

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2006-505128

(P2006-505128A)

(43) 公表日 平成18年2月9日(2006.2.9)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
HO 1 L 21/3065 (2006.01)	HO 1 L 21/302 I O 1 B	5 F O O 4
HO 1 J 37/32 (2006.01)	HO 1 J 37/32	
HO 5 H 1/46 (2006.01)	HO 5 H 1/46 A	

審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全 32 頁)

(21) 出願番号 特願2004-548534 (P2004-548534)
 (86) (22) 出願日 平成15年10月28日 (2003.10.28)
 (85) 翻訳文提出日 平成17年6月22日 (2005.6.22)
 (86) 国際出願番号 PCT/US2003/034191
 (87) 国際公開番号 W02004/040615
 (87) 国際公開日 平成16年5月13日 (2004.5.13)
 (31) 優先権主張番号 10/065,551
 (32) 優先日 平成14年10月29日 (2002.10.29)
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

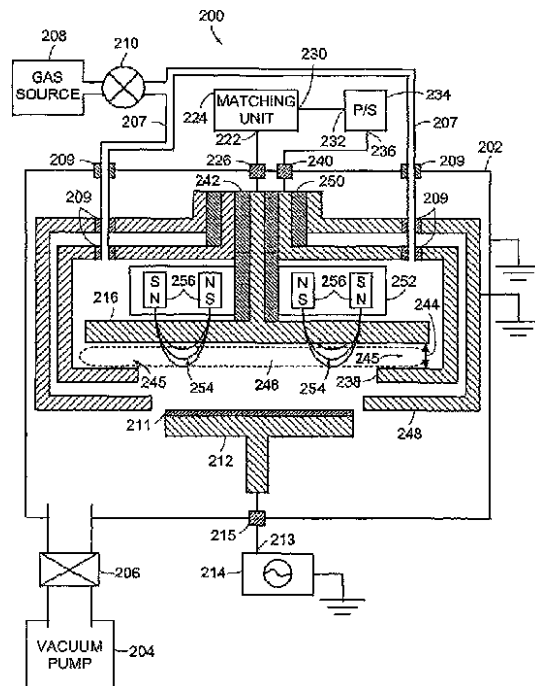
(71) 出願人 505154060
 ゾンド, インコーポレイテッド
 アメリカ合衆国 マサチューセッツ O 2
 O 4 8, マンスフィールド, ハイ スト
 リート 1 3 7 エー, ゾンド, インコーポ
 レイテッド
 (74) 代理人 100078282
 弁理士 山本 秀策
 (74) 代理人 100062409
 弁理士 安村 高明
 (74) 代理人 100113413
 弁理士 森下 夏樹

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 高電力パルスによって磁氣的に強化されたプラズマ処理

(57) 【要約】

本発明によるプラズマ処理装置には、アノードとカソードとが含まれる。イオン源は、カソードの近傍に弱電離プラズマを生成する。弱電離プラズマの近傍に磁場を生成するように、磁石が配置される。その磁場は、カソードの近傍の弱電離プラズマ内の電子を実質的に閉じ込める。電源は、アノードとカソードとの間のギャップに電場を作り出す。その電場は、弱電離プラズマ内に励起原子を生成し、カソードから二次電子を生成する。その二次電子は励起原子を電離し、それにより、強電離プラズマを生成する。電圧源は、カソードの近傍に配置される基板にバイアス電圧を印加し、それにより、基板の表面のエッチングを引き起こすように、イオンの一部が基板の表面に衝突する。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

アノードと、

該アノードに隣接して配置され、該アノードとの間にギャップを形成するカソードと、
該カソードの近傍に弱電離プラズマを生成するイオン源と、

該弱電離プラズマの近傍に磁場を生成するように配置された磁石であって、該磁場は、
該カソードの近傍の該弱電離プラズマ内の電子を実質的に閉じ込める、磁石と、

該ギャップの全体に電場を作り出す電源であって、該電場は、該弱電離プラズマ内に励起原子を生成し、該カソードから二次電子を生成することにより、複数のイオンを含む強電離プラズマを作り出す、電源と、

該カソードの近傍に配置された基板にバイアス電圧を印加する電圧源であって、該バイアス電圧により、該複数のイオンの中のイオンが該基板の表面のエッチングを引き起こすように該基板の該表面に衝突する、電圧源とを備える、磁氣的に強化されたプラズマ処理装置。

10

【請求項 2】

前記電場が準静的な電場を含む、請求項 1 に記載の装置。

【請求項 3】

前記電場がパルス状の電場を含む、請求項 1 に記載の装置。

【請求項 4】

前記電場の立上り時間を選択することにより、前記弱電離プラズマ内の前記励起原子の電離速度を増加させる、請求項 1 に記載の装置。

20

【請求項 5】

前記電場の立上り時間を選択することにより、前記基板の前記表面のエッチング速度を増加させる、請求項 1 に記載の装置。

【請求項 6】

前記弱電離プラズマが、前記アノードと前記カソードとの間に絶縁破壊状態を生み出す可能性を低減させる、請求項 1 に記載の装置。

【請求項 7】

前記複数のイオンの中の前記イオンが前記基板の前記表面に衝突することにより、該基板の該表面の実質的に均一なエッチングを引き起こす、請求項 1 に記載の装置。

30

【請求項 8】

前記複数のイオンの中の前記イオンが前記基板の前記表面に衝突することにより、異方的なエッチングを引き起こす、請求項 1 に記載の装置。

【請求項 9】

前記アノードと前記カソードとの間の体積を選択することにより、前記弱電離プラズマ内の前記励起原子および分子の電離速度を増加させる、請求項 1 に記載の装置。

【請求項 10】

前記イオン源が、UV 源と、X 線源と、電子ビーム源と、イオンビーム源と、誘導結合プラズマ源と、容量結合プラズマ源と、マイクロ波プラズマ源と、電極と、DC 電源と、AC 電源とを含む群から選択される、請求項 1 に記載の装置。

40

【請求項 11】

前記電源が、前記ギャップの全体に前記電場を作り出す電気パルスを生成する、請求項 1 に記載の装置。

【請求項 12】

前記電気パルスのパルス振幅と、パルス幅とのうちの少なくとも 1 つを選択することにより、前記基板の前記表面のエッチング速度を増加させる、請求項 11 に記載の装置。

【請求項 13】

前記バイアス電圧を選択することにより、前記基板の前記表面に衝突する前記複数のイオンの中の前記イオンのイオンエネルギーを制御する、請求項 1 に記載の装置。

【請求項 14】

50

前記電場が、前記弱電離プラズマ内にイオンと励起原子を生成し、前記カソードから二次電子を生成し、該二次電子が、該励起原子と、励起分子と、中性原子と、中性分子とを電離することにより、前記強電離プラズマを作り出す、請求項 1 に記載の装置。

【請求項 15】

原料ガスを電離することにより、カソードの近傍に弱電離プラズマを生成することと、該弱電離プラズマの近傍に磁場を生成することとであって、該磁場は、該カソードの近傍の該弱電離プラズマ内の電子を実質的に閉じ込める、ことと、

該弱電離プラズマ内の原子を励起し、該カソードから二次電子を生成する該弱電離プラズマ全体に電場を印加することとであって、該二次電子は該励起原子を電離することにより、複数のイオンを含む強電離プラズマを作り出す、ことと、

10

該カソードの近傍に配置された基板にバイアス電圧を印加することとであって、該バイアス電圧により、該複数のイオンの中のイオンが該基板の表面のエッチングを引き起こすように該基板の該表面に衝突する、こととを包含する、磁氣的に強化されたプラズマ処理方法。

【請求項 16】

前記電場を印加することが、定電力で該電場を印加することを包含する、請求項 15 に記載の方法。

【請求項 17】

前記電場を印加することが、定電圧で該電場を印加することを包含する、請求項 15 に記載の方法。

20

【請求項 18】

前記電場を印加することが、準静的な電場を印加することを包含する、請求項 15 に記載の方法。

【請求項 19】

前記電場を印加することが、前記弱電離プラズマの全体に電気パルスを印加することを包含する、請求項 15 に記載の方法。

【請求項 20】

前記電気パルスのパルス振幅と、パルス幅とのうちの少なくとも 1 つを選択することにより、前記強電離プラズマの電離速度を増加させることをさらに包含する、請求項 19 に記載の方法。

30

【請求項 21】

前記電気パルスのパルス振幅と、パルス幅とのうちの少なくとも 1 つを選択することにより、前記基板の前記表面の近傍の領域において前記強電離プラズマが実質的に均一になることをさらに包含する、請求項 19 に記載の方法。

【請求項 22】

前記電気パルスのパルス振幅と、パルス幅とのうちの少なくとも 1 つを選択することにより、前記基板の前記表面のエッチング速度を増加させることをさらに包含する、請求項 19 に記載の方法。

【請求項 23】

前記複数のイオンの中のイオンが、前記基板の前記表面に実質的に均一に衝突する、請求項 15 に記載の方法。

40

【請求項 24】

前記強電離プラズマが、前記基板の表面の近傍において実質的に均一である、請求項 15 に記載の方法。

【請求項 25】

前記弱電離プラズマの前記ピークプラズマ密度が約 10^{12} cm^{-3} 未満である、請求項 15 に記載の方法。

【請求項 26】

前記強電離プラズマの前記ピークプラズマ密度が約 10^{12} cm^{-3} よりも高い、請求項 15 に記載の方法。

50

【請求項 27】

前記基板の前記表面の温度を制御することをさらに包含する、請求項 15 に記載の方法。

【請求項 28】

前記原料ガスを前記電離することが、電場と、UV源と、X線源と、電子ビーム源と、イオンビーム源と、誘導結合プラズマ源と、容量結合プラズマ源と、マイクロ波源と、DC電源と、AC電源とのうちの少なくとも1つに該原料ガスをさらすことを包含する、請求項 15 に記載の方法。

【請求項 29】

前記バイアス電圧を選択することにより、前記基板の前記表面に衝突する前記複数のイオンの中の前記イオンのイオンエネルギーを制御する、請求項 15 に記載の方法。 10

【請求項 30】

原料ガスのポリウムを電離することにより、カソードの近傍に弱電離プラズマを形成することと、

該弱電離プラズマの近傍に磁場を作り出すことであって、該磁場は、該カソードの近傍の該弱電離プラズマ内の電子を実質的に閉じ込める、ことと、

該弱電離プラズマの全体に電気パルスを印加することにより、第1の複数のイオンを含む強電離プラズマを生成することと、

原料ガスの第2のポリウムの全体に該電気パルスを印加することにより第2の複数のイオンを含む強電離プラズマを生成する間に、原料ガスの該第2のポリウムと該強電離プラズマを交換することと、 20

該カソードの近傍に配置された基板にバイアス電圧を印加することであって、該バイアス電圧により、該第1の複数のイオンと、該第2の複数のイオンとが該基板の表面のエッチングを引き起こすように該基板の該表面に衝突する、こととを包含する、磁氣的に強化されたプラズマ処理方法。

【請求項 31】

前記強電離プラズマを交換することが、原料ガスの第2のポリウムと実質的に全ての該強電離プラズマを交換することを包含する、請求項 30 に記載の方法。

【請求項 32】

前記電気パルスのパルス振幅とパルス幅とのうちの少なくとも1つを選択することにより、前記強電離プラズマの電離速度を増加させることをさらに包含する、請求項 30 に記載の方法。 30

【請求項 33】

前記電気パルスのパルス振幅とパルス幅とのうちの少なくとも1つを選択することにより、前記基板の前記表面に隣接する領域において前記強電離プラズマが実質的に均一になることをさらに包含する、請求項 30 に記載の方法。

【請求項 34】

前記電気パルスのパルス振幅とパルス幅とのうちの少なくとも1つを選択することにより、前記基板の前記表面のエッチング速度を増加させることをさらに包含する、請求項 30 に記載の方法。 40

【請求項 35】

前記弱電離プラズマの全体に前記電気パルスを前記印加することにより、前記弱電離プラズマ内の原子を励起し、前記カソードから二次電子を生成し、該二次電子が該励起原子を電離することにより、前記強電離プラズマを作り出す、請求項 30 に記載の方法。

【請求項 36】

原料ガスを電離することにより、カソードの近傍に弱電離プラズマを生成する手段と、該弱電離プラズマの近傍に磁場を作り出す手段であって、該磁場は、該カソードの近傍の該弱電離プラズマ内の電子を実質的に閉じ込める、手段と、

該弱電離プラズマの全体に電場を印加することにより、該弱電離プラズマ内の原子を励起し、該カソードから二次電子を生成する手段であって、該二次電子が該励起原子を電離 50

することにより、複数のイオンを含む強電離プラズマを作り出す、手段と、

該カソードの近傍に配置された基板にバイアス電圧を印加する手段であって、該バイアス電圧により、該複数のイオンの中のイオンが該基板の表面のエッチングを引き起こすように該基板の該表面に衝突する、手段と

