(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7622197号
(P7622197)

(45)発行日　令和7年1月27日(2025.1.27)

(24)登録日　令和7年1月17日(2025.1.17)

(51)国際特許分類		FI		
H05H	*1/46 (2006.01)*	H05H	1/46	R
H03H	*7/075(2006.01)*	H03H	7/075	Z

請求項の数　10　（全27頁）

(21)出願番号	特願2023-500991(P2023-500991)
(86)(22)出願日	令和3年7月9日(2021.7.9)
(65)公表番号	特表2023-533284(P2023-533284A)
(43)公表日	令和5年8月2日(2023.8.2)
(86)国際出願番号	PCT/US2021/041180
(87)国際公開番号	WO2022/011315
(87)国際公開日	令和4年1月13日(2022.1.13)
審査請求日	令和5年1月11日(2023.1.11)
(31)優先権主張番号	63/049,907
(32)優先日	令和2年7月9日(2020.7.9)
(33)優先権主張国・地域又は機関	米国(US)
(31)優先権主張番号	63/087,150
(32)優先日	令和2年10月2日(2020.10.2)
	最終頁に続く

(73)特許権者　520064676
イーグル ハーバー テクノロジーズ，インク．
ＥＡＧＬＥ ＨＡＲＢＯＲ ＴＥＣＨＮＯＬＯＧＩＥＳ，ＩＮＣ．
アメリカ合衆国 ９８１１９ ワシントン州 シアトル，ウェスタン アベニュー １６９ ダブリュ スイート ２６３
(74)代理人　100107364
弁理士　斉藤 達也
(72)発明者　ボウマン，クリストファー
アメリカ合衆国 ９８１１９ ワシントン州 シアトル，ウェスタン アベニュー １６９ ダブリュ スイート ２６３
(72)発明者　リストン，コナー
最終頁に続く

(54)【発明の名称】　イオン電流ドループ補償

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

電源システムであって、

ＲＦ周波数を有するＲＦ信号を生成するＲＦドライバーと、

前記ＲＦ周波数よりも低いパルス繰返し周波数、パルス幅、および２ｋＶを超えるピーク電圧を有する高電圧パルスを生成するナノ秒パルサーであって、前記ナノ秒パルサーが、

７．５ｍΩ～１．２５Ωの抵抗を有するスナバ抵抗器と、

２μＦ～３５μＦの静電容量を有するスナバコンデンサと、を含むスナバ回路を備える、ナノ秒パルサーと、

前記ＲＦ信号と前記高電圧パルスとが干渉しないようにするフィルター回路と、

を備える、前記電源システムと、

前記電源システムに接続されるプラズマチャンバーであって、前記電源システムは前記ＲＦ信号を前記プラズマチャンバー内に導入し、前記プラズマチャンバー内でプラズマを発生および維持し、前記ナノ秒パルサーからのパルスを前記プラズマチャンバー内に駆動する、前記プラズマチャンバーと、

