

(19)日本国特許庁(JP)

**(12)特許公報(B2)**

(11)特許番号  
**特許第7213808号**  
**(P7213808)**

(45)発行日 令和5年1月27日(2023.1.27)

(24)登録日 令和5年1月19日(2023.1.19)

(51)国際特許分類

H 01 L    21/3065(2006.01)  
H 05 H    1/46 (2006.01)

F I

H 01 L    21/302    1 0 0  
H 05 H    1/46       A

請求項の数 12 (全13頁)

(21)出願番号	特願2019-527869(P2019-527869)	(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 A P P L I E D M A T E R I A L S , I N C O R P O R A T E D アメリカ合衆国 カリフォルニア 9 5 0 5 4 , サンタ クララ , パワーズ ア ヴェニュー 3 0 5 0 3 0 5 0 B o w e r s A v e n u e S a n t a C l a r a C A 9 5 0 5 4 U . S . A .
(86)(22)出願日	平成29年12月11日(2017.12.11)	(74)代理人	100101502 弁理士 安齋 嘉章
(65)公表番号	特表2020-501351(P2020-501351 A)	(72)発明者	ドルフ レオニッド アメリカ合衆国 カリフォルニア州 9 5 最終頁に続く
(43)公表日	令和2年1月16日(2020.1.16)		
(86)国際出願番号	PCT/US2017/065546		
(87)国際公開番号	WO2018/111751		
(87)国際公開日	平成30年6月21日(2018.6.21)		
審査請求日	令和2年12月9日(2020.12.9)		
(31)優先権主張番号	62/433,204		
(32)優先日	平成28年12月12日(2016.12.12)		
(33)優先権主張国・地域又は機関	米国(US)		
(31)優先権主張番号	15/834,939		
(32)優先日	平成29年12月7日(2017.12.7)		
	最終頁に続く		

(54)【発明の名称】 イオンエネルギー分布関数 (IEDF) の生成

**(57)【特許請求の範囲】****【請求項1】**

反応性イオンエッティングプラズマ処理チャンバでウエハを処理する方法であって、  
ネガティブジャンプ電圧を処理チャンバの電極に印加してウエハ用のウエハ電圧を設定  
するステップと、

前記ウエハ電圧の振幅を変調して異なる振幅の複数のバーストの列を生成し、複数のバ  
ーストの列を繰り返すことにより、2つ以上のエネルギーピークを有するイオンエネルギー  
分布関数を生成するステップであって、それぞれのバーストは同一振幅のパルスからな  
るステップとを含み、

それぞれのバーストの特定の振幅における相対パルス数が前記特定の振幅に対応するイ  
オンエネルギーにおける相対イオン分率を決定し、

前記エネルギーピークのそれぞれに対するイオン分率が、前記異なる振幅におけるウエ  
ハ電圧のそれぞれの変調中に生成されたパルスの数によって決定され、  
特定の振幅を有する列内のバーストの相対数は特定のエネルギーにおけるイオンの相対量  
を決定し、バースト内のパルスのネガティブジャンプ振幅はイオンエネルギーを決定する  
一方法。

**【請求項2】**

ポジティブジャンプ電圧を前記処理チャンバの前記電極に印加して前記ウエハの表面を  
中和するステップを含む、請求項1に記載の方法。

**【請求項3】**

前記ウエハ電圧の前記振幅を変調して、所望のイオンエネルギー分布関数を生成し、前記ウエハ上に特定のバイアス電圧波形を誘導する、請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 4】**

異なる時点でのウエハ電圧を変調して複数のエネルギーピークを有するイオンエネルギー分布関数を生成するステップを含む、請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 5】**

前記エネルギーピークのそれぞれに対するイオン分率が、前記異なる時点における前記ウエハ電圧のそれぞれの変調中に生成されるパルスの数によって決定される、請求項 4 に記載の方法。

**【請求項 6】**

異なる振幅における前記ウエハ電圧を変調して、異なる振幅を持つ複数のエネルギーピークを有するイオンエネルギー分布関数を生成するステップを含む、請求項 1 に記載の方法。

**【請求項 7】**

反応性イオンエッティングプラズマ処理チャンバでウエハを処理する方法であって、

ポジティブジャンプ電圧を処理チャンバの電極に印加してウエハの表面を中和するステップと、

ネガティブジャンプ電圧を前記電極に印加して前記ウエハ用のウエハ電圧を設定するステップと、

前記ウエハ上のイオン電流を過補償するランプ電圧を前記電極に印加するステップとを含み、

前記ウエハ上のイオン電流を過補償するランプ電圧を前記電極に印加するステップは、前記ウエハ上での電圧を一定に維持するために必要とされるよりも大きい負の勾配を含むランプ電圧を前記電極に印加し、2つ以上のエネルギーピークを有するイオンエネルギー分布関数を生成するステップを含む、方法。