を備える磁氣的に強化されたプラズマ処理装置。

【請求項 37】

原料ガスのボリュームを電離することにより、カソードの近傍に弱電離プラズマを形成する手段と、

該弱電離プラズマの近傍に磁場を作り出す手段であって、該磁場は、該カソードの近傍の該弱電離プラズマ内の電子を実質的に閉じ込める、手段と、

該弱電離プラズマの全体に電気パルスを印加することにより、第 1 の複数のイオンを含む強電離プラズマを生成する手段と、

原料ガスの第 2 のボリュームの全体に該電気パルスを印加することにより第 2 の複数のイオンを含む強電離プラズマを生成する間に、原料ガスの該第 2 のボリュームと該強電離プラズマを交換する手段と、

該カソードの近傍に配置された基板にバイアス電圧を印加する手段であって、該バイアス電圧により、該第 1 の複数のイオンと、該第 2 の複数のイオンとが該基板の表面のエッチングを引き起こすように該基板の該表面に衝突する、手段とを備える、磁氣的に強化されたプラズマ処理装置。

【発明の詳細な説明】

【背景技術】

【0001】

プラズマ処理は、半導体製造産業などの多くの産業において広く用いられている。例えば、プラズマエッチングは、半導体製造産業において広く用いられている。表面から材料を除去するために用いられるプラズマエッチング処理には、スパッタエッチング、純化学的エッチング (pure chemical etching)、イオンエネルギー誘起エッチング (ion energy driven etching)、および、イオンインヒビターエッチング (ion inhibitor etching) の 4 つの基本的な典型がある。

【0002】

スパッタエッチングでは、高エネルギーイオンの衝撃により、基板の表面から原子を取り出す。純化学的エッチングでは、プラズマ放電を用いることにより、ガス相のエッチャント原子を供給し、そのエッチャント原子は、基板の表面と化学的に反応することにより、ガス相の生成物を形成する。イオン強化エネルギー誘起エッチングでは、プラズマ放電を用いることにより、エッチャントおよび高エネルギーのイオンを基板の表面に供給する。イオンインヒビターエッチングでは、放電を用いることにより、エッチャント、高エネルギーのイオン、および、インヒビター前駆体分子を供給し、そのインヒビター前駆体分子が、基板に堆積することにより、保護層フィルムを形成する。周知のスパッタエッチングシステムの均一性およびエッチング速度を高めることは望ましい。

【発明の開示】

【課題を解決するための手段】

【0003】

本発明は、特に、詳細な説明において記載される。添付の図面とともに以下の記載を参照することによって、本発明の上記の利点およびさらなる利点はより良く理解され得る。図面において、類似した数字は、様々な図における類似した構造要素および特徴を示す。図面は必ずしもその縮尺である必要はなく、本発明の原理の図示を重視したものである。

【発明を実施するための最良の形態】

【0004】

(詳細な説明)

図 1 は、無線周波数 (R F) 電源 102 を有する周知の磁気強化エッチング装置 100

10

20

30

40

50

の断面図を示す。周知の磁気強化エッチング装置 100 には、プラズマ 105 を閉じ込めるための真空チャンバ 104 が含まれる。真空ポンプ 106 は、管 108 を介して真空チャンバ 104 と流動的に結合される。真空ポンプ 106 は、真空チャンバ 104 を高真空に真空引きし、そのチャンバをプラズマ処理に適する圧力に保つように適合される。アルゴンガス供給源などのガス供給源 109 は、ガス注入口 110 を介して真空チャンバ 104 にガスを導入する。バルブ 112 は、チャンバ 104 へのガス流量を制御する。

【0005】

磁気強化エッチング装置 100 にはカソード 114 も含まれる。カソード 114 は、通常、円板の形をした電極である。カソード 114 は、伝送線 122 によって、ブロッキングコンデンサ 120 の第 1 の電極 118 に電気接続される。ブロッキングコンデンサ 120 の第 2 の電極 124 は、RF 電源 102 の第 1 の出力 126 に結合される。絶縁体 128 は、真空チャンバ 104 の壁に伝送線 122 を貫通させるために用いられるが、絶縁体 128 によって、カソード 114 を真空チャンバ 104 と絶縁させる。

10

【0006】

アノード 130 は、真空チャンバ 104 においてカソード 114 の反対側に配置される。アノード 130 は、送電線 132 によってグラウンドに電氣的に結合される。RF 電源 102 の第 2 の出力 134 もグラウンドに電氣的に結合される。絶縁体 136 を用いることにより、真空チャンバ 104 の壁に送電線 132 を貫通させて、アノード 130 を真空チャンバ 104 と絶縁する。真空チャンバ 104 は、グラウンドにも電氣的に結合され得る。

【0007】

カソード 114 の上面に実質的に平行な方向に磁場 142 を発生させるために、一对の磁石 140 をチャンバ 104 の外部に配置させる。カソード 114 の上に基板 144 を配置させる。

20

【0008】

動作中に、後にエッチングされる基板 144 をカソード 114 の上に配置させる。真空ポンプ 106 を用いて、チャンバ 104 を高真空に十分真空引きする。ガス注入口 110 を介して、ガス供給源 109 からチャンバ 104 にエッチングガスを導入する。RF 電源 102 は、ブロッキングコンデンサ 120 を介してカソード 114 に、13.56 MHz の高周波数の放射線を提供する。

【0009】

カソード 114 に提供される高周波数の放射線によって、カソード 114 の上面に垂直な方向に高周波数の電場 146 が作り出される。磁場 142 と、高周波数の電場 146 とは、基板 144 の上の領域 148 おいて、交差する。電子は領域 148 内に閉じ込められ、エッチングガスからの中性原子と衝突する。その衝突によって、高密度のプラズマ 105 が生成される。負のバイアスがかけられたカソード 114 は、プラズマ 105 中の正に帯電したイオンを十分に加速して引き付ける。それによって、イオンは基板 144 の表面をエッチングする。

30

【0010】

カソード 114 とアノード 130 との間に印加される RF 電力は、真空チャンバ 104 においてエッチングガスを電離し、プラズマ 105 を作り出すに十分な大きさである。プラズマは、正のイオンと負の電子とから成る。典型的な RF 駆動電圧は、500 V ~ 5000 V の間にあり、カソード 114 とアノード 130 との間隔 138 は、約 70 mm である。典型的な圧力は、10 m Torr ~ 100 m Torr の範囲にある。典型的な電力密度は、0.1 W/cm² ~ 1 W/cm² の範囲にある。典型的なプラズマ密度は、10⁹ cm⁻³ ~ 10¹¹ cm⁻³ であり、電子温度は、3 eV のオーダーである。

40

【0011】

スパッタエッチング用のプラズマ 105 を生成する電離プロセスは、電子衝突による直接電離または原子電離と呼ばれることもあり、次のように記述し得る。

【0012】



50

ここで、Arは、エッチングガス中の中性のアルゴン原子を表し、 e^- は、カソード114とアノード130との間に印加される電圧に応答して生成されるイオン化用電子を表す。中性のアルゴン原子とイオン化用電子との衝突によって、アルゴンイオン(Ar^+)と2つの電子が得られる。

【0013】

カソード114からの二次電子放出によって、プラズマ放電は保持される。しかし、典型的な動作圧力が比較的高い必要があるために、二次電子はアノード130またはチャンバ104の壁から離れない。プラズマエッチングを含めた大抵のプラズマ処理において、このような圧力は最適ではない。

【0014】

電離を引き起こす電子は、一般的には、磁石140により作り出される磁場に閉じ込められる。磁場閉じ込めは、磁力線が電極の表面に平行な閉じ込め領域148において最も強い。一般的に、閉じ込め領域148におけるプラズマ内の正に帯電したイオンの濃度は、チャンバ104内のどの領域におけるその濃度よりも高い。従って、基板144は、正に帯電したイオンの濃度がより高い領域の近傍領域において、より速くエッチングされる。その領域における速いエッチングによって、望ましくない基板144の不均一なエッチングが得られる。

【0015】

プラズマに印加するRF電力を激増することだけでは、エッチングの均一性を改善するより均一でより密度の高いプラズマの形成は得られない。磁場が電極のいたるところにわたって均一でなく、電極付近の磁場分布は電子を閉じ込めるに適當でないために、エッチングは改善されない。その上、均一性の十分な増加の達成に必要な電力量を印加することによって、チャンバ104内に望ましくない放電(アーク放電)を引き起こす絶縁破壊状態を発生させる可能性が増し得る。

【0016】

比較的高電力のパルスを周期的に印加するが、放出電力の平均を低いままにし得るために、プラズマに印加される直流(DC)電力をパルス状にすることは、有利であり得る。その上、絶縁破壊状態をもたらす可能性を低減するように、電圧パルスの幅を選択し得る。しかしながら、パルス幅に関わらず、非常に高電力のパルスを用いると、絶縁破壊状態になり得る。望ましくない電気放電は、エッチング処理を阻害し、真空チャンバ104の汚染を引き起し、基板および/またはすでに製造された処理層を傷つけ得る。その上、マグネトロン型のプラズマ発生装置を用いると、閉じ込めをかなり改善する磁場が得られる。マグネトロン型のプラズマ発生装置において生成される電子は、閉じ込めをかなり改善する $E \times B$ ドリフト電流を生成する閉ループの経路を有する。

【0017】

図2は、本発明による磁氣的に強化されたプラズマ処理装置(magnetically enhanced plasma processing apparatus)200の実施形態の断面図を示す。一実施形態において、磁気強化プラズマ処理装置200は磁気強化反応性イオンエッチング用に構成され得る。別の実施形態において、磁気強化プラズマ処理装置200はスパッタエッチング用に構成され得る。

【0018】

磁気強化プラズマ処理装置200には、真空チャンバなどのチャンバ202が含まれる。チャンバ202は、真空バルブ206を介して真空ポンプ204と流動的に結合される。一実施形態において、チャンバ202はグランド電位に電氣的に結合される。

【0019】

チャンバ202は、1つまたは複数のガスライン207によって、原料ガス供給源208と結合される。一実施形態において、ガスライン207は、絶縁体209によって、チャンバおよび他の構成要素と絶縁される。その上、直列絶縁カプラー(図示していない)を用いて、ガスライン207を原料ガス供給源208と絶縁し得る。ガス流制御システム210は、チャンバ202へのガス流を制御する。ガス供給源208は、全てのタイプの

10

20

30

40

50

原料ガス、例えばアルゴンを含み得る。実施形態によっては、原料ガスは、種々のガスの混合ガスである。その種々のガスには、反応性ガスおよび非反応性ガスが含まれる。一実施形態において、原料ガスは、希ガスまたは希ガスの混合ガスである。

【0020】

未処理の基板211は、チャンバ202において基板支持体212に支えられる。基板211は、全てのタイプの加工物、例えば半導体ウェーハであり得る。一実施形態において、基板支持体212は、バイアス電圧源214の出力213に電氣的に結合される。絶縁体215は、バイアス電圧源214をチャンバ202と絶縁する。一実施形態において、バイアス電圧源214は、無線周波数(RF)電源などの交流(AC)電源である。別の実施形態(図示していない)において、基板支持体212は、グランド電位に結合されるか、または電氣的にフローティングである。

10

【0021】

磁気強化プラズマ処理装置200には、カソード216も含まれる。一実施形態において、カソード216は金属から成る。一実施形態において、カソード216は、ステンレス鋼などの化学的に不活性な材料から成る。カソード216から基板211への距離は、数センチメートルから約100センチメートルまで変化し得る。

【0022】

カソード216は整合器224の出力222に結合される。絶縁体226は、カソード216をチャンバ202の接地した壁と絶縁する。整合器224の入力230はパルス電源234の第1の出力232に結合される。パルス電源234の第2の出力236はアノード238に結合される。絶縁体240は、アノード238をチャンバ202の接地した壁と絶縁する。別の絶縁体242は、アノード238をカソード216と絶縁する。

20

【0023】

一実施形態(図示していない)において、パルス電源234の第1の出力232はカソード216に直接結合される。一実施形態(図示していない)において、パルス電源234の第2の出力236およびアノード238は、ともにグランドに結合される。一実施形態(図示していない)において、パルス電源234の第1の出力232は、負電圧のインパルスをカソード216に結合する。別の実施形態(図示していない)において、パルス電源234の第2の出力236は、正電圧のインパルスをアノード238に結合する。

