(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号

特許第5165821号
(P5165821)

(45)発行日　平成25年3月21日(2013.3.21)　(24)登録日　平成24年12月28日(2012.12.28)

(51)Int.Cl.		F I		
H01J 37/32	(2006.01)	H01J	37/32	
H01L 21/205	(2006.01)	H01L	21/205	
H01L 21/302	(2006.01)	H01L	21/302	400
H05H 1/46	(2006.01)	H05H	1/46	L

請求項の数 24　(全 15 頁)

(21)出願番号	特願2000-557486 (P2000-557486)
(86)(22)出願日	平成11年6月18日 (1999.6.18)
(65)公表番号	特表2002-519861 (P2002-519861A)
(43)公表日	平成14年7月2日 (2002.7.2)
(86)国際出願番号	PCT/US1999/012808
(87)国際公開番号	WO2000/000993
(87)国際公開日	平成12年1月6日 (2000.1.6)
審査請求日	平成18年6月19日 (2006.6.19)
審判番号	不服2011-2828 (P2011-2828/J1)
審判請求日	平成23年2月7日 (2011.2.7)
(31)優先権主張番号	09/106,852
(32)優先日	平成10年6月30日 (1998.6.30)
(33)優先権主張国	米国(US)

(73)特許権者　592010081
ラム　リサーチ　コーポレーション
ＬＡＭ　ＲＥＳＥＡＲＣＨ　ＣＯＲＰＯＲＡＴＩＯＮ
アメリカ合衆国，カリフォルニア　９４５３８，フレモント，クッシング　パークウェイ　４６５０
(74)代理人　100076428
弁理士　大塚　康徳
(74)代理人　100112508
弁理士　高柳　司郎
(74)代理人　100115071
弁理士　大塚　康弘
(74)代理人　100116894
弁理士　木村　秀二

最終頁に続く

(54)【発明の名称】誘導結合型プラズマ発生システム用の複数コイル・アンテナ

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

誘導結合型プラズマを発生させるための装置であって、

チャンバ中への電磁界経路を形成するウィンドウと該チャンバ中にプロセス・ガスを導入するように構成されたプロセス・ガス供給源とを有するプラズマ反応チャンバと、

前記チャンバのウィンドウに近接して配設された少なくとも第１および第２のアンテナ・セグメントを含む高周波アンテナと、

前記アンテナ・セグメントに結合され、前記アンテナ・セグメント中の高周波電流を共振させるように構成された高周波発生源と、

前記高周波発生源と前記第１のアンテナ・セグメントの一端との間に接続された第１の入力コンデンサと、

前記高周波発生源と前記第２のアンテナ・セグメントの一端との間に接続された第２の入力コンデンサと、

を備え、

前記第１および第２のアンテナ・セグメントのそれぞれの他端が相互に結合されインピーダンスを介して接地されており、

前記高周波電流によって誘導された電磁界は、前記ウィンドウを通過し、プロセス・ガスを励起およびイオン化し、それによりチャンバ内にプラズマを発生させ、かつ、前記第１のアンテナ・セグメントが、前記第２のアンテナ・セグメントを取り囲んでいることを特徴とする装置。

【請求項２】
発生するプラズマの密度が、前記少なくとも第１および第２のアンテナ・セグメントがまたがる領域内で実質的に均一であることを特徴とする請求項１に記載の装置。
【請求項３】
前記少なくとも第１および第２のアンテナ・セグメントが、それぞれ、高周波電力を前記チャンバ中の異なる領域に結合し、これにより、前記チャンバ中に全体的に均一なプラズマを発生させることを特徴とする請求項１に記載の装置。
【請求項４】
前記少なくとも第１および第２のアンテナ・セグメントが、単巻コイルからなることを特徴とする請求項１に記載の装置。
【請求項５】
前記第１のアンテナ・セグメントが単巻コイルからなり、前記第２のアンテナ・セグメントが複巻コイルからなることを特徴とする請求項１に記載の装置。
【請求項６】
前記少なくとも第１および第２のアンテナ・セグメントが、複巻コイルからなることを特徴とする請求項１に記載の装置。
【請求項７】
前記第１および第２の入力コンデンサは、同じ電流又は異なる電流が得られるように、前記少なくとも第１および第２のアンテナ・セグメントの電流を調整することを特徴とする請求項１に記載の装置。
【請求項８】
前記第１および第２の入力コンデンサの組合せが各々の前記アンテナ・セグメントにおける電流を増大させるときは、前記アンテナ・セグメントに隣接するプラズマ領域への高周波電力結合が増大し、前記第１および第２の入力コンデンサの組合せが各々の前記アンテナ・セグメントにおける電流を減少させるときは、前記プラズマ領域への電力結合が減少することを特徴とする請求項７に記載の装置。
【請求項９】
前記第１および第２の入力コンデンサは単一制御により動作することを特徴とする請求項７に記載の装置。
【請求項１０】
前記少なくとも第１および第２のアンテナ・セグメントが単一の高周波電力源によって電力供給され、単一の整合回路網によって調整されることを特徴とする請求項１に記載の装置。
【請求項１１】
前記第１および第２のアンテナ・セグメントは、同一平面内にある二次元構成、非平面的な三次元構成、またはその組合せで構成されていることを特徴とする請求項１に記載の装置。
【請求項１２】
前記第１および第２のアンテナ・セグメントが同心状に構成されており、一方の前記アンテナ・セグメントが他方の前記アンテナ・セグメントよりも小さい直径を有することを特徴とする請求項１に記載の装置。
【請求項１３】
前記三次元構成が、ドーム状又はらせん状であることを特徴とする請求項１１に記載の装置。
【請求項１４】
各々の前記アンテナ・セグメントの形状が、ほぼ円形であることを特徴とする請求項１に記載の装置。
【請求項１５】
前記少なくとも第１および第２のアンテナ・セグメントが、前記チャンバのウィンドウの外表面に近接して配置されていることを特徴とする請求項１に記載の装置。