**【請求項 8】**

前記ウエハ上に誘導される電流の最小電圧及び最大電圧が、結果として生じるイオンエネルギー分布関数の幅を決定する、請求項 7 に記載の方法。

**【請求項 9】**

前記ランプ電圧の勾配を調整して、所望のイオンエネルギー分布関数を生成し、前記ウエハ上に特定のバイアス電圧波形を誘導するステップを含む、請求項 7 に記載の方法。

**【請求項 10】**

反応性イオンエッティングプラズマ処理チャンバでウエハを処理する方法であって、

ポジティブジャンプ電圧を処理チャンバの電極に印加してウエハの表面を中和するステップと、

ネガティブジャンプ電圧を前記電極に印加して前記ウエハ用のウエハ電圧を設定するステップと、

前記ウエハ上のイオン電流を不足補償するランプ電圧を前記電極に印加するステップとを含み、

前記ウエハ上のイオン電流を不足補償するランプ電圧を前記電極に印加するステップは、前記ウエハ上での電圧を一定に維持するのに必要とされるよりも小さい負の勾配を含むランプ電圧を前記電極に印加し、単一のエネルギーピークを有するイオンエネルギー分布関数を生成するステップを含む、方法。

**【請求項 11】**

前記ウエハ上に誘導される電流の最小電圧及び最大電圧が、結果として生じるイオンエネルギー分布関数の幅を決定する、請求項 10 に記載の方法。

**【請求項 12】**

前記ランプ電圧の勾配を調整して、所望のイオンエネルギー分布関数を生成し前記ウエハ上に特定のバイアス電圧波形を誘導するステップを含む、請求項 10 に記載の方法。

**【発明の詳細な説明】**

10

20

30

40

50

**【技術分野】****【0001】**

本開示の実施形態は、一般に、基板を処理するためのシステム及び方法に関し、特に、基板をプラズマ処理するためのシステム及び方法に関する。

**【背景】****【0002】**

典型的な反応性イオンエッティング（R I E）プラズマ処理チャンバは、高周波（R F）電圧を「パワー電極」に供給するR Fバイアス発生器と、より一般的には「カソード」と呼ばれる「静電チャック」（E S C）に埋め込まれた金属ベースプレートとを含む。図1（a）は、典型的な処理チャンバ内のパワー電極に供給される典型的なR F電圧のプロットを示す。パワー電極は、E S Cアセンブリの一部であるセラミック層を介して処理システムのプラズマと容量結合される。プラズマシースの非線形でダイオードの様な性質により、印加されたR F電場の整流が行われ、カソードとプラズマとの間に直流（D C）電圧降下、すなわち「自己バイアス」が現れる。この電圧降下により、カソードに向かって加速されるプラズマイオンの平均エネルギー、従ってエッティング異方性が決定される。

10

**【0003】**

より具体的には、イオンの指向性、フィーチャプロファイル、及びマスクと停止層の選択性はイオンエネルギー分布関数（I E D F）によって制御される。R Fバイアスを有するプラズマでは、I E D Fは、通常、低エネルギーと高エネルギーにおいて2つのピークを有し、中間にイオン群を有する。I E D Fの2つのピークの中間にイオン群が存在することは、カソードとプラズマの間の電圧降下がバイアス周波数で振動するという事実を反映している。より低い周波数、例えば2 M H zのR Fバイアス発生器を使用してより高い自己バイアス電圧を得る場合、これら2つのピーク間のエネルギー差はかなり大きくなる可能性があり、低エネルギーピークにあるイオンによるエッティングはより等方的であり、フィーチャ壁の湾曲につながる可能性がある。高エネルギーイオンと比較して、低エネルギーイオンは（例えば、帯電効果により）フィーチャ底部の角に到達するという点で効果は少ないが、マスク材料のスパッタリングは少なくなる。これは、高アスペクト比エッティング用途（例えば、ハードマスク開口部等）において重要である。

20

**【0004】**

フィーチャサイズが縮小し続けてアスペクト比が増大するにつれて、フィーチャプロファイル制御要件がより厳しくなる一方で、処理中に基板表面において適切に制御されたI E D Fを有することがより望ましくなる。単一ピークI E D Fを使用して、独立して制御されたピーク高さとピークエネルギーを有する2ピークI E D Fを含め任意のI E D Fを構成することができ、このことは高精度プラズマ処理にとって非常に有益である。単一ピークI E D Fを生成するには、プラズマに対して基板表面の電圧がほぼ一定であること、すなわちイオンエネルギーを決定するシース電圧を有することが必要である。プラズマ電位（処理プラズマにおいては、通常、ゼロか接地電位に近い）が時間的に一定であると仮定すると、接地に対する基板における電圧、すなわち基板電圧をほぼ一定に維持することが必要である。イオン電流は基板表面を常に帶電させているので、単にD C電圧をパワー電極に印加することによってこれを達成することはできない。結果として、印加された全D C電圧は、プラズマシース（すなわち、シース容量）ではなく、基板とE S Cのセラミック部分（すなわち、チャック容量）の両端で降下することになる。これを打開するためには、印加電圧がチャック容量とシース容量との間で分担されるようになる特別整形パルスバイアス方式が開発された（通常、基板容量はシース容量よりはるかに大きいので、本発明者らは基板での電圧降下を無視している）。この方式ではイオン電流に対する補償が行われており、これにより各バイアス電圧サイクルの最大90%までの間、シース電圧及び基板電圧を一定に保つことが可能になる。より正確には、このバイアス方式により特定の基板電圧波形の維持が可能になり、この波形は負の直流オフセットの上に一連の周期的な短い正のパルスとして説明することができる（図1（b））。各パルスの間、基板電位はプラズマ電位に達してシースは短時間で崩壊するが、各サイクルの～90%の間、シース

