

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4677530号
(P4677530)

(45) 発行日 平成23年4月27日(2011.4.27)

(24) 登録日 平成23年2月10日(2011.2.10)

(51) Int.Cl. F 1
H05H 1/24 (2006.01) H05H 1/24

請求項の数 9 (全 16 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2008-549208 (P2008-549208)</p> <p>(86) (22) 出願日 平成19年6月12日 (2007.6.12)</p> <p>(86) 国際出願番号 PCT/JP2007/061837</p> <p>(87) 国際公開番号 W02008/072390</p> <p>(87) 国際公開日 平成20年6月19日 (2008.6.19)</p> <p>審査請求日 平成21年6月11日 (2009.6.11)</p> <p>(31) 優先権主張番号 特願2006-334800 (P2006-334800)</p> <p>(32) 優先日 平成18年12月12日 (2006.12.12)</p> <p>(33) 優先権主張国 日本国(JP)</p> <p>特許法第30条第1項適用 プラズマ・核融合学会第23回年会予稿集(平成18年11月20日)発行第301ページに発表</p>	<p>(73) 特許権者 504176911 国立大学法人大阪大学 大阪府吹田市山田丘1番1号</p> <p>(74) 代理人 110000040 特許業務法人池内・佐藤アンドパートナーズ</p> <p>(72) 発明者 北野 勝久 大阪府吹田市山田丘1番1号 国立大学法人大阪大学内</p> <p>(72) 発明者 浜口 智志 大阪府吹田市山田丘1番1号 国立大学法人大阪大学内</p> <p>(72) 発明者 青木 裕紀 大阪府吹田市山田丘1番1号 国立大学法人大阪大学内</p> <p style="text-align: right;">最終頁に続く</p>
--	---

(54) 【発明の名称】 プラズマ生成装置およびプラズマ生成方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

媒質ガスを供給し噴出させて細長い形状を有する媒質ガス噴出流を形成する誘電体からなるガス供給管と、

前記媒質ガス中に電場を形成するように前記ガス供給管の外部に配置された単一の高電位電極と、

前記高電位電極に所定の高電位を印加する電圧供給部とを備え、

前記ガス供給管は誘電体からなり、

前記所定の高電位は、前記高電位電極とその周囲に存在する接地電位との間で前記ガス供給管の材質を介して形成される電場により、前記高電位電極から前記媒質ガス中の上流側および下流側の双方に向けて誘電体バリア放電による部分放電が起こるように設定され、

前記部分放電の発生により前記媒質ガス噴出流中にプラズマが生成されることを特徴とするプラズマ生成装置。

【請求項2】

前記ガス供給管は、前記媒質ガスを噴出させる開口部が平板状をなし、

前記高電位電極は、前記開口部の平板面上に平板状に設けられている、請求項1に記載のプラズマ生成装置。

【請求項3】

前記ガス供給管は円筒構造を有し、

前記高電位電極は前記ガス供給管の円筒面に沿って設けられている、請求項 1 に記載のプラズマ生成装置。

【請求項 4】

前記電圧供給部は、前記媒質ガス中で部分放電を開始可能な電圧と、前記部分放電を維持可能な電圧とを供給可能である、請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載のプラズマ生成装置。

【請求項 5】

前記高電位電極から離間した位置で前記媒質ガスの一部に隣接するように配置された補助電極を更に備え、

前記補助電極は前記電圧供給部から接地電位が付与される、請求項 1 に記載のプラズマ生成装置。

10

【請求項 6】

前記媒質ガスを誘導する補助ガス供給管と、

前記補助ガス供給管に設けられ、前記電圧供給部により接地電位が付与される補助電極とを更に備え、

前記補助ガス供給管は、前記媒質ガスを噴出する噴出口が、前記ガス供給管の前記媒質ガスを噴出する噴出口に接触するか、または所定の間隔 g を隔てて近接して配置され、

前記ガス供給管及び前記補助ガス供給管の少なくとも一方は誘電体からなる請求項 1 に記載のプラズマ生成装置。

【請求項 7】

20

複数の前記媒質ガス噴出流からプラズマを生成するように構成され、

複数の前記媒質ガス中に各々配置される前記高電位電極を備えた、請求項 1 に記載のプラズマ生成装置。

【請求項 8】

誘電体からなるガス供給管により媒質ガスを供給し噴出させて細長い形状を有する媒質ガス噴出流を形成し、

前記媒質ガス中に電場を形成するように前記ガス供給管の外部に単一の高電位電極を配置し、

前記高電位電極に、前記高電位電極とその周囲に存在する接地電位との間で前記ガス供給管の材質を介して形成される電場により、前記高電位電極から前記媒質ガス中の上流側および下流側の双方に向けて誘電体バリア放電による部分放電が発生するように所定の高電位を印加して、

30

前記部分放電の発生により前記媒質ガス噴出流中にプラズマを生成するプラズマ生成方法。

【請求項 9】

前記高電位電極により前記電場を形成する際に、

前記高電位電極と接地電位箇所との間の距離を、前記高電位電極に印加される電圧により部分放電を開始可能な所定距離に設定し、

次に、前記高電位電極と前記接地電位箇所との間の距離を、部分放電を維持可能な範囲で前記所定距離より大きくする、請求項 8 に記載のプラズマ生成方法。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、マイクロプラズマの生成に関し、特に、媒質ガスに制限されたプラズマを生成するプラズマ生成装置および生成方法に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、マイクロプラズマジェットはその応用範囲の広さから注目され、種々の電源、電極構造により実現されている。マイクロプラズマは、その空間的なサイズが微小であることに特徴を有するが、微小な空間内でプラズマを生成・維持するためには、電子・イオン

50

と媒質ガス（プラズマ生成ガス）の原子分子との十分な衝突頻度を確保するために、必然的に媒質密度が高くなる。そのため、マイクロプラズマの生成には大気圧近傍の媒質ガス、すなわち媒質の密度で言えば、例えば、 $10^{18} \sim 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 程度が必要となる。

【0003】

また、一般に、従来のマクロスケールのプラズマの場合には、動作圧力の増加とともに、プラズマ中の電子温度 T_e とガスの温度 T_g がほぼ熱平衡に達するようになり、熱平衡プラズマと呼ばれる。これに対して、プラズマのサイズを数mmから μm 領域にスケールダウンしてマイクロプラズマの領域になると、媒質ガス分子のプラズマ中での滞在時間が短くなることに起因して、粒子間の衝突によるエネルギー緩和が十分になされず、低圧プラズマのように $T_e \neq T_g$ の非平衡状態になっているものと考えられる。

