

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4813908号
(P4813908)

(45) 発行日 平成23年11月9日(2011.11.9)

(24) 登録日 平成23年9月2日(2011.9.2)

(51) Int.Cl.	F 1
H01L 21/3065 (2006.01)	H01L 21/302 101B
C23C 16/455 (2006.01)	C23C 16/455
C23C 16/509 (2006.01)	C23C 16/509
H05H 1/46 (2006.01)	H05H 1/46 M

請求項の数 13 外国語出願 (全 49 頁)

(21) 出願番号	特願2006-19544 (P2006-19544)
(22) 出願日	平成18年1月27日 (2006.1.27)
(65) 公開番号	特開2006-210929 (P2006-210929A)
(43) 公開日	平成18年8月10日 (2006.8.10)
審査請求日	平成18年12月7日 (2006.12.7)
(31) 優先権主張番号	11/046538
(32) 優先日	平成17年1月28日 (2005.1.28)
(33) 優先権主張国	米国(US)

(73) 特許権者	390040660 アプライド マテリアルズ インコーポレイテッド APPLIED MATERIALS, INCORPORATED アメリカ合衆国 カリフォルニア州 95054 サンタクララ バウアーズ アベニュー 3050
(74) 代理人	100101502 弁理士 安齋 嘉章
(72) 発明者	ダグラス エー. ブッシュバーガー ジュニア. アメリカ合衆国, カリフォルニア州, リヴァーモア, ヴィンテージ レーン 2076

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】低アーク放電性、円筒形ガスアウトレット及び成形表面を有するプラズマリアクタ・オーバーヘッド・ソースパワー電極

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

プラズマリアクタの真空チャンバ内の支持ペデスタル上の被加工物を処理する前記プラズマリアクタにおける、前記リアクタのシーリングの少なくとも一部を形成する、径方向に伸びるガス分布電極であって、前記リアクタのRFプラズマソースパワー・アリケータであり、かつ前記リアクタの処理ゾーンに面する底部面を有するガス分布電極において、前記電極の頂部において、供給圧力でプロセスガスを受け入れるガス供給マニホールドと、

各オリフィスの一端部において、前記ガス供給マニホールドから前記電極に対して軸方向に伸びる複数の圧力低下円筒形オリフィスと、

前記電極の全域で径方向に伸びる、前記電極内の径方向ガス分布マニホールドと、

前記複数の圧力低下オリフィスのそれぞれの対向端部を前記径方向ガス分布マニホールドに結合する複数の軸方向に伸びる高コンダクタンスのガスフロー流路と、

前記径方向ガス分布マニホールドに接続されるように軸方向に伸びる前記電極の前記底部面に形成された複数の高コンダクタンスの円筒形のガスアウトレット穴とを備え、

前記複数の圧力低下円筒形オリフィスの径は前記ガスアウトレット穴の径より小さく、

前記高コンダクタンスのガスフロー流路の径は、前記複数の圧力低下円筒形オリフィスの径の20～30倍の範囲であり、

前記ガスアウトレット穴上の前記圧力低下オリフィスの軸方向の高さは、前記圧力低下オリフィスの直径の200～280倍の範囲である電極。

10

20

【請求項 2】

前記複数の圧力低下円筒形オリフィスの径は前記ガスアウトレット穴の径の 1 / 5 である、請求項 1 に記載の電極。

【請求項 3】

前記電極の前記底部面が、

(a) 湾曲面と、

(b) 階段状の面とのうちの一方を備える非平坦面である、請求項 1 に記載の電極。

【請求項 4】

前記非平坦底部面が、中央が高い面である、請求項 3 に記載の電極。

【請求項 5】

前記非平坦底部面が、前記電極の直径の 20 % ~ 100 % の中央・縁部間の高さの差を有する、請求項 4 に記載の電極。

【請求項 6】

前記底部面を被覆する保護層を更に備え、前記保護層が、プロセスに影響を及ぼさない材料物質で形成されており、前記ガスアウトレット穴が前記保護層を貫通して続いている、請求項 4 に記載の電極。

【請求項 7】

前記保護層が、半導体含有材料物質を備える、請求項 6 に記載の電極。

【請求項 8】

前記径方向ガス分布マニホールドは、前記電極の少なくとも半分の領域上で径方向に伸びている請求項 1 に記載の電極。

【請求項 9】

前記圧力低下オリフィスの直径が、10 ミルである、請求項 8 に記載の電極。

【請求項 10】

前記高コンダクタンスのガスフロー流路が、70 mm の軸方向長さを有する、請求項 1 に記載の電極。

【請求項 11】

前記圧力低下オリフィスが十分に小さいガスコンダクタンスを有し、前記ガスアウトレット穴が、前記圧力低下オリフィスの各々を介した圧力低下が、前記供給圧力と前記真空チャンバとの間の圧力差の少なくとも 80 % であるように、十分に高いガスコンダクタンスを有する、請求項 1 に記載の電極。

【請求項 12】

前記圧力低下オリフィスが、前記圧力低下オリフィス内の径方向電界が、前記ガスアウトレット穴内の最大径方向電界の 10 % よりも小さいように、前記底部面から軸方向に十分ずれています、請求項 11 に記載の電極。

【請求項 13】

前記底部面が、平坦な環状周辺部を有する、中央が高い湾曲面を備える、請求項 1 に記載の電極。

【発明の詳細な説明】

【発明者】

【0001】

Douglas A. Buchberger, Jr., Daniel J. Hoffmann, Olga Regelmann, James Carducci, Keiji Horioaka 及び Jang Gyoo Yang による

【関連出願の相互参照】

【0002】

[01] この出願は、現在、米国特許第 6,528,751 号として発行されている、2000 年 3 月 17 日に出願された、Daniel Hoffmann による「PLASMA REACTOR WITH OVERHEAD RF ELECTRODE TUNE D TO THE PLASMA」というタイトルの米国特許出願第 09/527,340

10

20

30

40

50

2号の一部継続出願である、2001年12月19日に出願された、Daniel Hoffmannによる「PLASMA REACTOR WITH OVERHEAD RF ELECTRODE TUNED TO THE PLASMA」というタイトルの米国特許出願第10/028,922号の一部継続出願である、2004年1月8日に出願された、Daniel J. Hoffmannによる「PLASMA REACTOR WITH OVERHEAD RF SOURCE POWER ELECTRODE WITH LOW LOSS, LOW ARCING TENDENCY AND LOW CONTAMINATION」というタイトルの米国特許出願第10/754,280号の一部継続出願であり、これら全ては、本譲受人に譲渡されている。

【背景技術】

10

【0003】

[02]多数の小さなガス・インレット・オリフィスを有するオーバーヘッド・ガス・シャワー・ヘッドは、プラズマ・ソースパワーを容量結合する電極として用いた場合に、プラズマ・アーク放電を引き起こすことがある。プラズマは、該電極のガス・アウトレット・オリフィスの多くの中に入り、各オリフィス内でアーク放電する傾向がある。該アーク放電は、該電極からの金属原子を溶融又はスパッタして、プラズマ中に汚染物質を生じ、それにより、該プラズマプロセス（例えば、半導体被加工物に対して実行されるプラズマ反応性イオンエッティングプロセス）を失敗させる。また、そのようなアーク放電は、異なるオリフィスを広げて、それにより、該電極表面におけるガスフロー分布をゆがめることにより、該電極にダメージを与える。最終的に、該電極が金属であり、かつ半導体保護層で被覆されている場合には、そのようなアーク放電は、更に、該半導体保護層と該金属製電極との間にある接合剤に破壊作用を及ぼすことにより、該電極にダメージを与え、又は、汚染物質を生成する。プラズマの該ガス・アウトレット・オリフィス内への移動を防ぐために、非常に狭いガス・アウトレット・オリフィス径を用いたが、このことは、実際には、該アーク放電問題を悪化させた。これは、該オリフィスの狭小化によって生じたより大きな圧力が、アーク放電を増進したためである。また、そのような狭いオリフィスは、洗浄するのが困難であるため、該プラズマからの残渣物（例えば、ポリマー）が、該ガス・アウトレット・オリフィス内に蓄積した。

20

【0004】

30

[03]オーバーヘッド・ソースパワー電極／ガス・シャワー・ヘッド内でのアーク放電を回避するという発明者等の努力は、該オーバーヘッド電極内の該ガス・アウトレット・オリフィスを狭い環として構成するというコンセプトに至り、これは、上記参照文献として引用した親出願に開示されている。該ガス圧力は、径方向に伸びる極端に狭い内部圧力低下オリフィスにより、該ガス・アウトレット・オリフィス上で良好に低下した。各環状ガス・アウトレット・オリフィスの（該電極の平面内における）弓形又は周囲長は、該オリフィス内のガスフローコンダクタンスを強め、これにより、該電極の表面に存在する高電界内のガス圧力が最小化された。この特徴は、該オリフィス内のガスがアーク放電する傾向を低減した。各環状オリフィスの狭い幅は、該狭い圧力低下オリフィスが配置されている、該ガス・アウトレット・オリフィスの底部の近傍で、該電極の上方領域から離れた高電界を制限するように、軸方向の高さの関数として、該オリフィス内で該電界が低下するレートを増加させた。この特徴は、該電極の該上方領域近傍の電界を最小化し、該領域においては、該ガス圧力は、非常に高い圧力から非常に低い圧力へ低下し、それに伴って、アーク放電を良好に抑制するため、同じ位置における高いガス圧力と高い電界の同時発生が回避される。

40

【0005】

[04]このような環状のガス・アウトレット・オリフィスは、製造するのに複雑なマッチングを要し、また、湾曲した形態に容易に適合しない。そのため、そのようなガス分布電極は、余分な製造コストを回避するために、平坦な形状に本質的に制限される。このことは、特に、半導体保護層が、該電極の底部表面を被覆しており、該金属電極内及び該半導体保護層内での相互に位置合わせされた環状ガス・アウトレット・オリフィスの形成を要

50

する場合に当てはまる。

【0006】

[05]発明者等は、図1～図30に開示したタイプのリアクタ内において、プラズマイオン密度分布を、ウェハ周辺部では一般的な低プラズマ密度及び低エッティングレートで、中心部をわずかに高くすることを見出したことを見出した。ある場合には、ウェハ縁部におけるプラズマイオン密度は、該ウェハの中心における該プラズマイオン密度の55%以下になる可能性がある。該エッティングレートは、該ウェハ中心と比較して、該ウェハ縁部において同様に低くなる。プラズマの均一性を改善すると共に、上述した低アーク放電性の利点を維持することが可能なオーバーヘッド・ガス分布ソースパワー電極が必要である。中心部の高いプラズマイオン密度分布を補正する1つの方法は、該電極面を、ドーム形状、又はマルチ放射状のドーム形状等のアーチ形状に構成することである。しかしながら、アーク放電する傾向が低い電極（すなわち、上述した環状形状のガス・アウトレット・オリフィス）を製造に要するマッチング・ステップの複雑性は、アーチ形状、少なくとも、かなりの曲率を有する形状を実現することができない。例えば、300mm程度の径の電極においては、中心から縁部まで数ミリ以上の偏差を有する曲率を設けるのは、コスト効率的に良くはないであろう。このような小さな曲率は、プラズマイオン密度の非均一性における55%の偏差を補正する又は著しく改善するのに不適当であり得る。問題は、アーク放電が、該ガス・アウトレット・オリフィス内で発生する傾向を増加させることなく、該電極にかなりの曲率をどのように設けるかである。

【発明の概要】

【0007】

[06]プラズマリアクタの天井の少なくとも一部を形成するオーバーヘッド・ガス分布電極は、該リアクタの処理ゾーンに面する底部面を有する。該電極は、該電極の頂部において、供給圧力でプロセスガスを受け入れるガス供給マニホールドと、各オリフィスの一端部で、該電極に対して、該ガス供給マニホールドから軸方向に伸びる複数の圧力低下円筒形オリフィスとを含む。該電極内の放射状のガス分布マニホールドは、該電極の全域で放射状に伸びている。複数の軸方向に伸びる高コンダクタンスのガス流路は、該複数の圧力低下オリフィスのそれぞれの対向端部を該放射状のガス分布マニホールドに結合する。複数の高コンダクタンスの円筒形ガス・アウトレット穴は、該電極のプラズマに面する底部面内に形成されており、該放射状のガス分布マニホールドに対して軸方向に伸びている。

【0008】

[07]上記底部面は、平面、あるいは、湾曲面又は階段状面のいずれかである非平面とすることができ、また、中心を高くすることができる。該非平面状の底部面は、中心部と縁部とで、該電極の径の約20%～100%の高さの違いを有することができる。

【0009】

[08]保護層は、上記底部面を被覆することができ、また、プロセスに影響を及ぼさない材料物質で形成することができ、上記ガス・アウトレット穴は、該保護層を貫通して続いている。該保護層は、例えば、シリコン又は炭化ケイ素等の半導体含有材料物質とすることができる。

【発明の詳細な説明】

【0010】

[47]図1について説明すると、プラズマリアクタは、半導体ウェハ110を支持する、リアクタチャンバの底部にウェハ支持体105を有するリアクタチャンバ100を含む。半導体リング115は、ウェハ110を囲んでいる。半導体リング115は、絶縁（石英）リング120によって、接地されたチャンバボディ127上に支持されている。一実施形態において、これは、10mmの厚さ及び誘電率4からなる。チャンバ100は、絶縁（石英）シールにより、接地されたチャンバボディ127上のウェハ110の上に、所定のギャップ長で支持されたディスク状オーバーヘッド・アルミニウム電極によって、該頂部で境界が形成されている。また、オーバーヘッド電極125は、その内面を半金属材料物質（例えば、Si又はSiC）で被覆することができる金属（例えば、アルミニウム）

10

20

30

40

50

であってもよいし、半金属材料物質そのものであってもよい。高周波電源 150 は、高周波電力を電極 125 に印加する。高周波電源 150 からの高周波電力は、高周波電源にマッチングした同軸ケーブル 162 を介して、電極 125 に接続された同軸突出部 135 に結合される。突出部 135 は、特性インピーダンス、共振周波数を有し、また、以下により完全に説明するように、電極 125 と、50 オームの同軸ケーブル 162 又は高周波電源 150 の 50 オーム出力とのインピーダンスマッチングを提供できる。上記チャンバボディは、高周波電源 150 の RF リターン (RF 接地) に接続されている。オーバーヘッド電極 125 から RF 接地までの RF 経路は、半導体リング 115、絶縁リング 120 及び絶縁シール 130 の影響を受ける。ウェハ支持体 105、ウェハ 110 及び半導体リング 115 は、電極 125 に印加された高周波電力のための一次 RF リターン経路を設ける。

10

【0011】

[48] RF リターン又は接地に関して測定した電極 125、絶縁リング 120 及び絶縁シール 130 を含むオーバーヘッド電極アセンブリ 126 のキャパシタンスは、180 ピコファラッドになる。該電極アセンブリのキャパシタンスは、順に、該電極の面積、該ギャップ長 (ウェハ支持体とオーバーヘッド電極との間の距離)、及び、漂遊キャパシタンスに影響を及ぼす要因、特に、シール 130 及び絶縁リング 120 の誘電率値の影響を受け、これらの値も、使用する材料の誘電率及び厚さの影響を受ける。より一般的には、該電極アセンブリのキャパシタンス (符号なし又はスカラー) は、以下に論じるように、特に、ソースパワー周波数、プラズマ密度及び作動圧力において、大きさが、該プラズマの負のキャパシタンス (複素数) と等しいか、又は、ほぼ等しい。

20

【0012】

[49] 上記の関係に影響を与える多くの要因は、該要因、該ウェハのサイズ、及び、該ウェハ上で、該処理が均一に実行される必要条件によって実行される必要がある該プラズマプロセスの必要条件の実態により、大部分が予め決まっている。したがって、該プラズマキャパシタンスは、プラズマ密度及びソースパワー周波数の関数であり、一方、該電極のキャパシタンスは、ウェハ支持体と電極との間のギャップ (高さ)、電極の径、及び、上記アセンブリの絶縁体の誘電率値の関数である。プラズマ密度、作動圧力、ギャップ及び電極の径は、該リアクタによって実行されるべきプラズマプロセスの必要条件を満たさなければならない。特に、イオン密度は、一定の範囲内でなければならない。例えば、シリコン又は誘電プラズマエッチングプロセスは、一般に、 $10^9 \text{ B } 10^{12}$ イオン / cm² の範囲内のプラズマイオン密度を要する。例えば、該ウェハ・電極間のギャップが約 1.25 ~ 約 2.0 インチである場合には、該ギャップは、8 インチウェハの場合、最適なプラズマイオン分布均一性を提供できる。300 mm 径のウェハの場合、最適なギャップサイズは、約 1.25 インチである。該電極の径は、該ウェハの径よりも大きくない限り、少なくともできる限り大きくすることができる。作動圧力は、同様に、典型的なエッチング及び他のプラズマプロセスに対して、実用的な範囲を有する。

30

【0013】

[50] しかしながら、上記の関係を達成するために選択することができる他の要因、特に、ソース周波数の選択及びオーバーヘッド電極アセンブリ 126 のためのキャパシタンスの選択が残っていることが見出されている。ソースパワー周波数が、VHF 周波数になるように選択される場合、及び電極アセンブリ 126 の絶縁構成要素の誘電率が正しく選択される場合、該電極に課せられた上記の寸法上の制約及び該プラズマに課せられた制約 (例えば、密度の範囲) の範囲内で、該電極のキャパシタンスを、該プラズマの負のキャパシタンスの大きさにマッチングさせることができる。このような選択は、ソースパワー周波数とプラズマ電極の共振周波数との間のマッチング又はほぼマッチングを達成することができる。

40

【0014】

[51] したがって、一態様において、8 インチウェハの場合、上記オーバーヘッド電極の径は、おおよそ 11 インチであり、上記ギャップは、約 2 インチであり、上記プラズマ密

50

度及び作動圧力は、上述したようなエッティングプロセスに対して典型的なものであり、シール130のための絶縁材料物質は、誘電率が9であり、厚さが1インチ程度であり、リング115は、10インチよりもわずかに大きい内径と、約13インチの外径とを有し、リング120は、誘電率4と、10mm程度の厚さとを有し、VHFソースパワー周波数は、（他のVHF周波数は、等しく有効にすることができるが）210MHzであり、ソースパワー周波数、プラズマ電極共振周波数及び上記突出部の共振周波数は、全て、マッチング又はほぼマッチングすることができる。300mm径のウェハの場合、最適なソースパワー周波数は、プラズマ電極共振周波数及び該突出部の共振周波数をマッチングした、あるいは、162MHzからわずかにオフセットした状態で、162MHzである。

【0015】

10

[52]より具体的には、これら3つの周波数は、互いにわずかにオフセットすることができ、ソースパワー周波数が（300mmウェハに対して最適化した）162MHzの場合、該システムのQを有利に低減するデチューニング効果を達成するため、電極プラズマ共振周波数は、162MHzよりわずかに下であり、該突出部の共振周波数は、162MHzよりわずかに上である。このようなシステムのQの低減は、上記リニアタのパフォーマンスを、上記チャンバ内の状態の変化の影響を受けにくくするため、プロセス全体は、かなりより安定的になり、かなり広いプロセスウィンドウに関して実行することができる。

【0016】

[53]同軸突出部135は、システム全体の安定性、その広いプロセスウィンドウ性能及び他の多くの有用な利点に対して更に貢献する特別に構成されたデザインである。該突出部は、内側円筒形コンダクタ140と、外側同心円筒形コンダクタ145とを含む。例えば、相対誘電率1を有する（図1にクロスハッチングで示す）絶縁体147は、内側コンダクタ140と外側コンダクタ145との間の空間を満たしている。内側コンダクタ140及び外側コンダクタ145は、ニッケル被覆アルミニウムで形成されている。外側コンダクタ145は、約4インチの径を有することができ、内側コンダクタ140は、約1.5インチの径を有することができる。上記突出部の特性インピーダンスは、内側コンダクタ140及び外側コンダクタ145の半径と、絶縁体147の誘電率とで決まる。一実施形態の突出部135は、30オームの特性インピーダンスを有する（この場合、VHFソースパワー周波数は、300mmウェハ径の場合、162MHzである）。より一般的には、該突出部の特性インピーダンスは、該ソースパワー出力インピーダンスを、約20%～40%だけ、及び、約30%だけ上回る。突出部135は、162MHzのVHFソースパワー周波数（以上の）からわずかなオフセットを有するため、162MHzよりわずかに高い（例えば、170MHz近く）4分の1波長に対応する軸方向長さを有する。

【0017】

20

[54]タップ160は、以下に論じるように、高周波電源150からの高周波電力を突出部135に印加するために、突出部135の軸方向長さに沿った特定のポイントに設けられている。高周波電源150の高周波電力端子150b及びRFリターン端子150aは、突出部135のタップ160において、それぞれ、内側同軸突出部コンダクタ140及び外側同軸突出部コンダクタ145に接続されている。これらの接続は、周知のやり方で、高周波電源150の出力インピーダンス（典型的には、50オーム）にマッチングする特性インピーダンスを有する高周波電源・突出部間同軸ケーブル162を介して作られる。コンダクタ165を、突出部135の遠端部135aに終端させることは、内側コンダクタ140と外側コンダクタ145とを短絡させるため、突出部135は、その終端部135aで短絡されている。突出部135の近端部（短絡されていない端部）135bにおいて、外側コンダクタ145は、環状導電性ハウジング又は支持体175を介して上記チャンバボディに接続されており、一方、内側コンダクタ140は、導電性シリンドラ又は支持体176を介して電極125の中心部に接続されている。絶縁リング180は、導電性シリンドラ176と電極125との間に保持されており、該シリンドラと該電極とを分離する。

【0018】

30

40

50

[55]内側コンダクタ 140 は、プロセスガスや冷却剤等の有用物のための導管を設けることができる。この特徴の第一の利点は、典型的なプラズマリアクタとは違って、ガスライン 170 及び冷却剤ライン 173 が、大きな電位差をクロスしないということである。そのため、これらのラインは、そのような目的のための金属、高価ではないより信頼性のある材料物質で構成することができる。金属製ガスライン 170 は、オーバーヘッド電極 125 内の、又は該電極に隣接するガスインレット 172 にガスを供給し、一方、金属製冷却剤ライン 173 は、オーバーヘッド電極 125 内の冷却剤流路又はジャケット 174 に冷却剤を供給する。