【請求項１６】
前記第１および第２のアンテナ・セグメントの電流が前記セグメントの周りに同じ方位角方向に流れることを特徴とする請求項１に記載の装置。
【請求項１７】
前記第１の複巻アンテナ・セグメントが平面的な複巻コイルとして構成されており、前記第２の複巻アンテナ・セグメントが第１および第２の部分を有することを特徴とする請求項６に記載の装置。
【請求項１８】
前記第２の複巻アンテナ・セグメントの前記第１の部分が平面的な複巻コイルとして構成されており、前記第２の複巻アンテナ・セグメントの前記第２の部分がらせん状のコイルとして構成されていることを特徴とする請求項１７に記載の装置。
【請求項１９】
前記ウィンドウは、前記らせん状のコイル内に中空の誘電体シリンダを含み、該中空の誘電体シリンダの中空領域が前記プロセス・チャンバに直接接続されていることを特徴とする請求項１８に記載の装置。
【請求項２０】
前記らせん状のコイルと前記中空の誘電体シリンダは、プラズマが、前記チャンバ内で、より低い圧力で当たるように構成されており、これにより前記プロセス・チャンバの中心部におけるプラズマ密度が高くなることを特徴とする請求項１９に記載の装置。
【請求項２１】
前記第１の複巻アンテナ・セグメントが、第１の平面的な部分と第２の非平面的な部分とを有し、前記第２の複巻アンテナ・セグメントが第１の平面的な部分と第２の非平面的な部分とを有することを特徴とする請求項６に記載の装置。
【請求項２２】
前記第１の複巻アンテナ・セグメントの前記第２の部分が、らせん状のコイルとして構成されていることを特徴とする請求項２１に記載の装置。
【請求項２３】
前記第２の複巻アンテナ・セグメントの前記第２の部分が、らせん状のコイルとして構成されていることを特徴とする請求項２１に記載の装置。
【請求項２４】
前記第１の複巻アンテナ・セグメントの全長が前記第２の複巻アンテナ・セグメントの全長と同等であることを特徴とする請求項６に記載の装置。
【発明の詳細な説明】
【０００１】
＜発明の分野＞
本発明は、半導体基板などの材料を処理するためのプラズマ反応器に関する。より詳細には、本発明は、プラズマ反応器内の誘導結合均一性を改善するためのシステムに関する。
＜発明の背景＞
プラズマの発生は様々な半導体製造プロセス、例えばプラズマ・エッチング及び堆積において有用である。プラズマは一般に、個々の電子ガス分子衝突による運動エネルギーの伝達によって個々のガス分子をイオン化させる自由電子の電界イオン化および生成によって低圧ガスから生成される。電子は通常、電界、一般には高周波電界の中で加速される。
【０００２】
ＲＦ電界中の電子を加速するための多数の技法が提案されている。例えば、米国特許第４９４８４５８号には、処理すべき半導体ウエハの平面的なに平行に位置する平面的なアンテナ・コイルを使用して、チャンバ内の高周波電界中で電子を励起するプラズマ発生デバイスが開示されている。図１に、アンテナ・システム１０５、誘電体ウィンドウ１２０、ガス分配プレート１３０、処理すべきウエハ１４０、真空チャンバ１５０、静電チャック１６０、および下側電極１７０を含んでいるプラズマ発生デバイス１００を概略的に示す。

【０００３】
動作に際しては、高周波発生源（図示せず）を使用して、一般に高周波整合回路（図示せず）を介して、アンテナ・システム１０５に高周波電流を供給する。高周波電流は、一般にアンテナ・システム１０５を介して共振し、真空チャンバ１５０内で方位角電界を誘導する。同時に、ガス分配プレート１３０を介してプロセス・ガスを真空チャンバ１５０中に導入すると、誘導された電界によりプロセス・ガスがイオン化してチャンバ１５０内にプラズマが生成される。次いでプラズマは、（静電チャック１６０によって所定の位置に保持された）ウエハ１４０に当たり、ウエハ１４０を必要に応じて処理する（例えば、エッチングする）。一般に、アンテナ・コイルに加えられる周波数とは異なる周波数である別の高周波数を下側電極１７０に加えて、イオン衝撃用の負のＤＣバイアス電圧を得る。
【０００４】
図２Ａおよび図２Ｂに、米国特許第４９４８４５８号に示されているアンテナ・システムを構成する２つの渦巻き状の平面的なコイル１１０ａ、１１０ｂを示す。図２Ａに示すように、第１の平面的なコイル１１０ａは、平面的なスパイラルに形成された一つの導電エレメントとして構成され、高周波回路への接続のために高周波タップ２０５、２１５に接続されている。図２Ｂでは、別の平面的なコイル１１０ｂは、相互接続２２５を介して直列に接続された複数の接続リング２２０として構成され、各端部が高周波タップ２０５、２１５に接続されている。
【０００５】
当技術分野においてよく知られているように、そのような渦巻き状のコイルによって得られる円状電流パターンはドーナツ形プラズマを作り出し、これによりウエハ１４０におけるエッチング速度に半径方向の不均一性が生じることがある。言い換えれば、平面的なコイル・アンテナ１１０によって誘導的に発生する電界は、一般に、（半径方向成分Ｅｒ＝０および方位角成分Ｅθ≠０を有する）方位角電界であるが、中心部では０である（Ｅｒ＝０およびＥθ≠０）。したがって、コイル・アンテナ１１０は、中心部においてより低い密度を有するドーナツ形プラズマを生成するので、ドーナツの中心部において適切な均一性を得るためには、プラズマ拡散（すなわち、中心部への電子およびイオンの拡散）を利用しなければならない。ただし、用途によっては、プラズマ拡散によって得られる均一性は不十分である。
【０００６】
さらに、そのような渦巻き状のコイル・アンテナは方位角不均一プラズマをつくる傾向がある。これは、平面的なアンテナ・コイルを構成するために使用される結合線路の比較的長い長さが、コイルが一般に動作する高周波数においてかなりの電気的長さを有することに起因する。電圧波および電流波は入力端部から端子端部まで順方向に進行し、端子端部において再び反射されることになる。順方向波および反射波の重ね合わせの結果、コイルに定在波が生じる（すなわち、電圧および電流がコイルの長さに沿って周期的に変化する）。コイルを端子端部において接地した場合、端子端部における電流は最大値になり、端子端部における電圧は０になる。入力に向かってコイルに沿って進むと、電圧は増大し、電流は減少し、ついには電気的長さが９０度のところで、電圧は最大値になり、電流は最小値になる。そのようなある程度の変化があると、極めて不均一なプラズマが生じる。したがって、平面的なコイルは一般にキャパシタンスで終端され、それによりコイル中の電流はコイルの両端部において同じになり、コイルの中央部の近くで最大値まで増大する。そうするとプラズマ均一性を改善することができるが、電流がコイルの長さに沿って方位角方向に変化するので、方位角不均一性はまだ存在する。例えば、図２Ａの点Ｐは電流最大値である。点Ｐのいずれかの側で、電流は低下する。したがって、プラズマに結合する電力はＰの下でより大きくなり、対応するプラズマはより密になる。反対に、点Ｐ’におけるプラズマ密度は比較的低くなる。
【０００７】
終端コンデンサ値は変化させることができるが、そうするとコイルに沿った電圧の位置が変化するだけであることに留意されたい。さらに、コイル長さに沿って同じ極性の電圧を

