

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6010406号
(P6010406)

(45) 発行日 平成28年10月19日 (2016. 10. 19)

(24) 登録日 平成28年9月23日 (2016. 9. 23)

(51) Int. Cl.	F I
H05H 1/46 (2006.01)	H05H 1/46 B
H01L 21/3065 (2006.01)	H01L 21/302 I O I D

請求項の数 6 (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2012-204568 (P2012-204568)	(73) 特許権者	000219967
(22) 出願日	平成24年9月18日 (2012. 9. 18)		東京エレクトロン株式会社
(65) 公開番号	特開2013-175430 (P2013-175430A)		東京都港区赤坂五丁目3番1号
(43) 公開日	平成25年9月5日 (2013. 9. 5)	(74) 代理人	100099944
審査請求日	平成27年5月25日 (2015. 5. 25)		弁理士 高山 宏志
(31) 優先権主張番号	特願2012-15092 (P2012-15092)	(72) 発明者	池田 太郎
(32) 優先日	平成24年1月27日 (2012. 1. 27)		東京都港区赤坂五丁目3番1号 赤坂B i
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		zタワー 東京エレクトロン株式会社内
		(72) 発明者	宮下 大幸
			東京都港区赤坂五丁目3番1号 赤坂B i
			zタワー 東京エレクトロン株式会社内
		(72) 発明者	長田 勇輝
			東京都港区赤坂五丁目3番1号 赤坂B i
			zタワー 東京エレクトロン株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 マイクロ波放射機構、マイクロ波プラズマ源および表面波プラズマ処理装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

チャンバ内に表面波プラズマを形成してプラズマ処理を行うプラズマ処理装置において、マイクロ波生成機構で生成されたマイクロ波をチャンバ内に放射するマイクロ波放射機構であって、

筒状をなす外側導体とその中に同軸的に設けられた内側導体とを有しマイクロ波を伝送するマイクロ波伝送路と、

前記マイクロ波伝送路を伝送されてきたマイクロ波を前記チャンバ内に放射するアンテナ部と

を具備し、

前記アンテナ部は、マイクロ波を放射するスロットが形成されたアンテナと、前記アンテナから放射されたマイクロ波を透過させ、その表面に表面波が形成される誘電体部材とを有し、かつ、少なくとも前記スロット内壁および前記誘電体部材の表面および内部を含む、表面電流および変位電流が流れる閉回路を有し、前記閉回路の長さが、マイクロ波の波長を λ_0 とした場合に、 $n\lambda_0 \pm \delta$ (n は正の整数、 δ は微調整成分 (0を含む) である) であることを特徴とするマイクロ波放射機構。

【請求項 2】

前記スロットには誘電体が充填されていることを特徴とする請求項1に記載のマイクロ波放射機構。

【請求項 3】

マイクロ波を生成するマイクロ波生成機構および生成されたマイクロ波をチャンバ内に放射するマイクロ波放射機構を有し、前記チャンバ内にマイクロ波を放射して前記チャンバ内に供給されたガスによる表面波プラズマを生成するマイクロ波プラズマ源であって、前記マイクロ波放射機構として、請求項 1 または請求項 2 に記載のものをを用いることを特徴とするマイクロ波プラズマ源。

【請求項 4】

複数の前記マイクロ波放射機構を有することを特徴とする請求項 3 に記載のマイクロ波プラズマ源。

【請求項 5】

被処理基板を収容するチャンバと、
前記チャンバ内にガスを供給するガス供給機構と、
マイクロ波を生成するマイクロ波生成機構および生成されたマイクロ波を前記チャンバ内に放射するマイクロ波放射機構を有し、前記チャンバ内にマイクロ波を放射して前記チャンバ内に供給されたガスによる表面波プラズマを生成するマイクロ波プラズマ源とを具備し、
前記チャンバ内の被処理基板に対して前記表面波プラズマにより処理を施す表面波プラズマ処理装置であって、
前記マイクロ波放射機構として、請求項 1 または請求項 2 に記載のものをを用いることを特徴とする表面波プラズマ処理装置。

【請求項 6】

前記マイクロ波プラズマ源は、複数の前記マイクロ波放射機構を有することを特徴とする請求項 5 に記載の表面波プラズマ処理装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、マイクロ波放射機構、マイクロ波プラズマ源および表面波プラズマ処理装置に関する。

【背景技術】

【0002】

プラズマ処理は、半導体デバイスの製造に不可欠な技術であるが、近時、LSI の高集積化、高速化の要請から LSI を構成する半導体素子のデザインルールが益々微細化され、また、半導体ウエハが大型化されており、それとともに、プラズマ処理装置においてもこのような微細化および大型化に対応するものが求められている。

【0003】

ところが、従来から多用されてきた平行平板型や誘導結合型のプラズマ処理装置では、生成されるプラズマの電子温度が高いため微細素子にプラズマダメージを生じてしまい、また、プラズマ密度の高い領域が限定されるため、大型の半導体ウエハを均一かつ高速にプラズマ処理することは困難である。

【0004】

そこで、高密度で低電子温度の表面波プラズマを均一に形成することができる RLSA (Radial Line Slot Antenna) マイクロ波プラズマ処理装置が注目されている (例えば特許文献 1)。

【0005】

RLSA マイクロ波プラズマ処理装置は、表面波プラズマ発生用のアンテナとしてチャンバの上部に所定のパターンで複数のスロットが形成された平面スロットアンテナであるラジアルラインスロットアンテナ (Radial Line Slot Antenna) を設け、マイクロ波発生源から導かれたマイクロ波を、アンテナのスロットから放射させるとともに、その下に設けられた誘電体からなるマイクロ波透過板を介して真空中に保持されたチャンバ内に放射し、このマイクロ波電界によりチャンバ内で表面波プラズマを生成し、これにより半導体ウエハ等の被処理体を処理するものである。

【0006】

また、マイクロ波を複数に分配し、上記のような平面スロットアンテナを有するマイクロ波放射機構を複数設け、それらから放射されたマイクロ波をチャンバ内に導きチャンバ内でマイクロ波を空間合成してプラズマを生成するプラズマ処理装置も提案されている（特許文献2）。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0007】

【特許文献1】特開2000-294550号公報

【特許文献2】国際公開第2008/013112号パンフレット

10

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

ところで、このようなマイクロ波を放射して表面波プラズマを生成するプラズマ処理装置では、投入電力を増加させた場合のプラズマ密度（電子密度）の増加率が低くなることが判明した。つまり、プラズマ密度（電子密度）を上昇させようとして投入電力を増加させても電子密度が十分に増加しないことが判明した。

【0009】

本発明はかかる事情に鑑みてなされたものであって、投入電力を増加させた場合のプラズマ密度（電子密度）増加率を高くすることができるマイクロ波放射機構、マイクロ波プラズマ源および表面波プラズマ処理装置を提供することを課題とする。