【0019】

[56]それにより、能動インピーダンスと共振インピーダンスの変換は、高周波電源 150 とオーバーヘッド電極アセンブリ 126との間の、この特別に構成された突出部のマッチングによって提供でき、また、プラズマ負荷を処理すること、反射電力を最小化すること及び非常に幅広いインピーダンスマッチングスペースを提供することは、負荷インピーダンスの広い変化に適応する。その結果として、これまで得ることのできなかった電力使用効率と共に、広いプロセスウインドウ及びプロセスの柔軟性を提供できると共に、典型的なインピーダンスマッチング装置の必要性が最小化又は回避される。上述したように、上記突出部の共振周波数も、システム全体の Q、システムの安定性、及びプロセスウインドウ及びマルチプロセス機能を更に高めるために、実際のマッチングからオフセットしている。

【0020】

電極・プラズマ共振周波数と VHF ソースパワー周波数のマッチング

[57]上の概略のように、第一の特徴は、上記電極・プラズマ間の共振周波数におけるプラズマとの共振のために、及び、上記ソースパワー周波数と該電極・プラズマ周波数とのマッチング（又は、ほぼマッチング）のために、オーバーヘッド電極アセンブリ 126 を構成することである。電極アセンブリ 126 は、主に容量性リアクタンスを有し、一方、プラズマリアクタンスは、周波数、プラズマ密度及び他のパラメータの複素関数である。（以下に、更に詳細に説明するように、プラズマは、虚数項を含む複素関数であり、かつ一般に、負のキャパシタンスに対応するリアクタンスに関して解析される。）電極・プラズマ共振周波数は、（キャパシタのリアクタンスと、インダクタのリアクタンスとで決まるキャパシタ／インダクタ共振回路の共振周波数と同様に）電極アセンブリ 126 のリアクタンスと、プラズマのリアクタンスとで決まる。したがって、電極・プラズマ共振周波数は、プラズマ密度次第では、必ずしもソースパワー周波数でなくてもよい。そのため、問題は、プラズマ密度及び電極の寸法の特定の範囲に対する実用的な制限の制約を考慮して、プラズマリアクタンスが、電極・プラズマ共振周波数がソースパワー周波数に等しく又は、ほぼ等しくなるようになるソースパワー周波数を見出すことである。該問題は、（プラズマリアクタンスに影響を及ぼす）プラズマ密度と、（電極キャパシタンスに影響を及ぼす）電極の寸法とが、一定のプロセス制約を満たさなければならないため、更に困難である。具体的には、絶縁及び金属プラズマエッティングプロセスの場合、プラズマ密度は、 $10^9 \sim 10^{12}$ イオン / cm^3 の範囲内になければならず、これは、プラズマリアクタンスに対する制約である。また、例えば、 300mm 径のウェハを処理するためのより均一なプラズマイオン密度分布は、約 1.25 インチのウェハ・電極間のギャップ又は高さと、電極キャパシタンスに対する制約である、該ウェハの径程度又はそれ以上の電極径とによって実現される。他方、異なるギャップ長を、更に大きなウェハを処理するのに用いてもよい。

【0021】

[58]したがって、上記実施形態の 1 つの特徴においては、電極キャパシタンスを、プラズマの負のキャパシタンスの大きさにマッチング（又は、ほぼマッチング）することにより、電極・プラズマ共振周波数とソースパワー周波数とは、少なくともほぼマッチングされる。上記列挙した一般的な金属及び絶縁エッティングプロセス条件（すなわち、 $10^9 \sim 10^{12}$ イオン / cm^3 間のプラズマ密度、2 インチギャップ及びおよそ 11 インチ程度の

10

20

30

40

50

電極径)の場合、該ソースパワー周波数がVHF周波数であれば、該マッチングは可能である。他の条件(例えば、異なるウェハ径、異なるプラズマ密度等)は、上記リクトに10
関するこの特徴を実行する際に、このようなマッチングを実現するために、異なる周波数範囲を規定してもよい。以下に、詳細に説明するように、絶縁及び金属プラズマエッティング及化学気相堆積を含むいくつかの主な用途において、8インチのウェハを処理する好都合なプラズマ処理条件の下で、上記したプラズマ密度を有する典型的な一実施例におけるプラズマキャパシタンスは、-50~B400ピコファラッドであった。210MHzのソースパワー周波数を用いる実用的な実施形態においては、オーバーヘッド電極アセンブリ126のキャパシタンスは、11インチの電極径、およそ2インチのギャップ長(電極・ペデスタル間の間隔、誘電率9及び1インチ程度の厚さを有するシール130のための絶縁材料物質の選択、及び、誘電率4及び10mm程度の厚さを有するリング120のための絶縁材料物質の選択を用いることにより、この負のプラズマキャパシタンスの大きさにマッチングした。300mmウェハの場合、ソースパワー周波数は、約162MHzとすることができる。

【0022】

[59]たった今説明したように、電極アセンブリ126とプラズマキャパシタンスとがマッチングしていると仮定すれば、該アセンブリとプラズマの組合せは、電極125に印加したソースパワー周波数に少なくともほぼマッチングする電極・プラズマ共振周波数で共振する。発明者等は、好都合なエッティングプラズマ処理レシピ、環境及びプラズマの場合、この電極・プラズマ共振周波数及び該ソースパワー周波数は、VHF周波数でマッチング又はほぼマッチングすることができること、及び、そのような周波数マッチング又はほぼマッチングを実施することができることを発見した。上記の実施形態において、プラズマの負のキャパシタンスの上記の値に対応する該電極・プラズマ共振周波数は、162MHzよりもわずかに下にすることができる。該ソースパワー周波数は、162MHzであり、以下に論じる他の利点を実現するため、該ソースパワー周波数が、該電極・プラズマ共振周波数よりもわずかに上にオフセットしているほぼマッチングである。該ソースパワー周波数が210MHzである場合には、該プラズマ共振周波数は、200MHzとすることができる、また、上記突出部の共振周波数は、220MHzとすることができる。

【0023】

[60]上記プラズマキャパシタンスは、とりわけ、プラズマ電子密度の関数である。これは、ほぼ 10^9 ~ 10^{12} イオン/cm³の範囲内に保つべき良好なプラズマ処理条件を提供するために必要なプラズマイオン密度に関連する。この密度は、ソースパワー周波数及び他のパラメータと共に、該プラズマの負のキャパシタンスを決めるため、該キャパシタンスの選択は、以下に更に詳細に説明するように、プラズマ処理条件を最適化する必要性により束縛される。しかしながら、上記オーバーヘッド電極アセンブリのキャパシタンスは、多くの物理的要因、例えば、ギャップ長(電極125と上記ウェハとの間の間隔)、電極125の面積、電極125と接地されたチャンバボディ127との間の絶縁シール130の誘電率の選択、半導体リング115と該チャンバボディとの間の絶縁リング120の誘電率の選択、及び、シール130及びリング120からなる絶縁構造体の厚さ及びリング180の厚さ及び誘電率によって影響を及ぼされる。このことは、上記オーバーヘッド電極のキャパシタンスに影響を及ぼすこれら及び他の物理的要因の間でなされた選択を介して、該電極アセンブリのキャパシタンスのいくつかの調整を可能にする。発明者等は、この調整の範囲が、該オーバーヘッド電極アセンブリのキャパシタンスと、該負のプラズマキャパシタンスの大きさとの必要な程度のマッチングを達成するのに十分であることを見出した。具体的には、シール130及びリング120のための絶縁材料物質及び寸法は、所望の誘電率及びその結果として生じる誘電率値を提供できるように選択される。その結果、該電極のキャパシタンスと該プラズマキャパシタンスとのマッチングは、電極のキャパシタンスに影響を与える同じ物理的要因のうちのいくつか、特に、ギャップ長が、次の実用性、すなわち、より大径のウェハを取り扱う必要性、該ウェハの全径に対してブ50

ラズマイオン密度の分布の良好な均一性でそれを行う必要性、及び、イオン密度対イオンエネルギーの良好な制御を有する必要性により、規定又は制限されるという事実にもかかわらず、達成することができる。

【0024】

[61]したがって、上記したプラズマエッティングプロセスに好都合なプラズマイオン密度の範囲の場合、及び8インチウェハを処理するのに適したチャンバ寸法の場合、11インチの電極径、およそ2インチのギャップ長、及び誘電率9を有するシール130のための材料物質及び誘電率4を有するリング120のための材料を用いることにより、-50～B400ピコファラッドのプラズマキャパシタンスにマッチングした電極アセンブリ126のキャパシタンスが達成された。

10

【0025】

[62]上記プラズマキャパシタンス及びマッチングオーバーヘッド電極のキャパシタンスに対する上記の範囲を考慮すると、上記電極・プラズマ共振周波数は、210MHzのソースパワー周波数に対して、およそ200MHzであった。上記の値は、162MHzのソースパワー周波数を用いて、300mmウェハのためのパフォーマンスを最適化するように調整することができる。

【0026】

[63]このようにして電極アセンブリ126のキャパシタンスを選択すること、及び、上記結果として生じる電極・プラズマ共振周波数とソースパワー周波数とをマッチングすることの大きな利点は、該ソースパワー周波数近傍での該電極とプラズマとの共振が、より幅広いインピーダンスマッチング及びより幅広いプロセスウィンドウ、及び、その結果として、プロセス条件の変化に対するかなり大きな耐性、及びその結果のより大きなパフォーマンスの安定性を提供することである。上記処理システム全体は、作動条件の変動、例えば、プラズマのインピーダンスのシフトに対してあまり敏感でなくなり、またそのため、広範囲のプロセス適応性と共に、より大きな信頼性が得られる。本明細書で後述するように、該電極・プラズマ共振周波数とソースパワー周波数との間の小さなオフセットにより、利点は更に強められる。

20

【0027】

何故、プラズマは、負のキャパシタンスを有するか

[64]プラズマキャパシタンスは、プラズマの電気的誘電率 ϵ_0 によって支配され、これは複素数であり、次式に従った自由空間の電気的誘電率 ϵ_0 、プラズマ電子周波数 ω_{pe} 、ソースパワー周波数 ω 及び電子中性子衝突頻度 $\Omega_{e,n}$ の関数である。

$$= \epsilon_0 [1 - \omega_{pe}^2 / (\omega (\omega + i \Omega_{e,n}))] \quad \text{ただし、} i = (-1)^{1/2}$$

(プラズマ電子周波数 ω_{pe} は、該プラズマ電子密度の単純な関数であり、プラズマ処理に関する周知の出版物で定義されている。)

30

[65]一実施例において、中性種はアルゴンであり、該プラズマ電子周波数は、約162MHzよりもわずかに下であり、RFソースパワー周波数は、該プラズマ密度が $10^9 \sim 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ になるように、十分な高周波電力を印加して、チャンバ圧力が、5mT～1000mTの範囲内にあるように、約162MHzであった。プラズマエッティングプロセスに有利な条件の典型であるこれらの条件の下で、該プラズマは、上記の式により定義されるその有効な電気的誘電率が負であるため、一般に、負のキャパシタンスを有する。これらの条件の下で、該プラズマは、-50～B400ピコファラッドの負のキャパシタンスを有した。そこで、上記のことをより一般的な用語で判断すると、プラズマ電子密度(及びソースパワー周波数及び電子中性子衝突頻度)の関数としてのプラズマキャパシタンスは、一般に、ある所望の範囲に対して、絶縁エッティング、金属エッティング及びCVD等の鍵となる用途に対する好都合なプラズマプロセスの現実性によって制限される傾向があり、また、VHFソースパワー周波数において、負の値を有する傾向があることを本発明者等は見つけた。プラズマのこれらの特性を利用することにより、該電極のキャパシタンスマッチング及び上記リーカタの周波数マッチング特徴が、これまででは可能ではなかった、プロセスウィンドウの性能及び柔軟性、及び動作の安定性を達成する。

40

50

【0028】

突出部135によって提供されるインピーダンス変換

[66]突出部135は、高周波電源150の50オームの出力インピーダンスと、電極アセンブリ126と、上記チャンバ内のプラズマとの組合せにより与えられる負荷インピーダンスとのインピーダンス変換を提供できる。このようなインピーダンスマッチングの場合、該高周波電源と該突出部との接続部において、及び、該突出部と電極との接続部において、高周波電力の反射は、少なくなければならず、あるいは、あってはならない（少なくとも、高周波電源150のVSWRの限界値を超える反射はない）。このことがどのようになされるかを次に説明する。

【0029】

[67]高周波電源150の所望のVHF周波数において、及び、プラズマエッティングプロセスにとって好都合なプラズマ密度及びチャンバ圧力（すなわち、それぞれ、 10^9 B10¹² イオン / cm³ 及び 5 mT B 1000 mT）において、該プラズマ自体のインピーダンスは、約 (0.3 + (i)7) オームであり、この場合、0.3は、該プラズマのインピーダンス i = (-1)^{1/2} の実数部分であり、また、7は、該プラズマのインピーダンスの虚数部分である。上記電極・プラズマの組合せにより与えられる負荷インピーダンスは、このプラズマのインピーダンス及び電極アセンブリ126のキャパシタンスの関数である。上述したように、電極アセンブリ126のキャパシタンスは、300 mm ウェハに対して、約 162 MHz で、又は、約 162 MHz よりわずかに低い、電極・プラズマ共振周波数を用いて、電極アセンブリ126と該プラズマとの共振を達成するように選択される。該突出部と該電極との境界における高周波電力の反射は、該突出部及び該電極が一緒に少なくともほぼ共振するように、突出部135の共振周波数が、該電極・プラズマ共振周波数に、あるいは、該共振周波数近傍に設定されているため、最小化され、又は、回避される。

【0030】

[68]同時に、上記高周波電源と突出部との境界における高周波電力の反射は、突出部135の軸方向長さに沿った、タップ160の位置が、タップ160において、突出部135における定常波電圧と定常波電流との比が、高周波電源150の出力インピーダンス又はケーブル162の特性インピーダンス（共に、約50オーム）に近くなるようになっているため、最小化され、又は、回避される。タップ160をどのように配置して、このことを達成するかを、次に論じる。

【0031】

突出部のタップ160の軸方向の配置

[69]突出部135の軸方向の長さは、上述したように、上記電極・プラズマ共振周波数の近傍である、「突出部」周波数（例えば、162 MHz のわずかに上）の4分の1波長の倍数とすることができます。一実施形態において、この倍数は、上記同軸突出部の長さが、該「突出部」周波数の約半波長となるように、2である。

【0032】

[70]タップ160は、突出部135の長さに沿った特定の軸方向位置にある。この位置において、高周波電源150の出力周波数におけるRF信号の定常波電圧と定常波電流との振幅の比は、高周波電源150の出力インピーダンスにマッチングする入力インピーダンス（例えば、50オーム）に対応する。このことは、図2A及び図2Bに図示されており、突出部135における電圧及び電流定常波は、それぞれ、短絡した外部突出部端部135aにおいて、ゼロ及びピークを有する。タップ160の所望の位置は、該短絡した端部から内側の距離Aにあり、そこでは、該定常波電圧と定常波電流との比は、50オームに対応する。この位置は、当業者が、該定常波の比が50オームであるところを経験的に判断することにより、容易に見出す。上記高周波電源の出力インピーダンス（50オーム）に対するマッチングを提供できる、タップ160の距離又は位置Aは、この明細書において後述するように、突出部135の特性インピーダンスの関数である。タップ160が、距離Aに正確に配置されると、該高周波電源が、3:1の電圧定常波比（VSWR）を

10

20

30

40

50

超える一定の供給電力を維持することができる典型的な種類である場合、該インピーダンスマッチングスペースは、負荷インピーダンスの実数部の9:1の変化に適応する。

【0033】

[71]該インピーダンスマッチングスペースは、該負荷インピーダンスの実数部のほぼ60:1の変化に適応するように、大幅に拡大することができる。この目覚しい結果は、タップ160を、位置Aの正確に50オームの箇所から、同軸突出部135の短絡した外部端部135aの方へわずかにシフトすることにより達成される。このすれば、例えば、波長の5%（すなわち、30オームの特性インピーダンスに対して、162MHzにおいて約7.5インチ）とすることができます。図3及び図4を参照して、以下に説明するように、このわずかにシフトしたタップ位置において、タップ160における高周波電流の貢献が、上記突出部における電流に対して減じられ又は加算され、そのことがプラズマ負荷インピーダンスの変動を補正するのに更に適切になることが、発明者等の発見である。この補正は、負荷インピーダンスの実数部における9:1のスイングに適応するものから60:1のスイングへマッチングスペースを増加させるのに十分である。

【0034】

[72]この作用は、上記タップの箇所が位置Aから離れた場合、電極・プラズマ負荷インピーダンスとのインピーダンスのミスマッチにより敏感になるという、突出部135における定常波電流の位相の傾向によるものであると思われる。上述したように、電極アセンブリ126は、公称作動条件の下で、プラズマの負のキャパシタンスにマッチングされている。このキャパシタンスは、VHFソースパワー周波数において、B50~B400ピコファラッドである。このキャパシタンスにおいて、該プラズマは、(.3+i7)オームのプラズマインピーダンスを示す。したがって、.3オームは、該システムが、それに対して調整されているプラズマインピーダンスの実数部である。プラズマの状態が変動すると、該プラズマキャパシタンス及びインピーダンスは、それらの公称値から離れて変動する。該プラズマキャパシタンスが、電極125がマッチングされている値から変動すると、該電極・プラズマ間の共振の位相が変化し、突出部135における電流の位相に影響を及ぼす。該突出部の定常波電流の位相がこのようにシフトした場合、タップ160に供給される高周波電源電流は、該位相シフトの方向により、該突出部の定常波電流に加えられるか、又は、該定常波電流から減じられことになる。タップ160の、50オームの位置Aからのすれば、波長の何十分の一（例えば、5%）に限定される。

【0035】

[73]図3は、プラズマインピーダンスの実数部が、プラズマの変動により増加した場合の、突出部135における定常波電流を図示する。図3において、該電流定常波の振幅は、突出部135に沿った軸方向位置の関数としてプロットされている。水平軸上の位置0.1における定常波電流の不連続性は、タップ160の位置に対応する。図3のグラフにおいては、プラズマインピーダンスの実数部が高く、すなわち、該システムがそれに対して調整されている公称プラズマインピーダンス（すなわち、該電極キャパシタンスは、その値で、負のプラズマキャパシタンスにマッチングする）より高いため、インピーダンスのミスマッチが生じる。この場合、タップ160における電流は、突出部135における定常波電流から減じられる。この減算は、図3のグラフにおいて、不連続性又はゼロを引き起こし、供給された電力を低減して、増加した負荷をオフセットする。これは、高い負荷（R）により、供給された電力（I²R）の対応する増加を回避する。

【0036】

[74]図4は、プラズマインピーダンスの実数部が減少した場合の突出部135における定常波電流を図示する。図4において、該電流定常波の振幅は、突出部135に沿った軸方向位置の関数としてプロットされている。位置0.1における該定常波電流の振幅における不連続性は、タップ160の位置をマークする。図4のグラフにおいて、プラズマインピーダンスの実数部は低く、すなわち、該システムがそれに対して調整されている公称プラズマインピーダンスより低い。この場合、タップ160における電流は、突出部135における定常波電流に加えられる。この加算は、該減少した負荷Rにより、供給される

10

20

30

40

50

電力 $I^2 R$ の同時に生ずる減少を避けるために、供給される電力を増加させて、該減少した負荷をオフセットする。このような補正の場合、マッチングスペースを著しく増加させるように、負荷インピーダンスの大幅な変化に適応することができる。

【0037】

[75]該負荷インピーダンスの実数部における 60 : 1 のスイングに適応する該マッチングスペースのこの拡大は、上記リアクタのプロセスウィンドウ及び信頼性を高める。これは、作動条件が、特定のプロセス又はアプリケーションの間にシフトした場合、あるいは、該リアクタが、異なるアプリケーションのための異なる作動レシピによって作動される場合、該プラズマインピーダンスが変化するため、特に、該インピーダンスの実数部が変化するためである。従来技術においては、そのような変化は、該システムに用いられる従来のマッチング回路の範囲を容易に超える可能性があったため、実用性のあるプロセスをサポートするために、もはや供給される電力を十分に制御することができず、該プロセスが失敗する可能性があった。本リアクタにおいては、供給される電力が、それを超えて所望のレベルで維持することができる負荷インピーダンスの実数部の範囲は、以前はプロセスの失敗につながっているであろうプラズマインピーダンスの変化が、該リアクタのこの態様を用いるリアクタに対して、ほとんど影響がなく、又は、影響が全くないように、増加している。したがって、該リアクタは、特定のプロセス又はアプリケーションの間の作動条件の変化に強く抵抗することができる。別法として、該リアクタを、幅広いプロセス条件、著しい利点を含む、異なる多くのアプリケーションで使用することが可能である。

【0038】

[76]更なる利点として、この広がったインピーダンスマッチングを提供できる同軸突出部 135 は、従来のインピーダンスマッチング装置には特有のものであった、可変キャパシタ / サーボ又は可変周波数 / サーボ等の「可動部」を伴わない単純な受動デバイスである。したがって、該突出部は、差し替えるインピーダンスマッチング装置よりも安価で、はるかに信頼性がある。

【0039】

動作のデチューニング及びプロセスウィンドウを広げるための共振周波数

[77]別の態様によれば、該システムの Q は、上記突出部の共振周波数、上記電極プラズマ共振周波数及びプラズマソースパワー周波数を互いにわずかにオフセットすることにより、該プロセスウィンドウを広げるよう低減される。上述したように、該突出部の共振周波数は、突出部 135 の軸方向長さが半波長である周波数であり、また、電極・プラズマ共振周波数は、電極アセンブリ 126 及びプラズマが共に共振する周波数である。一実施形態において、突出部 135 は、300 mm ウェハの場合、その共振周波数が、162 MHz よりもわずかに上となる長さにカットされ、ソースパワー高周波電源 150 は、162 MHz で作動するように選択され、結果として生じる電極プラズマ共振周波数は、約 162 MHz よりもわずかに低かった。

