

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6377060号
(P6377060)

(45) 発行日 平成30年8月22日(2018.8.22)

(24) 登録日 平成30年8月3日(2018.8.3)

(51) Int.Cl.	F 1
H01L 21/3065 (2006.01)	H01L 21/302 1 O 1 G
C23C 16/50 (2006.01)	C23C 16/50
H05H 1/46 (2006.01)	H05H 1/46 M
C23C 16/52 (2006.01)	H05H 1/46 R
	C23C 16/52

請求項の数 15 (全 54 頁)

(21) 出願番号	特願2015-529939 (P2015-529939)
(86) (22) 出願日	平成25年8月27日 (2013.8.27)
(65) 公表番号	特表2016-500132 (P2016-500132A)
(43) 公表日	平成28年1月7日 (2016.1.7)
(86) 国際出願番号	PCT/US2013/056851
(87) 国際公開番号	W02014/036000
(87) 国際公開日	平成26年3月6日 (2014.3.6)
審査請求日	平成28年7月15日 (2016.7.15)
(31) 優先権主張番号	61/694,148
(32) 優先日	平成24年8月28日 (2012.8.28)
(33) 優先権主張国	米国(US)

(73) 特許権者	597112542 アドバンスト・エナジー・インダストリーズ・インコーポレイテッド Advanced Energy Industries, Inc. アメリカ合衆国コロラド州80525・フォートコリンズ・シャープポイントドライブ 1625
(74) 代理人	100078282 弁理士 山本 秀策
(74) 代理人	100113413 弁理士 森下 夏樹

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】広ダイナミックレンジイオンエネルギーバイアス制御、高速イオンエネルギー切り替え、イオンエネルギー制御およびパルスバイアス供給部、および仮想フロントパネル

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

プラズマ処理チャンバを動作させる方法であって、

前記プラズマ処理チャンバ内の基板支持部上の基板と接触しているプラズマを持続させること、

前記基板支持部の有効容量 C_1 を取得することと、

前記基板の表面上に電位を生じさせるために、修正された周期的電圧関数を前記基板支持部に提供することであって、前記修正された周期的電圧関数は、周期的電圧関数とイオン電流補償 I_c との組み合わせから形成され、前記修正された周期的電圧関数は、

第1の部分と呼ばれる急速に増加する電圧と、

前記第1の部分の終了時に開始する実質的に一定の電圧であって、第2の部分と呼ばれる実質的に一定の電圧と、

前記実質的に一定の電圧を下回る電圧ステップ V であって、前記第2の部分の終了時に開始し、第3の部分と呼ばれる電圧ステップ V と、

前記第3の部分の終了時に開始する傾き電圧であって、第4の部分と呼ばれ、かつ、前記イオン電流補償によって制御される傾き dV_0 / dt を有する傾き電圧とを含む、こと、

前記修正された周期的電圧関数の測定値および前記有効容量 C_1 の関数として、前記プラズマ内のイオン電流 I_I を計算することと、

前記電圧ステップ V を制御することによって、前記基板表面上に入射するイオンのイ

10

20

オンエネルギー eV を制御することにより、前記基板表面上に前記電位を生じさせることと

を含む、方法。

【請求項 2】

以下の方程式が満たされるまで、前記イオン電流補償 I_c を調節することをさらに含み

【数 1 1】

$$0 = \frac{dV_0}{dt} - \frac{I_c}{C_1}$$

10

これにより、前記イオンエネルギー分布関数の最小幅を獲得する、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

前記最小幅から前記イオンエネルギー分布関数の幅を増加させるように、前記イオン電流 I_I から離して前記イオン電流補償 I_c を調節することをさらに含む、請求項 2 に記載の方法。

【請求項 4】

前記方程式が満たされるとき、以下の方程式が真であり、

【数 1 2】

20

$$I_I = I_c \frac{C_1}{C_1 + C_{stray}}$$

C_{stray} は、前記修正された周期的電圧関数によって見られる浮遊容量の累積容量である、請求項 2 に記載の方法。

【請求項 5】

イオン電流 I_I は、

第 1 のイオン電流補償 I_{c1} に対する第 1 の傾き dV_{01} / dt を決定することと、

第 2 のイオン電流補償 I_{c2} に対する第 2 の傾き dV_{02} / dt を決定することと、

前記有効容量 C_1 、前記第 1 の傾き dV_{01} / dt 、前記第 2 の傾き dV_{02} / dt 、前記第 1 のイオン電流補償 I_{c1} 、前記第 2 のイオン電流補償 I_{c2} の関数として、前記イオン電流 I_I を計算することと

によって計算される、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 6】

前記イオン電流 I_I は、以下の方程式を介して計算される、

【数 1 3】

$$I_I = \frac{C_1 \cdot (I_{c1} \cdot \frac{dV_{02}}{dt} - I_{c2} \cdot \frac{dV_{01}}{dt})}{I_{c1} - I_{c2} + C_1 \cdot (\frac{dV_{02}}{dt} - \frac{dV_{01}}{dt})}$$

40

請求項 5 に記載の方法。

【請求項 7】

前記修正された周期的電圧関数の 2 つの隣接したサイクルに対して 2 つの異なる電圧ステップ V を提供することによって、2 つ以上のイオンエネルギー分布ピークを生じさせることをさらに含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 8】

リアルタイムで非侵襲的にプラズマシースの容量 C_2 を計算することをさらに含み、C

50

C_2 は、前記イオン電流 I_I の関数として計算される、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 9】

C_2 は、以下の方程式から計算される、

【数 1 4】

$$C_2 = \frac{C_1 \cdot (I_I + I_c)}{I_c - C_1 \cdot \frac{dV_0}{dt}}$$

請求項 8 に記載の方法。 10

【請求項 1 0】

前記電圧ステップ V の関数として、前記基板表面上に入射するイオンのイオンエネルギー $-eV$ を監視することをさらに含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 1 1】

前記イオンエネルギー $-eV$ は、以下のように、前記電圧ステップ V 、前記有効容量 C_1 、プラズマシースの容量 C_2 から計算される、

【数 1 5】

$$eV = \Delta V \frac{C_1}{C_2 + C_1}$$

20

請求項 1 0 に記載の方法。

【請求項 1 2】

前記修正された周期的電圧関数は、1つ以上の周期的に繰り返す固定波形を含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 1 3】

前記イオン電流 I_I の関数として、前記プラズマの密度を遠隔で非侵襲的に監視することをさらに含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 1 4】

1つ以上の閾値を横断する前記プラズマの前記密度に応答して、前記周期的電圧関数のピーク間電圧を調節することをさらに含む、請求項 1 3 に記載の方法。 30

【請求項 1 5】

前記取得することは、前記有効容量をメモリから取り出すことを含む、請求項 1 に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【背景技術】

【0 0 0 1】

(優先権の主張)

本願は、出願人に譲渡された仮出願第 61 / 694, 148 号(2012 年 8 月 28 日出願、名称「WIDE DYNAMIC RANGE ION ENERGY BIAS CONTROL; FAST ION ENERGY SWITCHING; ION ENERGY CONTROL AND A PULSED BIAS SUPPLY; AND A VIRTUAL FRONT PANEL」)に基づく優先権を主張し、参照により本明細書に明示的に引用される。 40

【0 0 0 2】

プラズマ処理は、イオンエネルギーに対する精密な制御から、さらに、処理中に基板上に入射するイオンのイオンエネルギー分布関数 (IEDF) を制御する能力から利益を得ることができる。しかしながら、精密な制御は、イオンエネルギーおよび IEDF を監視するための非侵襲的なリアルタイム手段がないことによって妨害される。

【0 0 0 3】

50

加えて、イオン電流 I_I およびシース容量 C_2 (または C_{sheath}) の知識を介して監視することができる、種々の測定基準がある。しかしながら、さらに、これらの値を非侵襲的にリアルタイムで監視することができるシステムおよび方法がない。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

本開示は、概して、プラズマ処理に関し、具体的には、イオンエネルギーを制御することに関する。

【課題を解決するための手段】

【0005】

図面に示される、本発明の例証的実施形態は、以下に要約される。これらおよび他の実施形態は、発明を実施するための形態の項により完全に説明される。しかしながら、本発明の開示または発明を実施するための形態に説明される形態に本発明を限定することを意図するものではないことを理解されたい。当業者は、請求項に明示される発明の精神および範囲内に該当する、多数の修正、均等物、および代替構造が存在することを認識し得る。

【0006】

本開示の5つの主要な側面、すなわち、イオンエネルギーの不正確性の原因としての回路「記憶」、広ダイナミックレンジ、高速イオンエネルギー切り替え、パルスイオンエネルギー制御、および仮想フロントパネルがある。広ダイナミックレンジは、プラズマ処理チャンバのバイアス供給部を伴い、バイアス供給部は、プラズマ処理チャンバのプラズマ内で2つ以上のイオンエネルギーをもたらすことができる。2つ以上のイオンエネルギーは、精度、安定性、および広ダイナミックレンジ（大きいイオンエネルギー分離を有するイオンエネルギー）を伴ってもたらされることがある。高速イオンエネルギー切り替えは、例えば、あるバイアス供給パルスまたはサイクルから次までの短い期間で、2つ以上のイオンエネルギーをもたらす、バイアス供給部を伴う（パルスまたはサイクルは、修正された周期的電圧関数の期間としても知られている）。高速イオンエネルギー切り替えはまた、単一のサイクル内でイオンエネルギーの障害を補償するバイアス供給部の能力も含む。パルスイオンエネルギー制御は、プラズマ源供給部のパルスエンベロープに対するバイアス供給サイクルのパルスエンベロープのタイミングを伴う。仮想フロントパネルは、これらの最初の3つの側面で議論されるシステム、方法、および装置の制御を可能にするユーザインターフェースを伴う。

【0007】

本開示の一側面では、プラズマ処理チャンバを動作させる方法が開示される。本方法は、プラズマ処理チャンバ内の基板支持部上の基板と接触しているプラズマを持続させることを含むことができる。本方法はさらに、基板支持部の有効容量 C_1 にアクセスすることを含むことができる。本方法は、その上さらに、基板の表面上で電位を生じさせるために、修正された周期的電圧関数を基板支持部に提供することであって、修正された周期的電圧関数は、周期的電圧関数およびイオン電流補償 I_c の組み合わせから形成される、ことを含むことができる。最後に、本方法は、修正された周期的電圧関数の測定値の関数として、プラズマ内のイオン電流 I_I を計算することを含むことができる。

【0008】

本開示の別の側面では、プラズマ処理システムが開示される。本システムは、プラズマ処理チャンバ内の基板支持部を含むことができる。基板支持部は、基板を支持することができる。本システムはまた、周期的電圧関数を提供する基板支持部バイアス供給部を含むこともできる。本システムはさらに、イオン電流補償を提供する、イオン電流補償構成要素を含むことができる。イオン電流補償は、基板支持部に提供されることがある修正された周期的電圧関数を形成するために、周期的電圧関数と組み合わせられることができる。順に、基板の基板支持部と反対側の表面上で直流電圧を生じさせる。これは、順に、基板の基板支持部と反対側の表面上に入射するイオンのイオンエネルギーを制御する。修正

10

20

30

40

50

された周期的電圧関数は、第1の部分、第2の部分、および第3の部分を有することができる。第1の部分が、急速に増加する電圧を含むことができる一方で、第2の部分は、実質的に一定の電圧を含むことができる。第3の部分は、実質的に一定の電圧を下回る電圧ステップ V である、開始電圧を有する、傾き電圧を含むことができる。電圧ステップ V は、イオンエネルギーに対応することができ、傾き dV_0/dt は、イオン電流補償によって制御されることがある。本システムはさらに、基板支持部の有効容量 C_1 にアクセスし、少なくとも2つのイオン電流補償値の傾き dV_0/dt を測定し、有効容量 C_1 および傾き dV_0/dt の関数として、イオン電流 I_I を計算するためのプロセッサ読み取り可能な命令で符号化されている非一過性の有形コンピュータ読み取り可能な記憶媒体を有する、コントローラを含むことができる。

10

【0009】

本開示のさらに別の側面では、非一過性の有形コンピュータ読み取り可能な記憶媒体が開示される。記憶媒体は、プラズマ処理チャンバ内の基板上に入射するプラズマからのイオンのイオンエネルギー分布関数の特性を制御する方法を行うためのプロセッサ読み取り可能な命令で符号化されることがある。本方法は、基板を支持する基板支持部の有効容量 C_1 にアクセスすることを含むことができる。本方法はまた、基板バイアス供給部によって提供される周期的電圧関数およびイオン電流補償構成要素によって提供されるイオン電流補償を制御することを含むこともできる。周期的電圧関数およびイオン電流補償の組み合わせを、修正された周期的電圧関数と称することができる。修正された周期的電圧関数は、基板の基板支持部と反対側の表面上で電位を生じさせ、それによって、プラズマから基板上に入射するイオンのイオンエネルギー eV を制御するために、基板支持部に提供されることがある。本方法はさらに、修正された周期的電圧関数の測定を行うことと、測定に基づいて、プラズマ内のイオン電流 I_I を繰り返し計算することとを含むことができる。

20

例えば、本願は以下の項目を提供する。

(項目1)

プラズマ処理チャンバを動作させる方法であって、

前記プラズマ処理チャンバ内の基板支持部上の基板と接触しているプラズマを持続させることと、

前記基板支持部の有効容量 C_1 にアクセスすることと、

30

前記基板の表面上で電位を生じさせるために、修正された周期的電圧関数を前記基板支持部に提供することであって、前記修正された周期的電圧関数は、周期的電圧関数とイオン電流補償 I_C との組み合わせから形成される、ことと、

前記修正された周期的電圧関数の測定値の関数として、前記プラズマ内のイオン電流 I_I を計算することと

を含む、方法。

(項目2)

前記修正された周期的電圧関数は、

第1の部分と呼ばれる急速に増加する電圧と、

前記第1の部分の終了時に開始し、第2の部分と呼ばれる実質的に一定の電圧と、

40

前記第2の部分の終了時に開始し、第3の部分と呼ばれる、前記実質的に一定の電圧を下回る電圧ステップ V と、

前記実質的に一定の電圧を下回る V を開始する傾き電圧であって、前記傾き電圧は、前記第3の部分の終了時に開始し、第4の部分と呼ばれ、前記傾き電圧は、前記イオン電流補償によって制御される傾き dV_0/dt を有する、傾き電圧と

を備えている、項目1に記載の方法。

(項目3)

以下の方程式が満たされるまで、前記イオン電流補償 I_C を調節することをさらに含み

、

【数11】

$$0 = \frac{dV_0}{dt} - \frac{I_C}{C_1}$$

それによって、前記イオンエネルギー分布関数の最小幅を獲得する、項目2に記載の方法。

(項目4)

前記最小幅から前記イオンエネルギー分布関数の幅を増加させるように、前記イオン電流 I_I から離して前記イオン電流補償 I_C を調節することをさらに含む、項目3に記載の方法。

10

(項目5)

前記方程式が満たされたとき、以下の方程式が真であり、

【数12】

$$I_I = I_C \frac{C_1}{C_1 + C_{stray}}$$

20

C_{stray} は、前記修正された周期的電圧関数によって見られる浮遊容量の累積容量である、項目3に記載の方法。

(項目6)

イオン電流 I_I は、

第1のイオン電流補償 I_{C1} に対する第1の傾き dV_{01}/dt を決定することと、

第2のイオン電流補償 I_{C2} に対する第2の傾き dV_{02}/dt を決定することと、

前記有効容量 C_1 、前記第1の傾き dV_{01}/dt 、前記第2の傾き dV_{02}/dt 、前記第1のイオン電流補償 I_{C1} 、および前記第2のイオン電流補償 I_{C2} の関数として、前記イオン電流 I_I を計算することと

によって計算される、項目2に記載の方法。

30

(項目7)

前記イオン電流 I_I は、以下の方程式を介して計算される、

【数13】

$$I_I = \frac{C_1 \cdot (I_{c1} \cdot \frac{dV_{02}}{dt} - I_{c2} \cdot \frac{dV_{01}}{dt})}{I_{c1} - I_{c2} + C_1 \cdot (\frac{dV_{02}}{dt} - \frac{dV_{01}}{dt})}$$

40

項目6に記載の方法。

(項目8)

前記電圧ステップ V を制御することによって、前記基板表面上に入射するイオンのイオンエネルギー eV を制御し、それによって、前記基板表面上で前記電位を生じさせることをさらに含む、項目2に記載の方法。

(項目9)

前記修正された周期的電圧関数の2つの隣接したサイクルに対して2つの異なる電圧ステップ V を提供することによって、2つ以上のイオンエネルギー分布ピークを生じさせることをさらに含む、項目8に記載の方法。

(項目10)

50

リアルタイムで非侵襲的にプラズマシースの容量 C_2 を計算することをさらに含む、項目 2 に記載の方法。

(項目 1 1)

C_2 は、イオン電流 I_I の関数として計算される、項目 1 0 に記載の方法。

(項目 1 2)

C_2 は、以下の方程式から計算される、

【数 1 4】

$$C_2 = \frac{C_1 \cdot (I_I + I_c)}{I_c - C_1 \cdot \frac{dV_0}{dt}}$$

10

項目 1 1 に記載の方法。

(項目 1 3)

前記電圧ステップ V の関数として、前記基板表面上に入射するイオンのイオンエネルギー eV を監視することをさらに含む、項目 1 に記載の方法。

(項目 1 4)

前記イオンエネルギー eV は、以下のように、前記電圧ステップ V 、前記有効容量 C_1 、および前記シース容量 C_2 から計算される、

【数 1 5】

$$eV = \Delta V \frac{C_1}{C_2 + C_1}$$

20

項目 1 3 に記載の方法。

(項目 1 5)

前記修正された周期的電圧関数は、1つ以上の周期的に繰り返す固定波形を含む、項目 1 に記載の方法。

30

(項目 1 6)

前記イオン電流 I_I の関数として、前記プラズマの密度を遠隔で非侵襲的に監視することをさらに含む、項目 1 に記載の方法。

(項目 1 7)

1つ以上の閾値を横断する前記プラズマの前記密度に応答して、前記周期的電圧関数のピーク間電圧を調節することをさらに含む、項目 1 6 に記載の方法。

(項目 1 8)

アクセスすることは、メモリからの前記有効容量の取り出しを含む、項目 1 に記載の方法。

(項目 1 9)

40

基板を支持する、プラズマ処理チャンバ内の基板支持部と、

周期的電圧関数を提供する基板支持部バイアス供給部と、

イオン電流補償を提供するイオン電流補償構成要素であって、

前記イオン電流補償構成要素は、前記周期的電圧関数と組み合わせられることにより修正された周期的電圧関数を形成し、前記修正された周期的電圧関数は、前記基板支持部に提供され、それによって、DC 電圧を前記基板の前記基板支持部と反対側の表面上で生じさせ、順に、前記 DC 電圧は、前記基板の前記基板支持部と反対側の前記表面に入射するイオンのイオンエネルギーを制御し、

前記修正された周期的電圧関数は、

急速に増加する電圧を備えている第 1 の部分と、

50

実質的に一定の電圧を備えている第2の部分と、

傾き電圧を備えている第3の部分であって、前記傾き電圧は、前記実質的に一定の電圧を下回る電圧ステップVである開始電圧を有し、前記電圧ステップVは、イオンエネルギーに対応し、傾きdV₀/dtは、前記イオン電流補償によって制御される、第3の部分と

を有する、イオン電流補償構成要素と、

非一過性の有形コンピュータ読み取り可能な記憶媒体を有するコントローラであって、前記記憶媒体は、

前記基板支持部の有効容量C₁にアクセスすることと、

少なくとも2つのイオン電流補償値に対する前記傾きdV₀/dtを測定することと、

前記有効容量C₁および前記傾きdV₀/dtの関数として、イオン電流Iₜを計算することと

を行うためのプロセッサ読み取り可能な命令で符号化されている、コントローラとを備えている、プラズマ処理システム。

(項目20)

前記コントローラは、以下の方程式が満たされるまで、前記イオン電流補償Icを調節するようにさらに構成されている、

【数16】

$$0 = \frac{dV_0}{dt} - \frac{I_c}{C_1}$$

10

20

項目19に記載のプラズマ処理システム。

(項目21)

イオン電流Iₜは、

第1のイオン電流補償Ic₁に対する第1の傾きdV₀₁/dtを決定することと、

第2のイオン電流補償Ic₂に対する第2の傾きdV₀₂/dtを決定することと

Iₜに実質的に等しくなるように前記イオン電流補償Icを調節することなく、前記有効容量C₁、前記第1の傾きdV₀₁/dt、前記第2の傾きdV₀₂/dt、前記第1のイオン電流補償Ic₁、および前記第2のイオン電流補償Ic₂の関数として、前記イオン電流Iₜを計算することによって、計算される、項目19に記載のプラズマ処理システム。

30

(項目22)

前記イオン電流Iₜは、以下の方程式を介して計算される、

【数17】

$$I_I = \frac{C_1 \cdot (I_{c1} \cdot \frac{dV_{02}}{dt} - I_{c2} \cdot \frac{dV_{01}}{dt})}{I_{c1} - I_{c2} + C_1 \cdot (\frac{dV_{02}}{dt} - \frac{dV_{01}}{dt})}$$

40

項目21に記載のプラズマ処理システム。

(項目23)

前記電圧ステップVは、前記修正された周期的電圧関数のサイクル間で周期的に変動させられ、それによって、2つ以上の異なるイオンエネルギー分布関数をもたらす、項目19に記載のプラズマ処理システム。

(項目24)

前記基板支持部バイアス供給部のデューティサイクルは、前記シースを横断し、前記基

50

板表面上に入射するイオンのイオンフラックスを制御し、1つ以上の異なるイオンエネルギー分布関数の各々に対する前記イオンフラックスは、1つ以上の電圧ステップ V の各々に対する前記修正された周期的電圧関数のデューティサイクルに依存する、項目 19 に記載のプラズマ処理システム。

(項目 25)

前記基板支持部バイアス供給部は、第1のスイッチと第2のスイッチとを含み、前記第1および第2のスイッチの両方は、電源と前記基板支持部バイアス供給部の出力との間で並列に配列されている、項目 19 に記載のプラズマ処理システム。

(項目 26)

前記第1のスイッチは、バス電圧を前記出力に選択的に結合し、前記第2のスイッチは、前記出力を接地に選択的に結合する、項目 19 に記載のプラズマ処理システム。

(項目 27)

前記コントローラは、
電圧が 0 V に向かってピーク間電圧 V_{pp} だけ増加して 0 V をわずかに超える第1の期間中、前記第1のスイッチを開放し、前記第2のスイッチを閉鎖することと、

前記第1のスイッチを閉鎖し、前記第2のスイッチを開放することにより電圧の瞬間低下 V を引き起こすことであって、前記電圧の傾きが dV_0 / dt である傾き領域が、後に続く、ことと、

再度、前記第1のスイッチを開放し、前記第2のスイッチを閉鎖することと
を行う、項目 19 に記載のプラズマ処理システム。

(項目 28)

プラズマ処理チャンバ内の基板上に入射する plasma からのイオンのイオンエネルギー分布関数の特性を制御する方法を行うためのプロセッサ読み取り可能な命令で符号化されている非一過性の有形コンピュータ読み取り可能な記憶媒体であって、前記方法は、

前記基板を支持する基板支持部の有効容量 C_1 にアクセスすることと、
基板バイアス供給部によって提供される周期的電圧関数とイオン電流補償構成要素によつて提供されるイオン電流補償とを制御することであって、前記周期的電圧関数と前記イオン電流補償との組み合わせは、修正された周期的電圧関数であり、前記修正された周期的電圧関数は、前記基板支持部に提供されることにより、前記基板の前記基板支持部と反対側の表面上で電位を生じさせ、それによって、前記 plasma から前記基板上に入射するイオンのイオンエネルギー eV を制御することと、

前記修正された周期的電圧関数の測定を行うことと、
前記測定に基づいて、前記 plasma 内のイオン電流 I_T を繰り返し計算することと
を含む、非一過性の有形コンピュータ読み取り可能な記憶媒体。

(項目 29)

前記修正された周期的電圧関数は、傾き dV_0 / dt を有する傾き部分が後に続く電圧ステップ V を含む、項目 28 に記載の非一過性の有形コンピュータ読み取り可能な記憶媒体。

(項目 30)

前記イオン電流 I_T は、前記電圧ステップ V および前記傾き部分の前記傾き dV_0 / dt の関数である、項目 29 に記載の非一過性の有形コンピュータ読み取り可能な記憶媒体。