20

【課題を解決するための手段】

【0010】

上記課題を解決するため、本発明の第1の観点では、チャンバ内に表面波プラズマを形成してプラズマ処理を行うプラズマ処理装置において、マイクロ波生成機構で生成されたマイクロ波をチャンバ内に放射するマイクロ波放射機構であって、筒状をなす外側導体とその中に同軸的に設けられた内側導体とを有しマイクロ波を伝送するマイクロ波伝送路と、前記マイクロ波伝送路を伝送されてきたマイクロ波を前記チャンバ内に放射するアンテナ部とを具備し、前記アンテナ部は、マイクロ波を放射するスロットが形成されたアンテナと、前記アンテナから放射されたマイクロ波を透過させ、その表面に表面波が形成される誘電体部材とを有し、かつ、少なくとも前記スロット内壁および前記誘電体部材の表面および内部を含む、表面電流および変位電流が流れる閉回路を有し、前記閉回路の長さが、マイクロ波の波長を λ_0 とした場合に、 $n\lambda_0 \pm \delta$ （ n は正の整数、 δ は微調整成分（0を含む）である）であることを特徴とするマイクロ波放射機構を提供する。

30

【0011】

この場合に、前記スロットに誘電体を充填することができる。

【0012】

本発明の第2の観点では、マイクロ波を生成するマイクロ波生成機構および生成されたマイクロ波をチャンバ内に放射するマイクロ波放射機構を有し、前記チャンバ内にマイクロ波を放射して前記チャンバ内に供給されたガスによる表面波プラズマを生成するマイクロ波プラズマ源であって、前記マイクロ波放射機構として、上記第1の観点のものをを用いることを特徴とするマイクロ波プラズマ源を提供する。

40

【0013】

本発明の第3の観点では、被処理基板を収容するチャンバと、前記チャンバ内にガスを供給するガス供給機構と、マイクロ波を生成するマイクロ波生成機構および生成されたマイクロ波を前記チャンバ内に放射するマイクロ波放射機構を有し、前記チャンバ内にマイクロ波を放射して前記チャンバ内に供給されたガスによる表面波プラズマを生成するマイクロ波プラズマ源とを具備し、前記チャンバ内の被処理基板に対して前記表面波プラズマにより処理を施す表面波プラズマ処理装置であって、前記マイクロ波放射機構として、上記第1の観点のものをを用いることを特徴とする表面波プラズマ処理装置を提供する。

50

【0014】

上記第2および第3において、複数の前記マイクロ波放射機構を有するものとしてすることができる。

【発明の効果】

【0015】

本発明によれば、アンテナ部を、マイクロ波を放射するスロットが形成されたアンテナと、アンテナから放射されたマイクロ波を透過させ、その表面に表面波が形成される誘電体部材とを有し、かつ、スロット内壁および誘電体部材の表面および内部を含む、表面電流および変位電流が流れる閉回路を有し、閉回路の長さが、マイクロ波の波長を λ_0 とした場合に、 $n\lambda_0 \pm \delta$ (n は正の整数、 δ は微調整成分(0を含む)である)であるとしたので、スロットの厚さにかかわらず、アンテナ部における表面電流を大きくすることができ、プラズマの吸収効率が高いので、投入電力を増加した場合の電子密度増加率を高くすることができる。

10

【図面の簡単な説明】

【0016】

【図1】本発明の一実施形態に係るマイクロ波放射機構を備えた表面波プラズマ処理装置の概略構成を示す断面図である。

【図2】図1の表面波プラズマ処理装置に用いられるマイクロ波プラズマ源の構成を示す構成図である。

【図3】マイクロ波プラズマ源におけるマイクロ波供給部を模式的に示す平面図である。

20

【図4】図1の表面波プラズマ処理装置に用いられるマイクロ波放射機構を示す縦断面図である。

【図5】マイクロ波放射機構の給電機構を示す図4のAA'線による横断面図である。

【図6】チューナにおけるスラグと滑り部材を示す図4のBB'線による横断面図である。

【図7】アンテナ部における表面電流および変位電流が流れる閉回路を説明するための図である。

【図8】平面スロットアンテナのスロット形状の一例を示す平面図である。

【図9】プラズマ中へのマイクロ波の放射と誘電体中へのマイクロ波の放射における電磁界特性をシミュレーションした結果を示す図である。

30

【図10】平面スロットアンテナのスロット厚さをそれぞれ30mm、20mm、1mmとした場合のマイクロ波電力と電子密度との関係を示す図である。

【図11】平面スロットアンテナのスロット厚さをそれぞれ30mm、20mm、1mmとした場合のプラズマの誘電率とマイクロ波の放射効率との関係を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0017】

以下、添付図面を参照して本発明の実施の形態について詳細に説明する。

【0018】

<表面波プラズマ処理装置の構成>

図1は、本発明の一実施形態に係るマイクロ波放射機構を有する表面波プラズマ処理装置の概略構成を示す断面図であり、図2は図1の表面波プラズマ処理装置に用いられるマイクロ波プラズマ源の構成を示す構成図、図3はマイクロ波プラズマ源におけるマイクロ波供給部を模式的に示す平面図、図4はマイクロ波プラズマ源におけるマイクロ波放射機構を示す断面図、図5はマイクロ波放射機構の給電機構を示す図4のAA'線による横断面図、図6はチューナにおけるスラグと滑り部材を示す図4のBB'線による横断面図である。

40

【0019】

表面波プラズマ処理装置100は、ウエハに対してプラズマ処理として例えばエッチング処理を施すプラズマエッチング装置として構成されており、気密に構成されたアルミニウムまたはステンレス鋼等の金属材料からなる略円筒状の接地されたチャンバ1と、チャ

50

ンバ1内にマイクロ波プラズマを形成するためのマイクロ波プラズマ源2とを有している。チャンバ1の上部には開口部1aが形成されており、マイクロ波プラズマ源2はこの開口部1aからチャンバ1の内部に臨むように設けられている。

【0020】

チャンバ1内には被処理体である半導体ウエハW（以下ウエハWと記述する）を水平に支持するためのサセプタ11が、チャンバ1の底部中央に絶縁部材12aを介して立設された筒状の支持部材12により支持された状態で設けられている。サセプタ11および支持部材12を構成する材料としては、表面をアルマイト処理（陽極酸化処理）したアルミニウム等が例示される。

【0021】

また、図示はしていないが、サセプタ11には、ウエハWを静電吸着するための静電チャック、温度制御機構、ウエハWの裏面に熱伝達用のガスを供給するガス流路、およびウエハWを搬送するために昇降する昇降ピン等が設けられている。さらに、サセプタ11には、整合器13を介して高周波バイアス電源14が電気的に接続されている。この高周波バイアス電源14からサセプタ11に高周波電力が供給されることにより、ウエハW側にプラズマ中のイオンが引き込まれる。

【0022】

チャンバ1の底部には排気管15が接続されており、この排気管15には真空ポンプを含む排気装置16が接続されている。そしてこの排気装置16を作動させることによりチャンバ1内が排気され、チャンバ1内を所定の真空度まで高速に減圧させることが可能となっている。また、チャンバ1の側壁には、ウエハWの搬入出を行うための搬入出口17と、この搬入出口17を開閉するゲートバルブ18とが設けられている。

【0023】

チャンバ1内のサセプタ11の上方位置には、プラズマエッチングのための処理ガスをウエハWに向けて吐出するシャワープレート20が水平に設けられている。このシャワープレート20は、格子状に形成されたガス流路21と、このガス流路21に形成された多数のガス吐出孔22とを有しており、格子状のガス流路21の間は空間部23となっている。このシャワープレート20のガス流路21にはチャンバ1の外側に延びる配管24が接続されており、この配管24には処理ガス供給源25が接続されている。