【0040】

[78]プラズマの共振、突出部の共振及びソースパワー周波数に対して、3つ全てに同じ周波数ではなく、3つのこのような異なる周波数を選択することにより、上記システムは、多少「デチューニング」されている。そのため、該システムは、より低い「Q」を有する。より高い VHF ソースパワー周波数を用いると、(エッティングに都合のよい作動条件の下で、上記電極及びプラズマキャパシタンスとのマッチングを容易にするのに加えて) Q も比例して減少させる。

【0041】

[79]システムの Q を減少させると、上記システムのインピーダンスマッチングスペースが広がり、そのため、そのパフォーマンスは、プラズマの状態の変化又は製作公差からの逸脱に対してさほど影響を受けない。例えば、該電極・プラズマ間の共振は、プラズマの状態の変動により変動する可能性がある。より小さな Q の場合、(この明細書において既に説明したように)インピーダンスマッチングに必要な突出部 135 と該電極・プラズマの組合せとの間の共振の変化は、該プラズマ電極間の共振の所定の変化に対して、より少

10

20

30

40

50

ない。その結果として、プラズマ状態の変動は、該インピーダンスマッチングにあまり影響されない。具体的には、プラズマ作用条件の所定の逸脱は、高周波電源 150 の出力において、VSWR のより小さな増加をもたらす。したがって、上記リアクタは、幅広い領域のプラズマプロセス条件（圧力、ソースパワーレベル、ソースパワー周波数、プラズマ密度等）で作動することができる。また、製作公差は、コストを節約するために緩和してもよく、また、著しい利点として、同じモデルデザインのリアクタ間で、より均一な性能が達成される。関連する利点は、同じリアクタは、金属エッティング、絶縁エッティング及び／又は化学気相堆積等の異なるプロセスレシピ及び異なるアプリケーションを実施するのに有用となる十分に広いプロセスウィンドウを有してもよいということである。

【0042】

10

プロセスウィンドウを広げる為に突出部の特性インピーダンスを最小化すること

[80]調整スペースを広げる、あるいは、該システムの Q を減少させる別の選択は、突出部 135 の特性インピーダンスを減少させることである。しかしながら、該突出部の特性インピーダンスは、適当なマッチングスペースを在続させるために、上記高周波電源の出力インピーダンスを超えることができる。そのため、該システムの Q は、突出部 135 の特性インピーダンスが、その量だけ信号発生器 150 の出力インピーダンスを超える量を低減する限度まで低減することができる。

【0043】

20

[81]同軸突出部 135 の特性インピーダンスは、内側及び外側コンダクタ 140、145 の半径、及び、該コンダクタ間の絶縁体 147 の誘電率の関数である。該突出部の特性インピーダンスは、プラズマ電源 150 の出力インピーダンスと、電極 135 における入力インピーダンスとの間で必要なインピーダンス変換を提供できるように選択される。この特性インピーダンスは、最小特性インピーダンスと最大特性インピーダンスとの間にあり。突出部 135 の特性インピーダンスを変化させると、図 2 の波形が変化するため、タップ 160 の所望の位置（すなわち、突出部 135 の遠端部からの距離 A）が変化する。突出部 135 の許容最小特性インピーダンスは、上記定常波電流と定常波電圧との間で 50 オーム比を見るために、タップ 160 を、電極 125 の向かい側の、同軸突出部 135 の遠端部 135a に配置しなければならなくなるように、図 2 の距離 A がゼロになる値である。突出部 135 の許容最小特性インピーダンスは、上記定常波電流と定常波電圧との間で 50 オーム比を見るために、タップ 160 を、電極 125 に近接して、同軸突出部 135 の近端部 135b に近づくことになるように、図 2 の距離 A が、突出部 135 の長さに等しくなる値である。

【0044】

30

[82]最初の実施形態において、上記同軸突出部の特性インピーダンスは、適切なマッチングスペースを提供できるように、高周波電源 150 の出力インピーダンスよりも（約 30 %）大きくなるように選択されていた。該突出部のインピーダンスは、インピーダンスマッチング条件が、

$$Z_{gen} = a^2 [Z_{stub}^2 / r_{plasma}]$$

を満たすように、タップ箇所 160 の位置を選択することにより達成されるため、該高周波電源の出力インピーダンスを超えるなければならない。

ただし、a は、該タップ箇所の位置によって決まり、0 と 1 の間で変化する。（数 a は、遠端部 135b とタップ 160 との間の、突出部 135 の何十分の一のインダクタンスと、突出部 135 全体のインダクタンスとの比に対応する。）a は、1 を超えることができないので、該突出部の特性インピーダンスは、上記の等式の解を見出すために、上記高周波電源の出力インピーダンスを超えるなければならない。しかしながら、上記システムの Q は、該突出部の特性インピーダンスに直接的に比例するので、該突出部の特性インピーダンスが、該高周波電源の出力インピーダンスを超える量は、該 Q をできる限り低く保つように、いくらか最小化することができる。例示的な実施形態において、該突出部の特性インピーダンスは、約 15 オームだけ該高周波電源の出力インピーダンスを超える。

【0045】

40

50

[83] しかしながら、他の実施形態においては、上記同軸突出部の特性インピーダンスは、インピーダンスマッチングのある程度の低減を伴って、より大きな電力効率を達成するために、上記プラズマ電源（高周波電源）の出力インピーダンスよりも小さくなるように選択してもよい。

【0046】

突出部のインピーダンス変換によって提供できる増加した電力効率

[84] 先に論じたように、この明細書において、プラズマエッティングプロセスに好都合なプラズマ作用条件（例えば、プラズマ密度）は、非常に小さな実数（抵抗性）部（例えば、.3オームより小さい）と、小さい虚数（無効）部（例えば、7オーム）とを有するプラズマインピーダンスをもたらす。容量性損失は、上記電極のキャパシタンスが、上記リアクタの該部分における電力潮流に対して支配的なインピーダンスであるため、該システムの電極・プラズマ領域の組合せにおいて、支配的である。そのため、該電極・プラズマの組合せにおける電力損失は、該電極・プラズマの組合せに対する電圧に比例する。対照的に、誘導損失及び抵抗性損失は、突出部135のインダクタンス及びレジスタンスが、突出部135における電力潮流に対するインピーダンスの支配的な要素であるため、突出部135において支配的である。そのため、突出部135における電力損失は、該突出部の電流に比例する。該突出部の特性インピーダンスは、該電極・プラズマの組合せによって呈せられるインピーダンスの実数部よりもかなり大きい。そのため、高いインピーダンスの突出部135においては、電圧は、電流がより高く、かつ電圧がより低い、より低いインピーダンスのプラズマの場合よりも、高くなり、また、電流はより低くなる。したがって、突出部135と該プラズマ・電極の組合せとの間のインピーダンス変換は、突出部135において、より高い電圧及びより低い電流（この場合、抵抗性損失及び誘導損失が支配的であり、また、それらの損失は、ここでは最小化される）と、該プラズマ/電極における相応して低い電圧及び高い電流（この場合、容量性損失が支配的であり、また、該損失は、ここでは最小化される）とをもたらす。このようにして、上記システムにおける全体の電力損失は、電力効率が大幅に改善され、著しい利点となるように最小化される。上記の実施形態において、電力効率は、約95%以上である。

【0047】

[85] したがって、上述したように構成された突出部135は、上記高周波電源及び上記電極・プラズマ間のインピーダンスマッチング又はインピーダンス変換を、非常に幅広い範囲又は作用条件のウインドウにわたって提供できるように機能するだけでなく、更に、電力効率の著しい改善を提供できる。

【0048】

クロス接地

[86] 上記ウェハ表面におけるイオンエネルギーは、プラズマ密度/オーバーヘッド電極の出力に關係なく制御することができる。イオンエネルギーのこのような独立した制御は、高周波バイアス電源を該ウェハに印加することにより提供される。この周波数（典型的には、13.56MHz）は、プラズマ密度を管理する該オーバーヘッド電極に印加されるVHF電力よりも著しく低い。バイアス電力は、従来のインピーダンスマッチング回路210を介してウェハ支持体105に結合されたバイアス電力高周波信号発生器200によって、該ウェハに印加される。該バイアス発生器200の電力レベルは、該ウェハ表面近傍のイオンエネルギーを制御し、また、一般に、プラズマソースパワージェネレータ150の電力レベルの関数である。

【0049】

[87] 既に言及したように、同軸突出部135は、内側同軸突出部コンダクタ140と、外側同軸突出部コンダクタ145との間に短絡回路を設ける、該外側突出部における短絡コンダクタ165を含む。短絡コンダクタ165は、図2に示すように、VHF定常波電流のピークと、VHF定常波電圧のゼロの位置を確定する。しかしながら、短絡コンダクタ165は、VHFソースパワー周波数に、またはVHFソースパワー周波近傍にある該突出部の共振と該プラズマ/電極の共振との結合のため、該VHF印加電力を短絡させな

10

20

30

40

50

い。しかしながら、コンダクタ 165 は、上記ウェハに印加される（高周波バイアス発生器 200 からの）高周波バイアス電源のような他の周波数に対する直接的なアースへの短絡のように見える。また、該コンダクタは、プラズマシース内で発生した VHF 電源周波数の高調波等のより高い周波数も短絡させる。

【0050】

[88] ウェハ 110 及びウェハ支持体 105、高周波インピーダンスマッチング回路 210 及び該回路に接続された高周波バイアス電源 200 の組合せは、非常に低いインピーダンス、又は、オーバーヘッド電極 125 に印加された VHF 電力に対するアースへのほぼ短絡を提供できる。その結果として、上記システムは、クロス接地であり、該高周波バイアス信号は、オーバーヘッド電極 125 及び短絡した同軸突出部 135 を介してアースへ戻され、また、オーバーヘッド電極 135 上の VHF 電力信号は、（VHF に対する）非常に低いインピーダンス経路を介して、上記ウェハ、高周波バイアスインピーダンスマッチング 210 及び高周波バイアス電力発生器 200 を通ってアースへ戻される。

10

【0051】

[89] 上記ウェハの面とオーバーヘッド電極 125 の面との間の上記チャンバの側壁の露出部分は、電極 125 の大面積及び比較的短い電極・ウェハ間のギャップのため、オーバーヘッド電極 125 に印加される VHF 電力のための直接戻り経路としての役割をほとんど果たさず、又は、全く果たさない。実際には、該チャンバの側壁は、磁気絶縁、又は、絶縁被覆、又は、環状絶縁挿入体、又は、可動ライナーを用いて、プラズマから絶縁してもよい。

20

【0052】

[90] 上記電極・ペデスタル間の垂直経路内で、オーバーヘッド電極 125 から発せられ、かつ上記側壁等の、チャンバ 100 の他の部分から出る VHF プラズマソースパワーの電流の流れを制限するために、ウェハ 110 の面内の有効な接地又はリターン電極領域は、該ウェハ又はウェハ支持体 105 の物理的領域を超えて拡大され、そのため、該領域は、オーバーヘッド電極 125 の領域を超える。このことは、一般的にウェハ 110 と同一平面であり、かつ該ウェハを囲んでいる環状半導体リング 115 を設けることにより、達成される、半導体リング 115 は、接地されたチャンバボディに対する漂遊キャパシタンスを提供し、それにより、該オーバーヘッド電極からの VHF 電力信号のために、ウェハ 110 の面内における「リターン」電極の有効半径を拡大する。半導体リング 115 は、絶縁リング 120 によって、該接地されたチャンバボディと絶縁されている。リング 120 の厚さ及び誘電率は、ウェハ 110 を流れる VHF アース電流と、半導体リング 115 を流れる VHF アース電流との所望の比を実現するように選択される。一実施形態において、絶縁リング 120 は、誘電率 4 及び 10 mm の厚さを有する石英であった。

30

【0053】

[91] 上記ウェハの表面と電極 125 との間の垂直経路内でのバイアス発生器 200 からの高周波プラズマバイアス電力からの電流の流れを制限するため、及び、上記チャンバの他の部分（例えば側壁）への電流の流れを回避するため、オーバーヘッド電極 135 は、該ウェハ又はウェハ支持体 105 の領域よりも著しく大きい有効高周波リターン電極領域を設ける。ウェハ支持体 105 の平面内の半導体リング 115 は、該高周波バイアス電力を該チャンバ内に結合する際に、重要な役割を果たさないため、該高周波バイアス電力を結合する該有効電極領域は、該ウェハ及びウェハ支持体 105 の領域に本質的に制限される。

40

【0054】

プラズマ安定性の向上

[92] プラズマ安定性は、突出部 135 の後部において、内側コンダクタ 140 と外側コンダクタ 145 とにわたって接続された短絡コンダクタ 165 へのプラズマの DC 結合をなくすことによって向上した。このことは、同軸突出部内側コンダクタ 140 と電極 125 との間に、薄い容量性リング 180 を設けることにより成し遂げられる。図 1 の実施形態において、リング 180 は、底部の電極 125 と、導電性環状内側ハウジング支持体 1

50

76との間に挟まれている。本願明細書において説明した例示的な実施形態において、容量性リング180は、選択されたバイアスの周波数、約13MHzにより、約180ピコファラッドのキャパシタンスを有していた。このようなキャパシタンスの値の場合、容量性リング180は、上述したクロス接地という特徴を妨げない。クロス接地という特徴においては、上記ウェハ・ペデスタル上の高周波バイアス信号は、突出部135を介して、高周波バイアス発生器150の高周波リターン端子へ戻り、一方、電極125からのVHFソースパワー信号は、該ウェハ・ペデスタルを介して、VHFソースパワー発生器150の高周波リターン端子へ戻る。

【0055】

[93]図5は、周波数の関数としての、VHF電源とオーバーヘッド電極125との間の反射係数を図示するグラフである。このグラフは、該反射係数が、その範囲内で6dB以下である非常に広帯域の周波数の存在を図示し、これは、上述した極めて有利な低システムQを指示する。

【0056】

[94]図6は、タップ160が、上記突出部の短絡された端部から、図2Bの距離Aに置かれている場合の同軸突出部135に沿った位置の関数としての定常波電流（実線）を図示する。

【0057】

[95]図7は、上記リアクタの代替の実施形態を図示し、同軸突出部135の内側コンダクタ140が先細りになっており、オーバーヘッド電極125の近傍で、突出部端部135b近傍で大きな半径を有し、該突出部の遠端部135aにおいて、小さな半径を有している。この特徴は、タップ160において、同軸突出部135によって呈せられる低インピーダンス（例えば、50オーム）と、オーバーヘッド電極125において、同軸突出部135によって呈せられるより高いインピーダンス（例えば、64オーム）との間の遷移を提供する。また、図7に示すように、突出部135は、湾曲させる必要はなく、代わりに、直線状にすることができる。

【0058】

[96]プロセスガスは、望ましくは、オーバーヘッドVHFソースパワー電極を介して導入される。このために、該オーバーヘッド電極には、該オーバーヘッド電極を通る小さなガス注入ノズル又はポートからなるアレイを設けることにより、ガス分布シャワーヘッドの機能が与えられる。該プロセスガスは、同軸チューニング突出部の中心コンダクタを介して、それらの注入ポートに供給される。該中心コンダクタは、該オーバーヘッド電極に結合されているため、該プロセスガス供給は、プラズマから、及び、電界から完全に保護される。

【0059】

[97]アーク放電及び他の起り得る結果が回避されると共に、特徴の組合せによって、上述した利点の全てが維持され、該特徴のうちの1つは、該オーバーヘッド電極を該VHFチューニング突出部と容量絶縁することにより、該オーバーヘッド電極を浮遊DC電位にすることである。このことは、該同軸チューニング突出部と該オーバーヘッド電極との間に、絶縁膜を配置することにより成し遂げられる。この特徴は、DCプラズマ電流が該チューニング突出部を通って該オーバーヘッド電極を介して戻ってくることを防ぎ、それにより、該オーバーヘッド電極内のガス注入穴内でのアーク放電を低減する。

【0060】

[98]アーク放電を低減する別の特徴は、プラズマと該オーバーヘッド電極との間にキャパシタンスを設けることである。このために、絶縁層が、該プラズマに面する該オーバーヘッド電極の電極面に形成される。このことは、そのような電極面、特に、該電極の上記ガス注入ポートの内部面を陽極酸化することによって行うことができる。この特徴は、該オーバーヘッド電極の該ガス注入ポート内でのプラズマアーク放電を未然に防ぐのに役に立つ。このことの1つの理由は、該陽極酸化した電極面のキャパシタンスが、該プラズマからのRF電流のある程度の電荷が、該電極面に流れるのではなく蓄積されることを可能

10

20

30

40

50

にする電荷蓄積能力を提供することである。したがって、電荷が、該オーバーヘッド電極の該ガス注入ポートの表面からそれる限り、該ポート内でのプラズマ点火は回避される。

【0061】

[99]該オーバーヘッド電極の該ガス注入ポート内でのプラズマアーク放電を回避することに加えて、該オーバーヘッド電極を容量絶縁するという特徴は、著しい利点として、該プラズマと該電極との間に、最終的にDC電流を生じさせないため、該電極の耐用期間を延ばす。

【0062】

[100]上記ガス注入ポート内でのプラズマアーク放電のリスクを更に低減するために、別の特徴、すなわち、上記同軸突出部と、該電極と上記同軸チューニング突出部との間に存在する容量性層との間の金属「フォーム」層が導入される。一実施形態において、該金属フォーム層は、上記オーバーヘッド電極と一般的に同一の広がりをもつ径からなる。該金属フォーム層は、当分野において周知の市販のタイプであり、かつ典型的に、乱雑なセル構造を有するアルミニウムマトリクスからなる。該金属フォーム層の利点は、該層が、該電極の近傍（すなわち、該オーバーヘッド電極の上のプレナム内）の電界を抑制し、それにより、プラズマが、該オーバーヘッド電極の上記ガス注入ポート内でのアーク放電する傾向を低減することである。

【0063】

[101]また、金属フォーム層は、上記オーバーヘッド電極の上記ガス注入ポートからなるアレイ全域での一様なガス分布を達成するために、入ってくるプロセスガスを調節するのにも用いられる。該オーバーヘッド・シーリングの該ガス注入穴又はポートは、半径方向内側の群と、半径方向外側の群とに分けることができる。一方の金属フォーム層は、第1のガス供給と、該ポートの外側の群との間のガスを調節し、他方の金属フォーム層は、第2のガス供給と、該ポートの内側の群との間のガスを調節する。プロセスガスフローの径方向の分布は、該2つのガス供給のガス流量を独立して調整することにより、調整することができる。

【0064】

[102]上記同軸チューニング突出部及びオーバーヘッド電極は、ウェハ支持体ペデスタルに印加される高周波バイアス電力のためのアースへの低インピーダンスRFリターン経路を与える。しかしながら、ここで、該同軸チューニング突出部と該オーバーヘッド電極との間に挿入された新たな容量性絶縁層を、該オーバーヘッド電極を通る該リターンHF経路を特定の高周波に対してチューニングするのに用いることができる事が発見されている。（該オーバーヘッド電極に関する）VHFソースパワー周波数の選択の1つの利点は、（該オーバーヘッド電極と該チューニング突出部との間の）該容量性層は、広帯域のVHF周波数にとっては電気的短絡であるため、高周波に対してチューニングした場合、該オーバーヘッド電極に印加されたVHF信号に影響を及ぼさない。

【0065】

[103]最初に、上記RFリターン経路が、付加された容量性層によりチューニングされる狭い高周波通過帯域は、上記ウェハ支持体ペデスタルに印加される高周波バイアスソースパワーの周波数の中心にあった。しかしながら、シースが発生させる高調波の問題は、代わりにこのキャパシタンスを選択して、該オーバーヘッド電極を通る該高周波リターン経路を該高周波バイアス電力信号の第二調波に対してチューニングすることにより、解決することができる。この選択の結果は、該オーバーヘッド電極近傍のプラズマシース内で発生した高周波第二調波は、大量のプラズマに著しい影響を及ぼすことができる前に、該オーバーヘッド電極を介してアースへ分流されるということである。エッティングレートは、この特長により、一実施形態において、10%～15%だけ改善されることが見出された。この場合、該高周波バイアス信号の基本波は、上記チャンバ側壁等の他の利用可能なRF経路を通ってアースへ戻ると思われる。

【0066】

[104]以下に、詳細に説明するように、選択された高周波での共振のための（上記オーバーヘッド電極の）該ガス注入ポートの表面からそれる限り、該ポート内でのプラズマ点火は回避される。

10

20

30

40

50

バー・ヘッドと上記チューニング突出部との間の) この付加された容量性層のキャパシタンスの選択は、該オーバー・ヘッド電極における薄いプラズマシースのキャパシタンスだけではなく、上記ウェハ支持体ペデスタルにおける厚いプラズマシースのキャパシタンスも考慮しなければならない。

【 0 0 6 7 】

[105] 本リアクタの高効率の VHF プラズマソースは、定期的に上記チャンバ内部を入念にドライ洗浄するのに用いることができるため、十分高い密度のプラズマを維持することが可能である。「ドライ洗浄」という用語は、この明細書において用いる場合、液状化物質の塗布は要せず、プラズマの印加のみを要するため、真空エンクロージャを開く必要がない洗浄処置を指す。このようにして、該チャンバをポリマー残留物によって入念に洗浄することができるので、ウェハ処理中のこの表面を、十分高い温度に保って、該チャンバ上のどのようなポリマー堆積物も継続的に蒸発させることができ、その結果、該チャンバは、処理の全体を通して、ポリマー堆積物が少なくともほぼない状態に保たれる。(対照的に、入念に洗浄することができないリアクタの場合、該プロセスの汚染を回避するために、プラズマ状態は、チャンバ壁面上のポリマー堆積物が、除去されるのではなく、堆積し続けるように制御されなければならない。) このために、上記オーバー・ヘッド電極アセンブリは、該オーバー・ヘッド電極を加熱又は冷却する流体を導入するための液体流路を含み、該電極の外面の温度制御を可能にしている。一般に、プラズマ状態(イオンエネルギー、壁の温度等)は、処理中に、ポリマーが該チャンバ面に堆積しないようになっている。どのような小さな蓄積物も、洗浄中に、入念に除去される。