10

【0004】

従来のマイクロプラズマジェット生成のほとんどの方式は、媒質ガスを流した石英パイプの内部で発生させた比較的高温のプラズマが、媒質ガス流によって押し流されてパイプ先端から吹き出される、低温化したプラズマを利用するアフターグロー方式である。

【0005】

例えば特許文献1に記載の方式では、プラズマ生成のための媒質ガスとして使用されるアルゴン(Ar)ガスを石英パイプ内に流入させ、噴出口から噴出させるとともに、石英パイプの周囲にコイル配置して高周波電流を流すことにより、石英パイプ内に誘導電場を発生させる。石英パイプ内に流入するアルゴンガスのアルゴン原子は、誘導電場や磁場で電離して高温($6000 \sim 7000$)のプラズマとなり、アルゴンガスの流入圧力に押されて石英パイプ先端の噴出口から大気中に噴き出る。噴き出したプラズマは、大気存在により、拡散することなく、マイクロプラズマジェットを生成する。

20

【0006】

一方、それらとは異なる方式として、ドイツWuppertal大のEngemannらによって提案された、図11に示すような方式が知られている。図11において、1は内径が2~5mm程度の石英パイプからなるガス供給管であり、その内腔を通ったヘリウムガスが噴出口1aから噴出される。ガス供給管1の噴出口1a側の端部の外周上には、同軸状の一对のプラズマ発生用の電極3a、3bが上流側と下流側に設置されている。電圧印加装置4により、電極3aをグラウンド電位とし、電極3bを高電位として、10kHz程度の低周波のパルス電圧(例えば、6~12kV、13kHz)を印加してパルス放電させることにより、噴出口1aから細く伸びるプラズマジェット(以下、LF(Lower Frequency)プラズマジェットとも称する)が生成される。

30

【0007】

このLFプラズマジェットは、2つの点で希有な特徴を有している。まず、アフターグロー方式のプラズマジェットとは異なり、細長く伸張した、その直径に対する長さの比すなわちアスペクト比が大きい形状のプラズマジェットが得られ、電極に印加する電圧の向きに応じて射出方向が決まる。すなわち、電極に印加する電圧の向きを反転させると、ジェットの向きは逆にガスの上流に向かって伸びる。また、高時間分解能測定によると、柱状の放電が維持されているのではなく、球状のプラズマ塊が電源周波数と同期して、 10 [km/s] と、媒質ガス流に比べて1万倍程度と非常に高速に移動している。したがって、その生成機構は媒質ガス流とは直接関わりはない。

40

【0008】

この方式によるプラズマジェットは、アフターグロージェットとは異なり、媒質ガス流そのものがプラズマ化しているので、対象物に対して直接的にプラズマを照射することが可能である。また、LFプラズマジェットではパルス状にプラズマ塊が射出されるため、時間的に非平衡、すなわち、瞬間瞬間で中性ガスとエネルギー緩和できないことにより、熱的に非平衡の状態が作り出される。熱非平衡なプラズマであるので、対象物の温度上昇をもたらすことなく高エネルギー成分を照射することができる。

【特許文献1】特開2006-60130号公報

【発明の開示】

50

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

上述のとおり、LFプラズマジェット的方式によれば、電極3bに対して高電位を印加することにより、媒質ガス流に対して下流方向へプラズマジェット5が伸びているが、グラウンド電位の電極3aに対する高電位側の電極3bの位置がジェットの射出方向を決めているわけではないことが判った。

【0010】

すなわち、高電位が印加される電極3bの存在のみによりプラズマジェットが生成され、グラウンド電位の電極3aはむしろ、ジェットの流れを抑制している。高電位の電極3bに対する媒質ガス流の下流側では、遠方に存在するグラウンド電位との間で部分放電が発生する。しかもその放電は媒質ガス流の中でのみ発生する媒質制限されたプラズマであって、媒質ガス流がプラズマ化されたようなプラズマ流が生成される。一方、高電位の電極3bに対する媒質ガス流の上流側では、高電位の電極3aと接地電位の電極3bの間隔が近いため、誘電体バリアーに覆われた電極間の短絡による放電が生じている。短絡による放電は、部分放電と異なり、消費電力が大きく発熱を伴う。このような短絡放電を伴うため、2電極方式は効率の良いものではないことが判った。

【0011】

また、LFプラズマジェットは、その放電機構は不明であるため、種々のパラメーターでの放電可能範囲も制限的であった。

【0012】

したがって本発明は、簡易な構成により、エネルギー効率良く、かつ幅広いパラメーターに対し安定して、媒質ガスに制限されたプラズマを生成することが可能なプラズマ生成装置、および生成方法を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0013】

上記課題を解決するために、本発明のプラズマ生成装置は、媒質ガスを供給し噴出させて細長い形状を有する媒質ガス噴出流を形成する誘電体からなるガス供給管と、前記媒質ガス中に電場を形成するように前記ガス供給管の外部に配置された単一の高電位電極と、前記高電位電極に所定の高電位を印加する電圧供給部とを備え、前記所定の高電位は、前記高電位電極とその周囲に存在する接地電位との間で前記ガス供給管の材質を介して形成される電場により、前記高電位電極から前記媒質ガス中の上流側および下流側の双方に向けて誘電体バリア放電による部分放電が起こるように設定され、前記部分放電の発生により前記媒質ガス噴出流中にプラズマが生成されることを特徴とする。

【0016】

本発明のプラズマ生成方法は、誘電体からなるガス供給管により媒質ガスを供給し噴出させて細長い形状を有する媒質ガス噴出流を形成し、前記媒質ガス中に電場を形成するように前記ガス供給管の外部に単一の高電位電極を配置し、前記高電位電極に、前記高電位電極とその周囲に存在する接地電位との間で前記ガス供給管の材質を介して形成される電場により、前記高電位電極から前記媒質ガス中に制限されてその上流側および下流側の双方に向けて誘電体バリア放電による部分放電が発生するように所定の高電位を印加して、前記部分放電の発生により前記媒質ガス噴出流中にプラズマを生成することを特徴とする。

【0017】

なお、本願の記載において、部分放電とは、電極間に電圧を加えたとき、その間の雰囲気ガスが電極間において部分的に放電する現象であり、電極間を完全に短絡する放電は含まない意味で用いられる。このような部分放電は、電極間に、不均一な電界分布、不均一な絶縁破壊電圧の異なるガス分布がある場合などに生じる。例えば、電極構造が平行平板構造ではなく、先鋭な電極構造を持つ場合、電極の先端では電界の集中が起こり、電界強度が強くなり、この電界強度が、雰囲気ガスの絶縁破壊電界を超えた場合、この部分のみ部分放電が生じる。

