

科学研究費補助金研究成果報告書

平成23年4月16日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20540486

研究課題名(和文) 大規模マイクロ波ラインプラズマの生成技術に関する研究

研究課題名(英文) Research on Large-Scaled Line Plasma Production by Microwave

研究代表者

進藤 春雄 (SHINDO HARUO)

東海大学・情報理工学部・教授

研究者番号：20034407

研究成果の概要(和文)：

次世代大型ディスプレイパネル対応の大面積プロセスや太陽電池薄膜 CVD 用大面積プラズマ源の実現を目的に、大規模マイクロ波ラインプラズマ生成技術の研究を行い、最長 2 m のラインプラズマ生成に成功した。プラズマ電子密度の軸方向一様性は長さ 2 m にわたって 4 % 以内、電子密度は最大 $7 \times 10^{11} \text{ c m}^{-3}$ の高密度であり、電子密度の値がマイクロ波カットオフ密度より十分に高い密度となる条件が軸方向一様性を決めていることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：

Long line-shaped plasmas are inevitable in material processing in manufacturing industries, such as solar cell film CVD, flat panel displays (FPDs), and various surface modification of large-area thin films. In this work, a newly proposed method of large-scaled line plasma production is studied. In this method, microwave power of frequency of 2.45 GHz in a narrowed and flattened rectangular waveguide is employed to produce a long uniform linear plasma. Since the width of waveguide is very close to the cutoff condition, the wavelength of microwave inside the guide is extremely lengthened, providing a condition of long linear high density plasma with a great uniformity.

The narrowed rectangular wave-guide of 1.0 and 2.0 m in length and 5mm in height were prepared and the width of the waveguide is 61.5 mm-62.0 mm which is very closed to the cut-off condition of microwave. The waveguide has a long linear slot antenna on the top surface to launch the microwave power into the discharge plasma chamber of 1.0 and 2.0 m in length. At the end of wave guide, a short plunger was quipped to produce a standing microwave and to adjust the phase of the standing wave, hence the uniformity of the plasma thus produced. The plasmas of Ar at the pressures of 100 mTorr to 500 mTorr were produced by employing an extremely long microwave wavelength. The parameters of plasma thus produced were three-dimensionally measured by a Langmuir probe.

The axial profile of electron density was extremely flat and the plasma uniformity was within 4 % in the entire plasma over 2 m long. It was also found that the profile of electron density

showed a standing wave like profile for the short plunger position. To be specific, the electron density measured in a fixed axial position showed a standing wave-like profile, indicating the short plunger has functions of standing wave generation and the phase-shifter as expected. The value of electron density in the plasma showed a very high value, as high as $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ at the pressure of 100mTorr and the microwave power of 1 kW, indicating that the plasma electron density is adequately high above the cut-off condition of microwave. It was experimentally verified that the axially uniform plasma production has a threshold in microwave, above which the electron density becomes adequately higher than the microwave cut-off density. In these conditions, the microwave power comes onto the short plunger and is reflected, producing a standing wave, and thus the plasma uniformity can be improved very much. It is concluded thus that the present method can provide a powerful tool of large-scaled linear uniform plasma production in length more than 2 m.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：大面積プラズマプロセス

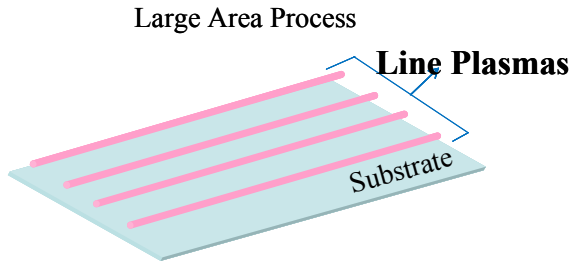
1. 研究開始当初の背景

フラットパネルディスプレイの製造プロセスや各種フィルムの表面処理など大面積を対象とする表面処理において、プラズマプロセスは必須技術である。近年パネルの大型化や大面積化が急激に進行し、G8世代対応のプラズマプロセス用のプラズマ源開発の時間的余裕はほとんどない。また各種フィルムの表面処理においても、その経済性を考慮すると大面積化は必須である。これらの事情に鑑み、大面積のプラズマ源が高周波による大気圧プラズマを中心に開発が進められている。しかしながら、大面積プラズマ源の開発はその制御に他に類を見ないほどの困難さがあり、その開発は全く進んでいないのが現状である。その一つの理由は、大面積プラズマを高周波電力により2次元で実現する場合、波長の有限性が決定的な障害となり、大面積プラズマの実現を大変困難にしている。

