

## 大口径マルチスロットアンテナによる均一 ECR プラズマの生成

上田, 洋子  
九州大学大学院総合理工学研究科高エネルギー物質科学専攻

寺西, 秀明  
九州大学大学院総合理工学研究科高エネルギー物質科学専攻 : (株) 富士電機総合研究所

田中, 雅慶  
九州大学大学院総合理工学研究科高エネルギー物質科学専攻

篠原, 俊二郎  
九州大学大学院総合理工学研究科高エネルギー物質科学専攻

他

<https://doi.org/10.15017/17337>

---

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 16 (2), pp.191-198, 1994-09-01. 九州大学大学院総合理工学研究科  
バージョン :  
権利関係 :

# 大口径マルチスロットアンテナによる均一 ECR プラズマの生成

上田 洋子\*・寺西 秀明\*\*・田中 雅慶\*\*\*

篠原 俊二郎\*\*\*・河合 良信\*\*\*

(平成6年5月31日 受理)

## Production of a Uniform ECR Plasma Using Large Diameter Multi Slot Antennas

Yoko UEDA, Hideaki TERANISHI, Masayoshi TANAKA,  
Shunjiro SHINOHARA and Yoshinobu KAWAI

A uniform ECR plasma is produced with a multi slot antenna of 280mm in diameter. The radial profile of the ion saturation current density is examined as a function of microwave power and pressure. The radial uniformity of the ion saturation current density is within  $\pm 3\%$  over 8 inches in diameter for the input microwave power 1kW at pressure of 2mTorr. Furthermore, the deposition of a-Si:H films is attempted on glass substrates using mixture SiH<sub>4</sub>/He. When the microwave power is increased, the thickness of the films increases.

### 1. 序 論

半導体プロセスにおいてすでに導入されている ECR プラズマ技術は、プラズマの大口径化、高密度化、高均一性においてまだまだ改善されるべき問題が山積している。通常の ECR プラズマ生成法は導波管の基本モードを用いて電磁波を入射するため、プラズマの大口径化かつ均一性を同時に実現させるということはかなり困難である。しかし現在、産業界からは 8 インチウエハー対応のより大口径な ECR プラズマが強く望まれている。我々はマイクロ波の波長に依存せず大口径で均一なプラズマを生成できるマルチスロットアンテナ (MSA) [1-5] を用いた ECR プラズマ生成法の開発を行っている。今回、ECR プラズマ CVD による薄膜の大面积化にむけ直径 300mm のチャンパーと直径 280mm のマルチスロットアンテナ (MSA) からなる磁気ミラー型プラズマ発生装置を建設した。

プラズマの均一性を調べるにあたり、基板の有無は

\*高エネルギー物質科学専攻修士課程

\*\*高エネルギー物質科学専攻修士課程 (現在富士電気総合研究所)

\*\*\*高エネルギー物質科学専攻

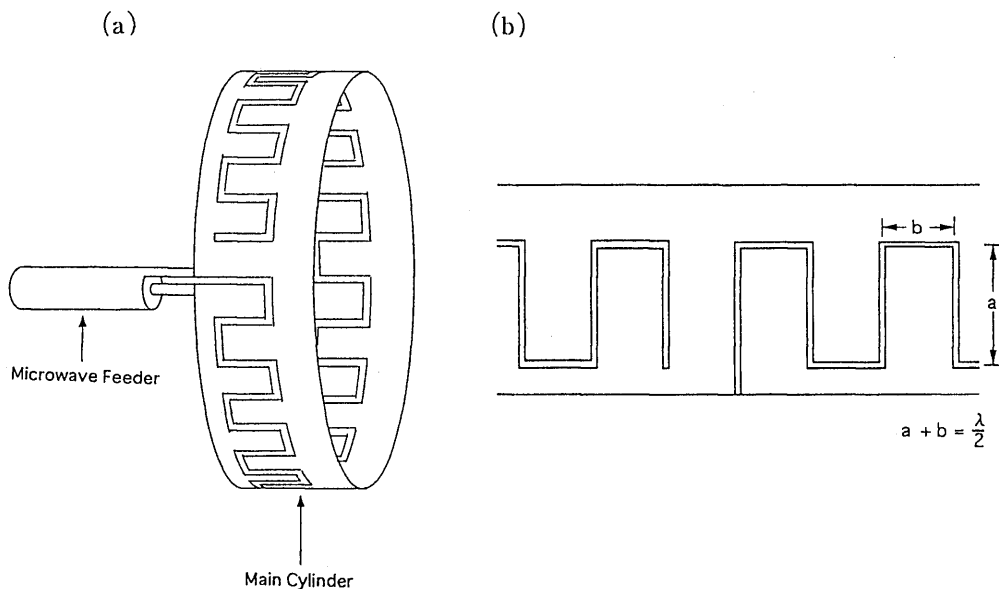
重要である。基板の設置によりプラズマが吸収され密度が低下するのみならず、均一性にも影響を与える。そこで基板ホルダー (8 インチ用) を設置した状態でこのプラズマの均一性を調べた。