【0024】

一方、チャンバ1のシャワープレート20の上方位置には、リング状のプラズマガス導入部材26がチャンバ壁に沿って設けられており、このプラズマガス導入部材26には内周に多数のガス吐出孔が設けられている。このプラズマガス導入部材26には、プラズマガスを供給するプラズマガス供給源27が配管28を介して接続されている。プラズマ生成ガスとしてはArガスなどが好適に用いられる。処理ガスとしては、通常用いられるエッチングガス、例えばCl₂ガス等を用いることができる。

【0025】

プラズマガス導入部材26からチャンバ1内に導入されたプラズマガスは、マイクロ波プラズマ源2からチャンバ1内に導入されたマイクロ波によりプラズマ化され、このプラズマがシャワープレート20の空間部23を通過しシャワープレート20のガス吐出孔22から吐出された処理ガスを励起し、処理ガスのプラズマを形成する。なお、プラズマガスと処理ガスを同一の供給部材で供給してもよい。

【0026】

マイクロ波プラズマ源2は、チャンバ1の上部に設けられた支持リング29により支持された天板110を有しており、支持リング29と天板110との間は気密にシールされている。図2に示すように、マイクロ波プラズマ源2は、複数経路に分配してマイクロ波を出力するマイクロ波出力部30と、マイクロ波出力部30から出力されたマイクロ波を伝送しチャンバ1内に放射するためのマイクロ波供給部40とを有している。

【0027】

マイクロ波出力部30は、マイクロ波電源31と、マイクロ波発振器32と、発振され

10

20

30

40

50

たマイクロ波を増幅するアンプ 33 と、増幅されたマイクロ波を複数に分配する分配器 34 とを有している。

【0028】

マイクロ波発振器 32 は、所定周波数（例えば、915 MHz）のマイクロ波を例えば PLL 発振させる。分配器 34 では、マイクロ波の損失ができるだけ起こらないように、入力側と出力側のインピーダンス整合を取りながらアンプ 33 で増幅されたマイクロ波を分配する。なお、マイクロ波の周波数としては、915 MHz の他に、700 MHz から 3 GHz を用いることができる。

【0029】

マイクロ波供給部 40 は、分配器 34 にて分配されたマイクロ波をチャンバ 1 内へ導く複数のアンテナモジュール 41 を有している。各アンテナモジュール 41 は、分配されたマイクロ波を主に増幅するアンプ部 42 と、マイクロ波放射機構 43 とを有している。また、マイクロ波放射機構 43 は、インピーダンスを整合させるためのチューナ 60 と、増幅されたマイクロ波をチャンバ 1 内に放射するアンテナ部 45 とを有している。そして、各アンテナモジュール 41 におけるマイクロ波放射機構 43 のアンテナ部 45 からチャンバ 1 内へマイクロ波が放射されるようになっている。図 3 に示すように、マイクロ波供給部 40 は、アンテナモジュール 41 を 7 個有しており、各アンテナモジュール 41 のマイクロ波放射機構 43 が、円周状に 6 個およびその中心に 1 個、円形をなす天板 110 の上に配置されている。

【0030】

天板 110 は、真空シールおよびマイクロ波透過板として機能し、金属製のフレーム 110a と、そのフレーム 110a に嵌め込まれ、マイクロ波放射機構 43 が配置されている部分に対応するように設けられた石英等の誘電体からなる誘電体部材 110b とを有している。

【0031】

アンプ部 42 は、位相器 46 と、可変ゲインアンプ 47 と、ソリッドステートアンプを構成するメインアンプ 48 と、アイソレータ 49 とを有している。

【0032】

位相器 46 は、マイクロ波の位相を変化させることができるように構成されており、これを調整することにより放射特性を変調させることができる。例えば、各アンテナモジュール毎に位相を調整することにより指向性を制御してプラズマ分布を変化させることができる。また、隣り合うアンテナモジュールにおいて 90° ずつ位相をずらすようにして円偏波を得ることができる。また、位相器 46 は、アンプ内の部品間の遅延特性を調整し、チューナ内での空間合成を目的として使用することができる。ただし、このような放射特性の変調やアンプ内の部品間の遅延特性の調整が不要な場合には位相器 46 は設ける必要はない。

【0033】

可変ゲインアンプ 47 は、メインアンプ 48 へ入力するマイクロ波の電力レベルを調整し、個々のアンテナモジュールのばらつきを調整またはプラズマ強度調整のためのアンプである。可変ゲインアンプ 47 を各アンテナモジュール毎に変化させることによって、発生するプラズマに分布を生じさせることもできる。

【0034】

ソリッドステートアンプを構成するメインアンプ 48 は、例えば、入力整合回路と、半導体増幅素子と、出力整合回路と、高 Q 共振回路とを有する構成とすることができる。

【0035】

アイソレータ 49 は、アンテナ部 45 で反射してメインアンプ 48 に向かう反射マイクロ波を分離するものであり、サーキュレータとダミーロード（同軸終端器）とを有している。サーキュレータは、アンテナ部 45 で反射したマイクロ波をダミーロードへ導き、ダミーロードはサーキュレータによって導かれた反射マイクロ波を熱に変換する。

【0036】

次に、マイクロ波放射機構 4 3 について説明する。

図 4、5 に示すように、マイクロ波放射機構 4 3 は、マイクロ波を伝送する同軸構造の導波路（マイクロ波伝送路）4 4 と、導波路 4 4 を伝送されたマイクロ波をチャンバ 1 内に放射するアンテナ部 4 5 とを有している。そして、マイクロ波放射機構 4 3 からチャンバ 1 内に放射されたマイクロ波がチャンバ 1 内の空間で合成され、チャンバ 1 内で表面波プラズマが形成されるようになっている。

【0037】

導波路 4 4 は、筒状の外側導体 5 2 およびその中心に設けられた棒状の内側導体 5 3 が同軸状に配置されて構成されており、導波路 4 4 の先端にアンテナ部 4 5 が設けられている。導波路 4 4 は、内側導体 5 3 が給電側、外側導体 5 2 が接地側となっている。外側導体 5 2 および内側導体 5 3 の上端は反射板 5 8 となっている。

10

【0038】

導波路 4 4 の基端側にはマイクロ波（電磁波）を給電する給電機構 5 4 が設けられている。給電機構 5 4 は、導波路 4 4（外側導体 5 2）の側面に設けられたマイクロ波電力を導入するためのマイクロ波電力導入ポート 5 5 を有している。マイクロ波電力導入ポート 5 5 には、アンプ部 4 2 から増幅されたマイクロ波を供給するための給電線として、内側導体 5 6 a および外側導体 5 6 b からなる同軸線路 5 6 が接続されている。そして、同軸線路 5 6 の内側導体 5 6 a の先端には、外側導体 5 2 の内部に向けて水平に伸びる給電アンテナ 9 0 が接続されている。