2. 研究の目的

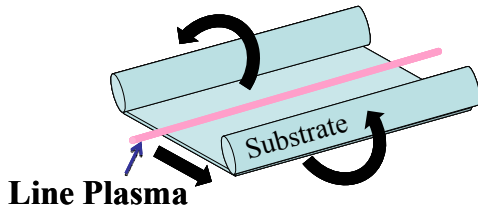
本研究課題では、G8世代対応の大面積プロセスプラズマ源を実現するために大規模ラインプラズマ生成技術の開発を目的とする。2次元大面積プラズマを実現するために、一様性の高い大規模一次元プラズマ生成技術を確立することにより、それらを基本にラインプラズマの2次元的配列により一様性の高い大面積プラズマを実現するか、あるいは基板掃引により結果的に大面積表面プロセスの実現を可能にしようとするものである。本研究では、2,45GHzマイクロ波パワーにより大規模ラインプラズマを生成するものであり、プラズマの一様性を確保する基本技術としてマイクロ波矩形導波管の管内波長が導波管幅により制御できるという極めて独創的な発想を利用し、管内波長が充分長くなる条件の導波管を製作して、一様性の高い大規模ラインプラズマを生成させる装置の開発をしようとする。

するものである。一様性の高いラインプラズマにより大面積を実現する方法を図1に示す。



(a) Parallel Line Plasmas Process

One Uniform Line Plasma



(b) Roll to Roll Process by a Line Plasma

図1 ラインプラズマによる大面積基板処理

図1 (a) は大面積の基板にラインプラズマを平行に並べて処理を行なうものである。図1 (b) は処理基板をロールからロールへと移動させ一本のラインプラズマで処理を行なう方法であるが、いずれの方法においても均一性の高い大規模ラインプラズマの生成技術が必要であり、本研究では大規模マイクロ波ラインプラズマの生成・制御技術の確立を目的として、長さ1mおよび2mにおけるマイクロ波ラインプラズマ生成技術に関する研究を行ったものである。

3. 研究の方法

3-1 マイクロ波の導波管モード

導波管は周囲を導体で取り囲まれた中空パイプで、このパイプの中を伝搬していく電磁波の周波数には限界があり、導波管の径に比べて長い波長の電磁波は、このパイプを通ることができない。この限界の波長を遮断波長と呼び、矩形導波管においては次式で

$$\lambda_c = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{m}{2a}\right)^2 + \left(\frac{n}{2b}\right)^2}} \quad (1)$$

表される。a, b は導波管の横と縦の長さであり、m, n はそれぞれモード数を表している。TE₁₀ モードでは、遮断波長は $\lambda_c = 2a$ となる。すなわち導波管の長辺の2倍以上の長い波長を持った電波は通過することができない。また、これら導波管内におけるマイクロ波特性の大きな特徴として、その波長がモード数および導波管の寸法に依存することであり、一般に自由空間波長 λ よりも長くなる。これを管内波長 λ_g と呼び、次式で表される。

$$\lambda_g = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2}} \quad (2)$$

これら (1) および (2) 式によれば、導波管内の波長 λ_g は特にカットオフ近傍で大きく変化する。周波数2.45GHzのマイクロ波に対して(2)式より計算される導波管内の波長を導波管幅aの関数として求めると、幅aを狭めることにより管内波長を大幅に長くでき、例えば、導波管幅が62.0mmの場合波長は776mmであり、幅が61.3mmでは2467mmと2mを越えるまでに長くすることが出来る。これらの管内波長が十分長くなる導波管条件において、マイクロ波電力を何らかの方法で放射させ、そのマイクロ波でプラズマ生成を行うことより一様性の高い大規模マイクロ波ラインプラズマの生成が可能になると考えられる。また、TE₁₀モードでは導波管の中央部で電界が最大となり、両側端では電界がゼロ、磁界が最大となるので、マイクロ波電力を利用する場合には導波管の中央部へ電力の消費部を置かなければならない。本研究では、これらの原理に基づき導波管幅を極端に狭くし、管内波長の長くなる条件においてプラズマ生成を行い、一様性の高いラインプラズマを生成するものである。

3-2 マイクロ波ラインプラズマ発生装置

図2に本研究で用いたラインプラズマ発生装置の概略図を示す。2種類の長さのラインプラズマ発生チャンバーを用いラインプラズマの生成実験を行った。周波数2.45GHzのマイクロ波電力をオートチューナーでマッチングをとり、テーパ導波管を用いて長尺導波管に導入し、ラインプラズマを生成した。この場合、導波管底面に長いスロットアンテナ