30

40

50

電圧は一定かつ各パルスの終端におけるネガティブ電圧ジャンプに等しいままなので、平均イオンエネルギーが決定される。図1(a)は、この特定の基板電圧波形を生成し、それによってシース電圧をほぼ一定に保つことを可能にするために開発された特別整形パルスバイアス電圧波形のプロットを示す。図2に示されるように、整形パルスバイアス波形は、(1)補償フェーズの間にチャック容量に蓄積された余分な電荷を除去するためのポジティブジャンプ、(2)シース電圧( $V_{SH}$ )値を設定するためのネガティブジャンプ( $V_{OUT}$ ) - すなわち、 $V_{OUT}$ は直列に接続されたチャック容量とシース容量の間で分担されるので、基板電圧波形におけるネガティブジャンプが決定される(但し、 $V_{OUT}$ は、一般的に、基板電圧波形におけるネガティブジャンプよりも大きい)、(3)イオン電流を補償し、この長い「イオン電流補償フェーズ」の間、シース電圧を一定に保つためのネガティブ電圧ランプ、を含む。本発明者らは、図1(b)に示す特定の基板電圧波形(ほぼ一定のシース電圧によって特徴付けられる)を維持することもできる、従って単一エネルギーIEDFを生成することができる他の整形パルスバイアス波形が存在し得ることを強調しておく。例えば、静電チャック容量がシース容量よりもはるかに大きい場合、上記の(3)で説明したネガティブ電圧ランプフェーズを定電圧フェーズで置き換えることができる。これら他の整形パルスバイアス波形を用いても以下で提案するシステム及び方法のいくつかを実施することができ、該当する場合には、本発明者らはそのことについて特筆することになるだろう。

#### 【0005】

単一ピークIEDFは、選択性及びフィーチャプロファイルの改善をもたらす、非常に望ましいIEDF形状であると広く考えられているが、幾つかのエッチング用途では、異なる形状(より幅の広い形状のIEDF等)を有するIEDFが必要とされる。

#### 【概要】

#### 【0006】

本明細書で、整形パルスバイアスを用いて任意形状のイオンエネルギー分布関数を生成するためのシステム及び方法が提供される。

#### 【0007】

幾つかの実施形態では、方法は、所定のやり方で、整形パルスバイアスを処理チャンバの電極に印加すること、及びネガティブ電圧ジャンプの振幅( $V_{OUT}$ )、従ってシース電圧( $V_{SH}$ )を変調することを含み、特定の振幅における相対パルス数がこの振幅に対応するイオンエネルギーにおける相対イオン分率を決定する。本発明者らは、図1(b)に示す(ほぼ一定のシース電圧によって特徴付けられる)特定の基板電圧波形を維持することができる、従って単一エネルギーIEDFを生成することができる、任意の整形パルスバイアス波形(必ずしも図1(a)に示される波形ではない)を用いて本方式を実施できることを強調しておく。

#### 【0008】

幾つかの別の実施形態では、方法は、図1(a)に示す電圧波形の整形パルスバイアスを印加すること、及び基板電圧を一定に維持するために必要とされるよりも大きい負の勾配( $dV/dt$ )を有する、すなわちイオン電流を過補償する、イオン補償フェーズ中に電圧ランプを生成することを含む。幾つかの別の実施形態では、方法は、図1(a)に示す電圧波形の整形パルスバイアスを印加すること、及び基板電圧を一定に維持するために必要とされるよりも小さい負の勾配( $dV/dt$ )を有する、すなわちイオン電流を不足補償する、イオン補償フェーズ中に電圧ランプを生成することを含む。

#### 【0009】

本開示の他の及び更なる実施形態を以下に説明する。

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【0010】

上記で簡潔に要約し、以下でより詳細に説明する本開示の実施形態は、添付図面に示された本開示の例示的な実施形態を参照することによって理解することができる。しかしながら、添付図面は本開示の典型的な実施形態を示しているに過ぎず、従って範囲を制限し

ていると解釈されるべきではなく、本開示は他の等しく有効な実施形態を含み得る。

#### 【0011】

【図1(a)】シース電圧を一定に保つことを可能にするために開発された特別整形パルスのプロットを示す。

【図1(b)】各バイアス電圧サイクルの最大90%までの間、シース電圧及び基板電圧を一定に保つことが可能になる、図1(a)のバイアス方式から生ずる特定の基板電圧波形のプロットを示す。