10

20

30

40

50

【 0 0 1 8 】

このような部分放電を用いることは、L F プラズマジェット of 放電機構について本発明者らが解明した知見に基づくものである。すなわち、L F プラズマジェットの放電機構は、高電圧電極近傍の集中した電界強度によるストリーマーコロナ放電現象が、大気中やガラス管内部のヘリウムガス流束に沿って起こっているものであると考えられる。

【 発明の効果 】

【 0 0 1 9 】

本発明の L F プラズマジェット生成装置および生成方法は、細長い形状を有する媒質ガス塊中にその長手方向に沿って部分放電が発生するように電場を形成することにより、簡易な構成により、エネルギー効率良く、かつ幅広いパラメーターに対し安定してプラズマを生成することが可能である。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 2 0 】

【 図 1 A 】 図 1 A は、本発明の実施の形態 1 における L F プラズマジェット生成装置を示す正面図である。

【 図 1 B 】 図 1 B は、図 1 A の L F プラズマジェット生成装置における A - A 線に沿った拡大断面図である。

【 図 2 A 】 図 2 A は、同実施の形態における L F プラズマジェット生成装置で印加される低周波電圧を示す波形図である。

【 図 2 B 】 図 2 B は、本発明の L F プラズマジェット生成装置で正の高電圧のみを印加した場合の電圧波形を示す波形図である。

【 図 2 C 】 図 2 C は、同負の高電圧のみを印加した場合の電圧波形を示す波形図である。

【 図 2 D 】 図 2 D は、同正と負の高電圧を交互に印加した場合の電圧波形を示す波形図である。

【 図 2 E 】 図 2 E は、同実施の形態における L F プラズマジェット生成装置で印加される低周波電圧の他の例を示す波形図である。

【 図 3 A 】 図 3 A は、本発明の実施の形態 2 における L F プラズマジェット生成装置の正面図である。

【 図 3 B 】 図 3 B は、図 3 A の L F プラズマジェット生成装置における B - B 線に沿った拡大断面図である。

【 図 4 】 図 4 は、同実施の形態における L F プラズマジェット生成装置の変形例を示す正面図である。

【 図 5 A 】 図 5 A は、本発明の実施の形態 3 における L F プラズマジェット生成装置の正面図である。

【 図 5 B 】 図 5 B は、図 5 A の L F プラズマジェット生成装置における C - C 線に沿った拡大断面図である。

【 図 6 A 】 図 6 A は、本発明の実施の形態 4 における L F プラズマジェット生成装置の正面図である。

【 図 6 B 】 図 6 B は、図 6 A の L F プラズマジェット生成装置における D - D 線に沿った拡大断面図である。

【 図 7 】 図 7 は、本発明の実施の形態 5 における L F プラズマジェット生成装置の正面図である。

【 図 8 A 】 図 8 A は、本発明の実施の形態 6 における L F プラズマジェット生成装置の正面図である。

【 図 8 B 】 図 8 B は、同実施の形態における L F プラズマジェット生成装置の他の態様を示す正面図である。

【 図 9 A 】 図 9 A は、本発明の実施の形態 7 における L F プラズマジェット生成方法の第 1 のステップを示す正面図である。

【 図 9 B 】 図 9 B は、本発明の実施の形態 7 における L F プラズマジェット生成方法の第 2 のステップを示す正面図である。

10

20

30

40

50

【図 9 C】図 9 C は、本発明の実施の形態 7 における L F プラズマジェット生成方法の第 3 のステップを示す正面図である。

【図 1 0】図 1 0 は、本発明の実施の形態 8 における L F プラズマジェット生成装置を示す正面図である。

【図 1 1】図 1 1 は、従来例の L F ジェット生成装置を示す正面図である。

【符号の説明】

【 0 0 2 1 】

1 ガス供給管

1 a 噴出口

2 ガスチューブ

3 高電位電極

4 電圧印加装置

5 非平衡プラズマジェット

6、7、1 0 高電位電極

8 金属パイプ

9 平板状ガス供給管

1 1 非平衡プラズマジェット

1 2 補助電極

1 3 補助ガス供給管

1 4 補助電極

1 5 沿面放電

1 6 媒質ガス源

【発明を実施するための最良の形態】

【 0 0 2 2 】

本発明のプラズマ生成装置は、上記構成を基本として、以下のような種々の態様をとることができる。

【 0 0 2 8 】

また、前記ガス供給管は、前記媒質ガスを噴出させる開口部が平板状をなし、前記高電位電極は、前記開口部の平板面上に平板状に設けられている構成とすることができる。あるいは、前記ガス供給管は円筒構造を有し、前記高電位電極は前記ガス供給管の円筒面に沿って設けられている構成とすることができる。但し、本発明の作用は、本質的にはガス流束の断面形状に制約されることはなく、円筒の場合や平面上以外にも、任意に決めることができる。

【 0 0 3 2 】

また、前記電圧供給部は、前記媒質ガス中で部分放電を開始可能な電圧と、前記部分放電を維持可能な電圧とを供給可能である構成とすることができる。

【 0 0 3 3 】

また、前記高電位電極から離間した位置で前記媒質ガスの一部に隣接するように配置された補助電極を更に備え、前記補助電極は前記電圧供給部から接地電位が付与される構成とすることができる。

【 0 0 3 4 】

また、前記媒質ガスを誘導する補助ガス供給管と、前記補助ガス供給管に設けられ、前記電圧供給部により接地電位が付与される補助電極とを更に備え、前記補助ガス供給管は、前記媒質ガスを噴出する噴出口が、前記ガス供給管の前記媒質ガスを噴出する噴出口に接触するか、または所定の間隔 g を隔てて近接して配置され、前記ガス供給管及び前記補助ガス供給管の少なくとも一方は誘電体からなる構成とすることができる。

【 0 0 3 5 】

また、複数の前記媒質ガス噴出流からプラズマを生成するように構成され、複数の前記媒質ガス中に各々配置される前記高電位電極を備えた構成とすることができる。

【 0 0 3 8 】

10

20

30

40

50

また、前記高電位電極により前記電場を形成する際に、前記高電位電極と接地電位箇所との間の距離を、前記高電位電極に印加される電圧により部分放電を開始可能な所定距離に設定し、次に、前記高電位電極と前記接地電位箇所との間の距離を、部分放電を維持可能な範囲で前記所定距離より大きくすることができる。

【0039】

以下、本発明の実施形態について図面を参照しながら説明する。

【0040】

(実施の形態1)