【0039】

20

給電アンテナ 9 0 は、例えば、アルミニウム等の金属板を削り出し加工した後、テフロン（登録商標）等の誘電体部材の型にはめて形成される。反射板 5 8 から給電アンテナ 9 0 までの間には、反射波の実効波長を短くするためのテフロン（登録商標）等の誘電体からなる遅波材 5 9 が設けられている。なお、2.45 GHz 等の周波数の高いマイクロ波を用いた場合には、遅波材 5 9 は設けなくてもよい。このとき、給電アンテナ 9 0 から反射板 5 8 までの距離を最適化し、給電アンテナ 9 0 から放射される電磁波を反射板 5 8 で反射させることで、最大の電磁波を同軸構造の導波路 4 4 内に伝送させる。

【0040】

給電アンテナ 9 0 は、図 5 に示すように、マイクロ波電力導入ポート 5 5 において同軸線路 5 6 の内側導体 5 6 a に接続され、電磁波が供給される第 1 の極 9 2 および供給された電磁波を放射する第 2 の極 9 3 を有するアンテナ本体 9 1 と、アンテナ本体 9 1 の両側から、内側導体 5 3 の外側に沿って延び、リング状をなす反射部 9 4 とを有し、アンテナ本体 9 1 に入射された電磁波と反射部 9 4 で反射された電磁波とで定在波を形成するように構成されている。アンテナ本体 9 1 の第 2 の極 9 3 は内側導体 5 3 に接触している。

30

【0041】

給電アンテナ 9 0 がマイクロ波（電磁波）を放射することにより、外側導体 5 2 と内側導体 5 3 との間の空間にマイクロ波電力が給電される。そして、給電機構 5 4 に供給されたマイクロ波電力がアンテナ部 4 5 に向かって伝播する。

【0042】

また、導波路 4 4 にはチューナ 6 0 が設けられている。チューナ 6 0 は、チャンバ 1 内の負荷（プラズマ）のインピーダンスをマイクロ波出力部 3 0 におけるマイクロ波電源の特性インピーダンスに整合させるものであり、外側導体 5 2 と内側導体 5 3 との間を上下に移動する 2 つのスラグ 6 1 a、6 1 b と、反射板 5 8 の外側（上側）に設けられたスラグ駆動部 7 0 とを有している。

40

【0043】

これらスラグのうち、スラグ 6 1 a はスラグ駆動部 7 0 側に設けられ、スラグ 6 1 b はアンテナ部 4 5 側に設けられている。また、内側導体 5 3 の内部空間には、その長手方向に沿って例えば台形ネジが形成された螺棒からなるスラグ移動用の 2 本のスラグ移動軸 6 4 a、6 4 b が設けられている。

【0044】

50

図6に示すように、スラグ61aは、誘電体からなる円環状をなし、その内側に滑り性を有する樹脂からなる滑り部材63が嵌め込まれている。滑り部材63にはスラグ移動軸64aが螺合するねじ穴65aとスラグ移動軸64bが挿通される通し穴65bが設けられている。一方、スラグ61bは、スラグ61aと同様、ねじ穴65aと通し穴65bとを有しているが、スラグ61aとは逆に、ねじ穴65aはスラグ移動軸64bに螺合され、通し穴65bにはスラグ移動軸64aが挿通されるようになっている。これによりスラグ移動軸64aを回転させることによりスラグ61aが昇降移動し、スラグ移動軸64bを回転させることによりスラグ61bが昇降移動する。すなわち、スラグ移動軸64a、64bと滑り部材63とからなるねじ機構によりスラグ61a、61bが昇降移動される。

10

【0045】

内側導体53には長手方向に沿って等間隔に3つのスリット53aが形成されている。一方、滑り部材63は、これらスリット53aに対応するように3つの突出部63aが等間隔に設けられている。そして、これら突出部63aがスラグ61a、61bの内周に当接した状態で滑り部材63がスラグ61a、61bの内部に嵌め込まれる。滑り部材63の外周面は、内側導体53の内周面と遊びなく接触するようになり、スラグ移動軸64a、64bが回転されることにより、滑り部材63が内側導体53を滑って昇降するようになっている。すなわち内側導体53の内周面がスラグ61a、61bの滑りガイドとして機能する。

【0046】

20

滑り部材63を構成する樹脂材料としては、良好な滑り性を有し、加工が比較的容易な樹脂、例えばポリフェニレンサルファイド（PPS）樹脂を好適なものとして挙げることができる。

【0047】

上記スラグ移動軸64a、64bは、反射板58を貫通してスラグ駆動部70に延びている。スラグ移動軸64a、64bと反射板58の間にはベアリング（図示せず）が設けられている。また、内側導体53の下端には、導体からなる底板67が設けられている。スラグ移動軸64a、64bの下端は、駆動時の振動を吸収するために、通常は開放端となっており、これらスラグ移動軸64a、64bの下端から2～5mm程度離隔して底板67が設けられている。なお、この底板67を軸受け部としてスラグ移動軸64a、64bの下端をこの軸受け部にて軸支させてもよい。

30

【0048】

スラグ駆動部70は筐体71を有し、スラグ移動軸64aおよび64bは筐体71内に延びており、スラグ移動軸64aおよび64bの上端には、それぞれ歯車72aおよび72bが取り付けられている。また、スラグ駆動部70には、スラグ移動軸64aを回転させるモータ73aと、スラグ移動軸64bを回転させるモータ73bが設けられている。モータ73aの軸には歯車74aが取り付けられ、モータ73bの軸には歯車74bが取り付けられており、歯車74aが歯車72aに噛合し、歯車74bが歯車72bに噛合するようになっている。したがって、モータ73aにより歯車74aおよび72aを介してスラグ移動軸64aが回転され、モータ73bにより歯車74bおよび72bを介してスラグ移動軸64bが回転される。なお、モータ73a、73bは例えばステッピングモータである。

40

【0049】

なお、スラグ移動軸64bはスラグ移動軸64aよりも長く、より上方に達しており、したがって、歯車72aおよび72bの位置が上下にオフセットしており、モータ73aおよび73bも上下にオフセットしているので、モータおよび歯車等の動力伝達機構のスペースが小さく、筐体71が外側導体52と同じ径となっている。

【0050】

モータ73aおよび73bの上には、これらの出力軸に直結するように、それぞれスラグ61aおよび61bの位置を検出するためのインクリメント型のエンコーダ75aおよ

50

び75bが設けられている。

【0051】

スラグ61aおよび61bの位置は、スラグコントローラ68により制御される。具体的には、図示しないインピーダンス検出器により検出された入力端のインピーダンス値と、エンコーダ75aおよび75bにより検知されたスラグ61aおよび61bの位置情報に基づいて、スラグコントローラ68がモータ73aおよび73bに制御信号を送り、スラグ61aおよび61bの位置を制御することにより、インピーダンスを調整するようになっている。スラグコントローラ68は、終端が例えば50Ωになるようにインピーダンス整合を実行させる。2つのスラグのうち一方のみを動かすと、スミスチャートの原点を通る軌跡を描き、両方同時に動かすと位相のみが回転する。

10

【0052】

アンテナ部45は、マイクロ波放射アンテナとして機能する、平面状をなしスロット131を有する平面スロットアンテナ81と、平面スロットアンテナ81の上面に設けられた遅波材82と、平面スロットアンテナ81の先端側に設けられた天板110の誘電体部材110bとを有している。遅波材82の中心には導体からなる円柱部材82aが貫通しており、底板67と平面スロットアンテナ81とを接続している。したがって、内側導体53が底板67および円柱部材82aを介して平面スロットアンテナ81に接続されている。なお、外側導体52の下端は平面スロットアンテナ81まで延びており、遅波材82の周囲は外側導体52で覆われている。また、平面スロットアンテナ81の周囲は被覆導体84により覆われている。