を備える半導体処理システム。

【請求項２】

前記ナノ秒パルサーが矩形波を生成する、請求項１に記載の半導体処理システム。

【請求項３】

前記フィルター回路が、２．５μＨ未満のインダクタンスを有するフィルターインダクタを含む、請求項１に記載の半導体処理システム。
【請求項４】
前記電源システムが、８００ｎＨ未満の浮遊インダクタンスを有する、請求項１に記載の半導体処理システム。
【請求項５】
前記パルス幅が１００～２５０ｎｓの持続時間を有する、請求項１に記載の半導体処理システム。
【請求項６】
前記ＲＦ信号のない二つの連続パルス間の前記電圧が、１Ｖ／ｎｓ未満変化する、請求項１に記載の半導体処理システム。
【請求項７】
二つの連続するパルス間の平均電圧が１Ｖ／ｎｓ未満変化する、請求項１に記載の半導体処理システム。
【請求項８】
前記電源システムが、複数の高電圧パルスのそれぞれの間にＲＦ信号を有する波形を出力する、請求項１に記載の半導体処理システム。
【請求項９】
前記プラズマチャンバーが２０ｎＨ未満のインダクタンスを有する、請求項１に記載の半導体処理システム。
【請求項１０】
前記プラズマチャンバーが、１０ｎＦ未満の静電容量を有するチャックを含む、請求項１に記載の半導体処理システム。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、イオン電流ドループ補償に関する。
【背景技術】
【０００２】
いくつかのプラズマシステムは、少なくとも二つの電源を含む。一つは、プラズマチャンバー内でプラズマを発生させるために使用できる高周波波形を生成する。他方は、プラズマチャンバー内のウェーハに向かって荷電プラズマ粒子を加速させる高電圧パルスを生成する。
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【０００３】
本発明は、上記従来の技術における課題を解決するためになされたものである。
【課題を解決するための手段】
【０００４】
いくつかの実施形態は、二つの後続するパルス間に電圧ドループの全くない複数の高電圧パルスを供給する電源を含む。
【０００５】
いくつかの実施形態では、１ｋＶを超える電圧を有し、パルス間にほぼ平坦な部分を有する複数の高電圧パルスを有する、電圧波形対時間を提供する電源を含む。
【０００６】
いくつかの実施形態は、ＲＦ周波数を有するＲＦ信号を生成するＲＦドライバーと、パルス繰返し周波数がＲＦ周波数より低いパルス繰返し周波数、パルス幅、および２ｋＶを超えるピーク電圧を有する高電圧パルスを生成するナノ秒パルサーであって、ナノ秒パルサーがスナバ回路を備える、ナノ秒パルサーと、ＲＦドライバーとプラズマチャンバーとの間に配置されるフィルター回路と、を含む電源を含む。スナバ回路は、約７．５ｍΩ～

１．２５Ωの抵抗を有するスナバ抵抗器、および約２μＦ～３５μＦの静電容量を有するスナバコンデンサを含むことができる。

【０００７】

いくつかの実施形態では、フィルター回路は、約０～２．５μＨのインダクタンスを有するフィルターインダクタを含む。

【０００８】

いくつかの実施形態では、電源は、約８００ｎＨ未満の浮遊インダクタンスを有する。

【０００９】

いくつかの実施形態では、パルス幅は約１００～２５０ｎｓの持続時間を有する。

【００１０】

いくつかの実施形態では、ＲＦ信号は１００Ｖを超える電圧を有する。

【００１１】

いくつかの実施形態では、ナノ秒パルサーは、５００Ｖを超える電圧のＤＣ電源を含む。

【００１２】

いくつかの実施形態では、二つの連続するパルス間の電圧は１Ｖ／ｎｓ未満変化する。

【００１３】

いくつかの実施形態では、ＲＦ信号のない二つの連続するパルス間の電圧は１Ｖ／ｎｓ未満変化する。

【００１４】

いくつかの実施形態では、二つの連続するパルス間の平均電圧は１Ｖ／ｎｓ未満変化する。

【００１５】

いくつかの実施形態では、電源は、複数の高電圧パルスのそれぞれの間にＲＦ信号を有する波形を出力する。

【００１６】

いくつかの実施形態は、プラズマチャンバーと、プラズマチャンバーに接続し、ＲＦ信号および駆動パルスをプラズマチャンバー内に導入する本開示に開示の電源と、を備える半導体処理システムを含む。

【００１７】

いくつかの実施形態では、プラズマチャンバーは、約２０ｎＨ未満のインダクタンスを有する。

【００１８】

いくつかの実施形態では、チャンバーは、約１０ｎＦ未満の静電容量を有するチャックを含む。

【００１９】

いくつかの実施形態は、２ｋＶを超える電圧を供給する電源と、トランスであって、トランスコアと、トランスコアの少なくとも一部の周りに巻き付けられた一次巻線であって、一次巻線が第一のリード線および第二のリード線を有する、一次巻線と、トランスコアの少なくとも一部の周りに巻き付けられた二次巻線と、を備えるトランスと、を備えるパルス発生器を含む。パルス発生器はまた、一次巻線の第一のリード線と電気的に接続するドループ補償回路と、ドループ補償回路および電源と電気的に接続する第一のスイッチと、一次巻線の第二のリード線および電源に電気的に接続する第二のスイッチと、矩形波パルスを出力するトランスの二次巻線と電気的に接続するパルス出力と、を備える。第一のスイッチと第二のスイッチは、例えば、異なる時間間隔で開閉することができる。