【0024】

一実施形態において、パルス電源234は5kV~10kVのオーダーのピーク電圧レベルを生成する。一実施形態において、動作電圧は約50V~約1,000Vの間にある。一実施形態において、パルス電源234は、プラズマの体積に応じて、約1A~約5,000Aの放電電流を保つ。典型的な動作電流は、プラズマの体積に応じて変わり得、約100A未満の電流から約数千Aよりも大きな電流の間にある。一実施形態において、パルス電源234により生成されるパルスの繰返し率は1kHz未満である。一実施形態において、パルス電源234により生成されるパルスのパルス幅は、実質的に、約1マイクロ秒~数秒の間にある。

30

【0025】

アノード238とカソード216との間に形成されるギャップ244が、アノード238とカソード216との間の領域245に電流が流れ得るに十分であるように、アノード238は配置される。一実施形態において、ギャップ244の幅は、約0.3cm~約10cmの間にある。カソード216の表面積とギャップの大きさから領域245の体積が決定される。ギャップ244の大きさおよび領域245の総体積は、本明細書に記載する電離プロセスにおけるパラメータである。

40

【0026】

アノードシールド248はアノード238の近傍に配置され、電気遮蔽として機能して、アノード238をプラズマと電気絶縁する。一実施形態において、アノードシールド248はグランド電位に結合される。絶縁体250は、アノードシールド248をアノード238と絶縁するように配置される。

50

【0027】

磁気強化プラズマ処理装置200には磁石集合体252も含まれる。一実施形態において、磁石集合体252は、カソード216の近傍に磁場254を生成するように適合される。磁石集合体252には、永久磁石256が含まれ得、またはその代わりに電磁石（図示していない）が含まれ得る。磁石集合体252の配置は、磁場254の所望の形状および強さに応じて、変更され得る。磁石集合体252は、バランスのとれた配置、または、バランスの取れていない配置を取り得る。

【0028】

一実施形態において、磁石集合体252には切り替え可能な電磁石が含まれ、切り替え可能な電磁石は、カソード216の近傍にパルス状の磁場を生成する。実施形態によっては、プラズマ処理に応じて、チャンバ202の周囲およびチャンバ202のいたる所の様々な位置に、追加の磁石集合体（図示していない）が配置される。

10

【0029】

一実施形態において、磁気強化プラズマ処理装置200は、カソード216の近傍に磁場254を生成することによって、作動する。図2に示される実施形態において、永久磁石256は持続的に磁場254を生成する。別の実施形態において、電磁石（図示していない）は、電磁石に結合された電流源に電圧を印加することによって、磁場254を生成する。一実施形態において、磁場254の強さは約50 Gauss～約2,000 Gaussの間にある。磁場254の生成後、ガス流制御システム210を用いて、チャンバ202にガス供給源208から原料ガスを供給する。

20

【0030】

一実施形態において、チャンバ202のカソード216とアノード238との間に原料ガスを直接供給する。カソード216とアノード238との間に原料ガスを直接注入することによって、カソード216とアノード238との間のガス流速が増加し得る。そのガス流速の増加によって、より長い持続時間のインパルスが可能になる。従って、より高密度のプラズマが形成され得る。図3とともに、原料ガスの流量についてさらに記載する。

【0031】

一実施形態において、パルス電源234は、弱電離プラズマ（weakly-ionized plasma）を発生させるイオン源の構成要素である。パルス電源234は、カソード216とアノード238との間に電圧パルスを印加する。一実施形態において、パルス電源234は、カソード216に負の電圧パルスを印加する。弱電離プラズマがアノード238とカソード216との間の領域246において発生するように、電圧パルスの大きさおよび形状が選択され得る。

30

【0032】

弱電離プラズマは、予備電離プラズマとも呼ばれる。一実施形態において、予備電離プラズマのプラズマ密度のピークは、アルゴン原料ガスに対して、約 10^6 cm^{-3} ～約 10^{12} cm^{-3} の間にある。一実施形態において、チャンバ内の圧力は約 10^{-3} Torr から約 10 Torr へと変化する。予備電離プラズマのプラズマ密度のピークは、特定のプラズマ処理システムの特性に依存する。

【0033】

一実施形態において、パルス電源234は、約0.1 A～約100 Aの間の放電電流を伴う約100 V～約5 kVの間の初期電圧を有する低電力パルスを生成することにより、弱電離プラズマを生成する。実施形態によっては、パルス幅は約0.1 マイクロ秒～約100 秒のオーダーであり得る。パルスの特定のパラメータについて、以下に、より詳細に記載する。

40

【0034】

一実施形態において、カソード216とアノード238との間に原料ガスを供給する前に、パルス電源234は、カソード216とアノード238との間に電圧を印加する。別の実施形態において、カソード216とアノード238との間に原料ガスを供給した後、パルス電源234は、カソード216とアノード238との間に電圧を印加する。

50

【 0 0 3 5 】

一実施形態において、直流（DC）電源（図示していない）を用いて、弱電離プラズマまたは予備電離プラズマを生成するか、または、保持する。この実施形態において、DC電源は、予備電離プラズマを点火するに十分高い電圧を生成するように適合される。一実施形態において、DC電源は、カソード216とアノード238との間に数キロボルトの初期電圧を生成することにより、予備電離プラズマを発生させ、保持する。カソード216とアノード238との間の初期電圧は、プラズマ放電電圧を生成するが、そのプラズマ放電電圧は100V～1000Vのオーダーであり、放電電流は0.1A～100Aのオーダーである。

【 0 0 3 6 】

予備電離プラズマを発生させ、保持するために必要な直流電流は、プラズマの体積に依存する。その上、予備電離プラズマを発生させ、保持するために必要な電流は、領域245内の磁場の強さに依存する。例えば、一実施形態において、プラズマの体積と領域245内の磁場の強さとに応じて、DC電源は約1mA～約100Aの間にある電流を生成する。DC電源は、原料ガスの導入前に、カソード216とアノード238との間の初期ピーク電圧を生成し、保持するように適合され得る。

【 0 0 3 7 】

別の実施形態において、交流（AC）電源（図示していない）を用いて、弱電離プラズマまたは予備電離プラズマを生成し、保持する。例えば、電子サイクロトロン共鳴（ECR）、容量結合プラズマ（CCP）放電、または、誘導結合プラズマ（ICP）放電を用いて、弱電離プラズマまたは予備電離プラズマを生成し得、または保持し得る。弱電離プラズマを生成し、保持するために必要な電力は、AC電源を用いる場合の方がDC電源を用いる場合と比べて小さくなり得る。その上、多数の他の方法を用いても、予備電離プラズマまたは弱電離プラズマを生成し得る。他の方法とは、紫外線法、X線法、電子ビーム法、イオンビーム法、または電離フィラメント法などである。実施形態によっては、弱電離プラズマは領域245の外側に形成され、次いで、領域245へと拡散する。

【 0 0 3 8 】

弱電離プラズマまたは予備電離プラズマを形成することによって、カソード216とアノード238との間に高電力パルスを印加するときにチャンバ202内がブレイクダウン状態になる可能性は実質的になくなる。カソード領域一面に弱電離プラズマまたは予備電離プラズマを均一に分布させることによって、高電力パルスを印加するときに、より均一な強電離プラズマ（strongly-ionized plasma）が得られる。ブレイクダウン状態になる可能性は実質的になくなる。これは、弱電離が、プラズマを介する電気伝導を提供する低レベルの電離を有するためである。この伝導によって、プラズマに高電力を印加するときにブレイクダウン状態になる可能性は、大いに低減されるか、または、防止される。

【 0 0 3 9 】

弱電離プラズマが形成されるとすぐに、カソード216とアノード238との間に高電力パルスが生成される。一実施形態において、パルス電源234は高電力パルスを生成する。高電力パルスの所望の電力レベルは様々な要因に依存し、その要因には、エッチングプロセスの性質、所望のエッチング速度、所望の予備電離プラズマの密度、および、所望のプラズマの体積が含まれる。一実施形態において、高電力パルスの電力レベルは、約1kW～約10MWの範囲にある。

【 0 0 4 0 】

各高電力パルスは所定の時間保たれ、一実施形態において、その時間は約1マイクロ秒～約10秒の間にある。一実施形態において、高電力パルスの繰返し周波数または繰返し率は、約0.1Hz～約1kHzの範囲にある。望ましくない基板の加熱を最小限にするために、プラズマの体積に応じて、パルス電源234により生成される電力の平均は、1MW未満であり得る。一実施形態において、カソード216、アノード238、および基板支持体212のうちの少なくとも1つの熱エネルギーは、ヘリウム冷却などの液体冷却

10

20

30

40

50

またはガス冷却（図示していない）によって持去られるか、または、分散される。

【0041】

高電力パルスにより、カソード216とアノード238との間に強電場が生成される。この強電場は、実質的に、カソード216とアノード238との間のギャップ244全体にわたる領域245に存在する。一実施形態において、電場はパルス状の電場である。他の実施形態において、電場は準静的な電場である。本明細書において、準静的な電場とは、電子の中性ガス粒子との衝突時間と比べてかなり長い電場変動の特性時間を有する電場のことを指す。上記の電場変動の時間は、10秒のオーダーであり得る。強電場の強さおよび位置について、以下により詳細に記載する。

【0042】

高電力パルスにより、弱電離プラズマから、高電離プラズマまたは強電離プラズマが発生する。例えば、圧力が約100mTorr～約10Torrのオーダーである場合には、この強電離プラズマから形成される放電電流は5kAのオーダーであり得、放電電圧は50V～500Vの範囲にある。一実施形態において、カソード216からのスパッタリング材料の確率が低くなるように、放電電圧は比較的強く選ばれる。

【0043】

一実施形態において、基板211はカソード216よりも負にバイアスがかけられている。強電離プラズマにおける正に帯電したイオンは基板211に向かって加速する。加速されたイオンは基板211の表面に衝突し、それによって、基板211の表面がエッチングされる。本発明の強電離プラズマにより、非常に均一で非常に高速度のエッチングが得られる。

【0044】

本発明の一実施形態において、強電離プラズマのイオンフラックス密度および強電離プラズマ内のイオンのイオンエネルギーは独立に制御される。一実施形態において、電力レベルと、パルス電源234により生成される高電力パルスの持続時間とを調節することにより、イオンフラックス密度を制御する。一実施形態において、バイアス電源214（図2）により生成される負の基板バイアス電圧を調節することにより、基板211に衝突し、基板211の表面をエッチングさせるイオンのイオンエネルギーを制御する。

【0045】

一実施形態において、強電離プラズマは、領域246に均一に拡散する傾向があり、従って、より均一なプラズマのボリューム（volume）を作り出す傾向にある。この均一な拡散により、従来のプラズマエッチングシステムと比べて、より均一な態様で、加速されたイオンが基板211の表面に衝突する。その結果、基板の表面はより均一にエッチングされる。一実施形態において、基板211および/または磁石集合体252を回転させる必要なしに、この均一性は得られる。図6A～図6Dを参照して、この均一な拡散を引き起こす物理メカニズムについて、以下に記載する。

【0046】

図3は、図2のカソード216およびアノード238の断面図を示す。動作中において、原料ガス264はカソード216とアノード238との間を流れる。一実施形態において、カソード216とアノード238との間の領域245において比較的高いガス体積交換が引き起こされるために、原料ガス264の流量が選択される。

【0047】

原料ガス264をまたぎカソード216とアノード238との間に予備電離電圧を印加し、弱電離プラズマを形成する。弱電離プラズマは、通常、領域245内に形成され、原料ガス264が引続き流れるように、領域266へと拡散する。一実施形態（図示していない）において、磁石集合体252は、カソードの中心に広がる領域245内に磁場254を作り出すように適合される。上記の磁場は、電子の領域245から領域266への拡散を促進する。他の実施形態において、領域245内の弱電離プラズマのボリュームは、速やかに原料ガス264の新たなボリュームに置換される。弱電離プラズマ内の電子は、実質的に、磁場254により領域266内に閉じ込められる。

10

20

30

40

50

【 0 0 4 8 】

領域 2 4 5 内における弱電離プラズマの形成の後に、カソード 2 1 6 とアノード 2 3 8 との間に高電力パルスを印加する。この高電力パルスは、カソード 2 1 6 とアノード 2 3 8 との間の領域 2 4 5 における強電場 2 6 0 を生成する。強電場 2 6 0 により、弱電離プラズマ内において、中性原子、電子、およびイオン間の衝突が引き起こされる。その衝突により、弱電離プラズマ内に励起したアルゴン原子が多数生成される。一実施形態において、カソード 2 1 6 およびアノード 2 3 8 は、スパッタエッチング材料処理用に適合される。

【 0 0 4 9 】

弱電離プラズマにおける励起原子の蓄積は、電離プロセスを変える。一実施形態において、強電場 2 6 0 は、原子原料ガスの多段階電離プロセスを促進する。多段階電離プロセスは、強電離プラズマが形成される速度を有意に増加させる。多段階電離プロセスの効率は、弱電離プラズマにおける励起原子の密度の増加に伴い上がる。他の実施形態において、強電場 2 6 0 は、分子または原子の原料ガスのイオンの形成を促進して、活性イオンエッチング用の活性イオン源を供給する。 10