【図1(c)】図1(a)のバイアス方式から生ずる単一ピークIEDFのプロットを示す。

【図2】本原理による実施形態を適用することができる基板処理システムを示す。 10

【図3】本原理の一実施形態による、基板電圧の値を設定する電圧パルスのプロットを示す。

【図4】本原理の一実施形態による、図3の選択された電圧パルスに対して、結果として生じるIEDFの図形を示す。

【図5】本原理の一実施形態による、イオン電流を過補償及び不足補償するように修正された、図1の特別整形パルスのプロットを示す。

【図6】図5の特別整形パルスから生じるウエハ上の誘導電圧パルスのプロットを示す。

【図7】本原理の一実施形態による、図6の電圧パルスに対して、結果として生じるIEDFの図形を示す。

【図8】本原理の一実施形態による、任意形状のイオンエネルギー分布関数を生成する方法の流れ図を示す。 20

【図9】本原理の別の実施形態による、任意形状のイオンエネルギー分布関数を生成する方法の流れ図を示す。

【図10】本原理の別の実施形態による、任意形状のイオンエネルギー分布関数を生成する方法の流れ図を示す。

#### 【0012】

理解を促進するために、図面に共通する同一の要素を示す際には、可能な限り同一の参考番号を使用している。図面は、比例して描かれているわけではなく、明確にするために簡素化されている場合もある。一実施形態の要素及び構成は、更なる説明なしに他の実施形態に有益に組み込むことができる。 30

#### 【詳細な説明】

#### 【0013】

整形パルスバイアスを用いて任意形状のイオンエネルギー分布関数を生成するためのシステム及び方法が本明細書で提供される。本発明のシステム及び方法により、整形パルスバイアス波形の振幅変調による任意形状のイオンエネルギー分布関数(IEDF)の生成が有利に促進される。本発明の方法の実施形態は、電圧波形の整形を行って、任意のIEDF形状、例えばより幅広いプロファイルを有するIEDFを提供することができる。本明細書での説明において、ウエハ及び基板という用語は交換可能に使用される。

#### 【0014】

図2は、本原理による実施形態を適用することができる基板処理システム200の高レベルの概略図を示す。図2の基板処理システム200は、例示的に、基板支持アセンブリ205、及びバイアス電源230を含む。図2の実施形態では、基板支持アセンブリ205は、基板支持台座210、パワー電極213、及びパワー電極213を基板支持アセンブリ205の表面207から分離するセラミック層214を含む。様々な実施形態では、図2のシステム200は、プラズマ処理チャンバ(例えば、カリフォルニア州サンタクララのApplied Materials, Inc.から入手可能なSYM3(登録商標)、DPS(登録商標)、ENABLER(登録商標)、ADVANTAGE(商標)及びAVATAR(商標)処理チャンバ、又はその他の処理チャンバ)のコンポーネントを含むことができる。 40

#### 【0015】

10

30

40

50

幾つかの実施形態では、バイアス電源 230 は、制御プログラムを記憶するためのメモリと、制御プログラムを実行するためのプロセッサを含み、当該制御プログラムは、バイアス電源 230 によってパワー電極 213 に供給される電圧を制御し、ウエハ電圧の振幅を少なくとも変調して所定数のパルスを生成し、代替的に、又は追加して、ネガティブジャンプ電圧を電極に印加してウエハ用のウエハ電圧を設定し、又は本明細書に記載の本原理の実施形態により、ウエハ上のイオン電流を過補償又は不足補償するランプ電圧を電極に印加する。代替の実施形態では、図 2 の基板処理システム 200 は、制御プログラムを記憶するためのメモリと、バイアス電源 230 と通信するために制御プログラムを実行するためのプロセッサとを含む任意のコントローラ 220 を備え、当該制御プログラムは、バイアス電源 230 によってパワー電極 213 に供給される電圧を少なくとも制御するために、ウエハ電圧の振幅を少なくとも変調して所定数のパルスを生成し、代替的に、又は追加して、ネガティブジャンプ電圧を電極に印加してウエハ用のウエハ電圧を設定し、又は本明細書に記載の本原理の実施形態によりウエハ上のイオン電流を過補償又は不足補償するランプ電圧を電極に印加する。

#### 【0016】

オペレーション中、処理されるべき基板は、基板支持台座 210 の表面上に配置される。図 2 のシステム 200 では、バイアス電源 230 からの電圧（整形パルスバイアス）がパワー電極 213 に供給される。プラズマシースの非線形でダイオードの様な性質により、印加された R F 電場が整流され、カソードとプラズマとの間に直流（D C）電圧降下、すなわち「自己バイアス」が現れる。この電圧降下は、カソードに向かって加速されるプラズマイオンの平均エネルギーを決定する。イオンの指向性とフィーチャプロファイルは、イオンエネルギー分布関数（I E D F）によって制御される。本明細書に記載の本原理の実施形態により、バイアス電源 230 は特別整形パルスバイアスをパワー電極 213 に供給することができる。このバイアス方式により、負の D C オフセットの上に周期的な一連の短い正のパルスとして記述できる特定の基板電圧波形を維持することができる（図 1（b））。各パルスの間、基板電位はプラズマ電位に達してシースは短時間で崩壊するが、各サイクルの～90% の間、シース電圧は一定かつ各パルスの終端におけるネガティブ電圧ジャンプに等しいままなので、平均イオンエネルギーが決定される。