得るためにコイルをインダクタンスで終端させることができるが、コイルの中心位置のどこかに電流ゼロが存在することになり（電流はゼロのいずれかの側で反対方向に流れる）、生じたプラズマ密度は容認できないほど低くかつ不均一になることがある。Ｐａｔｒｉｃｋ他の米国特許第５４０１３５０号は上述の欠点を克服しようと試みるものである。そこには、プラズマ均一性を改善するための複数平面的なコイル構成が記載されている。個々のコイルへのＲＦ電力は独立して制御され、電力および位相の独立した調整に対処する別個の電力源および別個の整合回路網が必要となる。

【０００８】

プラズマ結合システム内で誘導結合均一性を制御するための改善された方法および装置が必要であることは明らかである。

＜発明の概要＞

本発明は、アンテナ・システム内の誘導結合均一性を改善するためのシステムを提供することによって、従来技術の上記で特定した欠点を克服するものである。アンテナ・コイルの配置および電流分布を制御することによって、プラズマ均一性を改善することができる。

【０００９】

例示的な実施形態によれば、２つまたはそれ以上の渦巻き状のコイルがプラズマ・チャンバの誘電体ウィンドウ上に配置される。各コイルは平面的なコイルか、または平面的なコイルと垂直方向に積み重なったらせん状のコイルの両方の組合せのいずれかである。各コイルの入力端部は入力側可変コンデンサに取り付けられ、出力端部は出力側可変コンデンサを介して接地に終端される。出力側コンデンサは、電流が極値（すなわち、最大値または最小値）であるかどうか、または電圧が極値であるかどうかを決定し、入力側コンデンサは、各コイルの全インピーダンスを変化させることができ、これらの複数のコイルの電流の大きさの比を変化させることができる。各コイルにおける電流の大きさおよび最大電流の場所を調整することによって、プラズマ密度、すなわち、プラズマ均一性を制御することができる。

【００１０】

以下、本発明の上述した内容、その他の特徴、および、利点について、添付図面に示す例示的な実施形態を参照して詳細に説明する。説明する実施形態は一例であり、また、理解を助けるものであり、多数の同等の実施形態が実現されることはいうまでもない。

＜発明の詳細な説明＞

図１に、本発明のアンテナ・システムを組み込むことができるプラズマ発生デバイス１００を示す。プラズマ発生デバイス１００は、誘電体ウィンドウ１２０、ガス分配プレート１３０、ウェハ１４０、真空チャンバ１５０、静電チャック１６０、下側電極１７０およびアンテナ・システム１０５を含んでいる。アンテナ・システム１０５は、ＲＦ整合回路網（図示せず）とＲＦ発生器（図示せず）に接続された一組のコイル１１０を含んでいる。

【００１１】

本発明の例示的な実施形態によれば、このアンテナ・システムは、Ｔｒａｎｓｆｏｒｍｅｒ－Ｃｏｕｐｌｅｄ　Ｐｌａｓｍａ（ＴＣＰ™、ラム　リサーチ　コーポレーションの登録商標）アンテナ・システムである。図３に、本発明の第１の実施形態によるＴＣＰ™アンテナ・システム３００を示す。この実施形態では、ＴＣＰ™アンテナ・システム３００は２つの単巻コイルを含んでいる。コイル１は中心部の近くに置かれることが好ましく、コイル２は反応器の上部開口の外縁部に向かってより遠くに置かれることが好ましい。高周波（ＲＦ）電流が２つの調整コンデンサC_1およびC_2を介してコイル１および２の一方の端部に同時に供給される。当技術分野においてよく知られているように、ＲＦ入力はＲＦ発生源３１０によって発生され、ＲＦ整合回路網３２０を介してコンデンサC_1およびC_2に供給される。調整コンデンサC_1およびC_2は、それぞれ調整すべきコイル１および２の電流I_1およびI_2の大きさに対処する。コイル１およびコイル２の反対側の端部は結合され、インピーダンスZ_Tを介して接地に終端される。

