

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5698652号  
(P5698652)

(45) 発行日 平成27年4月8日(2015.4.8)

(24) 登録日 平成27年2月20日(2015.2.20)

(51) Int. Cl.	F I
<b>C 2 3 C 16/511 (2006.01)</b>	C 2 3 C 16/511
<b>C 2 3 C 14/35 (2006.01)</b>	C 2 3 C 14/35 F
<b>H O 1 L 21/31 (2006.01)</b>	H O 1 L 21/31 C
<b>H O 1 L 21/365 (2006.01)</b>	H O 1 L 21/31 D
<b>H O 1 L 21/3065 (2006.01)</b>	H O 1 L 21/365

請求項の数 16 (全 17 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2011-500841 (P2011-500841)  
 (86) (22) 出願日 平成21年2月26日 (2009.2.26)  
 (65) 公表番号 特表2011-515582 (P2011-515582A)  
 (43) 公表日 平成23年5月19日 (2011.5.19)  
 (86) 国際出願番号 PCT/US2009/035325  
 (87) 国際公開番号 W02009/117229  
 (87) 国際公開日 平成21年9月24日 (2009.9.24)  
 審査請求日 平成24年2月26日 (2012.2.26)  
 (31) 優先権主張番号 12/050,373  
 (32) 優先日 平成20年3月18日 (2008.3.18)  
 (33) 優先権主張国 米国 (US)

前置審査

(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 パウアーズ アベニュー 3050  
 (74) 代理人 100101502  
 弁理士 安齋 嘉章  
 (72) 発明者 ストールウェル マイケル ダブリュー  
 アメリカ合衆国 コロラド州 80538  
 ラブランド ホワイト エルム ドライブ 809

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 同軸マイクロ波支援堆積及びエッチングシステム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

処理チャンバと、

基板を保持するために前記処理チャンバの中に配設された基板支持部材と、

前記処理チャンバの中にガスを流し込むガス供給系と、

マイクロ波を放射するための線状同軸マイクロ波アンテナを含み、前記線状同軸マイクロ波アンテナは誘電体材料によって包囲される線状導体を含み、前記マイクロ波アンテナは、複数の平行な同軸マイクロ波線状源を有する平面源を含み、電源が前記マイクロ波アンテナに1000Hz~10000Hzの周波数でパルス状電力を提供するようになされており、前記線状同軸マイクロ波アンテナは、前記チャンバ内部に配設され、前記基板の長手に沿って延在し、前記マイクロ波アンテナは前記処理チャンバ内部の前記基板に対して移動できるマイクロ波堆積及びエッチングシステム。

【請求項2】

前記マイクロ波アンテナの位置が前記基板に隣接している請求項1記載のマイクロ波堆積及びエッチングシステム。

【請求項3】

前記マイクロ波堆積及びエッチングシステムにプラズマ源を用いることができる請求項1記載のマイクロ波堆積及びエッチングシステム。

【請求項4】

前記マイクロ波アンテナの位置が、前記チャンバのほぼ中央の、前記プラズマ源と前記

基板の間にある請求項 3 記載のマイクロ波堆積及びエッチングシステム。

【請求項 5】

前記マイクロ波アンテナの位置が前記プラズマ源に隣接している請求項 3 記載のマイクロ波堆積及びエッチングシステム。

【請求項 6】

前記プラズマ源がスパッタリングターゲットを含む請求項 3 記載のマイクロ波堆積及びエッチングシステム。

【請求項 7】

前記スパッタリングターゲットが、金属、誘電体、又は半導体を含む請求項 6 記載のマイクロ波堆積及びエッチングシステム。

10

【請求項 8】

マグネトロンが、プラズマ密度を向上させるために前記ターゲットに隣接している請求項 6 記載のマイクロ波堆積及びエッチングシステム。

【請求項 9】

前記プラズマ源が容量生成プラズマ源を含む請求項 3 記載のマイクロ波堆積及びエッチングシステム。

【請求項 10】

前記プラズマ源が、プラズマを持続させるための電場を提供する R F 電圧を受ける誘導コイルを有する誘導結合源を含む請求項 3 記載のマイクロ波堆積及びエッチングシステム。

20

【請求項 11】

基板支持部材全体を覆って基板を配設することにより処理チャンバの中に前記基板を取り付けるステップと、

前記基板に対して前記基板の長手に沿って延在する線状同軸マイクロ波アンテナの位置を調節するステップであって、前記線状同軸マイクロ波アンテナは誘電体材料によって包囲される線状導体を含み、前記同軸マイクロ波アンテナは、複数の平行な同軸マイクロ波線状源を有する平面源を含むステップと、

前記マイクロ波アンテナを用いてマイクロ波を生成するステップと、

1000 Hz ~ 10000 Hz で電力をパルス化することによって前記生成されたマイクロ波の電力を調節するステップと、

30

前記処理チャンバの中にガスを流し込むステップと、

前記生成されたマイクロ波を用いて前記流動ガスから前記処理チャンバの内部にプラズマを生成するステップと、

前記プラズマを用いて前記基板上に層を形成するステップとを含む基板上に膜を堆積する方法。

【請求項 12】

前記処理チャンバにプラズマ源を導入するステップを更に含む請求項 11 記載の基板上に膜を堆積する方法。

【請求項 13】

前記マイクロ波アンテナが、前記処理チャンバの内部の前記基板と前記プラズマ源の間で移動できるように構成されている請求項 12 記載の基板上に膜を堆積する方法。

40

【請求項 14】

前記プラズマ源が、スパッタリングターゲット、容量生成プラズマ源、又は誘導結合プラズマ源を含む請求項 12 記載の基板上に膜を堆積する方法。

【請求項 15】

R F 電力を用いて前記基板支持部材にバイアスをかけている請求項 11 記載の基板上に膜を堆積する方法。

【請求項 16】

前記同軸マイクロ波アンテナは水平位置にある請求項 11 記載の基板上に膜を堆積する方法。

50

## 【発明の詳細な説明】

## 【発明の背景】

## 【0001】

工業的応用及び材料研究において、特に、新規の先端材料を生成する際に、グロー放電薄膜堆積プロセスが広く使用されている。トレンチ又は穴内に材料を堆積するために化学的気相成長法(CVD)が優れた動作性能を一般に示すが、その簡単さと費用の低廉さから物理的気相成長法(PVD)が好ましい場合がある。PVDでは、マグネトロンスパッタリングが好ましいことが多く、その理由は、マグネトロンスパッタリングを用いると、マグネトロンスパッタリングを用いない場合と比較して堆積速度が100倍向上する可能性があると同時に、所要の放電圧力を100倍低くできる可能性があるためである。不活性ガスはターゲット材料と反応しないため、不活性ガス、特にアルゴンがスパッタリング物質として通常使用される。ターゲットに負の電圧を印加すると、正に帯電したアルゴンイオンなどの正イオンがターゲットに衝突して原子をたたき出す。また、ターゲット表面から二次電子が放出される。磁場によりターゲット付近の二次電子を捕捉することができ、二次電子と不活性ガスとのより多くのイオン化衝突を引き起こすことができる。これはターゲット付近でのプラズマのイオン化を促進して、より高いスパッタ率をもたらす。また、このことはプラズマをより低い圧力に持続できることを意味している。従来のマグネトロンスパッタリングでは、ターゲットへの電力を増加させたり、又はターゲットからの距離を縮小させたりすることにより、より大きな堆積速度を達成してもよい。しかしながら、欠点は、磁場強度が距離とともに著しく変化するため、磁化プラズマのプラズマ密度も大きく変化する傾向がある点である。この非均一性は大面積の堆積において複雑さを生じさせる可能性がある。また、従来のマグネトロンスパッタリングの堆積速度は比較的遅い。