特にエッチングの分野で早急に望まれる高密度プラズマを達成するため、今回マイクロ波の導入口のウィンドウ部を改良した。これはマイクロ波出力を増強させるためである。これまで高マイクロ波出力では反射が大きく、そのためウィンドウ部分が熱をもち破損した結果、リークして長時間の実験ができなかったが、この改良により He+SiH<sub>4</sub> (10%) ガスで a-Si:H 膜の成膜実験に 1 時間以上耐えることが可能となった。第 2 章で MSA を用いた ECR プラズマの生成機構を説明する。実験装置、実験結果及び考察を各々第 3 章、第 4 章で述べる。

### 2. MSA を用いた ECR プラズマの生成機構

Fig. 1 (a) に MSA の概略図を示す。MSA は Fig. 1 (a) に示すように金属円筒に約 2mm のスロットが入った円筒状のアンテナであり、スロットの一端は定在波が立つように短絡されている。

Fig. 1 (b) にスロットの拡大図を示す。スロットの



**Fig. 1** (a) The schematic diagram of the multi slot antennas  
 (b) The magnified view of the slot

長さは **Fig. 1 (b)** の  $a$  と  $b$  を加えた長さが印加するマイクロ波の半波長の長さとなるように決められている。このようなスロットにマイクロ波を伝播させると定在波が立ち、MSA の円周に沿って電場の向きが揃う。MSA の中心軸を磁力線方向と一致させて、その前方に電子がサイクロトロン共鳴を起こすための磁場の値を設定することにより、MSA から放射される電場とサイクロトロン運動をしている電子の ECR 共鳴効果でプラズマが生成される。MSA は印加するマイクロ波の波長にかかわらず、径方向に関してアンテナの直径程度の広い領域にわたって電場が存在しているために、マイクロ波の波長より大きな直径のプラズマが生成可能である。

### 3. 実験装置

**Fig. 2** に実験装置の概略図を示す。

容器の全長は 1600mm で、そのうち内径 290mm の部分の長さが 1200mm あり、内径 500mm の部分の長さが 400mm ある。内径 290mm の部分の長さを 700mm に短縮することもできる。今回は内径 290mm の部分の長さを 1200mm にして実験を行った。これは、磁場コイルの可動範囲が内径 290mm の部分に限

られており、磁場配位を大きく変化させて実験を行うためには、長さを 1200mm にする必要はあるということと、MSA と ECR 領域を遠ざけてアンテナ部とマイクロ波導入部の加熱を減少させるためである。真空容器の材質はステンレス製で接地しており、外側には水冷用パイプが巻かれている。真空容器は油回転ポンプ及び 2000l/s の複合分子ポンプにより  $1 \times 10^{-6}$  Torr 以下に排気される。

ガスは、プラズマパラメータ測定時には He, H<sub>2</sub>, Ar を使用し、a-Si:H 薄膜成膜時には He (90%) + SiH<sub>4</sub> (10%) を使用した。ガスの流量はマスフローコントローラーにより調節されて真空容器内に供給される。

2.45GHz のマイクロ波と電子がサイクロトロン共鳴を起こすのに必要な磁場を発生させるため磁場コイル (内径 320mm) を 6 個使用した。実験では、磁場コイルの位置は固定しておき、磁場コイルに流す電流を変化させて磁場配位を変化させた。

マイクロ波発生源として、最大出力 1.3kW (連続波) のマグネトロンを用いた。発振されたマイクロ波は、同軸導波管変換器により同軸モードに変換された後、真空容器内の MSA に供給される。プラズマとマイクロ波回路系のマッチングを、導波管部分に十字形