【００１２】
平面的な単巻コイルによって誘導的に発生した電界は方位角電界（半径方向成分$E_r = 0$および方位角成分$E_\theta \neq 0$）であるが、中心部では０である（$E_r = 0$および$E_\theta \neq 0$）。誘電体ウィンドウ表面の近くでは、プラズマ中の誘導電界および誘導電流（$J = \sigma E$）はほぼ駆動コイルの鏡像である。平面的なコイル・アンテナは、駆動コイルの半径の２分の１に近い半径をもつドーナツ形プラズマを生成する。２つのコイルを離して置くことによって、これは、２つのコイルの平均半径の２分の１にほぼ等しい半径を有するより漸進的なプラズマ・ドーナツを効果的に発生する。内側コイルからプラズマへの電力結合は内側領域内に局所化され、外側コイルからの電力結合は外側領域内に局所化される。その結果、プラズマ拡散（すなわち、電子およびイオンの拡散）は中心部および他の場所におけるプラズマ密度をより均一にする傾向がある。
【００１３】
上記のように、２つの単巻コイルに関連する回路（すなわち、コンデンサC_1およびC_2およびインピーダンスZ_T）は、コイル１とコイル２における電流の大きさ、すなわちそれぞれI_1とI_2の比を調整することができる。電流の大きさを調整することによって、反応器の中心部と縁部の間のプラズマ均一性を調整することができる。当業者なら理解できるように、C_1およびC_2は固定コンデンサでも可変コンデンサでもよい。
【００１４】
入力側調整コンデンサC_1およびC_2は各コイルの入力誘導リアクタンスを部分的に消去する。C_1およびC_2の値を適切に選択すれば、各脚の入力リアクタンスは同じになり、その結果、共通の発生源から供給されたときのコイル１およびコイル２への入力電流が等しくなる。これらの開始値からC_1をより高く、C_2をより低く調整すると、コイル１の電流は減少し、コイル２の電流は増大する。方向を逆にすると、反対方向における電流は不平衡になる。調整プロセス中、一方の脚は増大したリアクタンスを有し、他方の脚は減少したリアクタンスを有するので、複合回路の入力インピーダンスは名目上同じままである。
【００１５】
コイル１とコイル２の反対側の端部はインピーダンスZ_Tで終端することができる。Z_Tは、従来のＴＣＰ™システムの場合と同様に共通のコンデンサである。Z_Tは、接地に終端された別個のコンデンサとすることもできる。各コイルが異なる電気的長さを有する場合、各コイルの入力インピーダンスも異なる。電流最大値が名目上各コイル長さの中心部に現れるように、別個の終端コンデンサを選択することができる。
【００１６】
２つのコイルが対称的に平衡しているとき、各コイルに流れる電流は名目上同じになる。C_1およびC_2の値を変化させると、コイル１およびコイル２への不平衡な電流の流れが得られることが当業者なら理解できよう。入力リアクタンスX_1およびX_2が誘導性であると仮定すると、C_2は、例えば、$X_1 > X_2$という平衡状態から離れて増大すると、$I_1 > I_2$である。この場合、内側コイル（コイル１）中の電流は、反応器の中心部により強い誘導結合を生じる外側コイルよりも大きくなる。その結果、比較的高いプラズマ密度がコイル１の下の中心領域内に生じる。別の場合では、外側コイル（コイル２）中の電流を内側コイル中の電流よりも大きくなるように調整し、それにより反応器壁の近くのような、内側コイルを覆っている領域におけるよりも低いプラズマ密度を補償することができる。
【００１７】
上述の２つの単巻コイルの使用法を説明のために簡単に示す。上記の一般原則は複巻コイル、複巻システムに同等に適用可能であることが当業者なら理解できよう。さらに、本発明は（図３に示される）二次元コイルの構成に限定されるものではなく、代わりに三次元コイル構成として実現することもできる。例えば、コイルは、ドーム形誘電体ウィンドウに一致するように構成するか、あるいは円筒形誘電体ウィンドウの周りにらせん状に構成することができる。上記の一般原則は、複数の巻きの複数のコイルを有するドーム形、らせん状、または他の三次元の構成を同様に適用可能であることが当業者なら理解できよう。

【００１８】
図４に、本発明の第２の実施形態によるＴＣＰ™アンテナ・システム４００を示す。図４には、２つの調整コンデンサC_1～C_4が取付けられた２つの複巻コイル（コイル１およびコイル２）が示されている。図から明らかなように、コイル１は中心部に配置されおり、コイル２は反応器の上部開口の外縁部に向かってより遠くに配置されていることが好ましい。ＲＦ入力は、調整コンデンサC_1およびC_2を介してコイル１および２の第１の端部に同時に供給される。コイル１および２の反対側の端部はそれぞれ調整コンデンサC_3およびC_4を介して終端される。図３を参照して上述した二重のコイル単巻システムの場合と同様に、２つのコイルはより漸進的なドーナツ形プラズマを効果的に発生する。電流I_1およびI_2は同じ方向に流れるので、コイルからプラズマへの電力結合は領域全体に広がり、単一の平坦化されたドーナツ形プラズマを生成する。電流が不平衡である場合、ドーナツ形電界は中心部または外側においてより強くなる。

【００１９】
コイルに沿ってより対称的な電流分布を得るために、各コイルごとに２つのコンデンサが設けられる。例えば、電流最大値（ならびに純抵抗性インピーダンス点）がコイル１の中心部に現れるように、C_1をC_3と一緒に調整することができる。コイルの中心部からC_1に向かって移動すると、リアクタンスは誘導性になり、コイルの中心部からC_3に向かって移動すると、リアクタンスは容量性になり、それにより電流は中心部において最大になり、名目上正弦波の形で中心部から離れて減少する。

【００２０】
さらに、C_3とC_4の調整により上述の方位角不均一プラズマを補償することができる。例えば、図４のコイル１の点P_1において最大電流が得られるように、C_3を調整することができる。その結果、プラズマへの電力結合はP_1の下でより大きくなり、対応するプラズマ密度はより高くなる。これは方位角不均一性を生じる傾向がある。ただし、C_4を調整すれば、P_1に対向する半径方向軸に沿ったコイル２中の場所P_2において最大電流を得ることができる。したがって、P_2におけるコイル２のより大きい電力結合がコイル１による影響を相殺し、その結果、より方位角的に均一なプラズマが生じる。C_3とC_4の調整の別法として、コイル１およびコイル２中の電流最大値がそれぞれP_1およびP_2のところに現れるように、コイル１の方位角位置をコイル２の方位角位置に対して物理的に回転させることができる。