【 0 0 6 8 】

[106] このような特徴の 1 つの利点は、視覚ウインドウを、該オーバー・ヘッド電極上、又は、該電極に隣接して設けることができるということであり、なぜなら、該ウインドウは、処理中に、きれいなままであり、あるいは、ポリマー堆積物がつかないからである。したがって、上記リアクタのパフォーマンスを、視覚的に監視することができる。その結果、該オーバー・ヘッド電極は、上記チャンバの外部のセンサへの接続のために、光伝達光ファイバケーブルを上方へ伸ばした状態で、視覚ウインドウを、その中心近傍に含むことができる。該プラズマプロセスの視覚的監視は、終点検知を実行するのに用いることができる。例えば、該視覚的監視は、従来の光学測定技術を用いて、プラズマエッチングプロセスにおける層の厚さの減少、あるいは、プラズマ CVD における層の厚さの増加を測定してもよい。

【 0 0 6 9 】

[107] プラズマに入り、かつ最終的に該ウェハ又は被加工物に到達する、上記オーバー・ヘッド電極の露出面の材料物質からの汚染の問題を解決するために、追加的な外側層が、該オーバー・ヘッド電極の(プラズマに面する)底面に導入される。この追加的な外側層は、実行される特定のプロセスに影響を及ぼさない材料物質で形成される。例えば、二酸化シリコンのエッチングプロセスにおいて、該オーバー・ヘッド電極上の該外側層は、シリコン又は炭化ケイ素となるであろう。一般に、この外側層の配置の前に、該オーバー・ヘッド電極のプラズマに面する面は、本願明細書において既に述べたように、陽極酸化される。

【 0 0 7 0 】

[108] 本リアクタの別の発見は、プラズマが、当初の予想よりも、より大きな抵抗負荷インピーダンス変動及びより小さな無効負荷インピーダンス変動を呈することができるということである。具体的には、抵抗負荷インピーダンスは、(60:1 どころではなく) 100:1 程度も変動する可能性があり、一方、無効負荷インピーダンスは、(35% どころではなく) 20% しか変化しない可能性がある。この差が、上記同軸チューニング突出部の特性インピーダンスを(上記高周波電源の 50 オームの出力インピーダンスよりも高い) 65 オームから(該高周波電源の出力インピーダンスよりも低い) 30 オームまで低下させる。この低下は、効率のわずかな妥協を伴って、チューニングスペースの比例的増加を達成する。具体的には、上記チューニング突出部によってマッチングすることができるプラズマ抵抗負荷インピーダンスの変動の範囲は、上記同軸突出部の特性インピーダ

10

20

30

40

50

ンスの低下により、60:1から100:1まで増加する。該同軸突出部の特性インピーダンスは、該突出部の内側コンダクタ及び外側コンダクタの半径によって決まる。

【0071】

[109]該同軸チューニング突出部の設置面積を低減するために、等価なストリップライン回路が代わりに置き換えられる。該同軸チューニング突出部の該外側コンダクタは、上記リニアクトにふたをする金属蓋としての接地平面になり、一方、該同軸チューニング突出部の中心コンダクタは、ストリップラインコンダクタになる。該ストリップラインコンダクタの特性インピーダンスは、該ストリップラインコンダクタと該接地平面（該蓋）との間の間隔を調整することによって調整される。該チューニングデバイスの設置面積は、該同軸チューニング突出部が直線に沿って伸びていると共に、該ストリップラインコンダクタが該蓋の内側に環状にからみつくことができ、それにより、該領域又は設置面積が低減されるため、低減される。該同軸チューニング突出部の全ての特徴は、該ストリップライン回路において維持される。したがって、該ストリップラインコンダクタの長さは、上述したような該同軸チューニング突出部の長さと同じ方法で決められる。また、上記VHF発生器に接続された供給ポイント又はタップに対する該ストリップラインコンダクタの長さに沿った配置は、該同軸チューニング突出部に対する該タップの位置と同じである。また、該ストリップラインコンダクタは中空であり、有用物は、有用物が、該同軸チューニング突出部の中心コンダクタを通って供給されるのと同じように、該ストリップラインコンダクタを通って供給される。

【0072】

10

オーバーヘッド電極を介したプロセスガスの導入

[110]ここで、図8及び図9を参照すると、オーバーヘッド電極125は、ガス分布シャワーへッドであり、そのため、被加工物支持体105に面するその底部面125aに、多数のガス注入ポート又は小穴300を有する。例示的な実施形態において、ポート300は、0.01~0.03インチ径であり、それらの中心は、約3/8インチだけ均一に離間している。図8に図示する実施形態において、円錐形金属ハウジング290の環状頂部290aは、同軸突出部の内側コンダクタ140の近端部140aを支持し、また、その環状ベース290bは、アルミニウムオーバーヘッド電極125上に載っている。ハウジング290の円錐形の形状は、その内部で、様々な有用物を中空同軸内側コンダクタ140からオーバーヘッド電極125へ供給することができる、オーバーヘッド電極125を被覆する大きな開ブレナムを画成する。以下に、更に詳細に説明するように、円錐形ハウジングベース290bは、オーバーヘッド電極125の外周部の近傍にあり、オーバーヘッド電極125の上面のほぼ全てにアクセス可能にする。

【0073】

20

[111]一般に、ポート300は、0.020インチ径のポートからなる半径方向外側の群302と、0.010インチ径のポートからなる半径方向内側の群304とからなる。一般に、ポートからなる半径方向外側の群302は、ウェハ周辺における均一なガスフローを保障するために、該ウェハの半径の約半分だけ該ウェハの周辺部を越えて伸びている。この特徴の1つの利点は、プロセスガスフローの半径方向の分布を、図1~図7のVHF容量結合リニアクトの傾向を補正して、該ウェハの中心上でより大きく、かつ、ウェハ周辺上でより小さいプラズマ密度をもたらすように調整することができるということである。オーバーヘッド電極125内の半径方向外側の金属フォーム層310は、ポート302の上に重なっている。外側フォーム層310の上に重なっている半径方向外側のガス分布マニホールド又はブレナム315は、軸方向ガス流路320を介して、同軸チューニング突出部135の内部コンダクタ140を通過するガス供給ライン325に結合されている。オーバーヘッド電極125内の半径方向内側のアルミニウムフォーム層330は、ポート304の上に重なっている。内側のフォーム層330に重なっている半径方向内側のガス分布マニホールド又はブレナム335は、軸方向ガス流路340を介して、同軸チューニング突出部135の内部コンダクタ140を通過するガス供給ライン345に結合されている。アルミニウムフォーム層310及び330は、入ってくるプロセスガスを調節す

30

40

50

る。プロセスガス流量の半径方向分布は、ガス供給ライン 325 及び 345 の各々の内部のプロセスガス流量の独立した選択によって調整される。

【0074】

ガス注入ポート内でのアーク放電の抑制

[112] アーク放電を低減する手段として、プラズマと上記オーバーヘッド電極との間に 10 ある程度のキャパシタンスを設けるために、オーバーヘッド電極の底部面 125a は、絶縁層で被覆されている。一実施形態において、オーバーヘッド電極 125 はアルミニウムであり、該絶縁被膜は、電極底部面 125a を陽極酸化することにより形成される。このような陽極酸化は、平坦な底部面 125a にだけではなく、ガス注入ポート 300 の内部面にも、非常に薄い絶縁被膜を形成する。この特徴は、オーバーヘッド電極 125 に流れ 10 R F プラズマ電流を補正することができる電荷蓄積能力を提供することにより、該ガス注入ポート内でのアーク放電を抑制する傾向がある。図 10 は、ガスインレットポート 300 のうちの 1 つの近くの結果として生じる微細構造を図示する、図 8 に対応する拡大部分図である。特に、陽極酸化により形成された酸化アルミニウム層 350 が電極の底部面 125a を被覆しており、また、ガス注入ポート 300 の内部面を被覆している。

【0075】

[113] オーバーヘッド電極 125 近傍の電界を抑制するために、オーバーヘッド電極 125 の頂部面 125b は、アルミニウムフォームからなる比較的厚い(0.25インチ)層 355 で被覆されている。厚いアルミニウムフォーム 355 は、軸(垂直)方向において、該オーバーヘッド電極近傍の電位を一定に保つ傾向があり、それにより、該付近での電界を抑制し、これは、別の方法でガス注入ポート 300 内でのプラズマアーク放電に貢献することになるであろう。 20

【0076】

[114] 上記オーバーヘッド電極を通って同軸突出部の中心コンダクタ 140 に流れる D C プラズマ電流を防ぐために、薄い絶縁層 360 が、オーバーヘッド電極 125 と、オーバーヘッド電極 125 を同軸中心コンダクタ 140 に接続する導電性ハウジング 290 のベース 290b との間に置かれている。この特徴は、該オーバーヘッド電極の D C 電位を浮かせることを可能にする。それにより、コンデンサが、オーバーヘッド電極 125 と導電性ハウジングベース 290b との間に形成される。このコンデンサのキャパシタンスは、ベース 290b の面積により、及び、薄い絶縁層 360 の厚さ及び誘電率により決まる。このコンデンサのキャパシタンスは、特定の高周波数で、狭い共振又は低インピーダンス路を提供できるように、及び、VHF 帯域の全域で R F 短絡を提供できるように、選択することができる。このように、オーバーヘッド電極 125 は、ウェハ支持体ペデスタル 105 に印加される高周波バイアス電力のための戻り経路を設けるが、VHF ソースパワー周波数におけるオーバーヘッド電極 125 の作用には影響を及ぼさない。このように、別 の方法で該オーバーヘッド電極に流れるであろう D C プラズマ電流を防ぐことにより、ガス注入ポート 300 内でのプラズマアーク放電は、そのような D C 電流がアーク放電に貢献するため、抑制される。 30

【0077】

[115] 要約すると、ガス注入ポート 300 内でのプラズマアーク放電は、絶縁層 350 を、オーバーヘッド電極 125 の底部及びガス注入ポート 300 の内部面に形成することにより、アルミニウムフォーム層 355 をオーバーヘッド電極 125 の頂部に設けることにより、及び、薄い絶縁層 360 を、オーバーヘッド電極 125 と導電性ハウジング 290 との間に置くことにより抑制される。 40

【0078】

プラズマシースが発生させる高調波の抑制

[116] 薄い絶縁層 360 は、ウェハ支持体ペデスタル 105 に印加される高周波バイアス信号のプラズマシースが発生させる高調波を抑制する際に、重要な役割を果たすことができる。そのような高調波の存在は、プロセスパフォーマンスを減少させ、具体的には、エッチングレートを減少させる。絶縁層 360 のキャパシタンス決定特性(すなわち、誘 50

電率及び厚さ)を選択することにより、プラズマからオーバーヘッド電極125及び同軸内側コンダクタ140を通る戻り経路は、特定の高周波で共振(及びそのため、非常に高いアドミタンスを有)するようにチューニングされる。この共振周波数のための1つの選択は、ウェハ支持体ペデスタル105に印加される高周波バイアス信号の基本波になり、それは、この共振が、該バイアス信号の第2調波になるように選択することにより、エッチングレートが10%~15%改善されるという上記リアクタの発見である。このような好都合な結果は、該プラズマシースによって呈せられる非線形負荷により生成された高調波が、容量性層360によって、該オーバーヘッド電極及び同軸中心コンダクタ140により呈せられる低インピーダンス路を通ってアースへ速やかに戻るので、達成される。

【0079】

10

[117]オーバーヘッド電極125を通る戻り経路を特定の高周波に対してチューニングするためのコンデンサ層360の厚さの選択は、オーバーヘッド電極125における薄いプラズマシースのキャパシタンス、ウェハ支持体ペデスタル105における厚いプラズマシースのキャパシタンス及びプラズマ自体のキャパシタンスを含む多くの要因に影響を受ける。当業者は、試行錯誤を含む、特定のプラズマ作動条件を考慮して、選択された高周波における共振を達成するためのコンデンサ層360の正しい厚さを見出すために、多くの従来の技法を容易に用いることができる。

【0080】

電極表面温度の制御

[118]酸化エッチングリアクタにおいては、ポリマー堆積物は、プロセスガスが、シリコン酸化物質と、エッチングされない他の材料物質との間で適当なエッチング選択性を達成するために、被加工物上の非酸化物含有面を被覆してポリマー層を形成することができなければならないため、重大な問題である。フロン系ガスを使用するプラズマ処理の間、単純なフッ素イオン及びラジカルがエッチングを実行し、一方、カーボンリッチな活性種は、該被加工物上の全ての非酸素含有材料物質及び上記リアクタのチャンバの全ての内部面を被覆してポリマーを堆積させる。チャンバ内面からプラズマ中に落ちてくるポリマー粒子による該被加工物の汚染を回避するために、それらの面は、十分に低い温度に保たなければならない、また、該プラズマの電子エネルギーは、該チャンバ内部面のそのような堆積物の引き剥がしを回避するために、十分に低く保たなければならない。別法として、該チャンバの真空、及びそのような堆積物を除去するために実行される化学的洗浄工程、すなわち、該リアクタの生産性を大幅に低減させる工程は、中断しなければならない。

20

【0081】

30

[119]図1を参照して説明した容量結合VHFソースは高効率であり、またそのため、ウェハ処理中に堆積したいかなるポリマー残留物も該チャンバ内部面から入念に除去するのに十分高いプラズマ密度を、非化学的洗浄工程中にもたらすことが可能である。このような洗浄工程中に、通常のプラズマプロセスガスを、より揮発性のガス(例えば、非常に高い遊離型フッ素含有量を有するプラズマをもたらす傾向のガス)と置換してもよい。液状化学物質を上記チャンバ内に導入する必要がないので、該チャンバは、閉じたままであり、その結果、該洗浄工程を迅速かつ定期的に実行して、該チャンバを、ポリマー堆積物がない状態に保つことができる。そのため、図8のリアクタの1つの作動モードは、該チャンバの表面温度及びプラズマイオン密度は、該内部チャンバ面へのポリマーの蓄積を回避するのに十分大きい。

40

【0082】

[120]このために、図8のリアクタは、(熱伝導流体のための)流路670をオーバーヘッド電極125上に含む。図8の実施においては、流体流路670は、上方アルミニウムフォーム層355と、オーバーヘッド電極125の上面との間に形成されている。別法として、このような流路は、完全にオーバーヘッド電極125内部に形成してもよい。温度制御流体又はガスは、中空内側同軸コンダクタ140を通過する流体供給ライン675から流体流路670に供給される。したがって、オーバーヘッド電極125の温度を正確に制御することができる。このように電極温度を制御することにより、及び、プラズマイ

50

オンエネルギー等の他のプラズマプロセスパラメータを制御することにより、上記リアクタは、（該表面が、ポリマーを蓄積させるのに十分冷たい）堆積モード、又は、（該表面が、プラズマイオンを該表面から引き剥がし、それによりポリマーの蓄積を回避することができるよう十分熱い）消耗モードのいずれかで作動することができる。1つの好ましいモードは、このモードが粒子汚染を回避するため、該消耗モードである。

【0083】

プラズマプロセスの視覚的監視

[121]図8のリアクタは、上記チャンバの内部面にポリマー堆積物がないように作動させることができるため、視覚ウインドウ680は、オーバーヘッド電極125の底部面に設けることができる。光ファイバ又は光パイプ685等の光学的チャネルは、一端が視覚ウインドウ680に接続されており、中空内側同軸コンダクタ140を通過する。光パイプ685は、その外側端が従来の光検出器687に接続されている。

10

【0084】

[122]この特徴を用いて、終点検知及び他の測定を、そのような光検出器を用いて実行することができる。具体的には、検出器687は、周知の光技法を用いて、被加工物又は半導体ウェハ110上の選択した層の厚さを測定する。例えば、エッチングプロセスの間に、該プロセスは、検出器687によって測定した場合、エッチングされる材料物質の厚さが所定の厚さまで減った後に停止される。

【0085】

汚染の防止

20

[123]上記チャンバの内部面は、ポリマー堆積物がない状態に保有することができるため、該内部面は、プラズマにさらされたままである。特に、アルミニウムオーバーヘッド電極125の底部面は、プラズマによる化学的作用を継続的に受け続け、また、そのため、プラズマ中へのアルミニウム活性種に貢献しやすく、該被加工物の汚染及びプロセスの失敗につながる。このような問題を防ぐために、陽極酸化してもよいオーバーヘッド電極125の底部面は、シリコン又は炭化ケイ素等のプロセスの作用に影響を及ぼさない材料物質で被覆される。したがって、図10及び図11に示すように、薄い炭化ケイ素膜690は、アルミニウムオーバーヘッド電極125の底部陽極酸化面を被覆する。薄いシリコン又は炭化ケイ素膜690は、プラズマが電極125のアルミニウム材料物質に化学的作用を及ぼすことを防止する。プラズマが、シリコン含有膜690から材料物質を除去するまで、該プラズマ中にそのように導入された活性種は、そのような活性種（シリコン及び炭素）が既に、該プラズマ及び/又は被加工物中に存在しており、そのため、該プロセスの作用に影響を及ぼさないため、該プロセスを汚染することができない。シリコンは、シリコン酸化物がエッチングされるプラズマ中に存在している。炭素は、フロン系ガスがプロセスエッチングガスとして用いられるプラズマ中にある。

30

【0086】

[124]代替の実施形態においては、上記オーバーヘッド電極は陽極酸化されておらず、また、炭化ケイ素膜690は、電極125の純粋なアルミニウム面を被覆して形成されている。

【0087】

40

同軸突出部のチューニングスペースを増加させること

[125]プラズマは、より大きな抵抗負荷インピーダンスの変動及びより小さな無効負荷インピーダンスの変動を呈することができる。具体的には、該プラズマの抵抗負荷インピーダンスは、（60:1どころではなく）100:1程度変化する可能性があり、一方、該無効負荷インピーダンスは、（35%どころではなく）たった20%しか変化しない可能性がある。この差は、上記同軸チューニング突出部の特性インピーダンスを、65オーム（すなわち、上記高周波電源の50オームの出力インピーダンスより高い）から30オーム（すなわち、該高周波電源の出力インピーダンスより低い）へ低減させることを可能にする。この低減は、少しだけ効率に欠けるが、チューニングスペースの比例的増加を達成する。具体的には、該チューニング突出部によってマッチングすることができるプラズ

50

マ抵抗負荷インピーダンスの変動の範囲は、同軸突出部の特性インピーダンスの低減により、60:1から100:1まで増加する。該同軸突出部の特性インピーダンスは、その内側及び外側コンダクタの半径によって決まる。

【0088】

結果

[126]したがって、上記リアクタは、作動条件の変化及び／又は製作公差の変動に対して、はるかに敏感ではない。作動条件に対する敏感性の欠乏、すなわち、インピーダンスマッチングに対する幅広いチューニングまたは周波数スペースを含むこれらの大きな利点は、たいていの所望の処理プラズマイオン密度において、プラズマの負のキャパシタンスの大きさにマッチングする、または、ほぼマッチングするキャパシタンスを有するオーバーヘッドリアクタ電極と、プラズマ・電極間の共振周波数にマッチングする、または、ほぼマッチングするVHFソースパワー周波数の使用、すなわち、該VHFソースパワー周波数、該プラズマ・電極間の共振周波数及び該突出部共振周波数の密な関係と、該プラズマ・電極間の共振周波数、該突出部の共振周波数及び該ソースパワー周波数を互いにオフセットすることと、例えば、ソースパワー入力タップ160を理想のマッチング位置からわずかにオフセットした状態で、ソースパワーを該オーバーヘッド電極に結合する共振突出部マッチングの利用とを含む、協働して作用する多数のリアクタの特徴の貢献であると思われる。

【0089】

[127]該プラズマ、突出部及びソースパワー周波数をオフセットすることは、上記システムを実質的にデチューニングすることにより、該システムのチューニングスペースを広げるものと思われる。突出部マッチングを用いることは、幅広い周波数範囲にわたってマッチングすることにより、該チューニングスペースを広げる。上記突出部のタップ箇所160を理想のマッチングポイントからオフセットすることは、この特徴が、供給される電力が別の方法で低下した場合に、電流を加算するという効果、及び、供給される電力が別の方法で増加した場合に、電流を減算するという効果を有するため、該チューニングスペースを広げるよう、該システムを更に最適化する。より高い(VHF)ソースパワー周波数を用いると、システムQの減少、又は、ソースパワー周波数の増加に比例したチューニングスペースの増加を提供できる。更に重要なことには、この選択は、上記電極・プラズマ間の共振を、エッティングプロセスに有利なプラズマ密度で該ソースパワー周波数にマッチングさせることを可能にする。

【0090】

[128]上記リアクタは、幅広いプロセスウィンドウに関して、プロセス条件の変化に対して実質的に反応を示さないため、該リアクタは、(a)広範囲のプロセス条件の偏差に関して有効であり、(b)幅広い範囲の用途(異なるプロセスレシピ)に対して有用であり、及び、(c)そのパフォーマンスは、広範囲の製作公差に関して、実質的に影響を及ぼされないため、リアクタ間の特性が均一であるという、リアクタの3部からなる利点を提供できる。

【0091】

[129]その結果として、優れた結果が獲得された。具体的には、上記システムのQは、同じモデルの異なるリアクタ間で、特性及びパフォーマンスに関して優れた一定の均一性を維持するように、及び、プロセスウィンドウを増大させるように、場合によっては、約5まで最小化されてきている。10¹²イオン/c²程度の高プラズマ密度は、たった2kWのソースパワーで常に達成されてきた。該システムは、10Wぐらいの低いソースパワー・レベルの遷移を伴わずに、10mT～200mTの圧力範囲でプラズマを持続した。上記VHFプラズマ周波数及びソースパワー周波数近傍で共振する短絡したインピーダンスマッチング同軸突出部は、寄生VHFプラズマシース高調波を短絡させると共に、95%を超える電力効率を実現した。該システムは、60:1のプラズマ抵抗負荷の変動及び1.3～.75の無効負荷変動に適応すると共に、3:1以下でソースパワーSWRを保有した。