#### 【0017】

図 1（a）に戻って参照すると、整形パルスバイアス信号の振幅、従ってウエハ電圧は V<sub>out</sub> で表される。本発明者らは、本原理による少なくとも幾つかの実施形態では、I E D F の形状を整形パルスバイアス信号の振幅と周波数を変調することによって制御できると判断した。この方法は、所定のやり方で、整形パルスバイアスを処理チャンバの電極に印加すること、及びネガティブ電圧ジャンプの振幅（V<sub>out</sub>）、従ってシース電圧（V<sub>sh</sub>）を変調することを含み、特定の振幅における相対パルス数がこの振幅に対応するイオンエネルギーにおける相対イオン分率を決定する。各振幅におけるパルス数は、1つのシース電圧から次のシース電圧への移行を構成するのに十分でなければならず、その間にそれぞれの E S C 電荷が確立される。その後、所与の振幅を有するパルス列を含むバースト（図 3）は、処理ステップ期間に亘って何度も繰り返される。アクティブバースト（オンフェーズ）は、無音期間（オффフェーズ）と交互に配置することができる。バーストの全持続時間（オンフェーズとオффフェーズの組合せ）に対する各オンフェーズの持続時間はデューティサイクルによって決まり、バーストの全持続時間（周期）はバースト周波数の逆数に等しい。代替的に、各バーストは所与の（かつ同一の）振幅を有する一連のパルスから構成されてもよく、次いで、異なる振幅を有するバースト列を使用して I E D F が定義される。所与の振幅を有する（列内の）バーストの相対数が、特定のエネルギーにおけるイオンの相対量を決定し、これらのバースト内のパルスのネガティブジャンプ振幅（V<sub>out</sub>）がイオンエネルギーを決定する。その後、レシピステップの間、定義済みのバースト列が何度も繰り返される。例えば、低エネルギーピークに 25% のイオンが含まれ、高エネルギーピークに 75% のイオンが含まれる 2 ピーク I E D F を生成するには、バースト列を、高イオンエネルギーに対応するネガティブジャンプ振幅のパルスが 3 バースト

、低イオンエネルギーに対応する振幅のパルスが 1 バーストで構成する必要がある。このような列は、「H H H L」と表わすことができる。次に、同じ高さの 3 つのエネルギーピーク（高（H）、中（M）、低（L））を持つ I E D F を生成するには、H、M、L のイオンエネルギーに対応する異なる振幅の 3 バーストの列が必要であり、「H M L」と表わすことができる。単一ピーク I E D F は、定義済みのネガティブジャンプ振幅を持つパルスの単一バースト（オンフェーズとオフフェーズの両方を含む）で構成される列によって生成される。本発明者らは、図 1 ( b ) に示す（ほぼ一定のシース電圧によって特徴付けられる）特定の基板電圧波形を維持することができます、従って単一エネルギー I E D F を生成することができる、任意の整形パルスバイアス波形（必ずしも図 1 ( a ) に示される波形ではない）を用いて本方式を実施できることを強調しておく。

10

#### 【 0 0 1 8 】

例えば、図 3 は、本原理の一実施形態により、基板電圧の値を設定するために、電源が処理チャンバの電極に供給すべき電圧パルスのプロットを示す。図 3 の実施形態では、ウエハ電圧のフルジャンプがイオンエネルギーを決定し、電圧ジャンプに対応するパルス数（例えば、全持続時間）がこのエネルギーでの相対イオン分率（すなわち I E D F ）を決定する。

20

#### 【 0 0 1 9 】

図 4 は、本原理の一実施形態による、図 3 の選択された電圧パルスに対して、結果として生じる I E D F の図形を示す。図 4 に示すように、図 3 の多数の電圧パルスにより、より幅広い I E D F がもたらされ、これはより幅広いイオンエネルギー分布を必要とするハードマスク開口部の高アスペクト比エッチングのような用途において有効であり得る。

#### 【 0 0 2 0 】

本原理に従って、電源が処理チャンバの電極に供給する電圧パルスの振幅と周波数の制御により、特定のエッチング処理及び用途に必要とされる適切に制御され明確に定義された I E D F 形状を得ることができる。

#### 【 0 0 2 1 】

本原理による別の実施形態では、方法は、図 1 ( a ) に示す電圧波形の整形パルスバイアスを印加すること、及び基板電圧を一定に維持するために必要とされるよりも大きい負の勾配 ( $dV/dt$ ) を有する、すなわちイオン電流を過補償する、イオン補償フェーズ中に電圧ランプを生成することを含む。これにより、結果的に図 6 に示す基板電圧波形が生じ、イオン電流補償フェーズ中に基板電圧の大きさ（従って、シース電圧及び瞬間的なイオンエネルギー）が増加する。これにより、I E D F 幅は印加された整形パルスバイアス波形の負の勾配によって制御されて、図 7 に示すイオンエネルギー幅の広がりと非単一エネルギー I E D F が生成される。例えば、図 5 は、本原理の一実施形態による、ウエハを帯電させるイオン電流を過補償するように修正された図 1 ( a ) の特別整形パルスのプロットを示す。図 5 に示すように、ウエハを帯電させるイオン電流の補償を目的とした図 1 ( a ) の電圧ランプは、本原理の図 5 の特別整形パルスの中で、ウエハを帯電させるイオン電流を過補償するように修正される。図 5 に示すように、ウエハ表面の中和を目的とした図 1 のポジティブジャンプは、本原理の図 5 の特別整形パルスの中で、もはやウエハ表面を中和しない。