【００２０】

いくつかの実施形態では、パルス出力は、約２ｋＶを超える電圧を有し、１ｋＨｚを超えるパルス周波数を有するパルスを出力する。

【００２１】

いくつかの実施形態では、ドループ補償回路は、電流が第一のスイッチからトランスに向かって流れるようにバイアスされたドループダイオードを含む。

【００２２】
いくつかの実施形態では、ドループ補償回路は、直列に配置され、ドループダイオードの両端に電気的に接続する第一のインダクタおよび第一の抵抗器を含む。第一のインダクタは、例えば、約５０μＨ未満のインダクタンスを有する。第一の抵抗器は、例えば、約１Ω未満の抵抗を有する。ドループ回路はまた、例えば、ドループダイオードおよび一次巻線の第一のリード線と電気的に接続する第二のインダクタを含む。第二のインダクタは、例えば、約５０ｎＨ未満のインダクタンスを有する。
【００２３】
パルス発生器はまた、第二のスイッチと一次巻線の第二のリード線との間に直列に配置された第三の抵抗器および第三のインダクタとをさらに備えることができる。第三のインダクタは、例えば、約３５ｎＨ未満のインダクタンスを有することができる。第三の抵抗器は、例えば、約１Ω未満の抵抗を有することができる。
【００２４】
いくつかの実施形態は、２ｋＶを超える電圧を供給するＤＣ電源と、トランスであって、トランスコアと、トランスコアの少なくとも一部の周りに巻き付けられた一次巻線であって、一次巻線が第一のリード線および第二のリード線を有する、一次巻線と、トランスコアの少なくとも一部の周りに巻き付けられた二次巻線と、を備えるトランスと、を備えるパルス発生器を含む。パルス発生器は、フルブリッジ構成で配置された複数のスイッチであって、複数のスイッチの第一の部分は、ドループ補償回路および電源に電気的に接続し、複数のスイッチの第二の部分は、一次巻線の第二のリード線および電源と電気的に接続する、複数のスイッチを含むことができる。複数のスイッチの第一の部分と複数のスイッチの第二の部分は、例えば異なる時間間隔で開閉することができる。パルス発生器は、複数のスイッチの第一の部分および／または複数のスイッチの第二の部分とトランスとの間に電気的に配置される減衰回路を含むことができる。減衰回路は、複数のスイッチの第一の部分から第一のリード線に向かってバイアスされたダイオードと、ダイオードと第一のリード線との間に配置される第一の抵抗器と、第一のインダクタと、第一のインダクタと直列に配置され、ダイオードの両端に電気的に接続する第二の抵抗器と、を含むことができる。パルス発生器は、約２ｋＶを超える電圧を有し、かつ１ｋＨｚを超えるパルス周波数を有するパルスを出力するトランスの二次巻線と電気的に接続するパルス出力であることができる。
【００２５】
いくつかの実施形態では、第一のインダクタは約３５ｎＨ未満のインダクタンスを有する。いくつかの実施形態では、第一の抵抗器は約１Ω未満の抵抗を有する。いくつかの実施形態では、第二の抵抗器は約１Ω未満の抵抗を有する、
【００２６】
いくつかの実施形態では、パルス発生器は、複数のスイッチの第二の部分と第二のリード線との間に直列に配置される第二のインダクタおよび第三の抵抗器を含むことができる。
【００２７】
発明の概要および本文書に記載の様々な実施形態は、本開示または特許請求の範囲を限定または定義するために提供されるものではない。
【図面の簡単な説明】
【００２８】
【図１】図１は、いくつかの実施形態による、負荷段を駆動する電力システムの回路図である。
【図２】図２は、いくつかの実施形態による、負荷段を駆動する抵抗出力段を有する電力システムの回路図である。
【図３】図３は、いくつかの実施形態による、ＲＦ電力なしで電力システムによって生成される二つの波形の例である。
【図４】図４は、いくつかの実施形態による、ＲＦ電力を有する電力システムによって生成される二つの波形の例である。