10

20

## 【0002】

蒸発技術と異なり、PVDにおけるイオン又は原子のエネルギーは、典型的な表面の結合エネルギーに匹敵している。これが原子の移動性及び表面化学反応速度の増加を助け、低くなった温度でエピタキシャル成長が生じる可能性があるとともに、化学的に準安定な材料を合成できる可能性がある。また、エネルギー原子又はイオンを使用することにより、化合物形成がより容易になる可能性がある。更に大きい利点は、堆積材料がイオン化している場合に実現できる。この場合、電場又は磁場を用いてイオンを所望のエネルギーに加速して所定の方向に導くことにより、膜の混合、微細構造のナノスケール又はマイクロスケールでの改質、及び準安定相の生成を制御できる。中性粒子よりもイオンの形での堆積フラックスの実現に関心があるため、スパッタ材料をイオン化して、その後、基板上にRFバイアスを使用することで生成されるプラズマシースを用いてイオンを基板の方へ導くために、いくつかの新規のイオン化物理蒸着(IPVD)技術が開発されている。

30

## 【0003】

原子をイオン化するには高密度プラズマが必要であり、このことは、エネルギー電子によりイオン化される場合を除いて堆積原子が逃げることを困難にする。容量生成プラズマは通常ごくわずかにイオン化しており、結果として低堆積速度をもたらす。誘導放電を用いて、より高密度のプラズマを生成してもよい。誘導結合プラズマは、比較できる同程度の容量生成プラズマよりも約100倍高い $10^{11}$ イオン/cm<sup>3</sup>のプラズマ密度を有している可能性がある。典型的な誘導イオン化PVDは、13.56MHzのRF源を備えた内部コイルを用いて生成された誘導結合プラズマを使用する。この技術の欠点は、約100eVのエネルギーを有するイオンがコイルに衝突し、コイルを徐々に破壊して、その結果、スパッタリングにより生じた汚染物質を生成して、堆積に悪影響を与える可能性があるという点である。また、高エネルギーのイオンは基板に損傷を与える可能性がある。内部ICPコイルに関連する問題を解決するために外部コイルを使用することにより、かなりの改善が行われてきた。

40

## 【0004】

50

プラズマ密度を増加させるための他の技術は、マイクロ波周波数源を使用することである。低周波数では、電磁波はプラズマ内を伝搬せず、その代わりに反射されることがよく知られている。しかしながら、典型的なマイクロ波周波数のような高周波数では、電磁波はプラズマ電子を効果的に直接加熱することができる。マイクロ波はプラズマの中にエネルギーを与えるため、衝突が起こってプラズマをイオン化することができ、その結果、より高いプラズマ密度を実現できる。通常、ホーンを使用してマイクロ波を注入したり、又はマイクロ波をチャンバの中に入力するために真空チャンバ内にスパッタリング陰極に隣接して小型のスタブアンテナを設置したりする。しかしながら、この技術はプラズマ生成を促進する均一な支援を提供しない。また、この技術は、スパッタリング陰極の支援がない状態では、それ自体の放電を持続するのに十分なプラズマ密度を提供できない。更に、このようなシステムを大面積堆積に向けてスケールアップしようとしても、非線形性のせいで約1メートル以下の長さ限定されている。

10

**【0005】**

局所的なイオン化効率を高めて大面積全体を覆って膜を堆積するために、スパッタリング陰極に隣接して高密度で均一な放電を提供する必要性が依然として残っている。また、基板の表面損傷を減少させて、その結果、欠陥密度を減少させるために、イオンのエネルギーを低くする必要性が存在している。狭いトレンチ内のギャップフィルのような微細構造成長及び堆積範囲に影響を与えて、バルクプラズマ内及び基板表面付近の、イオン密度とイオンエネルギーとを制御することにより膜親和力を向上させる、さらなる必要性が存在している。

20

**【発明の簡単な概要】****【0006】**

本発明の実施形態は、マイクロ波源の可動位置及びマイクロ波源へのパルス状電力などの付加的な処理パラメータを導入して、マイクロ波源の支援により作動範囲及び処理ウィンドウを拡大することにより、向上した膜特性を実現するためのシステムを提供する。本発明の実施形態は、マイクロ波を放射する同軸マイクロ波アンテナを使用して物理的気相成長(PVD)又は化学的気相成長(CVD)システムを支援する。本発明の一態様は、システムが同軸マイクロ波アンテナを処理チャンバの内部で使用することであり、この同軸マイクロ波アンテナは、基板と、スパッタリングターゲット、平面状容量生成プラズマ源、又は誘導結合源のようなプラズマ源との間で移動できるようになっている。マイクロ波プラズマ源だけが存在している特別な場合では、マイクロ波アンテナの位置は基板に対して移動できる。プラズマ源に隣接した同軸マイクロ波アンテナは、より均一にイオン化を促進することができるとともに、大面積全体を覆って実質的に均一な堆積を可能にする。本発明の他の態様は、アンテナがパルス状電力を受けて、連続出力の全体にわたってプラズマ効率を増加させる可能性があることである。

30

**【0007】**

実施形態の第1のセットでは、システムが、処理チャンバと、スパッタリングターゲットと、処理チャンバ内に基板を保持する基板支持部材と、マイクロ波を放射する同軸マイクロ波アンテナと、ガス供給系と、を含んでいる。同軸マイクロ波アンテナは、PVD用途のスパッタリングターゲット又はスパッタリング陰極に隣接してプラズマ密度を均一に増加させる。ターゲットが金属を含んでいるときにはターゲットはDC電圧にさらされてターゲットが陰極として働くようにし、ターゲットが誘電体を含んでいるときにはターゲットはAC、RF、又はパルス状電力にさらされる。同軸マイクロ波プラズマ源は線状又は平面状であってもよい。平面源は平行な同軸マイクロ波線状源の群を含んでいてもよい。ターゲットの近くに1つのマグネトロン又は複数のマグネトロンを付加して、ターゲット表面に隣接して磁場を提供することにより二次電子を閉じ込めてイオン化の促進を助けてもよい。ガス供給系は、スパッタリング物質として働くように不活性ガスを処理チャンバの中に導入するように構成されている。

40

**【0008】**

本発明の実施形態の第2のセットでは、マイクロ波及びRF支援PECVDに対するシ

50

ステムが、処理チャンバと、基板支持部材と、平面状容量生成プラズマ源と、チャンバ内部の同軸マイクロ波アンテナと、ガス供給系と、を含んでいる。プラズマはRF電力を用いて容量的に生成され、線状又は平面状であってもよい補助的同軸マイクロ波源又はアンテナを用いて、プラズマは更に増強される。ガス供給系は、前駆体ガスとキャリアガスとを処理チャンバの中に導入するように構成されている。

【0009】

本発明の実施形態の第3のセットでは、マイクロ波及びICP支援CVDに対するシステムが、処理チャンバと、基板支持部材と、誘導コイルと、チャンバ内部の同軸マイクロ波アンテナと、ガス供給系と、を含んでいる。プラズマはRF電圧を用いて誘導的に生成され、同軸マイクロ波アンテナを用いて、更に増強される。アンテナは線状又は平面状であつてもよい。更に、ガス供給系は、前駆体ガスとキャリアガスとを処理チャンバの中に導入するように構成されている。

10

【0010】

本発明の実施形態の第4のセットでは、マイクロ波プラズマ支援CVDに対するシステムが、処理チャンバと、基板支持部材と、チャンバ内部の同軸マイクロ波アンテナと、ガス供給系と、を含んでいる。アンテナは線状又は平面状であつてもよい。この場合も先と同様に、ガス供給系は、前駆体ガスとキャリアガスとを処理チャンバの中に導入するように構成されている。

【0011】

また、本発明の実施形態は処理チャンバの内部の可動マイクロ波アンテナを含んでいる。本発明の1つの具体的な実施形態では、アンテナはターゲットの近くにあり、ラジカル種のプラズマ密度を増加させるとともに、エネルギーの広がりを低減する。本発明の他の具体的な実施形態では、アンテナは処理チャンバのほぼ中央にあり、バルクプラズマ特性を向上させる。本発明の第3の具体的な実施形態では、アンテナは基板の近くにあり、密度及びエッジ範囲などの膜特性に影響を与える。