30

#### 【 0 0 2 2 】

図 6 は、図 5 の特別整形パルスから生じるウエハ上での誘導電圧パルスのプロットを示す。図 6 に示されるように、電圧ジャンプはイオンエネルギーを決定し、エネルギー幅はサイクル中の最小及び最大のウエハ電圧ジャンプによって決定される。

40

#### 【 0 0 2 3 】

図 7 は、本原理の一実施形態により、図 6 の電圧パルスに対して、結果として生じる I E D F の図形を示す。図 7 に示すように、図 5 の過補償特別整形パルスの印加から得られる I E D F はより幅広い二重ピークのプロファイルを含むが、I E D F 幅を決定する  $V_{min}$  及び  $V_{max}$  は当該プロファイルにおけるエネルギーピークと必ずしも一致しない。本原理による過補償により、2 つの R F 周波数（例えば、2 MHz と 13.56 MHz）

50

を混合することによって達成できる精度よりも高い精度の制御が可能になる。

#### 【0024】

本原理による別の実施形態では、方法は、図1(a)に示す電圧波形の整形パルスバイアスを印加すること、及び基板電圧を一定に維持するために必要とされるよりも小さい負の勾配( $dV/dt$ )を有する、すなわちイオン電流を不足補償する、イオン補償フェーズ中に電圧ランプを生成することを含む。これにより、結果的に図6に示す基板電圧波形が生じ、イオン電流補償フェーズ中に基板電圧の大きさ(従って、シース電圧及び瞬間的なイオンエネルギー)が減少する。これにより、IEDF幅は印加された整形パルスバイアス波形の負の勾配によって制御されて、図7に示すイオンエネルギー幅の広がりと非単一エネルギーIEDFが生成される。例えば、図5に戻って参照すると、図5は、本原理の一実施形態による、ウエハを帯電させるイオン電流を不足補償するように修正された図1の特別整形パルスのプロットを示す。図5に示すように、ウエハを帯電させるイオン電流の補償を目的とした図1の電圧ランプは、本原理の図5の特別整形パルスの中で、ウエハを帯電させるイオン電流を不足補償するように修正される。図5に示すように、ウエハ表面の中和を目的とした図1のポジティブジャンプは、本原理の図5の特別整形パルスの中で、ウエハ表面をもはや中和しない。

10

#### 【0025】

図7に戻って参照すると、本原理の一実施形態の不足補償に対して、結果として生じるIEDFの図形が示されている。図7に示すように、図5の不足補償特別整形パルスの印加から生じるIEDFは、より幅広い単一ピークのプロファイルを含む。

20

#### 【0026】

図8は、本原理の一実施形態による、任意形状のイオンエネルギー分布関数を生成する方法の流れ図を示す。方法800は802から開始することができ、802の間、ネガティブジャンプ電圧が電極に印加されてウエハ電圧が設定される。次に、方法800は804に進むことができる。

#### 【0027】

804で、ウエハ電圧の振幅は所定数のパルスを生成するように変調され、イオンエネルギー分布関数が決定される。

#### 【0028】

次に、方法800は終了することができる。

30

#### 【0029】

図9は、本原理の別の実施形態による、任意形状のイオンエネルギー分布関数を生成する方法の流れ図を示す。方法900は、902から開始することができ、902の間、ポジティブジャンプ電圧が処理チャンバの電極に印加されてウエハ表面が中和される。次に、方法900は904に進むことができる。

#### 【0030】

904で、ネガティブジャンプ電圧が電極に印加されてウエハ電圧が設定される。次に、方法900は906に進むことができる。

#### 【0031】

906で、ウエハ上のイオン電流を過補償するランプ電圧が電極に印加される。次に、方法900は終了することができる。

40

#### 【0032】

図10は、本原理の別の実施形態による、任意形状のイオンエネルギー分布関数を生成する方法の流れ図を示す。方法1000は、1002から開始することができ、1002の間、ポジティブジャンプ電圧が処理チャンバの電極に印加されてウエハ表面が中和される。次に、方法1000は1004に進むことができる。