20

【0053】

遅波材82および誘電体部材110bは、真空よりも大きい誘電率を有しており、例えば、石英、セラミックス、ポリテトラフルオロエチレン等のフッ素系樹脂やポリイミド系樹脂により構成されており、真空中ではマイクロ波の波長が長くなることから、マイクロ波の波長を短くしてアンテナを小さくする機能を有している。遅波材82は、その厚さによりマイクロ波の位相を調整することができ、天板110と平面スロットアンテナ81の接合部が定在波の「はら」になるようにその厚さを調整する。これにより、反射が最小で、平面スロットアンテナ81の放射エネルギーが最大となるようにすることができる。

【0054】

天板110は誘電体部材110bがフレーム110aに嵌め込まれて構成されており、誘電体部材110bは平面スロットアンテナ81に接するように設けられている。そして、メインアンプ48で増幅されたマイクロ波が内側導体53と外側導体52の周壁の間の導波路44を通してアンテナ部45に至る。アンテナ部45では、マイクロ波が表面波として遅波材82を透過し、平面スロットアンテナ81のスロット131を伝送され、さらに天板110の誘電体部材110bを透過し、プラズマに接する誘電体部材110bの表面を伝送され、この表面波によりチャンバ1内の空間に表面波プラズマを生成する。

30

【0055】

平面スロットアンテナ81は、図7に示すアンテナ部45の表面電流および変位電流が流れる閉回路Cの長さが、マイクロ波の波長を λ_0 としたときに、 $n\lambda_0 \pm \delta$ （ n は正の整数、 δ は微調整成分（0を含む）である）となるように、その厚さ（スロット131の厚さ）が規定される。 δ の値は、十分な表面電流が得られるように決定され、25mm以下程度である。例えば、周波数 $f = 860\text{MHz}$ の場合、 $\lambda_0 = 349\text{mm}$ であるから、 $n = 1$ とすると、閉回路Cの長さの中心値は約350mmとなり、スロット131の厚さの最適値はこの長さから決定される。

40

【0056】

また、平面スロットアンテナ81は、例えば図8に示すように、全体が円板状（平面状）をなすとともに、6個のスロット131が全体形状が円周状になるように形成されている。これらスロット131は全て同じ形状であり、円周に沿って細長い形状に形成されている。これらスロット131のうち隣接するもの同士の継ぎ目部分は、一方のスロット131の端部と他方のスロット131の端部とが内外で重なるように構成されている。すな

50

わち、スロット131の中央部は、外側にある一方の端部と内側にある他方の端部を繋いだ状態となっており、6個のスロット131を内包する二点鎖線で示す円環領域132において外周と一致する一方の端部と内周と一致する他方の端部の間を斜めに結ぶようになっており、円周方向に隣接するスロットとスロットとの継ぎ目部分が、スロットに覆われるように構成され、周方向にスロットのない部分が存在しないようにしている。

【0057】

スロット131は、 $(\lambda g / 2) - \delta'$ の長さを有する。ただし、 λg はマイクロ波の実効波長であり、 δ' は円周方向（角度方向）に電界強度の均一性が高くなるように微調整する微調整成分（0を含む）である。なお、スロット131の長さは約 $\lambda g / 2$ に限らず、 $\lambda g / 2$ の整数倍から微調整成分（0を含む）を引いたものであればよい。スロット131は、中央部と、その両側の一方の端部および他方の端部（オーバーラップ部分）とがほぼ均等な長さを有している。すなわち、中央部が $(\lambda g / 6) - \delta_1$ 、その両側の端部がそれぞれ $(\lambda g / 6) - \delta_2$ および $(\lambda g / 6) - \delta_3$ の長さとなる。ただし、 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 は円周方向（角度方向）に電界強度の均一性が高くなるように微調整する微調整成分（0を含む）である。隣接するスロットがオーバーラップする部分の長さは等しいほうが好ましいので、 $\delta_2 = \delta_3$ であることが好ましい。本実施形態の場合、一つのスロット131の長さが約 $\lambda g / 2$ であり、それが6個であるから合計の長さが約 $3\lambda g$ である。そのうちオーバーラップ部分は $(\lambda g / 6) \times 6 = \lambda g$ であり、全体の長さは $2\lambda g$ となるから、アンテナとしては、長さが約 $\lambda g / 2$ のスロットを円周状に4つ配置した従来のアンテナとほぼ等価なものとなる。スロット131は、その内周が、平面スロットアンテナ81の中心から $(\lambda g / 4) \pm \delta''$ の位置になるように形成される。ただし、 δ'' は径方向の電界強度分布を均一にするために微調整する微調整成分（0を含む）である。なお、中心からスロット内周までの長さは約 $\lambda g / 4$ に限らず、 $\lambda g / 4$ の整数倍に微調整成分（0を含む）を加えたものであればよい。

【0058】

このような平面スロットアンテナ81は、スロットとスロットの継ぎ目部分で電磁波強度が弱くなることを回避することができ、周方向（角度方向）のプラズマ均一性を良好にすることができる。

【0059】

ただし、スロットの数は6個に限らず、例えば5個や4個、また7個以上であっても同様の効果を得ることができる。また、平面スロットアンテナ81のスロット形状は図8のものに限らず、例えば複数の円弧状のスロットが円周上に均等に形成されたものであってもよい。

【0060】

本実施形態において、メインアンプ48と、チューナ60と、平面スロットアンテナ81とは近接配置している。そして、チューナ60と平面スロットアンテナ81とは $1/2$ 波長内に存在する集中定数回路を構成しており、かつ平面スロットアンテナ81、遅波材82、誘電体部材110bは合成抵抗が 50Ω に設定されているので、チューナ60はプラズマ負荷に対して直接チューニングしていることになり、効率良くプラズマへエネルギーを伝達することができる。

【0061】

スロット131には誘電体を充填してもよい。スロット131に誘電体を充填することにより、マイクロ波の実効波長が短くなり、スロット全体の厚さ（平面スロットアンテナ81の厚さ）を薄くすることができる。

【0062】

表面波プラズマ処理装置100における各構成部は、マイクロプロセッサを備えた制御部120により制御されるようになっており、制御部120は表面波プラズマ処理装置100のプロセッシングシーケンスおよび制御パラメータであるプロセスレシピを記憶した記憶部や、入力手段およびディスプレイ等を備えており、選択されたプロセスレシピに従ってプラズマ処理装置を制御するようになっており、

【0063】

<表面波プラズマ処理装置の動作>

次に、以上のように構成される表面波プラズマ処理装置100における動作について説明する。

まず、ウエハWをチャンバ1内に搬入し、サセプタ11上に載置する。そして、プラズマガス供給源27から配管28およびプラズマガス導入部材26を介してチャンバ1内にプラズマガス、例えばArガスを導入しつつ、マイクロ波プラズマ源2からマイクロ波をチャンバ1内に伝送して表面波プラズマを生成する。