【 0 0 5 0 】

一実施形態において、原子の励起速度を最大化するように、カソード 2 1 6 とアノード 2 3 8 との間の距離またはギャップ 2 4 4 が選択される。領域 2 4 5 内の電場 2 6 0 の値は、パルス電源 2 3 4 (図 2) により印加される電圧レベル、および、アノード 2 3 8 とカソード 2 1 6 との間のギャップ 2 4 4 の大きさに依存する。実施形態によっては、種々のシステムのパラメータおよびマグネトロンシステムの動作条件に応じて、電場 2 6 0 の強さは約 $5 \text{ V / cm} \sim$ 約 10^5 V / cm の間を変化する。 20

【 0 0 5 1 】

実施形態によっては、プロセスの種々のパラメータに応じて、ギャップ 2 4 4 は約 $0.30 \text{ cm} \sim$ 約 10 cm の間にあり得る。一実施形態において、領域 2 4 5 内の電場 2 6 0 は、予備電離プラズマまたは弱電離プラズマに急激に加えられる。実施形態によっては、急激に印加される電場 2 6 0 は、立上り時間が約 $0.1 \text{ ミリ秒} \sim$ 約 10 秒 の間にある電圧パルスにより生成される。

【 0 0 5 2 】

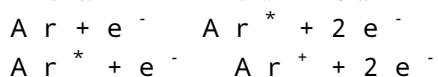
一実施形態において、ギャップ 2 4 4 の大きさ、および、印加電場 2 6 0 のパラメータは、領域 2 4 5 内の原子の励起速度が最大になる最適条件を決定するように選択される。例えば、アルゴンガスを励起させるには約 11.55 eV のエネルギーが必要である。従って、原料ガス 2 6 4 が領域 2 4 5 を介して流れるときに、弱電離プラズマが形成され、弱電離プラズマ内の原子は、段階的に電離プロセスを受ける。 30

【 0 0 5 3 】

弱電離プラズマ内の励起原子は、磁場 2 5 4 により領域 2 6 6 内に閉じ込められている電子に衝突する。中性原子を電離させるには約 15.76 eV のエネルギーが必要であるのに対して、励起原子を電離させるには約 4 eV のエネルギーしか必要でない。従って、励起原子は中性原子よりもかなり高い速度で電離する。一実施形態において、強電離プラズマ内のイオンはカソード 2 1 6 に衝突し、それにより、カソード 2 1 6 から二次電子放出を引き起こす。その二次電子は、実質的に磁場 2 5 4 により閉じ込められ、強電離プラズマ内の全ての中性原子または励起原子と相互作用する。このプロセスにより、原料ガス 2 6 4 を補給するときに、強電離プラズマ内のイオン密度がさらに増加する。 40

【 0 0 5 4 】

電場 2 6 0 の急激な印加に対応する多段階電離プロセスは次のように記述し得る。



ここで、Ar は原料ガス内の中性のアルゴン原子を表し、 e^- は、カソード 2 1 6 とアノード 2 3 8 との間に十分な電圧が印加される場合に、予備電離プラズマに反応して生成されるイオン化用電子を表す。また、 Ar^* は、弱電離プラズマ内の励起したアルゴン原 50

子を表す。励起したアルゴン原子とイオン化用電子との衝突により、アルゴンイオン (Ar^+) と2つの電子とが得られる。

【0055】

励起したアルゴン原子を電離させるために必要なエネルギーは、通常、中性のアルゴン原子の場合よりも少ない。従って、中性のアルゴン原子と比べて、その励起原子は、カソード216の表面近傍においてより速く電離する傾向にある。プラズマ内の励起原子の密度が増えるにつれ、電離プロセスの効率は急激に上がる。この効率の増大により、最終的に、強電離プラズマの密度がアバランシェのように増加する。適切な励起条件下において、原子の励起に変換される弱電離プラズマに加えらるエネルギーの割合は、原料ガス内のパルス放電に対して特に高い。

10

【0056】

従って、本発明の一局面において、ギャップ244全体に弱電離プラズマに高電力パルス印加することにより、アノード238とカソード216との間に強電場260が生成される。強電場260により、弱電離プラズマ内に励起原子が生成される。励起原子はカソードの中心へと拡散し、カソード216により放出される二次電子によって急激に電離される。その急激な電離の結果、カソード216の近傍領域に形成されるイオン密度の高い強電離プラズマが得られる。

【0057】

本発明の一実施形態において、領域245における原料ガス264の流量を制御することによって、より高い密度のプラズマが生成される。この実施形態において、原料ガス264の第1のボリュームは領域245に供給される。次いで、原料ガス264の第1のボリュームが電離することにより、領域245内に弱電離プラズマが形成される。次いで、パルス電源234(図2)は、弱電離プラズマ全体に高電力電気パルス印加する。その高電力電気パルスにより、弱電離プラズマから強電離プラズマが生成される。

20

【0058】

高電力電気パルスのレベルおよび持続時間は、高電力放電が縮小し、終結する前に、高電離プラズマが吸収し得る電力レベルおよび持続時間に制限される。一実施形態において、原料ガス264の流速を増加させることにより、高電力電気パルスの強度および持続時間が増加され得て、強電離プラズマの密度が増加する。

【0059】

一実施形態において、原料ガス264のボリュームの速い交換により、領域245を介して強電離プラズマを移動させる。原料ガス264が領域245を介して移動すると、原料ガス264は、移動する強電離プラズマと相互作用し、印加された高電力電気パルスを受けて強電離状態になる。電離プロセスは、先に記載のように、直接電離および/または段階的電離を組み合わせたものであり得る。原料ガス264のボリュームの速い交換による領域245を介する強電離プラズマの移動により、強電離プラズマに印加され得る電力レベルおよび持続時間は増加される。従って、領域246内に高密度の強電離プラズマが生成される。

30

【0060】

図4は、図2に示される磁気強化プラズマ処理装置200におけるプラズマに、周期的なパルス印加する場合における、時間の関数としての印加パルス電力のグラフ表示300を示す。時刻 t_0 において、パルス電源234を作動させる前に、ガス供給源208から原料ガスをチャンバ202に流入させる。ガス供給源208からチャンバ202への十分な量のガスの流入に要する時間は、様々な要因に依存し、その要因には、ガスの流速およびチャンバ202内の所望の圧力が含まれる。

40

【0061】

一実施形態(図示していない)において、原料ガスをチャンバ202に流入させる前に、パルス電源234を作動させる。この実施形態において、アノード238とカソード216との間に原料ガスを注入する。アノード238とカソード216との間において、パルス電源234により原料ガスが点火されることによって、弱電離プラズマが生成される

50

。

【0062】

一実施形態において、時刻 t_0 ~ 時刻 t_1 において、原料ガスはアノード 238 とカソード 216 との間を流れる。時刻 t_1 において、パルス電源 234 は、カソード 216 とアノード 238 との間にパルス 302 を生成し、パルス 302 の電力は、プラズマの体積に応じて、約 0.01 kW ~ 約 100 kW の間にある。パルス 302 は原料ガスを点火するに十分であり、弱電離プラズマを生成する。

【0063】

一実施形態（図示していない）において、ガス供給源 208 から原料ガス 264（図 3）がチャンバ 202 内に達する前に、パルス電源 234 は、カソード 216 とアノード 238 との間に電位差を加える。この実施形態において、原料ガス 264 がカソード 216 とアノード 238 との間に流れるときに、原料ガス 264 は点火される。他の実施形態において、ガス供給源 208 からの原料ガス 264 がチャンバ 202 に到達する間、または、到達した後に、パルス電源 234 は、カソード 216 とアノード 238 との間にパルス 302 を生成する。

【0064】

パルス電源 234 により生成される電力は、カソード 216 とアノード 238 との間領域 245 に存在するガスを部分的に電離させる。その部分的に電離したガスは、弱電離プラズマ、または、予備電離プラズマとも呼ばれる。先に記載のとおり、弱電離プラズマの形成により、高電力パルスを弱電離プラズマに印加するときブレイクダウン状態が作り出される可能性は実質的になくなる。

【0065】

一実施形態において、約 1 ミリ秒 ~ 約 100 秒の間の時間、連続的にその電力を加えることにより、予備電離プラズマは十分なプラズマ密度を形成し得、保持し得る。一実施形態において、弱電離プラズマを保持するために、弱電離プラズマの点火の後に、パルス電源 234 から電力を連続的に加える。パルス電源 234 により高電力パルスが供給されるまでに弱電離プラズマを生成し、保持するために、パルス電源 234 は、連続的にわずかな電力を出力するように設計され得る。

【0066】

時刻 t_2 ~ 時刻 t_3 において、パルス電源 234 は、弱電離プラズマ全体に高電力パルス 304 を供給する。実施形態によっては、磁気強化プラズマ処理装置 200 のパラメータに応じて、高電力パルス 304 の電力は、約 1 kW ~ 約 10 MW の範囲内にある。高電力パルスは、立上り時間が約 0.1 マイクロ秒 ~ 約 10 秒の間にある立上りエッジ 306 を有する。

【0067】

高電力パルス 304 の電力およびパルスは、弱電離プラズマを強電離プラズマに変えるに十分である。一実施形態において、約 10 マイクロ秒 ~ 約 10 秒の範囲内の時間、高電力パルス 304 を加える。時刻 t_4 において、高電力パルス 304 の印加を終了させる。

【0068】

高電力パルス 304 の供給後に、バックグランド電力を加えることにより、電源 224 は弱電離プラズマを保持する。そのバックグランド電力は、一実施形態において、約 0.01 kW ~ 約 100 kW の間にある。バックグランド電力は、パルス状、または、連続的に印加される電力であり得るが、パルス電源 234 が他の高電力パルス 308 の供給の準備をする間に、その電力はプラズマ内の予備電離状態を保持する。

【0069】

時刻 t_5 において、パルス電源 234 は他の高電力パルス 308 を供給する。一実施形態において、高電力パルス 304 と高電力パルス 308 との間の繰返し率は、約 0.1 Hz ~ 約 1 kHz の間にある。高電力パルス 304 および高電力パルス 308 の具体的な大きさ、形状、幅、および、周波数は、様々な要因に依存し、その要因には、パルス電源 234 の設計、および、磁気強化プラズマ処理装置の設計が含まれる。強電離プラズマの電

10

20

30

40

50

離速度を制御するが、弱電離プラズマを保持するように、高電力パルス304の立上りエッジ308および立下がりエッジ310の形状および持続時間は選択される。一実施形態において、基板211(図2)のエッチング速度を制御するように、高電力パルスの具体的な大きさ、形状、幅、および、周波数は選択される。

【0070】

図5は、図2の磁気強化プラズマ処理装置200におけるプラズマに周期的なパルスを印加する場合における、時間の関数としての、印加電圧の絶対値のグラフ表示320、印加電流の絶対値のグラフ表示322、および印加電力の絶対値のグラフ表示324を示す。一実施形態において、時刻 t_0 (図示していない)において、パルス電源234が作動する前に、ガス供給源208から原料ガス264(図3)をチャンバ202に流入させる。ガス供給源208からチャンバ202に十分な量の原料ガス264が流れるに要する時間は、様々な要因に依存し、その要因には、供給ガス264およびチャンバ202内の所望の圧力が含まれる。

10

【0071】

図5に示される実施形態において、電源234は時刻 t_1 に定電力を生成する。時刻 t_1 において、パルス電源234は、アノード238とカソード216の間に電圧326を生成する。一実施形態において、電圧326は、約100V~約5kVの間にある。時刻 t_0 と時刻 t_1 との間隔(図示していない)は、数マイクロ秒~数ミリ秒のオーダーであり得る。時刻 t_1 において、電流328および電力330は一定値である。

【0072】

時刻 t_1 ~時刻 t_2 において、弱電離プラズマが生成されるように、電圧326、電流328および電力330は一定のままである。時刻 t_2 における電圧332は、約100V~約5kVの間にある。時刻 t_2 における電流334は、約0.1A~約100Aの間にある。時刻 t_2 において供給される電力336は、約0.01kW~約100kWの間にある。

20

【0073】

パルス電源234により生成される電力336は、カソード216とアノード238との間に存在するガスを部分的に電離させる。その部分的に電離したガスは、弱電離プラズマ、または、予備電離プラズマとも呼ばれる。先に記載のとおり、弱電離プラズマの形成により、高電力パルスを弱電離プラズマに印加するときブレイクダウン状態が作り出される可能性は実質的になくなる。このブレイクダウン状態の抑制により、チャンバ202における望ましくないアーク放電の発生は実質的になくなる。