図1A、1Bは、実施の形態1におけるLFプラズマジェット生成装置を示し、図1Aは正面図、図1Bは図1AにおけるA-A線に沿った拡大断面図である。

10

【0041】

ガス供給管1は、例えば石英パイプのような誘電体からなり、その後端部にはガスチューブ2が接続されて、図示しない媒質ガス源から例えばヘリウム(He)ガスが供給される。ガス供給管1の内腔を通ったヘリウムガスは噴出口1aから噴出されて、媒質ガスのガス流を形成するためのガス流発生部が構成される。ガス供給管1としては、例えば、内径50 μ m~50mmのものを用いることができる。石英パイプに代えて、他の誘電体からなるパイプ、例えばプラスチックチューブ等を用いてもよい。

【0042】

ガス供給管1の噴出口1a側の端部の外周上には、同軸状の単一のプラズマ発生用の高電位電極3が設置されている。高電位電極3には電圧印加装置4が接続され、図2Aに示すような、所定周波数のパルス列状の正電圧を印加することができる。電圧印加装置4により印加するパルス列状の正電圧の電圧値を例えば10kVに設定し、周波数を例えば10kHz程度に設定することにより、噴出口1aから細く伸びる非平衡プラズマジェット5が生成される。

20

【0043】

このように、高電位の単極のみにより生成されるプラズマジェット5には、図1Aに破線でも示すように、高電位電極3から媒質ガス流の上下流方向へ伸張する現象が観察される。したがってこの放電は、プラズマ塊が大気中へ飛び出している現象ではなく、ヘリウムガス流により媒質制限された円柱状の空間で起こる放電現象であると考えられる。つまり高電位の電極3に対する媒質ガス流の上下流側において、遠方に存在するグラウンド電位との間で部分放電が発生し、しかもその放電は、媒質ガス流中でのみ発生する媒質制限されたプラズマである。したがって、本実施の形態のLFプラズマジェット生成装置においては、電極間での短絡放電は発生していない。その結果、高電位電極3の上流部と下流部との双方(即ち高電位電極3の外部)で、アスペクト比の大きいプラズマが発生する。

30

【0044】

本実施の形態における媒質制限された部分放電のみによるプラズマ流を発生させるために、上記構成においては、ガス供給管1およびガスチューブ2が、媒質ガス流を発生するガス流発生部として機能し、高電位電極3および電圧印加装置4が、媒質ガス流の各々に対応するように電場を形成する電場形成部として機能する。このように設けられた電場形成部により形成される電場により、媒質ガス流の上流側および下流側の双方で部分放電が発生し、媒質ガス流中に、電場形成部から媒質ガス流の上流側及び下流側の双方に向かってプラズマが生成される。

40

【0045】

上記構成において、電圧印加装置4は、高電位電極3に対して所定周波数を有するパルス列状の正電圧を印加するように構成されているが、印加電圧はこのような態様に限定されるわけではない。部分放電が起こるように電場が生成されさえすれば、印加電圧の態様は任意である。

【0046】

但し、時間的に変化する電圧を印加することが望ましい。時間的に変化するることにより、特に誘電体バリア放電の場合、ガラスというコンデンサを経由してプラズマを着火して

50

いるので、電圧が変化する成分によってプラズマが生成され易くなる。具体的には、10 kHz程度の電圧を用いればよいが、60 Hz程度の低周波でもグロー状の大気圧プラズマが得られる場合もある。ただし、10 MHz程度の高周波になると、高速カメラで見ても一様な形状をしている別の放電形状になる。より好ましくは、周期的に変化する電圧を印加する。周期的に放電したほうが安定したプラズマが得られ易いからである。

【0047】

媒質ガスとしてはヘリウムガスが好適であるが、条件を適切に設定すれば他のガスを用いることも可能である。例えば、アルゴンとケトンの混合ガスを用いることもできる。また、モノマーなど化学薬品の蒸気、噴霧した霧や微粒子などエアロゾルを供給することにより、種々のプロセスを行うことが可能である。

10

【0048】

以上のような放電機構に関する知見を応用することにより、種々の放電が可能になった。このLFプラズマジェットは熱的に非平衡な低温プラズマであり、薄いナイロン等へ基材にダメージを与えることなく照射する事も可能であるが、表面処理、オゾン生成やプラズマ重合を起こすために十分なエネルギーは有している。

【0049】

本実施の形態のように、単電極すなわち単一の高電位電極3により非平衡プラズマジェットを生成する構成により、短絡放電を発生させることなく、部分放電のみを容易に発生させることが可能である。但し、1つの媒質ガス流に対して配置される高電位電極3すなわち電場形成部は、1つのみに制限されることはない。すなわち、1つの媒質ガス流に対して複数の電場形成部を設けても、各々の電場形成部が部分放電のみを発生するように配置されればよい。したがって、1つのガス流発生部に対して、複数の高電位電極3が互いに十分に離間して配置された構成により、本実施形態のような作用効果を得ることも可能である。

20

【0050】

部分放電のみを発生させる構成とすることにより、従来の同軸2電極方式に比べると、短絡放電に伴う消費電力の増大が抑制され、エネルギー変換効率を向上させることが可能であり、また、不要な発熱を抑制することもできる。さらに、プラズマジェットの発生に対する寄与が少ないグラウンド側の電極が省略されて、装置が単純化される。単電極であっても、プラズマジェットの生成の起動は容易である。

30

【0051】

また、媒質ガス流束により媒質制限された空間領域にプラズマを生成する方法においては、部分放電のみを発生させることにより、任意の媒質ガス流束を安定してプラズマ化することが可能である。この手法を用いて、10 μm ~ 50 mm程度の幅広いスケールにてプラズマを着火することが実現され、さらなる大口径化も原理的に可能である。

【0052】

また、チューブの内面処理では、特に部分放電が有効である。チューブの内面処理には、移動電極（チューブに接触している必要は無い）を用い、ヘリウムガスや適当なモノマーガスを混ぜたものをチューブに流しておいて（充填するだけでもよい）、チューブ内でプラズマを生成する。それにより、チューブの連続処理が可能である。本実施の形態の手法を利用すれば、2電極方式に比べて、移動電極を容易に構成することができる。

40

【0053】

以上のように、本実施の形態におけるLFプラズマジェット生成装置によれば、媒質ガスを流したガス供給管1に接続した高電位電極3にパルス列状の正電圧のみを印加することにより、ガス供給管1から大気中へ拡散する媒質ガス流に沿って部分放電を発生させ、それによりプラズマ流を生成することができる。そのための各種条件の設定の一例は、次のとおりである。