【0064】

そして、処理ガス供給源25から配管24およびシャワープレート20を介してチャンバ1内に処理ガス、例えばCl₂ガス等のエッチングガスが吐出される。吐出された処理ガスは、シャワープレート20の空間部23を通過してきたプラズマにより励起されてプラズマ化し、この処理ガスのプラズマによりウエハWにプラズマ処理、例えばエッチング処理が施される。

【0065】

上記表面波プラズマを生成するに際し、マイクロ波プラズマ源2では、マイクロ波出力部30のマイクロ波発振器32から発振されたマイクロ波電力がアンプ33で増幅された後、分配器34により複数に分配され、分配されたマイクロ波電力はマイクロ波供給部40へ導かれる。マイクロ波供給部40においては、このように複数に分配されたマイクロ波電力が、ソリッドステートアンプを構成するメインアンプ48で個別に増幅され、マイクロ波放射機構43の導波路44に給電され、導波路44を通過してアンテナ部に至る。アンテナ部45では、マイクロ波が表面波として遅波材82を透過し、平面スロットアンテナ81のスロット131を伝送され、さらに天板110の誘電体部材110bを透過し、プラズマに接する誘電体部材110bの表面を伝送され、この表面波によりチャンバ1内の空間に表面波プラズマを生成する。

【0066】

一般的に、スロットアンテナはマイクロ波放射手段として知られており、スロットアンテナの基本的な放射方法として、長手方向のスロットの長さをマイクロ波の実効波長の半波長の整数倍+δ' (δ'は微調整成分(0を含む)である)にすると放射効率が最大となることが知られている。一方、マイクロ波を空气中に放射する場合、アンテナ構造によってはカットオフ波長よりもスロット長さが短くなり、スロットアンテナを厚くすると、マイクロ波を減衰させてしまうので、できる限り薄くすることが重要である。例えば、石英で挟まれた平面スロットアンテナを用い、そのスロット長さを30.5mm(2.45GHzのマイクロ波における実効波長の半波長)にした場合、スロット内ではTE₁₀波が伝送するので、このスロットを導波管と見立てた場合のカットオフ波長は61mmとなり、2.45GHzのマイクロ波は伝送できずに減衰する。この減衰を最小限にするため、導波路であるスロットの厚さを薄くすることが重要となるのである。したがって、本実施形態のような平面スロットアンテナ81の場合にも、従来は厚さを1mm程度に薄くしていた。

【0067】

しかし、プラズマ中へマイクロ波を放射する場合には、空気のような誘電体中に放射する場合とは様相が異なる。プラズマ中へのマイクロ波の放射と誘電体中へのマイクロ波の放射における電磁界特性をシミュレーションした結果を図9に示す。外部固定磁場が無く、駆動周波数が中性粒子と電子の衝突周波数よりも大きい場合、プラズマの誘電率は、以下の式で近似的に表すことができる。

【数1】

$$\kappa_p = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}$$

10

20

30

40

50

ここで、 ω はマイクロ波の周波数であり、 ω_{pe} はプラズマ中の電子の振動周波数である。

【0068】

プラズマ中の電磁波の波数は、以下の式で表されるので、 κ_p が負の値をとるときは、電磁波はプラズマ中を伝播することができなくなる、すなわち全反射されることがわかる。

【数2】

$$k = \pm \frac{\sqrt{\kappa_p}}{c} \omega$$

10

【0069】

プラズマの加熱（電力吸収）はこの全反射面の近傍に生じる電子プラズマ波とスロットから放射される電磁波の共振によると考えられている。電磁波放射位置に極めて近く、電界の強い領域では、プラズマ中の電子はより大きな熱エネルギーを持つことができる。その状況において、熱エネルギーと電界エネルギーのエネルギー交換による波が存在することができる。この波は進行方向に平行な成分に電界を持ち（縦波であり）、これが電子プラズマ波と呼ばれるものである。それが、スロットから放射される電磁波と共振することで、電子プラズマ波は最大効率で電力を吸収することができる。その電子プラズマ波のエネルギーはランダウ減衰により電子のエネルギーとして転化され、電子は効率的にエネルギーを得ることができる。一方、駆動周波数が中性粒子と電子の衝突周波数よりも小さい場合は、放射電磁波の電子へのエネルギー伝達は、誘電損失によるプラズマ中へのエバネッセント波によって行われる。プラズマと誘電体部材110bとの界面では、プラズマ誘電損失、つまり抵抗成分があるので、界面にも小さいながら電界成分は存在するが、マイクロ波回路上ではショート終端に近くなるので、垂直成分が主となる。また、プラズマと誘電体部材110bとの界面での表面電流は、誘電体中へ放射する場合とは異なり、径方向に流れることになり、スロット131の入り口（遅波材82を含む）と閉回路を形成することとなる。閉回路に流れる電流は、表面電流と変位電流からなる。金属表面を流れる場合が、表面電流であり、誘電体中を流れる場合は変位電流となる。具体的には、電流は、図7に示すように、遅波材82を透過して平面スロットアンテナ81のスロット131に至り、スロット131内壁を通過して誘電体部材110bを透過し、プラズマと誘電体部材110bとの界面（誘電体部材110bの表面）を外側から中心に向けて流れ、中心から誘電体部材110bを透過した後、誘電体部材110bと平面スロットアンテナ81との界面を通過してスロット131に至り、スロット131内壁を通過して遅波材82を透過するといった閉回路Cとなる。つまり、プラズマ中へマイクロ波を放射する場合、スロット内部は伝送路としてではなく、アンテナの一部として作用するのである。したがって、空気中のような誘電体にマイクロ波を放射する場合のように、スロットをできるだけ薄くする必要はない。一方、この閉回路にはプラズマ表面も含まれるため、プラズマへのエネルギー伝達に大きく寄与する。したがって、この閉回路に表面電流をできるだけ多く流すことがプラズマへのエネルギー伝達効率を高める上で重要となる。この閉回路の表面電流が最大となるのは、その全長がおよそマイクロ波の波長 λ_0 の整数倍のとき（共振条件）である。ただし、この閉回路の全長がマイクロ波の波長 λ_0 の整数倍から多少ずれていても表面電流を多くすることができることから、本実施形態では上記閉回路の長さが $n\lambda_0 \pm \delta$ （ n は正の整数、 δ は微調整成分（0を含む）である）となるように、スロット131の厚さ（すなわち平面スロットアンテナ81の厚さ）を規定する。上述したように、 δ の値は、十分な表面電流が得られるように決定され、25mm以下程度である。例えば、周波数 $f = 860\text{MHz}$ の場合、 $\lambda_0 = 349\text{mm}$ であるから、 $n = 1$ とすると、閉回路Cの長さの中心値は約350mmであり、好ましい閉回路Cの長さは $350\text{mm} \pm 25\text{mm}$ となり、中心値である350mmの場合のスロット131の厚さは約30mmとなる。上