20

【0012】

本発明を応用できる可能性がある領域は、太陽電池（例えば、バンドギャップ制御性と向上した堆積速度とを備えたアモルファス光起電層及び微結晶光起電層の堆積）と、プラズマディスプレイ装置（例えば、省エネルギー性であり製造費が低廉である誘電体層の堆積）と、傷防止コーティング（例えば、UV吸収性と引っかき抵抗性を持たせるためのポリカーボネート上の有機材料及び無機材料の薄膜層）と、先進的なチップパッケージのプラズマ洗浄及び前処理（例えば、利点は静電気蓄積がなく、UV放射線損傷がない）と、半導体、配向層、バリア膜、光学被膜、ダイヤモンド状炭素、及び純粋なダイヤモンド薄膜と、を含んでおり、本発明を使用することにより向上したバリアと引っかき抵抗性を実現できる。

30

【0013】

付加的な実施形態及び構成の一部は以下の説明で示され、一部は明細書を審査することで当業者に明らかになり、又は本発明を実施することにより確認されるであろう。本発明の本質及び利点は、明細書の残りの部分と図面とを参照することにより、更に理解されるであろう。

40

【図面の簡単な説明】

【0014】

【図1A】簡略化した例示的なマイクロ波支援スパッタリング及びエッチングシステムを示す図である。

【図1B】簡略化した例示的なマイクロ波支援マグネトロンスパッタリング及びエッチングシステムを示す図である。

【図2】簡略化した例示的なマイクロ波及び平面プラズマ支援PECVD堆積及びエッチングシステムを示す図である。

【図3】簡略化した例示的なマイクロ波及び誘導結合プラズマ支援CVD堆積及びエッチングシステムを示す図である。

50

【図4】簡略化した例示的なマイクロ波支援CVD堆積及びエッチングシステムを示す図である。

【図5】基板上に膜を形成するための簡略化した堆積ステップを示すフローチャートである。

【図6】パルス周波数がプラズマからの光信号に及ぼす影響を示す図である。

【図7A】4つの同軸マイクロ波線状源で構成された平面プラズマ源の簡略図である。

【図7B】8つの平行な同軸マイクロ波プラズマ源で構成された平面状マイクロ波源の光学像である。

【図8】連続マイクロ波電力と比較してパルス状マイクロ波電力における向上したプラズマ効率を示すグラフである。

10

【発明の詳細な説明】

【0015】

#### 1. マイクロ波支援堆積の概要

マイクロ波プラズマは、13.56MHzでの典型的な高周波(RF)結合プラズマ源と比較して、2.45GHzでの向上した電力結合及び電力吸収の結果として、より高いプラズマ密度(例えば、 $10^{12}$ イオン/cm<sup>3</sup>)と、より高い堆積速度とを実現するために開発されている。RFプラズマの1つの欠点は、入力電力の大半がプラズマシース(暗部)を通して失われることである。マイクロ波プラズマを使用することにより、薄いプラズマシースが形成され、より多くの電力がプラズマで吸収されてラジカル種及びイオン種を生成することができ、これにより、プラズマ密度を増加させるとともに、イオンエネルギー分布の衝突広がりを減少させて幅の狭いエネルギー分布を実現する。

20

【0016】

また、マイクロ波プラズマは、狭いエネルギー分布を有する低イオンエネルギーのような他の利点を有している。例えば、マイクロ波プラズマは1~25eVの低イオンエネルギーを有していてもよく、RFプラズマと比較して損傷がより少ない。対照的に、標準的な平面放電は、より広がったイオンエネルギー分布を有する100eVの高イオンエネルギーを生成するが、生成されるイオンエネルギーが関心のあるほとんどの材料の結合エネルギーを超えているため、損傷がより大きくなるであろう。最終的には、これは、真性欠陥の導入のせいで高品質の結晶性薄膜の形成を阻害する。低イオンエネルギーと幅の狭いエネルギー分布とにより、マイクロ波プラズマは表面改質に有用であるとともに、被覆特性を向上させる。

30

【0017】

更に、幅の狭いエネルギー分布を有する低イオンエネルギーのプラズマ密度が増加した結果として、より低い基板温度(200よりも低い、例えば、100などの温度)を実現する。このようなより低い温度は、動力学的に制限された状態でのより良い微結晶成長を可能にする。また、マグネトロンを用いない標準的な平面放電では、約50mtorrよりも低い圧力ではプラズマが不安定になるため、自続放電を維持するには約50mtorrよりも高い圧力を通常必要とする。本明細書で説明したマイクロ波プラズマ技術は、約 $10^{-6}$ torrから1気圧の間の圧力を可能にする。従って、マイクロ波源を使用することにより温度及び圧力などの処理ウィンドウが拡大される。

40

【0018】

これまでの真空被覆業界でのマイクロ波源技術に関連する1つの欠点は、小型ウェハ処理から非常に大面積の処理へとスケールアップするときの均一性維持の困難さであった。本発明の実施形態のマイクロ波反応器設計は、これらの問題点に対処する。高速堆積で超大面積(1m<sup>2</sup>よりも大きい面積)の実質的に均一な被膜を堆積して高密度の厚膜(例えば、厚さ5~10µm)を形成するために、同軸プラズマ線状源の配列が開発されている。

【0019】

マイクロ波電力を制御してプラズマを生成し、このようにして、プラズマ密度とプラズマ温度とを制御するために、高度なパルス化技術が開発されている。この高度なパルス化

50

技術は、平均電力が低いままであるため、基板全体に対してかかる熱負荷を低減する可能性がある。この特徴は、基板が、高分子基板の場合のような低融点又は低ガラス遷移温度を有しているときに関係がある。高度なパルス化技術は、パルスとパルスの間のオフ時間を用いたプラズマの中への高出力パルシングを可能にして、これにより、基板の連続加熱の必要性を減少させる。パルス化技術の他の態様は、連続マイクロ波電力と比較してプラズマ効率の大幅な改善である。

#### 【 0 0 2 0 】

#### 2 . プラズマ放電を持続させるためのスパッタリング陰極及び条件

図 1 A 及び図 1 B を参照すると、スパッタリングシステム 1 0 0 A 内及びマグネトロンスパッタリングシステム 1 0 0 B 内のターゲット 1 1 6 は、金属、誘電体、又は半導体で作られていてもよい。アルミニウム、銅、チタニウム、又はタンタルなどの金属ターゲットでは、ターゲットを陰極にして基板を陽極にするようにターゲットに DC 電圧を印加してもよい。DC 電圧は自由電子の加速を促進するであろう。自由電子は、アルゴンガスからのアルゴン ( Ar ) 原子などのスパッタリング物質と衝突し、アルゴン原子を励起してイオン化する。Ar の励起はガスグローを生じる。Ar のイオン化は、Ar<sup>+</sup> と二次電子とを生成する。二次電子は励起過程とイオン化過程とを繰り返してプラズマ放電を持続させる。

#### 【 0 0 2 1 】

電子は小さい質量のせいでイオンよりもはるかに速く動くため、陰極付近には正電荷が蓄積する。従って、Ar と衝突する電子は少なく、高エネルギー電子との衝突が少ないため、ほとんどの場合、励起ではなく、むしろイオン化が引き起こされる。陰極付近にはクルックス暗部が形成される。暗部に入射する正イオンは陰極又はターゲットに向かって加速されてターゲットに衝突し、その結果、原子がターゲットからたたき出されて、その後、原子は基板に搬送され、また、二次電子も生成されてプラズマ放電を持続させる。陽極と陰極の間の距離が暗部よりも狭いときには、わずかな励起しか生じず、放電を持続することができない。他方、チャンバ内の Ar 圧力が低すぎるときには、電子の平均自由行程が長くなり、それにより、二次電子は Ar 原子と衝突する前に陽極に到達することになる。この場合もまた、放電を持続できない。従って、プラズマを持続させるための条件は下記の式で表される。

$$L * P > 0 . 5 ( c m \ t o r r )$$

ここで、L は電極間隔、P はチャンバ圧力である。例えば、ターゲットと基板の間隔が 1 0 c m であるときには、P は 5 0 m t o r r よりも高くなければならない。