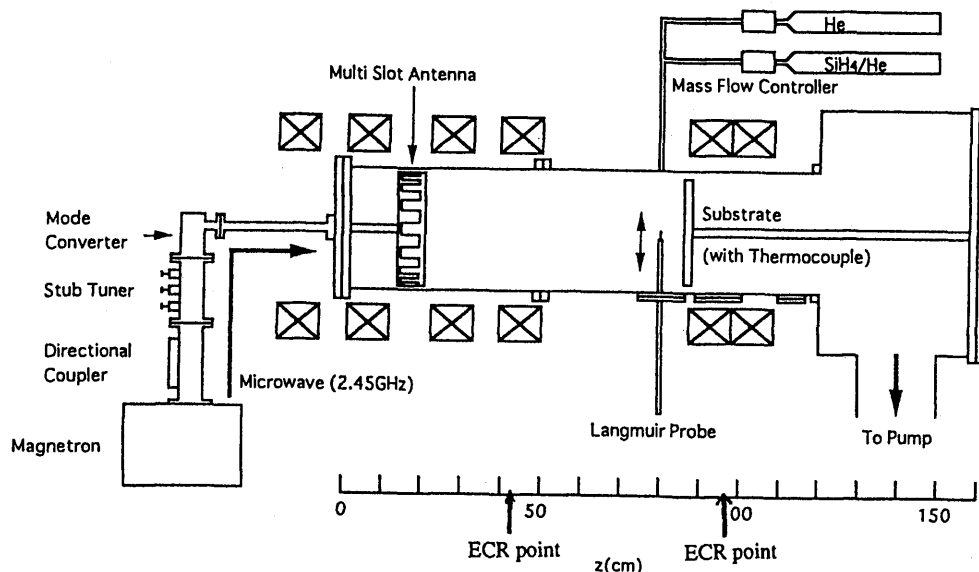


Fig. 2 The schematic diagram of the experimental apparatus

方向性結合器を取り付けそれにパワーモニターを接続してマイクロ波の入射と反射を測定し、反射が最小になるように、同じく導波管部分に取り付けられた 3 スタブチューナーを調節することにより合わせた。

MSA は、スパッタリングを起こしにくいステンレス製であり、直径は 280mm、スロット長は 70mm、スロット幅は 2mm である。

基板ホルダーは、外径が 280mm、ホルダー面の直径が 270mm で、加熱のためのヒーターが裏側についており、± 5 % の温度差で一様に加熱できる部分の直径が 240mm ある。基板ホルダーの中心には熱電対が入っており、ホルダー中心部の温度が測定できるようになっている。

プラズマパラメータの測定には Langmuir プロブを使用した。プロブの形状は直径 1mm、長さ 3mm の円筒形である。

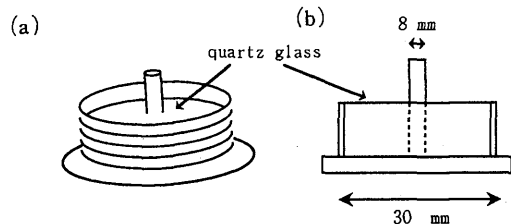


Fig. 3 The part of the vacuume window

Fig. 3 (a), (b) にマイクロ波導入ウインドウ部の略図、断面図を示す。マイクロ波はチェンバー内にこの窓を通して同軸モードで入射される。矢印で示される部分の材質がこれまでセラミックであったが、今回透明の石英にした。この部分と軸は真空中用接着剤で固定され、真空を保っている。

#### 4. 実験結果と考察

##### 4.1 均一プラズマの生成実験

実際に a-Si:H 太陽電池を作製する場合には、その大面積化と均一性の実現がまず前提条件になる。そこで、Fig. 2 に示されている実験装置を用いて、He プラズマのイオン飽和電流密度及びプラズマパラメータの径方向分布の測定を外部パラメータを変えて行った。測定位置は、 $z=95\text{cm}$  であり、 $z=100\text{cm}$  のところに基板ホルダーを設置している。