【図５】図５は、いくつかの実施形態による、ＲＦ電力なしで電力システムによって生成される二つの波形の例である。
【図６】図６は、いくつかの実施形態による、ＲＦ電力を有する電力システムによって生成される二つの波形の例である。
【図７】図７は、いくつかの実施形態による、ＲＦ電力なしで電力システムによって生成される二つの波形の例である。
【図８】図８は、いくつかの実施形態による、ＲＦ電力を有する電力システムによって生成される二つの波形の例である。
【図９】図９は、いくつかの実施形態による、システムなしにナノ秒パルサーによって生成されるドループ補償有無の波形を並べて表示した例である。
【図１０Ａ】図１０Ａおよび図１０Ｂは、いくつかの実施形態による、ドループ補正有無のウェーハ電位のヒストグラムである。
【図１０Ｂ】同上。
【図１１】図１１は、いくつかの実施形態による、負荷回路を駆動するドループ補償回路を有する電力システムの回路図である。
【図１２】図１２は、いくつかの実施形態による、負荷段を駆動するドループ補償回路を有する電力システムの回路図である。
【図１３】図１３は、いくつかの実施形態による、パルサーおよびプラズマシステムの回路図である。
【図１４】図１４は、パルサーならびに、パルサーとプラズマシステムをエネルギー回収回路で組み合わせたプラズマシステムの回路図である。
【発明を実施するための形態】
【００２９】
いくつかの実施形態は、プラズマチャンバー内でプラズマを駆動するパルス（例えば矩形波パルス）を生成するナノ秒パルサーを含む電力システムを含む。電力システムは、パルスが完了した後に発生するプラズマ内のイオン電流を打ち消す回路素子を含むスナバ回路を含むことができる。
【００３０】
図１は、いくつかの実施形態による、パルスをプラズマチャンバー１０６内に駆動するパルサーおよびプラズマシステム１００の回路図である。これらのパルスは、例えば矩形波パルスを含むことができる。パルサー段１０１は、プラズマチャンバー１０６内に導入されることができる複数のパルスを生成することができる。ＲＦ発生器１０８は、ＲＦ信号、例えば正弦波信号を生成することができる。フィルター回路１０３は、ＲＦ信号とパルスとが互いに干渉しないようにすることができる。スナバ回路内の構成要素、例えば、スナバ抵抗器Ｒ３、スナバインダクタＬ３、および／またはスナバコンデンサＣ５の値は、プラズマチャンバー１０６内に導入されるパルスのドループを低減するように選択されることができる。
【００３１】
例えば、スナバ抵抗器Ｒ３は、約１００ｍΩ未満、例えば、７５、５０、２５、１０、５、１、０．５ｍΩ等の抵抗を有してもよい。代替的にまたは追加的に、スナバ抵抗器Ｒ３は、約７．５ｍΩ～１．２５Ωの抵抗を有してもよい。例えば、スナバコンデンサは、約５０μＦ未満、例えば約２μＦ～３５μＦの静電容量を有すことができる。
【００３２】
いくつかの実施形態では、プラズマチャンバー１０６は、半導体処理チャンバー、例えば、プラズマ堆積システム、半導体製造システム、プラズマスパッタリングシステム等のための理想化されたまたは有効な回路を表すことができる。コンデンサ１２は、例えば、半導体プロセスウェーハが載ることができる静電チャックの静電容量を表すことができる。チャックは、例えば、誘電体材料（例えば、酸化アルミニウム、または他のセラミック材料、および誘電体材料内に入れた導体）を含むことができる。例えば、コンデンサ１１は、小さい静電容量（例えば、約１０ｐＦ、１００ｐＦ、５００ｐＦ、１ｎＦ、１０ｎＦ