#### 【0033】

1004で、ネガティブジャンプ電圧が電極に印加されてウエハ電圧が設定される。次に、方法1000は1006に進むことができる。

#### 【0034】

50

1006で、ウエハ上のイオン電流を不足補償するランプ電圧が電極に印加される。次に、方法1000は終了することができる。

【0035】

上記は本開示の実施形態を対象としているが、本開示の他の及び更なる実施形態は本開示の基本的な範囲を逸脱することなく創作することができる。

10

20

30

40

50

## 【図面】

【図 1 ( a )】

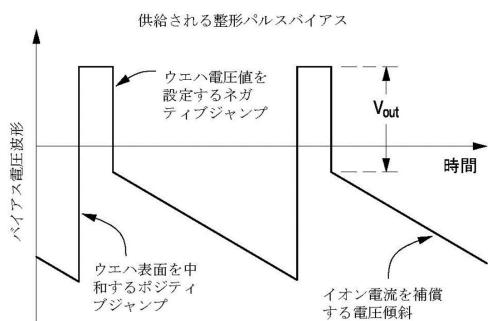
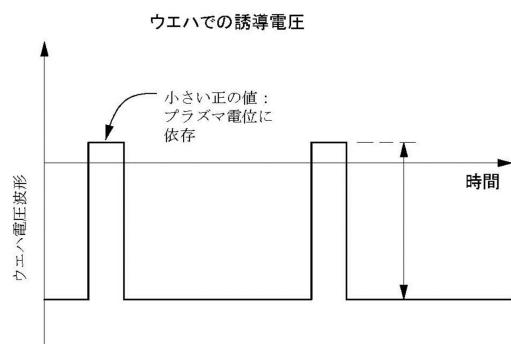


FIG. 1(a)

【図 1 ( b )】



10

FIG. 1(b)

【図 1 ( c )】

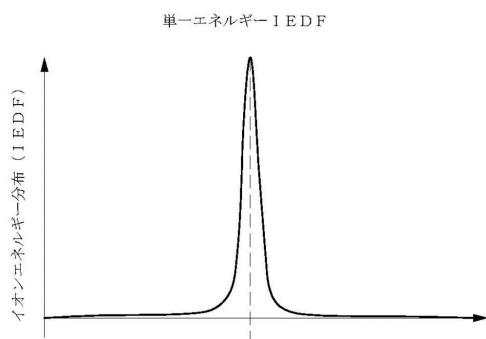
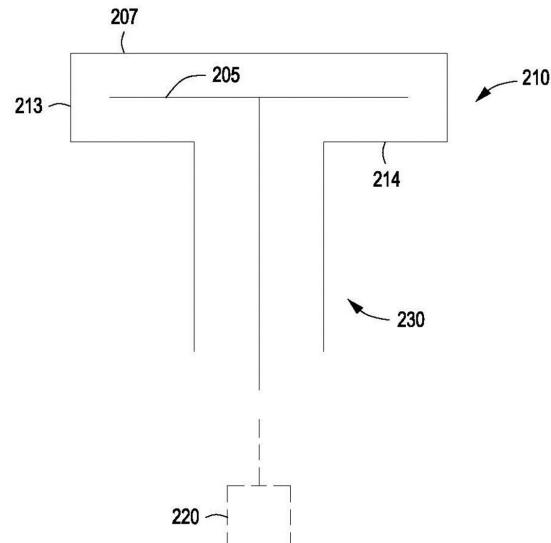


FIG. 1(c)