【００２１】
本発明の例示的な実施形態によれば、調整コンデンサC_1およびC_2は、１回の制御により反対方向に回転するように構成することができる。このようにすると、入力において単一の従来の整合回路網を妨害することなしに、単一の発生器からの１回の制御により電流の不平衡を、ひいてプラズマ不均一性を最適化することができる。同様に、C_3とC_4を反対方向に調整しても、C_1とC_2を調整するのと同じ効果が得られる。

【００２２】
コイル中の巻数が変化するにつれて、コイルとプラズマの間の相互結合は、変圧器の一次コイル（すなわち駆動コイル）と二次コイル（すなわちプラズマ）の間の相互結合と同様の形で変化する（Albert J.Lammの、"Observations of Standing Waves on an Inductive Plasma Coil Modeled as a Uniform Transmission Line",J. Vac. Sci. Tech A, １５巻 Ｎｏ．５ １９９７年９月／１０月 ２６１５頁を参照されたい。）。巻数の増大／減少はプラズマの密度に影響を及ぼす。例えば、巻数が増大すると相互結合係数が減少し、それによりプラズマ密度が低くなる。一方、コイル長さが短縮された場合、コイル長さにわたって統合された全体的なプラズマの発生が減少する。したがって、各コイルの巻数および全長を最適化して、これら２つのファクタをつりあわせることが可能であることが当業者なら理解できよう。

【００２３】
入力側調整コンデンサC_1およびC_2の値を変化させる影響を説明するために、以下の３つの状況、すなわち、C_1の値がC_2の値よりも大きい最初の状況、C_1とC_2の値が等しくな

るように調整される第２の状況、およびC_1の値がC_2の値よりも小さい最後の状況について考えてみる。

【００２４】

ＴＣＰ^{TM}コイル・アンテナの複素伝搬定数（ｋ＝α＋ｊβ）は、コイル・アンテナの入力および出力における電圧および電流波形測定値から推測することができる（Lammを参照されたい。）。説明のために、α、βおよび実効特性インピーダンスZ_0は３つの状況を通して同じであると仮定する。表Ｉに各コイルのα、β、Z_0、電気的長さ、およびC_1～C_4の値を示す。

【００２５】

【表１】

表Ｉ　損失の大きい伝送線路としての二重のコイル・アンテナ回路－ケース (a)

	$\alpha=6.89\times10^{-4}$／度	$\beta=1.145$度／インチ	Zo＝110Ω	
	入力コンデンサ (pF)	長さ（度）	出力コンデンサ (pF)	Z_{in} (Ω)
コイル１	C_1=615.2	45	C_3=257.6	4.0+j26.4
コイル２	C_2=415.2	45	C_4=257.6	4.0+j17.2

【００２６】

表Ｉにおいて、Z_{in}は各コイルの入力インピーダンスを表す。２つのコイルの全入力インピーダンスは２．１＋ｊ１０．５Ωであり、これは各コイルのZ_{in}の約２分の１である。表ＩＩに、１０００Ｗの入力ＲＦ電力および表Ｉに記載されているパラメータが与えられたときのｉ番目のコイルのI_i、I_i’、V_iおよびV_i’の大きさおよび位相角を掲載する。表ＩＩにおいて、I_iは、ｉ（ｉ＝１、２）番目のコイルの（図４のＲＦ入力により近い）入力端部における電流を表し、I_i’は、ｉ番目のコイルの（図４のC_3およびC_4により近い）出力端部における電流を表し、V_iおよびV_i’はそれぞれｉ番目のコイルの入力端部および出力端部における電圧を表す。

【００２７】

【表２】

表ＩＩ　２つのコイルの入力および出力におけるRF電流および電圧

	入力電流		出力電流		入力電圧		出力電圧	
ｉ番目のコイル	(I_i)rms	角度	(I_i')rms	角度	(V_i)rms	角度	(V_i')rms	角度
コイル１	8.7 A	-3°	8.7 A	-3°	399 V	+82°	398 V	-93°
コイル２	13.2 A	+2°	13.2 A	+1°	603 V	+87°	601 V	-89°

【００２８】

表ＩＩから明らかなように、ＲＦ電流および電圧は２つのコイルの間で不平衡であるが、各コイル内では平衡である。内側コイルの全インピーダンスは外側コイルの全インピーダンスよりも大きいので、内側コイル（コイル１）の電流と電圧はどちらも外側コイル（コイル２）の電流と電圧よりも３４％小さい。各コイルはコイルの中心部の周りに対称的に平衡しており、したがって各コイルの入力電流および電圧の値は大きさが出力値にほとんど等しい。各コイルの中心部から離れると、インピーダンスは、コイルの入力端部に向かって誘導性に支配されるようになり、出力端部に向かって容量性に支配されるようになる

。これは、入力電圧と出力電圧の間の位相角の変化から明らかである。

【００２９】

（C_1＝C_2となるように）C_1とC_2の値を変化させることが電流I_1とI_2に及ぼす影響を以下の表ＩＩＩおよびＩＶに示す。

【００３０】

【表３】

表 III　損失の大きい伝送線路としての二重のコイル・アンテナ回路－ケース (b)

	α＝6.89×10^{-4}／度	β＝1.145 度／インチ	Zo=110Ω	
	入力コンデンサ (pF)	長さ（度）	出力コンデンサ (pF)	Z_{in} (Ω)
コイル 1	C_1=515.2	45	C_3=257.6	4.0+j22.7
コイル 2	C_2=515.2	45	C_4=257.6	4.0+j22.7