(項目 31)

前記傾き dV_0 / dt は、前記修正された周期的電圧関数の 2 つの異なるサイクルの各々からの少なくとも 1 つの電圧測定を使用して計算される、項目 30 に記載の非一過性の有形コンピュータ読み取り可能な記憶媒体。

(項目 32)

前記電圧ステップ V は、前記基板の前記基板支持部と反対側の前記表面上の平均電位に対応し、それによって、前記基板上に入射するイオンの平均イオンエネルギー eV を生じさせる、項目 28 に記載の非一過性の有形コンピュータ読み取り可能な記憶媒体。

10

20

30

40

50

(項目 3 3)

前記傾き部分の前記傾き $d V_0 / d t$ は、前記イオン電流補償構成要素からのイオン電流補償 I_c の関数である、項目 3 2 に記載の非一過性の有形コンピュータ読み取り可能な記憶媒体。

(項目 3 4)

前記イオン電流補償 I_c が前記イオン電流 I_T に等しくなるまで、前記イオン電流補償 I_c を調節すること、したがって、前記基板の前記基板支持部と反対側の前記表面上で一定の電位を生じさせることを介してイオンエネルギー分布関数の幅を最小限化することをさらに含む、項目 2 8 に記載の非一過性の有形コンピュータ読み取り可能な記憶媒体。

(項目 3 5)

前記イオン電流補償 I_c を調節し、前記基板の前記基板支持部と反対側の前記表面上の前記電位を変動させること、したがって、前記イオンエネルギー分布関数の幅を所望の幅まで増加させることをさらに含む、項目 2 8 に記載の非一過性の有形コンピュータ読み取り可能な記憶媒体。

【0010】

本発明の種々の目的および利点ならびにより完全なる理解は、添付図面と併せて考慮されるときに、以下の発明を実施するための形態および添付の請求項を参照することによって、明白であり、かつ容易に理解される。

【図面の簡単な説明】

【0011】

【図 1】図 1 は、プラズマ処理システムの実施形態である。

【図 2】図 2 は、スイッチモードバイアス供給部を実現するために利用され得る、構成要素の概略図である。

【図 3】図 3 は、 V_{u_t} で周期的電圧関数を生成するように、(V_2 および V_4 として) T_1 および T_2 に印加され得る、2 つの駆動信号波形を描写する、タイミング図である。

【図 4】図 4 は、 V_{bus} 対時間、基板の表面における電圧対時間、および対応するイオンエネルギー分布を描写するグラフである。

【図 5】図 5 は、特定のイオンエネルギーに集中するイオンエネルギー分布(またはイオンエネルギー分布関数(IEDF))をもたらす、スイッチモードバイアス供給部を動作させる単一のモードである。

【図 6】図 6 は、イオン電流補償構成要素がプラズマチャンバ内でイオン電流を補償する、実施形態を描写するプロック図である。

【図 7】図 7 は、例示的イオン電流補償構成要素である。

【図 8】図 8 は、 V_0 における例示的電圧(例えば、修正された周期的電圧関数)を描写するグラフである。

【図 9】図 9 は、スイッチ構成要素 T_1 および T_2 と直列容量 C_{series} との間のインダクタンス L_1 を図示する。

【図 10】図 10 は、エネルギー排出構成要素の特定の実施形態を伴うバイアス供給部である。

【図 11】図 11 は、種々の IEDF 形状のグラフを図示する。

【図 12】図 12 は、次のサイクルの V に影響を及ぼす、障害を第 1 のサイクルで見ることができる、修正された周期的電圧関数である。

【図 13】図 13 は、類似の修正された周期的電圧関数を示すが、この場合、障害が下降電圧に経路よりもむしろ経路を辿らせる。

【図 14】図 14 は、前のサイクルでの異なる障害にもかかわらず、所望のイオンエネルギーを達成するために本明細書で開示されるシステムおよび方法が使用される、波形である。

【図 15】図 15 は、前のサイクルでの異なる障害にもかかわらず、所望のイオンエネルギーを達成するために本明細書で開示されるシステムおよび方法が使用される、波形であ

10

20

30

40

50

る。

【図16】図16は、図7を参照して説明される電流源を実現するように実装され得る、電流源の例示的実施形態である。

【図17】図17は、基板の表面に影響を及ぼすイオンのイオンエネルギー分布を制御する方法の一実施形態である。

【図18】図18は、基板の表面に影響を及ぼすイオンのイオンエネルギー分布を制御する方法の別の実施形態である。

【図19】図19は、IEDF幅およびイオンエネルギーを設定する方法を示す。

【図20】図20は、電力供給部電圧 V_{PS} とイオンエネルギー分布関数との間の3つの関係を図示する。
10

【図21】図21は、電力供給部スイッチタイミング、周期的電圧関数、イオン電流補償、修正された周期的電圧関数、基板表面電圧、およびイオンエネルギー分布関数の間の関係を示す、チャートの実施形態である。

【図22】図22は、電力供給部スイッチタイミング、周期的電圧関数、イオン電流補償、修正された周期的電圧関数、基板表面電圧、およびイオンエネルギー分布関数の間の関係を示す、チャートのさらなる実施形態である。

【図23】図23はさらに、電力供給部スイッチタイミング、周期的電圧関数、イオン電流補償、修正された周期的電圧関数、基板表面電圧、およびイオンエネルギー分布関数の間の関係を示す、チャートの実施形態である。

【図24】図24はさらに、電力供給部スイッチタイミング、周期的電圧関数、イオン電流補償、修正された周期的電圧関数、基板表面電圧、およびイオンエネルギー分布関数の間の関係を示す、チャートの実施形態である。
20

【図25】図25は、電力供給部スイッチタイミング、周期的電圧関数、イオン電流補償、修正された周期的電圧関数、基板表面電圧、およびイオンエネルギー分布関数の間の関係を示す、チャートの別の実施形態である。

【図26】図26は、電力供給部スイッチタイミング、周期的電圧関数、イオン電流補償、修正された周期的電圧関数、基板表面電圧、およびイオンエネルギー分布関数の間の関係を示す、チャートのさらに別の実施形態である。

【図27】図27は、電力供給部スイッチタイミング、周期的電圧関数、イオン電流補償、修正された周期的電圧関数、基板表面電圧、およびイオンエネルギー分布関数の間の関係を示す、チャートのさらなる実施形態である。
30

【図28】図28は、鎖線によって示されるパルスエンベロープ内でパルス状である、ソース供給部である。

【図29】図29は、鎖線によって示されるパルスエンベロープ内でパルス状である、バイアス供給部に対する修正された周期的電圧である。

【図30】図30は、プラズマ密度およびバイアス供給に対する測定された波形を示す。

【図31】図31は、仮想フロントパネルの実施形態である。

【図32】図32は、仮想フロントパネルの実施形態である。

【図33】図33は、仮想フロントパネルの実施形態である。

【図34】図34は、仮想フロントパネルの実施形態である。
40

【図35】図35は、仮想フロントパネルの実施形態である。

【図36】図36は、仮想フロントパネルの実施形態である。

【図37】図37は、仮想フロントパネルの実施形態である。

【図38】図38は、仮想フロントパネルの実施形態である。

【図39】図39は、仮想フロントパネルの実施形態である。

【図40】図40は、仮想フロントパネルの実施形態である。

【図41】図41は、仮想フロントパネルの実施形態である。

【図42】図42は、仮想フロントパネルの実施形態である。

【図43】図43は、仮想フロントパネルの実施形態である。

【図44】図44は、仮想フロントパネルの実施形態である。
50

【図45】図45は、仮想フロントパネルの実施形態である。

【図46】図46は、仮想フロントパネルの実施形態である。

【図47】図47は、仮想フロントパネルの実施形態である。

【図48】図48は、仮想フロントパネルの実施形態である。

【図49】図49は、仮想フロントパネルの実施形態である。

【図50】図50は、仮想フロントパネルの実施形態である。

【図51】図51は、仮想フロントパネルの実施形態である。

【図52】図52は、仮想フロントパネルの実施形態である。

【図53】図53は、その内側で一式の命令が、デバイスに本開示の側面および／または方法論のうちのいずれか1つ以上を実施あるいは実行させるために実行することができる、制御システムの一実施形態の概略図を示す。 10

【発明を実施するための形態】

【0012】

プラズマ処理システムの例示的実施形態は、概して、図1に示される。描写されるように、プラズマ電力供給部102は、プラズマ処理チャンバ104に結合され、スイッチモード電力供給部106は、チャンバ104内において、その上に基板110が置かれている支持部108に結合される。また、スイッチモード電力供給部106に結合される、コントローラ112も示される。

【0013】

この例示的実施形態では、プラズマ処理チャンバ104は、実質的に従来の構造のチャンバ（例えば、ポンプまたは複数のポンプ（図示せず）によって真空にされる、真空封入体を含む）によって実現され得る。また、当業者が理解するように、チャンバ104内のプラズマ励起は、例えば、ヘリコン型プラズマ源等の種々の源のうちの任意の1つによるものであり得、種々の源は、反応炉内でプラズマ114を点火し、持続させるための磁気コイルおよびアンテナを含み、ガス注入口がチャンバ104内にガスを導入するために提供され得る。 20

【0014】

描写されるように、例示的プラズマチャンバ104は、基板110のエネルギーイオン衝撃および他のプラズマ処理（例えば、プラズマ蒸着およびプラズマ支援イオン注入）を利用して、材料のプラズマ支援エッチングを行うように配列および構成される。本実施形態におけるプラズマ電力供給部102は、プラズマ114を点火し、持続させるように、1つ以上の周波数（例えば、13.56MHz）において、整合回路（図示せず）を介して、チャンバ104に電力（例えば、RF電力）を印加するように構成される。本発明は、チャンバ104に電力を結合するための任意の特定の種類のプラズマ電力供給部102または源に限定されるものではなく、種々の周波数および電力レベルが、プラズマ114に容量的または誘導的に結合され得ることを理解されたい。 30

【0015】

描写されるように、処理される誘電性基板110（例えば、半導体ウエハ）は、従来のウエハチャック（例えば、半導体ウエハ処理のため）の一部を含み得る支持部108によって、少なくとも部分的に支持される。支持部108は、支持部108と基板110との間に絶縁層を有し、基板110は、プラットフォームに容量的に結合されるように形成され得るが、支持部108と異なる電圧で浮動し得る。 40

【0016】

前述のように、基板110および支持部108が、導体である場合、支持部108に不变電圧を印加することが可能であり、基板110を通しての電気伝導の結果、支持部108に印加される電圧は、基板110の表面にも印加される。

【0017】

しかしながら、基板110が、誘電性である場合、支持部108への不变電圧の印加は、処理される基板110の表面全体にわたる電圧をかけるために有効ではない。その結果、例示的スイッチモード電力供給部106は、基板110の制御されたエッチングおよび 50

/または蒸着および/または他のプラズマ支援プロセスを行うように、プラズマ114内でイオンを引きつけて基板110と衝突させることができある電圧を基板110の表面上にもたらすように制御されるように構成される。

【0018】

さらに、本明細書でさらに論じられるように、スイッチモード電力供給部106の実施形態は、プラズマ電力供給部102によって(プラズマ114に)印加される電力と、スイッチモード電力供給部106によって基板110に印加される電力との間にごくわずかな相互作用があるように動作するように構成される。スイッチモード電力供給部106によって印加される電力は、例えば、プラズマ114の密度に実質的に影響を及ぼすことなく、イオンエネルギーの制御を可能にするように制御可能である。

10

【0019】

さらに、図1に描寫される例示的スイッチモード電力供給部106の多くの実施形態は、比較的に単純な制御アルゴリズムによって制御され得る、比較的に安価な構成要素によって実現される。また、従来技術のアプローチと比較して、スイッチモード電力供給部106の多くの実施形態は、はるかに効率的である。つまり、エネルギーコストと、過剰な熱エネルギーを除去することに関連付けられる高価な材料とを削減する。

【0020】

誘電性基板に電圧を印加するための公知の技術の1つは、基板の表面において電圧を誘発する、基板支持部への電力を印加するための複雑な制御方式とともに、高出力線形増幅器を利用する。しかしながら、この技術は、コスト効率的ではなく、または十分に管理可能ではないことが分かっているため、商業用事業体によって採用されていない。特に、利用される線形増幅器は、典型的には、大型、非常に高価、非効率的、かつ制御が困難である。さらに、線形増幅器は、本質的に、AC結合(例えば、阻止コンデンサ)と、チャッキングのような補助機能とを要求し、チャッキングのような補助機能は、並列給電回路によって達成され、並列給電回路は、チャックとともに、源に対するシステムのACスペクトル純度を害する。

20

【0021】

検討されている別の技術は、(例えば、1つ以上の線形増幅器によって)基板に高周波電力を印加することである。しかしながら、基板に印加される高周波電力は、プラズマ密度に影響を及ぼすため、この技術は、プラズマ密度に悪影響を及ぼすことが分かっている。

30

【0022】

いくつかの実施形態では、図1に描寫されるスイッチモード電力供給部106は、降圧、昇圧、および/または降圧-昇圧型電力技術によって実現され得る。これらの実施形態では、スイッチモード電力供給部106は、可変レベルのパルス電力を印加し、基板110の表面上に電位を誘発するように制御され得る。

【0023】

次に、図2を参照すると、これは、スイッチモードバイアス供給部を実現するために利用され得る、構成要素の略図である。示されるように、本実施形態における切り替え構成要素T1およびT2は、ハーフブリッジ(また、トーテムポールとも称される)型トポロジにおいて配列される。集合的に、R2、R3、C1、およびC2は、プラズマ負荷を表し、C10は、有効容量(本明細書では直列容量またはチャック容量とも称される)であり、C3は、基板の表面上に誘発される電圧または静電チャック(図示せず)の電圧からのDC電流が、回路を通して流動するのを防止するための任意の物理的コンデンサである。C10は、基板支持部および静電チャック(またはEチャック)の直列容量(チャック容量とも称される)、ならびに絶縁および基板等のバイアスの印加に固有の他の容量を含むため、有効容量と称される。描寫されるように、L1は、漂遊インダクタンス(例えば、負荷に電力を給電する導体の自然インダクタンス)である。また、本実施形態では、3つの入力: Vbus、V2、およびV4が存在する。

40

【0024】

50

V_2 および V_4 は、駆動信号（例えば、図 2 を参照して説明される駆動構成要素 228'、228''）によって出力される、駆動信号 $230'$ 、 $230''$ を表し、本実施形態では、 V_2 および V_4 は、T1 および T2 の閉鎖が変調され、基板支持部に印加される、 V_{out} での電圧出力の形状を制御し得るように、タイミングをとられることが可能である（例えば、パルスの長さおよび／または相互遅延）。多くの実装では、切り替え構成要素 T1 および T2 を実現するために使用されるトランジスタは、理想的スイッチではなく、したがって、所望の波形に到達するために、トランジスタ特有の特性が考慮される。多くの動作モードでは、単に、 V_2 および V_4 のタイミングを変更することが、 V_{out} での所望の波形の印加を可能にする。

【0025】

10

例えば、スイッチ T1、T2 は、基板 110 の表面における電圧が、概して負であり、周期的電圧パルスが、正電圧基準に接近し、および／またはそれを若干超えるように動作され得る。基板 110 の表面における電圧の値は、イオンのエネルギーを定義するものであり、それは、イオンエネルギー分布関数（IEDF）の観点から特徴付けられ得る。基板 110 の表面において所望の電圧をもたらすために、 V_{out} でのパルスは、基板 110 の表面に十分な電子を引きつけ、所望の電圧および対応するイオンエネルギーを達成するように、概して矩形であり、基板 110 の表面において短時間の正電圧を誘発するために十分な長さの幅を有し得る。

【0026】

20

正電圧基準に接近する、および／またはそれを若干超える周期的電圧パルスは、スイッチ T1、T2 の切り替え能力によって限定される最小時間を有し得る。電圧がスイッチを損傷するレベルまで蓄積しない限り、電圧の概して負の部分が延長することができる。同時に、電圧の負の部分の長さは、イオン転移時間を超えるべきである。

【0027】

本実施形態における V_{bus} は、 V_{out} で測定されるパルスの振幅を定義し、パルスの振幅は、基板の表面における電圧、その結果、イオンエネルギーを定義する。

【0028】

30

パルス幅、パルス形状、および／または 2 つの信号 V_2 、 V_4 の相互遅延は、 V_{out} （本明細書では修正された周期的電圧関数とも称される）において、所望の波形に到達するように変調され得、 V_{bus} に印加される電圧は、パルスの特性に影響を及ぼし得る。言い換えると、電圧 V_{bus} は、パルス幅、パルス形状、および／または信号 V_2 、 V_4 の相対的位相に影響を及ぼし得る。図 3 を簡単に参照すると、例えば、 V_{out} において周期的電圧関数を生成するように、T1 および T2 に印加され得る 2 つの駆動信号波形（ V_2 および V_4 として）を描写するタイミング略図が示される。 V_{out} でのパルスの形状を変調するために（例えば、 V_{out} において、パルスの最小時間を達成するが、パルスのピーク値に到達するために）、2 つのゲート駆動信号 V_2 、 V_4 のタイミングが、制御され得る。

【0029】

40

例えば、パルスの各々が、 V_{out} で印加される時間が、パルス間の時間 t と比較して短いが、基板 110 の表面において、正電圧を誘発し、基板 110 の表面に電子を引きつけるために十分に長くなり得るように、2 つのゲート駆動信号 V_2 、 V_4 が、切り替え構成要素 T1、T2 に印加され得る。さらに、パルス間のゲート電圧レベルを変更することによって、パルス間で V_{out} に印加される電圧の勾配を制御可能であることが分かっている（例えば、パルス間で、基板の表面において、実質的に一定の電圧を達成するために）。いくつかの動作モードでは、ゲートパルスの反復速度は、約 400 kHz であるが、この速度は、当然ながら、印加毎に変化し得る。

【0030】

50

必須ではないが、実際は、実際の実装のモデル化および改良に基づいて、所望の（または定義された）イオンエネルギー分布を生成するために使用され得る波形が、定義され得、波形は、（例えば、電圧レベルの連続として、図 1 を参照して説明される波形メモリ部

分内に)記憶可能である。加えて、多くの実装では、波形は、直接生成可能である(例えば、 V_{out} からのフィードバックを伴わずに)。したがって、フィードバック制御システムの望ましくない側面を回避する(例えば、整定時間)。

【0031】

再び、図2を参照すると、 V_{bus} は、イオンのエネルギーを制御するために変調可能であり、記憶された波形が、ゲート駆動信号 V_2 、 V_4 を制御し、 V_{out} における所望のパルス振幅を達成する一方、パルス幅を最小限にするために使用され得る。再び、これは、モデル化または実装され、実験的に確立され得るトランジスタの特定の特性に従って行われる。図4を参照すると、例えば、 V_{bus} 対時間、基板110の表面における電圧対時間、および対応するイオンエネルギー分布を描写するグラフが示される。

10

【0032】

図4のグラフは、特定のイオンエネルギーに集中するイオンエネルギー分布(またはイオンエネルギー分布関数(IEDF))をもたらす、スイッチモードバイアス供給部106を動作させる单一モードを描写する。描写されるように、この実施例におけるイオンエネルギーの单一集中をもたらすために、 V_{bus} に印加される電圧は、一定に維持される一方、 V_2 および V_4 に印加される電圧は、図4に示される対応するイオンエネルギー分布をもたらす、スイッチモードバイアス供給部106、206の出力におけるパルスを生成するように制御される(例えば、図3に描写される駆動信号を使用して)。

【0033】

図4に描写されるように、基板110の表面における電位は、概して、負であり、基板110の表面に衝突し、エッティングするイオンを引きつける。基板110に印加される周期的短パルス(パルスを V_{out} に印加することによって)は、 V_{bus} に印加される電位によって定義される規模を有し、これらのパルスは、基板110の電位に短時間の変化を生じさせ(例えば、正に近いまたは弱正電位)、電位の短時間の変化は、基板110の表面に沿って、概して、負の電位を達成するように、基板の表面に電子を引きつける。図4に描写されるように、 V_{bus} に印加される一定電圧は、特定のイオンエネルギーにおける单一集中のイオンフラックスをもたらす。したがって、特定のイオン衝撃エネルギーは、特定の電位に V_{bus} を単に設定することによって選択され得る。他の動作モードでは、イオンエネルギーの2つ以上の別個の集中が生成され得る(例えば、図5、20、23、25、26、27参照)。

20

【0034】

当業者であれば、電力供給部は、スイッチモード電力供給部に限定される必要もなく、したがって、あるイオンエネルギーを達成するために、電力供給部の出力も制御されることができるなどを認識するであろう。したがって、電力供給部の出力は、スイッチモードであろうと別様のモードであろうと、イオン電流補償またはイオン電流と組み合わせられることなく考慮されるとき、電力供給部電圧 V_{ps} と称されることもできる。

30

【0035】

次に、図5を参照すると、例えば、イオンエネルギー分布において2つの別個のピークが生成される、動作の二峰性モードを描写するグラフが示される。示されるように、この動作モードでは、基板は、2つの異なるレベルの電圧および周期的パルスを被り、その結果、イオンエネルギーの2つの別個の集中が生成される。描写されるように、2つの異なるイオンエネルギー集中をもたらすために、 V_{bus} で印加される電圧は、2つのレベル間を交互し、各レベルは、2つのイオンエネルギー集中のエネルギーレベルを定義する。

40

【0036】

図5は、各パルス後(例えば、図25、27)に交互するように、基板110、210における2つの電圧を描写するが、これは、必ずしも、必要ではない。他の動作モードでは、例えば、 V_2 および V_4 に印加される電圧は、基板の表面で誘発される電圧が、2つ以上のパルス後(例えば、図26)に、第1の電圧から第2の電圧(逆も然り)に交互するように、 V_{out} に印加される電圧に対して切り替えられる(例えば、図3に描写される駆動信号を使用して)。

50

【0037】

従来技術では、多重イオンエネルギーをもたらすために、線形増幅器に2つの波形（波形発生器によって生成される）の組み合わせを印加し、基板に増幅された2つ以上の波形の組み合わせを印加することが試みられている。しかしながら、このアプローチは、図5を参照して説明されるアプローチはより非常に複雑となり、したがって、高価な線形増幅器および波形発生器を要求する。

【0038】

次に、図6を参照すると、イオン電流補償構成要素660が、プラズマチャンバ604内のイオン電流を補償する、実施形態のブロック図が、描写される。本出願人は、高いエネルギーレベルでは、チャンバ内のイオン電流の高いレベルが、基板の表面における電圧に影響を及ぼし、結果として、イオンエネルギー分布もまた、影響を受けることを見出した。
10

【0039】

イオン電流補償構成要素660は、随意に、スイッチモード電力供給部606およびコントローラ612に追加され得る、別個の付属として実現され得る。他の実施形態では（例えば、図7に描写されるように）、イオン電流補償構成要素660は、共通筐体766（図7参照）を本明細書に説明される他の構成要素（例えば、スイッチモード電力供給部106、606およびイオン電流補償660）と共有し得る。本実施形態では、プラズマチャンバ604に提供される周期的電圧関数は、イオン電流補償構成要素660からのイオン電流補償によって修正される周期的電圧関数を備えているので、修正された周期的電圧関数と称することができる。コントローラ612は、スイッチモード電力供給部606の出力とイオン電流補償660の出力とが合体する、電気ノードにおいて、異なる時間に電圧 V_0 をサンプリングすることができる。
20

【0040】

図7に描写されるように、スイッチモード供給部の出力736に結合される、電流源764と、電流源764および出力736の両方に結合される、電流コントローラ762とを含む、例示的イオン電流補償構成要素760が、示される。また、図7には、プラズマチャンバ704が、描写され、プラズマチャンバ内には、容量要素 C_1 、 C_2 、およびイオン電流 I_I がある。描写されるように、 C_1 は、絶縁、基板、基板支持部、および静電チャックを含み得るが、それらに限定されない、チャンバ704に関連付けられた構成要素の固有容量（本明細書では有効容量とも称される）を表し、 C_2 は、シース容量および浮遊容量を表す。本実施形態では、プラズマチャンバ704に提供され、 V_0 で測定可能である周期的電圧関数は、イオン電流補償 I_C によって修正される周期的電圧関数を備えているため、修正された周期的電圧関数と称することができる。
30

