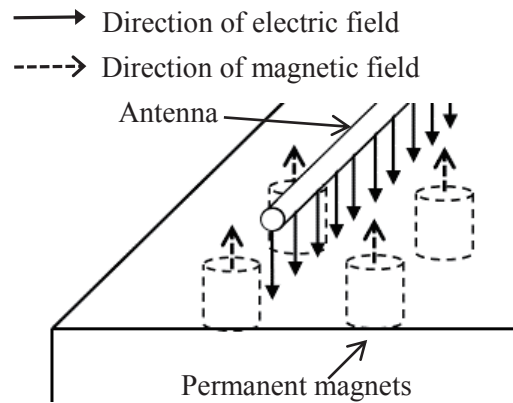


Fig. 10. Outline of electromagnetic fields on (a) pattern magnet arrangement.

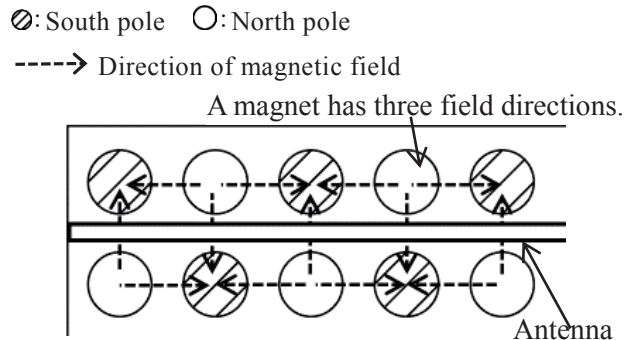


Fig. 11. Outline of magnetic field on (b) pattern magnet arrangement.

次に(b)の磁場の向きの概略図をFig. 11に示す. プラズマの形状を見ると, アンテナの回りを中心にプラズマの強い領域と弱い領域が格子状に存在している. これは互い違いの極性を持って配置された, 永久磁石の磁場が電子サイクロトロン運動を発生させる磁場  $\vec{B}_0$  と直交する磁場勾配  $\vec{\nabla}B$  をプラズマ源の短尺方向と長尺方向両方に存在

するために写真のような格子状の分布になると考える。

電子サイクロトロン運動を発生させる磁場  $B_0$  と直交する磁場勾配  $\vec{\nabla}B$  が存在する場合のプラズマの移動は磁場勾配ドリフトと呼ばれ、そのドリフト速度  $\vec{v}_B$  は

$$\vec{v}_B = \frac{-\mu_m \vec{\nabla}_\perp B \times \vec{B}_0}{qB^2} = \frac{-\mu_m \vec{\nabla}B \times \vec{B}_0}{qB^2} \quad (5)$$

で表され<sup>6)</sup>、 $\mu_m$  は  $B_0$  と直交する磁気双極子の磁気モーメント、 $\vec{\nabla}_\perp$  は  $B_0$  に垂直な面内での勾配である。磁場勾配ドリフトは(c)の磁石配置でより顕著に確認できる。(c)の配置の磁場の向きの概略図を Fig. 12 に示す。

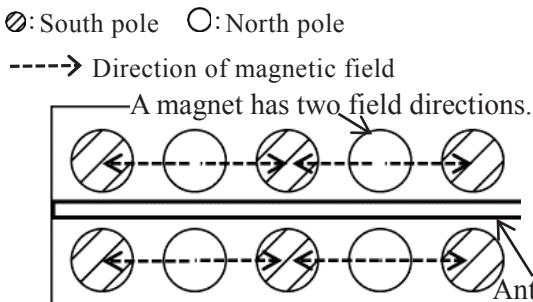


Fig. 12. Outline of magnetic field on (c) pattern magnet arrangement.