30

【0074】

一実施形態において、時刻 t_1 と時刻 t_2 との間隔は約1ミリ秒~約100秒の間であり、それにより、予備電離プラズマは十分なプラズマ密度を形成し得、保持し得る。一実施形態において、弱電離プラズマを保持するために、パルス電源234から電力336を連続的に加える。弱電離プラズマを保持するために、パルス電源234は、連続的にわずかな電力を出力するように設計され得る。

【0075】

時刻 t_2 ~時刻 t_3 において、パルス電源234は、弱電離プラズマ全体に高電圧パルス338を供給する。実施形態によっては、高電圧パルス338の電圧は、約200V~約30kVの範囲内にある。実施形態によっては、時刻 t_2 と時刻 t_3 との間隔は、約0.1マイクロ秒~約10秒の間にある。プラズマをまたぐ電流が増加しだす前に、時刻 t_3 ~時刻 t_4 において高電圧パルス338を印加する。一実施形態において、時刻 t_3 と時刻 t_4 との間隔は、約10ナノ秒~約1マイクロ秒の間にあり得る。

40

【0076】

時刻 t_4 ~時刻 t_5 において、電圧340は下げられ、電流342は増加する。電力344も、電圧346と電流348との間に準静的な状態が存在するまで、時刻 t_4 ~時刻 t_5 において増加する。時刻 t_4 と時刻 t_5 との間隔は、数百ナノ秒のオーダーであり得る。

50

【 0 0 7 7 】

一実施形態において、時刻 t_5 において、電圧 3 4 6 は約 5 0 V ~ 約 1 0 0 0 V の間にあり、電流 3 4 8 は約 1 0 A ~ 約 5 k A の間にあり、電力 3 5 0 は約 1 k W ~ 約 1 0 M W の間にある。時刻 t_6 まで、電力 3 5 0 はプラズマに連続的に印加される。一実施形態において、時刻 t_5 と時刻 t_6 との間隔は、約 1 マイクロ秒 ~ 約 1 0 秒の間にある。

【 0 0 7 8 】

一実施形態において、磁気強化プラズマ処理装置は、プラズマエッチング用に構成される。この実施形態において、カソード 2 1 6 からのスパッタリングを実質的に防ぐために、時刻 t_5 において、電圧 3 4 6 は約 5 0 V ~ 約 1 0 0 0 V の間にあり、電流 3 4 8 は、約 1 0 0 0 A ~ 約 1 0 , 0 0 0 A の間にある。

10

【 0 0 7 9 】

パルス電源 2 3 4 は、最大電力 3 5 0 およびパルス幅が弱電離プラズマを強電離プラズマに変えるに十分である高電力パルスを提供する。時刻 t_6 において、最大電力 3 5 0 の印加を終了させる。一実施形態において、時刻 t_6 の後に、パルス電源 2 3 4 は、プラズマを保持するに十分なバックグラウンド電力を提供し続ける。

【 0 0 8 0 】

一実施形態において、高電力パルスの供給後に、約 0 . 0 1 k W ~ 約 1 0 0 k W の間にあり得る電力 3 5 2 をプラズマに連続的に加えることにより、電源 2 2 4 は弱電離プラズマを保持する。パルス電源 2 3 4 が次の高電力パルスの供給の準備をする間に、連続的に生成される電力はプラズマ内の予備電離状態を保持する。

20

【 0 0 8 1 】

時刻 t_7 において、パルス電源 2 3 4 は次の高電力パルス（図示していない）を提供する。一実施形態において、高電力パルス間の繰返し率は、約 0 . 1 H z ~ 約 1 0 k H z の間にある。高電力パルスの具体的な大きさ、形状、幅、および、周波数は、様々な要因に依存し、その要因には、パルス電源 2 3 4 の設計、および、磁気強化プラズマ処理装置の設計が含まれる。

【 0 0 8 2 】

他の実施形態（図示していない）において、電源 2 3 4 は定電圧を生成する。この実施形態において、時刻 t_2 から時刻 t_6 まで電圧 3 2 0 を連続的に印加する。電流 3 2 2 および電力 3 2 4 は、時刻 t_6 まで増大し、電圧 3 2 0 の印加が終了されるまで、比較的一

30

【 0 0 8 3 】

図 6 A ~ 図 6 D は、図 2 の磁気強化プラズマ処理装置 2 0 0 における種々の電子の $E \times B$ ドリフト電流に対してシミュレートしたカソード 2 1 6 近傍における磁場分布 4 0 0、磁場分布 4 0 2、磁場分布 4 0 4、および、磁場分布 4 0 6 を示す。マグネトロンにより生成されたプラズマの反磁性特性は強いために、マグネトロン放電は、プラズマのボリュームからの外部磁場を締め出す傾向にある。シミュレートされた磁場分布 4 0 0、磁場分布 4 0 2、磁場分布 4 0 4、および、磁場分布 4 0 6 は、大電流を有する高電力プラズマが、図 2 の磁気強化プラズマ処理装置の領域 2 4 6 に均一に拡散する傾向にあることを示す。

40

【 0 0 8 4 】

カソード 2 1 6 とアノード 2 3 8 との間の高電力パルスは、カソード 2 1 6 から二次電子を生成し、その二次電子は、交差した電場と磁場とに従ってカソード 2 1 6 の近傍において円運動する。電子の実質的な円運動により、電子の $E \times B$ ドリフト電流が生成される。電子の $E \times B$ ドリフト電流の大きさは、プラズマ内の放電電流の大きさに比例し、一実施形態において、放電電流の大きさの約 3 倍 ~ 約 1 0 倍の範囲にある。

【 0 0 8 5 】

一実施形態において、実質的に円運動する電子の $E \times B$ ドリフト電流により磁場が生成されるが、その磁場は、磁石系 2 5 2 により生成される磁場と交差する。一実施形態において、電子の $E \times B$ ドリフト電流により生成される磁場の向きは、磁石系 2 5 2 により生

50

成される磁場の向きと実質的に反対である。電子の $E \times B$ ドリフト電流により生成される磁場の大きさは、電子の $E \times B$ ドリフト電流の増加とともに増加する。磁石系 252 により生成される磁場と、電子の $E \times B$ ドリフト電流により生成される磁場との相互作用により、領域 246 内の少なくとも一部に強電離プラズマの均一な拡散が引き起こされる。

【0086】

一実施形態において、電子の $E \times B$ ドリフト電流は、低電流密度プラズマの場合には、実質的に円形な形状を定める。しかし、プラズマの電流密度が増加するにつれ、実質的に円形の電子の $E \times B$ ドリフト電流は、より複雑な形状を表す傾向にある。これは、磁石系 252 により生成される磁場と、高電力パルスにより生成される磁場と、電子の $E \times B$ ドリフト電流により生成される磁場との相互作用が強くなるためである。例えば、一実施形態において、電子の $E \times B$ ドリフト電流の形状は実質的にサイクロイドである。従って、電子の $E \times B$ ドリフト電流の正確な形状は非常に複雑であり得、様々な要因に依存する。

10

【0087】

例えば、図 6A は、磁石系 252 により生成される磁場と、実質的に円形な輪により示される電子の $E \times B$ ドリフト電流 410 により生成される磁場との相互作用により生成される磁力線 408 を示す。電子の $E \times B$ ドリフト電流 410 は、カソード 216 近傍に生成される。

【0088】

図 6A に示される例において、電子の $E \times B$ ドリフト電流 410 は、約 100 A である。本発明の一実施形態において、電子の $E \times B$ ドリフト電流 410 は、放電電流の約 3 倍 ~ 約 10 倍の間にある。従って、図 6A に示される例において、放電電流は約 10 A ~ 約 30 A の間にある。磁石系 252 により生成される磁場は、比較的小さな電子の $E \times B$ ドリフト電流 410 により生成される比較的小さな磁場によって、実質的には乱されないということを、図 6A に示される磁力線 408 は示す。

20

【0089】

図 6B は、磁石系 252 により生成される磁場と、電子の $E \times B$ ドリフト電流 414 により生成される磁場との相互作用により生成される磁力線 412 を示す。電子の $E \times B$ ドリフト電流 414 は、カソード 216 近傍に生成される。図 6B に示される例において、電子の $E \times B$ ドリフト電流 414 は、約 300 A である。電子の $E \times B$ ドリフト電流 414 は、通常、放電電流の約 3 倍 ~ 約 10 倍の間にあるため、この例における放電電流は約 30 A ~ 約 100 A の間にある。

30

【0090】

磁石系 252 により生成される磁力線 412 は、比較的小さな電子の $E \times B$ ドリフト電流 414 により生成される比較的小さな磁場によって、実質的には乱されない。しかしながら、電子の $E \times B$ ドリフト電流 414 に最近接する磁力線 416 は、電子の $E \times B$ ドリフト電流 414 により生成される磁場によって、いくぶんか歪められる。より大きな電子の $E \times B$ ドリフト電流により、磁石系 252 により生成される磁場とより強く相互作用するより強い磁場が生成されるということを、この歪みは示唆する。

【0091】

図 6C は、磁石系 252 により生成される磁場と、電子の $E \times B$ ドリフト電流 420 により生成される磁場との相互作用により生成される磁力線 418 を示す。電子の $E \times B$ ドリフト電流 420 は、カソード 216 の近傍に生成される。図 6C に示される例において、電子の $E \times B$ ドリフト電流 420 は、約 1,000 A である。電子の $E \times B$ ドリフト電流 420 は、通常、放電電流の約 3 倍 ~ 約 10 倍の間にあるため、この例における放電電流は約 100 A ~ 約 300 A の間にある。

40

【0092】

磁石系 252 により生成される磁力線 418 は相当な歪みを示し、その歪みは、比較的大きな電子の $E \times B$ ドリフト電流 420 により生成される比較的強い磁場により引き起こされる。従って、より大きな電子の $E \times B$ ドリフト電流 420 は、より強い磁場を生成し、そのより強い磁場は、磁石系 252 により生成される磁場と強く相互作用し、その磁場

50

を支配しだす。

【0093】

磁石系252により生成される磁場と、電子の $E \times B$ ドリフト電流420により生成される磁場との相互作用は、実質的に磁力線422を生成するが、磁力線422は、図6Aの磁力線408ならびに図6Bの磁力線412および磁力線416よりも、カソード216の表面に対して幾ばくかより平行である。磁力線422は、強電離プラズマを領域246内においてより均一に分布させる。

【0094】

従って、強電離プラズマは、領域246内において、実質的に均一に拡散する。従って、従来の磁気強化エッチングシステムと比べて、カソード216は、より均一に、正イオンの衝突を受ける。この均一な衝突により、領域246に均一に分布した二次電子が生成される。その二次電子は、実質的に均一な強電離プラズマと均一に相互作用する。その結果、本発明による磁気強化プラズマエッチングプロセスにおいて、基板211(図2)はより均一にエッチングされる。

10

【0095】

図6Dは、磁石系252により生成される磁場と、電子の $E \times B$ ドリフト電流426により生成される磁場との相互作用により生成される磁力線424を示す。電子の $E \times B$ ドリフト電流426は、カソード216の近傍に生成される。図6Dに示される例において、電子の $E \times B$ ドリフト電流426は、約5kAである。この例における放電電流は約500A~約1,700Aの間にある。

20

【0096】

比較的大きな電子の $E \times B$ ドリフト電流426により生成される比較的強い磁場と相互作用するために、磁石系252により生成される磁力線424は、比較的強く歪められる。従って、この実施形態において、比較的大きな電子の $E \times B$ ドリフト電流426は非常に強い磁場を生成し、その磁場は、磁石系252により生成される磁場と比べて相当強い。

【0097】

図7は、本発明による磁気強化プラズマ処理装置450の別の実施形態の断面図を示す。磁気強化プラズマ処理装置450は、弱電離プラズマまたは予備電離を生成する電極452を含む。電極452は、予備電離フィラメント電極とも呼ばれ、弱電離プラズマを生成するイオン源の構成要素である。

30

【0098】

一実施形態において、電極452は、電源456の出力454に結合される。電極456はDC電源またはAC電源であり得る。絶縁体458は、電極452をチャンバ202の接地された壁と絶縁する。一実施形態において、電極452は、実質的に円形の電極である。他の実施形態において、電極452は、実質的に直線の形状であるか、または、プラズマを予備電離するに適する形状である。

【0099】

一実施形態において、電源456の第2の出力460は、カソード216に結合される。絶縁体226はカソード216をチャンバ202の壁と絶縁する。一実施形態において、電源456は、平均が約0.01kW~約100kWの範囲にある出力電力を生成する。上記の出力電力は、電極452とカソード216との間に、電極452の近傍に存在する原料ガスを予備電離するに適する電流を生成するに十分である。

40

【0100】

動作中において、磁気強化プラズマ処理装置450は、図2の磁気強化プラズマ処理装置200と類似した態様で機能する。磁場254は、カソード216の近傍に生成される。一実施形態において、磁場254の強さは、約50ガウス~約2,000ガウスの間にある。ガス流制御システム210により、原料ガスは、ガス供給源208からチャンバ202に供給される。