【0041】

シース（本明細書ではプラズマシースとも称される）は、基板表面、および、おそらくプラズマ処理チャンバの壁の近くのプラズマの層であり、正イオンの高い密度、したがって全体的に過剰な正電荷を伴う。シースが接触している表面は、典型的には、圧倒的多数の負電荷を有する。シースは、正イオンより速い電子の速度により生じ、したがって、電子の大部分が基板表面または壁に到達することをもたらし、したがって、シースを電子が奪われたままにする。シースの厚さ s_{heat} は、プラズマ密度およびプラズマ温度等のプラズマ特性の関数である。
40

【0042】

本実施形態における C_1 は、チャンバ704に関連付けられた構成要素の固有の（本明細書では有効とも称される）容量であるので、処理中に制御され得る容量ではないことに留意されたい。例えば、線形増幅器を利用するいくつかの従来技術アプローチは、基板へのバイアス電力を阻止コンデンサと結合し、次いで、その線形増幅器を制御するためのフィードバックとして、阻止コンデンサの監視電圧を利用する。コンデンサが、本明細書に開示される実施形態の多くにおいて、スイッチモード電力供給部を基板支持部に結合し得るが、阻止コンデンサを使用するフィードバック制御は、本発明のいくつかの実施形態で
50

は、要求されないため、そのように行うことは、不必要である。

【0043】

図7を参照しながら、図7に描写される V_o における例示的電圧（例えば、修正された周期的電圧関数）を描写するグラフである図8も同時に参照する。動作において、電流コントローラ762は、 V_o における電圧（修正された周期的電圧関数）を監視し、イオン電流が、以下のように、間隔 t またはその一部分（図8に描写される）にわたって計算される。

【0044】

【数1】

$$I_i = C_1 \frac{dV_o}{dt} \quad (\text{方程式1})$$

10

【0045】

イオン電流 I_i および固有容量 C_1 （有効容量とも称される）のいずれかまたは両方は、時間的に変化することができる。 C_1 は、実質的に、所与のツールに対する定数であり、測定可能であるので、 V_o のみ、補償電流の継続的制御を可能にするために監視される必要がある。前述のように、イオンエネルギーのより単一エネルギー的分布を得るために、電流コントローラは、 I_c が、実質的に、 I_i と同一である（または代替案では、方程式3に関係付けられる）ように、電流源764を制御する。このように、イオンエネルギーの狭広がりは、イオン電流が、基板の表面において、電圧に影響を及ぼすレベルに到達する場合にも、維持され得る。

20

【0046】

また、図7には、イオンエネルギー分布の制御に関連して利用され得るフィードバックライン770が描写される。例えば、図8に描写される V の値（本明細書では電圧ステップまたは第3の部分806とも称される）は、瞬間的イオンエネルギーを示し、フィードバック制御ループの一部として、多くの実施形態において使用され得る。一実施形態では、電圧ステップ V は、方程式6に従ってイオンエネルギーに関係付けられる。他の実施形態では、ピーク間電圧 V_{pp} は、瞬間的イオンエネルギーに関係付けることができる。代替として、ピーク間電圧 V_{pp} と、第4の部分808の傾き dV_o/dt と時間 t との積との間の差は、瞬間的イオンエネルギーに関連付けられることができる（例えば、 $V_{pp} - dV_o/dt \cdot t$ ）。

30

【0047】

次に、図16を参照すると、図7を参照して説明される、電流源764を実現するために実装され得る電流源1664の例示的実施形態が示される。本実施形態では、制御可能負DC電圧源は、直列インダクタL2と関連して、電流源として機能するが、当業者は、本明細書に照らして、電流源が、他の構成要素および/または構成によって実現され得ることを理解するであろう。

【0048】

図17は、基板の表面に影響を及ぼすイオンのイオンエネルギー分布を制御する方法の一実施形態を図示する。方法1700は、修正された周期的電圧関数1702（図8の修正された周期的電圧関数802参照）を、プラズマ処理チャンバ内の基板を支持する基板支持部に適用することから始まる。修正された周期的電圧関数は、イオン電流補償 I_c （図21の I_c 2104参照）および電力供給部電圧 V_{ps} （図21の電力供給部電圧2106参照）等の少なくとも2つの「ノブ」を介して制御されることがある。電力供給部電圧を生成するための例示的構成要素は、図1のスイッチモード電力供給部106である。電力供給部電圧 V_{ps} を説明することに役立つために、これは、イオン電流およびイオン電流補償に結合することなく測定された場合として本明細書で図示される。次いで、修正された周期的電圧関数は、イオン電流補償 I_c 1704の第1および第2の値においてサンプリングされる。修正された周期的電圧関数の電圧の少なくとも2つのサンプルが、

40

50

イオン電流補償 I_c の各値について得られる。サンプリング 1704 は、イオン電流 I_I およびシース容量 C_2 1706（例えば、図 2 の C2）の計算 1706（または決定）を可能にするために行われる。そのような決定は、基板支持部に印加された場合に（または基板支持部に印加されると）狭小（例えば、最小）イオンエネルギー分布関数（IEDF）幅を生成するであろう、イオン電流補償 I_c を見出すことを伴い得る。計算 1706 はまた、隨意に、修正された周期的電圧関数の波形のサンプリング 1704 に基づいて、電圧ステップ V （修正された周期的電圧関数 1406 の第 3 の部分としても知られている）を決定することを含むこともできる。電圧ステップ V は、基板の表面に到達するイオンのイオンエネルギーに關係付けることができる。最初にイオン電流 I_I を見出すとき、電圧ステップ V を無視することができる。サンプリング 1704 および計算 1706 の詳細を、以下の図 18 の議論で提供する。シース容量 C_2 は、以下の式によって計算されることができる。
10

【0049】

【数 2】

$$C_2 = \frac{C_1 \cdot (I_I + I_c)}{I_c - C_1 \cdot \frac{dV_0}{dt}} \quad (\text{方程式2})$$

【0050】

イオン電流 I_I およびシース容量 C_2 が把握されると、方法 4300 は、イオンエネルギーおよびIEDF の形状（例えば、幅）を設定し、監視することを伴う、図 19 の方法 1900 へ移動し得る。例えば、図 23 は、どのようにして電力供給部電圧の変化がイオンエネルギーの変化をもたらすことができるかを図示する。特に、図示した電力供給部電圧の規模が減少させられ、イオンエネルギーの規模の減少をもたらす。加えて、図 24 は、狭小 IEDF 2414 を考慮すると、イオン電流補償 I_c を調節することによって IEDF を拡大できることを図示する。代替として、または並行して、方法 1700 は、イオン電流 I_I 、シース容量 C_2 、および修正された周期的電圧関数の波形の他の側面を利用する種々の測定法を行うことができる。
20

【0051】

イオンエネルギーおよび / または IEDF 幅を設定することに加えて、方法 1700 は、イオンエネルギーおよび IEDF 幅を維持するために、修正された周期的電圧関数 1708 を調節し得る。特に、イオン電流補償構成要素によって提供されるイオン電流補償 I_c の調節および電力供給部電圧の調節が、行われ得る 1708。いくつかの実施形態では、電力供給部電圧は、電力供給部のバス電圧 V_{bus} （例えば、図 2 のバス電圧 V_{bus} ）によって制御されることができる。イオン電流補償 I_c は、IEDF 幅を制御し、電力供給部電圧は、イオンエネルギーを制御する。
30

【0052】

これらの調節 1708 の後、修正された周期的電圧関数を再度サンプリングすることができ 1704、イオン電流 I_I 、シース容量 C_2 、および電圧ステップ V の計算を再度行うことができる 1706。イオン電流 I_I または電圧ステップ V が定義された値（または代替案では所望の値）以外である場合、イオン電流補償 I_c および / または電力供給部電圧を調節することができる 1708。サンプリング 1704、計算 1706、および調節 1708 のループが、イオンエネルギー eV 、および / または IEDF 幅を維持するために起こり得る。
40

【0053】

図 18 は、基板の表面に影響を及ぼすイオンのイオンエネルギー分布を制御する方法の別の実施形態を図示する。いくつかの実施形態では、上記で議論されるように、狭小 IEDF 幅（例えば、最小 IEDF 幅または代替案では約 6 % 半値全幅）を達成することが望ましくあり得る。したがって、方法 1800 は、一定の基板電圧、したがって、シース電圧が、基板の表面に存在するように、修正された周期的電圧関数をチャンバおよび基板支
50

持部に提供することができる。これは、順に、実質的に一定の電圧を使用してシースにわたってイオンを加速し、したがって、イオンが実質的に同一のイオンエネルギーで基板に影響を及ぼすことを可能にする（換言すると、狭小 IEDF 幅を提供する）。例えば、図 22 では、イオン電流補償 I_c を調節することが、パルス間の基板電圧 V_{sub} に一定または実質的に一定の電圧を持たせ、したがって、IEDF を狭くさせることができることが分かる。

【0054】

そのような修正された周期的電圧関数は、いかなる浮遊容量も仮定せず、イオン電流補償 I_c がイオン電流 I_I に等しいときに達成される（図 22 の周期的電圧関数 (V_0) の最後の 5 つのサイクルを参照）。浮遊容量 C_{stray} が考慮される代替案では、イオン電流補償 I_c は、方程式 3 に従って、イオン電流 I_I に関係付けられる。10

【0055】

【数 3】

$$I_I = I_C \frac{C_1}{C_1 + C_{stray}} \quad (\text{方程式 3})$$

【0056】

式中、 C_1 は、有効容量（例えば、図 2 および 9 - 10 を参照して説明される固有容量）である。有効容量 C_1 は、時間変動し得るか、または一定であり得る。本開示の目的で、狭小 IEDF 幅は、 $I_I = I_c$ であるとき、または代替案では、方程式 3 が満たされるとき（ I_I および浮遊容量を考慮した I_C の等値）のいずれかで存在することができる。20 図 21 - 27 は、具体的には、 $I_I = I_c$ を使用するが、これらの関係が無視可能な浮遊容量を仮定していることを理解されたい。より厳密な関係は、方程式 3 によって示され、したがって、方程式 3 は、図 21 - 27 で使用される等式の代わりであり得る。浮遊容量 C_{stray} は、電力供給部によって見られるようなプラズマチャンバの累積容量である。図 22 で図示される 8 つのサイクルがある。

【0057】

方法 1800 は、基板支持部 1802（例えば、図 1 の基板支持部 108）への修正された周期的電圧関数（例えば、図 8 で描写される修正された周期的電圧関数または図 21 の修正された周期的電圧関数 2102）の適用から始まることができる。修正された周期的電圧関数の電圧を 2 回以上サンプリングすることができ 1804、このサンプリングから、修正された周期的電圧関数のサイクルの少なくとも一部分に対する傾き dV_0 / dt を計算することができる 1806（例えば、パルスの間の一部分または第 4 の部分 808 の傾き）。決定 1810 前のある時点で、有効容量 C_1 （例えば、図 13 の固有容量 C_1 および図 2 の固有容量 $C10$ ）の以前に決定された値に（例えば、メモリから取り出された前に測定された値、ユーザによって入力された値、またはリアルタイムで測定された値）アクセスすることができる 1808。傾き dV_0 / dt 、有効容量 C_1 、およびイオン電流補償 I_c に基づいて、関数 f （方程式 4）が、以下のように、イオン電流補償 I_c の各値について評価されることができる。30

【0058】

【数 4】

$$f(I_C) = \frac{dV_0}{dt} - \frac{I_C}{C_1} = 0 \quad (\text{方程式 4})$$

【0059】

関数 f が真である場合、イオン電流補償 I_c は、イオン電流 I_I に等しく、または代替案では、方程式 3 を真にし、狭小 IEDF 幅が達成されている 1810（例えば、図 22 参照）。関数 f が真ではない場合、関数 f が真になるまで、イオン電流補償 I_c をさらに調節することができる 1812。これの別の見方としては、イオン電流 I_I に合致するまで（または代替案では方程式 3 の関係を満たすまで）イオン電流補償 I_c を調節すること50

ができ、その時点で狭小 I E D F 幅が存在するであろう。イオン電流補償 I_c へのそのような調節および I E D F の結果として生じる狭小化を図 2 2 で見ることができる。イオン電流 I_I および対応するイオン電流補償 I_c を、記憶動作 1814 で（例えば、メモリに記憶することができる。イオン電流 I_c は、有効容量 C_1 と同様に、時間変動し得る。

【0060】

方程式 4 が満たされると、（ $I_c = I_I$ であるため、または方程式 3 が真であるためのいずれかで）イオン電流 I_I が把握される。したがって、方法 1800 は、プラズマに影響を及ぼすことなく、リアルタイムでイオン電流 I_I の遠隔かつ非侵襲的測定を可能にする。これは、プラズマ密度の遠隔監視およびプラズマ源の遠隔故障検出等のいくつかの新規の測定基準につながる。

10

【0061】

補償電流 I_c を調節している間に 1812、イオンエネルギーは、デルタ関数より広くなる可能性が高く、イオンエネルギーは、図 2 1 のものに類似するであろう。しかしながら、方程式 3 を満たす補償電流 I_c が見出されると、I E D F が、図 2 2 の右部分で図示されるように、狭小 I E D F 幅（例えば、最小 I E D F 幅）を有するものとして現れるであろう。これは、 $I_c = I_I$ であるときに（または代替として、方程式 3 が真であるときに）、修正された周期的電圧関数のパルス間の電圧が、実質的に一定のシースまたは基板電圧、したがって、イオンエネルギーを引き起こすためである。図 2 3 では、基板電圧 2308 は、定電圧部分の間のパルスを含む。これらのパルスは、非常に短い持続時間を有するため、イオンエネルギーおよび I E D F へのそれらの影響は、ごくわずかであり、したがって、基板電圧 2308 は、実質的に一定と称される。

20

【0062】

以下は、図 18 で図示される方法ステップの各々についてのさらなる詳細を提供する。一実施形態では、修正された周期的電圧関数は、図 8 で図示されるもののような波形を有することができ、第 1 の部分（例えば、第 1 の部分 802）、第 2 の部分（例えば、804）、第 3 の部分（例えば、第 3 の部分 806）、および第 4 の部分（例えば、第 4 の部分 808）を含むことができ、第 3 の部分は、電圧ステップ V を有することができ、第 4 の部分は、傾き dV_0 / dt を有することができる。傾き dV_0 / dt は、正、負、またはゼロであり得る。修正された周期的電圧関数 800 はまた、第 1 の部分 802、第 2 の部分 804、および第 3 の部分 806、ならびに、多くの場合傾いているパルス間の部分（第 4 の部分 808）を備えている、パルスを有するものとして表すことができる。

30

【0063】

修正された周期的電圧関数は、図 2 では V_0 として測定することができ、図 2 1 では修正された周期的電圧関数 2102 として現れることがある。修正された周期電圧関数 2102 は、電力供給部電圧 2106（周期的電圧関数として知られている）をイオン電流補償 2104 と組み合わせることによって生成される。電力供給部電圧 2106 は、大部分が、修正された周期的電圧関数 2102 のパルスを生成して成形することに関与し、イオン電流補償 2104 は、大部分が、多くの場合は、真っ直ぐな傾き電圧である、パルス間の部分を生成して成形することに関与する。イオン電流補償 I_c を増加させることは、図 2 2 で見られるように、パルス間の部分の傾きの規模の減少を引き起こす。電力供給部電圧 2306 の規模を減少させることは、図 2 3 で見られるように、修正された周期的電圧関数 2302 のパルスおよびピーク間電圧の振幅の規模の減少を引き起こす。

40

【0064】

電力供給部がスイッチモード電力供給部である場合において、第 1 のスイッチ T_1 および第 2 のスイッチ T_2 の切り替え図 2110 が適用されることがある。例えば、第 1 のスイッチ T_1 は、図 2 でスイッチ T_1 として実装されることができ、第 2 のスイッチ T_2 は、図 2 で第 2 のスイッチ T_2 として実装されることができる。2つのスイッチは、同一の切り替え時間を有するが、180°位相がずれているものとして図示される。他の実施形態では、スイッチは、図 3 で図示されるもの等のわずかな位相オフセットを有し得る。第 1 のスイッチ T_1 がオンであるとき（最大で第 1 の時間 t_1 ）、電力供給部電圧（ V_P ）

50

s)は、最大規模（電力供給部が負のバス電圧を有するため負の電圧）に引き寄せられる。第2のスイッチT₂は、電力供給部電圧2106が接地から隔離されるように、この期間中にオフにされる。スイッチが逆転するとき（第1の時間₁で）、電力供給部電圧2106は、漸増して接地をわずかに通過し、次いで、この正の電圧で安定する。この漸増および安定は、第1の時間₁と第2の時間₂との間で起こる。次いで、第1のスイッチT₁は、再度オンにされ、第2のスイッチT₂は、第3の時間₃までオフにされる。第1のスイッチT₁をオンにすることにより、電圧ステップVによって電圧を降下させ、次いで、スイッチが第3の時間₃で再度逆転するまで、傾きdV₀/dtを有する傾き部分が後に続く。第3の時間₃はまた、修正された周期的電圧関数の後続のサイクルまたは期間の第1の時間でもある。

10

【0065】

図示した実施形態では、2つのパルス幅があるが、これは必要とはされない。他の実施形態では、パルス幅は、全てのサイクルについて同一であり得る。他の実施形態では、パルス幅は、時間を変動または変調させることができる。

【0066】

修正された周期的電圧関数を基板支持部1802に適用し、修正された周期的電圧関数が（例えば、スイッチモード電力供給部と有効容量との間の）基板支持部に到達する前に、最後のアクセス可能な点でV₀としてサンプリングすることができる1804。修正されていない周期的電圧関数（または図21の電力供給部電圧2106）は、図12のスイッチモード電力供給部1206等の電力供給部から供給されることができる。図21のイオン電流補償2104は、図12のイオン電流補償構成要素1260または図13の1360等の電流源から供給されることができる。

20

【0067】

修正された周期的電圧関数の一部分または全体をサンプリングすることができる3004。例えば、第4の部分（例えば、第4の部分808）をサンプリングすることができる。サンプリング1804は、電力供給部と基板支持部との間で行われることができる。例えば、図1では、サンプリング1804は、スイッチモード電力供給部106と支持部108との間で行われることができる。図2では、サンプリング1804は、インダクタL1と固有容量C10との間で行うことができる。一実施形態では、サンプリング1804は、容量C3と固有容量C10との間のV₀で行われることができる。固有容量C10、およびプラズマを表す要素（R2、R3、C1、およびC2）がリアルタイム測定のためにアクセス可能ではないため、サンプリング1804は、典型的には、図2の固有容量C10の左側で行われる。固有容量C10は、典型的には、処理中に測定されないが、典型的には、既知の定数であり、したがって、製造中に設定されることがある。同時に、場合によっては、固有容量C10は経時的に変動し得る。

30

【0068】

いくつかの実施形態では、修正された周期的電圧関数の2つだけのサンプルが必要とされるが、他の実施形態では、何百、何千、または何万個ものサンプルを修正された周期的電圧関数の各サイクルについて得ることができる。例えば、サンプリングレートは、400kHzより大きくあり得る。これらのサンプリングレートは、修正された周期的電圧関数およびその形状のより正確かつ詳細な監視を可能にする。同様に、周期的電圧関数のより詳細な監視は、サイクル間、異なるプロセス条件間、異なるプロセス間、異なるチャンバ間、異なるソース間等での波形のより正確な比較を可能にする。例えば、これらのサンプリングレートで、図8で図示される周期的電圧関数の第1、第2、第3、および第4の部分802、804、806、808を区別することができ、これは、従来のサンプリングレートでは可能ではない場合がある。いくつかの実施形態では、より高いサンプリングレートが、従来技術では可能ではない、電圧ステップVおよび傾きdV₀/dtの解決を可能にする。いくつかの実施形態では、修正された周期的電圧関数の一部分をサンプリングすることができる一方で、他の部分はサンプリングされない。

40

【0069】

50

傾き dV_o / dt の計算 1806 は、時間 t (例えば、第 4 の部分 808) の間に得られる複数の V_o 測定値に基づき得る。例えば、線を V_o 値に適合させるように、線形適合を行うことができ、線の傾きは、傾き dV_o / dt を生じる。別の事例では、図 8 の時間 t (例えば、第 4 の部分 808) の始めおよび終わりの V_o 値が解明されることができ、 dV_o / dt として求められる線の傾きを用いてこれらの 2 つの点の間で線が適合させられることができ。これらは、パルス間の部分の傾き dV_o / dt を計算することができる、多数の方法のうちの 2 つにすぎない。

【0070】

決定 1810 は、IEDF を狭小幅 (例えば、最小幅、または代替案では 6 % 半値全幅) に調節するために使用される、反復ループの一部であり得る。方程式 4 は、イオン電流補償 I_c がイオン電流 I_I に等しい (または代替案では方程式 3 に従って I_I に関係付けられる) 場合のみ当てはまり、これは、一定の基板電圧、したがって、一定かつ実質的に単数のイオンエネルギー (狭小 IEDF 幅) がある場合のみ起こる。一定の基板電圧 2308 (V_{sub}) を図 23 で見ることができる。したがって、イオン電流 I_I または代替としてイオン電流補償 I_c のいずれか一方を方程式 3 で使用することができる。

10

【0071】

代替として、第 4 の部分 808 (パルス間の部分とも称される) に沿った 2 つの値を、第 1 のサイクルおよび第 2 のサイクルについてサンプリングすることができ、それぞれ、第 1 および第 2 の傾きを各サイクルについて決定することができる。これら 2 つの傾きから、第 3 のまだ測定されていない傾きに対して方程式 4 を真にすることを期待されるイオン電流補償 I_c を決定することができる。したがって、狭小 IEDF 幅に対応することができる予測されるイオン電流 I_I を推定することができる。これらは、狭小 IEDF 幅を決定することができる多くの方法のうちの 2 つにすぎず、対応するイオン電流補償 I_c および / または対応するイオン電流 I_I を見出すことができる。

20

【0072】

イオン電流補償 I_c への調節 1812 は、イオン電流補償 I_c の増加または減少のいずれか一方を伴うことができ、各調節のためのステップサイズには制限がない。いくつかの実施形態では、イオン電流補償を増加または減少させるかどうかを決定するために、方程式 4 における関数 f の符号を使用することができる。符号が負である場合、イオン電流補償 I_c を減少させることができ一方で、正符号は、イオン電流補償 I_c を増加させる必要性を示すことができる。

30

【0073】

イオン電流 I_I に等しい (または代替案では方程式 3 に従ってそれに関係付けられる) イオン電流補償 I_c が識別されると、方法 1800 は、さらなる設定点動作 (図 19 参照) または遠隔チャンバおよびソース監視動作へ前進することができる。さらなる設定点動作は、イオンエネルギー (図 23 も参照) およびイオンエネルギーの分布または IEDF 幅 (図 24 も参照) を設定することを含むことができる。ソースおよびチャンバ監視は、プラズマ密度、ソース供給部異常、プラズマアーク放電、およびその他を監視することを含むことができる。

40

【0074】

さらに、方法 1800 は、随意に、連続的に (または代替案として周期的に) イオン電流補償 I_c を更新するためにサンプリング 1804 に戻ることができる。例えば、サンプリング 1804、計算 1806、決定 1810、および調節 1812 は、方程式 3 が満たされ続けることを確実にするために、電流イオン電流補償 I_c を考慮して周期的に行うことができる。同時に、方程式 3 を満たすイオン電流補償 I_c が更新される場合、イオン電流 I_I も更新されることができ、更新された値は、記憶されることができる 1814。

【0075】

方法 1800 は、イオン電流 I_I に等しいように、または代替案では方程式 3 を満たすように、イオン電流補償 I_c を見出して設定することができるが、狭小 IEDF 幅を達成するために必要とされるイオン電流補償 I_c の値は、イオン電流 I_c をその値に設定する

50

ことなく（または代替案ではその前に）決定されることがある。例えば、第1のサイクルについて第1のイオン電流補償 I_{c1} を適用し、パルス間の電圧の第1の傾き dV_{01} / dt を測定し、かつ、第2のサイクルについて第2のイオン電流補償 I_{c2} を適用し、パルス間の電圧の第2の傾き dV_{02} / dt を測定することによって、方程式4が真であることが期待される、第3のイオン電流補償 I_{c3} に関連付けられる第3の傾き dV_{03} / dt が決定されることがある。第3のイオン電流補償 I_{c3} は、適用された場合に狭小IEDF幅をもたらすであろうものであり得る。したがって、イオン電流補償の単一の調節のみを用いて、方程式4を満たし、したがって、イオン電流 I_I に対応するイオン電流補償 I_c を決定することができる。次いで、方法1800は、イオン電流 I_c を、狭小IEDF幅を達成するために必要とされる値に設定することさえなく、図19で説明される方法へ移動することができる。そのような実施形態は、調節速度を増加させるために実行され得る。10