(c)の配置ではそれぞれの永久磁石から発生する磁場  $B$  は、プラズマ室の長尺方向のみとなっており、また、アンテナを挟んだ隣の永久磁石と極性がそろっているために、Fig. 13の様に磁場勾配ドリフトの向きがアンテナを横切る方向に揃って発生する。Fig. 13の右側の部分では磁場  $B$  の向きが左側と反対のため、ドリフト方向も逆になるため、アンテナの両脇にプラズマの強い部分と目視できない部分が交互に発生すると考えられる。

プラズマ源の長尺方向に最も均一にプラズマが存在するのは(d)の配置である。これは永久磁石の磁力線がプラズマ源のどの位置でもアンテナを横切る方向に繰り返し存在するため、磁場とマイクロ波の電場により式(4)のプラズマドリフトがアンテナ長尺方向に発生し、(a)の様にアンテナ

導入部で生成されたプラズマがプラズマ源の長尺方向に拡散しているためと考えられる。

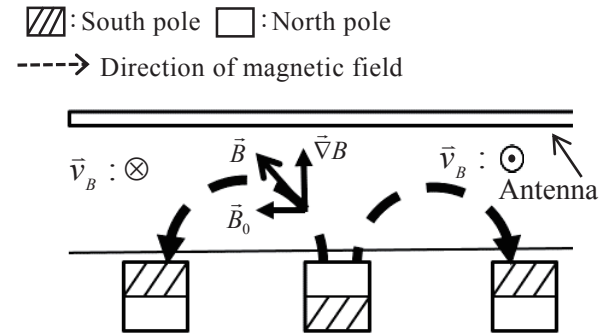


Fig. 13. Mechanism of plasma drift by Grad-B.

### 5.2 電子密度と電子温度の空間分布

Fig. 5(d)の永久磁石の配置で測定された電子密度の分布は目視でプラズマが発光している領域、2本のアンテナ近傍に生成されたプラズマに挟まれた領域で電子密度が高く、プラズマの発光が確認できる領域で実際の電子密度も高いことが確認できた。この傾向はアンテナ距離によらず同じ傾向であった。また、アンテナと壁の距離を変えても、電子密度の最も高い値は顕著な差は確認できなかった。アンテナと壁面の距離が変わった際にマイクロ波電源へ反射波の強度は距離に比例して大幅に増加し、12.5 mmでは100 W中の54 Wが電源に反射していた。このことから、アンテナと壁面の距離が近い場合はマイクロ波のエネルギーがプラズマに吸収され、距離が遠い場合に比べてより多くのイオンが生成されていると考える。また別の要因として、今回はプラズマ源から測定位置が遠く、プラズマ源からプローブに到達する間にさまざまな方向へ拡散し、差が現れなかった可能性がある。今後プローブをプラズマ源に接近させた測定や、引出電圧を印可しての測定によって測定用プローブに電子が到達しやすい状態で、より詳細な測定を行えば、アンテナと壁面距離による電子密度の依存性の有無を確認できると考えられる。

電子温度はアンテナと壁面の距離が7.5 mmのみ最高値が1.5 eVと他の約1.2 eVの結果と比べて

高く、また測定面内でのバラつきも10 mm, 12.5 mmに比べて大きかった。電子密度は目視での発光領域との相関傾向はなさそうであったが、これは電子を加速する電場を与えるマイクロ波の周波数等のマイクロ波のパラメータに変更がなかった為と考えられる。

今回製作したプラズマ源と類似した構成のプラズマ源<sup>7)</sup>がPichotらによって報告されており、その磁場とアンテナの構成と今回の構成の比較をFig. 14に示す。Pichotの報告では直径150 mmの範囲で均一な電子密度が実現している。今回の測定では均一な電子密度の分布を実現することはできなかったが今後Pichotの報告に近い構成や、今回変更していないガス流量やマイクロ波の入力電力等も変更し、均一な電子密度分布を持つプラズマ源の開発を目指す。

