

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 14 日現在

機関番号：92717

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05736

研究課題名(和文)大規模直線型マイクロ波大気圧プラズマの生成技術に関する研究

研究課題名(英文)A Study on Production Technology of Large-Scaled Linear Atmospheric Pressure Microwave Plasma

研究代表者

進藤 春雄(Shindo, Haruo)

株式会社プラズマ理工学研究所・研究開発部・教授

研究者番号：20034407

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題はプラスチック等の材料表面を大面積で処理するプラズマ装置の開発を目的とし、表面の化学的処理用直線型ラジカル源及び物理的熱処理用の直線型熱源までを系統的に制御可能な大規模直線型マイクロ波大気圧プラズマ発生装置プロト機を開発する。本研究課題で得られた成果は、1m長直線型マイクロ波大気圧プラズマ発生装置の開発、1m長直線型マイクロ波照射源装置の開発、内部導体によるマイクロ波導波管内波長制御装置の開発、の3点が挙げられる。ではプラズマ及びマイクロ波をガラス表面に照射し、その効果を表面濡れ性で確認した。また、の開発研究では、導波管内波長が内部導体で制御可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題で得られた成果は今後12インチウエハ用半導体製造装置への応用をはじめ、ガラス表面や各種プラスチック材料の大面積表面処理に応用可能であり、各種応用分野への波及効果は大であると考えられる。更に新技術として開発に成功した導波管内波長の内部導体による制御技術は、より長尺の直線型プラズマ発生装置開発への道を拓くものであり、Flat Panel Display(FPD)製造分野においてG10世代へ対応可能な技術になるものと考えられる。本研究課題は(株)プラズマ理工学研究所と東海大学工学部並びに国内某大企業との共同研究による成果であることを強調するものである。

研究成果の概要(英文)：In this project, development of linear microwave plasma sources at atmospheric pressure has been examined. The linear microwave plasma is quite innovative in that uniform power deposition is devised on the basis of waveguide mode of microwave. Linear microwave plasma devices at atmospheric pressure have been successfully developed as a proto-type and its application for surface treatment is studied. In the project, the following three major developments are attained; the one is that the linear microwave atmospheric-pressure plasma device of 1m length is developed. The second is that the linear microwave radiation device of 1m length is also developed as a proto-type. Thirdly the new microwave guide which enables us to control the microwave wavelength by inner conductors is developed. It is shown, further, that the development of the new microwave guide open a new road to apply the linear microwave plasma devices to various application fields.

研究分野：プラズマ理工学

キーワード：大規模直線型マイクロ波プラズマ 大面積プラズマ処理 大気圧プラズマ 半導体プロセス FPDプロセス

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

経済展開のグローバル化と新興国台頭の中で、少子高齢化の社会状況にある我が国が今後も経済大国としての持続的発展を維持するには、他国がマネできない徹底したイノベーションの創出にあると考える。

本研究はプラズマ技術におけるイノベーション創出を意図したものである。低温プラズマによる材料プロセス技術は近年ますますその重要性を増している。プラズマを用いることにより、比較的簡単に各種の原子、分子過程を手に入れることができることから、各種材料プロセスへの応用の膨大な分野が広がりつつある。就中、大気圧下におけるプラズマ応用は人間住環境下でダイレクトにターゲットへアクセスできることから、大きなポテンシャルを有するものと考えられる。本研究課題は次世代航空機翼材表面処理や各種高分子材料の表面改質など大規模面積の基板処理を可能とする「大規模直線型マイクロ波大気圧プラズマ発生装置の研究とその装置の開発」を行うものである。すなわち、プラズマ生成電力にマイクロ波を用い、マイクロ波の導波管内における長波長特性を巧みに利用し、大規模にプラズマ一様性の高い大気圧プラズマ生成技術を生み出すものである。

一方、土壌改質や各種材料の表面熱処理も大規模面積での処理が必須であり、本研究課題の大規模直線型プラズマ源が応用可能と考えられる。すなわち、前述の表面化学処理用のプラズマ源の熱特性を制御することにより、熱処理用直線型プラズマ発生装置として機能させることも可能と考えられる。この場合、プラズマの熱特性はマイクロ波電力のパルス変調で制御可能であり、変調パルスの周波数およびデューティ比を変えることで熱制御を行い、同一のプラズマ発生装置によりラジカル主体の非平衡プラズマから熱プラズマまでを連続的に制御可能な直線型プラズマ源の創出を目論むものである。