、１００ｎＦ等）を有することができる。
【００３３】
コンデンサ１３は、例えば、プラズマとウェーハとの間のシース静電容量を表すことができる。抵抗器５６は、例えば、プラズマとウェーハとの間のシース抵抗を表すことができる。インダクタ４０は、例えば、プラズマとウェーハとの間のシースインダクタンスを表すことができる。電流源Ｉ２は、例えば、シースを通るイオン電流を表すことができる。例えば、コンデンサ１１またはコンデンサ１３は、小さい静電容量（例えば、約１０ｐＦ、１００ｐＦ、５００ｐＦ、１ｎＦ、１０ｎＦ、１００ｎＦ等）を有することができる。
【００３４】
コンデンサ１８は、例えば、チャンバーの壁に対するプラズマシース静電容量を表すことができる。抵抗器５７は、例えば、プラズマとチャンバー壁との間の抵抗を表すことができる。電流源Ｉ１は、例えば、プラズマ中のイオン電流を表すことができる。例えば、コンデンサ１１またはコンデンサ１８は、小さい静電容量（例えば、約１０ｐＦ、１００ｐＦ、５００ｐＦ、１ｎＦ、１０ｎＦ、１００ｎＦ等）を有することができる。
【００３５】
いくつかの実施形態では、プラズマ電圧は、グランドから回路点１２３まで測定された電圧であってもよく、ウェーハ電圧は、グランドから回路点１２２まで測定された電圧であり、およびウェーハの表面における電圧を表してもよく、チャッキング電圧は、グランドから回路点１２１まで測定された電圧であり、電極電圧は、グランドから１２４と表示された（例えば、電極上の）回路点までの電圧測定値であり、ならびに入力電圧は、グランドから回路点１２５まで測定された電圧である。
【００３６】
いくつかの実施形態では、パルサーおよびプラズマシステム１００は、図１１に示すようにＤＣバイアス回路１０４を含むことができる。
【００３７】
いくつかの実施形態では、バイアスコンデンサ２０は、ＤＣバイアス電圧を他の回路素子から分離する（または切り離す）ことができる。バイアスコンデンサ２０は、例えば、回路のある部分から別の部分への電位シフトを可能にすることができる。いくつかの実施形態では、この潜在的なシフトにより、チャック上のウェーハを定位置に保持する静電力が電圧閾値未満に保たれることを確実にすることができる。抵抗器Ｒ２は、ＤＣバイアス電源をパルサー段１０１からの高電圧パルス出力から分離することができる。
【００３８】
バイアスコンデンサ２０は、例えば、約１００ｐＦ、１０ｐＦ、１ｐＦ、１００μＦ、１０μＦ、１μＦ未満などの静電容量を有することができる。抵抗器Ｒ２は、高抵抗、例えば、約１ｋΩ、１０ｋΩ、１００ｋΩ、１ＭΩ、１０ＭΩ、１００ＭΩ等の抵抗を有してもよい。
【００３９】
回路１０５は、回路からプラズマチャンバー１０６への伝送路を表すことができる。抵抗器６３は、例えば、高電圧電力システムの出力から電極（例えば、プラズマチャンバー１０６）に接続するリード線または伝送路の抵抗を表すことができる。コンデンサ１１は、例えば、リード線または伝送路の浮遊容量を表すことができる。
【００４０】
いくつかの実施形態では、パルサー段１０１は、高パルス電圧（例えば、１ｋＶ、１０ｋＶ、２０ｋＶ、５０ｋＶ、１００ｋＶ等を超える電圧）、高周波数（例えば、１ｋＨｚ、１０ｋＨｚ、１００ｋＨｚ、２００ｋＨｚ、５００ｋＨｚ、１ＭＨｚ等を超える周波数）、高速立ち上がり時間（例えば、約１ｎｓ、１０ｎｓ、５０ｎｓ、１００ｎｓ、２５０ｎｓ、５００ｎｓ、１，０００ｎｓ等未満の立ち上がり時間）、高速立ち下がり時間（例えば、約１ｎｓ、１０ｎｓ、５０ｎｓ、１００ｎｓ、２５０ｎｓ、５００ｎｓ、１，０００ｎｓ等未満の立ち下がり時間）および／または短いパルス幅（例えば、約１，０００ｎｓ、５００ｎｓ、２５０ｎｓ、１００ｎｓ、２０ｎｓ等未満のパルス幅）を有するパルス