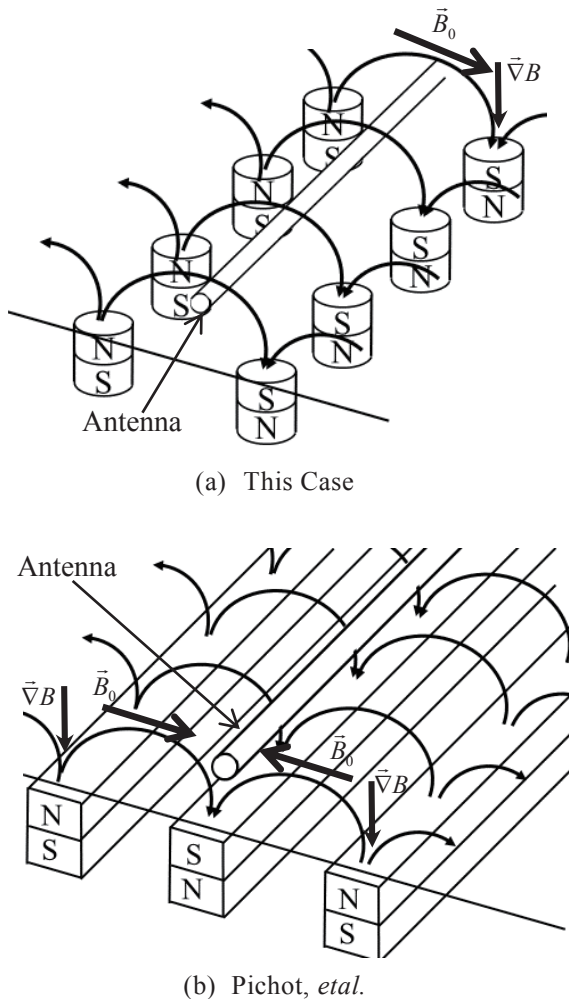


Fig. 14. Comparison of magnetic fields between this report and Pichot's report.

## 6. まとめ

長方形マイクロ波プラズマ源を製作し、永久磁石の配置を変えてプラズマ形状の比較を行い、アンテナを挟んでN極とS極の列が並ぶ配置が最も長尺方向に均一なプラズマ分布であった。

この磁石配置でアンテナがチャンバー壁面に最も近いときに電子密度が最も大きく、また、電子温度も距離が10 mm以上の場合と比較して0.3 eV程度の差であることから、アンテナと磁石の距離が近い方が高密度のプラズマを生成しやすいと考えられる。また、電子密度の分布も実際に目視でプラズマの光度が高い部分が相対的に電子密度の大きな部分となっており、均一形状のプラズマを生成できれば、プラズマの密度も均一にすることができると考えられる。類似のプラズマ源としてFig. 14のようなプラズマ源が過去に報告されており、今後は同様にアンテナの真下に磁石のあるタイプのプラズマ源との比較も実施予定である。

## 参考文献

- 1) G. Fridman, G. Friedman, A. Gutsol, A. B. Shekhter, V. N. Vasilets, and A. Fridman, "Applied Plasma Medicine", *Plasma Process. Polym.*, **5**, 503-533 (2008).
- 2) R. Devonshire, "The Competitive Technology Environment for LED Lighting", *J. Light & Env*, **32**, 275-287 (2008).
- 3) S. V. Dudin, D. V. Rafalskyi, and A. V. Zykov, "High Homogeneity 25 cm Low-Energy RF Ion Source with Inherent Electron Compensation", *Review of Scientific Instruments*, **81**[8], 083302 (2010).
- 4) C. Cantin, G. Gove, and G. Polisski, "Verification and Reduction of Surface Charging During High/Medium Current Implantations by Implementing Plasma Damage Monitoring", *Microelectronics Reliability*, **49**, 215-220 (2009).
- 5) F. F. Chen, *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion* (2<sup>nd</sup> ed.), (Plenum press, New York, 1974), p.20.
- 6) 林泉, プラズマ工学, (朝倉書店, 東京, 1987), 第7章.
- 7) M. Pichot, A. Durandet, J. Pelletier, and L. Vallier, "Microwave Multipolar Plasmas Excited by Distributed Electron Cyclotron Resonance: Concept and Performance", *Rev. Sci. Instrum.*, **59**, 1072-1075 (1988).