Fig. 4 は磁場配位を一定にし (Fig. 5 (a) で  $I=50\text{A}$  の場合)、かつマイクロ波出力も一定 (1000W) にした上で、圧力を変化させた場合のイオン飽和電流密度の径方向分布である。マルチスロットアンテナの直径 (280mm) 程度の領域にわたってイオン飽和電流が存在し、大口径プラズマが生成されていることがわかる。イオン飽和電流の径方向分布の一般的傾向としては、マルチスロットアンテナ付近で概ね大きく、それより

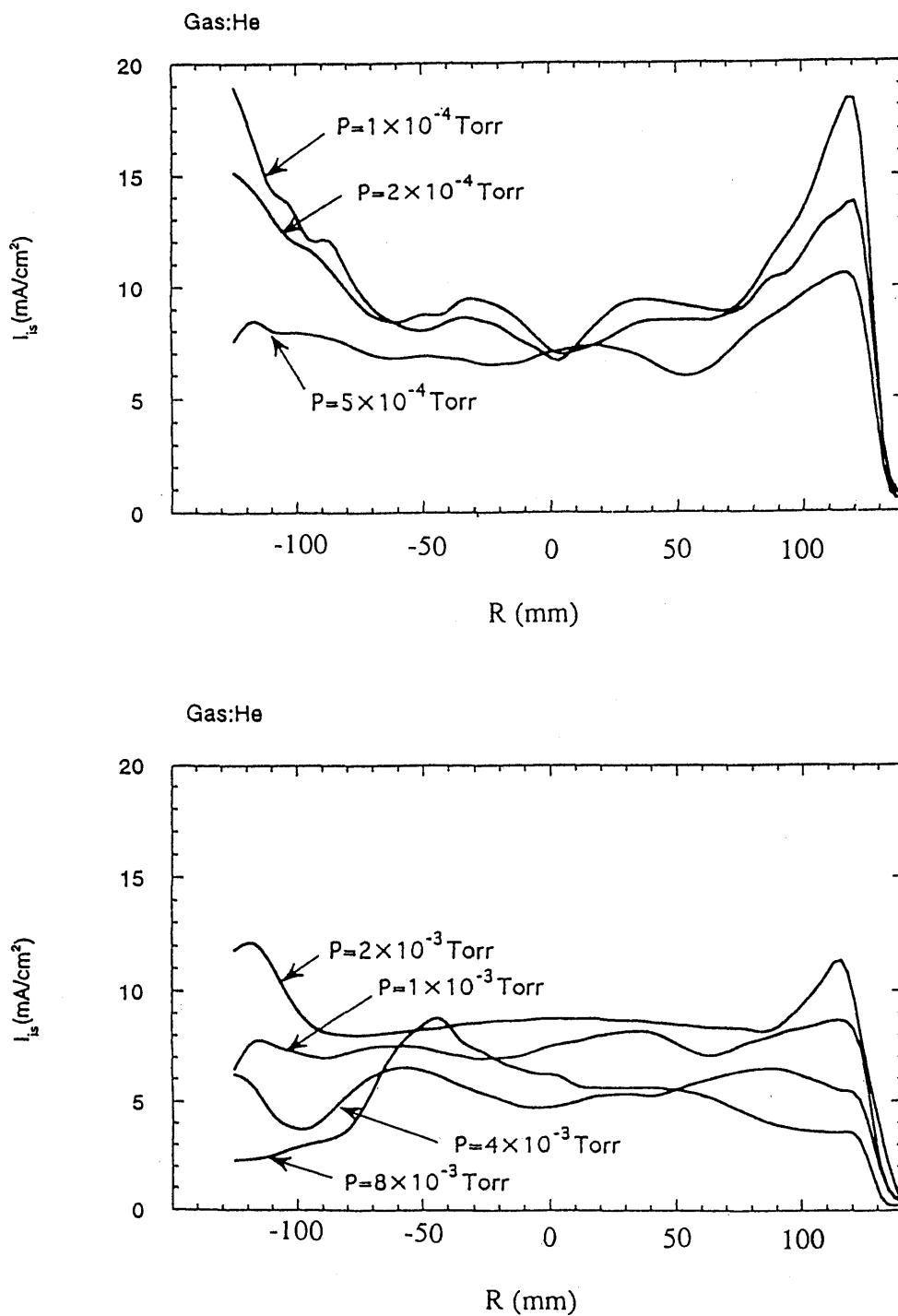
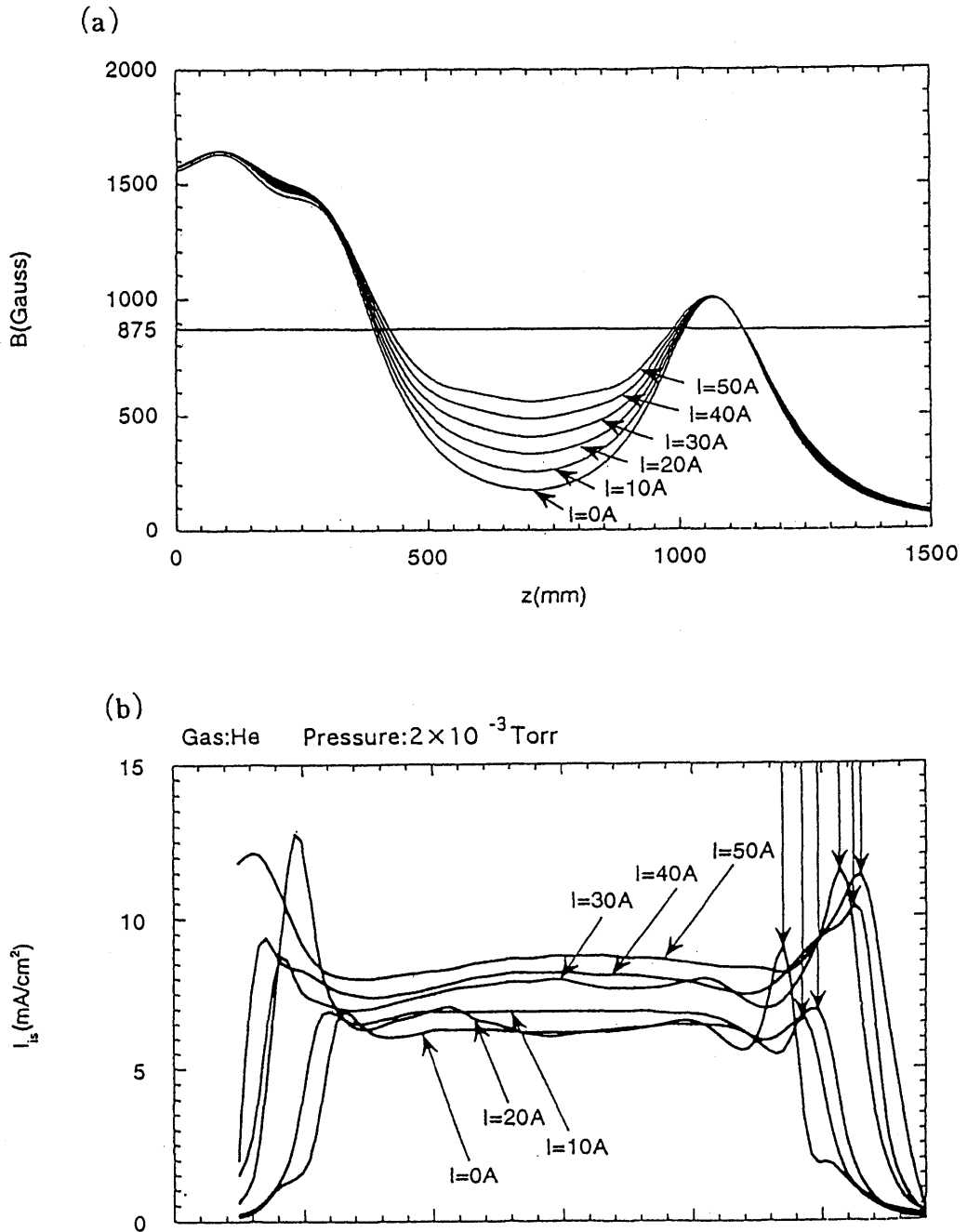
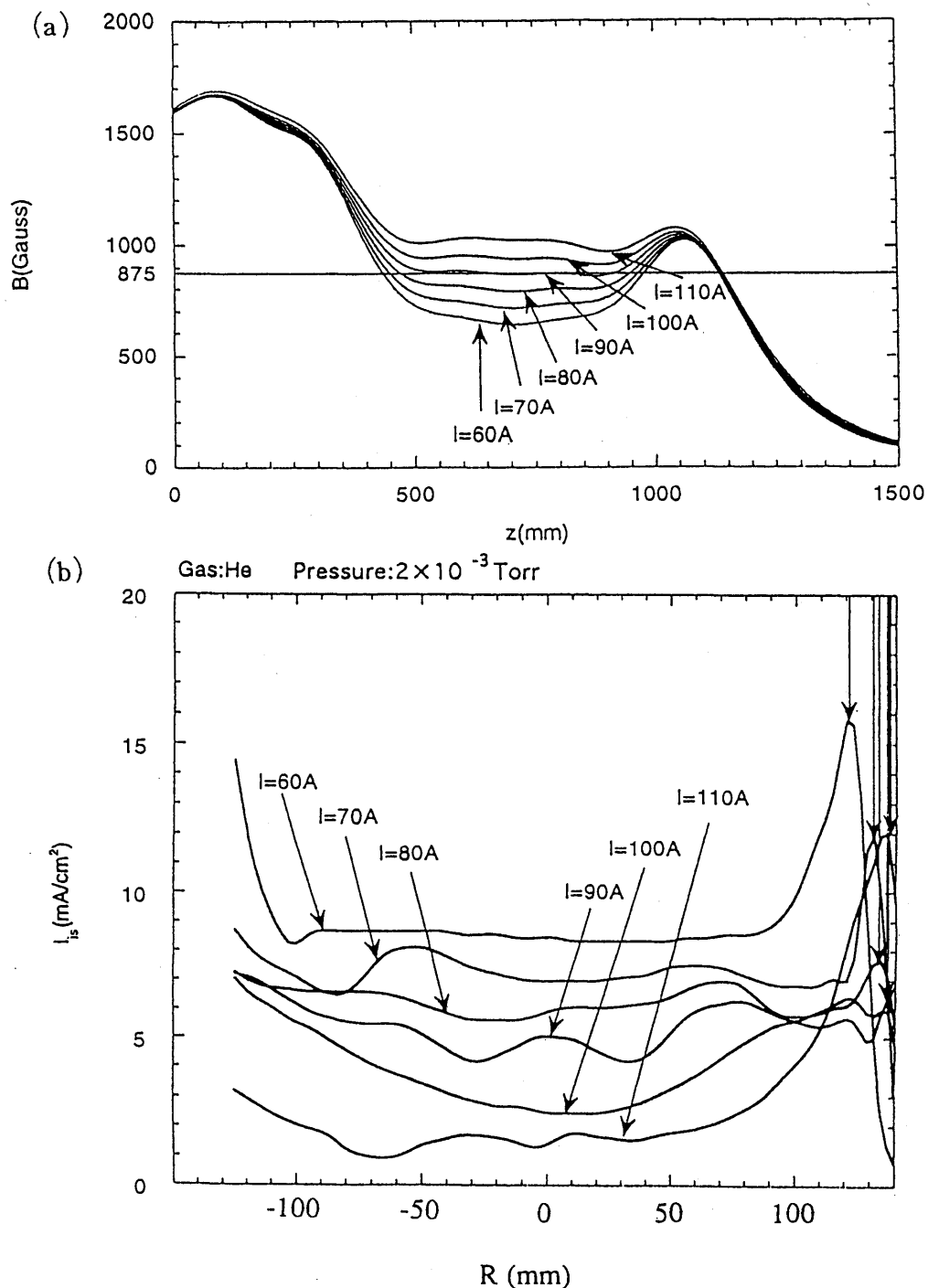