【0076】

代替として、第1の傾き dV_{01} / dt および対応する第1のイオン電流補償 I_{c1} 、第2の傾き dV_{02} / dt および対応する第2のイオン電流補償 I_{c2} 、ならびに有効容量 C_1 が与えられると、イオン電流 I_I に等しくイオン補償電流 I_c を調節すること、または方程式3を満たすようにそれを調節することなく、以下の方程式を使用して、イオン電流 I_I を推定することができる。

【0077】

【数5】

$$I_I = \frac{C_1 \cdot (I_{c1} \cdot \frac{dV_{02}}{dt} - I_{c2} \cdot \frac{dV_{01}}{dt})}{I_{c1} - I_{c2} + C_1 \cdot (\frac{dV_{02}}{dt} - \frac{dV_{01}}{dt})} \quad (\text{方程式5})$$

【0078】

図19は、IEDF幅およびイオンエネルギーを設定する方法を図示する。本方法は、図18で図示される方法1800が起源であり、それぞれ、IEDF幅およびイオンエネルギーの設定を伴う、左の経路1900（IEDF分岐とも称される）または右の経路1901（イオンエネルギー分岐とも称される）のいずれか一方をとることができる。イオンエネルギー eV は、電圧ステップ V または図8の修正された周期的電圧関数800の第3の部分806に比例する。イオンエネルギー eV と電圧ステップ V との間の関係は、方程式6として表されることができる。30

【0079】

【数6】

$$eV = \Delta V \frac{C_1}{C_2 + C_1} \quad (\text{方程式6})$$

【0080】

式中、 C_1 は、有効容量（例えば、チャック容量、図2の固有容量 $C10$ 、または図13の固有容量 $C1$ ）であり、 C_2 は、シース容量（例えば、図2のシース容量 $C2$ 、または図13のシース容量 $C2$ ）である。シース容量 C_2 は、浮遊容量を含み得、イオン電流 I_I に依存する。電圧ステップ V は、修正された周期的電圧関数800の第2の部分804と第4の部分808との間の電圧の変化として測定されることがある。電圧ステップ V （電力供給部電圧または図2のバス電圧 V_{bus} 等のバス電圧の関数である）を制御および監視することによって、イオンエネルギー eV を制御し、把握することができる。40

【0081】

本開示の全体を通して、イオンエネルギー eV は、単一の値であるかのように称される。しかしながら、イオンエネルギー eV の意味は、IEDF幅に応じて、わずかに異なる意味を有する。IEDF幅が最小限化される場合、イオンエネルギー eV は、IEDFの50

平均イオンエネルギーである。IEDF 幅が最小限化されないとき、イオンエネルギー eV は、 $I_I < I_c$ であるか、 $I_I > I_c$ であるかに応じて、IEDF の最小値または最大値のいずれか一方を指し示す。 $I_I < I_c$ である場合、イオンエネルギー eV は、IEDF の最小イオンエネルギー eV に対応する。 $I_I > I_c$ である場合、イオンエネルギー eV は、IEDF の最大イオンエネルギー eV に対応する。IEDF 幅が小さい場合、この専門的側面はあまり重要ではなく、したがって、イオンエネルギー eV は、IEDF の平均イオンエネルギーを表すかのように扱われるであろう。しかし、厳密性のために、上記の説明を念頭に置くべきである。

【0082】

同時に、IEDF 幅を方程式 7 に従って概算することができる。

10

【0083】

【数 7】

$$IEDF \text{ 幅} = V_{PP} - \Delta V - \frac{It}{C} \quad (\text{方程式7})$$

【0084】

式中、I は、C が C_{series} である場合 I_I であり、C が $C_{effective}$ である場合 I_c である。時間 t は、パルス間の時間であり、 V_{PP} は、ピーク間電圧であり、V は、電圧ステップである。

【0085】

20

加えて、シース容量 C_2 は、種々の計算および監視動作で使用されることができる。例えば、デバイシース距離 s_{sheath} を以下のように推定することができる。

【0086】

【数 8】

$$\lambda_{sheath} = \frac{\epsilon A}{C_2} \quad (\text{方程式8})$$

【0087】

式中、 ϵ は、真空誘電率であり、A は、基板の面積（または代替案では基板支持部の表面積）である。いくつかの高電圧用途では、方程式 8 は、方程式 9 として表される。

30

【0088】

【数 9】

$$\lambda_{sheath} = \sqrt{\frac{T_e \epsilon_0}{n_{eq}}} \cdot \left(\frac{V}{2} T_e\right)^{.75} \quad (\text{方程式9})$$

【0089】

加えて、シース内の電場を、シース容量 C_2 、シース距離 s_{sheath} 、およびイオンエネルギー eV の関数として推定することができる。シース容量 C_2 は、イオン電流 I_I とともに、方程式 10（単独にイオン化されたプラズマに対して飽和電流 I_{sat} が補償電流 I_c に直線的に関係付けられる）から、プラズマ密度 n_e を決定するために使用されることもできる。

40

【0090】

【数 10】

$$I_{sat} = \sum n_i q_i \sqrt{\frac{kT_e}{m_i}} A \approx n_e q \sqrt{\frac{kT_e}{\langle m \rangle}} A \quad (\text{方程式10})$$

【0091】

シース容量 C_2 および飽和電流 I_{sat} を使用して、基板表面におけるイオンの有効質量を計算することができる。プラズマ密度 n_e 、シース内の電場、イオンエネルギー eV、イオンの有効質量、および基板の DC 電位 V_{DC} は、典型的には、当技術分野で間接的

50

手段を介してのみ監視される、基本的プラズマパラメータである。本開示は、これらのパラメータの直接測定を可能にし、したがって、リアルタイムでプラズマ特性のより正確な監視を可能にする。

【0092】

方程式6で見られるように、シース容量 C_2 はまた、図19のイオンエネルギー分岐1901で図示されるように、イオンエネルギー eV を監視して制御するために使用することもできる。イオンエネルギー分岐1901は、イオンエネルギーのユーザ選択を受信することによって開始する1902。次いで、イオンエネルギー分岐1901は、周期的電圧関数を供給するスイッチモード電力供給部のための初期電力供給部電圧を設定することができる1904。周期的電圧サンプリング動作1908前のある時点で、イオン電流がアクセスされる（例えば、メモリからアクセスされる）こともできる1906。周期的電圧がサンプリングされることができ1908、修正された周期的電圧関数の第3の部分の測定値を測定することができる1910。イオンエネルギー I_I は、修正された周期的電圧関数の電圧ステップ V （第3の部分（例えば、第3の部分806）とも称される）から計算されることができる1912。次いで、イオンエネルギー分岐1901は、イオンエネルギーが定義されたイオンエネルギーに等しいかどうかを決定することができ1914、もしそうであれば、イオンエネルギーは所望の設定点にあり、イオンエネルギー分岐1901は終了することができる。イオンエネルギーが定義されたイオンエネルギーに等しくない場合、イオンエネルギー分岐1901は、電力供給部電圧を調節し1916、再度、周期的電圧をサンプリングすることができる1908。次いで、イオンエネルギー分岐1901は、イオンエネルギーが定義されたイオンエネルギーに等しくなるまで、サンプリング1908、測定1910、計算1912、決定1914、および設定1916を循環することができる。10

【0093】

I_{EDF} 幅を監視して制御する方法が、図19の I_{EDF} 分岐1900で図示されている。 I_{EDF} 分岐1900は、 I_{EDF} 幅のユーザ選択を受信し1950、電流 I_{EDF} 幅をサンプリングすること1952を含む。次いで、決定1954は、定義された I_{EDF} 幅が電流 I_{EDF} 幅に等しいかどうかを決定し、決定1952が満たされる場合、 I_{EDF} 幅は所望される（または定義される）通りであり、 I_{EDF} 分岐1900は終了することができる。しかしながら、電流 I_{EDF} 幅が定義された I_{EDF} 幅に等しくない場合、イオン電流補償 I_c を調節することができる1956。この決定1954および調節1956は、電流 I_{EDF} 幅が定義された I_{EDF} 幅に等しくなるまで、循環様式で継続されることができる。20

【0094】

いくつかの実施形態では、 I_{EDF} 分岐1900はまた、所望の I_{EDF} 形状を確保するように実装されることもできる。種々の I_{EDF} 形状が生成されることができ、各々は、異なるイオンエネルギーおよび I_{EDF} 幅に関連付けられることができる。例えば、第1の I_{EDF} 形状が、デルタ関数であり得る一方で、第2の I_{EDF} 形状は、二乗関数であり得る。他の I_{EDF} 形状は、カップ状であり得る。種々の I_{EDF} 形状の実施例を図11で見ることができる。30

【0095】

イオン電流 I_I および電圧ステップ V の知識を用いて、方程式6をイオンエネルギー eV について解くことができる。電圧ステップ V は、電力供給部電圧を変化させることによって制御されることができ、そして、電力供給部電圧を変化させることは、電圧ステップ V を変化させる。より大きい電力供給部電圧は、電圧ステップ V の増加を引き起こし、電力供給部電圧の減少は、電圧ステップ V の減少を引き起こす。言い換えると、電力供給部電圧を増加させることにより、より大きいイオンエネルギー eV をもたらす。40

【0096】

さらに、上記システムおよび方法が連続的に変化するフィードバックループ上で動作するので、プラズマ源またはチャンバ条件に対する変動または意図的な調節による、プラズ50

マの変化にもかかわらず、所望の（または定義された）イオンエネルギーおよび IEDF 幅を維持することができる。

【0097】

図 17 - 19 は、単一のイオンエネルギーに関して説明されているが、当業者であれば、所望の（または定義された）IEDF 幅（または IEDF 形状）およびイオンエネルギーを生成して監視するこれらの方法はさらに、各々が各自の IEDF 幅（または IEDF 形状）を有する 2 つ以上のイオンエネルギーを產生して監視するために利用できることを認識するであろう。例えば、第 1、第 3、および第 5 のサイクルで第 1 の電力供給部電圧 V_{PS} 、第 2、第 4、および第 6 のサイクルで第 2 の電力供給部電圧を提供することによって、基板の表面に到達するイオンについて、2 つの異なる狭小イオンエネルギーを達成することができる（例えば、図 20 の上の 2 つの図）。3 つの異なる電力供給部電圧を使用することは、3 つの異なるイオンエネルギーをもたらす（例えば、図 20 の中間の 2 つの図）。複数の電力供給部電圧の各々が印加される時間または各電力供給部電圧レベルが印加されるサイクルの数を変化させることによって、異なるイオンエネルギーのイオンフラックスが制御されることがある（例えば、図 20 の下の 2 つの図）。

【0098】

上記の議論は、プラズマ処理中に基板の表面に到達するイオンのイオンエネルギーならびに IEDF 幅および / または IEDF 形状を制御するために、電力供給部によって提供される周期的電圧関数を、イオン電流補償構成要素によって提供されるイオン電流補償と組み合わせるがどのように使用されることがあるかを示している。

【0099】

これまで記述された制御のうちのいくつかは、（1）固定波形（波形の連続サイクルが同一である）、（2）イオンエネルギーおよび IEDF に比例する少なくとも 2 つの部分（例えば、図 8 で図示される第 3 および第 4 の部分 806 および 808）を有する波形、および（3）波形の異なる特徴の正確な監視を可能にする高いサンプリングレート（例えば、125 MHz）のいくつかの組み合わせを使用することによって、可能にされる。例えば、線形增幅器等の従来技術が、修正された周期的電圧関数に類似する波形を基板に送信する場合、サイクル間の望ましくない変動が、イオンエネルギーまたは IEDF 幅（または IEDF 形状）を特徴付けるために、これらの従来技術の波形を使用することを困難にする。

【0100】

線形增幅器が基板支持部にバイアスをかけるために使用されている場合、波形がサイクル毎に一貫しておらず、したがって、波形の特徴（例えば、パルス間の部分の傾き）が典型的には有用な情報を提供しないであろうため、高い割合でサンプリングする必要性が認められていない。本開示および関連開示で見られるような、そのような有用な情報は、固定波形が使用されるとき、生じない。

【0101】

本明細書で開示された固定波形および高いサンプリングレートはさらに、より正確な統計観察を可能にさせる。この増加した精度により、修正された周期的電圧関数の種々の特性を監視することを介して、プラズマ源およびチャンバ内のプラズマの動作および処理特性を監視することができる。例えば、修正された周期的電圧関数の測定は、シース容量およびイオン電流の遠隔監視を可能にし、チャンバプロセスまたは他のチャンバ詳細の知識を伴わずに監視することができる。いくつかの実施例が、続き、ソースおよびチャンバの非侵襲的監視および故障検出のために、これまで記述されたシステムおよび方法を使用することができる、多数の方法のうちのいくつかのみを例証する。

【0102】

監視の実施例として、図 8 を参照すると、波形 800 の DC オフセットは、プラズマ源（以降では「ソース」と称される）の健全性を表すことができる。別の実施例では、修正された周期的電圧関数のパルスの最上部分 804（第 2 の部分）の傾きは、ソース内の減衰効果に関連させられることがある。（0 に等しい傾きを有するものとして図示される

) 水平からの最上部分 804 の傾きの標準偏差は、波形 800 のある側面に基づいてソースの健全性を監視する別の方針である。別の側面は、修正された周期的電圧関数の第 4 の部分 808 に沿ってサンプリングされた V_0 点の標準偏差を測定し、標準偏差をチャンバ共鳴に関連させることを伴う。例えば、この標準偏差が連続パルスの間で監視され、標準偏差が経時的に増加する場合、これは、チャンバ内、例えば、静電チャック内に共鳴があることを示し得る。共鳴は、チャンバへの、またはチャンバ内の不良な電気接続の兆候、あるいは付加的な不要インダクタンスまたは容量の兆候であり得る。

【0103】

当業者であれば、図 17、18、19 で図示される方法が、いかなる特定の、または説明された動作順も必要とせず、または図によって図示される、あるいは図中で示唆されるいかなる順番にも限定されないことを認識するであろう。例えば、測定基準は、IEDF 幅および / またはイオンエネルギー eV を設定し、監視する前、間、または後に監視することができる。

【0104】

図 21 は、本明細書で開示されるシステムにおける異なる点での種々の波形を図示する。スイッチモード電力供給部の切り替え構成要素のための図示した切り替えパターン 2110、電力供給部電圧 V_{PS} 2106 (本明細書では周期的電圧関数とも称される)、イオン電流補償 I_c 2104、修正された周期的電圧関数 2102、および基板電圧 V_{sub} 2112 を考慮すると、IEDF は、図示した幅 2114 (一定の縮尺で描かれない場合がある) または IEDF 形状 2114 を有する。この幅は、本開示が「狭小幅」と称しているものより広い。示されるように、イオン電流補償 I_c 2104 がイオン電流 I_I より大きいとき、基板電圧 V_{sub} 2112 は一定ではない。IEDF 幅 2114 は、基板電圧 V_{sub} 2112 のパルス間の傾き部分の電圧差に比例する。

【0105】

この狭小 IEDF 幅 2114 を考慮すると、本明細書で開示される方法は、 $I_c = I_I$ となる (または代替案では方程式 3 に従って関係付けられる) まで、イオン電流補償 I_c が調節されることを要求する。図 22 は、イオン電流 I_I に一致させるために、イオン電流補償 I_c の最終増加的变化を生じることの効果を図示する。 $I_c = I_I$ であるとき、基板電圧 V_{sub} 2212 は、実質的に一定になり、IEDF 幅 2214 は、非狭小から狭小になる。

【0106】

狭小 IEDF が達成されると、図 23 で図示されるように、イオンエネルギーを所望の値または定義された値に調節することができる。ここで、電力供給部電圧 (または代替案ではスイッチモード電力供給部のバス電圧 V_{bus}) の規模が減少させられる (例えば、電力供給部電圧 2306 のパルスの最大負振幅が低減させられる)。結果として、 V_1 は、ピーク間電圧が V_{PP1} から V_{PP2} まで減少するように、 V_2 まで減少する。その結果として、実質的に一定の基板電圧 V_{sub} 2308 の規模が減少し、したがって、狭小 IEDF 幅を維持しながら、イオンエネルギーの規模を 2315 から 2314 へ減少させる。

【0107】

イオンエネルギーが調節されようとされまいと、図 24 に示されるように狭小 IEDF 幅が達成された後に、IEDF 幅を広げることができる。ここで、 $I_I = I_c$ (または代替案では、 I_I と I_c との間の関係を与える方程式 3) を考慮して、 I_c が調節できることができ、したがって、修正された周期的電圧関数 2402 のパルス間の部分の傾きを変化させる。イオン電流補償 I_c およびイオン電流 I_I が等しくないことの結果として、基板電圧は、実質的に一定から非一定に移動する。さらなる結果は、IEDF 幅 2414 が狭小 IEDF 2414 から非狭小 IEDF 2402 まで拡張することである。 I_c が I_I から離れて調節されるほど、IEDF 2414 幅が大きくなる。

【0108】

図 25 は、各イオンエネルギーレベルが狭小 IEDF 2514 幅を有する、1つより多

10

20

30

40

50

くのイオンエネルギーレベルを達成するために使用されることがある電力供給部電圧の1つのパターンを図示する。電力供給部電圧2506の規模が、各サイクルで交互する。これは、修正された周期的電圧関数2502の各サイクルに対して交互するVおよびピーク間電圧をもたらす。基板電圧2512は、順に、基板電圧のパルスの間で交互する、2つの実質的に一定の電圧を有する。これは、各々が狭小IEDF2514幅を有する、2つの異なるイオンエネルギーをもたらす。

【0109】

図26は、各イオンエネルギーレベルが狭小IEDF2614幅を有する、1つより多くのイオンエネルギーレベルを達成するために使用されることがある電力供給部電圧の別のパターンを図示する。ここで、電力供給部電圧2606は、2つの異なる規模の間で交互するが、交互する前に1度に2つのサイクルに対してそのようにする。示されるように、平均イオンエネルギーは、 $V_{PS}2606$ がサイクル毎に交互させられた場合と同一である。これは、同一のイオンエネルギーを達成するために、 $V_{PS}2606$ の種々の他のパターンをどのようにして使用することができるかという一例のみを示す。

10

【0110】

図27は、定義されたIEDF2714を生成するために使用されることがある電力供給部電圧 $V_{PS}2706$ およびイオン電流補償 I_c2704 の1つの組み合わせを図示する。ここで、交流電力供給部電圧2706が、2つの異なるイオンエネルギーをもたらす。加えて、イオン電流 I_I から離してイオン電流補償2704を調節することによって、各イオンエネルギーのIEDF2714幅を拡張することができる。イオンエネルギーが、図示した実施形態のように十分に近い場合、両方のイオンエネルギーのIEDF2714が重複し、1つの大きいIEDF2714をもたらすであろう。他の実施例も可能であるが、本実施例は、定義されたイオンエネルギーおよび定義されたIEDF2714を達成するために、 $V_{PS}2706$ および I_c2704 への調節の組み合わせをどのようにして使用することができるかを示すように意図されている。

20

【0111】

(不正確なイオンエネルギーの原因としての回路記憶)

図2および8を参照すると、修正された周期的電圧関数800は、スイッチモード電力供給部206の出力において生成されると見なされることがある。修正された周期的電圧関数800は、第1のスイッチ構成要素226'が閉鎖して、基板支持部208を含む直列容量 C_{series} を充電すると、電圧 V_0 の上昇から始まる。 C_{series} が充電されるとき、第1のスイッチ構成要素226'が開放されている。第1および第2のスイッチ構成要素226'および226''は、両方とも短期間($t_c - t$)に対して開放し、 C_{series} にわたる電圧を一定のままにさせることができる。次いで、第2のスイッチ構成要素226''が閉鎖され、 V_0 に電圧Vを降下させ、その時点の後に、イオンエネルギー制御部220からのイオン電流補償が基板支持部208に提供されると、修正された周期的電圧関数800が傾き dV_0/dt とともに下向きに傾き始める。電圧ステップVは、プラズマ処理チャンバ204内の基板表面に衝打するイオンのイオンエネルギーに関連している。修正された周期的電圧関数800は、障害を伴わずに図示および説明されている。

30

【0112】

しかしながら、実践では、障害は、V、したがって、イオンエネルギーに影響を及ぼし得る。例えば、狭小イオンエネルギー分布関数IEDFが所望される場合、Vは、サイクルごとに一定であるべきである。障害がいくつかのサイクルでVを異ならせる場合、IEDFは、スマまたはジッタを有するであろう。

40

【0113】

この問題は、図12および13で図示されている。図12は、次のサイクルのVに影響を及ぼす、障害1212が第1のサイクルで見られることができる、修正された周期的電圧関数1200を図示する。図12はまた、各サイクルの開始時の電圧上昇のより正確な表現を示し、この形状は、図8で図示される垂直形状よりも正弦曲線的である。正弦形

50

状は、この電圧上昇中に起こっている、 L_1 を通した C_{series} の再充電の結果である。

【0114】

障害1212は、第1のサイクルの下向きに傾く部分の間に見られる（他の種類の障害も可能であり、そのような障害は、傾き部分の間だけでなく、サイクルの中のいずれかで起こり得る）。障害1212がないと、電圧は、線1214に沿った実質的に同一の傾きで降下し続けるであろう。しかしながら、障害1212は、同一の傾きを伴うが、より高い電圧を有する線1208に沿って、電圧を降下し続けさせる。結果として、第1のスイッチ構成要素226'が再度閉鎖され、 V_0 が上昇し始めると、前のサイクルで辿られた経路1214を辿る代わりに、 V_0 は、前のサイクルの V より低く、所望されるよりも低い V' に至る経路1208を辿る。この影響は、各サイクルが前のサイクルが終了した電圧を覚えている（例えば、第1のスイッチ構成要素226'が閉鎖するときに）ので、「記憶」と称されることができる。10

【0115】

図13は、類似の修正された周期的電圧関数1300を示すが、この場合、障害1312が下降電圧に経路1314よりもむしろ経路1308を辿らせる。結果として、 V_0 は、第1のスイッチ構成要素226'が閉鎖され、 C_{series} が充電し始めるときにより低い。その結果として、 V_0 は、第1のスイッチ構成要素226'が開放するときに、経路1314よりもむしろ経路1308を辿る。結果は、所望されるより大きく、前のサイクルの V より大きい V' である。20

【0116】

したがって、この「記憶」は、イオンエネルギーにおいて、不正確性および潜在的に不安定性を引き起こす。したがって、本分野には、この記憶を排除し、依然としてエネルギー効率的な共鳴切り替えを使用しながら、正確で安定したイオンエネルギーを達成する必要性がある。

【0117】

記憶は、部分的に、第1のスイッチ構成要素226'が閉鎖するときまでに、通常は C_{series} から完全に除去されるであろう、直列容量 C_{series} に貯蔵された過剰なエネルギーの結果である。しかしながら、障害（例えば、1312）がある場合、第1のスイッチ構成要素226'が閉鎖するときにエネルギーが C_{series} にとどまる。このエネルギーを除去する1つの方法は、エネルギーが抵抗器の中へ放散するように、 C_{series} を抵抗器に結合することである。これは、 C_{series} から記憶を除去する迅速な方法であるが、エネルギーが作業に置かれるよりもむしろ熱に変換されるにすぎないため、エネルギーを無駄にするという欠点がある。30

【0118】

エネルギーがコンデンサとインダクタとの間で行き来して渡され、したがって、抵抗器において無駄にされるよりもむしろ再利用されるため、好ましい動作形態は、共鳴として知られている（固有の抵抗におけるいくらかの放散は回避不可能であるが、少なくとも抵抗形態よりも小さい）。しかしながら、インダクタは迅速に充電されず、したがって、共鳴システム内のインダクタは、各サイクルの終了時にコンデンサから過剰な容量を除去するためには効果的ではない。40

【0119】

したがって、いわゆる記憶によって引き起こされる不正確性および不安定性を回避するために、システムのコンデンサから過剰な電荷を迅速に除去することも可能である一方で、より効率的な共鳴形態で動作する、システム、方法、および操作の必要性がある。

【0120】

図14および15は、前のサイクルでの異なる障害にもかかわらず、所望のイオンエネルギーを達成するために本明細書で開示されるシステムおよび方法が使用される、波形を図示する。図14では、障害1408は、 V を所望されるより高くさせたであろうが（図13を想起されたい）、代わりに、（第1のスイッチ構成要素が閉鎖された状態で） V 50