を発生させることができる。
【００４１】
例えば、パルサー段１０１は、「Ｈｉｇｈ Ｖｏｌｔａｇｅ Ｎａｎｏｓｅｃｏｎｄ Ｐｕｌｓｅｒ」と題する米国特許出願第１４／５４２，４８７号に記載されている任意のデバイスの全てまたは任意の一部を含むことができ、これはあらゆる目的のために本開示に組み込まれ、また、「Ｇａｌｖａｎｉｃａｌｌｙ Ｉｓｏｌａｔｅｄ Ｏｕｔｐｕｔ Ｖａｒｉａｂｌｅ Ｐｕｌｓｅ Ｇｅｎｅｒａｔｏｒ Ｄｉｓｃｌｏｓｕｒｅ」と題する米国特許出願第１４／６３５，９９１号に記載されている任意のデバイスの全てまたは任意の一部を含むことができ、これはあらゆる目的のために本開示に組み込まれ、また、「Ｈｉｇｈ Ｖｏｌｔａｇｅ Ｎａｎｏｓｅｃｏｎｄ Ｐｕｌｓｅｒ Ｗｉｔｈ Ｖａｒｉａｂｌｅ Ｐｕｌｓｅ Ｗｉｄｔｈ ａｎｄ Ｐｕｌｓｅ Ｒｅｐｅｔｉｔｉｏｎ Ｆｒｅｑｕｅｎｃｙ」と題する米国特許出願第１４／７９８，１５４号に記載されている任意のデバイスの全てまたは任意の一部を含むことができ、これはあらゆる目的のために本開示に組み込まれる。
【００４２】
いくつかの実施形態では、パルサー段１０１は、あらゆる方法で接続する一つまたは複数のナノ秒パルサーを含むことができる。
【００４３】
いくつかの実施形態では、パルサー段１０１は、スイッチＳ６によって切り替えられ、切り替えられた電力をトランスＴ１に供給する一定のＤＣ電圧を供給するＤＣ電源を含むことができる。ＤＣ電源は、電圧源Ｖ５およびエネルギー蓄積コンデンサＣ７を含むことができる。トランスＴ１の巻数比が１：１０の場合、トランスは負荷で１０ｋＶを発生させることができる。
【００４４】
いくつかの実施形態では、負荷静電容量（例えば、コンデンサ１３およびコンデンサ１８）がエネルギー蓄積コンデンサＣ７の静電容量と比較して小さい場合、トランス入力で倍電圧が発生する（または発生しない）場合がある。例えば、エネルギー蓄積コンデンサＣ７が５００Ｖを供給する場合、トランスＴ１の入力で１ｋＶが測定されることができる。
【００４５】
スイッチＳ６は、例えば、一つまたは複数の固体スイッチ、例えばＩＧＢＴ、ＭＯＳＦＥＴ、ＳｉＣ ＭＯＳＦＥＴ、ＳｉＣ接合トランジスタ、ＦＥＴ、ＳｉＣスイッチ、ＧａＮスイッチ、光導電スイッチ等を含むことができる。スイッチＳ６は、Ｓｉｇ６＋およびＳｉｇ６－と表示されるコントローラからの信号に基づいて切り替えられることができる。
【００４６】
いくつかの実施形態では、スイッチＳ６は、切り替えられた電圧が全電圧（例えば、エネルギー蓄積コンデンサＣ７および／または電圧源Ｖ５の電圧）に決してならないほど高速に、切り替わることができる。いくつかの実施形態では、スイッチＳ６に接続されたゲート抵抗器は、短いターンオンパルスで設定されることができる。
【００４７】
いくつかの実施形態では、パルサー段１０１は、フリーホイーリングダイオードＤ２を含んでもよい。いくつかの実施形態では、フリーホイーリングダイオードＤ２を誘導負荷と組み合わせて使用することができ、スイッチＳ６が開いた後、電流がインダクタを通って同じ方向に流れ続けることを可能にすることにより、誘導負荷に蓄積されたエネルギーを確実に消散させ、回路の抵抗要素でエネルギーを確実に消費させることができる。フリーホイーリングダイオードＤ２が含まれていない場合、例えば、スイッチＳ６に逆電圧が発生する可能性がある。
【００４８】
いくつかの実施形態では、パルサー段１０１は、浮遊インダクタンスＬ１および／または浮遊抵抗Ｒ１を含むことができる。浮遊インダクタンスＬ１は、例えば、約１０ｎＨ、１００ｎＨ、１，０００ｎＨ、１０，０００ｎＨ等未満であってもよい。浮遊抵抗Ｒ１は