#### 【 0 0 2 2 】

ガス内の原子の平均自由行程 は下記の式で与えられる。

$$( c m ) \sim 5 \times 1 0 ^ { - 3 } / P ( t o r r )$$

P が 5 0 m t o r r であるときには、 は約 0 . 1 c m である。このことは、スパッタ原子又はイオンは基板に到達するまでに、通常、何百回もの衝突を行っていることを意味する。これは堆積速度を著しく低下させる。実際、スパッタ率 R はチャンバ圧力と、ターゲットと基板の間隔と、に反比例する。従って、放電を持続させるのに必要なチャンバ圧力を低下させると、堆積速度が向上する。

#### 【 0 0 2 3 】

スパッタリング陰極の近くに補助的なマイクロ波源を設けることにより、スパッタリングシステムは、低圧力、低電圧、及び場合によっては高くなる可能性のある堆積速度で陰極が作動することを可能にする。動作電圧を低下させることにより、原子又はイオンのエネルギーが低くなり、基板に与える損傷が低減される。マイクロ波の支援により得られる高プラズマ密度と低エネルギープラズマとを用いることで、基板に与える損傷を少なくしながら高い堆積速度を実現できる。

#### 【 0 0 2 4 】

再び図 1 A 及び図 1 B を参照すると、スパッタリングシステム 1 0 0 A 内及びマグネトロンスパッタリングシステム 1 0 0 B 内のターゲット 1 1 6 は、酸化シリコン、酸化アル

10

20

30

40

50

ミニウム、又は酸化チタンなどの誘電体で作られていてもよい。ターゲット106は自由電子を加速するためにAC、RF、又はパルス状電力にさらされてもよい。

【0025】

### 3. 例示的マイクロ波支援PVD

図1Bは、同軸マイクロ波アンテナ110で支援された物理的気相成長(PVD)マグネトロンスパッタリングシステム100Bの簡略化した模式的断面図を示している。このシステムを使用して本発明の実施形態を実行してもよい。システム100Bは、真空チャンバ148と、ターゲット116と、マグネロン114と、ターゲット116の下方に配置された同軸マイクロ波アンテナ110と、基板支持部材124と、真空ポンプシステム126と、コントローラ128と、ガス供給系140、144と、スパッタリング蒸着からチャンバ側壁と基板支持部材の側部とを保護する遮へい体154と、を含んでいる。アプライドマテリアルズ社などにより使用される例示的PVDマグネトロンスパッタリングシステムに対する以下の参考文献、すなわち、米国特許第6,620,296B2号、米国特許出願公開第2007/0045103A1号、及び米国特許出願公開第2003/0209422A1号をここに引用し、引用することによりすべての目的に対して本明細書の一部となっている。

10

【0026】

ターゲット116は、膜118を形成するために基板120上に堆積される材料である。ターゲット116は誘電体又は金属を含んでいてもよい。ターゲットは、対応するPVDマグネトロンスパッタリングシステム100Bに着脱自在に挿入できるような構造を通常有している。PVDプロセスがターゲット材料を浸食することを考慮して、ターゲット116を定期的に新規のターゲットに取り換える。

20

【0027】

DC電源138と、高周波電源又はパルス電源132と、の両方が、所定の装置を介してターゲット116に接続されている。この装置はスイッチ136であってもよい。スイッチ136は、DC電源138からの電力、又はAC電源、RF電源、もしくはパルス電源132からの電力のどちらか一方を選択する。相対的に負電圧を与える電圧源138は、数百ボルトのDC陰極電圧を提供する。具体的な陰極電圧は設計によって異なる。ターゲットは負に帯電した粒子の供給源として働くことができるため、ターゲットを陰極と呼んでもよい。機能を実現するDC電力とRF電力とを切り換えるための多数の方法があってもよいことを当業者は理解するであろう。更に、いくつかの実施形態では、DC電力とRF電力の両方が同時にターゲットに接続されていることが有利である可能性がある。

30

【0028】

図1Bに示すようにマグネロンを使用することにより、マグネロンを使用しない図1Aと比較してスパッタ率を著しく向上させることができる。マグネロン114は、一般に、ターゲット116の近くに配置され、例えば、図1Bではターゲットの上方に配置されている。マグネロン114は対向する磁石(S、N)を有しており、チャンバの中のマグネロン114のすぐ近くに磁場を生成する。磁場は二次電子を閉じ込めて、その結果、電荷の中立性によりイオン密度が増加して、チャンバの中のマグネロン114の近傍に高密度プラズマ150を形成するであろう。プラズマのイオン化の程度を制御するために、マグネロン114は、可変サイズ、位置、及び多数の形状を有していてもよい。マグネロン114は任意の形状を有していてもよく、特に、楕円形、三角形、円形、及び平らなインゲンマメ形状であってもよい。また、マグネロン114はアンバランスな設計を有していてもよく、すなわち、外部ポールの磁束が内部ポールで作り出される磁束よりも大きくてもよい。いくつかの参考文献、例えば、平らなインゲンマメ形状のマグネロンについての米国特許第5,242,566号、三角形の外部ポールについての米国特許第6,306,265号、及び異なる形状のマグネロンについての米国特許第6,290,825号などをここに提供する。上述の特許のそれぞれは引用することによりすべての目的に対して本明細書の一部となっている。

40

【0029】

50



同軸マイクロ波アンテナ 110 は、チャンバ 148 内部のターゲット 116 と基板 120 の間に位置している。アンテナ 110 の位置はコントローラ 128 を用いて調節してもよい。アンテナ 110 がターゲット 116 の近くにあるときには、アンテナ 110 から放射されたマイクロ波は、ラジカル及びイオンのプラズマ密度の増加を促進するとともに、エネルギー広がりを低減する。他方、アンテナ 110 が基板 120 の近くにあるときには、マイクロ波は基板 120 のバイアス効果の増大を促進して、密度及びエッジ範囲などの膜特性に影響を与える。アンテナ 110 はチャンバ 148 のほぼ中央の、ターゲット 116 と基板 120 の間にあってもよく、マイクロ波はバルクプラズマ特性を向上させる。

#### 【0030】

マイクロ波はプラズマの中にエネルギーを与え、プラズマを加熱してイオン化を促進して、その結果、プラズマ密度を向上させる。同軸マイクロ波アンテナ 110 は複数の平行な同軸アンテナを含んでいてもよい。アンテナ 110 の長さは、いくつかの実施形態では最大 3 m までであってもよい。同軸マイクロ波アンテナ 110 の利点の 1 つは、スパッタリング陰極又はターゲット 116 の近傍で均一放電を提供することである。これは、基板 120 全体を覆って実質的に均一な大面積の堆積を可能にする。アンテナ 110 はパルス状電力 170 又は連続電力（図示せず）を受けてもよい。