V_0 がサイクルの開始時に上昇すると、バイアス供給部が上昇電圧を監視し、 V_0 が所望のイオンエネルギーに対応する電圧 1408 に達するときに上昇電圧を断ち切る。言い換えると、バイアス供給部は、電圧上昇のためのデフォルト期間の前に、または C_{series} が完全に充電される前に、電圧増加を断ち切る。図 15 では、障害 1508 は、 V を所望されるより低くさせたであろうが（図 12 を想起されたい）、代わりに、 V_0 がサイクルの開始時に上昇すると、バイアス供給部が上昇電圧を監視し、 V_0 が所望のイオンエネルギー 1508 に対応するレベルに達するときに上昇電圧を断ち切る。この場合、電圧は、電圧上昇のためのデフォルト期間よりも長く上昇させられるが、依然として C_{series} が完全に充電される前に断ち切られる。

【0121】

10

図 14 では、要点は、デフォルト期間前に電圧上昇を断ち切ることである。しかしながら、図 15 では、本方法の 2 つの手掛けがあり、第 1 に、理論上、要求されるであろうよりもはるかに高く V_0 を上昇させることができるように、バス電圧 V_{bus} が設定される（例えば、レベル 1514）。言い換えると、任意の所望のイオンエネルギーを達成するために、 C_{series} が典型的には完全に充電されないように、 V_{bus} が設定される。このようにして、 V_0 は、デフォルト期間より後に断ち切られることができ、したがって、障害 1512 によりそうでなければ到達するであろう場所を上回って上昇することができる。

【0122】

20

残念ながら、電圧が最大 V_0 まで上昇させられる前に V_0 が断ち切られるとき、エネルギーは、バイアス供給部のインダクタに、および / またはバイアス供給部の固有インダクタンスに貯蔵されたままとなる。バイアス供給部が C_{series} を完全に充電することを許された場合、インダクタのエネルギーは、 C_{series} に完全に放出されたか、または C_{series} と交換されたであろう。したがって、本明細書で説明される切り替えアルゴリズムが、共鳴動作および前のサイクルから「記憶」を消去する能力を可能にし、したがって、不正確性および不安定性を除去する一方で、バイアス供給部のインダクタおよび / またはインダクタンスが決して完全には消耗されないという点で、新しい問題が生成される。この貯蔵されたエネルギーは、後続のサイクルのさらなる「記憶」問題を引き起こし、したがって、バイアス供給部のインダクタおよび / またはインダクタンスの中の残りの貯蔵されたエネルギーを迅速かつ効率的に除去するさらなる必要性がある。この問題の解決策が、図 9 で図示されるシステムを参照して説明される。

30

【0123】

図 9 は、スイッチ構成要素 T_1 および T_2 と直列容量 C_{series} との間のインダクタンス L_1 を図示する (C_{series} の使用は、浮遊容量がないことを仮定し、浮遊容量が考慮される場合、 $C_{effective}$ を使用することができ、 C_{series} は、 $C_{effective}$ の一部であり得る)。インダクタンス L_1 は、個別的なインダクタまたは個別的なインダクタと固有インダクタンスとの組み合わせを表すことができる。また、スイッチ構成要素 T_1 における固有抵抗 R_1 、ならびにスイッチ構成要素 T_2 における固有抵抗 R_2 もある。 R_1 および C_{series} の直列組み合わせは、スイッチ構成要素 T_1 が開放しており、スイッチ構成要素 T_2 が閉鎖されているときはいつでも、 C_{series} の指数関数的減衰または放電につながる RLC 回路の役割を果たす。固有インダクタンス L_1 および直列容量 C_{series} の直列組み合わせは、周期的に C_{series} と L_1 との間のエネルギーの交換につながる共鳴性質を有する、LC 回路として動作する。 R_1 が L_1 を支配するものであった場合、この RLC 回路は、抵抗的に動作し、 C_{series} から放出されるエネルギーは、 R_1 において放散される熱として無駄にされるであろう。これは、非効率的で望ましくない状況であろう。

40

【0124】

1 つの代替案は、 L_1 が R_1 を支配し、エネルギーが主に C_{series} と L_1 との間で交換され、エネルギーのわずか部分のみが R_1 へ失われる、共鳴形態で、この RLC 回路が動作することである。共鳴様式で動作することの不利な点は、インダクタ L_1 および

50

C_{series} に貯蔵されたエネルギーが、1つのサイクルでの障害が後続のサイクルの波形に影響を及ぼす、「記憶」と称されるであろうものにつながることである。この記憶により、プラズマ内の基板表面を表す、 C_{series} の右側に提供される電圧は、不正確性または不安定性を受け得る。

【0125】

例えは、図12では、図9の V_0 で測定される修正された周期的電圧関数における障害1212は、 V' が、障害がなかった場合よりも小さく、前のサイクルでの V' よりも小さいという点で、不正確性を引き起こす。これは、いくつかのイオンが V で加速され、いくつかのイオンが V' において加速され、所望するよりも広い、またはスミア付きのIEDFにつながる。図13では、障害1308は、 V' が、障害がなかった場合よりも大きく、前のサイクルでの V より大きいという点で、不正確性を引き起こす。両方の場合において、 V' が期待および所望される以外であるため、イオンエネルギーに不正確性がある。

10

【0126】

さらに、1つのサイクルでの不正確性が、後続のサイクルでさらなる不正確性を引き起こすため、単一の障害が、不安定性、すなわち、サイクルごとに V において増加する誤差を引き起こし得る。

【0127】

バイアス供給部902を効率的な共鳴形態で動作させるために、 R_1 の抵抗性効果を無視可能にする、個別的なインダクタ L_1 が使用される。 L_1 は、少なくとも個別的なインダクタのインダクタンスを表す一方で、いくつかの実施形態では、固有インダクタンスも表すこともできるが、これらは、個別的なインダクタのインダクタンスに対して小さくなるはずである。本開示の目的で、図9の L_1 は、個別的なインダクタのインダクタンス、または個別的なインダクタのインダクタンスおよび固有インダクタンスを指すことができる。いずれにしても、バイアス供給部902が共鳴的に動作するように、 L_1 が R_1 を支配する。しかし、上記で説明されるように、これは、新規の切り替えアルゴリズムとともに、各サイクルの終了時に L_1 の中の不要な貯蔵エネルギーにつながる。

20

【0128】

スイッチ構成要素 T_1 が開放するときに L_1 に貯蔵されている過剰なエネルギーに関連付けられる問題を解決するために、この貯蔵されたエネルギーを除去し、ほんのわずかなサイクル長でそうするように、エネルギー排出構成要素908を使用することができる。エネルギー排出構成要素908は、図14および15で $T_{e\backslash v\backslash a\backslash c}$ と標識されるものの間の任意の時点または任意の期間で、 L_1 からエネルギーを除去することができる。言い換えると、エネルギー排出構成要素1408は、 $T_{e\backslash v\backslash a\backslash c}$ の間の任意の時間に、起動されることができる。エネルギー排出構成要素908がインダクタ L_1 からエネルギーを除去し始める特定の時間は、コントローラ910およびコントローラ910に提供されるeV設定点によって統制される。特に、スイッチ構成要素 T_1 は、閉鎖してサイクルを開始し、 C_{series} を充電する。 V_0 は、上昇し、スイッチ構成要素 T_1 がある時点で開放されなかった場合、最大電圧（最大 V_0 ）に達するであろう。言い換えると、 C_{series} がいつまでも充電された場合、 V_0 は最大 V_0 に達し、そこで安定するであろう。 V_{bus} は、所望のイオンエネルギーに対応するレベルを超えて C_{series} が充電されるようになるように、設定されることができる。このようにして、前のサイクルに障害がある場合、スイッチ構成要素 T_1 は、閉鎖し、次いで、 C_{series} が完全に充電される前に開放することができ、したがって、障害にもかかわらず所望の V_0 を達成する。 V_0 が上昇すると、コントローラ910は、 V_0 から電圧測定値を受信し、これらをeV設定点と比較することができる。 V_0 がeV設定点に合致するとき、コントローラ910は、スイッチ構成要素 T_1 に開放するように指示することができ、したがって、 V_0 の増加を断ち切る。この時間、または $T_{e\backslash v\backslash a\backslash c}$ の間の任意の時間に、コントローラ910は、エネルギー排出構成要素908に、起動するか、または L_1 からエネルギーを除去し始めるように指示することができる。

40

50

【0129】

エネルギー排出構成要素 908 は、 L_1 から除去されるエネルギーから利益を得ることができる、バッテリ、コンデンサ、抵抗器、スイッチ、および / またはバイアス供給部 902 または任意の構成要素の他の部分への電気接続等の任意の種々の回路を含むことができる。例えば、エネルギー排出構成要素 908 は、後で使用するために L_1 から排出されるエネルギーを貯蔵する（例えば、レール電圧を補足するようにエネルギーを V_{bus} に戻して提供する）バッテリまたは容量性要素を含むことができる。

【0130】

図 10 は、エネルギー排出構成要素の特定の実施形態を伴うバイアス供給部を図示する。ここで、エネルギー排出構成要素 1008 のスイッチ 1014 は、 T_{evac} の間のある時点で閉鎖し、 L_1 の中の任意のエネルギーは、エネルギー排出構成要素 1008 の中へ排出され、抵抗器 1012 において放散される。
10

【0131】

コントローラ 910 および 1010 は、いくつかの実施形態では、アナログ比較器またはデジタル比較器に供給する A/D 変換器を含むことができる。

【0132】

(広ダイナミックレンジ)

低エネルギーにおいて、上記で議論される不正確性および不安定性は、より問題となる。これは、イオンエネルギーの広ダイナミックレンジが、典型的には、低値を有する少なくとも 1 つのイオンエネルギーを必要とするため、イオンエネルギーの広ダイナミックレンジを達成することを困難にする。したがって、上記で議論されるシステムおよび方法は、高いエネルギーで、特に、低エネルギーで、不正確性および不安定性を除去するように実装することができ、したがって、バイアス供給部がプラズマにおけるイオンエネルギーの広ダイナミックレンジを達成することを可能にする。
20

【0133】

(高速イオンエネルギー制御)

ある用途は、イオンエネルギーの「高速」変化を要求し、「高速」は、修正された周期的電圧関数のいくつかのサイクル内、またはさらにサイクルごとのイオンエネルギーの変化を含むことができる。イオンエネルギーを変化させる 1 つの方法は、 V_{bus} を調節することであるが、これは、「高速」用途のために十分に速くそのようにするためには困難である。しかしながら、バイアス供給部のインダクタに貯蔵された過剰なエネルギーを除去するために、上記で議論される切り替えアルゴリズムとエネルギー排出構成要素とを使用して、イオンエネルギーをサイクルごとに調節することができる（すなわち、第 1 のサイクルが第 1 のイオンエネルギーを產生し、次のサイクルが第 2 のイオンエネルギーを产生する）。

【0134】

本明細書で開示されるシステムおよび方法は、 V_{bus} の変化を伴わずにイオンエネルギーを調節することができる。例えば、図 12 - 15 では、種々のイオンエネルギー（異なる V ）が所与の V_{bus} のために達成されることが分かることが分かる。イオンエネルギー切り替えは、非常に「高速」であり、イオンエネルギーは、 V_0 が上昇している間、あるサイクルに対して選択されることさえできる。言い換えると、切り替え構成要素 T_1 が開放される前の任意の時間に、 V またはイオンエネルギーが決定されることがある。
40

【0135】

「高速」イオンエネルギー制御は、異なるイオンエネルギーを切り替えるときに有利であり得るが、それは、プラズマが点火されるときにも有利である。なぜなら、プラズマが点火されるときに時として見られるプラズマイオンエネルギーの過渡状態を排除しない場合、正確な eV 設定点で C_{series} を充電することを止める能力が大幅に低減するからである。

【0136】

10

20

30

40

50

(パルスイオンエネルギー制御)

多くのプラズマ処理レシピは、プラズマ源によって提供されるRF電力のパルスエンベロープを要求する。図28は、時間の関数としてのパルス源供給を図示する。示されるように、RF正弦波は、鎖線で示されるパルスエンベロープに従ってパルス状である。パルスは、例えば、フリーラジカルに対するイオンの比率が制御されることを可能にする。特に、フリーラジカルは、典型的には、イオンより長い寿命を有し、したがって、RFがオフにされるとき、イオンに対するフリーラジカルの比率は、時間とともに増加する。増加したラジカルの比率は、例えば、被加工物の表面上の種々の材料の相対エッティング速度に影響を及ぼし得、これは、いくつかのレシピで有利である。しかしながら、所望のレベルのフリーラジカルおよびイオンを維持するために、RF電力が再びオンにされ、したがって、ソース供給部のパルスが実行される。場合によっては、ソース供給部は、処理チャンバ内でより一貫したレベルのイオンおよびラジカルを維持する目的で、RF振幅と0との間よりもむしろ2つの異なるRF振幅の間でパルス状であり得る。

【0137】

パルスRF源供給部が使用されるとき、バイアス供給部は、典型的には、ある様式でソース供給パルスに同期化される(図29参照)。2層ソース供給電圧が使用される場合、バイアス供給部はまた、2つの異なるバイアス供給部電圧の間でパルス状であり得る。しかしながら、複数の供給をパルス状にする当技術分野内のシステムおよび方法は、種々の不利点を抱えている。例えば、パルスバイアス供給部は、バイアス供給部がオンにされる度にイオン密度およびイオンエネルギーにおいて過渡状態を受け得る。一実例が図30で見られることができ。バイアス供給部は、所望の電圧形態に定着する前、オンにされた直後、所望の電圧標的のオーバーシュートに加えて、遅いターンオン過渡状態を例証する。同様に、ソースパルスエンベロープ上で見られるパルス内ターンオン過渡状態は、バイアス供給部をオンにすることの影響を受ける。これらの過渡状態は、部分的に、従来のバイアス供給部とプラズマ密度とが非直交であり、バイアス供給部電圧の変化が、プラズマ密度に実質的な影響を及ぼすという事実に起因し得る。これらの過渡状態は、正確な処理レシピを設計することを困難にするだけでなく、バイアス供給部電圧を観察するとき、当技術分野内の多くの方法は、過渡形態からのデータ点を使用せず、したがって、潜在的処理時間を増加させながら、潜在的な測定および調整誤差を注入する。いくつかのレシピはまた、所与のソース供給パルス内のイオンエネルギーの急速な変化も要求し得る。従来のシステムおよび方法は、精度および安定性を伴ってイオンエネルギーを制御することが困難であり、バイアス供給部の数サイクルほどの短い期間内に少しでもそのような変化を生じることが困難である。

【0138】

本明細書で開示されるシステムおよび方法は、いくつかのこれらの問題を解決する。図29は、鎖線によって示されるパルスエンベロープ内でパルス状である、図9のバイアス供給部902等のバイアス供給部の修正された周期的電圧を図示する。バイアス供給部のパルスは、図28のソース供給部のパルスと同期化される。所望のイオンエネルギーを達成するために必要とされる正確な瞬間にスイッチ構成要素T₁を開放することを介して、本明細書で開示されたバイアス供給部によって生成される、修正された周期的電圧関数の最大電圧を正確に制御することができるため、図30で見られるもの等の過渡状態は低減され、おそらく排除されることができる。これらのシステムおよび方法はまた、イオンエネルギーにおいて不正確性および不安定性を低減するものとして以前に説明された、同一のシステムおよび方法は、パルスバイアス供給動作中に過渡状態を回避し、イオンエネルギーおよびプラズマ密度制御の間の直交性を可能にするという追加の利益を有する。

【0139】

過渡状態はまた、本明細書で開示されるシステムおよび方法が、イオンエネルギーとプラズマ密度との間でほぼ直交な関係を達成するため、回避され、したがって、バイアス供給部(例えば、902)のパルスは、プラズマ密度に無視可能な影響を及ぼす。

10

20

30

40

50

【0140】

さらに、「高速」イオンエネルギー変化（例えば、サイクルごとにイオンエネルギーを変化させる）を達成するために、本明細書で開示されたシステムおよび方法を使用することができるため、単一のソース供給またはバイアス供給パルス内で1回以上、イオンエネルギーを変更することができる。

【0141】

広ダイナミックレンジに対して議論されるシステムおよび方法はまた、バイアス供給部の単一のパルス内で複数のイオンエネルギーの広ダイナミックレンジを達成するために、パルスバイアス供給部の実施形態で使用することもできる。

【0142】

上記で議論されるようなイオンエネルギーに対する変化とともに、他の実施形態では、イオンエネルギー分布関数（I E D F）をサイクルごとに調節することができる。言い換えると、バイアス供給部の所与のパルス内で、I E D Fおよび/またはイオンエネルギーを1回以上調節することができる。

【0143】

パルスバイアス供給部の実施形態はさらに、 I_c の事前設定を設定する能力から利益を得ることができる。したがって、バイアス供給パルスの開始時に、所望のイオンエネルギーをより少ない時間で達成することができるよう、 I_c を「推測」することができる。例えば、以前に議論されたように、最小I E D Fを決定するために、いくつかの反復が要求され得、その後、所望のイオンエネルギーが設定されることができる。以前のI E D F設定に基づく I_c を用いて、そのような反復を開始することによって、最小I E D Fがより迅速に見出され得、したがって、所望のイオンエネルギーをより早く確立することができる。他の実施形態では、以前のパルスで使用された I_c は、パルスのためのイオンエネルギーを設定するために使用される時間を再度減少させるために、後続のパルスの開始時に初期条件として使用されることがある。さらに、複数のイオンエネルギーが所与のパルスにおいて設定される場合、後続のパルスにおいて種々のイオンエネルギーを設定するための初期条件として、1つまたは複数の以前のパルスで使用された I_c を使用することができる。同様に、 I_c と組み合わせて、またはその代替として、 C_2 またはそのより正確な導関数 $C_{series} / (C_2 + C_{series})$ を初期条件として使用することができる。

【0144】

パルス実施形態はまた、以前に議論されたが、ここではパルスバイアス供給状況に適用されるような、イオン電流および C_2 を介してプラズマ密度を測定する能力から利益を得ることもできる。これは、パルス動作中にプラズマ密度の測定に基づいて、バイアス供給部を制御することができる、さらなる実施形態につながる。例えば、プラズマ密度閾値に基づいて、バイアス供給パルスがトリガされるか、または振幅、デューティ係数等が調整されることがある（例えば、プラズマ密度が閾値を下回るときにバイアス供給部がオンになることができる）。別の実施例では、プラズマ密度閾値を下回る、またはそれを上回って上昇するプラズマ密度によって、イオンエネルギーまたはe V設定点に対する変更がトリガされることがある。バイアス供給パルス内のイオンエネルギーおよびI E D Fもまた、プラズマ密度の関数として制御されることがある。

【0145】

他の実施形態では、ソース供給部は、プラズマ密度の関数として制御されることがある。例えば、プラズマ密度閾値を横断するプラズマ密度に基づいて、あるいは所望のレベルの近くにプラズマ密度を維持する目的で、ソース供給部のパルスがトリガされることがあるか、またはパルスエンベロープの振幅、デューティ係数等が調整されることがある。

【0146】

（仮想フロントパネル）

図31-52は、以前に開示されたようなバイアス供給部に関連付けられる、種々の「

10

20

30

40

50

仮想フロントパネル」(VFP)表示を図示する。VFPは、種々の制御(例えば、ボタン、スライダ、ラジオボタン)、インジケータ(例えば、カラーインジケータ、バーインジケータ、数値インジケータ)、およびグラフまたはチャート(例えば、電圧対時間)を有することができる。VFPは、バイアス供給部および/またはソース供給部を制御するための制御ならびに監視チャートおよびインジケータを含むことができる。例えば、VFPは、eV設定点ならびにIEDF形状および幅の制御と、達成されたイオンエネルギーならびにIEDF形状および幅の監視とを可能にすることができる。VFPはまた、イオン電流 I_I 、ならびにバイアス供給部および/またはプラズマ処理チャンバの較正を監視するために使用されることもできる。これらは、VFPを使用することができる、多くの実施形態のうちのいくつかにすぎない。

10

【0147】

VFPは、単一のディスプレイ(例えば、バイアス供給部に組み込まれるか、またはバイアス供給部に結合される、LCDフラットパネルディスプレイ)または複数のディスプレイで具現化することができる。VFPは、タッチセンサ式制御を含むことができる。

【0148】

図31は、修正された周期的電圧関数を図表にする、VFPを図示する。VFPはさらに、バイアス供給部出力をオンおよびオフに切り替える電力出力制御を含む。いくつかの警告インジケータが、VFPの左側に配列される。また、イオンエネルギー(eV)、イオン電流補償 I_c (Compensation)、およびピーク間電圧(V_{pp})を示すためのバーおよび数値インジケータもある。

20

【0149】

図33は、バイアス供給部の2つの制御、すなわち、イオンエネルギー設定点(eV設定点)のための1つの制御およびイオン電流補償(電流オフセット)のためのもう1つの制御を示す、VFPを図示する。VFPはまた、測定されたイオンエネルギー(eV)のためのバーおよび数値インジケータも有する。

【0150】

図35は、3つのイオンエネルギーのチャートを有する、VFPを図示する。チャートは、読み出しまだ入力画面のいずれか一方であり得る。例えば、チャートは、達成されたイオンエネルギーおよび3つのイオンエネルギーの各々におけるイオンの濃度を示すために使用されることができ、またはチャートは、本システムが試行して達成するものである、イオンエネルギーおよび濃度を示すために使用されることができる。

30

【0151】

図36は、台形状を有するイオンエネルギー分布関数のチャートを有する、VFPを図示する。IEDFは、500eV直下から、イオンの濃度がイオンエネルギーとともに増加する1000eV直上まで伸張する。VFPはまた、IEDFの下限および上限ならびに両限界におけるイオンの濃度を制御するための制御も左に含む。

【0152】

図37は、イオンエネルギー V_1 の周囲のイオンエネルギーの広がり(Spread₁)を制御するためのVFPを図示する。図示した実施形態では、各エネルギーにおけるイオンの濃度は、 V_1 から離れるエネルギーについて、0に向かって降下する。

40

【0153】

図38は、2つの狭小IEDF、および定義された広がりを有する1つのIEDFを制御するためのVFPを図示する。示されるように、2つの狭小IEDFは、 h_1 および h_2 に存在し、 v_1 および v_2 に等しいイオン濃度を有することができる。IEDF2パラメータは、広大IEDF(V_1)およびIEDF広がり(Spread₁)の中心イオンエネルギーを制御する。

【0154】

図39は、いずれか2つの隣接イオンエネルギーの間の広がりが、2つの隣接イオンエネルギーを直線的に接続する濃度を有する特定の濃度を各々が有する、4つのイオンエネルギーを含むIEDFを制御するためのVFPを図示する。

50

【 0 1 5 5 】

図 4 0 は、時間または位置の関数としてイオンエネルギー $I_{i o n}$ を図表にする、VFPを図示する。

【 0 1 5 6 】

図 4 3 は、時間または位置の関数としてプラズマ密度 n_e を図表にする、VFPを図示する。

【 0 1 5 7 】

図 4 4 は、時間または位置の関数として基板電位 V_{D_C} を図表にする、VFPを図示する。

【 0 1 5 8 】

(パルスヒータ)

典型的なチャックでは、処理チャンバが収納される構内のAC分布システムから電力供給され得る電気加熱システムがある。RF電力は、潜在的にAC分布システムに伝搬可能であることが知られている。この望ましくない電流経路を防止するために、60Hzまたは50Hz分布電力を通すが、RF周波数（例えば、13.56MHzまたは60MHz）に対してトラップの役割を果たすように、RFフィルタが加熱システムの中に配置され得る。しかし、場合によっては、フィルタが相当量の電流を扱わなければならないため、フィルタ（または2つのフィルタ）のための十分な物理的空間がなく、バイアス基板供給部が利用されるとき、印加される数周波数（例えば、0.4MHz～5MHz）が存在するため、フィルタは設計することが困難である。

10

20

【 0 1 5 9 】

結果として、典型的なフィルタを利用する代わりに、低巻線間容量を有する変圧器の一次側に印加されるヒータ電力供給部を用いて、パルスが生成され得る。電力は、変圧器の二次側に渡され、次いで、整流され、ヒータに印加される。変圧器の低容量障壁は、広範囲の周波数が変圧器の二次側から一次側に戻ることを可能にせず、したがって、不要な周波数が構内のAC分布システムに伝搬することを防止する。