、例えば、約１Ω、１００ｍΩ、１０ｍΩ等未満であってもよい。
【００４９】
いくつかの実施形態では、エネルギー回収回路１１０は、トランスの二次側および／またはエネルギー蓄積コンデンサＣ７と電気的に接続することができる。エネルギー回収回路１１０は、例えば、トランスＴ１の二次側に跨がるクローバーダイオード１３０を含むことができる。エネルギー回収回路１１０は、例えば、（直列に配置される）エネルギー回収ダイオード１２０およびエネルギー回収インダクタ１１５を含んでもよく、これにより、トランスＴ１の二次側から電流が流れ、エネルギー蓄積コンデンサＣ７を充電することができる。エネルギー回収ダイオード１２０およびエネルギー回収インダクタ１１５は、トランスＴ１の二次側およびエネルギー蓄積コンデンサＣ７と電気的に接続することができる。いくつかの実施形態では、エネルギー回収回路１１０は、トランスＴ１の二次側に電気的に接続するクローバーダイオード１３０および／またはインダクタ１４０を含むことができる。インダクタ１４０は、浮遊インダクタンスを表すことができ、および／またはトランスＴ１の浮遊インダクタンスを含むことができる。
【００５０】
いくつかの実施形態では、エネルギー回収インダクタ１１５は、任意のタイプのインダクタ、例えば、フェライトコアインダクタまたは空芯インダクタを含むことができる。いくつかの実施形態では、エネルギー回収インダクタ１１５は、任意のタイプの形状、例えば、ソレノイド巻線、トロイダル巻線等を有することができる。いくつかの実施形態では、エネルギー回収インダクタ１１５は、約１０μＨ、５０μＨ、１００μＨ、５００μＨ等より大きいインダクタンスを有することができる。いくつかの実施形態では、エネルギー回収インダクタ１１５は、約１μＨ～約１００ｍＨのインダクタンスを有することができる。
【００５１】
いくつかの実施形態では、エネルギー回収インダクタ１１５およびエネルギー回収ダイオード１２０の順序は入れ替えることができる。例えば、エネルギー回収ダイオード１２０がエネルギー回収インダクタ１１５に続いてもよいし、エネルギー回収インダクタ１１５がエネルギー回収ダイオード１２０に続いてもよい。
【００５２】
いくつかの実施形態では、ナノ秒パルサーがオンになると、電流がプラズマチャンバー１０６を充電する（例えば、コンデンサ１３、コンデンサ１２、またはコンデンサ１８を充電する）ことができる。例えば、トランスＴ１の二次側の電圧がエネルギー蓄積コンデンサＣ７の充電電圧を超えて上昇すると、一部の電流がエネルギー回収インダクタ１１５を通って流れる可能性がある。ナノ秒パルサーがオフになると、エネルギー回収インダクタ１１５を通ってプラズマチャンバー内のコンデンサ（例えば、コンデンサ１１）から電流が流れて、エネルギー回収インダクタ１１５の両端の電圧がゼロになるまでエネルギー蓄積コンデンサＣ７を充電することができる。クローバーダイオード１３０は、プラズマチャンバー１０６内のコンデンサがプラズマチャンバー１０６またはＤＣバイアス回路１０４内のインダクタンスでリンギングするのを防止することができる。
【００５３】
エネルギー回収ダイオード１２０は、例えば、電荷がエネルギー蓄積コンデンサＣ７からプラズマチャンバー１０６内のコンデンサに流れるのを防止することができる。
【００５４】
エネルギー回収インダクタ１１５の値を選択して、電流の立ち下がり時間を制御することができる。いくつかの実施形態では、エネルギー回収インダクタ１１５は、１μＨ～６００μＨのインダクタンス値を有することができる。いくつかの実施形態では、エネルギー回収インダクタ１１５は、５０μＨより大きいインダクタンス値を有することができる。いくつかの実施形態では、エネルギー回収インダクタ１１５は、約５０μＨ、１００μＨ、１５０μＨ、２００μＨ、２５０μＨ、３００μＨ、３５０μＨ、３５０μＨ、４００μＨ、４００μＨ、５００μＨ等未満のインダクタンスを有することができる。