【0054】

媒質ガス：ヘリウムガス
石英パイプの内径：3 mm

50

媒質ガスの流量：数リットル/分

高電位電極 3 への印加電圧：電圧 10 kV

印加電圧の周波数：10 kHz

また、幅 2 mm 横 50 mm のような、媒質ガス流束に対して回転角方向に閉じた面を持たない電極（一部分のみを覆っている電極）を用いても、部分放電によるプラズマ発生が可能である。

【0055】

本発明によるプラズマジェットの本質は、“大気中にガス流束を作る”ことと、“高電圧電極近傍での部分放電”の二つである。周期的な高電圧を印加し放電を行っているが、印加電圧のみならず、印加周波数によってプラズマパラメーターの制御が可能である。それらに加えて、印加する高電圧の波形（極性）を制御することによっても、生成されるプラズマのパラメーターの制御が可能である。

10

【0056】

実際に印加される高電圧は、図 2 B ~ 2 C に示すような波形に分類できる。図 2 B は、正の高電圧のみを印加した場合の電圧波形を示す。図 2 C は、負の高電圧のみを印加した場合の電圧波形を示す。図 2 D は、正と負の両方の高電圧を交互に印加した場合の電圧波形を示す。それぞれの場合において、放電そのものは、印加した電圧が正と負でそれぞれ異なる一定の絶対値より大きくなった瞬間にパルス状の放電が生じる。例えば 10 kHz の電源を用いた場合、一周期は 100 μ sec となるが、このパルス状の放電は数 μ sec のうちに観測される。

20

【0057】

そのときに印加されている高電圧の極性により、プラズマそのもの、もしくはプラズマから生成されるイオン、電子、メタステーブル原子などの大気中密度や温度分布状態などが異なってくる。それぞれ、正電圧の場合は正コロナ放電、負電圧の場合は負コロナ放電が発生しているが、それぞれ物理的な放電機構が異なるためにプラズマ生成状態が異なってくる。このようにそれぞれ極性を制御したプラズマを用いることにより、プラズマを照射対象物へ対する効果を制御することが可能となる。一方、図 2 D の場合には、両極性の放電が発生し、それぞれ電圧がピーク近傍の時間領域で、正コロナ放電と負コロナ放電が順次発生する状態が得られる。

【0058】

正や負の高電圧の印加波形を組み合わせて制御することにより、パラメーターの異なるプラズマジェットを生成して、選択性のある化学反応増進を行うことが期待できる。

30

【0059】

なお、電圧印加装置 4 は、図 2 E に示すように、プラズマ発生の起動時の印加電圧のピーク値と、プラズマ発生を維持する際の印加電圧のピーク値を変化させる構成とすることが望ましい。すなわち、プラズマジェットの起動に際して、時間 $t_0 \sim t_1$ までは、高いピーク電圧 V_0 を供給し、その後時間 t_1 以降は、低減させたピーク電圧 V_1 を供給する。電圧 V_0 は、プラズマジェットの発生を起動させるのに十分なレベルを有し、電圧 V_1 は、プラズマジェットの発生を維持するのに必要なレベルである。プラズマジェットの起動には高い電圧が必要であるが、一旦プラズマジェットが生成されると起動時よりも低い電圧でプラズマジェットの生成を維持できるので、印加電圧を下げることにより、消費電力を低減することが可能である。以降の実施の形態における LF プラズマジェット生成装置についても、同様の駆動方法を適用できる。

40

【0060】

また、高電位電極 3 は、必ずしもガス供給管 1 の外周面に同軸状に設ける必要はなく、ガス供給管 1 の外周面あるいは内周面の一部に取り付けた電極でも、LF プラズマジェットの生成は可能である。すなわち、媒質ガス流を形成する誘電体からなる部材の内面あるいは外面に電極を取り付けた構造とし、また、誘電体と電極が一体となった構造とすることが好ましい。誘電体からなる部材の内面に電極を取り付けた構造とした場合には、媒質ガスは誘電体および電極の双方に接触する。

50

【 0 0 6 1 】

また、媒質ガスは、必ずしも流れを形成している必要はない。すなわち、媒質ガス塊からプラズマを生成するようにプラズマ生成装置を構成することも可能である。その場合、媒質ガス塊中に電場を形成する電場形成部を設ける。媒質ガス塊が細長い形状を有する場合であれば、電場形成部から媒質ガス塊の長手方向における双方に向かって部分放電が起こるように電場を形成する。媒質ガス塊を、電極を設けた管に、媒質ガスを封入した構成とすることもできる。その場合でも、電極は、管の内面あるいは外面のどちらに設けてもよい。

【 0 0 6 2 】

(実施の形態 2)

図 3 A、3 B は、実施の形態 2 における L F プラズマジェット生成装置を示し、図 3 A は正面図、図 3 B は図 3 A における B - B 線に沿った拡大断面図である。図 3 において、図 1 に示した要素と同一の要素については同一の参照符号を付して、説明の繰り返いを省略する。以下の各実施の形態の説明についても同様である。

【 0 0 6 3 】

本実施の形態において、ガス供給管 1 は誘電体の石英パイプであるが、高電位電極 6 は銅線であり、ガス供給管 1 の噴出口 1 a 側端部の内腔の軸線上に配置されている。このような高電位電極 6 を用いると、放電は高電位電極 6 である銅線の先端から開始される。そして、細く伸びたジェットはガス供給管 1 の噴出口 1 a に向かって次第に半径を増大させる。

【 0 0 6 4 】

図 4 に示すように、銅線からなる高電位電極 7 を、ガス供給管 1 から分離して配置することもできる。すなわち、線状の高電位電極 7 が、ガス供給管 1 の噴出口 1 a 端から媒質ガス流の噴出方向に離間した位置に配置されている。

【 0 0 6 5 】

さらに、線状の高電位電極 6 に代えて、ガス供給管 1 の噴出口 1 a 側端部の内周面に、同軸状の電極を配置することもできる。あるいは内周面の一部に電極を配置しても、非平衡プラズマジェットの生成は可能である。

【 0 0 6 6 】

(実施の形態 3)

上述のように本発明によれば、単一の高電位電極を設ければよいので、電極設置の自由度が増大する。例えば、誘電体のガス供給管に電極を装着するのみならず、本実施の形態のように、誘電体のガス供給管に代えて金属のガス供給管を用い、ガス供給管を電極としてプラズマジェットを生成することも可能である。

【 0 0 6 7 】

図 5 A、5 B は、実施の形態 3 における L F プラズマジェット生成装置を示し、図 5 A は正面図、図 5 B は図 5 A における C - C 線に沿った拡大断面図である。