【 0 1 6 0 】

本明細書で説明されるシステムおよび方法は、本明細書で以前に説明された特定の物理的デバイスに加えて、制御および処理構成要素に関連して実装することができる。図53は、その内側で一式の命令が、デバイスに本開示の側面および／または方法論のうちのいずれか1つ以上を実施あるいは実行させるために実行することができる、制御システム5300の一実施形態の概略図を示す。例えば、制御システム5300は、制御構成要素112、612、762、910、1010を実現するために利用され得る。しかし、図53の構成要素は、実施例にすぎず、任意のハードウェア、ソフトウェア、ファームウェア、埋込論理構成要素、または本開示の特定の実施形態を実装する2つ以上のそのような構成要素の組み合わせの使用あるいは機能性の範囲を限定しない。図示した構成要素のうちのいくつかはまたは全ては、制御システム5300の一部であり得る。例えば、制御システム5300は、2つだけの非限定的実施例を挙げると、汎用コンピュータまたは埋込論理デバイス（例えば、FPGA）を含むことができる。

30

【 0 1 6 1 】

本実施形態における制御システム5300は、少なくとも、2つの非限定的実施例を挙げると、中央処理ユニット（CPU）またはFPGA等のプロセッサ5301を含む。制御システム5300はまた、両方ともバス5340を介して互におよび他の構成要素と通信する、メモリ5303および記憶装置5308を備え得る。バス5340はまた、ディスプレイ5332、1つ以上の入力デバイス5333（例えば、キーパッド、キーボード、マウス、スタイルス等を含み得る）、1つ以上の出力デバイス5334、1つ以上の記憶デバイス5335、および種々の非一過性の有形プロセッサ読み取り可能な記憶媒体5336を、互と、ならびにプロセッサ5301、メモリ5303、および記憶装置5308のうちの1つ以上とをリンクし得る。これらの要素はすべて、直接、あるいはバス5340への1つ以上のインターフェースまたはアダプタを介して、インターフェースをとり

40

50

得る。例えば、種々の非一過性の有形プロセッサ読み取り可能な記憶媒体 5336 は、記憶媒体インターフェース 5326 を介して、バス 5340 とインターフェースをとることができる。制御システム 5300 は、1 つ以上の集積回路 (I C)、印刷回路基板 (P C B)、モバイルハンドヘルドデバイス、ラップトップまたはノートブックコンピュータ、分散型コンピュータシステム、コンピューティンググリッド、あるいはサーバを含むが、それらに限定されない、任意の好適な物理的形態を有し得る。

【0162】

プロセッサ 5301 (または、中央処理ユニット (C P U)) は、随意に、命令、データ、またはプロセッサアドレスの一時的ローカル記憶のためのキャッシュメモリユニット 5302 を含む。プロセッサ 5301 は、少なくとも 1 つの非一過性の有形プロセッサ読み取り可能な記憶媒体上に記憶された非一過性プロセッサ読み取り可能な命令の実行を支援するように構成される。制御システム 5300 は、メモリ 5303、記憶装置 5308、記憶デバイス 5335、および / または記憶媒体 5336 (例えば、読み取り専用メモリ (R O M)) 等の 1 つ以上の非一過性の有形プロセッサ読み取り可能な記憶媒体で具現化される、命令を実行するプロセッサ 5301 の結果として、機能性を提供し得る。例えば、図 17 - 19 を参照して説明される方法の 1 つ以上のステップを達成する命令が、1 つ以上の非一過性の有形プロセッサ読み取り可能な記憶媒体で具現化され得、プロセッサ 5301 が、命令を実行し得る。メモリ 5303 は、1 つ以上の他の非一過性の有形プロセッサ読み取り可能な記憶媒体 (大容量記憶デバイス 5335、5336 等) から、またはネットワークインターフェース 5320 等の好適なインターフェースを通して、1 つ以上の他のソースから、命令を読み取り得る。そのようなプロセスまたはステップの実行は、メモリ 5303 内に記憶されるデータ構造を定義し、ソフトウェアによって指示されるように、データ構造を修正するステップを含み得る。

10

20

【0163】

信号入力構成要素 5350 は、概して、スイッチモード電力供給部 106、スイッチモード電力供給部 606、イオン電流補償 660、プラズマ処理チャンバ 604、および電流源 764 の 1 つ以上の側面についての情報を提供する信号 (例えば、デジタルおよび / またはアナログ信号) を受信するように動作する。いくつかの実装では、コントローラ 112 および 612 は、パルスまたは電力供給部電圧のデューティサイクルを調節するようスイッチモード電力供給部 106 および 506 に通知するように、出力信号 (例えば、バイナリビット) を提供し得る。他の実装では、制御システム 5300 は、部分的に、イオン電流補償 660、電流制御 762、コントローラ 910、コントローラ 1010 を実現するために利用され得る。

30

【0164】

信号出力構成要素 5360 は、スイッチ制御信号を生成してスイッチ T₁ および T₂ を制御するように、当業者に公知であるデジタル・アナログ構成要素を含み得る。スイッチ T₁ および T₂ が、例えば、電界効果トランジスタ (F E T) として実装されるとき、信号出力構成要素 5360 は、スイッチ T₁ および T₂ を制御するようにゲート駆動信号を生成し得る。

40

【0165】

メモリ 5303 は、限定されないが、ランダムアクセスメモリ構成要素 (例えば、R A M 5304) (例えば、静的 R A M 「S R A M」、動的 R A M 「D R A M」等)、読み取り専用構成要素 (例えば、R O M 5305)、および任意のそれらの組み合わせを含む、種々の構成要素 (例えば、非一過性の有形プロセッサ読み取り可能な記憶媒体) を含み得る。R O M 5305 は、データおよび命令を、プロセッサ 5301 に単方向に通信するように作用し得、R A M 5304 は、データおよび命令を、プロセッサ 5301 と双方向に通信するように作用し得る。R O M 5305 および R A M 5304 は、以下に説明される任意の好適な非一過性の有形プロセッサ読み取り可能な記憶媒体を含み得る。場合によっては、R O M 5305 および R A M 5304 は、本明細書で説明される方法を実行するための非一過性の有形プロセッサ読み取り可能な記憶媒体を含む。

50

【0166】

固定記憶装置 5308 は、随意に、記憶制御ユニット 5307 を通して、プロセッサ 5301 に双方向に接続される。固定記憶装置 5308 は、追加のデータ記憶容量を提供し、また、本明細書に説明される任意の好適な非一過性の有形コンピュータ読み取り可能な媒体を含み得る。記憶装置 5308 を使用して、オペレーティングシステム 5309、EXEC 5310（実行可能ファイル）、データ 5311、APPV アプリケーション 5312（アプリケーションプログラム）等を記憶し得る。多くの場合、常時ではないが、記憶装置 5308 は、一次記憶装置（例えば、メモリ 5303）より低速の二次記憶装置媒体（ハードディスク等）である。記憶装置 5308 はまた、光ディスクドライブ、固体メモリデバイス（例えば、フラッシュベースのシステム）、または前述のいずれかの組み合わせを含むことができる。記憶装置 5308 内の情報は、適切な場合、メモリ 5303 内の仮想メモリとして組み込まれ得る。10

【0167】

一実施例では、記憶デバイス 5335 は、記憶デバイスインターフェース 5325 を介して、制御システム 5300 と（例えば、外部ポートコネクタ（図示せず）を介して）取り外し可能にインターフェースがとられ得る。特に、記憶デバイス 5335 および関連付けられた機械読み取り可能な媒体は、機械読み取り可能命令、データ構造、プログラムモジュール、および / または制御システム 5300 のための他のデータの不揮発性ならびに / あるいは揮発性記憶を提供し得る。一実施例では、ソフトウェアは、完全にまたは部分的に、記憶デバイス 5335 上の機械読み取り可能な媒体内に常駐し得る。別の実施例では、ソフトウェアは、完全にまたは部分的に、プロセッサ 5301 内に常駐し得る。20

【0168】

バス 5340 は、種々のサブシステムを接続する。本明細書では、バスの参照は、必要に応じて、共通機能を果たす、1つ以上のデジタル信号線を包含し得る。バス 5340 は、限定されないが、種々のバスアーキテクチャのいずれかを使用する、メモリバス、メモリコントローラ、周辺バス、ローカルバス、および任意のそれらの組み合わせを含む、いくつかのタイプのバス構造のうちのいずれかであり得る。限定ではなく、実施例として、そのようなアーキテクチャとして、業界標準アーキテクチャ（ISA）バス、拡張 ISA（EISA）バス、マイクロチャネルアーキテクチャ（MCA）バス、ビデオエレクトロニクススタンダードソシエーションローカルバス（VLB）、ペリフェラルコンポーネントインターフェース（PCI）バス、PCI - エクスプレス（PCI-X）バス、アクセラレーテッドグラフィックスポート（AGP）バス、ハイパートランスポート（HTX）バス、シリアルアドバンスドテクノロジーアタッチメント（SATA）バス、および任意のそれらの組み合わせが挙げられる。30

【0169】

コンピュータシステム 5300 はまた、入力デバイス 5333 を含み得る。一実施例では、コンピュータシステム 5300 のユーザは、入力デバイス 5333 を介して、コマンドおよび / または他の情報をコンピュータシステム 5300 に入力し得る。入力デバイス 5333 の実施例として、タッチスクリーン、英数字入力デバイス（例えば、キーボード）、ポインティングデバイス（例えば、マウスまたはタッチパッド）、タッチパッド、ジョイスティック、ゲームパッド、オーディオ入力デバイス（例えば、マイクロホン、音声応答システム等）、光学スキャナ、動画または静止画像捕捉デバイス（例えば、カメラ）、および任意のそれらの組み合わせが挙げられるが、それらに限定されない。入力デバイス 5333 は、限定されないが、シリアル、パラレル、ゲームポート、USB、FIRE WIRE、THUNDERBOLT、または前述の任意の組み合わせを含む、種々の入力インターフェース 5323（例えば、入力インターフェース 5323）のいずれかを介して、バス 5340 に対してインターフェースがとられ得る。40

【0170】

情報およびデータは、ディスプレイ 5332 を通して表示されることができる。ディスプレイ 5332 の実施例として、液晶ディスプレイ（LCD）、有機液晶ディスプレイ（50

O L E D) 、 ブラウン管 (C R T) 、 プラズマディスプレイ 、 および それらの任意の組み合わせが挙げられるが 、 それらに限定されない。ディスプレイ 5 3 3 2 は 、 バス 5 3 4 0 を介して 、 プロセッサ 5 3 0 1 、 メモリ 5 3 0 3 、 および 固定記憶装置 5 3 0 8 、 ならびに入力デバイス 5 3 3 3 等の他のデバイスとインターフェースをとることができる。ディスプレイ 5 3 3 2 は 、 ビデオインターフェース 5 3 2 2 を介して 、 バス 5 3 4 0 にリンクされ 、 ディスプレイ 5 3 3 2 とバス 5 3 4 0 間のデータの転送は 、 グラフィック制御 5 3 2 1 を介して 、 制御されることがある。

【 0 1 7 1 】

加えて 、 または代替として 、 制御システム 5 3 0 0 は 、 ソフトウェアの代わりに 、 またはそれとともに 、 本明細書に説明または図示される 1 つ以上のプロセスまたは 1 つ以上のプロセスの 1 つ以上のステップを実行するように動作し得る 、 回路内に有線接続または別様に具現化される論理の結果として 、 機能性を提供し得る。さらに 、 非一過性の有形プロセッサ読み取り可能な媒体の参照は 、 適切な場合 、 実行のための命令を記憶する回路 (I C 等) 、 実行のための論理を具現化するための回路 、 または両方を包含し得る。本開示は 、 ソフトウェアに関連してハードウェアの任意の好適な組み合わせを包含する。
10

【 0 1 7 2 】

本明細書で開示される実施形態に関連して説明される 、 種々の例証的な論理ブロック 、 モジュール 、 および回路は 、 汎用プロセッサ 、 デジタル信号プロセッサ (D S P) 、 特定用途向け集積回路 (A S I C) 、 フィールドプログラマブルゲートアレイ (F P G A) または他のプログラマブル論理デバイス 、 離散ゲートまたはトランジスタ論理 、 離散ハードウェア構成要素 、 あるいは本明細書で説明する機能を果たすように設計されているそれらの任意の組み合わせを用いて実装または実施され得る。汎用プロセッサは 、 マイクロプロセッサであり得るが 、 代替案では 、 プロセッサは 、 任意の従来のプロセッサ 、 コントローラ 、 マイクロプロセッサ 、 または状態機械であり得る。プロセッサはまた 、 コンピュータデバイスの組み合わせ 、 例えば 、 D S P コア 、 または任意の他のそのような構成と併せた 、 D S P およびマイクロプロセッサ 、 複数のマイクロプロセッサ 、 1 つ以上のマイクロプロセッサの組み合わせとして実装され得る。
20

【 0 1 7 3 】

結論として 、 本発明は 、 とりわけ 、 プラズマ処理中のアーク取り扱いのためのシステムおよび方法を提供する。当業者であれば 、 本明細書で説明される実施形態によって達成されるものと実質的に同じ結果を達成するために 、 多数の変形例および置換が 、 本発明 、 その用途 、 およびその構成に行われ得ることを容易に認識できる。故に 、 本発明を開示された例示的形態に限定する意図は全くない。多くの変形例 、 修正 、 および代替構造は 、 請求項で明示されるような開示された発明の範囲および精神内にある。
30

【図1】

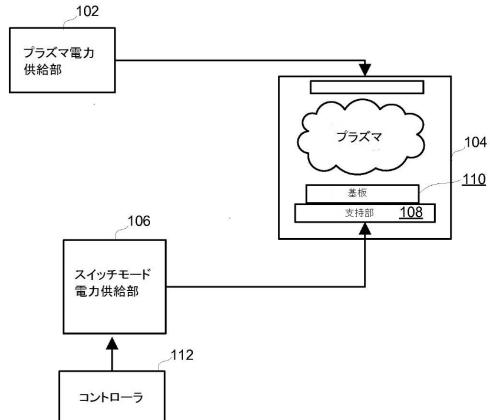


FIG. 1

【図2】

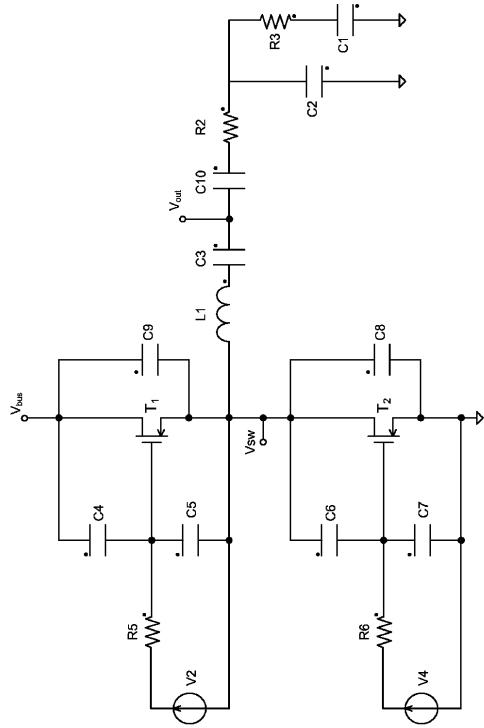


FIG. 2

【図3】

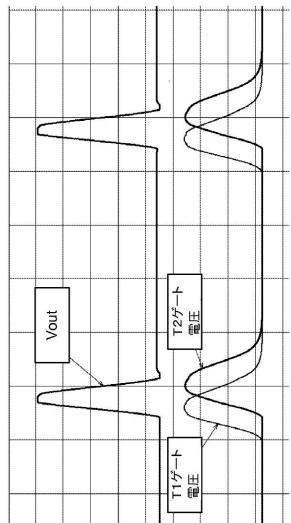


FIG. 3

【図4】

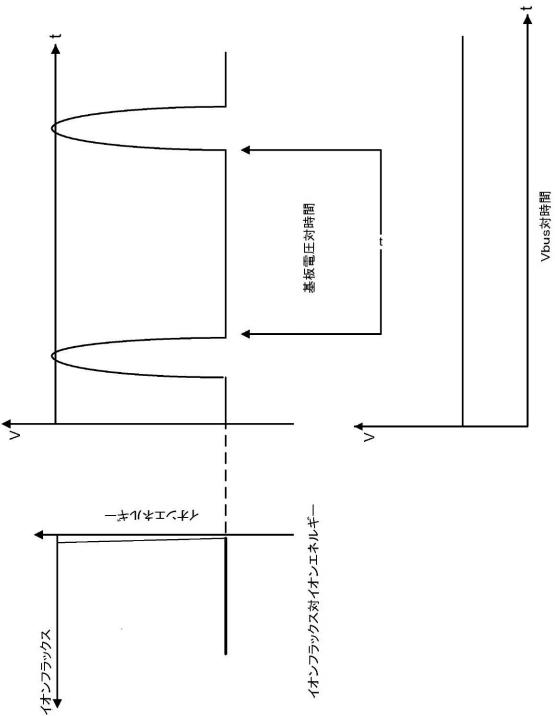


FIG. 4

【図5】

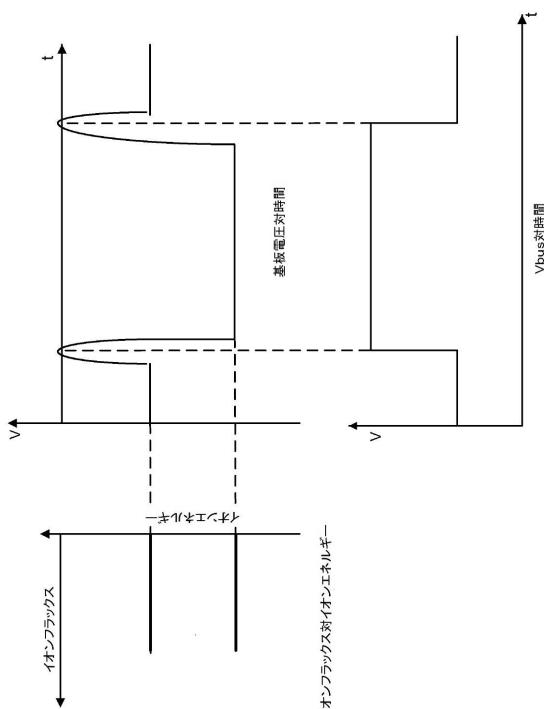


FIG. 5

【図6】

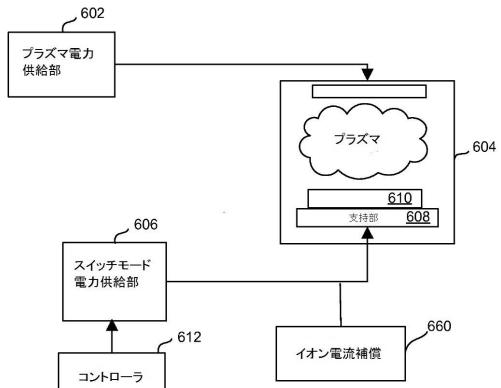


FIG. 6

【図7】

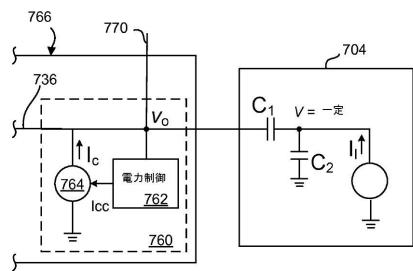


FIG. 7

【図8】

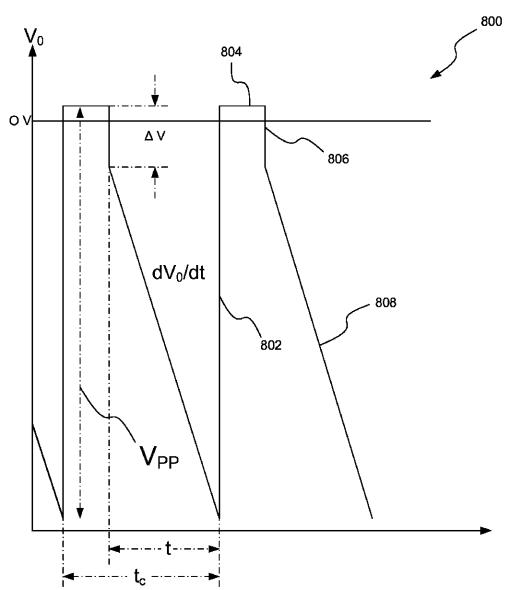
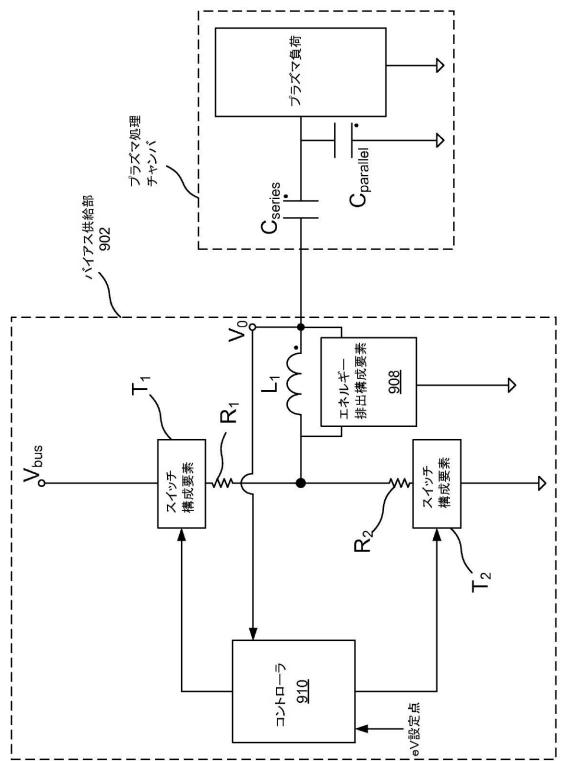
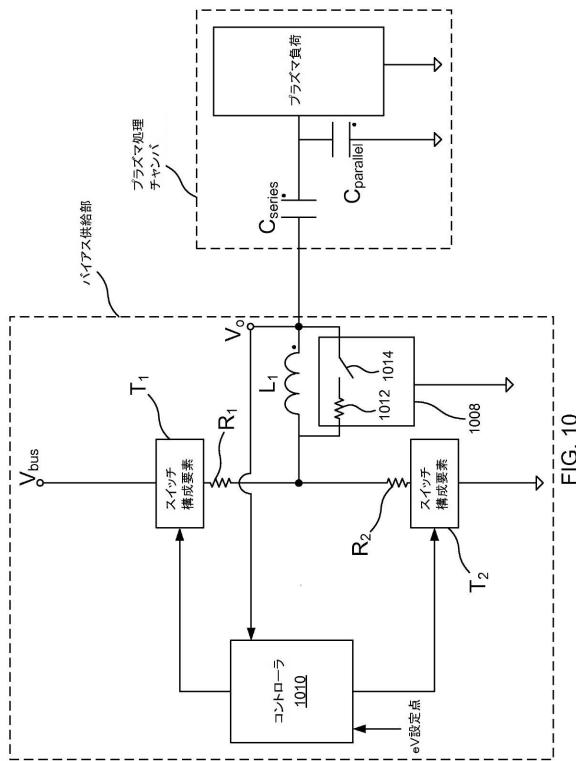