20

30

40

50

述したように、プラズマ中にマイクロ波を放射する場合には、スロット 131 の厚さがこのように厚くても問題はない。

【0070】

プラズマ着火後、インピーダンスが整合した状態において、投入されるマイクロ波電力はプラズマへ吸収されるものとそれ以外（チャンバ 1 の壁面、平面スロットアンテナ 81 の表面、誘電体）で吸収されるものに分別することができ、プラズマへ吸収されるものの比率を上げることが電子生成効率を向上させる上で重要である。本実施形態では上述したように表面電流を大きくすることができ、エネルギー伝達効率が高い、つまりプラズマの吸収効率が高いため、電子生成効率が高く、投入電力を増加させた場合の電子密度増加率を高くすることができる。また、これにより、プラズマ以外で吸収される電力を減少させることができ、平面スロットアンテナ 81 やチャンバ 1 の温度上昇を抑えることができる。

10

【0071】

このように、本実施形態では、スロット 131 の厚さ（すなわちスロットアンテナの厚さ）は薄いほうがよいという従来の常識にとらわれることなく、スロット 131 の厚さに拘わらず、閉回路の長さが $n\lambda_0 \pm \delta$ となるようにすることにより、投入電力を増加させた場合のプラズマ密度増加率を高くすることができる。石英のような誘電体材料からなる遅波材 82 および誘電体部材 110b が厚くなると、種々のモードが発生し、プラズマが不安定になってしまうか、またはプラズマ着火が難しくなり、プラズマ自体を生成できなくなってしまうが、本実施形態では、このような不都合が生じないように遅波材 82 およ

20

【0072】

次に、平面スロットアンテナのスロットの厚さをそれぞれ 1 mm、20 mm、30 mm としたマイクロ波放射機構を用い、マイクロ波の周波数を 860 MHz とし、マイクロ波電力を変化させてプラズマを生成した場合の電子密度を測定した。その結果を図 10 に示す。これらのうちスロット厚さが 1 mm のものは従来例であり、閉回路 C の長さが約 294 mm である。また、スロットの厚さが 20 mm では閉回路 C の長さが約 332 mm であり、スロットの厚さが 30 mm では閉回路 C の長さが約 352 mm となる。周波数 $f = 860 \text{ MHz}$ では、 $\lambda_0 = 349 \text{ mm}$ であるから、スロット厚さが 20 mm のものもスロット厚さが 30 mm のものも閉回路 C の長さが $\lambda_0 \pm \delta$ を満たし、スロット厚さが 30 mm のほうがより共振条件（閉回路 C の長さ $= \lambda_0$ ）に近づく。このため、この図に示すように、スロット厚が 1 mm の場合よりも閉回路 C の長さが $n\lambda_0 \pm \delta$ を満たすスロット厚が 20 mm および 30 mm の場合のほうが電子密度の増加率を高くすることができ、スロット厚が 30 mm のほうが 20 mm の場合よりも電子密度の増加率を高くすることができる。

30

【0073】

また、図 11 に、これらについて、電子密度に相当するプラズマの誘電率（ κ_p ）とマイクロ波放射効率との関係を示すが、プラズマの比誘電率の絶対値の増大、つまり電子密度の増大にともない、スロット厚が 1 mm の場合には放射効率がやや低下しているのに対し、スロット厚が 20 mm の場合には放射効率が増大し、スロット厚が 30 mm の場合には電子密度の増大にともなって放射効率が一層増大することがわかる。

40

【0074】

<他の適用>

なお、本発明は上記実施形態に限定されることなく、本発明の思想の範囲内において種々変形可能である。例えば、マイクロ波出力部 30 やマイクロ波供給部 40 の構成等は、上記実施形態に限定されるものではなく、例えば、アンテナから放射されるマイクロ波の指向性制御を行ったり円偏波にしたりする必要がない場合には、位相器は不要である。また、マイクロ波放射機構 43 において、遅波材 82 は必須ではない。

【0075】

50

また、上記実施形態では複数のマイクロ波放射機構を設けた例について示したが、マイクロ波放射機構は一個であってもよい。

【0076】

さらに、上記実施形態においては、プラズマ処理装置としてエッチング処理装置を例示したが、これに限らず、成膜処理、酸化膜処理、アッシング処理等の他のプラズマ処理にも用いることができる。さらに、被処理基板は半導体ウエハWに限定されず、LCD（液晶ディスプレイ）用基板に代表されるFPD（フラットパネルディスプレイ）基板や、セラミックス基板等の他の基板であってもよい。

【符号の説明】

【0077】

- 1；チャンバ
- 2；マイクロ波プラズマ源
- 11；サセプタ
- 12；支持部材
- 15；排気管
- 16；排気装置
- 17；搬入出口
- 20；シャワープレート
- 30；マイクロ波出力部
- 31；マイクロ波電源
- 32；マイクロ波発振器
- 40；マイクロ波供給部
- 41；アンテナモジュール
- 42；アンプ部
- 43；マイクロ波放射機構
- 44；導波路
- 45；アンテナ部
- 52；外側導体
- 53；内側導体
- 54；給電機構
- 55；マイクロ波電力導入ポート
- 56；同軸線路
- 58；反射板
- 60；チューナ
- 81；平面スロットアンテナ
- 82；遅波材
- 100；表面波プラズマ処理装置
- 110；天板
- 110b；誘電体部材
- 120；制御部
- 131；スロット
- C；閉回路
- W；半導体ウエハ