【 0 0 6 8 】

本実施の形態においては、ガス供給管は導電材である金属パイプ 8 により形成され、金属パイプ 8 が電圧印加装置 4 に接続されて、所定周波数のパルス列状の正電圧を印加するためのプラズマ発生用の高電位電極として用いられる。金属パイプ 8 としては、例えば、内径が数ミリ程度の金属管は無論のこと、内径 1 0 0 μ m のステンレスパイプを用いて、マイクロサイズのプラズマジェットを生成することも可能である。

【 0 0 6 9 】

(実施の形態 4)

図 6 A、6 B は、実施の形態 4 における L F プラズマジェット生成装置を示し、図 6 A は正面図、図 6 B は図 6 A における D - D 線に沿った拡大断面図である。

【 0 0 7 0 】

本実施の形態においては、平板状ガス供給管 9 を構成する平板状石英パイプは、その断面が、図 6 B に示すように円筒形ではなく、平板形状を有する、従って噴出口 9 a は線状

10

20

30

40

50

の開口を形成している。高電位電極 10 も平板形状を有し、平板状ガス供給管 9 の一方の外面に取り付けられている。

【0071】

この LF プラズマジェット生成装置は、上述の実施の形態と比べて大型化を可能とするものである。例えば、2 mm × 50 mm 程度の平面状の非平衡プラズマジェット 11 を形成することができ、大面積処理に適している。

【0072】

また、ガス供給管としては、石英パイプに限らず、プラスチックパイプや金属パイプなども使用可能である。

【0073】

(実施の形態 5)

図 7 は、実施の形態 5 における LF プラズマジェット生成装置を示す正面図である。本実施の形態における LF プラズマジェット生成装置は、基本的な構成は、図 1 A、1 B に示した実施の形態 1 の装置と同様である。

【0074】

ガス供給管 1 の噴出口 1 a 側の端部の外周上には、同軸状の単一のプラズマ発生用の高電位電極 3 が設置されている。高電位電極 3 には電圧印加装置 4 が接続され、所定周波数のパルス列状の正電圧を印加することができる。本実施の形態の特徴は、さらに、ガス供給管 1 の噴出口 1 a の近傍に補助電極 1 2 が配置され、電圧印加装置 4 のグラウンド側に接続されることである。

【0075】

ガス供給管 1 を用いてその噴出口 1 a から媒質ガス、例えばヘリウムガスを噴出させて媒質ガスのガス流を形成し、電圧印加装置 4 により、例えば 10 kV のパルス列状の正電圧を周波数 10 kHz 程度の周波数で印加すれば、噴出口 1 a から細く伸びる非平衡プラズマジェット 5 が生成される。その際、接地された補助電極 1 2 が配置されていることにより、プラズマ生成の起動が容易になり、またプラズマ生成維持の安定性が向上する。すなわち、プラズマ生成の起動時の印加電圧を、プラズマ生成の維持に必要な程度の低い電圧に低減させることができ、また、十分に低い電圧でプラズマ生成を安定して維持可能である。

【0076】

補助電極 1 2 は、噴出口 1 a から噴出する媒質ガス流の一部にのみ接触するような寸法および配置とする。それにより、非平衡プラズマジェット 5 の生成に実質的な影響を与ることなく、プラズマの起動及び維持の効果を得ることができる。

【0077】

(実施の形態 6)

図 8 A は、実施の形態 6 における LF プラズマジェット生成装置を示す正面図である。本実施の形態における LF プラズマジェット生成装置は、基本的な構成は、図 1 A、1 B に示した実施の形態 1 の装置と同様である。すなわち、ガス供給管 1 の噴出口 1 a 側の端部の外周上には、同軸状の単一のプラズマ発生用の高電位電極 3 が設置されている。高電位電極 3 には電圧印加装置 4 が接続され、所定周波数のパルス列状の高電位を印加することができ

【0078】

本実施の形態の特徴は、さらに、ガス供給管 1 の噴出口 1 a に隣接して、補助ガス供給管 1 3 が設けられたことである。補助ガス供給管 1 3 の内腔には補助電極 1 4 が配置され、電圧印加装置 4 のグラウンド側に接続される。補助電極 1 4 は、補助ガス供給管 1 3 のガス供給管 1 側の管壁に近接して配置される。

【0079】

補助ガス供給管 1 3 は、ガス供給管 1 と鋭角をなして斜めに配置され、その噴出口 1 3 a は、ガス供給管 1 の噴出口 1 a に隣接して配置されている。隣接とは、図 8 A のように互いに接触する状態、あるいは図 8 B に示すように、互いに接触はしないが近接して配置

10

20

30

40

50

されている場合を含む意味である。噴出口 1 3 a と噴出口 1 a を接触させずに近接させる場合の離間距離 g の許容可能な上限は、後述する効果を実用上十分に得ることが可能な範囲によって決まる。なお、図 8 B には、図示の都合上、沿面放電 1 5 のみを図示し、プラズマジェット 5 の図示は省略されている。

【 0 0 8 0 】

上記構成の装置を用い、媒質ガスとして例えばアルゴンガスを流し、電圧印加装置 4 により、高電位電極 3 と補助電極 1 4 間に実施の形態 1 と同様の低周波電圧を印加すると、容易にプラズマジェット 5 の発生を起動し、安定して維持することが可能である。この理由は以下のとおりである。

【 0 0 8 1 】

L F プラズマジェットは、短絡放電ではなくて、部分放電により生成される。部分放電は高電位電極近傍の電界集中によりもたらされるが、そのため、プラズマの発生には短絡放電に比べて高い電圧が必要である。ヘリウムを媒質ガスとして用いた場合には、比較的低い電圧で L F プラズマジェットを起動し維持することが可能である。これに対してアルゴンガスの場合は、ヘリウムガスの場合に比べて放電開始電圧が高いため、比較的高電圧を印加する必要がある。その結果、放電開始と共に強い放電が生じる。言い換えれば、L F プラズマジェットの特徴を損なうことのない弱い放電を発生させるような低い電圧では、アルゴンガス中で L F プラズマジェットを起動し維持することは困難である。

【 0 0 8 2 】

これに対して、上記構成の L F プラズマジェット生成装置によれば、補助電極 1 4 を有する補助ガス供給管 1 3 を設けることにより、アルゴンガスを媒質ガスとして用いた場合の放電開始電圧を低下させることができる。これは、電圧を印加したときに、まず高電位電極 3 と補助電極 1 4 との間で沿面放電 1 5 が生成されることによる。沿面放電 1 5 は、固体表面に沿った放電現象であり、気体中の放電に比べて比較的低電圧で長距離の放電が可能である。すなわち、高電位電極 3 による、ガス供給管 1 から噴出するアルゴンの媒質ガス流中での部分放電に比べて、より低電圧で放電を開始する。