【0101】

50

電源 4 5 6 は、カソード 2 1 6 と電極 4 5 2 との間に適切な電流を印加する。電極 4 5 2 近傍の領域 2 4 6 に弱電離プラズマを発生させるように、電流のパラメータは選択される。一実施形態において、プラズマの体積に応じて、電源 4 5 6 は約 1 0 0 V ~ 約 5 k V の電圧を生成し、約 0 . 1 A ~ 約 1 0 0 A の放電電流を伴う。電圧の特定のパラメータの例について、図 8 とともに、以下により詳細に記載する。

【 0 1 0 2 】

一実施形態において、アルゴンスパッタリングガスに対して、結果として生じる予備電離プラズマの密度は、約 $1 0^6 \text{ cm}^{-3}$ ~ 約 $1 0^{12} \text{ cm}^{-3}$ の間にある。一実施形態において、チャンバ 2 0 2 内の圧力は、約 $1 0^{-3} \text{ Torr}$ ~ 約 $1 0 \text{ Torr}$ の間にある。上述したように、弱電離プラズマまたは予備電離プラズマにより、プラズマに高電力パルス 10 を印加するときチャンバ 2 0 2 内がブレイクダウン状態になる可能性は実質的になくなる。

【 0 1 0 3 】

次いで、パルス電源 2 3 4 は、カソード 2 1 6 とアノード 2 3 8 との間に高電力パルスを生成する。高電力パルスは、弱電離プラズマから強電離プラズマを生成する。高電力パルスのパラメータは様々なパラメータに依存し、そのパラメータには、プラズマの体積、所望の堆積速度、および、基板 2 1 1 のエッチングに必要な予備電離プラズマの濃度が含まれる。

【 0 1 0 4 】

一実施形態において、カソード 2 1 6 とアノード 2 3 8 との間の高電力パルスは約 1 k 20 W ~ 約 1 0 M W の範囲内にある。一実施形態において、約 $1 0 \text{ m Torr}$ の圧力に対して、強電離プラズマから生成され得る放電電流密度は、約 $1 \text{ A} / \text{cm}^2$ よりも大きい。一実施形態において、高電力パルスのパルス幅は、約 1 マイクロ秒から約数秒の範囲内にある。一実施形態において、高電力放電の繰返し率は、約 0 . 1 H z ~ 約 1 0 H z の範囲内にある。

【 0 1 0 5 】

パルス電源により生成される電力の平均は、望ましくない基板の加熱を最小限にするように選択され得る。例えば、プラズマの体積に応じて、パルス電源により生成される電力の平均は、1 M W 未満になるように選択され得る。一実施形態において、カソード 2 1 6 30 、アノード 2 3 8 、および、基板支持体 2 1 2 のうちの少なくとも 1 つにおける熱エネルギーは、液体冷却またはガス冷却（図示していない）によって持去られるか、または、分散される。

【 0 1 0 6 】

ガス流制御システム 2 1 0 は、強電離プラズマを保持するに十分高い原料ガス流速を提供する。その上、強電離プラズマを保持する範囲にチャンバ 2 0 2 内の圧力を保つように、真空バルブ 2 0 6 は圧力を制御する。

【 0 1 0 7 】

強電離プラズマ内のイオンは、基板 2 1 1 に向かい加速し、基板 2 1 1 の表面に衝突する。強電離プラズマにより、基板材料のエッチング速度は非常に速くなる。その上、本明細書において図 6 A ~ 図 6 D とともに記載したように、生成された磁場間の相互作用により、本発明によるプラズマ処理システムによって生成される強電離プラズマは、領域 2 4 40 6 内に均一に拡散する傾向にある。その均一な拡散により、従来のプラズマエッチングシステムと比べて、基板 2 1 1 の表面へのイオン衝撃の分布はより均一になる。従って、基板 2 1 1 は比較的均一にエッチングされる。

【 0 1 0 8 】

図 8 は、図 7 の磁気強化プラズマ処理システム 4 5 0 におけるプラズマに周期的なパルスを加える場合における、時間の関数としてのパルス電力のグラフ表示 5 0 0 を示す。一実施形態において、電源 4 5 6 またはパルス電源 2 3 4 の一方を作動させる前に、時刻 t_0 において、ガス供給源 2 0 8 から原料ガスをチャンバ 2 0 2 に流入させる。

【 0 1 0 9 】

別の実施形態において、弱電離プラズマ形成の前に、原料ガスがチャンバ202に入る前の時刻 t_0 において、電源456および/またはパルス電源234を作動させる。この実施形態において、原料ガスは、電極452とカソード216との間に注入され、電極452とカソード216との間において、原料ガスは電源456により点火されて、弱電離プラズマを生成する。

【0110】

十分な量の原料ガスをチャンバ202に流入するに要する時間は、様々な要因に依存し、その要因には、原料ガスの流速、および、チャンバ202内の所望の動作圧力が含まれる。時刻 t_1 において、電源456は、電極452とカソード216との間に、約0.01kW~約100kWの範囲にある電力502を生成する。電力502により、電極452近傍の原料ガスが部分的に電離し、それにより、弱電離プラズマまたは予備電離プラズマが生成される。

10

【0111】

時刻 t_2 において、パルス電源234は、プラズマの体積に応じて、約1kW未満~約10MWのオーダーの高電力パルス504を弱電離プラズマに供給する。高電力パルス504は、弱電離プラズマを強電離プラズマに変えるに十分である。その高電力パルスの立上りエッジ506の立上り時間は約0.1マイクロ秒~約10秒の間にある。

【0112】

一実施形態において、高電力パルス504のパルス幅は、約1マイクロ秒から約10秒の間にある。時刻 t_4 において、高電力パルス504の印加を終了させる。高電力パルス504の供給の後においても、パルス電源234が他の高電力パルス508の供給の準備をする間に、電源456からの電力502は連続的に印加されて、予備電離プラズマを保持する。他の実施形態(図示していない)において、電源456は、AC電源であり、適切な電力パルスを供給することにより、弱電離プラズマを点火し、保持する。

20

【0113】

時刻 t_5 において、パルス電源234は他の高電力パルス508を供給する。一実施形態において、高電力パルスの繰返し率は、約0.1Hz~約10kHzの間にある。高電力パルスの具体的な大きさ、形状、幅、および、周波数は、処理パラメータと、パルス電源234の設計と、プラズマ処理システムの設計とに依存する。高電力パルス504の立上りエッジ506および立下がりエッジ510の形状および持続時間は、強電離プラズマの電離速度を制御するように選択される。一実施形態において、高電力パルス504の具体的な大きさ、形状、幅、および、周波数は、基板材料のエッチング速度を制御するように選択される。

30

【0114】

図9A~図9Cは、本発明によるカソード216'、カソード216''、および、カソード216'''の様々な実施形態の断面図である。図9A~図9Cは、カソード216'、カソード216''、および、カソード216'''のそれぞれの片側(図7を参照して右側)を示す。カソード216'、カソード216''、および、カソード216'''のそれぞれの左側は、通常、図示した右側と対称的である。図9A~図9Cは、電極452と、カソード216'、カソード216''、および、カソード216'''との様々な構成を示す。その様々な構成は、電極452とカソード216'、カソード216''、および、カソード216'''のそれぞれとの間に生成される電場のパラメータに影響を及ぼし得る。

40

【0115】

電場のパラメータは、通常、予備電離プロセスのみならず、予備電離プラズマの点火にも影響を及ぼし得る。一実施形態において、様々な実施形態は、原料ガスのブレイクダウンに必要な状態、ならびに、アノード238とカソード216'、カソード216''、および、カソード216'''のそれぞれとの間の領域における弱電離プラズマの点火に必要な状態を作り出す。

【0116】

図9Aは、カソード216'の片側を示す。カソード216'の表面518は、円形電

50

極 4 5 2 に実質的に平行であり、円形電極 4 5 2 のベンド 5 2 0 よりも先まで広がる。この実施形態において、カソード 2 1 6 ' と円形電極 4 5 2 との間に生成される電場の電気力線（図示していない）は、円形電極 4 5 2 の円周に沿ってカソード 2 1 6 ' と実質的に直交する。この実施形態により、弱電離プロセスの効率を上げ得る。

【 0 1 1 7 】

図 9 B は、カソード 2 1 6 " の片側を示す。この実施形態において、カソード 2 1 6 " と円形電極 4 5 2 との間に生成される電気力線（図示していない）は、カソード 2 1 6 " 上の点 5 2 8 において、カソード 2 1 6 " と実質的に直交する。電極 4 5 2 とカソード 2 1 6 " との間のギャップ 5 3 0 における電場は、ギャップ 5 3 0 を介して流れる原料ガスからのプラズマを点火するように適合される。点 5 2 8 に対する磁場の生成される位置、および、カソード 2 1 6 " の近傍領域の圧力などの様々なパラメータに依存して、この実施形態により、弱電離プロセスの効率を上げ得る。

10

【 0 1 1 8 】

図 9 C は、カソード 2 1 6 " ' の片側を示す。この実施形態において、カソード 2 1 6 " ' と円形電極 4 5 2 との間に生成される電気力線（図示していない）は、点 5 3 8 において、カソード 2 1 6 " ' と実質的に直交する。電極 4 5 2 とカソード 2 1 6 " ' との間のギャップ 5 4 0 における電場は、ギャップ 5 4 0 を介して流れる原料ガスからのプラズマを点火するように適合される。点 5 3 8 に対する磁場の生成される位置、および、カソード 2 1 6 " ' の近傍領域の圧力などの様々なパラメータに依存して、この実施形態により、弱電離プロセスの効率を上げ得る。

20

【 0 1 1 9 】

図 1 0 は、本発明による磁気強化プラズマ処理装置 4 5 0 ' の他の実施形態の断面図である。この実施形態は、図 7 の磁気強化プラズマ処理装置 4 5 0 と類似する。しかしながら、この実施形態において、イオン源の構成要素である電極 4 5 2 ' は、カソード 2 1 6 を実質的に取り囲む。

【 0 1 2 0 】

カソード 2 1 6 に対する電極 4 5 2 ' の位置は、アノード 2 3 8 とカソード 2 1 6 との間のギャップ 2 4 4 における特定の電気的狀態を果たすように選択される。例えば、この実施形態において、予備電離電極 4 5 2 ' は、アノード 2 3 8 とカソード 2 1 6 との間の領域 2 4 5 ' に物理的に配置されていないため、予備電離電極 4 5 2 ' は、アノード 2 3 8 とカソード 2 1 6 との間に高電力パルスを印加するときに得られる強電場と干渉しない。

30

【 0 1 2 1 】

電源 4 5 6 は、カソード 2 1 6 とアノード 4 5 2 ' との間に実質的に一定な電圧を印加する。その実質的に一定な電圧により、電極 4 5 2 ' およびカソード 2 1 6 の近傍に弱電離プラズマまたは予備電離プラズマが生成される。予備電離プラズマによって、そのプラズマに高電力パルスを印加するときにチャンバ 2 0 2 内がブレイクダウン状態になる可能性は実質的になくなる。

【 0 1 2 2 】

一実施形態において、電源 4 5 6 は D C 電源であり、その D C 電源は、約 0 . 1 A ~ 約 1 0 0 A の範囲内にある放電電流を伴う約 1 0 0 V ~ 約 5 k V の範囲内の D C 電圧を生成する。他の実施形態において、電源 4 5 6 は A C 電源であり、その A C 電源は、カソード 2 1 6 と電極 4 5 2 ' との間に電圧パルスを生成する。

40

【 0 1 2 3 】

電極 4 5 2 ' がカソード 2 1 6 を実質的に取り囲むために、電極 4 5 2 ' とカソード 2 1 6 との間隔 4 6 2 は、電極 4 5 2 ' の直径を変化させることにより、変わり得る。例えば間隔 4 6 2 は、約 0 . 3 c m から約 1 0 c m へと変わり得る。間隔 4 6 2 は、領域 2 4 6 ' の弱電離プラズマを保持するように選択される。カソード 2 1 6 に対する電極 4 5 2 ' の垂直方向の位置も、変わり得る。

【 0 1 2 4 】

50

パルス電源 234 は、先に記載のように、カソード 216 とアノード 238 との間に高電力パルスを生成する。高電力パルスは、弱電離プラズマから強電離プラズマを生成する。

【0125】

図 11 は、本発明による磁気強化プラズマ処理装置 450 の他の実例となる実施形態の断面図である。磁気強化プラズマ処理装置 450 は、図 7 の磁気強化プラズマ処理装置 450 と類似する。例えば、電極 452 はイオン源の構成要素である。しかしながら、電極 452 は、第 1 の電源 464 に結合され、追加の第 2 の電源 466 にも結合される。カソード 216 に対する電極 452 の位置は、特定のプラズマ処理特性を果たすように選択される。