#### 【0031】

基板 120 上のスパッタ層 118 の堆積を制御するために、基板支持部材 124 に接続された RF 電力 130 を用いて基板 120 にバイアスをかけてもよく、この基板支持部材 124 はターゲット 116 の中心の下方に、ターゲット 116 から離間して設けてあり、通常遮へい体 154 の内部にある。バイアス電力は 13.56 MHz の典型的な周波数を有していてもよく、又はより一般的には 400 kHz ~ 約 500 MHz の間の周波数を有していてもよい。支持部材は電気伝導性であり、一般に、接地に接続されたり、又はターゲット 116 と支持部材 124 の間にさらなる電場を形成するために相対的に正電圧を与える他の基準電圧に接続されたりする。基板 120 はシリコンウェハのようなウェハ、又は高分子基板であってもよい。特定の用途で要求されるように、基板 120 はスパッタリングの間に加熱されたり、又は冷却されたりしてもよい。電源 162 が、一般的に台座と呼ばれる基板支持部材 124 内に埋め込まれた抵抗加熱器 164 に電流を流して、それによって基板 120 を加熱してもよい。制御可能な冷却装置 160 が、台座内に形成された冷却水路に冷却水又は他の冷却媒体を循環させてもよい。膜 118 の堆積は、基板 120 の上面全体にわたって均一であることが好ましい。

#### 【0032】

真空ポンプ 126 は、 $10^{-8}$  torr の範囲内の非常に低い基底圧力までチャンバ 148 を排気することができる。質量流量コントローラ 142 を介してチャンバ 148 に連結された第 1 のガス源 140 が、アルゴン (Ar)、ヘリウム (He)、キセノン (Xe)、及び / 又はそれらの組み合わせなどの不活性ガスを供給する。第 2 のガス源 144 が、質量流量コントローラ 146 を介してチャンバ 148 に窒素 (N<sub>2</sub>) などの反応性ガスを供給する。図 1 B に示すようにチャンバの上端近くのアンテナ 110、マグネトロン 114、及びターゲット 116 の上方で、又は基板 120 とターゲット 116 の間のチャンバの中ほどで（図示せず）、ガスをチャンバの中に流し込んでよい。チャンバ内部のスパッタリングガスの圧力は、0.2 m torr と 100 m torr の間に通常維持される。

#### 【0033】

マイクロプロセッサコントローラ 128 が、マイクロ波アンテナ 110 の位置、マイクロ波用のパルス電源又は連続電源 170、質量流量コントローラ 142、高周波電源 132、DC 電源 138、バイアス電源 130、抵抗加熱器 164、及び冷却装置 160 を制御する。コントローラ 128 は、例えば、ランダムアクセスメモリのようなメモリ、読み出し専用メモリ、ハードディスクドライブ、フロッピー（商標名）ディスクドライブ、又は他の任意の形態のローカルもしくはリモートのデジタル記憶装置、及び汎用コンピュータプロセッサ (CPU) に接続されたカードラックなどを含んでいてもよい。ハードディ

10

20

30

40

50

スク上に保存されたコンピュータプログラムの制御に基づいて、又はリムーバブルディスク上に保存されるような他のコンピュータプログラムを介して、コントローラは動作する。コンピュータプログラムは、例えば、タイミング、ガスの混合、マイクロ波アンテナへのパルス状電力又は連続電力、ターゲット上に印加されたDC電力又はRF電力、基板用にバイアスをかけられたRF電力、基板温度、及び特定のプロセスの他のパラメータなどを指示する。

#### 【0034】

##### 4. 例示的なマイクロ波及びRFプラズマ支援CVD

5 ~ 10  $\mu\text{m}$ などの厚膜を堆積する場合、RF支援PECVD法は非常に低い堆積速度をもたらす。従って、プラズマ密度を増加させて、その結果、堆積速度を向上させるためには補助的なマイクロ波源が必要である。図2は、簡略化したマイクロ波及び平面プラズマ支援PECVDシステム200である。システム200は、プラズマ源がスパッタリングターゲットではなく、その代わりに容量生成プラズマ源であるということを除いて、図1A及び図1Bに示したシステム100A及び100Bに非常によく似ている。システム200は、処理チャンバ248と、平面プラズマ源216と、チャンバ内部の平面プラズマ源216と基板220の間にあるアンテナ210と、基板支持部材224上の基板220と、弁246及び242を備えたガス配送系244及び240と、真空ポンプシステム226と、遮へい体254と、コントローラ228と、を含んでいる。電源262を用いて制御される加熱器264により基板を加熱してもよい。また、冷却装置260を用いて基板を冷却してもよい。基板支持部材224は電気伝導性であり、RF電力230を用いて基板支持部材224にバイアスをかけてもよい。平面プラズマ源216はRF電力270を受ける。プラズマ250はチャンバ248内部の遮へい体254の中で形成される。この場合も先と同様に、アンテナ210の位置はコントローラ228を用いて調節してもよい。アンテナ210は同軸マイクロ波プラズマ源であり、アンテナ210はパルス状電力232又は連続電力(図示せず)を受ける。ガス配送系244及び240は、基板220上に膜218を形成するために不可欠な物質源を提供する。

#### 【0035】

##### 5. 例示的なマイクロ波及び誘導結合プラズマ支援CVD

図3は、簡略化したマイクロ波及びICP支援堆積及びエッチングシステム300を示している。この場合も先と同様に、システム300は、プラズマ源がスパッタリングターゲットではなく、誘導結合プラズマ(ICP)コイル316であるということを除いて、図1A及び図1Bに示したシステム100A及び100Bに非常によく似ている。システム300は、処理チャンバ348と、誘導結合プラズマ源316と、チャンバ内部の誘導結合プラズマ源316と基板320の間にあるアンテナ310と、基板支持部材324上の基板320と、弁346及び342を備えたガス配送系344及び340と、真空ポンプシステム326と、遮へい体354と、コントローラ328と、を含んでいる。電源362を用いて制御される加熱器364により基板を加熱してもよい。また、冷却装置360を用いて基板を冷却してもよい。基板支持部材324は電気伝導性であり、RF電力330を用いて基板支持部材324にバイアスをかけてもよい。誘導結合プラズマ源316はRF電力370を受ける。プラズマ350はチャンバ内部の遮へい体354の中で形成される。この場合も先と同様に、アンテナ310の位置はコントローラ328を用いて調節してもよい。アンテナ310は同軸マイクロ波プラズマ源であり、アンテナ310はパルス状電力332又は連続電力(図示せず)を受ける。ガス配送系344及び340は、基板320上に膜318を形成するために不可欠な物質源を提供する。

#### 【0036】

ソレノイドコイル316がRF電圧370を受ける。コイル内の電流は縦方向の磁場を生成する。この時間的に変化する磁場は、ソレノイド軸に巻き付く時間的に変化する方位角電場を生成する。方位角電場はプラズマ内に周方向電流を生じさせる。その結果、電子は加速されてエネルギーを増し、これによりプラズマ密度を増大させる。例えば、13.56 MHzのRF周波数が一般的に使用されるが、これに限らない。

10

20

30

40

50

## 【0037】

## 6. 例示的なマイクロ波プラズマ支援CVD

図4は、簡略化したマイクロ波支援CVD堆積及びエッチングシステム400である。このシステムは、システム100A、100B、200、及び300とは異なり、マイクロ波源だけが存在しており、スパッタリングターゲット、平面プラズマ源、又は誘導結合プラズマ源などの他のプラズマ源がない。システム400は、処理チャンバ448と、チャンバ内部の基板420の上方にあるアンテナ410と、基板支持部材424上の基板420と、弁446及び442を備えたガス配送系444及び440と、真空ポンプシステム426と、遮へい体454と、コントローラ428と、を含んでいる。電源462を用いて制御される加熱器464により基板を加熱してもよい。また、冷却装置460を用いて基板を冷却してもよい。基板支持部材424は電気伝導性であり、RF電力430を用いて基板支持部材424にバイアスをかけてもよい。プラズマ450はチャンバ内部の遮へい体454の中で形成される。この場合も先と同様に、アンテナ410の位置はコントローラ428を用いて調節してもよい。アンテナ410は同軸マイクロ波プラズマ源であり、アンテナ410はパルス状電力432又は連続電力(図示せず)を受ける。ガス配送系444及び440は、基板420上に膜418を形成するために不可欠な物質源を提供する。