【図 2】



20

30

40

FIG. 2

50

【図 3】

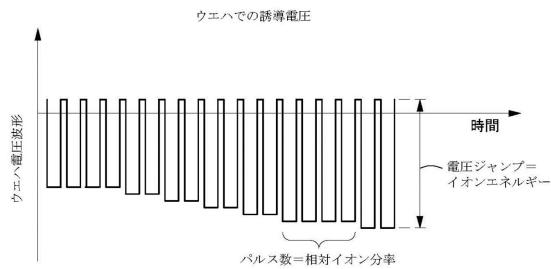


FIG. 3

【図 4】

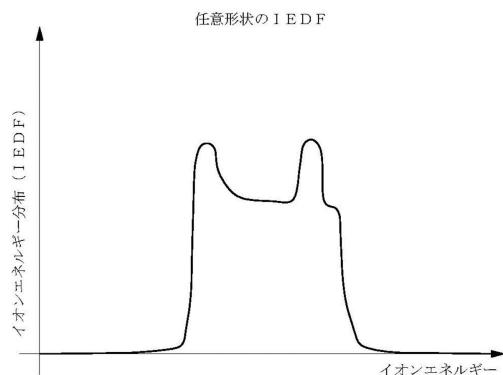


FIG. 4

10

【図 5】

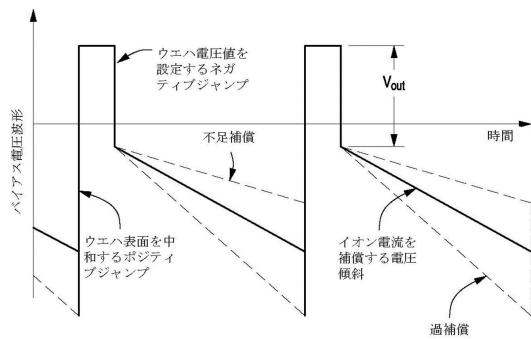


FIG. 5

【図 6】

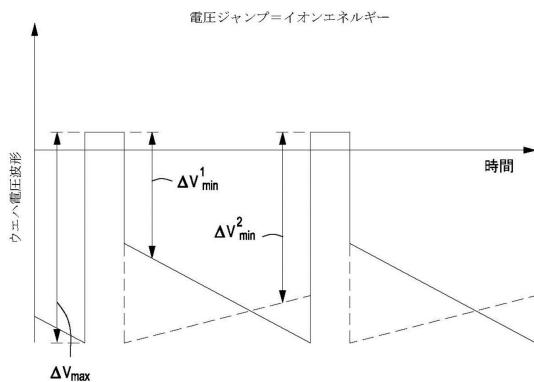


FIG. 6

20

30

40

50

【図 7】

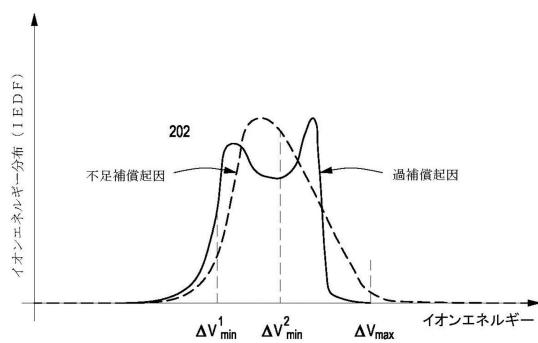


FIG. 7

【図 8】

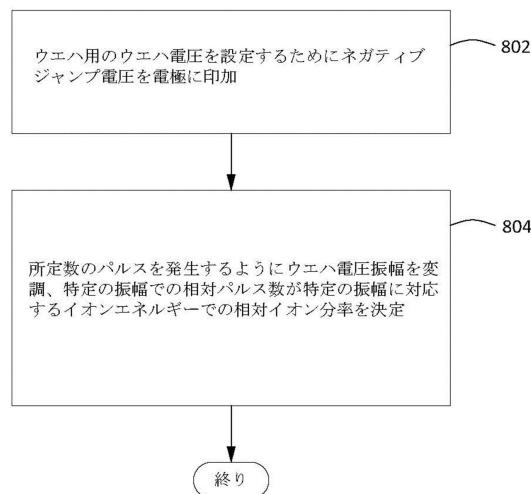


FIG. 8

10

【図 9】

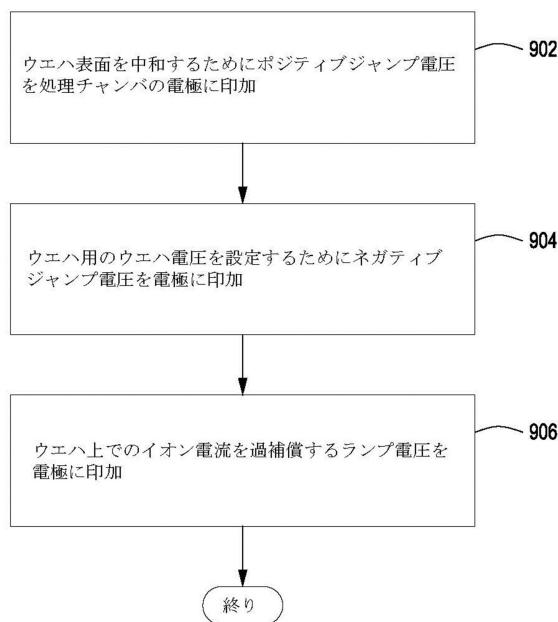
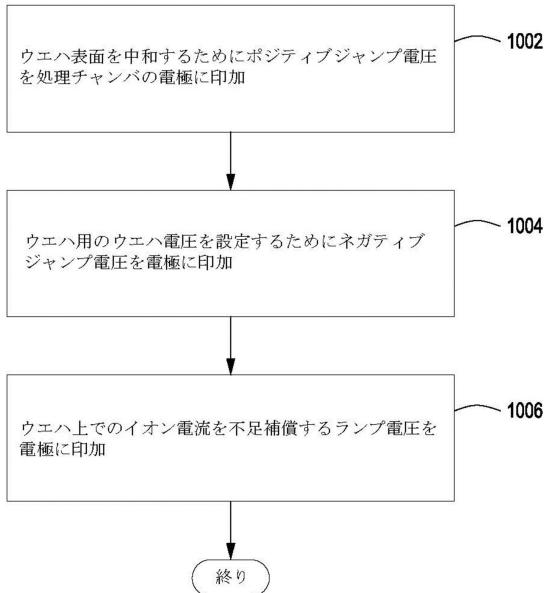


FIG. 9

【図 10】



20

30

40

50

---

フロントページの続き

(33)優先権主張国・地域又は機関

米国(US)

前置審査

124 サンノゼ ポートラ レッドウッド レーン 4786

(72)発明者 コー トラビス

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94085 サニーベール ウエスト イーグルウッド アベニ  
ュー 311

(72)発明者 ルエール オリビア

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94086 サニーベール オールド サンフランシスコ ロード  
718

(72)発明者 ジュベール オリビア

フランス共和国 メラン 38240 アリー ドゥ バヤート 18

(72)発明者 クラウス フィリップ エー

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 95125 サンノゼ ブロードウェイ アベニュー 1006

(72)発明者 ディンドサ ラジンダー

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 94566 プリザントン イー ゲートウェイ 1618

(72)発明者 ロジャーズ ジェームズ ヒュー

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 95032 ロスガトス ランズベリー コート 109

審査官 長谷川 直也

(56)参考文献 特開2012-104382(JP,A)

特表2016-500132(JP,A)

特開2016-149560(JP,A)

特開2004-193564(JP,A)

特開平09-326383(JP,A)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

H01L 21/3065

H05H 1/46