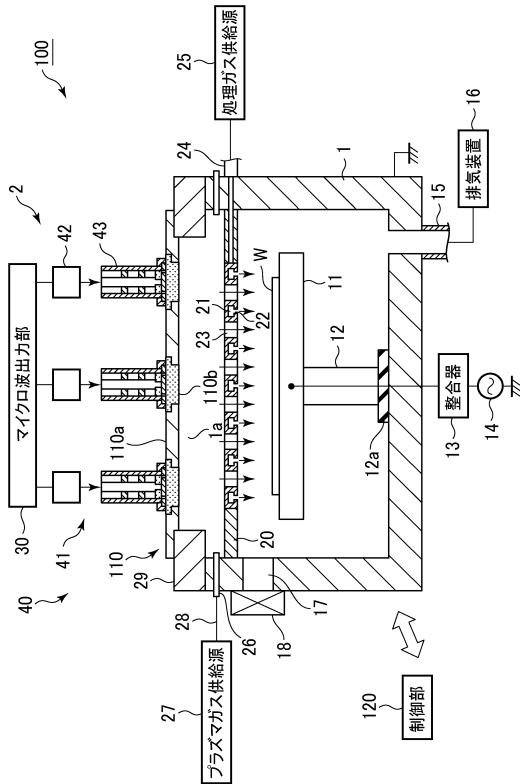
10

20

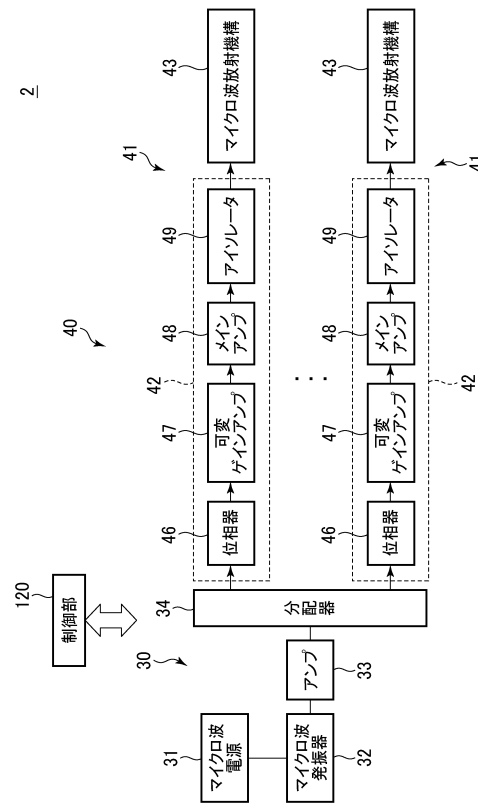
30

40

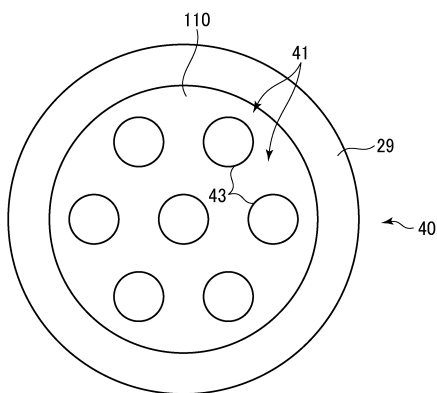
【図 1】



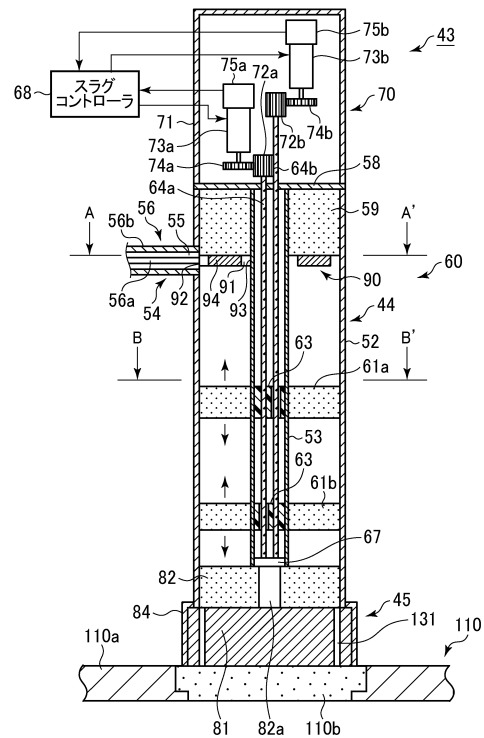
【図 2】



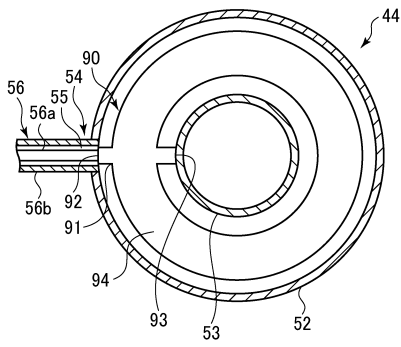
【図 3】



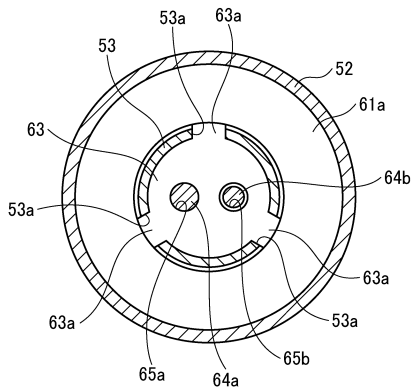
【図 4】



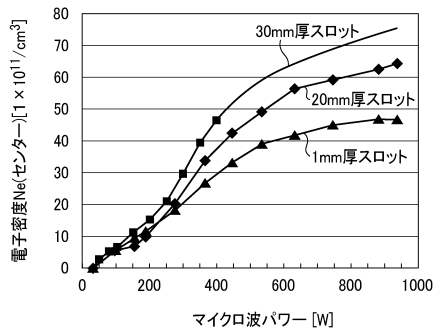
【図 5】



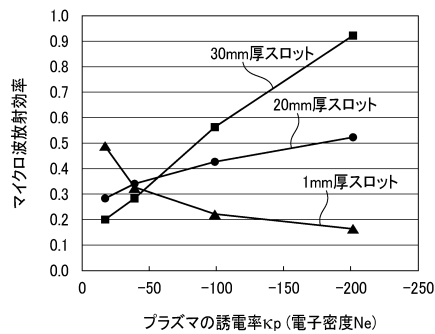
【図 6】



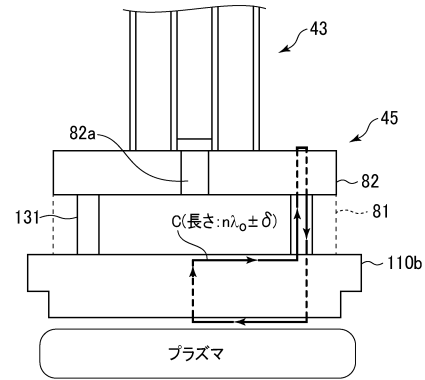
【図 10】



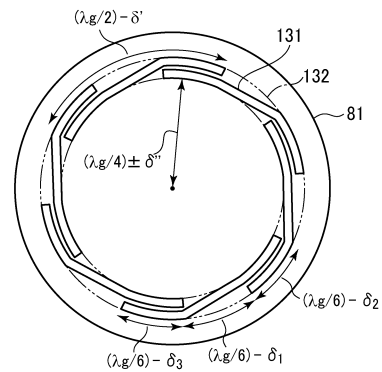
【図 11】



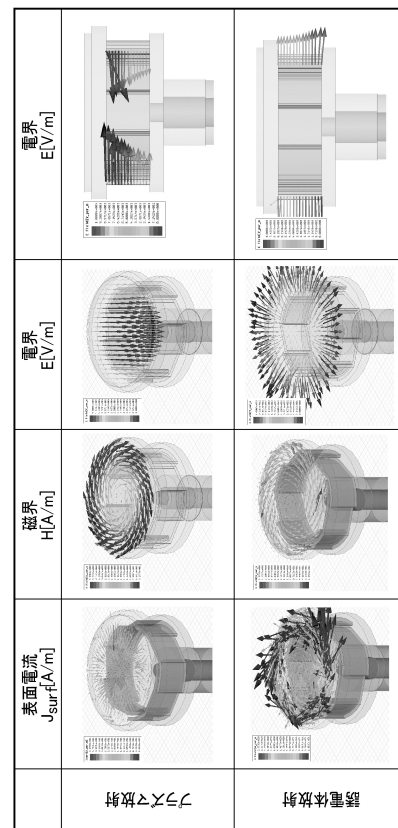
【図 7】



【図 8】



【図 9】



フロントページの続き

(72)発明者 藤野 豊

東京都港区赤坂五丁目3番1号 赤坂Bizタワー 東京エレクトロン株式会社内

(72)発明者 小松 智仁

東京都港区赤坂五丁目3番1号 赤坂Bizタワー 東京エレクトロン株式会社内

審査官 藤本 加代子

(56)参考文献 特開2010-232493 (JP, A)

特開2010-177420 (JP, A)

特開2010-087184 (JP, A)

特開2003-234327 (JP, A)

特開2001-298015 (JP, A)

特開2004-079829 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H05H 1/46

H01L 21/3065

H01L 21/205

H01L 21/31

C23C 16/511