10

## 【0038】

また、システム100A、100B、200、300、及び400を使用してプラズマエッチング又はプラズマ洗浄を行ってもよい。例えば、 $\text{NF}_3$ のようなニトロフッ素化されたエッチングガス又は $\text{C}_2\text{F}_6$ 、 $\text{C}_3\text{F}_8$ 、又は $\text{CF}_4$ のようなカルボフッ素化されたエッチングガスをチャンバの中に導入するとき、プラズマエッチング又はプラズマ洗浄を用いて、チャンバの構成要素上に堆積した好ましくない物質を除去してもよい。

20

## 【0039】

## 7. 例示的堆積プロセス

説明のために、図5は、基板上に膜を形成するために使用してもよいプロセスのフローチャートを提供している。プロセスは、ブロック502で、スパッタリングターゲット、容量生成プラズマ源、誘導結合プラズマ源、又はマイクロ波プラズマ源のみ、などのプラズマ源を導入することによりシステムを選択するステップから始まる。次に、ブロック504に示すように処理チャンバの中に基板を取り付ける。ブロック506で、マイクロ波アンテナを所望の位置に移動させ、具体的な要求事項に応じて、例えば、ターゲット又は基板の近くに移動させる。ブロック508で、例えば、電源によりパルス状電力又は連続電力を用いて、マイクロ波電力を調節する。ブロック510で、スパッタリング物質などのガス又は反応性前駆体を流すことにより、膜堆積を開始する。

30

## 【0040】

$\text{SiO}_2$ の堆積では、このような前駆体ガスは、ヘキサメチルジシロキサン(HMDSO)などのシリコン含有前駆体と、 $\text{O}_2$ などの酸化性前駆体と、を含んでもよい。 $\text{SiO}_x\text{N}_y$ の堆積では、このような前駆体ガスは、ヘキサメチルジシラザン(HMDS)などのシリコン含有前駆体と、アンモニア( $\text{NH}_3$ )などの窒素含有前駆体と、酸化性前駆体と、を含んでもよい。 $\text{ZnO}$ の堆積では、このような前駆体ガスは、ジエチル亜鉛(DEZ)などの亜鉛含有前駆体と、酸素( $\text{O}_2$ )、オゾン( $\text{O}_3$ )、又はそれらの混合物などの酸化性前駆体と、を含んでもよい。反応性前駆体が基板に到達する前に早まって反応するのを防止するために、それらの反応性前駆体は別々のラインを流れてもよい。あるいは、同じラインを流れるように反応性前駆体を混合してもよい。

40

## 【0041】

キャリアガスがスパッタリング物質として働いてもよい。例えば、 $\text{H}_2$ の流れと一緒に、又は $\text{He}$ の流れもしくは $\text{Ar}$ などの重い不活性ガスの流れさえも含む不活性ガスの流れと一緒に、キャリアガスを提供してもよい。異なるキャリアガスで提供されるスパッタリングの程度は、それらのキャリアガスの原子質量に反比例する。例えば、処理チャンバ内で混ざる $\text{H}_2$ の流れと $\text{He}$ の流れの両方を提供することにより、複数のガスの流れを提供

50

してもよい場合がある。あるいは、例えば、 $H_2 / He$ の流れを処理チャンバの中に提供するときには、キャリアガスを提供するために複数のガスを使用してもよい場合がある。

【0042】

ブロック512に示すように、1GHz～10GHzの範囲の周波数のマイクロ波を用いて、例えば、一般的には2.45GHz(12.24cmの波長)の周波数のマイクロ波を用いて、前駆体ガスからプラズマを形成する。更に、出力要件が重要ではないときには、5.8GHzの高周波を使用する場合が多い。高い周波数源を使用する利点は、高い周波数源は2.45GHzの低い周波数源よりも小型(約半分の大きさ)であることである。

【0043】

いくつかの実施形態では、プラズマは、 $10^{11}$ イオン/cm<sup>3</sup>を超えるイオン密度を有する高密度プラズマであってもよい。また、ある場合には、ブロック514で基板に電氣的バイアスを加えることが、堆積特性に影響を与える可能性がある。このようなバイアスを加えることにより、プラズマのイオン種が基板に引き寄せられて、結果としてスパッタリングを増加させる場合がある。また、いくつかの実施形態では、他の方法を用いて、例えば、処理チャンバの中の圧力を制御する方法、前駆体ガスが処理チャンバに入る流速を制御する方法、プラズマを生成する際に使用する電力を制御する方法、基板にバイアスをかける際に使用する電力を制御する方法などを用いて、処理チャンバの中の環境を調整してもよい。このようにして、特定の基板を処理するために定めた条件に基づいて、ブロック516に示すように基板全体を覆って材料が堆積される。

【0044】

発明者はCVDにおいてパルス状のマイクロ波を用いることにより約3倍の堆積速度の向上を実証している。厚さが約5μmで面積が約800mm×200mmのSiO<sub>2</sub>膜を約1m<sup>2</sup>の基板の上に堆積する。基板は約280℃まで静的に加熱される。堆積時間はわずか5分であり、従って、堆積速度は約1μm/分である。SiO<sub>2</sub>膜は良好な光学透過率を与え、また、好ましくない有機物質の含有量も少ない。

【0045】

#### 8. 例示的な平面状マイクロ波源及び特徴

パルス周波数は、プラズマの中に入るマイクロ波パルス状電力に影響を与える可能性がある。図6は、マイクロ波パルス状電力604がプラズマの光信号602に及ぼす周波数効果を示している。プラズマの光信号602は平均ラジカル濃度を反映している。図6に示すように、10Hzのような低パルス周波数では、すべてのラジカルが消費された場合、プラズマからの光信号602は次の電力パルスが来るまでに縮小して消滅する。パルス周波数が10,000Hzのような高周波まで高くなると、平均ラジカル濃度は基準線606よりも高くなり、より安定する。

【0046】

図7Aは、4つの同軸マイクロ波線状源710で構成された平面状同軸マイクロ波源702と、基板704と、カスケード型同軸電力プロバイダ708と、インピーダンス整合された方形導波管706と、を含む簡略化したシステムの模式図を示している。同軸マイクロ波線状源710では、マイクロ波電力が横電磁界(TEM)波モードでチャンバの中に放射される。同軸ラインの外部導体を置換するチューブが、高耐熱性と低誘電損失とを有する石英又はアルミナなどの誘電体で作られており、このチューブは大気圧を有する導波管と真空チャンバの間の境界の役割を果たす。

【0047】

同軸マイクロ波線状源700の断面図は、2.45GHzの周波数でマイクロ波を放射する導体726を示している。放射状にのびる線は電場722を表しており、円は磁場722を表している。マイクロ波は空気を通して誘電体層728まで伝搬し、その後、誘電体層728を通して漏れ出て誘電体層728の外側に外部プラズマ導体720を形成する。同軸マイクロ波線状源の近くで持続するこのような波は、表面波である。マイクロ波は直線に沿って伝搬し、電磁エネルギーをプラズマエネルギーに変換することにより高い減

10

20

30

40

50

衰を経験する。他の構成は、マイクロ波源（図示せず）の外側に石英又はアルミナを備えていない。

【0048】

図7Bは、8つの平行な同軸マイクロ波線状源で構成された平面状同軸マイクロ波源の光学像を示している。各同軸マイクロ波線状源の長さは、いくつかの実施形態では最大3mまでであってもよい。図面は平面状同軸マイクロ波源を水平に配置することを示しているが、特別な実施形態（図示せず）においてウェハを垂直方向に配置する場合には、平面状同軸マイクロ波源を垂直方向に配置してもよい。ウェハ及びマイクロ波源をこのような垂直位置にする利点は、水平位置では重力がかえってウェハ上に集まるために、いかなる粒子も、処理中に、垂直方向に配置したウェハから離れ落ちる可能性があることである。