【００３１】

２つのコイルの全入力インピーダンスは２．０＋ｊ１１．４Ωであり、これは各コイルのZ_{in}の約２分の１である。表ＩＶに、１０００Ｗの入力ＲＦ電力および表ＩＩＩに記載されているパラメータが与えられたときのｉ番目のコイルのI_i、I_i’、V_iおよびV_i’の大きさおよび位相角を掲載する。

【００３２】

【表４】

表 IV　２つのコイルの入力および出力における RF 電流および電圧

	入力電流		出力電流		入力電圧		出力電圧	
i 番目のコイル	(I_i)rms	角度	(I_i')rms	角度	(V_i)rms	角度	(V_i')rms	角度
コイル 1	11.2 A	0°	11.2 A	-1°	511 V	+85°	510 V	-91°
コイル 2	11.2 A	0°	11.2 A	-1°	511 V	+85°	510 V	-91°

【００３３】

C_1＝C_2およびC_3＝C_4であり、コイル１はコイル２と同等であるので、ＲＦ電流および電圧は２つのコイル間ならびに各コイル内で平衡している。

【００３４】

最後の状況は、C_1の値がC_2の値よりも小さくなるようにC_1とC_2の値を変化させることの影響を示す。

【００３５】

【表５】

表Ｖ　損失の大きい伝送線路としての二重のコイル・アンテナ回路－ケース (c)

	$\alpha=6.89\times10^{-4}$／度	β＝1.145 度／インチ	Zo=110Ω	
	入力コンデンサ (pF)	長さ（度）	出力コンデンサ (pF)	Z_{in} (Ω)
コイル１	C_1=415.2	45	C_3=257.6	4.0+j17.2
コイル２	C_2=615.2	45	C_4=257.6	4.0+j26.4

【００３６】
２つのコイルの全入力インピーダンスは２．１＋ｊ１０．５Ωであり、これは各コイルのZ_{in}の約２分の１である。表ＶＩに、１０００Ｗの入力ＲＦ電力および表ＩＩＩに記載されているパラメータが与えられたときのｉ番目のコイルのI_i、I_i’、V_iおよびV_i’の大きさおよび位相角を掲載する。
【００３７】
【表６】

表 VI　２つのコイルの入力および出力における RF 電流および電圧

	入力電流		出力電流		入力電圧		出力電圧	
i 番目のコイル	(I_i)rms	角度	(I_i')rms	角度	(V_i)rms	角度	(V_i')rms	角度
コイル１	13.2 A	+2°	13.2 A	+1°	603 V	+87°	601 V	-89°
コイル２	8.7 A	-3°	8.7 A	-3°	399 V	+82°	398 V	-93°

【００３８】
この場合、内側コイル（コイル１）のＲＦ電流と電圧はどちらも外側コイル（コイル２）の電流と電圧よりも５１％大きい。
【００３９】
C_1とC_2を変化させるだけで、他方のコイルの電流および電圧に対してコイルの電流ならびに電圧を実質上調整することができることが、上記の状況から明らかである。
【００４０】
図５に本発明の第３の実施形態を示す。図５では、２つの複巻コイルおよび４つの調整コンデンサC_1～C_4の他に、らせん状のコイルが設けられている。この実施形態によれば、内側コイル（コイル１）は２つの部分からなる。部分Ｉは、図４に関して上述した平面的な複巻コイルを表す。部分ＩＩは、平面的な複巻コイルに対して垂直に置かれ、平面的なコイル（コイル１およびコイル２の部分Ｉ）の軸と同一の軸を有するらせん状のコイルを表す。
【００４１】
この実施形態では、内側コイルの電気的長さは、コイル１およびコイル２がそれらの電気的長さに関してより平衡するように延長されている。２つの電気的長さが互いに近接しているとき、各コイルへの電流をより大きい程度まで調整するとともに、より一定の複素入力インピーダンスを維持することができる。本発明によるらせん状のコイルは中心部におけるプラズマへの誘導結合を助ける。らせん状のコイルによって発生される電界も方位角電界であり、中心部において０であるが、この方位角電界の平均半径はらせん状のコイルの直径の程度である。したがって、中心部におけるプラズマをより密にして、よりよい全体的な均一性を得ることができる。
【００４２】

らせん状のコイルの中央部にあるシリンダは誘電体材料でできており、中実にすることにより単に巻線を機械的に支持するが、あるいはその軸に沿って中空にすることもできる。後者の場合、中空シリンダは上端部が真空密封され、また、シリンダの中空領域がチャンバに直接接続されるように底端部が開いている。そのような場合、プロセス・ガスは真空チャンバにだけでなく、中空シリンダにも導入される。シリンダはプラズマ反応器の誘電体ウィンドウの一部と考えることもできる。中空シリンダ中のプラズマ密度は、比較的強い誘導電界および中空陰極効果のためにチャンバ中よりも高くなることがある。中空シリンダ中で生成されるプラズマはチャンバの中心部に拡散する。さらに、一般に１０ｍ－トル未満の低圧状況において放電を容易に当てることができるように、比較的高い電圧が終端コンデンサC_3によって調整され得る。

【００４３】

図６に本発明の第４の実施形態を示す。この実施形態によれば、各コイル（コイル１およびコイル２）は２つの部分からなる。部分１は平面的な複巻コイルの形態であり、部分２はらせん状のコイルの形態であって平面的な複巻コイル（すなわち、部分１）に対して直角に置かれ、部分１の軸と同一の軸を有する。