FIG. 8

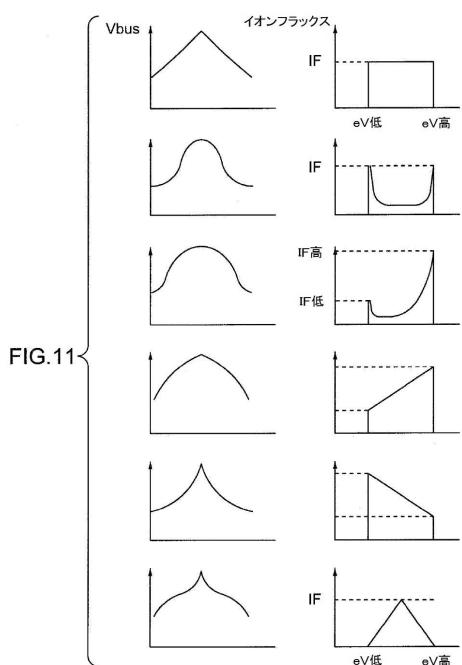
【図 9】



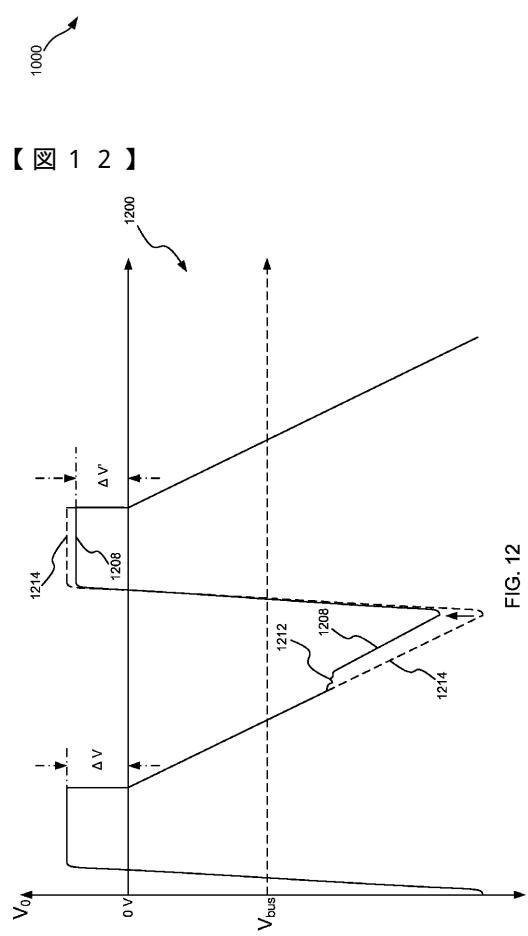
【図 10】



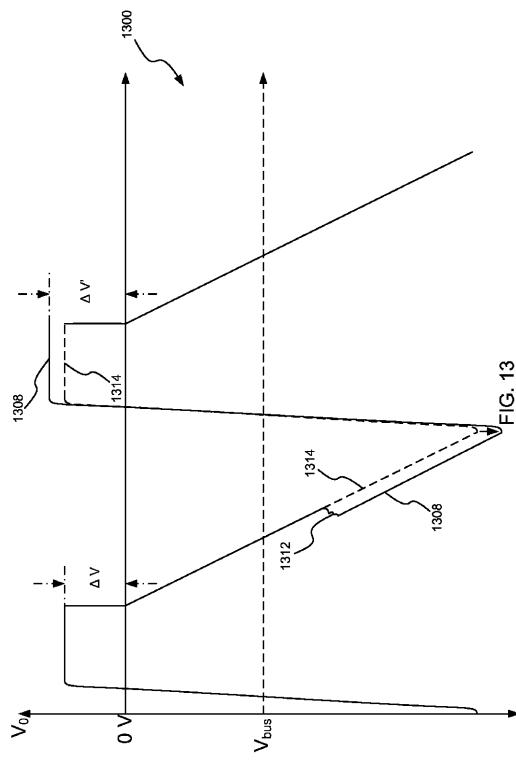
【図 11】



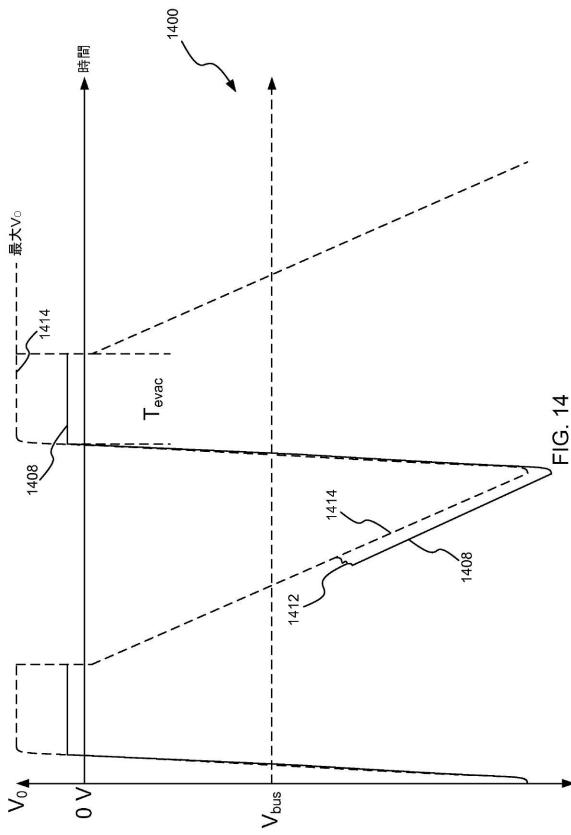
【図 12】



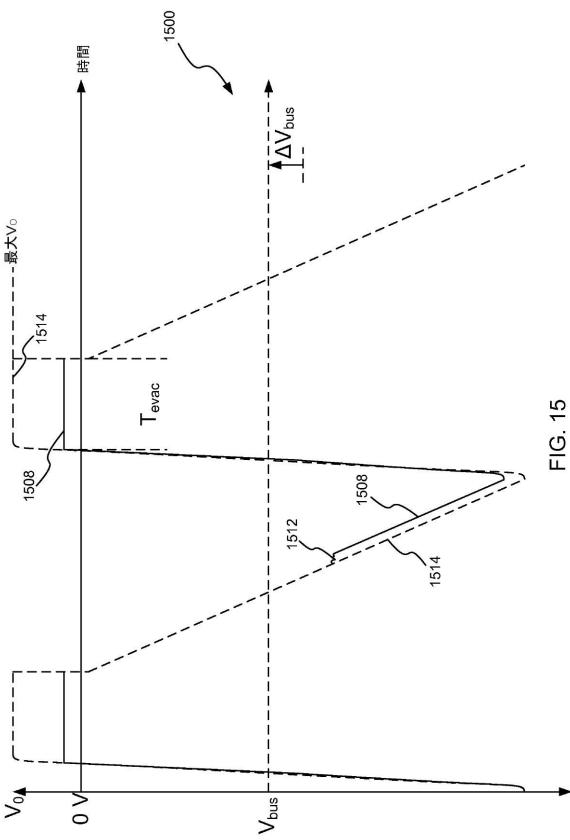
【図 1 3】



【図 1 4】



【図 1 5】



【図 1 6】

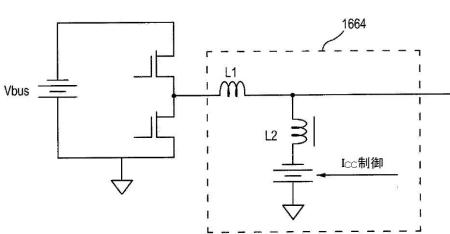


FIG. 16

【図17】

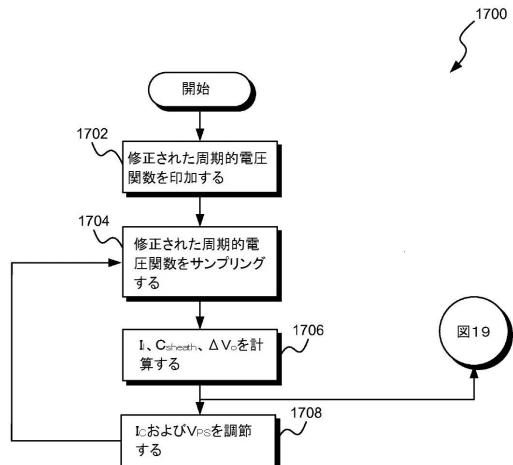


FIG. 17

【図18】

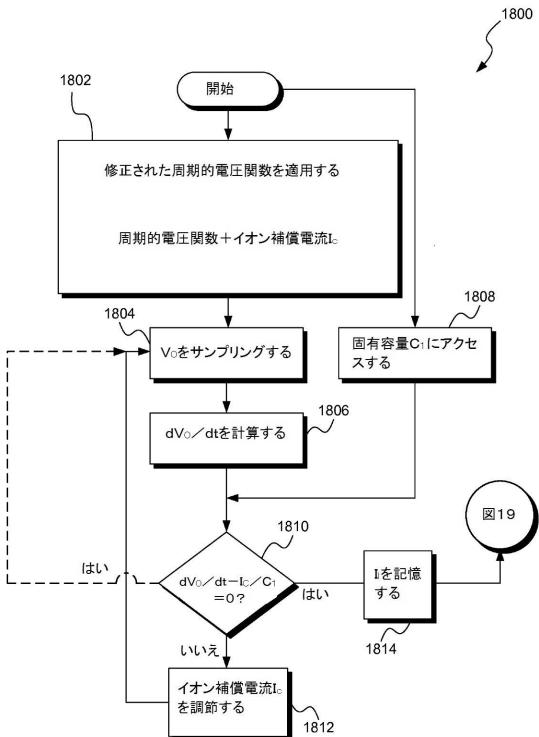


FIG. 18

【図19】

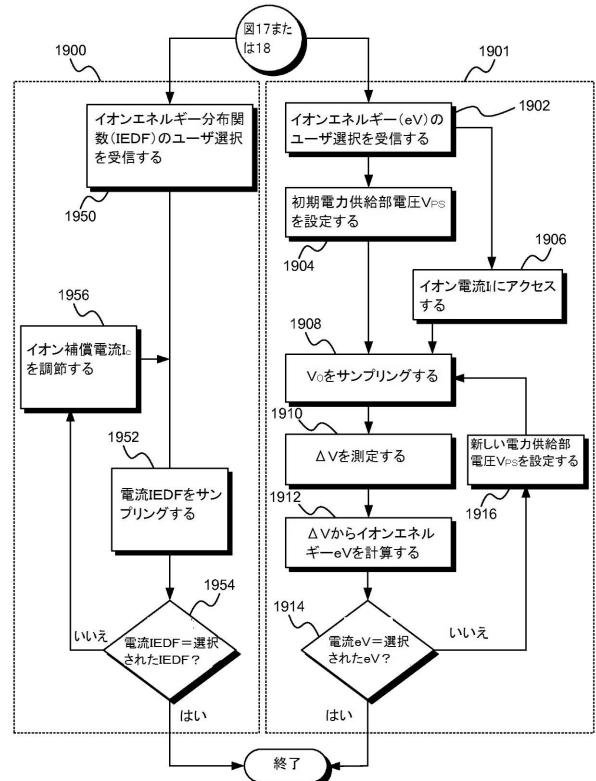


FIG. 19

【図20】

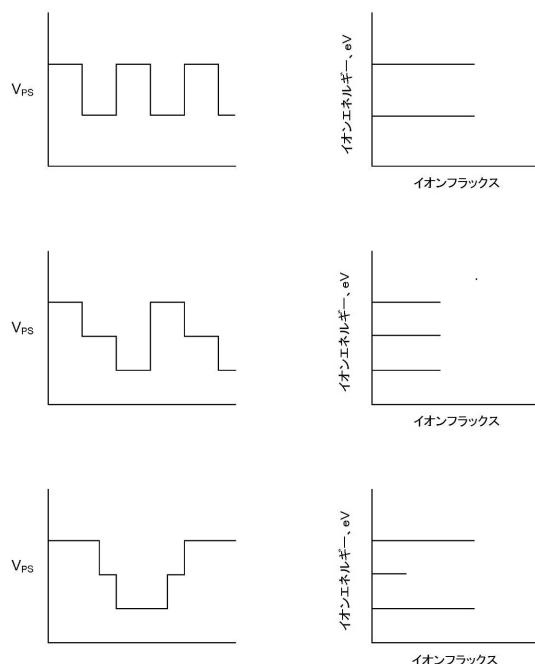
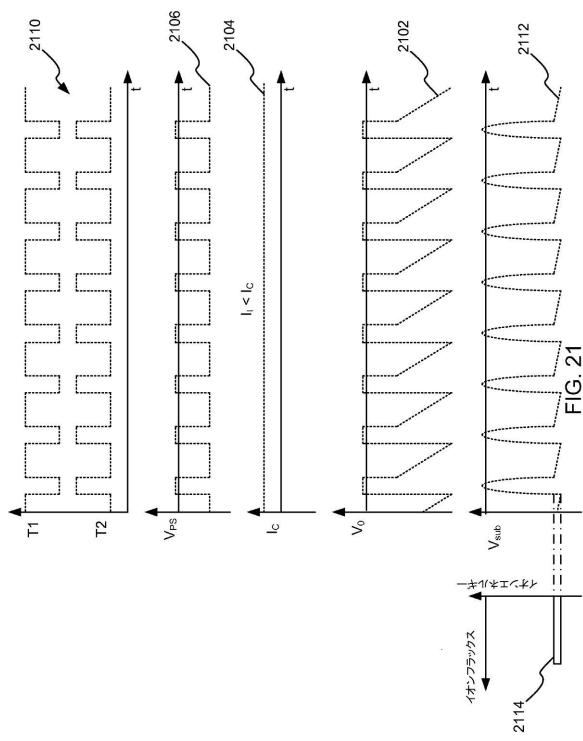
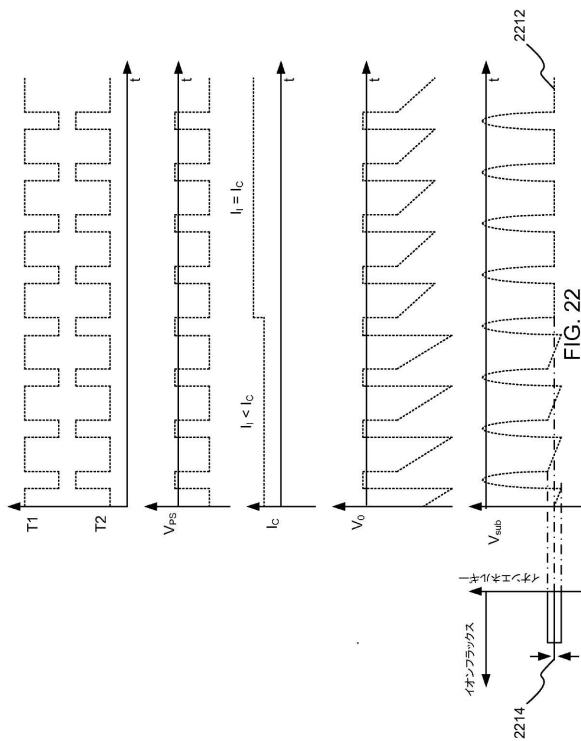