ナを設けてあり、このスロットより放射されるマイクロ波電力でプラズマが生成される。また、導波管の他端にはショートプランジヤーを設置し、マイクロ波を終端で短絡した。ショートプランジヤーが位置している導波管寸法は東芝サイズ(96x27 mm)のものである。チャンバー下部の両端から Ar ガスを導入し、チャンバー側面から真空排気を行い、Ar プラズマを生成した。長尺導波管及びチャンバー

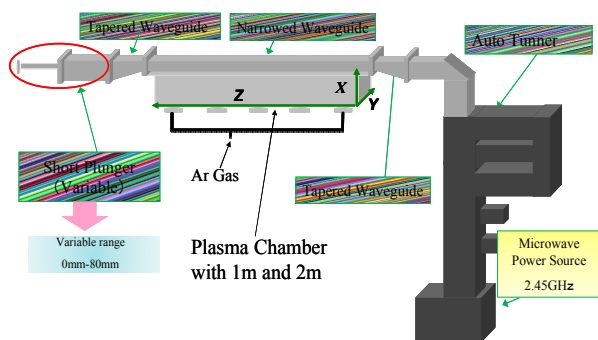


図2 マイクロ波ラインプラズマ発生装置の概略図

は長さ1 mと2 mのものを使用し、その場合の導波管幅はそれぞれ $a=62.0$ mm および $a=61.5$ mm であり、導波管の高さはいずれも5 mmのものである。導波管幅は61.5-62.0 mmとなっておりJISサイズの導波管からテーパ導波管を用いて導波管幅を狭めている。これはプラズマの均一性を確保する基本技術としてマイクロ波矩形導波管の管内波長が導波管幅により制御できるという原理を用いて設計したものである。なお、真空保持用誘電体にはテンパックスガラス(誘電率4.1)を用いている。

Ar ガス圧力5Torr~10mTorr、マイクロ波電力100W~1500Wの条件において、プラズマ生成実験を行った。プラズマ特性は1 mm Φ 平面ラングミュアープローブで評価し、特にラインプラズマ軸方向の一様性について詳し

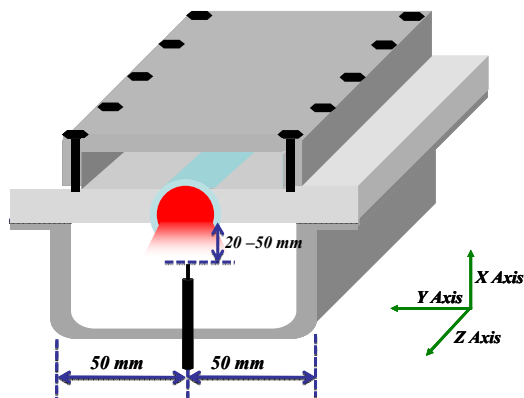


図3 導波管断面図ならびにプローブ測定位置の説明図

く検討を行った。実際の測定では図3に示されているように、X, Y, Z の3次元で測定を行っている。図3には合わせて導波管部断面図を示しているが、マイクロ波の伝播方向がZ方向であり、スロットからの距離がXとして示されている。

4. 研究成果

4-1 2 m長ラインプラズマの生成

図2に示されたラインプラズマ装置において、プラズマ発生部分を2 m長のラインプラズマ装置に変え、大規模ラインプラズマの生成実験を行った。導波管寸法は幅が61.5 mm、スロット長2000 mm、スロット幅3 mmである。その他の装置構成は1 m長の装置と全く同様である。図4には2 m長ラインプラズマでのプラズマ発生実験の様子を写真で示した。7箇所の観測窓が手前側に向いているのが見える。これらの観測窓を通してのプラズマ発光の観測では、7箇所全ての観測窓においてプラズマ発光が観測されることから、2 m長全域にわたってプラズマ生成が行われていることが確認された。これらの観測窓はプローブ測定用のポートも兼ねており、これらの測定ポートを通してプラズマの軸方向分布の測定を行った。

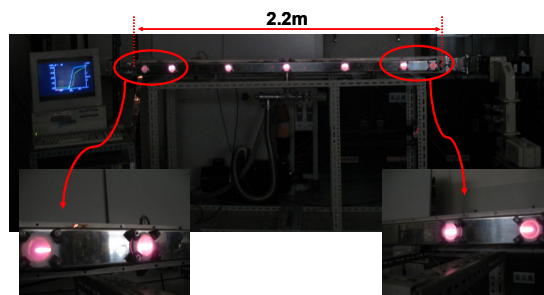


図4 2 m長ラインプラズマ装置におけるプラズマ発生の様子. 装置両端の観測窓から見えるスロット両端でのプラズマ発生の様子も拡大して示した。マイクロ波電力950W、Ar ガス圧力0,2Torr