【００４４】

入力高周波はコイル１およびコイル２の平面的な複巻コイルからアンテナ・システム６００に入り、また電流が両方のコイル中を同じ方向に流れるように、らせん状のコイルから出る。コイル１およびコイル２の同等の電気的長さを得るために、コイル２のらせん状のコイル（部分２）は平面的な複巻コイル（コイル２の部分１）の最も内側の巻線と同じ半径を有し、コイル１のらせん状のコイル（部分２）は平面的な複巻コイル（コイル１の部分１）の最も外側の巻線と同じ半径を有する。コイル１およびコイル２のらせん状のコイルの巻数は、コイル１およびコイル２の電気的全長がほぼ等しくなるように選択される。コイル１および２のリング間の小さな開口が整列していないことは図６から明らかである。開口が整列している構成とすることは可能であるが、そのような構成にすると、開口の場所におけるプラズマへの電力結合が小さくなることが当業者なら理解できよう。

【００４５】

入力調整コンデンサ（C_1およびC_2）および出力調整コンデンサ（C_3およびC_4）は図３～図５に関して上述したものと同様の形でコイル中の電流分布の調整を可能にする。本実施形態は一方のコイル中の電流を独立して調整できること点で有利である。図３～図５に示した上述の実施形態では、各コイルへの電流は主として、入力インピーダンスを変化させる入力調整コンデンサによって調整される。一方のコイルの入力インピーダンスが変化するにつれて、コイルが電気的に並列に接続されているので、全入力インピーダンスが変化する。これにより一方のコイル中の電流が変化するだけでなく、他方のコイル中の電流も変化することになる。言い換えれば、２つのコイルの電流調整は独立ではない。したがって、全入力インピーダンスのそのような変化を補償するために整合回路網を再同調させなければならない。これは、整合回路網の同調範囲が有限でありかつ制限されているので、すべての用途において実行可能であるとは限らない。

【００４６】

図６において、平面的な複巻コイル（部分１）中の場所か、またはらせん状のコイル（部分２）中の場所に対して出力コンデンサを調整することによって、各コイルの電流最大値の場所を調整することができる。電流最大値が平面的な複巻コイル中のどこかにあるときには、平面的なコイルがプラズマにより近いので、プラズマへの高周波の電力結合は比較的大きい。同様に、電流最大値がらせん状のコイル中のある場所にある場合、らせん状のコイルがプラズマからより離れており、平面的な複巻コイル中で電流が低下するので、プラズマへの電力結合は弱くなる。したがって、出力コンデンサのみの調整では、最大電流の場所とプラズマへの電力結合の大きさが同時に変化することになる。出力コンデンサが調整されるのと同時に、コイルの比較的不変の入力インピーダンスを維持するために、入力コンデンサは反対方向に調整されることになる。このようにして入力および出力コンデンサを調整することにより、電流の大きさは実質上変化しないが、コイル中の電流定在波

パターンがシフトし、これによりプラズマへの電力結合が効果的に変化することが当業者なら理解できよう。その結果、プラズマ均一性を制御可能に維持できるようになる。

【００４７】

図７に本発明の第５の実施形態による二重コイル結合システムを示す。図７の二重のコイル結合システムは平行なアンテナ・エレメントを使用する。２つのコイル（コイル１およびコイル２）は対称的であり、コイルの各ループは半円と平行とのアンテナ・エレメントからなる。ＲＦは各コイル（平行軸により近い）の平行エレメントの中央に同時に供給され、コイルの他の端部は結合され、コンデンサC_Tを介して接地に終端される。

【００４８】

渦巻き状の平面的なコイルとは対照的に、平面的なアンテナ結合方式は常に比較的大きい電界を中心部において生成し、したがってプラズマ均一性を本質的に改善する（J.J. Chen他、"Prallel-Antenna Transformer-Coupled Plasma Generation System" 米国特許出願第０９／０５２１４４号、出願日１９９８年３月３１日を参照されたい）。従来のＴＣＰ™コイルと同様に、各コイルによって生成されたプラズマはドーナツ形であり、コイル１ではo_1の周り、コイル２ではo_2の周りを中心とすることができる。単一のＴＣＰ™と比較して、各プラズマ・ドーナツの半径はかなり短く、それにより従来のＴＣＰ™システムと比較して、プラズマがドーナツの中心部に拡散しやすくなる。この結合システムの利点は、各コイルの電気的長さがほぼ２分の１になるので、各コイルに沿ったＲＦ電流および電圧の変化がより小さくなることである。

【００４９】

以上、本発明の原理、好ましい実施形態および動作モードについて説明した。ただし、本発明は上述した特定の実施形態に限定されるものではない。すなわち、上述した実施形態は限定的なものではなく例示的なものであり、当業者であれば、請求の範囲に記載された本発明の範囲から逸脱することなく、それらの実施形態に変更を加えることができることはいうまでもない。

【図面の簡単な説明】

【図１】　処理チャンバ中に高周波エネルギーを結合するために使用される誘電体ウィンドウの上部にアンテナ・システムが置かれているプラズマ反応器を示す図である。

【図２Ａ】　従来の渦巻き状の平面的なコイル・アンテナを示す図である。

【図２Ｂ】　別の従来の渦巻き状の平面的なコイル・アンテナを示す図である。

【図３】　本発明の第１の実施形態による二重の平面的な単巻コイルの構成例を示す図である。

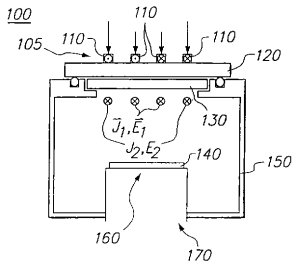
【図４】　本発明の第２の実施形態による二重の平面的な複巻コイルの構成例を示す図である。

【図５】　本発明の第３の実施形態による、内側にらせん状のコイルをもつ二重の平面的な複巻コイルの構成例を示す図である。

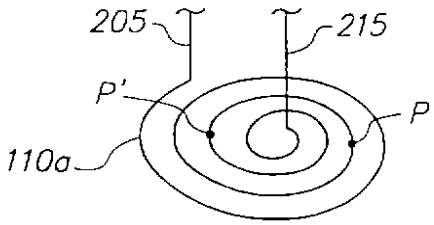
【図６】　本発明の第４の実施形態による、内側及び外側の両方にらせん状のコイルを有する二重の平面的な複巻コイルの例示的な構成を示す図である。