10

【0126】

第 1 の電源 464 の第 1 の出力 468 は、絶縁体 458 を介して電極 452 の第 1 の面 470 に結合される。第 1 の電源 464 の第 2 の出力 472 は、絶縁体 476 を介して電極 452 の第 2 の面 474 に結合される。第 1 の電源 464 は、電極 452 を介する電流を生成するように適合される。電流は、本質的に、電極 452 内に熱を生成し、加熱された電極 452 は電子を領域 245 に放つ。一実施形態において、第 1 の電源 464 は DC 電源であり、電極 452 を介して実質的に一定の電流を印加する。他の実施形態において、第 1 の電源 464 は AC 電源である。

【0127】

第 2 の電源 466 の第 1 の出力 478 は、絶縁体 480 を介してアノード 238 に結合される。第 2 の電源 466 の第 2 の出力 482 は、電極 452 の第 2 の面 474 に結合される。第 2 の電源 466 は、電極 452 とアノード 238 との間に電圧を印加するように適合される。第 2 の電源 466 は、AC 電源または DC 電源であり得る。一実施形態において、第 2 の電源 466 は、約 0.1 A ~ 約 100 A の範囲内の放電電流を伴う約 100 V ~ 約 5 kV の電圧を生成する。

20

【0128】

一実施形態において、第 2 の電源 466 は、実質的に一定の電圧を印加し、その電圧は、電極 452 およびカソード 216 の近傍に弱電離プラズマまたは予備電離プラズマを生成する。予備電離プラズマにより、高電力パルスを印加するとき、チャンバ 202 内がブレイクダウン状態になる可能性は実質的になくなる。

30

【0129】

高電力パルス電源 234 は、カソード 216 とアノード 238 との間に高電力パルスを生成する。高電力パルスは、弱電離プラズマから強電離プラズマを生成する。上述のとおり、高電力パルスのパラメータは様々なパラメータに依存し、そのパラメータには、プラズマの体積、所望のエッチング速度、および、予備電離プラズマの所望の濃度が含まれる。

【0130】

図 12 は、本発明による磁気強化プラズマエッチングの実例となるプロセスのフローチャート 600 である。そのプロセスは、図 2 の磁気強化プラズマ処理装置 200 内の様々なシステムに電圧を印加することにより、開始する（工程 602）。例えば、まず、チャンバ 202 を特定の圧力まで真空引きする（工程 604）。次いで、チャンバ 202 内の圧力を評価する（工程 606）。一実施形態においては、次いで、チャンバに原料ガスを供給する（工程 608）。

40

【0131】

次いで、ガス圧を評価する（工程 610）。ガス圧が適当である場合には、チャンバ 202 内の圧力を再び評価する（工程 612）。チャンバ 202 内の圧力が適当である場合には、原料ガスの近傍に適当な磁場を生成する（工程 614）。一実施形態において、図 2 の磁石系 252 には、少なくとも 1 つの永久磁石が含まれる。従って、プロセス開始前から一定の磁場が生成されている。他の実施形態において、磁石系（図示していない）には、少なくとも 1 つの電磁石が含まれる。従って、電磁石が作動するときのみ磁場が生

50

成される。

【0132】

磁場が適当である場合には（工程616）、原料ガスは電離して、弱電離プラズマを生成する（工程618）。一実施形態において、図2のカソード216とアノード238の間のギャップ244に比較的低い電流放電を作り出すことによって、弱電離プラズマが生成される。他の実施形態において、図7の電極452とカソード216との間に比較的低い電流放電を作り出すことによって、弱電離プラズマが生成される。さらに他の実施形態において、図11の電極452''が加熱されて、カソード216の近傍に電子を放出する。図11の実施形態において、アノード238と電極452'との間に、比較的低い電流放電が作り出される。

10

【0133】

図2の実施形態において、原料ガスを導入する前に、カソード216とアノード238との間のギャップ244に電位を加えることによって、弱電離プラズマが生成される。図7に示される実施形態において、弱電離プラズマを生成する原料ガスを導入する前に、図7の電極452とカソード216との間に電位差を加えることによって、弱電離プラズマが生成される。

【0134】

ガスが弱電離している場合には（工程620）、基板に負のバイアスをつける（工程621）。次いで、弱電離プラズマから強電離プラズマが生成される（工程622）。一実施形態において、カソード216とアノード238との間に高電力パルスを印加することによって、強電離プラズマが生成される。上述したように、高電力パルスによって、アノード238とカソード216との間のギャップ244に強電場が生成される。その強電場によって、原子の原料ガスが段階的に電離し、強電離プラズマになる分子の原料ガスのイオン形成が促進される。一実施形態において、強電離プラズマは、図2の領域246内において実質的に均一である。その均一性により、実質的に均一な基板211のエッチングが得られる。

20

【0135】

基板211はカソード216に対して負にバイアスがかけられているために、基板211は、実質的に均一な強電離プラズマから電子を引き付ける。それにより、イオンが基板211に衝突して、基板材料のエッチングが引き起こされる。一実施形態において、強電離プラズマが形成されると（工程624）、周知のモニタリング技術を用いて、プラズマエッチングをモニタリングする（工程628）。プラズマエッチングが完了すると（工程630）、プラズマエッチング処理を終了させる（工程632）。

30

【0136】

図13は、本発明によるエッチング速度の制御の実例となるプロセスのフローチャート650である。そのプロセスは、図2の磁気強化プラズマ処理装置200内の様々なシステムに電圧を印加することにより、開始する（工程602）。例えば、まず、チャンバ202を特定の圧力まで真空引きする（工程604）。次いで、チャンバ202内の圧力を評価する（工程606）。一実施形態においては、次いで、チャンバに原料ガスを供給する（工程608）。ガス圧を評価する（工程610）。ガス圧が適当である場合には、チャンバ202内の圧力を再び評価する（工程612）。チャンバ202内の圧力が適当である場合には、原料ガスの近傍に適当な磁場を生成する（工程614）。

40

【0137】

磁場が適当であると仮定すると（工程616）、原料ガスは電離して、弱電離プラズマを生成する（工程618）。一実施形態において、図2のカソード216とアノード238の間に比較的低い電流放電を作り出すことによって、弱電離プラズマが生成される。

【0138】

弱電離プラズマが生成された（工程620）後、基板に負のバイアスをつける（工程621）。次いで、弱電離プラズマから強電離プラズマが生成される（工程622）。一実施形態において、カソード216とアノード238との間のギャップ244に高電力パル

50

スを印加することによって、強電離プラズマが生成される。一実施形態において、強電離プラズマは、図2の領域246内において実質的に均一である。その均一性により、実質的に均一な基板211のエッチングが得られる。基板211は、実質的に均一な強電離プラズマから電子を引き付ける。そのイオンが基板211に衝突することにより、基板材料のエッチングが引き起こされる。

【0139】

一実施形態において、強電離プラズマが形成されると(工程624)、周知のモニタリング技術を用いて、エッチング速度をモニタリングする(工程652)。エッチング速度が十分でない場合(工程654)には、プラズマに供給される電力を増加させる(工程656)。一実施形態において、カソード216とアノード238との間のギャップ244に印加される高電力パルスの大きさを増すことにより、プラズマに供給される電力が増加する。一実施形態(図示していない)において、基板に衝突するイオンのイオンエネルギーを制御するために、基板にかける負のバイアス(工程621)を変更する。エッチング速度を再び評価する(工程652)。エッチング速度が十分になるまで(工程654)、このプロセスを続け、エッチングが続く(工程658)。プラズマエッチングが完了すると(工程660)、プラズマエッチング処理を終了させる(工程662)。

10

【0140】

(等価物)

特に、特定の実施形態を参照して、本発明を示し、記載してきたが、本明細書に定められる本発明の精神および範囲から逸脱することなく、様々な形態および詳細の変更がなされ得ることは、当業者には理解されるべきである。

20

【図面の簡単な説明】

【0141】

【図1】無線周波数(RF)電源を有する周知の磁気強化エッチング装置の断面図を示す。

【図2】本発明による磁気強化プラズマ処理装置の実施形態の断面図を示す。

【図3】図2の磁気強化プラズマ処理装置のアノードおよびカソードの断面図を示す。

【図4】図2の磁気強化プラズマ処理装置においてプラズマに印加される周期的なパルスに対する印加電力を時間の関数としてグラフ表示したものを示す。

【図5】図2の磁気強化プラズマ処理装置においてプラズマに加えられる周期的なパルスの印加電圧、印加電流、および、印加電力を時間の関数としてグラフ表示したものを示す。

30

【図6A】本発明による、種々の電子E×Bドリフト電流に対する、カソード近傍の種々のシミュレートされた磁場分布を示す。

【図6B】本発明による、種々の電子E×Bドリフト電流に対する、カソード近傍の種々のシミュレートされた磁場分布を示す。

【図6C】本発明による、種々の電子E×Bドリフト電流に対する、カソード近傍の種々のシミュレートされた磁場分布を示す。

【図6D】本発明による、種々の電子E×Bドリフト電流に対する、カソード近傍の種々のシミュレートされた磁場分布を示す。

40

【図7】本発明による磁気強化プラズマ処理装置の他の実施形態の断面図を示す。

【図8】図7の磁気強化プラズマ処理装置においてプラズマに加えられる周期的なパルスに対して、パルス電力を時間の関数としてグラフ表示したものを示す。

【図9】図9A～図9Cは本発明によるカソードの種々の実施形態の断面図である。

【図10】本発明による磁気強化プラズマ処理装置の別の実施形態を示す断面図である。

【図11】本発明による磁気強化プラズマ処理装置の別の実施形態を示す断面図である。

【図12A】本発明による磁気強化プラズマ処理装置のプロセスを示すフローチャートである。

【図12B】本発明による磁気強化プラズマ処理装置のプロセスを示すフローチャートである。

50

【図13A】本発明によるエッチング速度の制御のプロセスを示すフローチャートである。
。
【図13B】本発明によるエッチング速度の制御のプロセスを示すフローチャートである。
。