Fig. 4 The dependence of the ion saturation current profile on the gas pressure



**Fig. 5** (a) The axial profile of magnetic fields ( $I=0\sim 50A$ )  
 (b) The dependence of the ion saturation current profile on the profile of magnetic fields 1  
 (I: The coil current of center of the mirror magnetic profile)



**Fig. 6** (a) The axial profile of magnetic fields ( $I=60\sim 110A$ )  
 (b) The dependence of the ion saturation current profile on the profile of magnetic fields 2  
 ( $I$ =The coil current of center of the mirror magnetic profile)

内側の領域では減少しているが、これは、マルチスロットアンテナから放射される電場強度を強く反映していると考えられる。そのなかでも圧力が  $2 \times 10^{-3}$  Torr の場合に、中心部の 20cm 程度にわたって均一な領域が存在している。

**Fig. 5 (a), (b)** は、圧力一定 ( $2 \times 10^{-3}$  Torr)、マイクロ波出力一定 (1000W) とし、磁場の値を変化させたときの、中心軸上での磁場の大きさの軸方向分布、イオン飽和電流密度の径方向分布である。ミラー磁場のミラー比が大きく、ミラー中央における磁場が小さい場合、イオン飽和電流は径方向に狭い範囲でしか存在せず、磁場の値を上げるにしたがって、イオン飽和電流は、径方向に広い範囲で存在するようになるのに加えて、全体の値が上昇してくる。そして、**Fig. 6 (a), (b)** に示すようにさらに磁場の値を上げると、イオン飽和電流は、径方向に更に広い範囲で分布するが、その絶対値は、徐々に下がってくる。これらのことは、次のような定性的な説明により理解することができる。

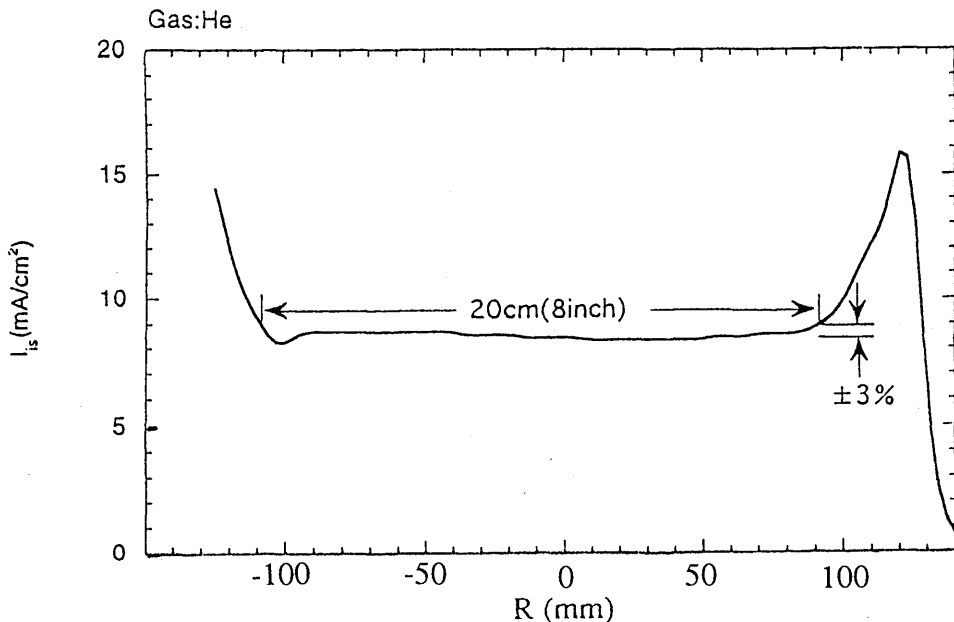
ミラー部の磁場の値が小さいときは、生成されたプラズマが磁力線に沿って進む際に磁力線がチェンパー壁と交差する所で再結合してプラズマが無くなり、ミラーの後方で磁力線が再び収束してくるために測定点 ( $z=95$ cm) ではチェンパー壁付近にプラズマが存

在しないことになる。そして、磁場の値を更に上げるとミラー比が小さくなりプラズマのミラーによる捕獲される割合が小さくなると共に、径方向における磁場強度の違いから ECR 条件からはずれてくる領域が徐々に大きくなっていくため、プラズマが生成されなくなりイオン飽和電流の値が下がってくる。

イオン飽和電流の径方向分布がもっとも均一になるための圧力、マイクロ波出力、磁場配位の最適値は、He ガスで、 $2 \times 10^{-3}$  Torr, 1000W, ミラー中央部磁場 630Gauss であった。その場合のイオン飽和電流 (モータードライブで連続的に測定) の径方向分布を **Fig. 7** に示す。直径約 20cm にわたって、 $\pm 3\%$  の均一性が得られていることがわかる。これまでの実験でも一様性のよい ECR プラズマが得られていた [5] が、**Fig. 7** のような  $\pm 3\%$  の均一プラズマが得られたのはこの実験が初めてである。その条件において、イオン飽和電流が均一な領域では、電子密度は約  $7 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$  で一定であり、電子温度は約 6eV で一定である。これらの結果より、マルチスロットアンテナはプラズマプロセスに必要な大口径・均一 ECR プラズマを生成できるアンテナであると言える。