2. 研究の目的

本研究課題では、大規模直線型プラズマ生成技術の開発を目的とする。周波数 2.45GHz のマイクロ波パワーにより大規模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直線型プラズマを生成させる装置の開発をするものであり、更に、一様性の高い直線型プラズマを用いれば大面積プロセスも容易に実現可能である。本研究では、次の3課題を主要目的として研究を行った。すなわち、直線型プラズマ源については既に原理的実証を終えており、これらの成果を踏まえて、次の3課題について研究を進める。

- ① 長さ 1 m の大規模直線型マイクロ波大気圧プラズマ発生装置の技術開発
- ② 長さ 1 m 直線型マイクロ波放射装置の技術開発
- ③ 導波管管内波長制御可能な新型導波管装置研究開発

上記3課題の研究成果として、大規模マイクロ波大気圧プラズマ発生装置プロト機を完成させ、次世代直線型プラズマ発生装置の設計指針を得ることを目的とした。

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、導波管の寸法に比べて長い波長の電磁波は、この導波管を通過することができない。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表される。

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

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 2 m 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、一様性の高い直線型プラズマを生成するものである。

3-2 直線型マイクロ波大気圧プラズマ発生装置

図 1 に本研究で用いた直線型プラズマ生成装置の概略図を示す。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、直線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ャーを設置し、マイクロ波を終端で短絡した。ショートプランジャ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 He ガスを導入し、He プラズマを生成した。長尺導波管は長さ 1 m のものを使用し、その場合の導波管幅は $a=62.0$ mm であり、導波管の高さはいずれも 5 mm のものである。導波管幅が 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。

He ガスを大気圧状態で導入し、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。

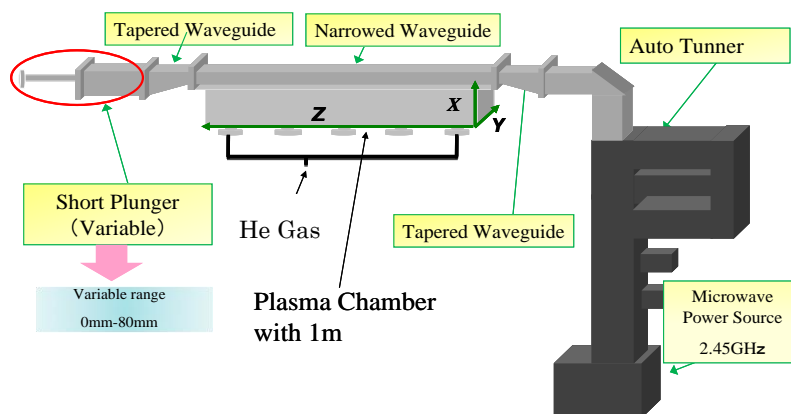


図 1 マイクロ波ラインプラズマ発生装置の概略図

本研究では、一様性の高い大規模直線型大気圧プラズマを実現するために、極めて独創性の高い方法でマイクロ波プラズマ生成を行う。前記の通り、マイクロ波導波管内波長が導波管幅により大幅に制御可能であることを利用し、管内波長の長い条件で導波管底面のスロットから放射されるマイクロ波により長さ方向に均一性の高い直線型プラズマを生成するものであり、極めて独創性の高いプラズマ発生法である。本研究は3年計画で、前記①、②、③の主要課題に取り組み、大規模直線型マイクロ波大気圧プラズマ発生装置プロト機を開発した。

一方、マイクロ波電力のパルス制御によりプラズマの熱特性の制御が可能であり、同一のプラズマ発生装置においてプラズマの特性が非平衡プラズマから熱プラズマまでを系統的に制御可能な大規模直線型マイクロ波大気圧プラズマの生成という極めて独創性の高いプラズマ発生技術を確立するものである。更に、本マイクロ波技術による直線型プラズマ生成技術においては、導波管幅により管内波長が固定されるため、幅の異なる導波管を多数用意する必要があるが、この欠点を克服し、一導波管により波長が制御できる方法を新たに導入した。すなわち、固定された幅の導波管に内部導体を挿入し、管内マイクロ波波長を制御する方法であり、この方法を新たに導入したことにより本直線型プラズマ発生技術は更に広い応用分野に適用可能となる。