【図７】　本発明の第５の実施形態による、平行アンテナ・エレメントをもつ二重の平面的な複巻コイルの構成例を示す図である。

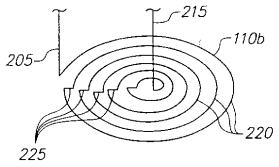
【図１】



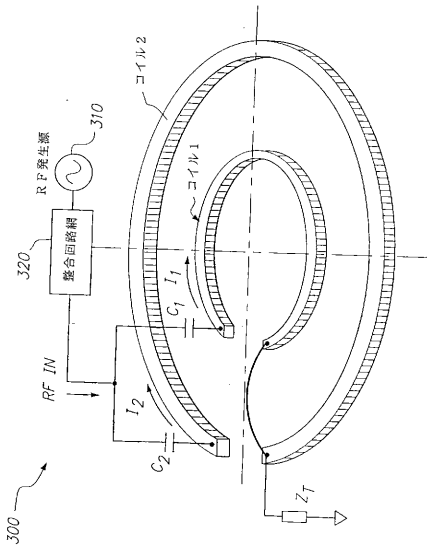
【図２Ａ】



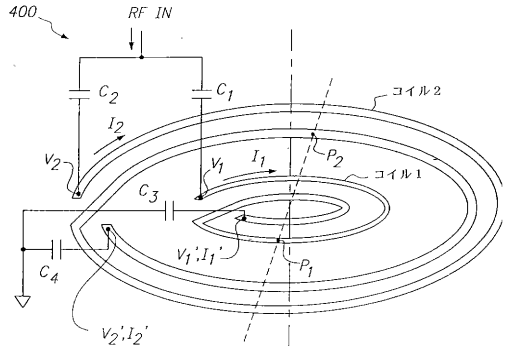
【図２Ｂ】



【図３】



【図４】



【図５】

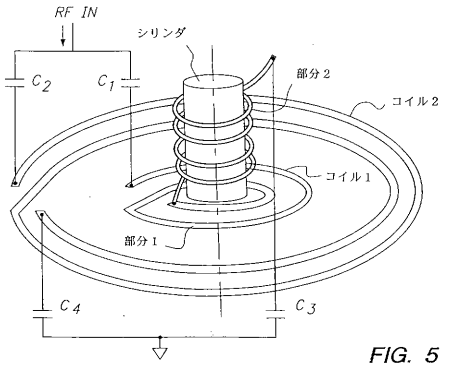
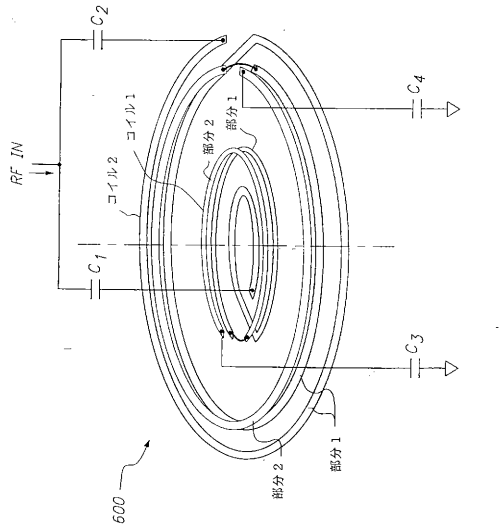
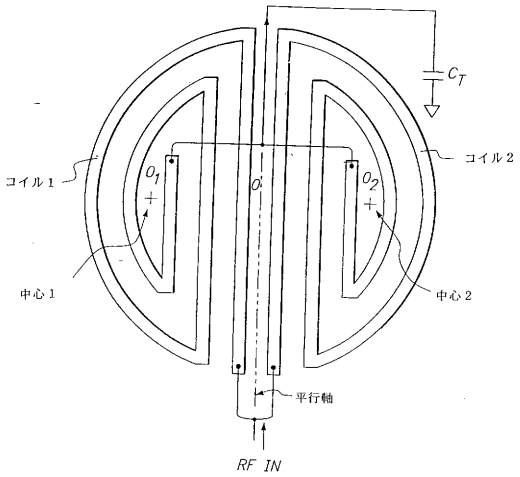


FIG. 5

【図６】


C2
C4
RF IN
コイル1
コイル2
部分2
部分1
C1
C3
600
部分2
部分1

【図７】


CT
コイル1
コイル2
O1
O
O2
中心1
中心2
平行軸
RF IN

フロントページの続き

(74)代理人 100130409
弁理士 下山 治
(74)代理人 100134175
弁理士 永川 行光
(72)発明者 チェン, ジアン, ジェイ.
アメリカ合衆国 カリフォルニア州９４５３６, フレモント, ヘイスティングス ストリート ３８６８０, アパートメント エー１０３
(72)発明者 ヴィルトロップ, ロバート, ジー.
アメリカ合衆国 アイダホ州 ８３７０３, ボイズ, エヌ. パリセイズ ウェイ １０２２４
(72)発明者 ウィッカー, トーマス, イー.
アメリカ合衆国 ネバダ州 ８９５１１, レノ, フェアヴュー ロード ４４３０

合議体
審判長 鈴木 正紀
審判官 加藤 友也
審判官 井上 茂夫

(56)参考文献 特開平６－２６７９０３（ＪＰ，Ａ）
特開平１０－１２５６６３（ＪＰ，Ａ）
特開平１０－１２５４９７（ＪＰ，Ａ）
特開平８－７８１９１（ＪＰ，Ａ）
特開平８－５０９９８（ＪＰ，Ａ）
特開平１０－１８９２９６（ＪＰ，Ａ）
特開平７－２９６９９２（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl., ＤＢ名)
H01J37/32
H01L21/205
H01L21/302
H05H1/46