10

20

30

40

50

【0092】

[130]負荷変動に適応するこの増加した性能及び拡大したプロセスウィンドウは、大部分が、(a) 上述したように、電極 125 とその導電性支持体との間の誘電率値の適切な選択、及び、VHF ソースパワー周波数の適切な選択によりなされた、デザイン作動条件下での該電極キャパシタンスとプラズマキャパシタンスとのマッチングと、(b) それにより上記タップ電流が、低負荷条件下で該突出部電流に加算され、高負荷条件下で該突出部電流から減算される、最適なタップ位置決めによって特別に構成された同軸突出部によるものであると思われる。非常に高い電力効率は、大部分が、抵抗損失が支配的である、該同軸突出部における低電流及び高電圧を実現し、かつ容量性損失が支配的である、該電極 / プラズマにおける高電流低電圧を実現する最適なタップ位置決めと共に、突出部共振周波数と電極・プラズマ間共振周波数とのマッチングを得ることにより、上記高周波電源接続部及び該電極接続部における反射損を最小化する、該同軸突出部により提供できるインピーダンス変換によるものであると思われる。更に、これら全ての恩恵が提供されると共に、従来のインピーダンスマッチング装置の必要性が回避され、又は最小化される。10

【0093】

[131]シリコン及び金属エッチングに適合された上記リアクタの実施形態を詳細に説明してきたが、該リアクタは、異なるイオン密度、異なるプラズマソースパワーレベル、異なるチャンバ圧力を含む、上述した条件以外のプラズマ作動条件の選択に対しても利点がある。これらのバリエーションは、異なるプラズマキャパシタンスを生じ、異なる電極キャパシタンス及び異なる電極・プラズマ間共振周波数を要し、そのため、上述したのとは異なるプラズマソースパワー周波数及び突出部共振周波数を要することになる。また、異なるウェハ径、及び、化学気相堆積等の異なるプラズマプロセスは、ソースパワー及びチャンバ圧力に対して、異なる作動領域を有する可能性がある。更に、これらの様々な用途において、上記リアクタは、一般に、上述した実施形態と同様に、該プロセスウィンドウ及び安定性を向上させることになると思われる。20

【0094】

コンパクトなVHF 固定チューニング要素

[132]図1及び図8の同軸チューニング突出部は、図1～図7を参照して説明したように、大きなチューニングスペースに関してインピーダンスマッチングを提供できる固定チューニング要素である。しかしながら、その細長い線形デザインのため、その設置面積は、実際には、該プラズマリアクタチャンバの設置面積よりも大きくなる。この態様が不利であると分かった状況においては、図1及び図8の該同軸チューニング突出部は、図12、図13及び図14に図示したような等価なストリップライン回路と置換される。VHF 発生器の 50 オームの同軸出力コネクタの中心コンダクタは、ストリップラインコンダクタ 700 に接続されており、一方、VHF 発生器の 50 オームの同軸出力コネクタの外側コンダクタは、該リアクタの頂部を被覆するハウジング 715 の金属シーリング 710 に接続されている。導電性シーリング 710 は、ストリップラインコンダクタ 700 が面する接地面として機能する。ストリップラインコンダクタ 700 は、一般に、その境界面が接地面シーリング 710 に面した状態で、断面が長円形である。該ストリップラインコンダクタの特性インピーダンスは、接地面シーリング 710 からの間隔によって決まる。ストリップラインコンダクタ 700 は、その全長に沿って、接地面シーリング 710 から均一に離間させることができる。30

【0095】

[133]例示的な実施形態において、該ストリップラインコンダクタは、高さが 0.125 インチで、幅が 2.5 インチで、接地面シーリング 710 の下に 0.5 インチだけれている。ストリップラインコンダクタ 700 の幅広の方 (2.5 インチ) の面が接地面シーリング 710 に面することにより、電流が、ストリップラインコンダクタ 700 の 2.5 インチ幅の全域でより多く分布され、それにより、ほとんどの電流が発生する外側面における抵抗損失が低減される。ストリップラインコンダクタ 700 の長さは、図1を参照して詳細に説明したように、同軸チューニング突出部 135 の長さと同じように決められ40

る。更に、ストリップラインコンダクタ700の長さに沿ったRFタップの位置も、図1を参照して説明したように、同軸突出部135の長さに沿った該RFタップの位置と同じように決められる。最終的に、オーバーヘッド電極125から最も遠くの図12のストリップラインコンダクタ700の端部は、図1の同軸突出部内側コンダクタ140の対応する端部と同様に、アースに短絡される。ストリップラインコンダクタ700の場合、該アースへの短絡は、図13に示すように、遠端部700aにおける接地面シーリング710への接続により達成される。

【0096】

[134]図1～図8の同軸チューニング突出部135と同様に、ストリップラインコンダクタ700は、上記固定チューニング要素の共振周波数の4分の1波長に等しい長さを有し、この場合、該ストリップライン回路は、ストリップラインコンダクタ700と上記接地面シーリングとを備える。そのため、ストリップラインコンダクタ700の長さの選択は、図1～図7を参照して説明されている同軸チューニング突出部135の長さの選択と同様に厳密である。一実施形態において、この長さは、約29インチであった。図12のRFタップ160は、図1のRFタップ160が、同軸チューニング突出部135の長さに沿った対応する接続部を形成するのと同様に、ストリップラインコンダクタ700に沿った特定の箇所において、上記VHF発生器を該ストリップライン回路に接続する。図12の場合、該VHF発生器の出力同軸コネクタの中心コンダクタは、タップ160において、該ストリップラインコンダクタに接続され、一方、該VHF発生器の出力同軸コンダクタの外側コンダクタは、該ストリップラインコンダクタに対する該タップ接続部の上にある箇所において、上記接地面シーリングに接続されている。図12のタップ箇所160のストリップラインコンダクタ700の長さに沿った配置は、図1に関して詳細に上述したように、該同軸突出部の長さに沿った図1における該タップの配置と同じように決められる。インピーダンスマッチングスペースが、タップ箇所160を理論上最適な箇所からわずかにオフセットすることにより、負荷抵抗の100:1程度の変動に適応することができる、図1に関して説明した特徴を含みながら、この特徴を用いて、ストリップラインコンダクタ700及び該接地面シーリングを備える該ストリップライン回路は、図1の同軸チューニング突出部135と同じように機能する。図1を参照して上述したように、タップ160の理論上最適な位置は、定常波電圧と定常波電流との比が、そこで、上記VHF発生器の出力インピーダンス又は該発生器と該タップとの間に接続された同軸ケーブルの特性インピーダンスに等しい、チューニング突出部135の長さに沿った（又は、同等地に、図12のストリップラインコンダクタ700の長さに沿った）箇所である。図1を参照して説明したこの発見は、インピーダンスマッチングスペースが、タップ160を、理論的に最適な位置から約5%だけオフセットすることにより、驚くほど拡大されるということである。したがって、図12のストリップラインコンダクタ回路は、図1の同軸チューニング突出部の全ての利点及び機能を提供でき、更に、コンパクト性という利点も加わる。

【0097】

[135]図8の同軸突出部の内側コンダクタ140と同様に、図12のストリップラインコンダクタ700は、電極125に接続された有用物ラインを収容するために中空であり、また、円錐形ハウジング290の頂面290aに接続されている。（図1及び図8の同軸チューニング突出部に優る）ストリップラインコンダクタ700の利点は、該コンダクタに要する長さを、上記リアクタチャンバの「設置面積」を超えて伸びることなく実現することができるよう、ストリップラインコンダクタ700が、ハウジング715内で円形状に伸びることができるということである。

【0098】

[136]該ストリップラインコンダクタの長さは、図1を参照して上述したように、上記同軸チューニング突出部が決められるのと同様に決められる。ストリップラインコンダクタ700のインピーダンスは、接地面シーリング710からのずれを調整することにより決められる。上述したように、このインピーダンスは、約30オームになるように、又は

10

20

30

40

50

、上記VHF発生器の出力インピーダンスよりも低いように最良に選択される。タップ160の、ストリップラインコンダクタ700の長さに沿ったVHF発生器150からの位置は、図1を参照して上述したような上記同軸チューニング突出部上のRFタップ160の位置と同様に決められる。ストリップラインコンダクタ700は、接地面シーリング710と共に、図1又は図8の同軸チューニング突出部と同じ機能を実行し、かつ、図1を参照して上述したような同じパフォーマンスの利点を提供できる。

【0099】

[137]図13の上面図は、ストリップラインコンダクタ700が(丸みの付いた角部を有する)ほぼ四角形の経路に沿って巻回されている実施形態を示すが、図14は、ストリップラインコンダクタ700が、円形に巻回されている別の実施形態を図示する。

10

【0100】

チューニング要素を介した有用物の供給

[138]図8及び図12に関して上述したように、図8の同軸突出部内側コンダクタ140及び図12のストリップラインコンダクタ700は、様々な有用物を上記オーバーヘッド電極へ運ぶラインを収容するために、共に中空である。したがって、図8及び図12の両方に図示するように、外部ガス供給ライン325は、外部ガス流量コントローラ800に接続されており、内部ガス供給ライン345は、内部ガス流量コントローラ810に接続されており、光ファイバ又は光パイプ685は、光検出器687に接続されており、加熱/冷却ライン675は、加熱/冷却源コントローラ830に接続されている。

【0101】

20

[139]固定チューニング要素135は、(図1及び図8の実施形態の場合のような)同軸チューニング突出部又は(図12及び図14の実施形態の場合のような)ストリップライン回路のいずれかである。アンテナの設計者は、上記高周波電源の50オームの特性出力インピーダンスと、上記電極/プラズマの組合せのインピーダンスとのインピーダンスマッチングを提供にする際に、該固定チューニング要素に関する両実施形態により実行される同等の機能を認識する。該固定チューニング要素(又は、同等に、固定インピーダンスマッチング要素)に関する両実施形態は、中心コンダクタ(図12の接地面シーリング又は図8の内側同軸コンダクタのいずれか)及び接地されたコンダクタ(図12のストリップラインコンダクタ又は図8の接地された外側同軸コンダクタのいずれか)の使用を含む構造上の特徴を共通して共有する。どちらの場合においても、該インピーダンスマッチング要素の特性インピーダンスは、該2つのコンダクタ間の間隔によって決まり、一方、該インピーダンスマッチング要素に対する入力インピーダンスは、該高周波電源への接続部の中心コンダクタに沿った位置によって決まる。また、該中心コンダクタは中空であり、そのため、ガス供給ライン及び熱伝導性流体供給ラインのためのRFシールド導管として機能する。そして、最も重要な共通の特徴は、該インピーダンスマッチング要素に関する両実施形態は、物理的に固定された構造であり、そのため、可動部又はインテリジェントコントローラを必要としないということであり、これは著しい利点である。他の関連する利点は、既に説明されている。したがって、両実施形態の固定インピーダンスマッチング要素は、一般的に、中空中心コンダクタを有する固定2コンダクタインピーダンスマッチング要素と呼んでもよい。

30

【0102】

40

RF損失が不变で、アーケ放電が抑えられた、低汚染性の被覆シーリング電極

[140]上記シーリング電極内のガス分布流路におけるアーケ放電の問題は、次の特徴、すなわち、(a)良好なガスフロー又はコンダクタンスを有する傾向があるが、ガス流路の軸方向長さに沿った電界分布を生じる傾向もあり、該電界強度が、該電極の底部面における最大強度から、該電極の頂部近傍における最小強度まで減少する、ガス流路形状と、(b)ガス供給圧力と、上記リニアターチャンバの真空レベルとの全圧力差をほぼ表す圧力低下を有するように十分損失の多い上述したガス流路を与えるオリフィスであって、該ガス流路の電界分布における最小電界強度の領域内又は該領域の上に配置されているオリフィスと、を組み合わせることによって解決される。その結果は、実質的に全ての圧力低下

50

が最小電界強度の領域内で発生すると共に、全ての電界低下が、ほぼゼロの圧力低下の領域内で発生するということである。その結果として、上記シーリング電極の軸方向長さに沿った全ての位置におけるガス圧力及び電界強度の組合せは、一般的に、アーク放電が発生することが可能な範囲の外側にある。この範囲は、以下に詳細に論じるように、パッシュエン曲線によって画成される。該ガス流路の断面形状の選択、上記の結果を成し遂げるための該オリフィスのオリフィス径及び位置を、以下に詳細に説明する。

【0103】

[141]上記シーリング電極内部面の保護半導体被覆におけるRF損失の広い変動の問題は、上記リアクタに係る該半導体被覆の電気的特性の特定の選択により解決される。該半導体被覆又は半導体層によるRF吸収の広い変動は、電極温度の比較的小さな偏位、電極の厚さ及び不純物濃度によって引き起こされる。この問題は、本リアクタにおいては、RF吸収が、該材料物質の損失正接の変化に対して、少なくともほぼ不变である範囲内に、該半導体層の損失正接を置くレベルに対する該半導体層のドーパント濃度を選択することにより解決される。（損失正接は、該材料物質の複素誘電率の実数成分と虚数成分との比である。）損失正接は、ドーパント又は固有不純物濃度によって決まり、また、温度によって変化する。また、損失正接の変動に対する該材料物質におけるRF吸収の敏感性または変動は、該層の厚さに影響を受ける。その結果として、損失正接の変化に対して、RF電力吸収の最小変化の範囲内にある半導体被覆又は半導体層の損失正接を選択すると、該RF電力吸収が、温度、層の厚さ及び層の組成（例えば、不純物濃度）の変化に対してほぼ鈍感になる。

10

【0104】

[142]本シーリング電極の一態様は、上記半導体層が、ガス注入流路が層中に形成されており、かつ金属電極ベースの底部面に直接接合されている単一のモノリシック層である高度に単純化された構造である。最適な接合を達成するための該接合層の厚さは重要であり、比較的大面積に、処理チャンバに対して露出される接合材を残すと、汚染につながる。この問題は、該接合層を独立し離間したゾーンに分け、上に重なる金属電極ベースから下方へ伸びる縁、又は（別法として）下にある半導体層から上方へ伸びる縁のいずれかによって各ゾーンを囲むことにより、該接合層の厚さを低減することなく、解決される。該縁は、上記チャンバ内でのプロセスガスの汚染を低減又は防止するために、該接合層の露出した厚みを、少なくとも部分的に被覆する。別の態様は、非常に小さなガス抜け特性を有する非常に優良な接着剤を用いることである。

20

【0105】

[143]次に、図15を参照する。図15は、図8のシーリング電極125が図15のシーリング電極900と置換されていることを除いて、図8と同様のプラズマリアクタを図示する。シーリング電極900は、図15において、その断面が示されており、ウェハ支持体ペデスタル105に面する底部面を有する金属（例えば、アルミニウム）ベース901と、金属ベース901の底部面に接合された保護層（又は、シャワーヘッド）902とからなる。該保護層は、プロセスに影響を及ぼさない材料物質の化学気相堆積により、巨大なセラミック部材として形成することができる。このようなプロセスに影響を及ぼさない材料物質は、例えば、この明細書において後述するある特徴にしたがって、該材料物質を半導電性にする不純物をドープすることができる、炭化ケイ素等のセラミックとすることができます。シーリング電極900は更に、金属ベース901の頂面に重なっている加熱プレート903と、加熱プレート903の頂面に重なっている冷却プレート904とを含む。図15に概略的に指し示すように、加熱流体供給ライン675a及びリターンライン675bは、加熱プレート903内の循環のための加熱流体を供給し、一方、冷却流体供給ライン675c及びリターンライン675dは、冷却プレート904内の循環のための冷却流体を供給する。熱電対901は、ベース901の温度の測定値をプロセスコントローラ906に提供する。

30

【0106】

[144]図16は、穴907からなるアレイの配置を示す金属ベース901の平面図であ

40

50

り、各穴 907 は、ベース 901 を通って軸方向に伸びている。図 17 は、上記シャワーヘッドを軸方向を通って伸びる弓形スロット 908 のペアからなるアレイの配置を示す、上記半導体保護層又はシャワーヘッド 902 の平面図である。図 18 の拡大図に図示するように、弓形スロット 908 の各ペアは、円環のほぼ半円形部分を形成する、対向する「C」字状形状 908a、908b とすることができますが、他の適当な形状を代わりに用いてもよい。

【0107】

[145] 図 19 の拡大図を参照すると、金属電極ベース 901 は、2 つの個別の構成要素、すなわち、複数の下方に伸びる円筒形ポスト 923 を有する上部プレート 901a と、ポスト 923 が環状ガス流路 914 を形成するようにその中にに入れ子状に収まる、複数の円筒形穴 922 を有する下部プレート 901b とで形成されている。複数のガス分布マニホールド 909（そのうちの 1 つが図 19 の拡大図に示されている）は、ベース 901 の頂部の空間として形成されている。穴 907 は、マニホールド 909 のそれぞれの底部から上部プレート 901a を完全に通って、かつ下部プレート 901b を部分的に通って伸びている。プラグ 910 は、上部プレート 901a 及び下部プレート 901b の両方に接觸するように、各穴 907 内に圧入されている。複数の圧入プラグ 910 が上部プレート 901a 及び下部プレート 901b を一緒に保持している。各圧入プラグ 910 は、マニホールド 909 に対して開いている中心軸方向開口 911 と、上部プレート 901a 内で、軸方向開口 911 から径方向空間 913 の方へ伸びる 4 つの径方向オリフィス 912 を有する。空間 913 は、ベース 901 の底部面に達する、ベース 901 内の環状流路 914 内に開いている。環状流路 914 は、半導体保護層 902 の弓形スロット 908 と一般的に位置合わせされている。各垂直流路 914 は、保護層 902 の対向する「C」字状スロット 908 の対応するペアの対称軸と同軸の円形（環状）弓形スロットである。ガスは、マニホールド 909 から下方へ流れ、軸方向プラグ開口 911 を通って、オリフィス 912 の径方向外側を通り、そこから環状垂直流路 914 を下方を通り、ベース 901 と保護層 902 との間の径方向スロット 915 の径方向を通り、弓形スロット 908 を通って上記チャンバ内へ流れる。

【0108】

[146] スロット状流路 908、914 は、該スロットの方位角長さに比例する高ガスコンダクタンスを提供するが、スロット 908 及び環 914 の幅の逆関数である割合で、該スロット内の電界を低下させる。その結果として、流路 908、914 を通った、すなわち、保護層 902 の底部面から上方の径方向空間 913 までの圧力差はほとんどない。同時に、スロット 908、914 は、保護層 902 の底部面と径方向空間 913 との間の距離の範囲内で、そのピークの大きさの少なくとも半分（好ましくは、それ以上）だけ電界が低下するように、十分狭い（例えば、約 .012 インチ程度）。

【0109】

[147] オリフィス 912 は、円筒形であり、ガスマニホールド 909 の高圧と、シーリング電極 900 の下の上記チャンバの真空圧との間のほぼ全圧力差が、各オリフィス 912 の長さにわたって低下するように、十分小さな直径（例えば、約 .010 程度）を有する。例えば、該圧力は、各オリフィス 912 の長さにわたって、10 倍低下する可能性がある。以下に更に詳細に説明するように、その結果として、最高の電圧低下（電界）は、最低圧力の領域で（すなわち、スロット 908、914 の軸方向長さに沿って）発生し、全体の圧力低下は、最小電界の領域で（すなわち、径方向オリフィス 912 内で）発生する。この特徴は、以下に更に詳細に説明するように、シーリング電極 900 を、アーク放電に対してほとんど鈍感にする。

【0110】

[148] 図 20 を参照すると、ベース 901 と保護層 902 との間の複数のスペーサ又はポスト 916 は、ギャップ 917 の幅を固定し、保護層 902 をベース 901 に固着するために、接合接着剤 918 が配置されている。ギャップ 917 の幅は、最適な接合を保障するのに十分である。この幅は、比較的大きく、そのため、接合接着剤 918 のかなりの

領域を、径方向流路 915 内のプロセスガスにさらし、このことが、接合接着剤層 918 からのガス抜きにより、汚染を促進する。この問題は、ギャップ 917 の幅のいかなる低減も要することなく、解決される。その代わりに、接着剤層 918 は、図 19 に示す複数の離間したゾーン又はアイランド 918a、918b、918c 等に分けられ、各アイランドは、各接合接着剤アイランド 918a、918b、918c 等の別に露出した垂直面 921 の（全部ではないが）約半分を被覆する、軸方向に伸びる縁 920 によって囲まれている。各縁 920 は、各接合接着剤層ゾーンの垂直面 921 の全体を被覆するか、又は、径方向流路 915 内のプロセスガスにさらされる、該ゾーンのほんの一部のみを残している。縁 920 は、径方向流路 915 の幅を、ギャップ 917 の幅以下まで低減する。プロセスガスにさらされる接合接着剤アイランド 918a、918b、918c の表面積を低減する（又はなくす）ことにより、各縁 920 は、該接着接合材からのガス抜きによる、上記チャンバ内での汚染を低減する（あるいは、なくす）。各縁 920 は、金属ベース 901 から、すなわち、ベース 901 のプラグ 923 から下方へ伸びる（その結果、プラグ 923 と一体形成される）か、あるいは、保護層 902 から上方へ伸びてもよい。図 20 の描画においては、縁 920 は、プラグ 923 から下方へ伸び、かつプラグ 923 と一体形成されている。

【0111】

[149] 接着接合層 918 からの汚染を更に低減するためには、ガス抜きする極微の傾向を有するにすぎない、極めて優良な接合接着材を層 918 に用いる。接着剤層 918 に対する好適な接合材は、Dow Corning Corporation により製作されている Dow Corning・スペースグレード低揮発性接着剤 93-500 である。

【0112】

[150] 図 21 は、冷却流体がその中を循環する冷却剤流体ジャケット 927 を示す、冷却プレート 904 の平面図である。図 22 は、加熱流体がその中を循環する加熱流体ジャケット 928 を示す加熱プレート 903 の平面図である。