図5には2 m長のラインプラズマ装置において測定された電子密度の軸方向分布を示した。マイクロ波電力を変えた場合の分布の変化を比較して示した。測定された電子密度の分布には、1 m長で測定された分布と同様の傾向が見られる。すなわち、マイクロ波電力が比較的低い1 kW以下の条件では、電子密度の軸方向分布はそれ程均一性は良くないが、マイクロ波電力の増加とともにその

均一性は改善し、マイクロ波電力 1300Wの条件では極めて良好な均一性が得られており、前述の議論で展開したラインプラズマ発生機構が合理的であることを示している。

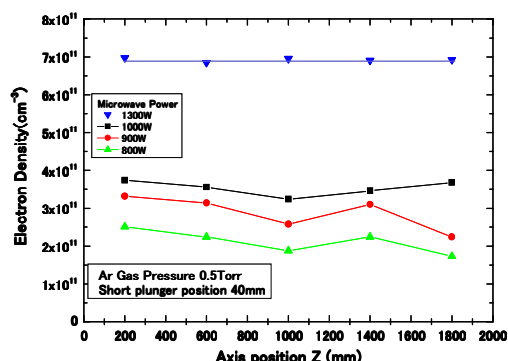


図5 2 m長ラインプラズマにおける電子密度の軸方向依存性

ちなみに、図5において得られる電子密度の軸方向均一性は4%程度であり、極めて一様性の高いラインプラズマの生成が達成されることを示している。図5に示した電子密度の軸方向依存性は実質的な測定全長が1.6mであり、1 m長の場合の測定全長より3倍以上の長さであることから、本研究で提案しているラインプラズマの生成技術は軸方向の均一性を本質的に良好とするような機構が存在する可能性が考えられる。

図6(a)および(b)にはチャンバー内部で軸方向から撮影された2 m長ラインプラズマ生成の様子を写真を示した。(a)がマイクロ波導入側から軸方向をみたものであり、(b)はショートプランジヤー側から撮影したものである。両者の場合とも、中心部に均一

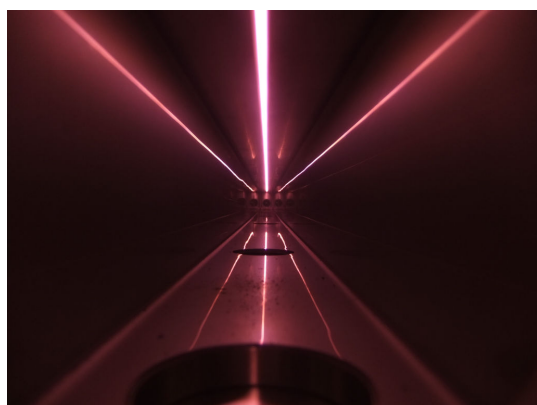


図6(a) 2 m長ラインプラズマ生成のチャンバー内部写真. マイクロ波電力導入側から撮影した。

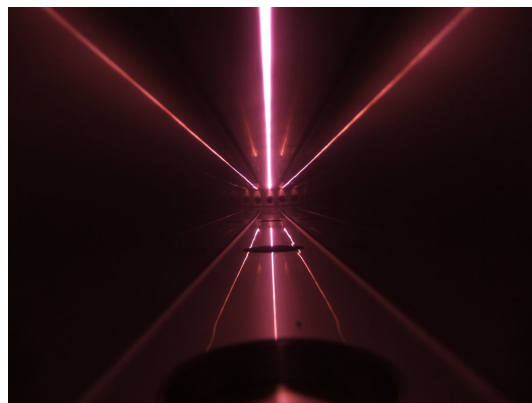


図6(b) 2 m長ラインプラズマ生成のチャンバー内部写真. ショートプランジヤー側から撮影した。

性の高いラインプラズマが生成されており、図5において示された電子密度の軸方向均一性の良さを裏付けている結果である。なお、図6において中心部以外に見られるライン状の発光は中心部ラインプラズマのチャンバー壁からの反射によるものであることに注意されたい。

4-2 まとめ

本研究は近年急速に基板サイズの大面積化が進んでいるフラットパネルディスプレイ、太陽電池パネルや各種フィルムの表面処理など大面積の基板を対象とするプロセス用プラズマ源として、大規模マイクロ波ラインプラズマの発生技術を検討したものである。大面積を処理するプラズマ源として均一性の高いプラズマの形成が難しくなるなど技術的問題が生じており、大面積プラズマを発生させる新しい技術が囑望されている。本研究では、大面積プラズマを実現する方法の一つとして大規模マイクロ波ラインプラズマの生成技術を検討したものである。均一性の高いライン状のプラズマをマイクロ波技術で実現し、大面積プラズマプロセスに応用するものであるが、本研究では、ラインプラズマ発生技術に関して原理的検討を行うとともに、大規模マイクロ波ラインプラズマの生成技術をライン長が1 m、2 mのラインプラズマについて装置開発の視点から実験的検討を行った。