【 0 0 8 3 】

これは、沿面放電 1 5 により、その周辺に、電子、ラジカル、紫外線などが供給され、周辺部分での放電開始条件が緩くなるためである。その結果、ガス供給管 1 から噴出するアルゴンの媒質ガス流中で部分放電が発生し難いような印加電圧でも、高電位電極 3 による部分放電、すなわち L F プラズマジェットの生成が開始し易くなり、また、プラズマ生成を安定して維持可能となる。

【 0 0 8 4 】

本実施の形態の構成は、ヘリウムガスを媒質とする場合であっても、より放電開始電圧を低下させ、また、放電の維持をより低電圧で安定して維持可能とすることができ、効果的である。

【 0 0 8 5 】

なお、図 8 B に示したように、噴出口 1 3 a と噴出口 1 a を接触させずに近接させる場合の離間距離 g の許容可能な上限は、種々の条件によって相違する。但し、下記の式 (1) で示される条件を満足するように離間距離 g を設定すれば、沿面放電による補助効果を実用上十分に得ることが可能である。式 (1) において L は、ガス供給管 1 及び補助ガス供給管 1 3 の内壁に沿った、沿面放電 1 5 が生成される経路の長さを示す。

【 0 0 8 6 】

$$g / L \leq 0.1 \quad (1)$$

この g / L の値は、厳密には、沿面部分と空間短絡部分のそれぞれの絶縁破壊電圧を足し算したものが、印加電圧より下回るように設定すればよい。しかし、通常、沿面破壊電圧よりも空間破壊電圧の方が大幅に高いため、式 (1) で示される範囲に設定すれば、実用的な効果を得ることが可能である。

【 0 0 8 7 】

上記 L F プラズマジェット生成装置においては、高電位電極 3 はガス供給管 1 のガラス

10

20

30

40

50

壁を誘電体バリアとして媒質ガスに電圧を印加し、補助電極 1 4 は誘電体バリアを介することなく媒質ガスに電圧を印加する、片側バリアの構成によりガラス壁に沿った沿面放電を発生させている。一方、補助電極 1 4 も補助ガス供給管 1 3 のガラス壁を誘電体バリアとして媒質ガスに電圧を印加する、両側バリアの構成によりガラス壁に沿った沿面放電を発生させることも可能である。

【 0 0 8 8 】

また、上記構成において、補助電極 1 4 は補助ガス供給管 1 3 の管軸に対して偏って配置されているが、沿面放電の発生が可能であれば、どのような配置であってもよい。

【 0 0 8 9 】

(実施の形態 7)

実施の形態 7 における L F プラズマジェット生成方法について説明する。本実施の形態における L F プラズマジェット生成方法は、基本的には、図 1 A、1 B を参照して実施の形態 1 として説明した方法と同様である。すなわち、例えばガス供給管 1 を用いてその噴出口 1 a から媒質ガス、例えばヘリウムガスを噴出させて媒質ガスのガス流を形成し、その媒質ガス流に接触するかまたは隣接するように単一の高電位電極 3 を配置して、高電位電極に所定周波数を有するパルス列状の正電圧を印加することにより、媒質ガス流中にプラズマ 5 を発生させる。

【 0 0 9 0 】

上記の基本的な L F プラズマジェット生成方法に対して、起動をより容易にするための改良を加えた方法について、生成方法の工程を示す図 9 A ~ 9 C の正面図を参照して説明する。

【 0 0 9 1 】

まず、図 9 A に示すように、電圧印加装置 4 から高電位電極 3 に対して所定の駆動用パルス電圧を印加するとともに、電圧印加装置 4 のグラウンド側に接続された電極 1 2 を、ガス供給管 1 の噴出口 1 a の近傍に位置させる。

【 0 0 9 2 】

そして、図 9 B に示すように、ガス供給管 1 の噴出口 1 a からヘリウムガスを噴出させれば、非平衡プラズマジェットの生成が開始される。次に、図 9 C に示すように、グラウンド電位の電極 1 2 を単一の電極から離間させる。電圧印加装置 4 からの高電位電極 3 へのパルス電圧印加を継続すれば、非平衡プラズマジェットの生成が維持される。

【 0 0 9 3 】

このようにすれば、プラズマジェットの起動時の印加電圧を、プラズマジェット生成の維持に必要な程度の低い電圧に低減することができ、電圧印加装置 4 の小型化に有効である。

【 0 0 9 4 】

(実施の形態 8)

図 1 0 は、実施の形態 8 における L F プラズマジェット生成装置を示す正面図である。本実施の形態においては、図 1 A に示したものと同様の構成を有するプラズマジェット生成ユニットが 4 台配置され、各々のユニットに対して、共通の媒質ガス源 1 6 から H e ガスが供給される。電圧印加装置 4 は、各ユニットに個別に設けられている。

【産業上の利用可能性】

【 0 0 9 5 】

本発明のプラズマ生成装置は、単純な放電機構により、幅広いパラメーターで安定したプラズマ流を生じさせることが可能であり、プラスチックの表面処理、液中溶解物質の酸化反応、液体モノマーのプラズマ重合など、広範囲に利用可能である。