10

これにより処理中の汚染が減少する可能性がある。

【0049】

通常、マイクロ波プラズマ線形均一性は約 $+/-15\%$ である。発明者は実験を行って、動的配列構成では $1\text{m}^2$ に対して約 $+/-1.5\%$ の均一性を実現でき、静的配列構成では $1\text{m}^2$ に対して $2\%$ の均一性を実現できることを実証した。この均一性は、大面積に対して $+/-1\%$ 以下になるように更に改善される可能性がある。

【0050】

プラズマ密度が約 $2.2 \times 10^{11} / \text{cm}^3$ まで増加すると、マイクロ波電力を増加させるにつれて、プラズマ密度が飽和し始める。この飽和の理由は、プラズマ密度が高くなると、マイクロ波放射がより多く反射されるようになるためである。利用できるマイクロ波源の出力には制限があるため、いかなる実質的長さのマイクロ波プラズマ線状源も、最適なプラズマ条件、すなわち、非常に高密度のプラズマを実現できない可能性がある。連続マイクロ波と比較して、パルス状マイクロ波電力はアンテナの中に入るはるかに高いピークエネルギーを可能にし、その結果、最適なプラズマ条件に近づくことができる。

20

【0051】

図8は、連続マイクロ波に対してパルス状マイクロ波の向上したプラズマ効率を説明するグラフを示しており、パルス状マイクロ波が連続マイクロ波と同じ平均電力を有すると仮定している。ここで留意すべきは、中性 $\text{N}_2$ に対する窒素ラジカル $\text{N}_2^+$ の比率を用いて測定されるように、連続マイクロ波は、より少ない電離をもたらすことである。パルス状マイクロ波電力を使用することにより、プラズマ効率の $31\%$ の増加を実現できる。

30

【0052】

上述の記載は本発明の具体的な実施形態の完全な説明であるが、様々な修正、変形、及び代替手段を使用してもよい。更に、同軸マイクロ波プラズマ源に関連して、堆積パラメータを変化させる他の技術を使用できる可能性がある。可能な変形の実施例は、マイクロ波アンテナに印加されるパルス状電力の異なる波形、アンテナの様々な位置、マグネトロンの異なる形状、ターゲットへのDC電力、RF電力、又はパルス状電力、線状又は平面状のマイクロ波源、マイクロ波源へのパルス状電力又は連続電力、基板に対するRFバイアス条件、基板温度、堆積圧力、不活性ガスの流速、及びその種の他のものを含むが、これらに限らない。

【0053】

いくつかの実施形態について説明したが、本発明の要旨を逸脱することなく、様々な修正、他の構成、及び均等物を使用できることを当業者は認識するであろう。更に、本発明を不必要に分かりにくくすることを避けるために、多くの周知のプロセス及び要素については説明を行わなかった。従って、上述の説明は本発明の範囲を限定するものとして解釈されるべきではない。