【図1】

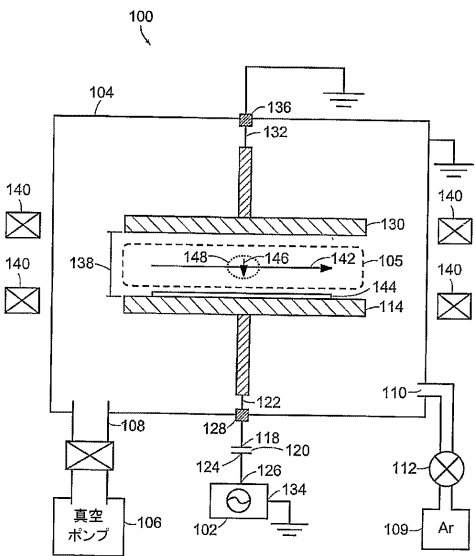


FIG. 1
従来技術

【図2】

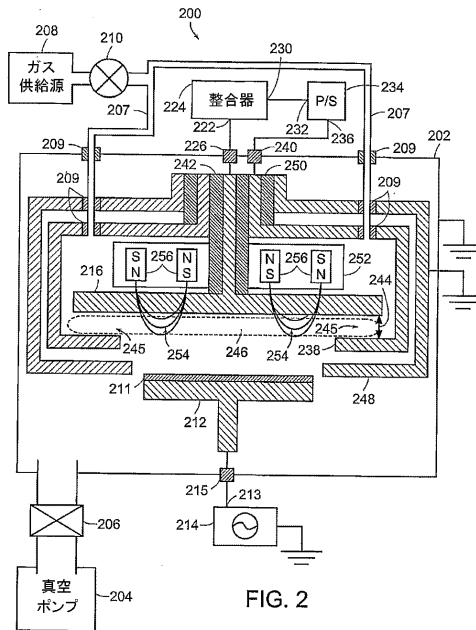


FIG. 2

【 図 3 】

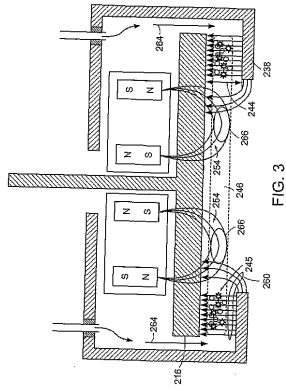


FIG. 3

【 図 4 】

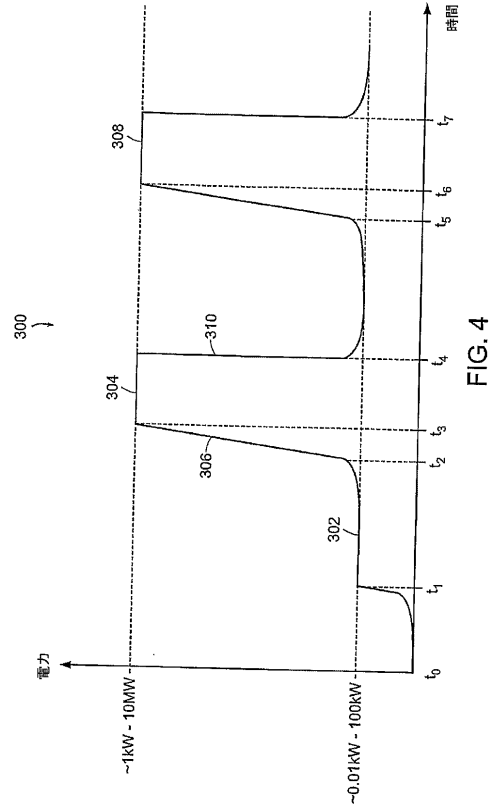


FIG. 4

【 図 5 】

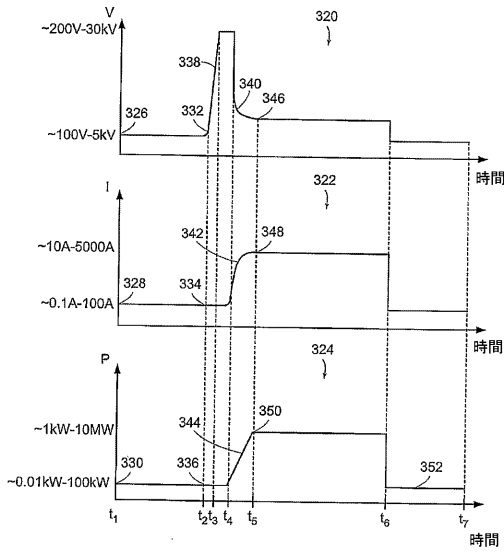


FIG. 5

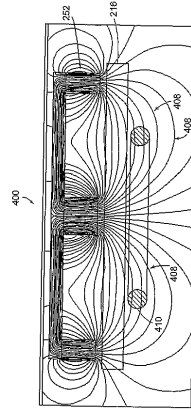


FIG. 6A

【 図 8 】

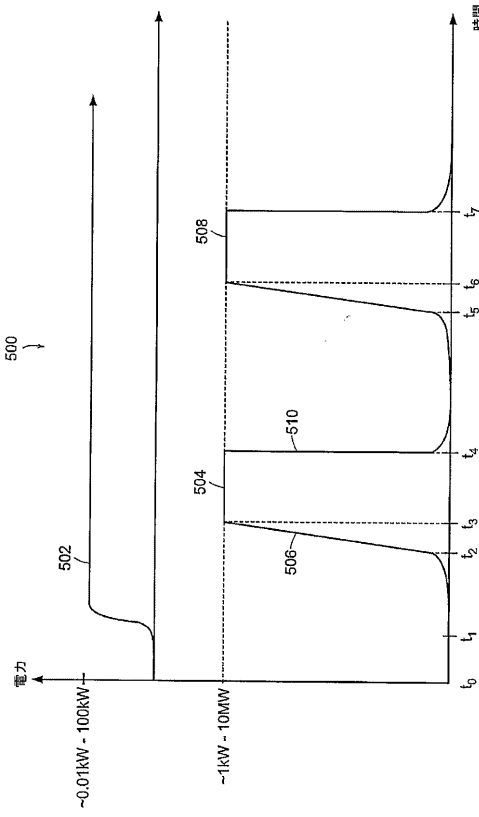
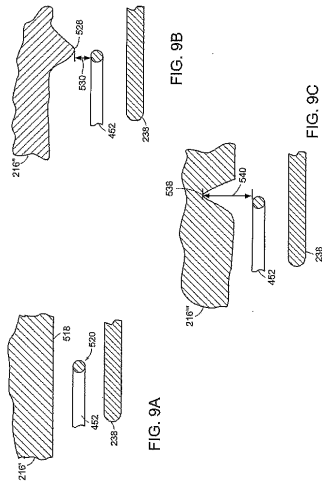


FIG. 8



【 図 10 】

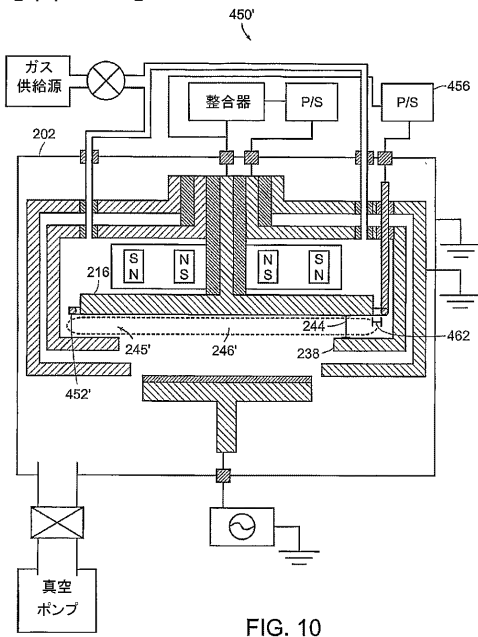


FIG. 10

【 図 11 】

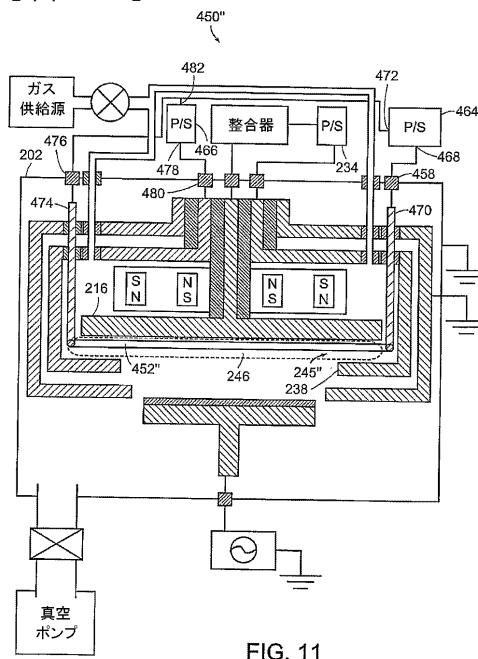


FIG. 11

【図12A】

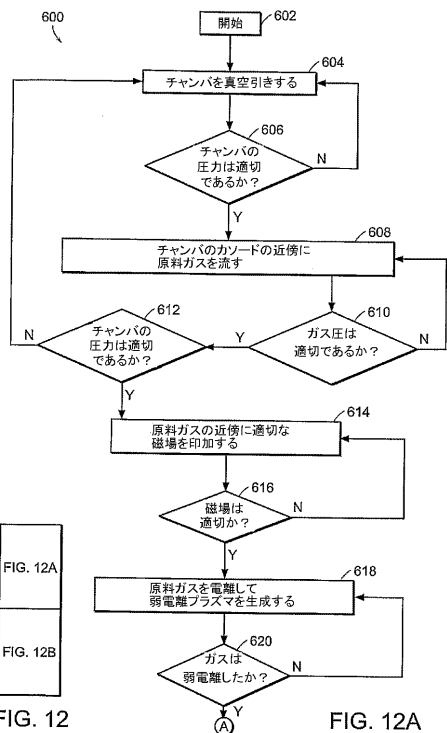


FIG. 12A
FIG. 12B
FIG. 12

【図12B】

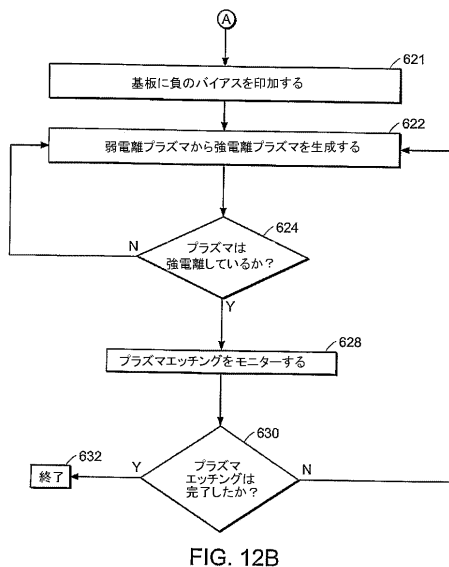


FIG. 12B

【図13A】

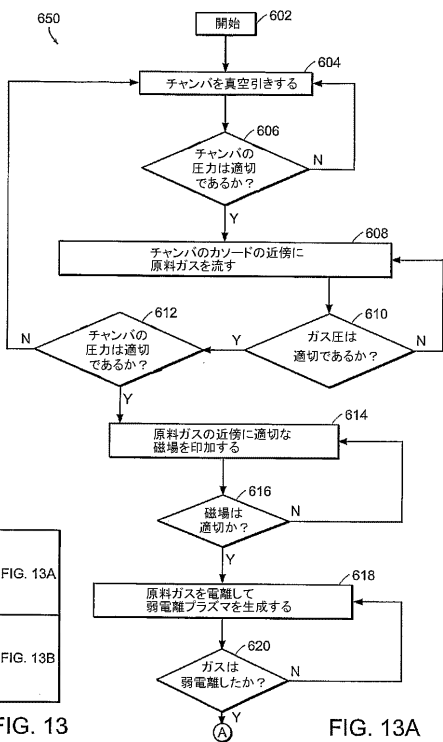


FIG. 13A
FIG. 13B
FIG. 13

【図13B】

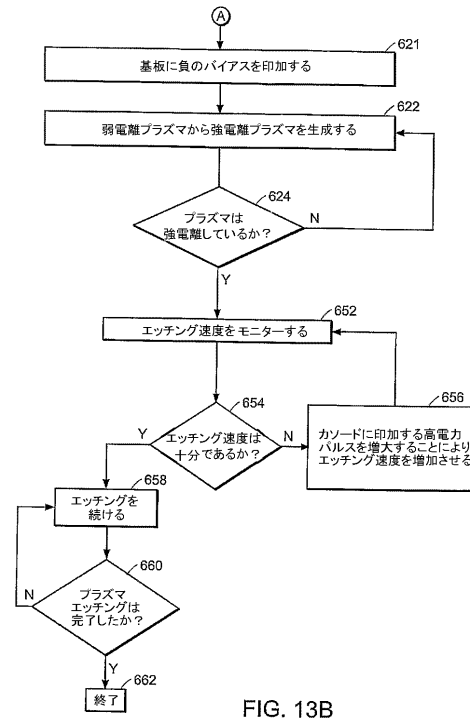


FIG. 13B

【 国際調査報告 】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

		International Application No PCT/US 03/34191
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER IPC 7 H01J37/32		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) IPC 7 H01J		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used) EPO-Internal, WPI Data, PAJ		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 4 983 253 A (FONG FU-ON ET AL) 8 January 1991 (1991-01-08) column 3, line 55 - column 5, line 63; figure 1	1, 15, 30, 36, 37
A	US 5 728 261 A (WOLFE JOHN C ET AL) 17 March 1998 (1998-03-17) column 5, line 25 - column 8, line 5; figure 1	1, 15, 30, 36, 37
A	EP 0 428 161 A (KOKUSAI ELECTRIC CO LTD ; KINOSHITA HARUHISA (JP)) 22 May 1991 (1991-05-22) column 7, line 7 - column 10, line 3; figures	1, 15, 30, 36, 37
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of box C. <input checked="" type="checkbox"/> Patent family members are listed in annex.		
* Special categories of cited documents:		
A document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance *E* earlier document but published on or after the international filing date *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed		*T* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention *X* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone *Y* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art. *&* document member of the same patent family
Date of the actual completion of the international search 4 August 2004		Date of mailing of the international search report 16/08/2004
Name and mailing address of the ISA European Patent Office, P.B. 5816 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl, Fax: (+31-70) 340-3016		Authorized officer Schaub, G

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No.
PCT/US 03/34191

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 4983253	A	08-01-1991	AU 3739489 A	12-12-1989
			WO 8911729 A1	30-11-1989
US 5728261	A	17-03-1998	WO 9638857 A2	05-12-1996
EP 0428161	A	22-05-1991	JP 2790878 B2	27-08-1998
			JP 6025874 A	01-02-1994
			DE 69032952 D1	25-03-1999
			DE 69032952 T2	30-09-1999
			EP 0428161 A2	22-05-1991
			KR 180900 B1	15-04-1999
			US 5795452 A	18-08-1998

フロントページの続き

(81) 指定国 AP(GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), EP(AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW

(72) 発明者 チストアコブ, ローマン

アメリカ合衆国 マサチューセッツ 02048, マンスフィールド, ハイ ストリート 1
37エー

Fターム(参考) 5F004 AA01 BA08 BA09 BB07 BB11 BD03 BD05 CA03 CA08