4. 研究成果

4-1 1 m長直線型プラズマ発生装置の開発

図1に示されたプラズマ装置において、プラズマ発生部分を1 m長の直線型プラズマ装置として、大規模直線型プラズマの生成実験を行った。導波管寸法は幅が62.0 mm、スロット長1000 mm、スロット幅5 mmである。その他の装置構成は図1に示されている通りである。本開発実験においては、プラズマ発生部直下にミラーを配置し、直線型プラズマの発生の様子を観測した。主として、投入されたマイクロ波パワーと直線型プラズマの長さの関係を調べた結果、マイクロ波電源の最大パワー1.5 kWの条件においてほぼ1 m長の直線型プラズマの発生を確認出来た。一方、直線型プラズマのDay-by-Dayの再現性では、特に湿度の高い条件においてプラズマ直線方向の一様性が少し悪くなることが確認された。すなわち、本大気圧プラズマ生成実験においては、実験環境として、クリーンルーム仕様となっていないため、湿度等の影響が大であることが分かった。この問題を解決する方法としては、マイクロ波パワーを増強することが考えられるが、現有設備との関係から今後の課題として残った。

4-2 1 m長直線型マイクロ波放射源装置の開発

本研究開発項目における成果は、その内容上前記研究目的に記載の「③導波管管内波長制御可能な新型導波管装置研究開発」の成果と一緒に論ずる必要がある。すなわち、「③導波管管内波長制御可能な新型導波管装置研究開発」は直線型プラズマ発生装置並びにマイクロ波放射源装置の次世代型を実現する際に必要な技術であることから、本節では両者の成果を同時に論じることとする。

直線型プラズマ発生装置及びマイクロ波放射源装置はその直線方向均一性はマイクロ波波長に依存することになる。すなわち、マイクロ波導波管内波長が長い条件でそれらの均一性はより長距離において保証される。しかるにマイクロ波導波管内波長は一義的に導波管幅に依存することから、長距離において均一性を要求する場合には、その都度幅の異なる導波管自体を取り換える必要があり、極めて利便性の悪い技術となっていた。この欠点をクリアするために創出された技術が③導波管管内波長制御可能な新型導波管装置である。本新型導波管の基本特性を理解するために、本研究ではマイクロ波シミュレーションを行って特性を明らかにした。シミュレーション解析で得られたデータの一例を図2に示す。本技術では固定された幅の導波管内に内部導体を入れて波長を制御するものであるが、2本の内部導体の間隔を変えた場合のマイクロ波管内波長の変化を示したものが図2の結果である。図2の横軸は内部導体間距離であり、それに対する管内波長の変化を示したものである。この場合、固定された導波管の寸法は幅62.0 mm、高さ5.0 mm、長さ1000 mmの条件である。内部導体間隔を広げていくと管内波長は増加し、間隔35 mm付近では、本来、幅62.0 mmの導波管が持つ管内波長の388 mmを超えて長くなることが分かる。間隔50 mm以上ではマイクロ波がカットオフになり、この近傍での管内波長は2000 mm以上にもなる。図2のシミュレーション結果から分かるように、本研究において着想した波長可変型導波管を用いれば任意の波長で動作可能な大規模直線型マイクロ波プラズマ源並びにマイクロ波放射源装置の製作が可能になることを示している。この意味において、本技術は次世代の直線型マイクロ波プラズマ源並びにマイクロ波放射源装置の応用に新しい道を拓いたと考える。本研究ではこの波長可変型導波管を組み込んだ長さ1 mの直線型マイクロ波放射源装置のプロト機を開発しており、本研究課題における第2、第3の成果として報告するものである。