本研究で得られた具体的な成果をまとめると以下のようなものである。

- (1) 1 m長ラインプラズマにおいて、導波管幅を62mmと狭くすることで電子密度の軸方向分布が5%以内の高い均一性を有する。
- (2) ラインプラズマ軸方向均一性の達成に

はマイクロ波電力に閾値が存在し、高いマイクロ波電力の条件で、プラズマ電子密度がマイクロ波カットオフ密度を充分上回る条件で軸方向均一性が良くなる。

(3) 電子密度プロファイルの測定から、導波管端に設置したショーとブランジャーは導波管内に定在波を生起させなおかつ定在波の位相制御の機能を有していることを明らかにした。

(4) 2 m長ラインプラズマにおいては、マイクロ波電力 1300Wの条件で電子密度軸方向分布が4%以内の高い均一性を有し、そのメカニズムは1 mの場合と同様であることを明らかにした。

以上本研究の成果は次世代フラットパネルプロセスや太陽電池薄膜CVD等の主要技術を提供するものであり、さらに各種フィルムの大面積処理装置の開発等にもつながることから、各種産業分野に与えるインパクトは大きいものと考ええる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者には下線)

[雑誌論文] (7件)

- ① 進藤春雄、大規模マイクロ波ラインプラズマの開発、Journal of Plasma and Fusion Research、査読有、Vol. 87、No. 1、2011、pp18-23、
- ② 進藤春雄、大規模マイクロ波ラインプラズマの生成、ケミカルエンジニアリング、査読有、Vol. 55、No. 12、2010、pp. 52-58、
- ③ Haruo SHINDO、Yasuhito KIMURA、Takashi HIRAO、Large-Scaled ECR Line Plasma Production by Microwave in a Narrowed Rectangular Waveguide、Abstract of 18th International conference on Gas Discharges and Their Applications、査読有、2010、pp. 422-425、
- ④ Yasuhito Kimura、Hideki Kawaguchi、Shin Kagami、Masakazu Furukawa、Haruo Shindo、A New Method of Line Plasma Production by Microwave in a Narrowed Rectangular Waveguide、Applied Physics Express、査読有、2、2009、pp126002-1-126002-3、

- ⑤ Haruo Shindo、Yasuhito Kimura、2m Long Line Plasma Production by Microwave in a Narrowed Rectangular Waveguide、Advances in Applied Plasma Science、査読有、Vol. 7、2009、pp211-214、
- ⑥ H. Shindo、Y. Kimura、2m Long Line Plasma Production by Microwave in a Narrowed Rectangular Waveguide、17th International Colloquium on Plasma Processes、査読有、2009、pp111、
- ⑦ H. Shindo、Y. Kimura、N. Sato、M. Suzuki、LARGE-SCALED LINE PLASMA PRODUCTION BY EV ANESCENT MICROWAVE IN A NARROWED RECTANGULAR WAVEGUIDE、XVII International Conference on Gas Discharges and Their Applications、査読有、2008、pp. 417-420、

[学会発表] (計5件)

- ① 渡部智、岡部優登、木村康人、進藤春雄、大規模マイクロ波ラインプラズマの電子密度の電力依存性、第71回応用物理学学会学術講演会、2010年9月、長崎大学
- ② 木村康人、増田哲也、矢吹和輝、柴田林太郎、進藤春雄、大規模マイクロ波ラインプラズマの生成(Ⅲ)、第57回応用物理学関係連合講演会、2010年3月、東海大学
- ③ 木村康人、進藤春雄、2 m長マイクロ波ラインプラズマの生成、第70回応用物理学学会学術講演会、2009年9月、富山大学
- ④ 木村康人、進藤春雄、大規模マイクロ波ラインプラズマの生成(Ⅱ)、第56回応用物理学関係連合講演会、2009年3月、筑波大学
- ⑤ 木村康人、進藤春雄、大規模マイクロ波ラインプラズマの生成、第69回応用物理学学会学術講演会、2008年9月、中部大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

進藤春雄 (SHINDO HARUO)
東海大学・情報理工学部・教授
研究者番号：20034407

(2) 連携研究者

沖村邦雄 (OKIMURA KUNIO)
東海大学・情報理工学部・教授
研究者番号：00194473