【0113】

[151] 図 23、図 24 及び図 25 は、図 15～図 19 のシーリング電極における上記ガス流路及びオリフィスの形状を、該シーリング電極内でのアーク放電を防ぐために、どのように選択することができるかを図示するグラフである。図 23 は、該シーリング電極により上記チャンバ内に注入されたプロセスガスの場合のパッシュエン曲線を表し、垂直軸は電界に対応し、水平軸はガス圧力に対応する。図 23 の曲線上の領域は、該ガス発生中で、アーク放電又は電気的放電が発生する電界強度・圧力空間の位置を表す。図 23 の曲線下では、アーク放電は発生せず、1 つの目的は、該シーリング電極の軸（高さ）に沿った全てのポイントにおいて、図 23 の曲線の下に、圧力と電界強度との組合せを保つことである。図 24 は、該シーリング電極における軸方向ガス流路に沿った高さの関数としてのガス圧力を図示する。図 24 の点線は、小さな円筒形状のガス流路に対応し、図 24 の実線のほぼ水平区分は、図 15～図 19 の該シーリング電極におけるスロット状ガス流路 908、914 に対応する。図 23 の実線のほぼ垂直部分は、圧入プラグ 910 の小さな径方向穴 912 における圧力分布に対応する。図 25 は、高さの関数としての、スロット状ガス分布流路 908、914 における電界分布を図示する。「.020」と「.040」と標示された図 25 の曲線は、それぞれ、0.020 及び 0.040 インチのスロット幅（ギャップ）に対応する。図 19 の弓形スロット状ガス流路 908、914 に適用した場合、「幅」という用語は、該スロットの小さい方の寸法を指し、一方、「長さ」という用語は、該スロットの大きい方の寸法を指す。一般に、図 19 において、該長さは、ほぼ該幅以上の大きさである。

【0114】

[152] 図 25 は、上記スロット状ガス流路の電界が、該スロットの幅によって決まる比における高さによって減少することを示す。そのため、ガス流路 908、914 の組み合わせた長さに沿って該電界低下を増加させることにより、ガス流路 914 の頂部における電界強度を最小化するのに、比較的狭いスロット幅（例えば、0.010 インチ）が用い

られる。例えば、ガス流路 914 の頂部における電界は、保護層 902 の底部面における電界の 10 分の 1 (又はそれ以下) とすることができます。ガス流路 908、914 の組合せた長さに沿った電界低下は、ベース 901 と保護層 902 との組み合せた厚さにわたる電界低下のほとんど (例えば、80% 又はほとんど全て) である。径方向オリフィス 912 の軸方向位置は、該オリフィスが、図 25 の電気分布における最小電界の領域内に位置するように十分高い。径方向オリフィス 912 の各々の径は、該ガス流路の高さの頂部近傍で、図 24 の曲線の急勾配部分によって表される、各径方向オリフィス 912 にわたる非常に高い圧力低下を達成するように、十分小さい (例えば、0.010 インチ)。各径方向オリフィス 912 の長さに沿った圧力低下は、ベース 901 と保護層 902 との組み合せた厚さにわたる圧力低下のほとんど (例えば、80% 又はほとんど全て) を表す。各オリフィス 912 の径方向は、上記電極の軸方向厚さにわたる電界に対して直行するため、各オリフィス 912 の長さに沿って電界低下が最小になる。その結果として、(最大高さに位置する) 径方向オリフィス 912 内で、該圧力は、(少なくとも、各オリフィス 912 の径方向内側部分近傍において) 非常に高く、一方、該電界は、スロット状ガス流路 908、914 の狭さにより、最小 (又は、ゼロ) である。高圧と低電界強度との組合せは、図 23 の位置 930 に対応し、これは、アーク放電しきい値の十分下である。軸方向弓形スロット 908、914 内で、該圧力は非常に低く (図 24 の曲線の浅い部分)、一方、該電界は、該底部近傍でその最大値 (図 25 の曲線のピーク) に近づく。したがって、軸方向ガス流路 908、914 において、図 23 の位置 931 に対応して、電界は高いが、圧力は非常に低く、これもアーク放電しきい値よりも十分下である。この結果を達成するため、ガス流路 908、914 のスロットの長さは、ガス流路 908、914 の組み合せた長さに沿った圧力低下を、電極 900 の頂部と底部の間の圧力低下の何十分の一まで最小化するように、十分大きくなければならない。その結果として、ほぼ全ての圧力低下は、上述したように、各径方向オリフィス 912 の長さに沿って発生する。該スロットの長さ (例えば、該アークの長さ) は、0.070 インチ程度とすることができます、一方、該スロットの幅は、約 0.010 インチ程度とすることができます。

【0115】

[153] 次に、保護層 902 における RF 損失を、様々な変動プロセス条件 (温度、層の厚さ、不純物含有量) 下でほぼ不变にする方法について説明する。図 26 は、特定の RF ソースパワー周波数 (すなわち、例えば、162 MHz、又は、210 MHz のプラズマ・電極共振周波数における、該共振周波数近傍における)、特定の温度 (例えば、90 の作動温度) における炭化ケイ素材の損失正接の関数としての、保護層 902 の炭化ケイ素バージョンにおける RF ソースパワーの損失を図示するグラフである。該損失正接は、該材料物質の複素誘電率の実数成分と虚数成分との比であり、該材料物質が吸収する RF 電力の量を決める。損失正接は、該材料物質の実数の誘電率と該 RF 周波数との積で該材料物質の伝導率を割ったものである。損失正接は、半導体材料物質中のドーパント不純物の濃度を変化させることにより調整することができる。図 26 に図示されている、炭化ケイ素等の半導体材料物質の作用は、様々なドーパント不純物濃度 (ゆえに、異なる損失正接) からなる炭化ケイ素層の損失正接を測定し、該層各々に吸収された RF 電力を測定することにより、容易に導出される。このような測定は、King, Transmission Line Theory, McGraw-Hill, 1955 年、8 頁及び 285 ~ 286 頁に記載されている原理にしたがって、当業者によって容易に実施される。図 27 のグラフは、炭化ケイ素層 902 における RF 損失又は吸収が、損失正接 1 でピークをつけ、このピークから、該損失正接の増加又は減少のいずれかを伴って減っていくことを示す。

【0116】

[154] 誘電体の損失正接は、一般に、温度と共に増加し、そのため、温度変動は、RF 電力吸収の変動を引き起こすことになる。損失正接 1 におけるピーク RF 損失近傍で、RF 電力は、損失正接の小さな変動だけで非常に劇的に失われる。保護層 902 の厚さを増加させた場合、損失正接の変化に伴う RF 損失の変動は、より一層顕著になる。このこと

は、薄い層の作用を表す図26の実線の曲線と、より厚い層を表す図26の点線の曲線との比較によって図示される。すなわち、図26のいずれかの曲線のピーク近傍（すなわち、損失正接1において）で、RF電力は、温度又は層の厚さのいずれかの小さな変化だけで、大幅に失われる。該ピークから離れると（すなわち、10以上、又は、0.1以下の損失正接値において）、該点線の曲線は、該実線の曲線とほぼ重なり、その結果、層の厚さの差が、RF電力損失のごくわずかな変化を引き起こす。また、RF電力損失は、該損失正接が10以上、又は、0.1以下の場合、損失正接値の幅広い範囲にわたってほぼ一定であり、その結果、損失正接値のそれらの範囲に対応する温度変動は、RF電力損失のごくわずかな変化を引き起こす。そのため、保護層902におけるRF電力損失は、作動温度において、10を超えるか、又は、0.1未満の損失正接に対して、該材料物質をドープすることにより、温度、層の厚さ及び不純物濃度の変化に関して、ほぼ不变となる。一実施形態において、0.1以下の損失正接は、比較的高価なほぼ真性の半導体材料物質を要するため、該損失正接は、コストを節約するために、作動温度において、10以上になるように選択される。10以上の損失正接値の選択は、該半導体層におけるRF損失のわずかな測定可能な変動を伴って、又は、該変動を伴わずに、約10以上の損失正接値に対応する温度偏位を可能にする。温度制御、層の厚さ及びドーパント濃度に対するデザイン上の許容範囲は、（図26で「最適範囲」と標示したバーによって図示するように）10から非常に高い値まで及ぶ損失正接値の範囲に対応して、非常に広い。この選択は、損失正接に対する、RF電力吸収（図26の垂直軸）の微分係数を低減（ほぼ最小化）する。以下を見て分かるように、このような選択の結果は、温度、厚さ及び不純物濃度に対する該RF電力吸収の微分係数を低減（ほぼ最小化）することになる。

【0117】

[155]図27は、電力損失（垂直軸）が、異なる損失正接値に対して、温度の変化によってどのように変化するかを図示する。「tan ピーク」と標示された図28の一方の曲線は、図26の損失正接値1に対応し、所定の温度範囲に関するRF電力損失の非常に大きな変化を指示する。「tan 10」と標示された図27の他方の曲線は、10を超える損失正接値に対応し、同じ温度範囲に関するRF電力損失の非常に小さな又はゼロの変化を指示する。図28は、電力損失（垂直軸）が、厚さの範囲に関して、（保護層902の）層厚の変化によってどのように変動するかを図示する。「tan ピーク」と標示された図28の一方の曲線は、図26の損失正接値1に対応し、所定の厚さの範囲に関して、RF電力損失の非常に大きな変化を指示する。「tan 10」と標示された図28の別の曲線は、10を超える損失正接値に対応し、同じ厚さの範囲に関して、RF電力損失の非常に小さな又はゼロの変化を指示する。したがって、図27及び図28は、図26に図示した作用の結果、及び、上記リアクタによる損失正接範囲の正しい選択が、温度制御及び層の厚さの両方に対して、デザインウィンドウをどのように広げるかを示す。

【0118】

[156]したがって、一般に、処置は、保護層902のための半導体（又は、他のプロセスに影響を及ぼさない）材料物質を選択して、選択したRFソースパワー周波数で、RF損失が該材料物質の損失正接値の範囲に関してどのように作用するかを判断することである。具体的には、該材料物質における最大RF損失に対応する損失正接値が見出される。このことは、分析的に、又は、異なる不純物濃度を有する同じ材料物質の異なるサンプルを用いて、一連のRF損失測定を実行することにより行える。一旦、ピークRF損失の損失正接値が見出されると、該ピーク損失における損失正接値より大きな（又は小さい）損失正接値が選択される。そして、該材料物質は、該材料物質において選択された損失正接値を出す不純物濃度レベルまでドープされた後、保護層902を形成するのに使用される。上記シーリング電極の温度は、少なくとも、ピークRF吸収の損失正接値よりも大きい（又は小さい）損失正接値を保有するように制御される。炭化ケイ素においては、損失正接値10以上に対するこの温度範囲は、室温から250以上に及ぶ。

【0119】

[157]図20を参照して上述したように、それぞれの接着接合アイランド918の露出

10

20

30

40

50

した垂直面 921 を被覆する各縁 920 の特徴は、接着接合層 918 の厚さを、該接合接着材に付隨する汚染の増加を伴うことなく、最大強度の接合に対してかなり大きくすることを可能にする。しかしながら、接合接着層 918 の厚さに関わらず、発明者等は、通常の使用中、特に、洗浄中に、シーリング電極 900 に起る温度偏位が、アセンブリ 900 を、金属ベース 901 と保護層 902 との熱膨張率の差によって生じるせん断力により破壊することを見出した。このような温度偏位を、図 29 のグラフに 940 で標示した曲線で図示する。接着接合層 918 が約 30 の温度で硬化すると仮定すると、上記シーリング電極の温度は、プラズマ処理中に、約 90 まで上昇する。この温度の増加は、金属ベース 901 及び保護層 902 を、それぞれの熱膨張率にしたがって、異なる速度で膨張させる。このことが、せん断力（図 29 の垂直軸）を発生させ、該せん断力は、シーリング電極 900 の温度が 90 の作動温度に達するまで、該電極温度によって増加する。該問題は、シーリング電極 900 を、該作動温度をかなり上回って、例えば、約 150 の焼成温度までよく加熱することを要するが、上記リアクタの焼成プロセスが実行されるときに悪化する。図 29 に示すように、該シーリング電極に関するせん断力は、該温度が作動温度から焼成温度まで増加したときに、ほぼ倍増する。シーリング電極 900 が破壊される傾向があるのは、（せん断力がほぼ倍増する）この後者の温度偏位の間である。
10

【0120】

[158] この問題は、接着接合層 918 を、高温で、好ましくは、該シーリング電極が受ける、最大及び最小温度極値間の約中間の温度で硬化することにより解決される。図 29 に図示する場合において、該接合接着層は、90 の作動温度に近い高温で硬化される。図 29 に 945 で標示した曲線によって図示するように、接着接合層 918 を中間温度で硬化させることにより、シーリング電極 900 が受ける最大せん断力は、約 2 倍低減され、すなわち、室温で負のせん断力まで、あるいは、焼成温度で正のせん断力まで低減され、そのどちらもほぼ同じであるが、逆方向であり、また、どちらも、該接合接着層が低温で硬化する、940 で標示した曲線の場合で生成される最大せん断力の約半分よりも大きくない。
20

【0121】

[159] 接着接合層 918 をそのような中間温度で硬化させる方法は、破壊の問題を解決するだけではなく、接着接合層 918 からガス抜きすることによる汚染を防ぐ、又は、低減する、上記リアクタの別の方法を実行することも可能にする。この後者の方法によれば、接着接合層 918 が硬化して冷却された後で、シーリング電極 900 がプラズマ処理に使用される前に、該電極は、接着接合層 918 からの高揮発性の生成物の全てを少なくともほぼ煮沸又は蒸発させるために、十分長い時間、可能な限り高い温度（例えば、150 の焼成温度）まで加熱される。この蒸発方法の一実施形態においては、該シーリング電極は、製品ウェハのプラズマ処理に用いられる前に、少なくとも 8 時間、150 に保持された。この焼成プロセスは、該シーリング電極の寿命の間に一度だけ実行されるため、該接着層は、最大ストレスを一度だけ受け、それにより、該シーリング電極の寿命の間、該接着層のせん断応力疲労が回避される。
30

【0122】

[160] 上記リアクタの 1 つの特徴は、その構造が、長時間のウェハ処理中に蓄積された全ての汚染を除去する定期的なウェット洗浄処置の影響を受けやすくするということである。この特徴は、該シーリング電極の寿命を延ばし、その寿命が、収益性の高い用途により、製作コストを回収するのに十分であるという意味で、商売上実用的になる。この特徴の下にある構造上の特徴は、次のとおり、すなわち、
40

該ウェット洗浄プロセスが、該接合層の全域で、最小（又はゼロ）せん断応力という条件下で実行されるような、上記接着接合層の、ウェット洗浄プロセスに適した高温での硬化と、

C F ポリマーを除去し、アルコールで洗い流し、110 まで加熱する溶液中での浸漬の影響を受けやすい、上記シーリング電極を構成するセラミック炭化ケイ素／アルミニウム材料物質と、
50

シリコン又はシリコン酸化物を除去するために、(H F 及び / 又は H 2 N O 3 等の)酸に浸漬することができ、あるいは、そのような酸できれいにすることができる巨大なセラミック炭化ケイ素層と、

ガス流路を通る高圧ガスバージが、捕捉した残留物を少しも残すことなく、全ての汚染材料物質を最終的に除去できるような、該シーリング電極を完全に通って伸びるフロースルー式再入不可のガス流路とを含む。

【 0 1 2 3 】

[161]ウェット洗浄プロセスは、該シーリング電極の上記プラズマリアクタからの取外し、及び、以下に説明する固定具への設置によって始まる。そして、該シーリング電極全体は、該シーリング電極に蓄積した全てのフッ素樹脂を除去するのに十分な時間、室温で、アセトン等の溶剤に浸漬される。次の工程は、該シーリング電極のセラミック炭化ケイ素層(のみ)を、該シーリング電極に蓄積した全てのシリコン酸化物又はシリコン材料物質を除去するのに十分な時間、H F 又は硝酸又はそれら両方の混合物等の酸にさらすことである。このことは、該セラミック層をきれいにすることにより、又は、該シーリング電極の該セラミック部分のみを酸に浸漬することにより、実行することができる。この工程も室温で実行される。該シーリング電極は、該シーリング電極の一方の面を加圧すると共に、ガスが該シーリング電極の他方の面から抜けることを可能にすることにより、室温で、窒素又は乾燥空気を用いてバージされる。最後に、全ての水分が該シーリング電極から蒸発するまで、該シーリング電極を上記接着層のおおよその硬化温度まで加熱することにより、水分が該シーリング電極から除去される。この最後の工程は、該温度(100)は、せん断応力がおおよそゼロである、該接着層の硬化温度であるため、該接着層の全域で、最少量のせん断応力を発生させる。その結果として、該ウェット洗浄プロセスは、該接着層に対して、ごくわずかな量のせん断応力のみを与え、またそのため、該シーリング電極の寿命を大幅に損なうことなく、又は、該接着層を過度に疲労させることなく、該シーリング電極の寿命の間、該プロセスを何度も繰り返すことができる。

【 0 1 2 4 】

[162]上記焼成方法及びウェット洗浄方法のいずれか一方又は両方を実行する固定具を図30に図示する。密閉チャンバ950は、側壁954に支持されたリング952を有し、リング952は、シーリング電極900を収容して固着することができる。加熱流体源955及び(任意の)冷却流体源956は、該電極温度を約150に保有する温度制御を実行するために、加熱及び冷却流体を、シーリング電極900の加熱及び冷却プレート903、904に供給する。ガス供給部958は、シーリング電極900の頂部に、すなわち、シーリング電極900のガス分布マニホールド909内に高いガス圧力を発生させるポンプ959にガスを供給する。排気ポート960は、シーリング電極900の底部を通って注入されたガスを除去する。

【 0 1 2 5 】

[163]図31は、一般的に平坦なオーバーヘッド電極を有する、図16~図20に開示したタイプのリアクタにおけるウェハ支持ペデスタル上に保持されたウェハの表面にわたる半径の関数としてのプラズマイオン密度を図示する。該イオン密度(垂直軸)は、任意の倍率を使用してプロットされており、酸化プロセスにおけるアッシングレートから推測された。図31のグラフは、該ウェハの縁部におけるプラズマイオン密度が、該ウェハの中心部におけるイオン密度の55%以下であることを示している。

【 0 1 2 6 】

[164](該縁部よりも該中心部においてより高い階段状形状を有する)図32、又は、(該縁部よりも該中心部においてより高い湾曲形状を有する)図33に図示するタイプのガス分布オーバーヘッドソースパワーシーリング電極は、イオン分布の非均一性を約2倍だけ低減する(該均一性を改善する)ことができる。このことは、図32の階段状シャワー・ヘッド電極によってもたらされる、半径方向の位置の関数としての該ウェハ表面におけるエッチングレートを示す図34のグラフに示されている。図34におけるエッチングレートは、パワー密度分布から推測した。同様のエッチングレート分布は、図33の湾曲した

10

20

30

40

50

シャワーヘッド電極によってもたらされる。図32又は図33の湾曲又は階段状のシャワーヘッド電極において、エッティングレートの中心・縁部間の偏差は、20%まで低減され、それは、上記平坦な電極によってもたらされる、偏差(55%)の半分よりも小さい。これは、図32及び図33の階段状又は湾曲した中心部が高いシャワーヘッド電極が、該中心部よりも該ウェハ縁部において、より小さなウェハ・シーリング間のギャップ内にプラズマを閉じ込め、それにより、該縁部近傍において、プラズマイオン密度を高めるためである。このような結果は、該電極の底部面において、比較的高い曲率又は急勾配の階段状部分を要する。例えば、図32の階段状電極の1つの実施においては、直径が約300mmであり、該ウェハ縁部におけるウェハ・シーリング間ギャップは25mmであり、これは、約12mmの中心部・縁部間のギャップ差である。図33の湾曲したシーリングの1つの実施においては、該中心部・縁部間のギャップ差は、15mmである。このような高い曲率又は急勾配の階段状部分によって、図16～図20のガスシャワーヘッド電極を製造することは、実用的ではない。特に、多数の図18の狭い環状ガス注入開口部908の製造、及び、多数の圧入プラグを用いる図19の複雑なアセンブリの製造は、極端に高いコストを必要とするであろう。

【0127】

[165]本リアクタは、アーク放電の問題を解決するために、図16～図20のアプローチから外れる。アーク放電を抑えるために、各開口部における径方向の電界が高さを伴って低下する割合を高めるために、図18の各ガス開口部の狭い環状形状が必要であったことが思い出されるであろう。本リアクタにおいて、発明者等は、非常に小さなオリフィスにおける供給・真空間のガス圧力低下が、高い径方向電界の領域の上の十分な高さに達成されるのであれば、単純な円筒形穴内の径方向電界の低下は、アーク放電を抑えるのに十分であることを見出した。そのため、本リアクタは、(実質的に全ての供給・真空間のガス圧力低下が、高い径方向電界の領域の上で発生するように)ガス出口穴のかなり上流で、非常に小さな圧力低下オリフィスによって供給される(プラズマ近傍の高い径方向電界の領域において、高いガス圧力を回避するために)該電極表面に、比較的大きな円筒形ガスアウトレット穴を用いる。(図18の環状ガスアウトレットの代わりに)円筒形穴ガスアウトレットを用いる利点は、円筒形穴を、図32の階段状電極の底部面や図33の湾曲電極の底部面等のかなり湾曲又は急勾配の階段状面に容易に製造することができるることである。