FIG. 20

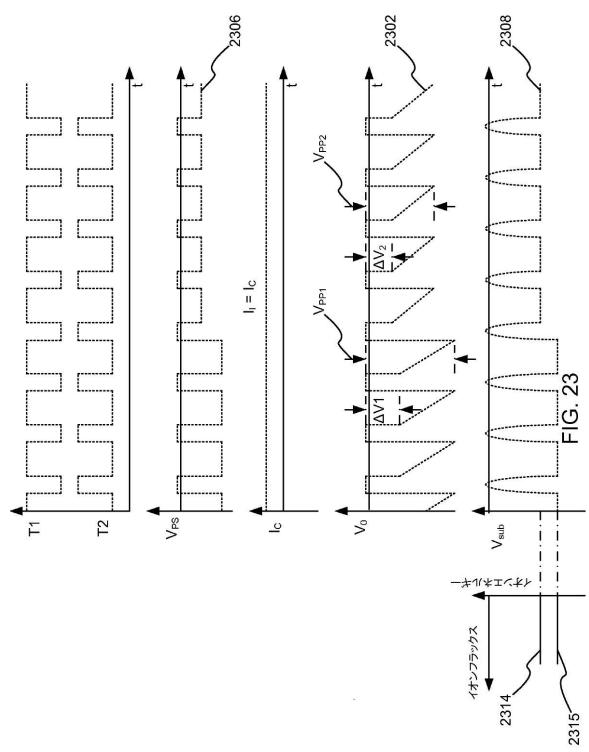
【図 2 1】



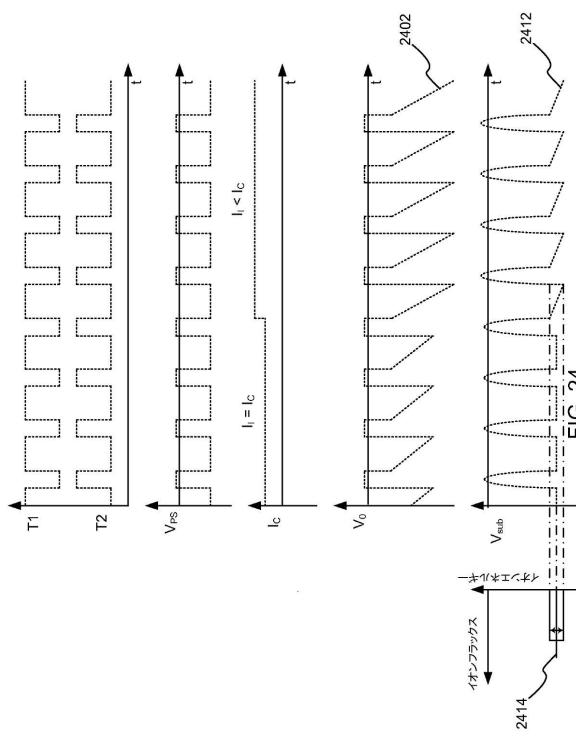
【図 2 2】



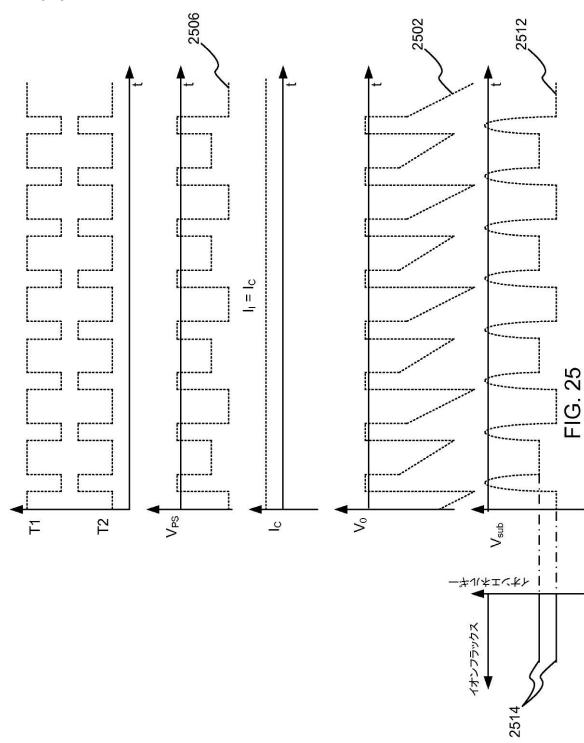
【図 2 3】



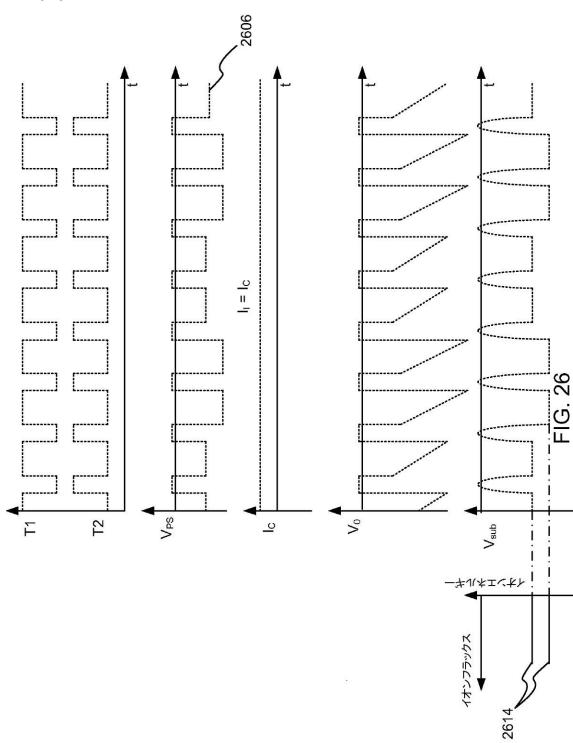
【図 2 4】



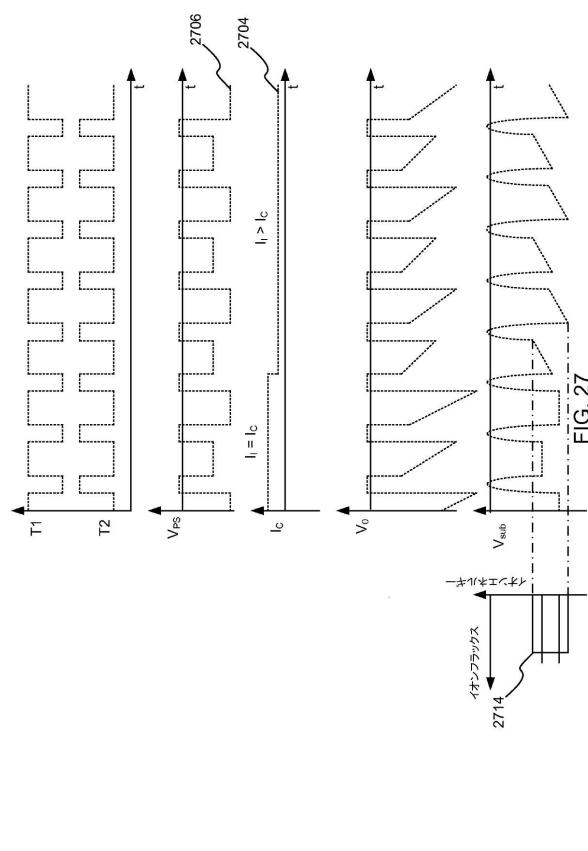
【図 25】



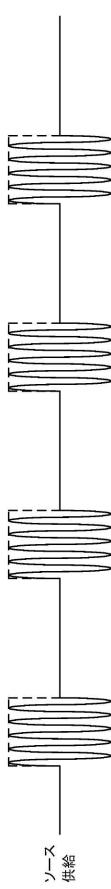
【図 26】



【図 27】



【図 28】



【図29】

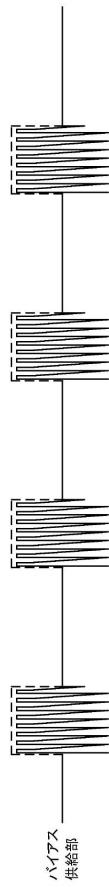


FIG. 29

【図30】

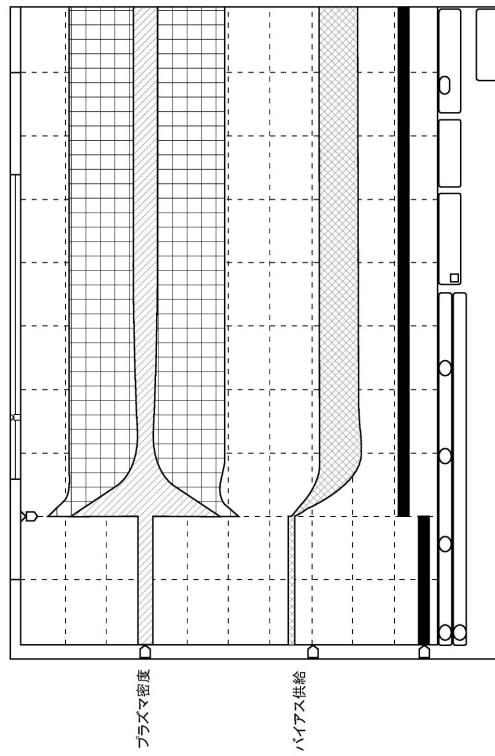


FIG.30

【図31】

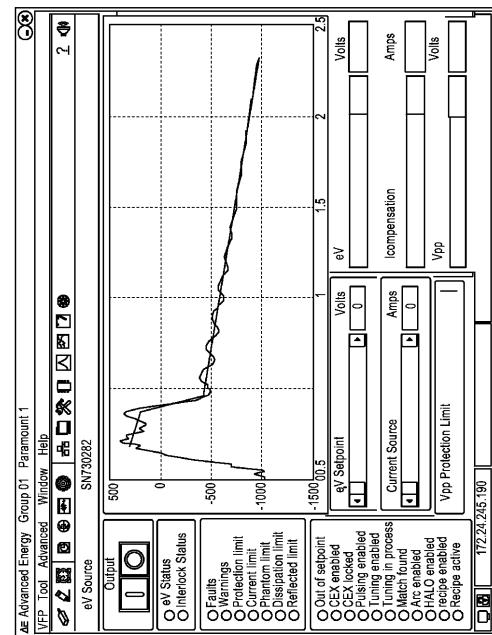


FIG.31

【図32】

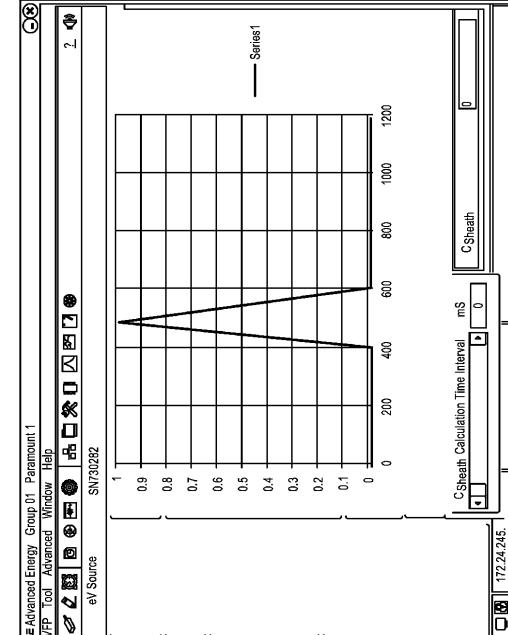


FIG.32

【図33】

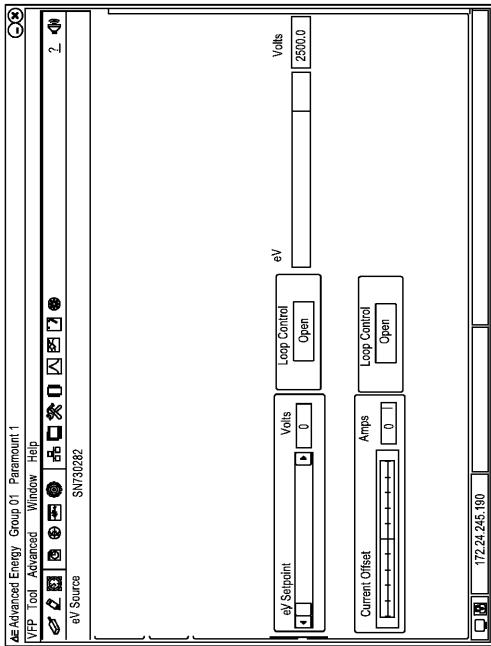


FIG.33

【図34】

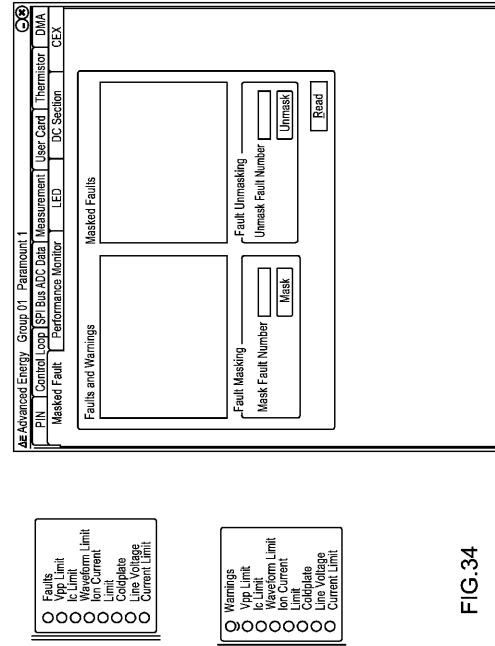


FIG.34

【図35】

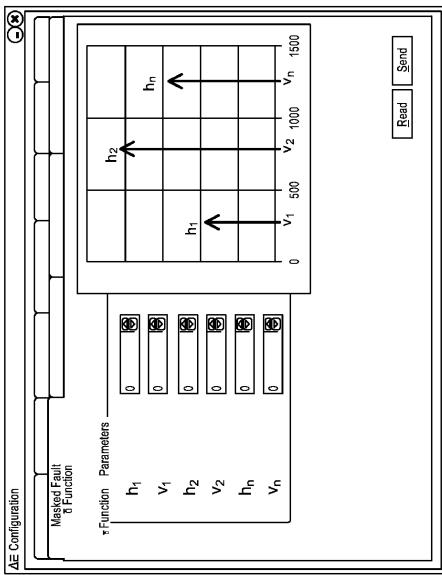


FIG.35

【図36】

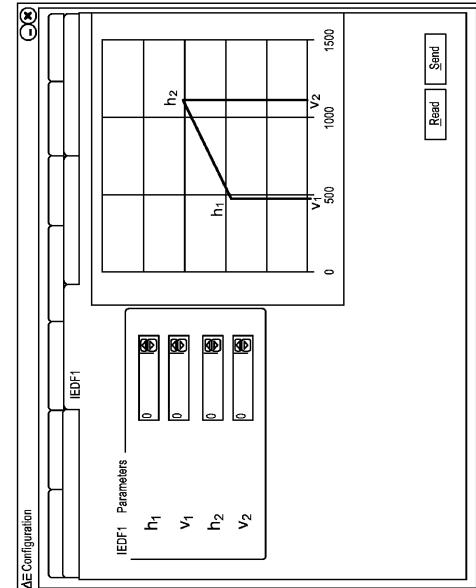


FIG.36

【図37】

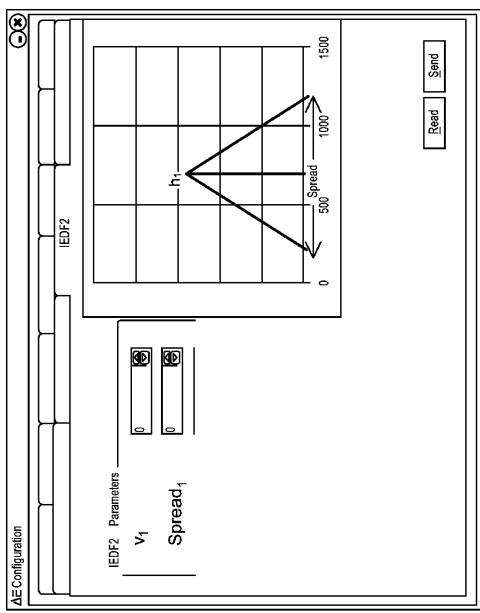


FIG.37

【図39】

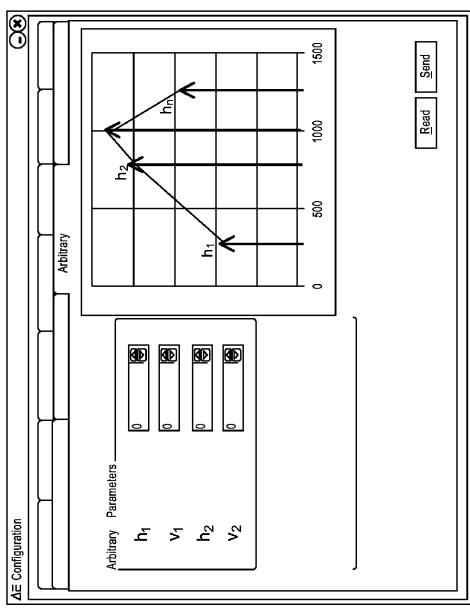


FIG.39

【図38】

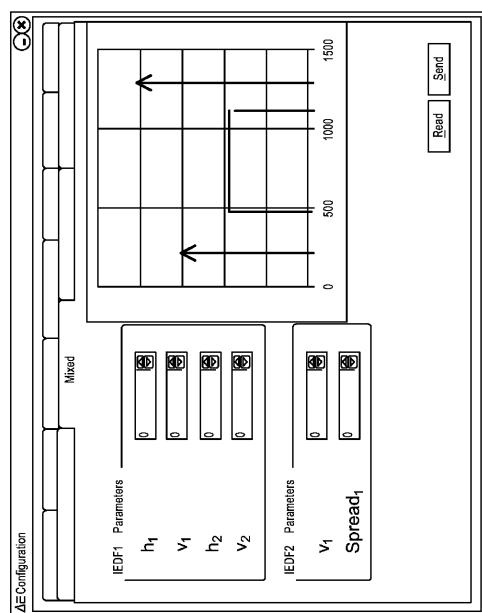


FIG.38

【図40】

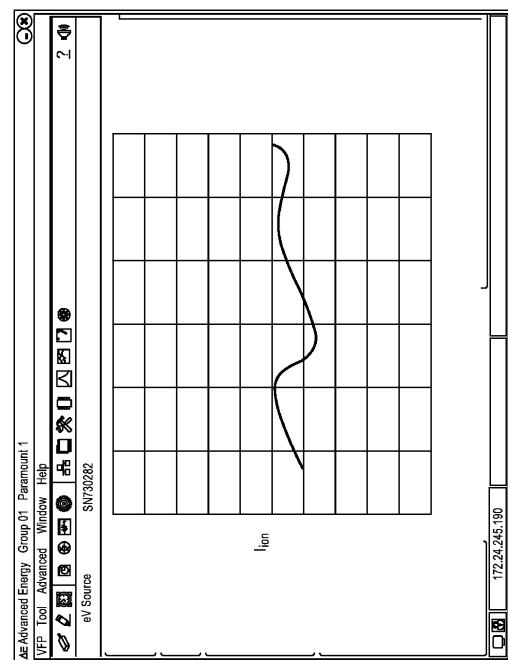


FIG. 40

【図41】

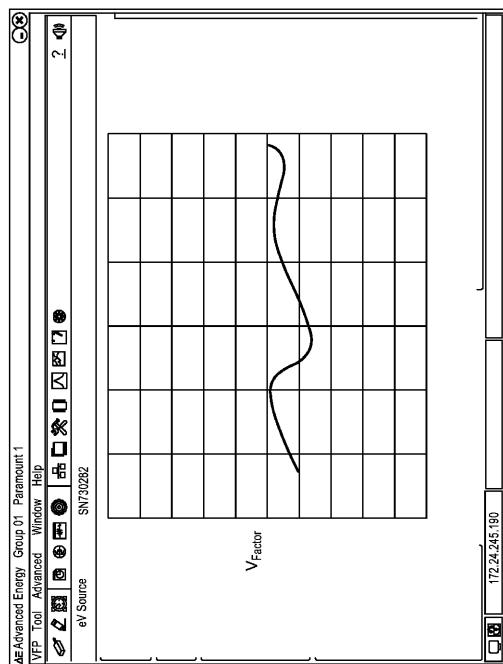


FIG.41

【図42】

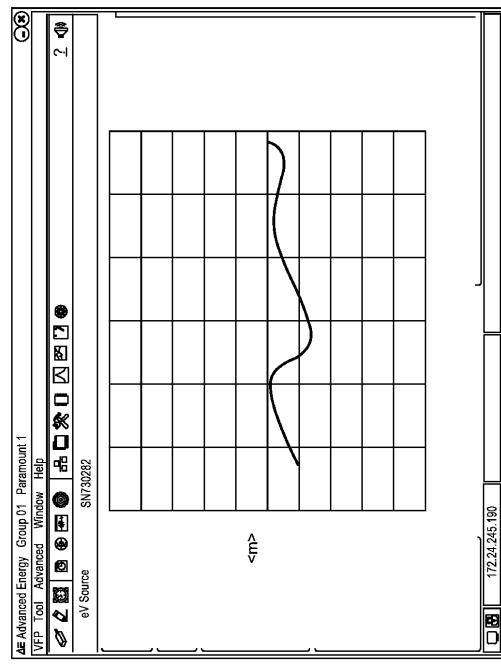


FIG.42

【図43】

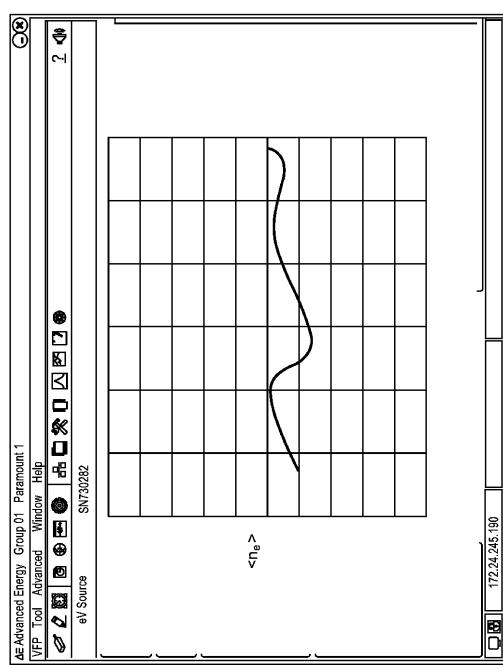


FIG.43

【図44】

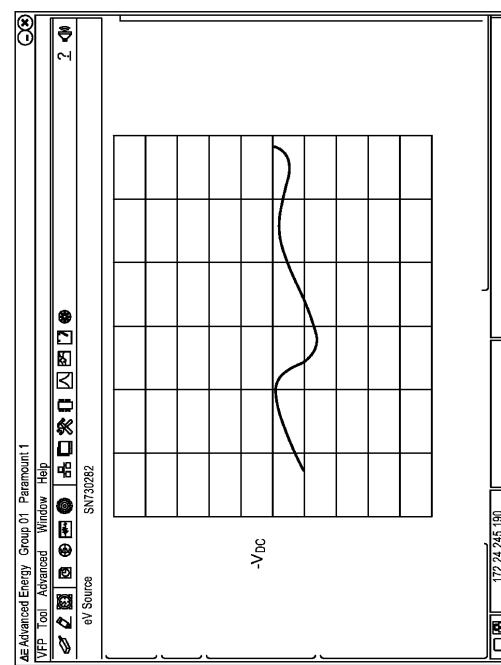


FIG.44

【図45】

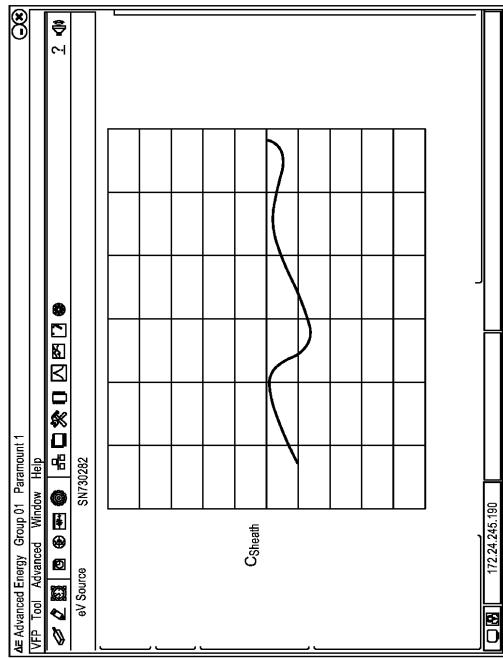


FIG.45

【図46】

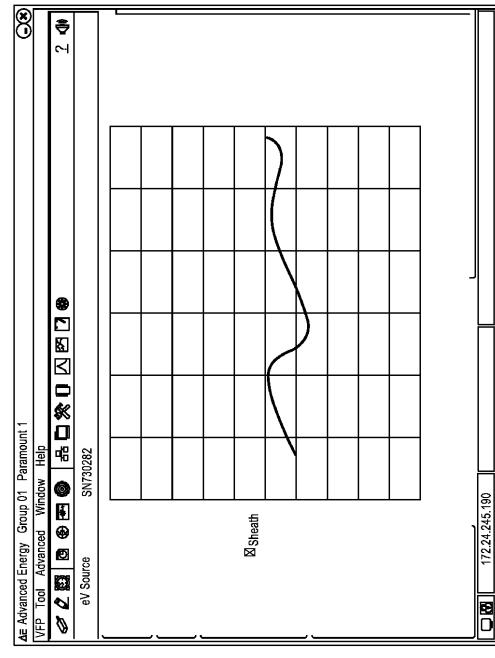


FIG.46

【図47】

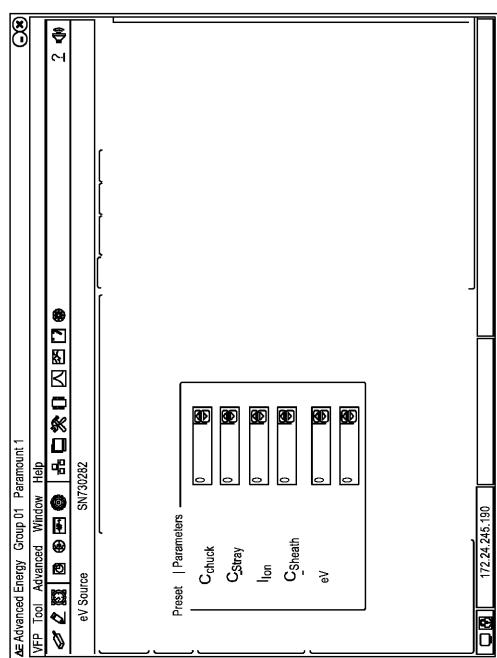


FIG.47

【図48】

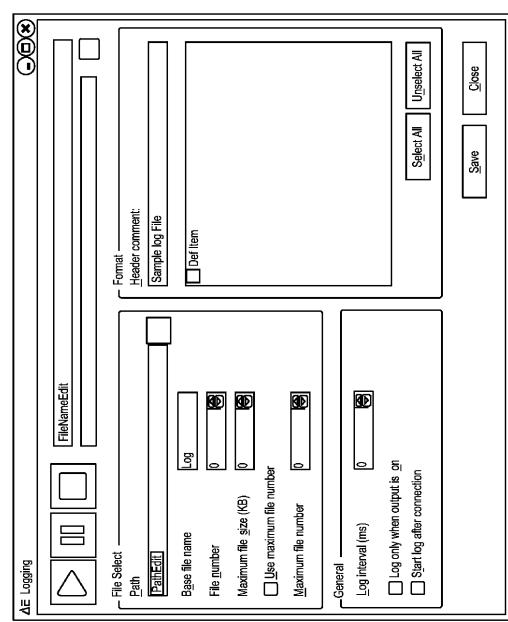


FIG.48

【図49】

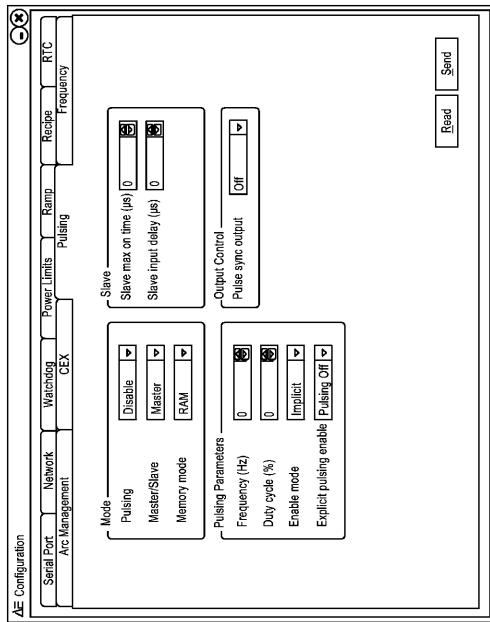


FIG.49

【図50】

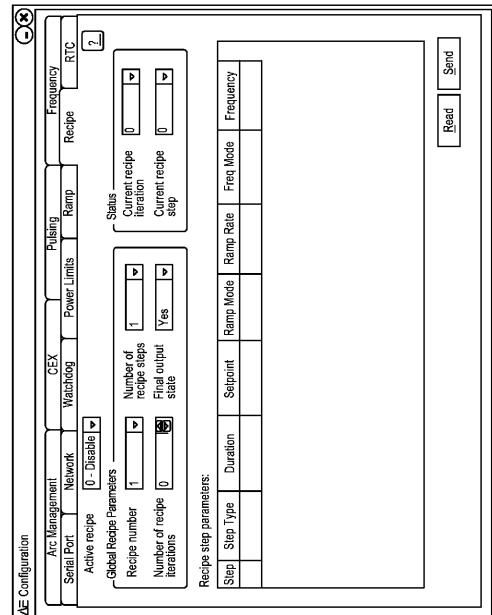


FIG.50

【図51】

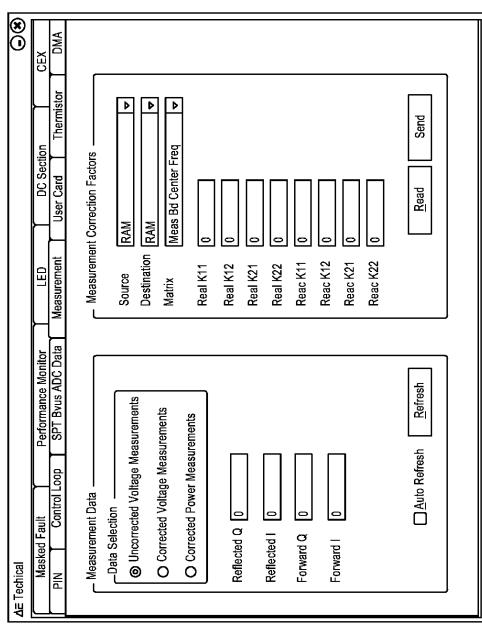


FIG.51

【図52】

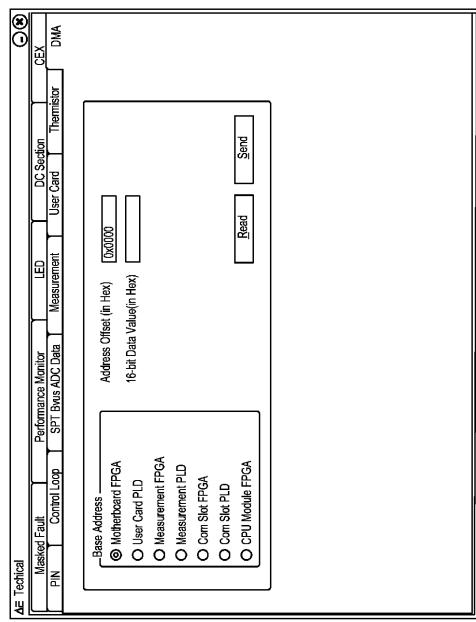


FIG.52

【図53】

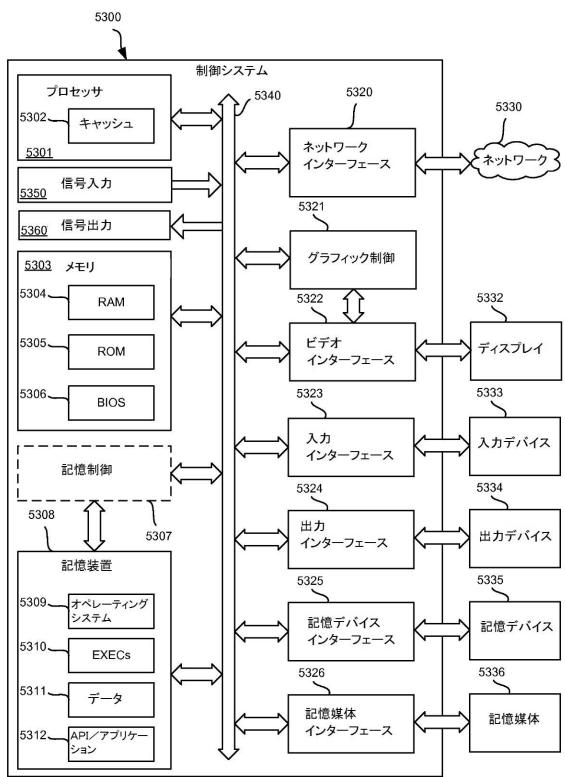


FIG. 53

フロントページの続き

(72)発明者 ブルーカー , ピクター

アメリカ合衆国 コロラド 80525 , フォート コリンズ , ケーブ コッド サークル
4336

(72)発明者 ホフマン , ダニエル ジェイ .

アメリカ合衆国 コロラド 80528 , フォート コリンズ , ボールド イーグル レーン
3700

(72)発明者 カーター , ダニエル

アメリカ合衆国 コロラド 80525 , フォート コリンズ , シルク オーク ドライブ
1436

(72)発明者 コワレフスキー , ドミトリー

アメリカ合衆国 コロラド 80525 , フォート コリンズ , ナッソー ウェイ 1308

審査官 鈴木 聰一郎

(56)参考文献 國際公開第2012/030500 (WO , A1)

特開2001-237234 (JP , A)

米国特許出願公開第2012/0052599 (US , A1)

特開2004-193564 (JP , A)

特開2008-287999 (JP , A)

米国特許第06201208 (US , B1)

特表2013-538457 (JP , A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , DB名)

H01L 21/205

H01L 21/302

H01L 21/3065

H01L 21/31

H01L 21/365

H01L 21/461

H01L 21/469

H01L 21/86

H05H 1/00 - 1/54

C23C 16/50

C23C 16/52