40

【図1A】

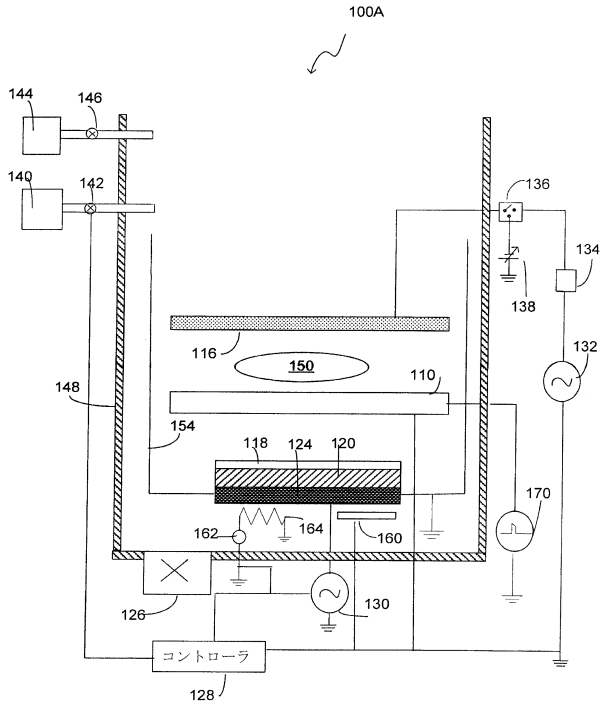


Fig. 1A

【図1B】

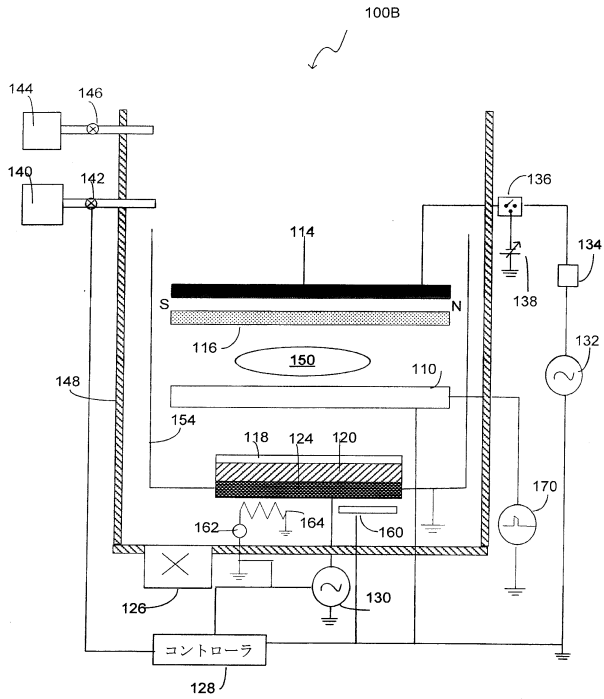


Fig. 1B

【図2】

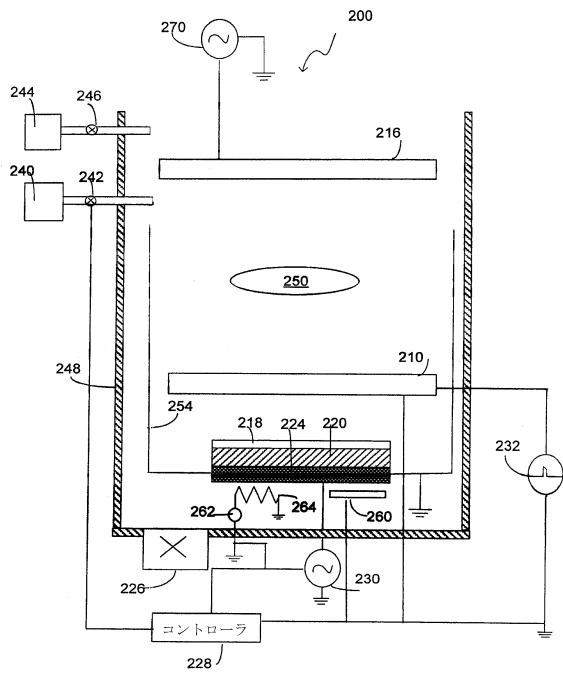


Fig. 2

【図3】

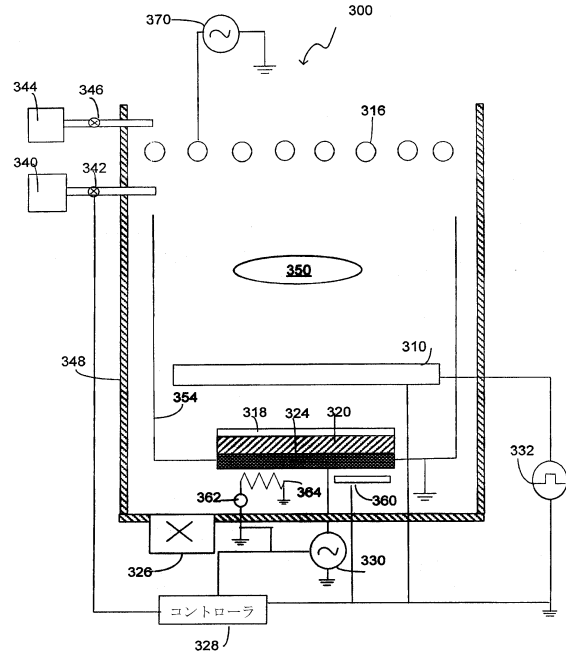


Fig. 3

【図4】

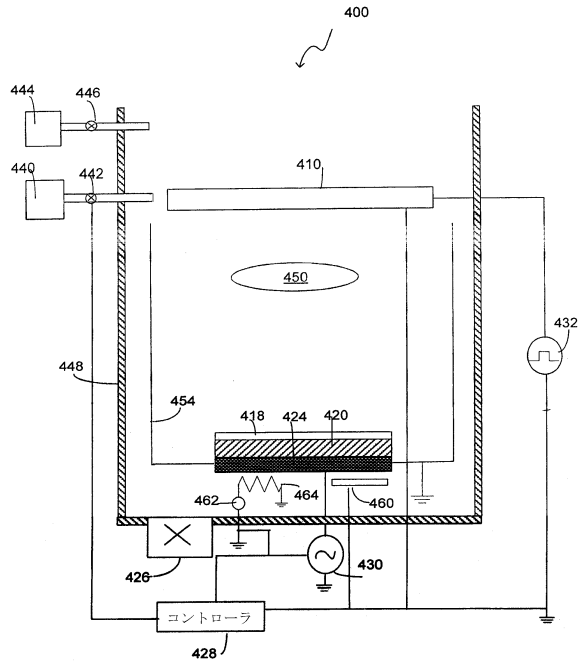


Fig. 4

【図5】

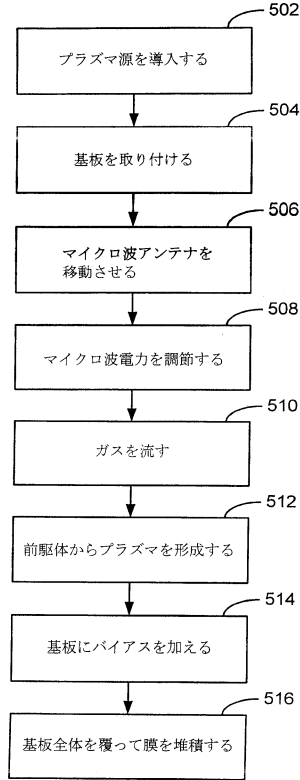


Fig. 5

【図6】

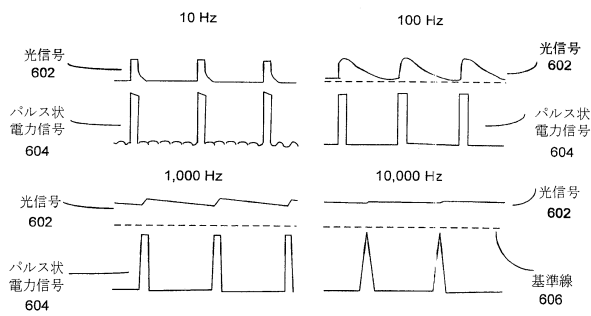


Fig. 6

【図7A】

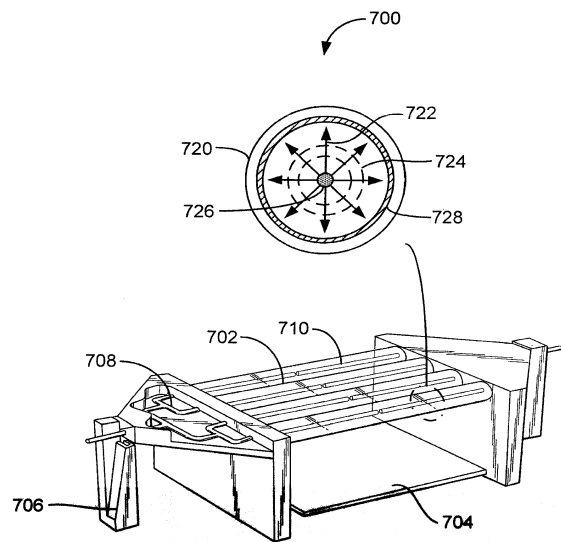


Fig. 7A

【 図 7 B 】

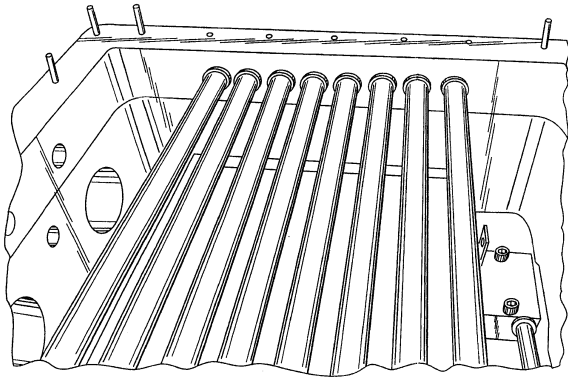


Fig. 7B

【 図 8 】

0.3mb (ミリバール) でのアルツェナウ・バルスおよびCWに対する比率  $N2 + / N2$   
 (CWはバルスよりも3.1.3%ほど電離の度合いが低いことを示している)

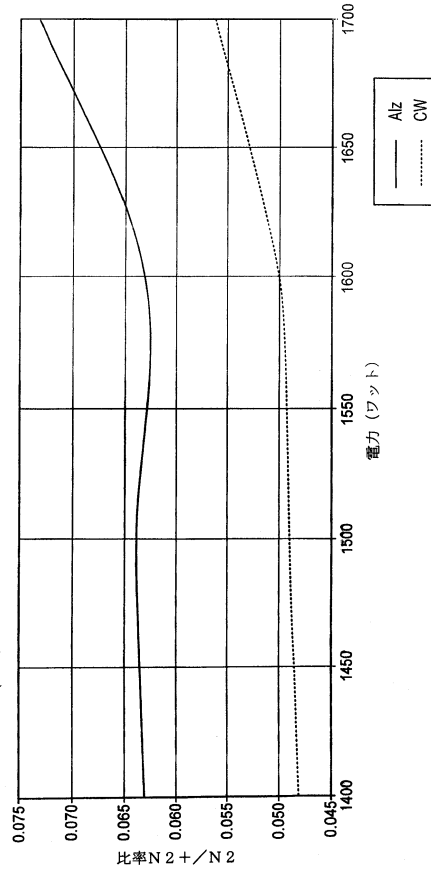


Fig. 8



## フロントページの続き

(51)Int.Cl.		F I		
<b>H 0 5 H</b>	<b>1/46</b>	<b>(2006.01)</b>	H 0 1 L	21/302 1 0 1 H
			H 0 5 H	1/46 B
			H 0 5 H	1/46 A

(72)発明者 クリシュナ ネティ  
 アメリカ合衆国 カリフォルニア州 9 4 0 8 7 サニーベール フロイド アベニュー 1 3 4  
 5

(72)発明者 ホフマン ラルフ  
 アメリカ合衆国 カリフォルニア州 9 5 0 7 3 ソクエル フェアウェイ ドライブ 3 3 6 0

(72)発明者 グリフィス ジョー  
 アメリカ合衆国 カリフォルニア州 9 5 1 3 1 サン ノゼ ベルミード ストリート 1 5 7  
 2

審査官 田中 則充

(56)参考文献 特開2004-055614(JP,A)  
 特開平11-172430(JP,A)  
 特開平11-121598(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

C 2 3 C 1 4 / 0 0 - 1 4 / 5 8  
 C 2 3 C 1 6 / 0 0 - 1 6 / 5 6  
 H 0 1 L 2 1 / 3 0 6 5  
 H 0 1 L 2 1 / 3 1  
 H 0 1 L 2 1 / 3 6 5  
 H 0 5 H 1 / 4 6