【0128】

[166]各アウトレット穴内でのアーク放電又はプラズマ放電を抑制する際に助けとなる特徴は、(1) プラズマ又はプラズマ近傍の高い径方向電界領域内の高い圧力を回避するための(大径の)該ガスアウトレット穴の高コンダクタンスと、(2) ガスが該ガスアウトレット穴に達する前に、ガス圧力を供給圧力からチャンバ真空圧力まで低下させるための、(小径の)該圧力低下オリフィスの低コンダクタンスと、(3) 該圧力低下オリフィス内の径方向電界を最小化するための、該プラズマが面する電極面の上の該圧力低下オリフィスの十分な軸方向高さとを含む。この軸方向高さは、ガス圧力及び径方向の電界強度の組合せが、図23のパッシュエン曲線によって画成されるアーク放電しきい値を超えるのを防ぐのに十分である。具体的には、該圧力低下オリフィス内で、該プラズマが面する電極面上の軸方向高さは、圧力・電界の組合せが図23のパッシュエン曲線の下の高圧力・低電界位置930に対応する各オリフィス内でそのような低い径方向電界を発生させるのに十分である。該圧力低下オリフィスのこの軸方向高さは、高レベルのプラズマRF又はVHFソースパワー、典型的には、数千ワットでの条件を満たすのに十分である。該圧力低下オリフィスに要する軸方向高さは、約50～70mm程度とすることができます、この場合、該電極は、主として、例えば、アルミニウム等の金属で形成される。(図23のパッシュエン曲線は、水平軸に「圧力」のディメンションを使用し、これは、ガス穴全体の長さに沿って均一な径を有するガス穴に便利である。しかしながら、このディメンションは、実際には、その径が該穴の長さに沿って変化する穴に対する「圧力時間径」である。

【0129】

10

20

30

40

50

[167]図32は、図15のリアクタの変更例を図示し、該オーバーヘッド電極は、プラズマに面している中央の高い階段状面をプラズマを有する。図32の図面においては、図15の加熱及び冷却プレート903、904は、単純化のため省略されている。次に、図32を参照すると、階段状ガスシャワー・ヘッド電極3210のプロセスゾーンに面する面は、円筒形の中心平坦面3210aと中心平坦面3210aの高さから連続的に下がっていく平坦な環状外側面3210b、3210cとを含む。3つの階段状面は、図32の実施形態に用いられているが、いかなる適切な数も用いることができる。階段状面3210a、3210bは、環状斜行及び弓形遷移面3212aによって円滑につながっている。階段状面3210b、3210cは、環状斜行及び弓形遷移面3212bによって円滑につながっている。

10

【0130】

[168]これらの面の各々は、該面内に穿孔された多数のガスアウトレット穴3214を有し、それらの穴の径は比較的大きく、約50ミル(千分の50インチ)程度である。次に、図35の拡大断面図を参照すると、各アウトレット穴3214は、より大きな上方穴3216内に伸びている。再び図32について説明すると、薄い内側及び外側プレナム3218-1、3218-2は、電極3210の内側及び外側環状ゾーンの径方向にわたって伸びている。内側及び外側プレナム3218-1、3218-2は、ガスフローを該内側及び外側プレナムに対して別々に調整することにより、ガスフローの径方向分布を調整することができるよう、ガスアウトレットポートの内側群と外側群とを分けるように、(以下に説明するようなやり方で)結合されている。図35の拡大図は、内側プレナム3218-1のみを示す。総合して、内側及び外側プレナム3218-1、3218-2は、電極3210の上方部分3210-1と下方部分3210-2との間の境界を画成することができる。再び図35の拡大図を参照すると、上方電極部分3210-1の頂部のガスマニホールド3220は、約200~300ミルの大径を有する高コンダクタンス流路3224を通って、径方向に拡がるプレナム3218に結合されている非常に小さな圧力低下オリフィス3222にガスを供給する。圧力低下オリフィス3222は、小さく細長い軸方向に伸びる円筒形穴である。1つの実施において、10ミル程度であったそれらの直径は、下方電極区分3210-2におけるアウトレット穴3214、3216を通ったガスコンダクタンスが十分大きいとすれば、ガス圧力を、供給圧力から、少なくともほぼ該リアクタチャンバ内の真空圧力まで低下させるのに十分小さい。このため、ガスアウトレット穴3214、3216は、約50ミル程度の比較的大径である。同様に、径方向に拡がる薄いプレナム3218-1、3218-2の各々は、(該オーバーヘッド電極の面積の半分程度の面積を有する)十分大きな平坦領域を有し、その結果、各プレナム3218-1、3218-2の小さな高さにもかかわらず、各プレナム3218-1、3218-2内のガスコンダクタンスは、該プレナム内での圧力勾配を回避するのに、同様に高い。

20

【0131】

[169]小さなオリフィス3222の高圧領域とプラズマとの間の軸方向の分離を確実にするために、圧力低下オリフィス3222は、中央内側電極面3210aの上で、約70mm程度である。この軸方向のずれ(図35のD)は、電極3210の階段状構成により、該ウェハ縁部近傍の外側電極面3210cにおいてかなり大きくなっている。階段状面3210a、3210b、3210cの各々の異なる軸方向高さに適応するために、中間のガス穴3216の軸方向長さは、径方向位置の関数として、最外面3210cにおける最大長から内側又は中央面3210aにおける最小長の範囲で変化する。該電極のプラズマに面する面の上の圧力低下オリフィス3222の十分な最小軸方向ずれを保障するために、オリフィス3222によってガスが供給される大きなガス流路3224は、ガスアウトレット3214内のアーク放電又はプラズマ崩壊を防ぐ、上述した条件を満たすのに要する最小ずれとほぼ同程度の軸方向長さを有する。この距離は、約70mmである。この距離のもっとも望ましい選択は、該電極に印加されるRF又はVHFソースパワーレベルにより、及び、該真空チャンバ内のガス圧力により、変えてよい。

30

40

50

【0132】

[170]電極3210は、例えば、アルミニウム等の金属で形成することができる。図35に示す薄い炭化ケイ素保護層902'は、電極3210の底部面に付着させることができる。炭化ケイ素保護層902'は、図35の炭化ケイ素保護層902'が環状ガスアウトレット(図18)を有さず、代わりに、電極3210のガスアウトレット穴3214に合い、かつ該穴と見当合わせされているガスアウトレットのための円筒形状穴3310を有していることを除いて、図20の炭化ケイ素保護層902に対応する。炭化ケイ素保護層902'のガスアウトレット穴3310の単純な円筒形状は、図32の急勾配の階段状部分又は図33の鋭い曲率によって炭化ケイ素保護層902'を製造することを実際的 10 するものである。急勾配の又は鋭いという用語は、比較的大きな中心・縁部間のギャップ差を指し、該ギャップ差は、図32及び図33の実施例においては、300mm径に関して12mm程度、又は、約4%であった。

【0133】

[171]図36を参照すると、炭化ケイ素保護層902'は、図20を参照して論じたタイプの接着材料物質3315によって、電極3210の底部面(すなわち、下方電極区分3210-2の底部面)に接合されている。軸方向ポスト3320は、該電極の底部から伸びており、また、電極3210と保護層902'との間の間隔を決める高さを有する。電極3210は、該底部から下方へ突出し、かつ接着剤3315をプラズマから少なくとも部分的に保護するように各ガスアウトレット3214を囲む、軸方向に伸びる肩部3325を有することができる。 20

【0134】

[172]図33は、図33のオーバーヘッド電極の底部面3210a'が階段状ではなく、中央が高い曲率を有する連続的な弓形面であることを除いて、図32のリアクタと同様のリアクタを図示する。図37のグラフに示すように、図33の電極を構成する際には、異なる曲率を用いてもよい。図37は、A及びBで標示された2つの異なる実施形態のミリメートルで表した半径の関数としての(炭化ケイ素保護層902'の底部で測定した)ミリメートルで表した電極の高さを描写するグラフである。Aで標示された曲線は、一定の曲率半径を有する実施形態を描写する。他の実施形態は、多種な半径のドームとすることができる。Bで標示された曲線は、該電極の最外の10%が平坦である実施形態を描写する。図38は、半径の関数としてのエッチングレートを描写するグラフである。図38のCで標示された曲線は、図37の湾曲した電極構成Aによって得られた結果を表し、一方、Dで標示された曲線は、平坦な縁部環を有する、図37の湾曲した電極構成Bによって得られた結果を表す。図38は、平坦化された電極縁部デザイン(図37のB)が、該ウェハ縁部近傍のエッチングレートの非均一性を低減することを指示する。図37の両構成A及びBの曲率は、中心・縁部間の高さの差が、該電極の直径の約27%であるようになっている。この高さの差は、例えば、該電極の直径の約20%~100%の範囲とすることができる。 30

【0135】

[173]リアクタを、特に好ましい実施形態に関して詳細に説明してきたが、該リアクタの真の趣旨及び範囲を逸脱することなく、変形例及び変更例が実施可能であることは理解されよう。 40

【図面の簡単な説明】

【0136】

【図1】プラズマリアクタの一部側面断面図である。

【図2A】図1の同軸突出部を図示する図である。

【図2B】同軸突出部に沿った位置の関数としての電圧及び電流の定常波振幅を図示する図である。

【図3】より大きなマッチングスペースにおいて、より一定の供給されたVHFパワー レベルを保有するための高プラズマ負荷インピーダンスに応じて発生する、同軸突出部上の入力パワーのタップポイントにおける電流の減算を図示する。 50

【図4】より大きなマッチングスペースにおいて、より一定の供給されたVHFパワー レベルを維持するための高プラズマ負荷インピーダンスに応じて発生する、同軸突出部上の入力パワーのタップポイントにおける電流の加算を図示する。

【図5】図1の実施形態の周波数の関数としての低Q反射係数を図示するグラフである。

【図6】同軸突出部上の入力パワータップポイントにおける電流貢献と、突出部長に沿った定常波電流及び電圧との相互作用を図示するグラフである。

【図7】図1の同軸突出部の代替の実施形態を図示する。

【図8】更なる実施形態を図示する。

【図9】図8に対応する拡大図である。

【図10】図9の拡大図である。

10

【図11】図8の別の拡大図である。

【図12】また別の実施形態を図示する。

【図13】図12に対応する上面図である。

【図14】図13のリアクタの代替の実施形態に対応する上面図である。

【図15】図8と同様であるが、天井電極が、比較的不变のRF損失を伴う保護半導体被覆を有し、かつアーク放電に対して耐性があるプラズマリアクタを図示する。

【図16】図15の天井電極のベースの平面図である。

【図17】図15の天井電極の保護半導体層の平面図である。

【図18】天井電極内のガス分布流路として機能するアーチ形スロットを図示する、図15の天井電極の一部の拡大図である。

20

【図19】図15の天井電極の一部の側面拡大断面図である。

【図20】図19の拡大図である。

【図21】図15の天井電極の冷却プレートの平面図である。

【図22】図15の天井電極の加熱プレートの平面図である。

【図23】電界強度と、図15の天井電極の内部ガス流路内でのプロセスガスのアーク放電を可能にする圧力レベルとの組合せしきい値を描写する曲線を含むグラフである。

【図24】図15の天井電極のアーチ形スロット又はガス流路内での軸方向高さの関数としての圧力降下を図示する。

【図25】図15の天井電極のアーチ形スロット又はガス流路内での軸方向高さの関数としての電界分布を図示する

30

【図26】保護半導体層の異なる厚さに対する該半導体層の損失正接の関数としての図15の天井電極の保護半導体層におけるRF電力損失を図示するグラフである。

【図27】半導体層の損失正接の異なる値に対する温度の変動を伴う保護半導体層におけるRF電力損失の変動を描写するグラフである。

【図28】半導体層の損失正接の異なる値に対する該半導体層の厚さの変動を伴う保護半導体層におけるRF電力損失の変動を描写するグラフである。

【図29】異なる温度で硬化した接合層に対する温度の関数としての、せん断力方向と、電極ベースと保護半導体層との間の接合層にわたる大きさとを描写するグラフである。

【図30】図15の天井電極を洗浄し、清浄化する装置を図示する。

【図31】平面を有する、図1～図30を参照して開示したタイプのオーバーヘッドVHFガス分布電極を用いて得られた、半導体ウェハ上のエッティングレートの径方向分布を図示するグラフである。

40

【図32】階段状面を有するオーバーヘッドガス分布電極の一実施形態を描写する。

【図33】湾曲面を有するオーバーヘッドガス分布電極の一実施形態を描写する。

【図34】図32及び図33の成形電極を使用して得られたエッティングレートの径方向分布を図示するグラフである。

【図35】図32又は図33のいずれかの電極の一部の拡大断面図である。

【図36】図35の一部の拡大断面図である。

【図37】図33による成形電極の異なる実施形態に対する電極面の高さの径方向の分布を図示するグラフである。

50

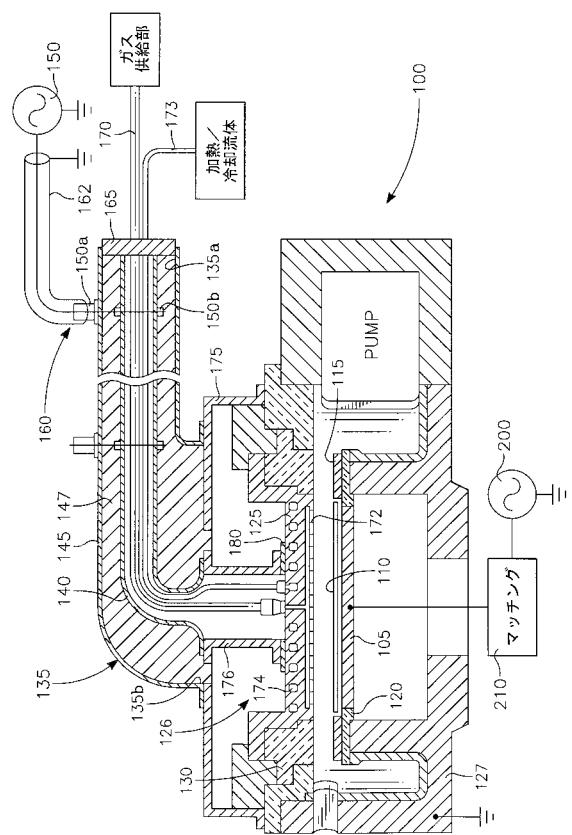
【図38】図37で表したそれぞれの実施形態を用いて得られたエッティングレートの径方向分布を図示するグラフである。

【符号の説明】

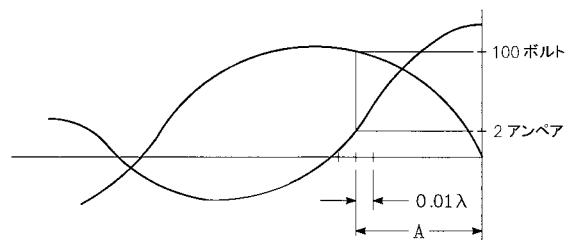
【0137】

100...リアクタチャンバ、110...半導体ウェハ、125...オーバーヘッド電極、135...同軸突出部、140...内側円筒形コンダクタ、145...外側同心円筒形コンダクタ、150...高周波電源、160...タップ。