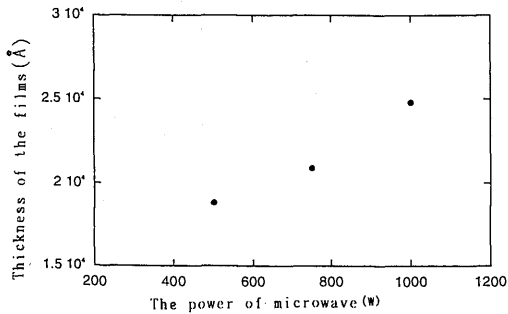
#### 4.2 アモルファスシリコン薄膜の成膜実験

次に実際に He で希釈されたシランガスを通し a-Si:



**Fig. 7** The uniform profile of the ion saturation current





**Fig. 8** The dependence of the thickness of a-Si:H films on the incident power of microwave

H 膜を成膜した。Fig. 3 で示したマイクロ波導入ウインドウの改良により、安定なマイクロ波放電と長時間の成膜が可能になった。磁場配位は一定 (Fig. 6 (a) で  $I=60A$  の場合)、圧力一定 (2mTorr)、流量一定 (20sccm) とし、マイクロ波出力を変化させて膜厚の出力依存性を調べた。その結果を Fig. 8 に示す。マイクロ波出力の増加に伴い膜厚が増加している。これはマイクロ波出力増加に伴いより多くの中性粒子がイオン化されプラズマ密度が高くなることによる。得られた薄膜の物性値を調べた。光学バンドギャップは 2.1eV 程度で少し高めであった。これは基板加熱を行っていないため基板が低温であるためと思われる。今後は基板加熱を行い、光学バンドギャップを下げる実験を行う必要がある。

我々は MSA アンテナを用いた ECR プラズマ CVD 実験としてこれまでカーボン系薄膜の成膜を行い、MSA アンテナが CVD に使用できることを示してきた [6]。また本研究でアモルファスシリコン膜の成

膜実験も可能であることがわかった。これらのことから、MSA アンテナは広範囲の ECR プラズマ CVD に使用できると結論される。

#### 4.3 ECR プラズマの高密度実験

プラズマエッチングにおいては、より高密度なプラズマが要求される。通常、質量数が大きいガスが使用される。質量数が大きければ、プラズマの損失時間が長くなり、プラズマの密度の上昇が期待される。そこでガスを変えて  $H_2$ , Ar でイオン飽和電流密度値をマイクロ波出力を変化させて調べた。磁場配位は一定 (Fig. 6 (a) で  $I=60A$  の場合)、圧力一定 (2mTorr) とした。その結果、 $H_2$ : 4.63mA/cm<sup>2</sup>, Ar: 2.85mA/cm<sup>2</sup> が達成された。 $H_2$  の電子温度  $T_e=2.5eV$  として、電子密度を計算すると、 $Ne=6.4 \times 10^{10}/cm^3$ , 特に Ar では、 $T_e=4eV$  として約  $Ne=1.7 \times 10^{11}/cm^3$  を得ている。プラズマカットオフ密度は  $2.45GHz=9000\sqrt{n}$  より  $n=7.3 \times 10^{10}/cm^3$  であるので、ECR プラズマとして十分な密度を達成できたと結論される。

#### 参 考 文 献

- 1) G. Lisitano, R. A. Ellis, W. M. Hooke, T. H. Stix: Rev. Sci. Instrum. **39**, 295 (1968).
- 2) A. Orefice and R. Pozzoli: J. Appl. Phys. **41**, 3739 (1970).
- 3) Y. Kawai and K. Sakamoto: Rev. Sci. Instrum. **53**, 606 (1982).
- 4) Y. Suetsugu and Y. Kawai: Jpn. J. Appl. Phys. **23**, 1101 (1984).
- 5) A. Yonesu, Y. Takeuchi, A. Komori and Y. Kawai: Jpn. J. Appl. Phys. **26**, 1032 (1987).
- 6) 築山和好, 甲斐義崇, 篠原有仁, 桑野範之, 沖憲典, 田中雅慶, 小森彰夫, 河合良信: 九州大学大学院総合理工学研究科報告 **14**, 189 (1992)