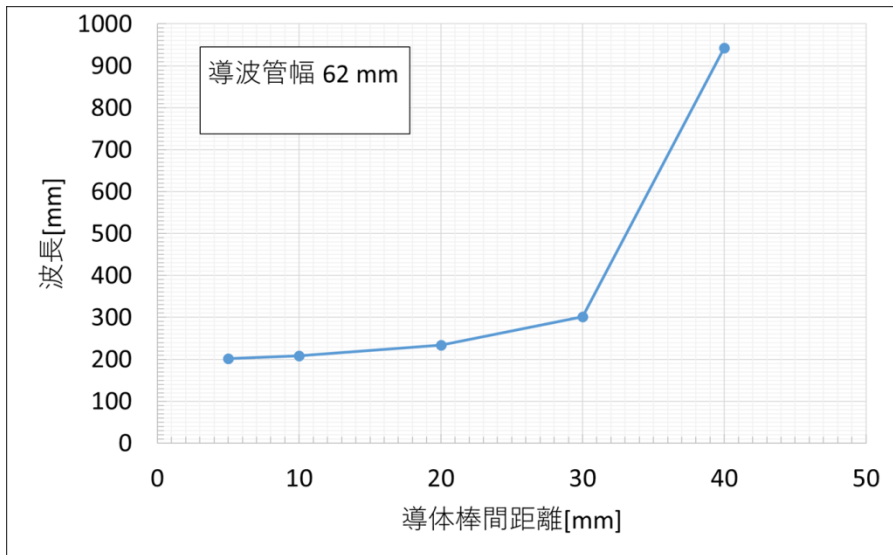


図2 新型導波管における波長特性

更に本研究では新型導波管技術の詳細を理解するために、内部導体を入れた場合のスロット部における電界強度の変化を調べた。その結果を図3に示した。この場合、スロット部はプラズマ装置においてはプラズマ生成部にあたり、マイクロ波放射装置においては放射部にあたり、いずれの装置においても電界強度の値が重要な特性となる。図3によれば、電界強度は間隔20 mm程度で最少となるが、それ以外の条件では電界強度は増加する。従って、間隔20 mm近傍での本導波管の使用には注意を要することが明らかとなった。

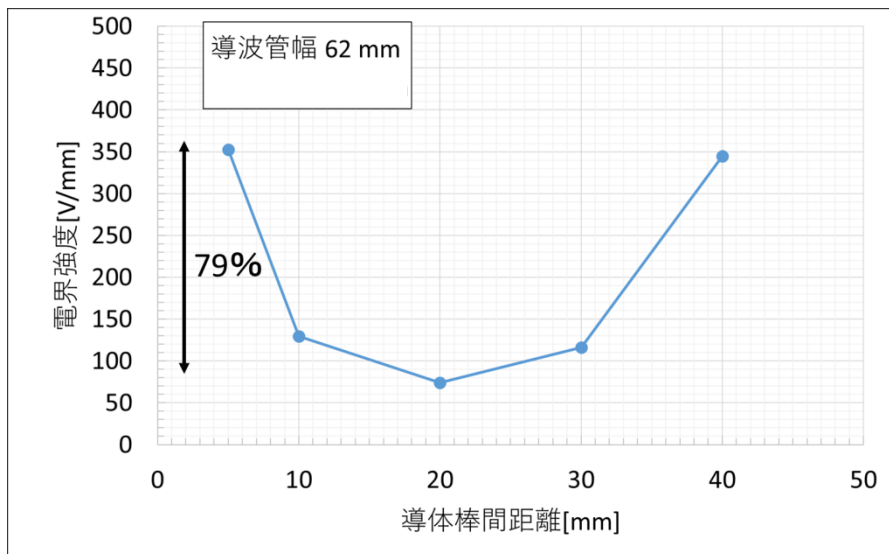


図3 新型導波管のスロット部における電界特性

5. 謝辞

本研究課題は(株)プラズマ理工学研究所と東海大学工学部との共同研究として実施されたものであり、計画2年度からは国内某大企業からの参画を得て実施されました。研究課題実施にご協力を頂きました皆様に記して謝意を申し上げます。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 進藤春雄 桑畑周司 磯村雅夫	4. 巻 72
2. 論文標題 大規模表面処理のための直線型マイクロ波プラズマ	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 自動車技術（招待論文）	6. 最初と最後の頁 74-80
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 S. Takahashi, Y. Taniuchi, M. Utsumi, and H. Shindo	4. 巻 58
2. 論文標題 Aspect ratio dependence of silicon trench oxidation in downstream of microwave oxygen plasma	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 016508-1-7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.7567/1347-4065/aaee8e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 進藤春雄、桑畑周司、磯村雅夫	4. 巻 60
2. 論文標題 表面処理のための大気圧直線型マイクロ波プラズマ	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of Vacuum Technologies of Japan	6. 最初と最後の頁 105-111
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hiroshi Kuwahata, Hiroshi Miyata, Masao Isomura and Haruo Shindo	4. 巻 56
2. 論文標題 Generation of microwave-excited atmospheric-pressure line plasma and its application	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 126201-01-06
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.7567/JJAP.56.126201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 K. Yano, H. Horisawa, and H. Shindo
2. 発表標題 Fundamental Study of Electrostatic Acceleration of Laser Ablation Plasma
3. 学会等名 The 71st Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 矢野楓, 浜田彩香, 堀澤秀之, 進藤春雄
2. 発表標題 レーザー誘起プラズマの静電加速に向けた基礎研究
3. 学会等名 宇宙科学連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮 翔真, 亀山 高範, 内海 倫明, 桑畑 周司, 磯村 雅夫, 進藤 春雄
2. 発表標題 直線型マイクロ波プラズマ生成のための導波管内電磁界
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	磯村 雅夫 (Isomura Masao) (70365998)	東海大学・工学部・教授 (32644)	