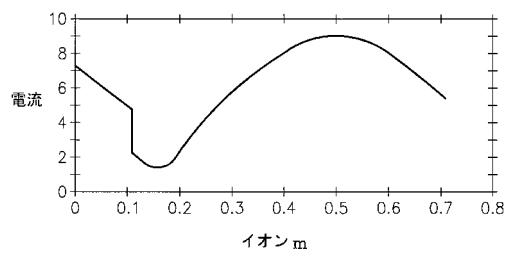
【図1】



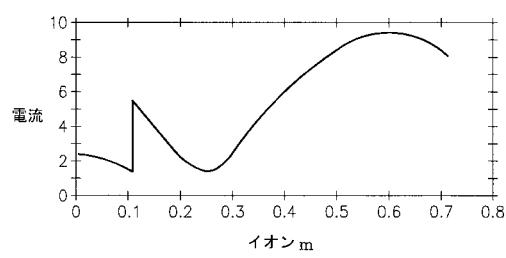
【図2B】



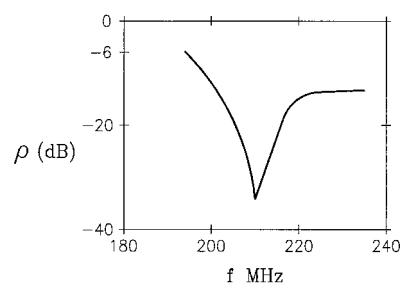
【図3】



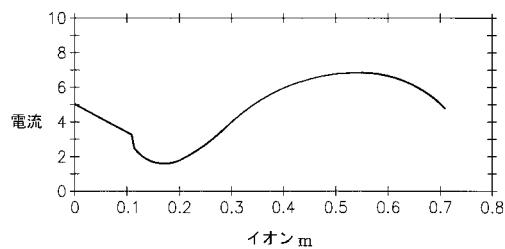
【図4】



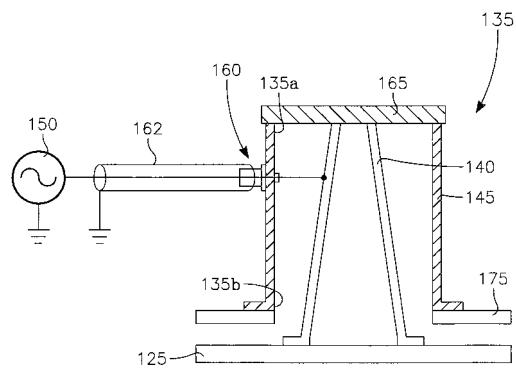
【図5】



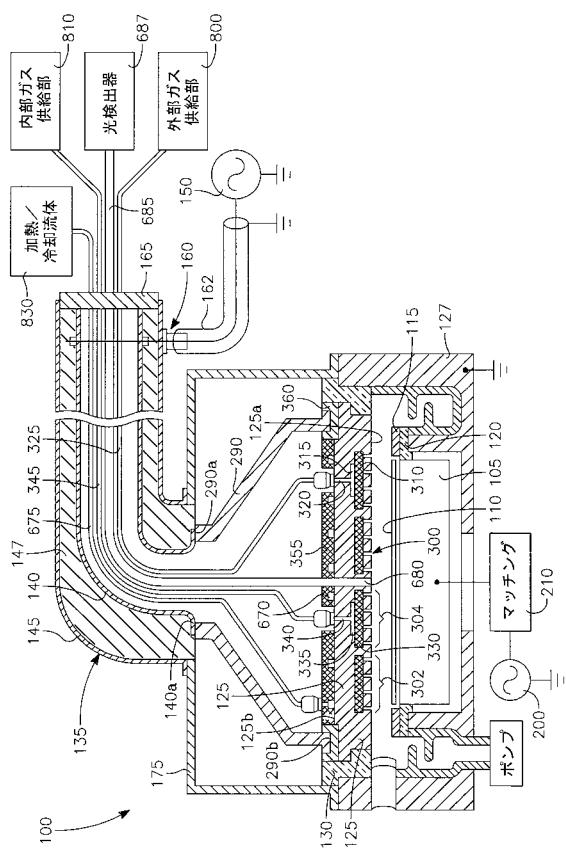
【 义 6 】



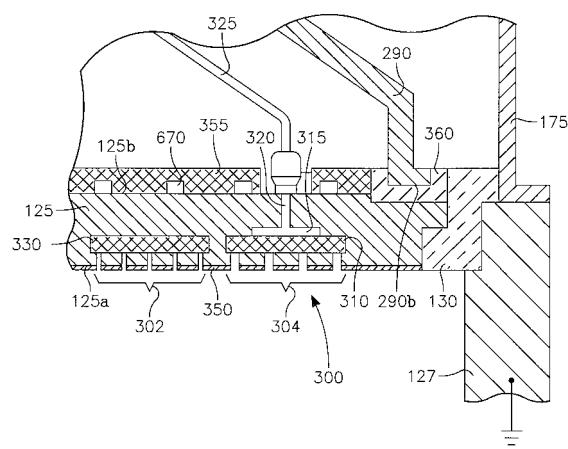
【 図 7 】



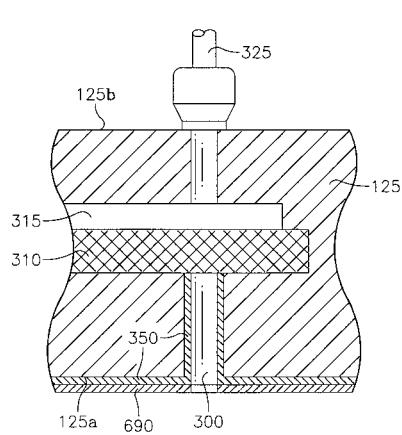
【 四 8 】



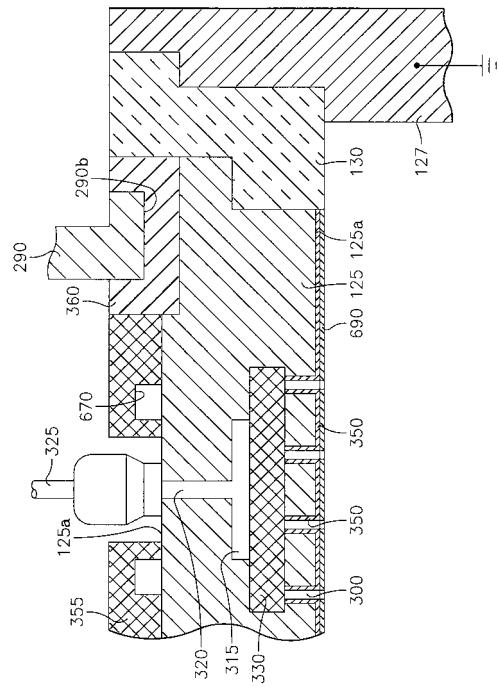
【図9】



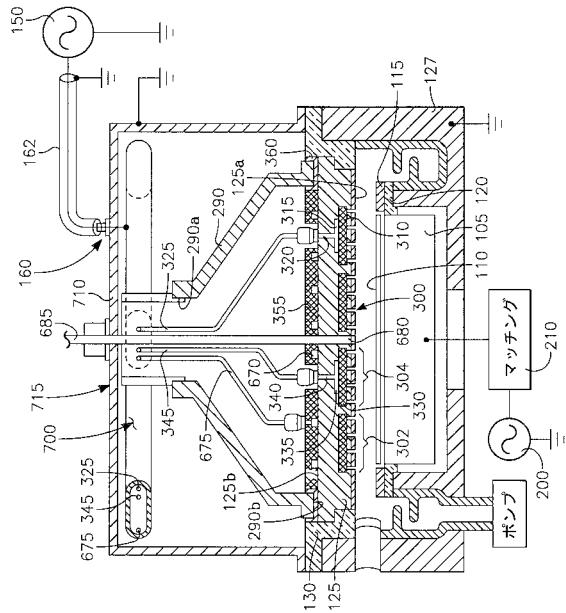
【図10】



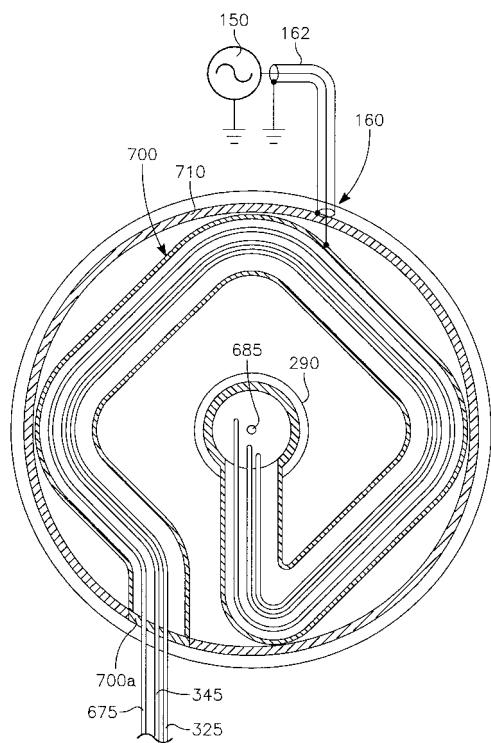
【 図 1 1 】



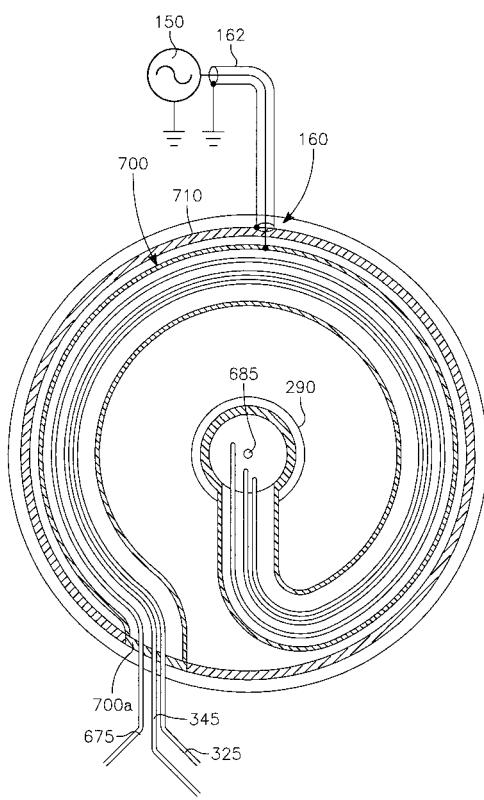
【図12】



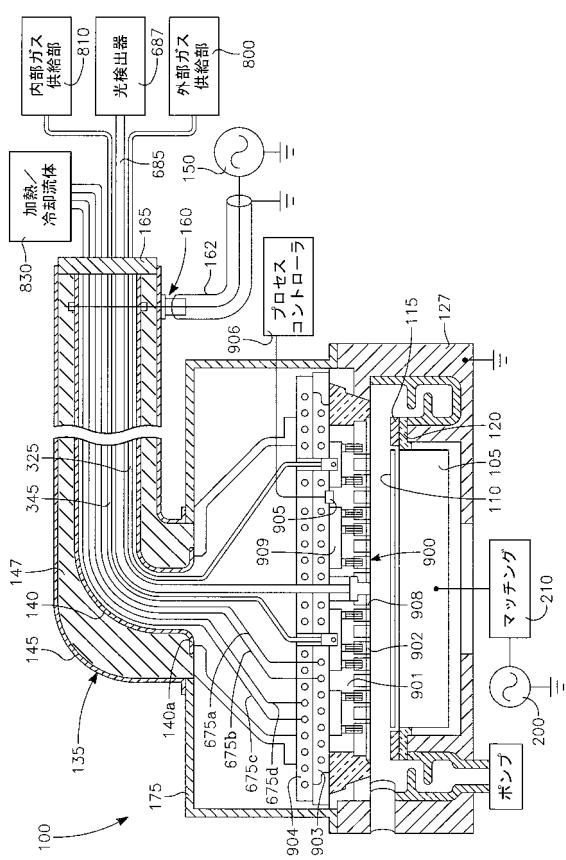
【図13】



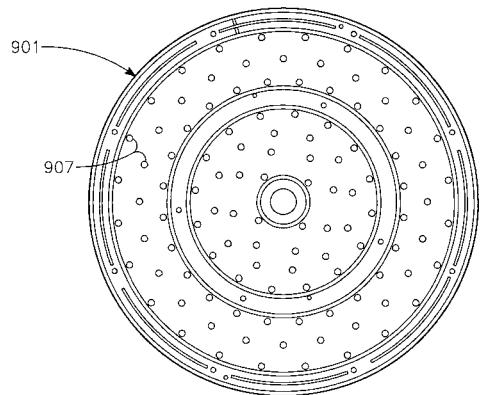
【図14】



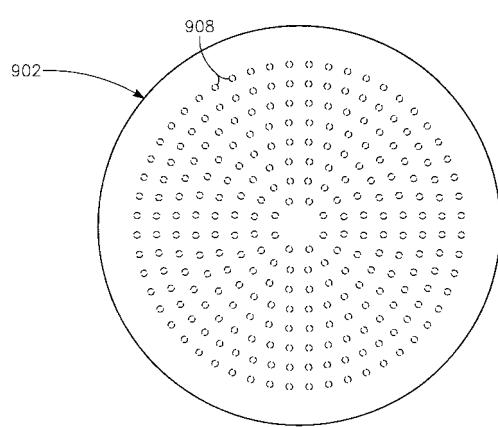
【図15】



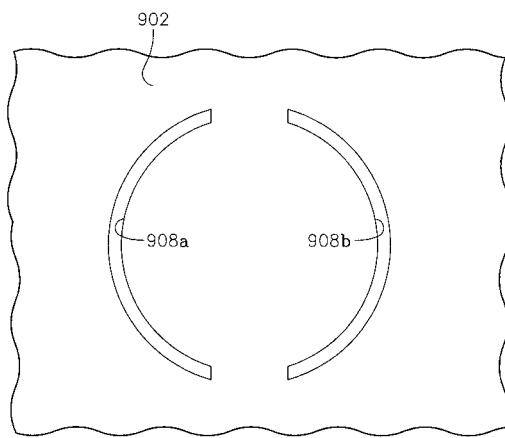
【図16】



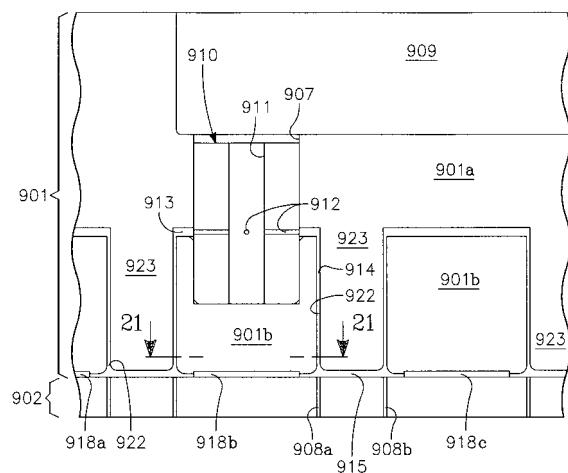
【図17】



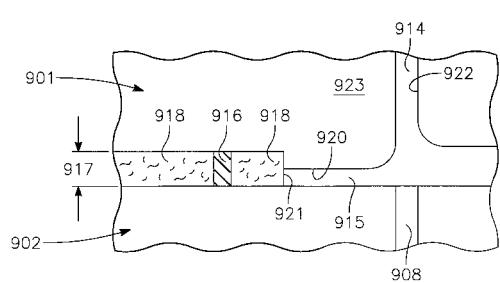
【図18】



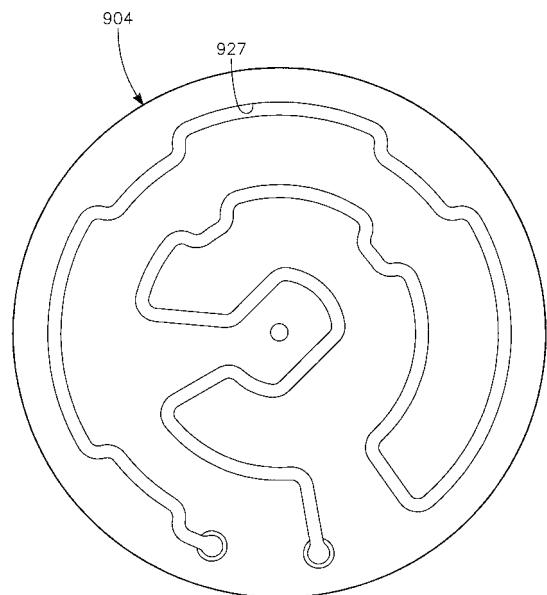
【図19】



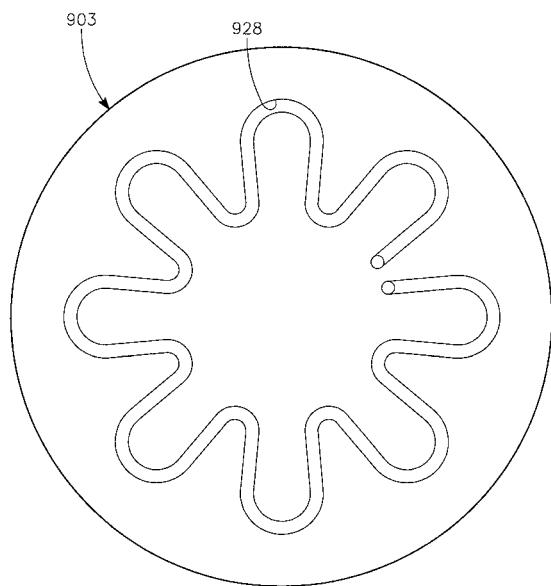
【図20】



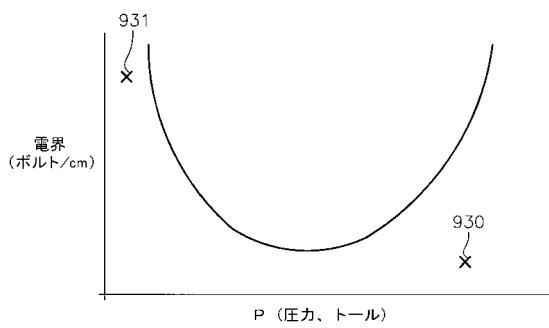
【図21】



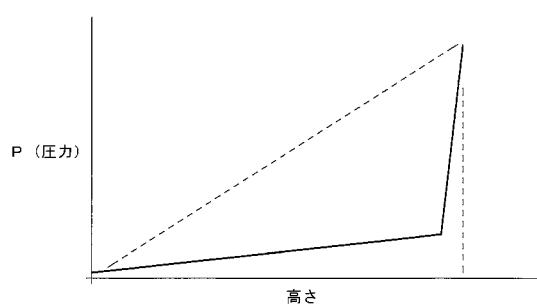
【図22】



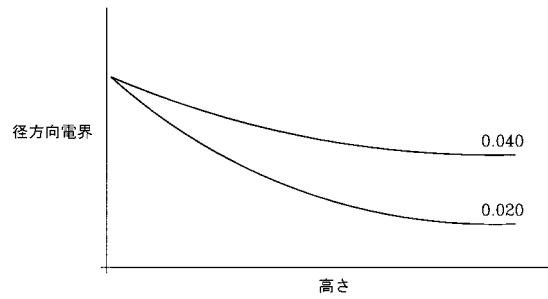
【図23】



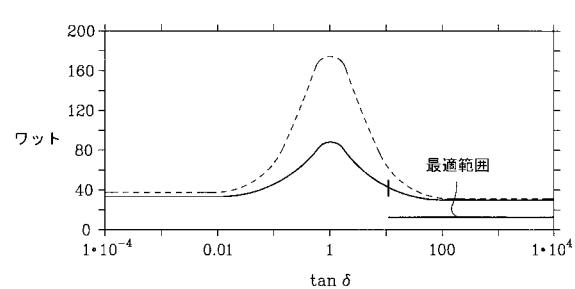
【図24】



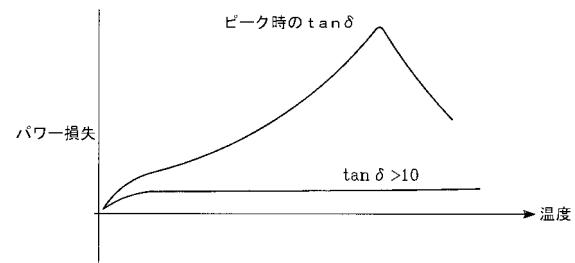
【図25】



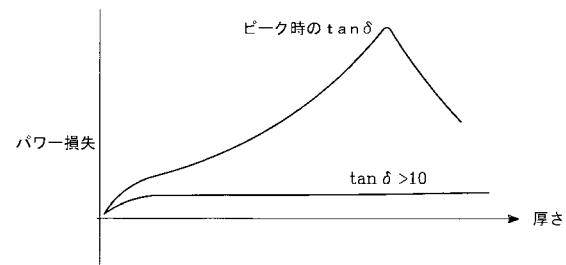
【図26】



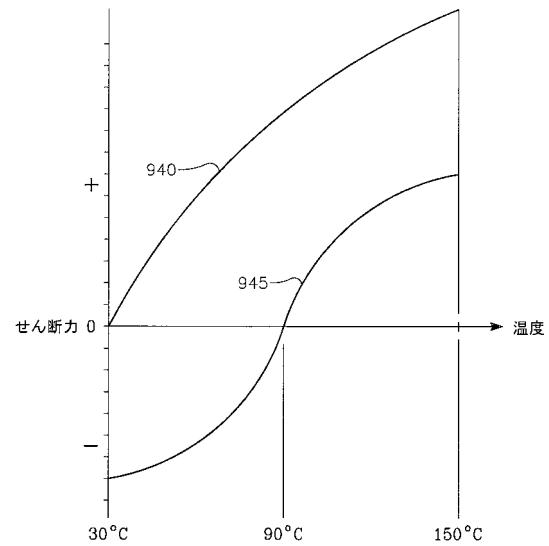
【図27】



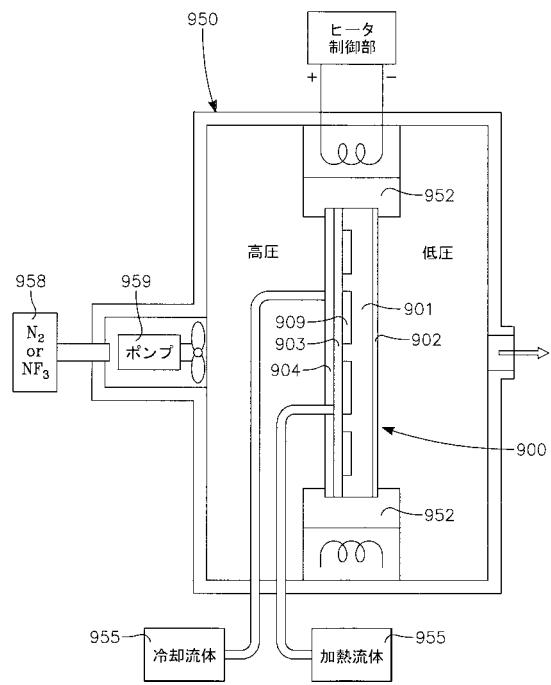
【図28】



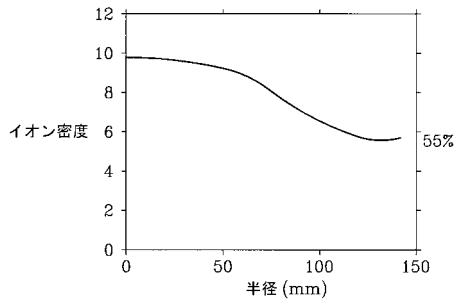
【図29】



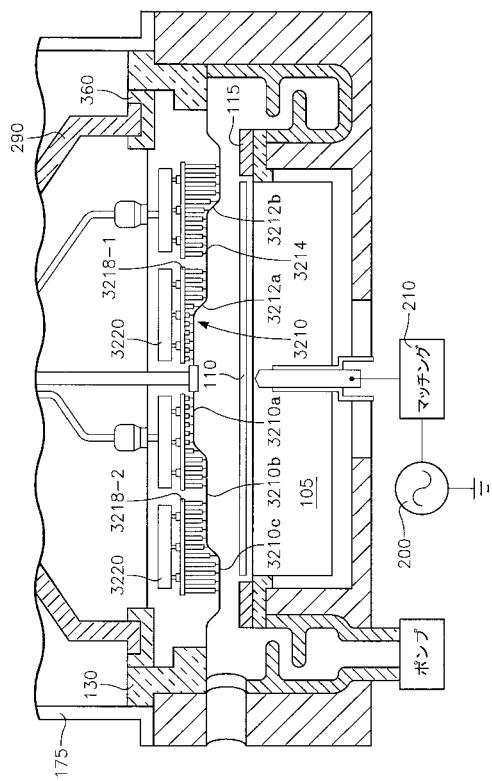
【図30】



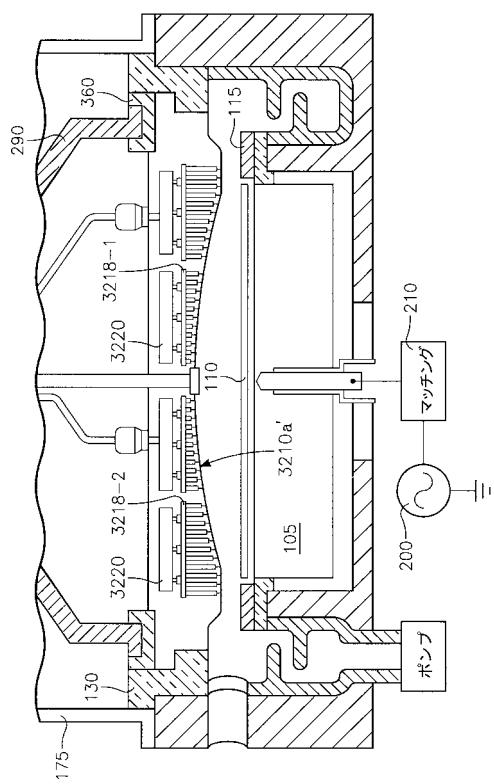
【図31】



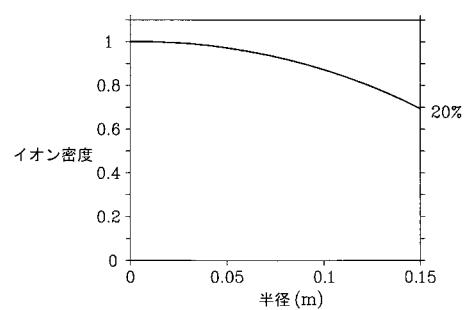
【図32】



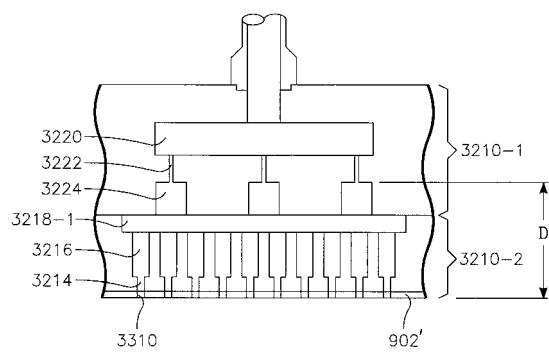
【図33】



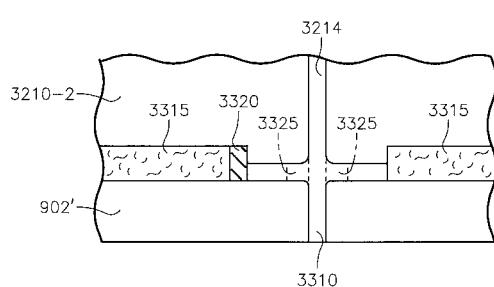
【図34】



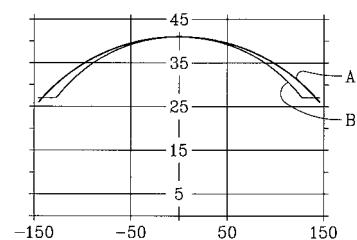
【図35】



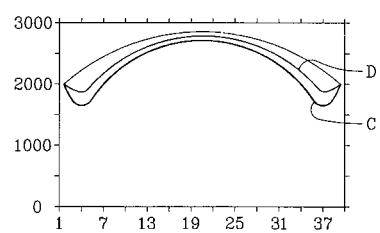
【図36】



【図37】



【図38】



フロントページの続き

(72)発明者 ダニエル ジェイ . ホフマン
アメリカ合衆国 , カリフォルニア州 , サラトガ , アーロヨ デ アルゲロ 12343
(72)発明者 オルガ レジェルマン
アメリカ合衆国 , カリフォルニア州 , ダリー シティ , ミランダ ドライヴ 185
(72)発明者 ジェイムス カルダッチ
アメリカ合衆国 , カリフォルニア州 , サニーヴェール , ガイル アヴェニュー 731
(72)発明者 堀岡 啓治
千葉県千葉市美浜区打瀬2 - 9 - 16 - 604
(72)発明者 ジャン グヨー ヤン
アメリカ合衆国 , カリフォルニア州 , サニーヴェール , レミングトン ドライヴ 721
ダブリュ .

審査官 関根 崇

(56)参考文献 國際公開第03/055287 (WO , A1)
特開2002-246371 (JP , A)
特開2000-269146 (JP , A)
特開2004-119995 (JP , A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , DB名)

H 01 L 21 / 3065
H 01 L 21 / 205
C 23 C 16 / 455
C 23 C 16 / 509
H 05 H 1 / 46