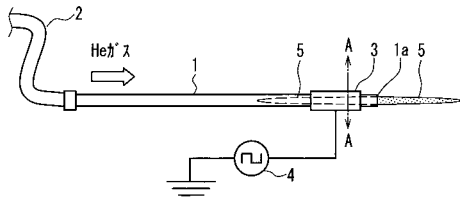
10

20

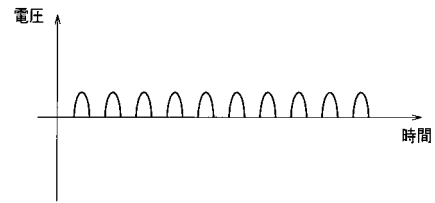
30

40

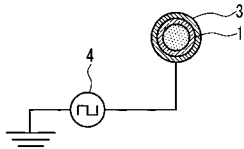
【図 1 A】



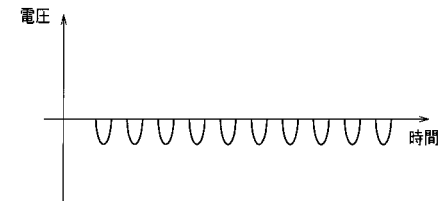
【図 2 B】



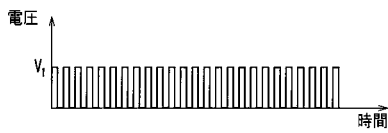
【図 1 B】



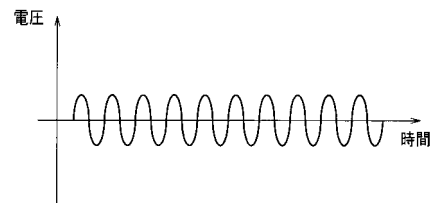
【図 2 C】



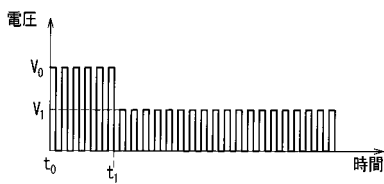
【図 2 A】



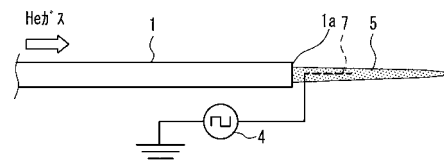
【図 2 D】



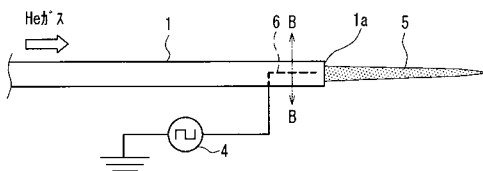
【図 2 E】



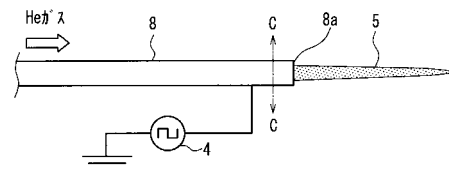
【図 4】



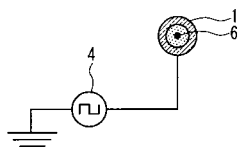
【図 3 A】



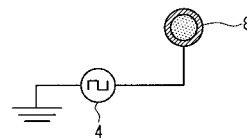
【図 5 A】



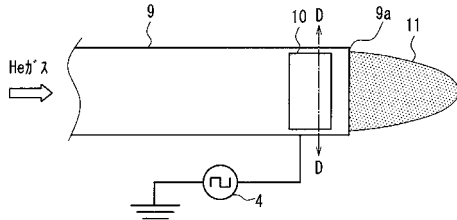
【図 3 B】



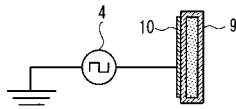
【図 5 B】



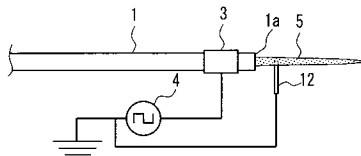
【図 6 A】



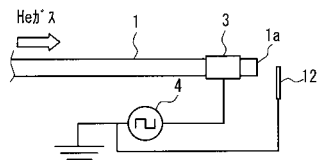
【図 6 B】



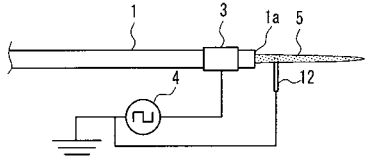
【図 7】



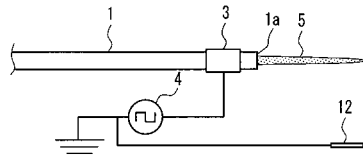
【図 9 A】



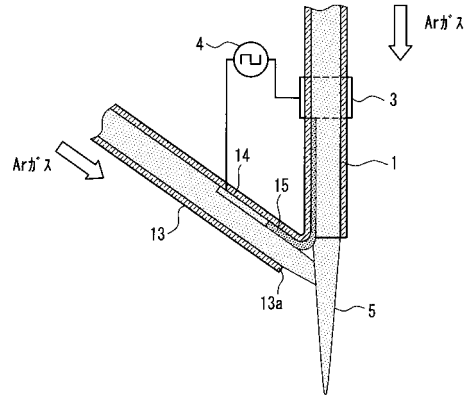
【図 9 B】



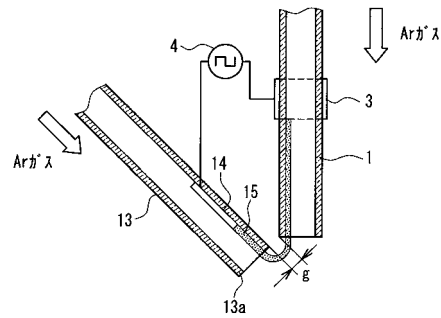
【図 9 C】



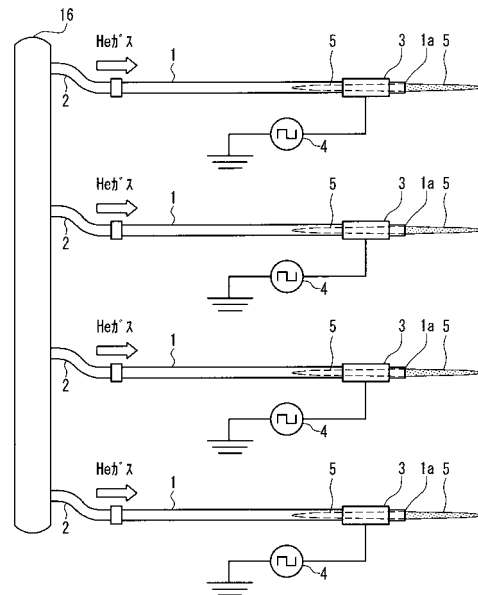
【図 8 A】



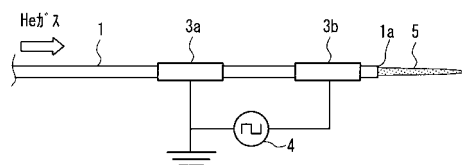
【図 8 B】



【図 10】



【図 11】



フロントページの続き

特許法第30条第1項適用 第67回応用物理学会学術講演会予稿集(平成18年8月29日)発行第148ページに発表

特許法第30条第1項適用 平成18年6月13日、富山国際会議場において開催された、社団法人プラズマ・核融合学会、日本原子力学会第6回核融合エネルギー連合講演会で文書をもって発表

早期審査対象出願

前置審査

審査官 林 靖

- (56)参考文献 特開2002-368389(JP,A)
国際公開第2006/001455(WO,A1)
特開2003-282443(JP,A)
特開平06-065739(JP,A)
特開2002-313599(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H05H 1/00-1/54
C23C 14/00-14/58
C23C 16/00-16/56
H01L 21/302
H01L 21/304
H01L 21/461
H01L 21/3065
H01L 21/205
H01L 21/31
H01L 21/365
H01L 21/469
H01L 21/86