【００５５】
例えば、エネルギー蓄積コンデンサＣ７が５００Ｖを供給する場合、（例えば、上記のように、倍電圧により）トランスＴ１の入力で１ｋＶが測定されることができる。トランスＴ１における１ｋＶは、スイッチＳ６が開いている場合、エネルギー回収回路１１０の構成要素間で分割されることができる。値が適切に選択される（例えば、スナバインダクタＬ３は、エネルギー回収インダクタ１１５のインダクタンスよりも小さいインダクタンスを有する）場合、エネルギー回収ダイオード１２０およびエネルギー回収インダクタ１１５の両端の電圧は、５００Ｖより大きくなることができる。そして、電流は、エネルギー回収ダイオード１２０を通って流れ、および／またはエネルギー蓄積コンデンサＣ７を充電することができる。電流はまた、ダイオードＤ３およびインダクタＬ８を通って流れる場合がある。エネルギー蓄積コンデンサＣ７が充電されると、電流は、ダイオードＤ３およびエネルギー回収インダクタ１１５を通って流れることができない。
【００５６】
いくつかの実施形態では、エネルギー回収回路１１０は、例えば、高速時間スケール（例えば、１ｎｓ、１０ｎｓ、５０ｎｓ、１００ｎｓ、２５０ｎｓ、５００ｎｓ、１，０００ｎｓ等の時間スケール）で、プラズマチャンバー１０６からエネルギーを伝達する（または電荷を伝達する）ことができる。プラズマチャンバー１０６を横切るパルスが速い立ち下がり時間ｔｆを有することを確実にするために、エネルギー回収回路の浮遊抵抗は低くてもよい。エネルギー回収回路１１０の浮遊抵抗は、例えば、約１Ω、１００ｍΩ、１０ｍΩ等未満の抵抗を有することができる。いくつかの実施形態では、プラズマチャンバー１０６からのエネルギー伝達効率は、高く、例えば、約６０％、７０％、８０％、または９０％等を超える場合がある。
【００５７】
図１に示す任意の数の構成要素、例えば、ダイオード１３５もしくはクローバーダイオード１３０、またはインダクタ１４０は、必要とされてもよく、または必要とされなくてもよい。
【００５８】
いくつかの実施形態では、電圧源Ｖ１とエネルギー回収回路１１０が電圧源Ｖ１および／またはエネルギー蓄積コンデンサＣ７と接続する点との間に、ダイオードを配置することができる。このダイオードは、例えば、電流が電圧源Ｖ１からエネルギー蓄積コンデンサＣ７に流れることを可能にするように配置されることができるが、電流がエネルギー回収回路からエネルギー蓄積コンデンサＣ７に流れることを可能にしない。
【００５９】
いくつかの実施形態では、エネルギー回収回路１１０は除去されてもよい。いくつかの実施形態では、抵抗出力段またはバイアス補償回路を含むことができる。様々な他の回路または回路素子を含むことができる。
【００６０】
いくつかの実施形態では、パルサーおよびプラズマシステム１００は、フィルター回路１０３を含むことができる。この実施例では、フィルター回路は、フィルターコンデンサ１８５および／またはフィルターインダクタ１８０を含む。フィルターコンデンサ１８５は、例えば、パルサー段１０１からの低周波数信号をフィルタリングすることができる。これらの低周波信号は、例えば、約１００ｋＨｚおよび約１０ＭＨｚ、例えば約１０ＭＨｚの周波数（例えば、スペクトル成分の大部分）を有することができる。フィルターコンデンサ１８５は、例えば、約１ｐＦ～１ｎＦの、例えば約１００ｐＦ未満の値を有することができる。
【００６１】
いくつかの実施形態では、フィルターインダクタ１８０は、例えば、ＲＦ発生器１０８からの高周波信号をフィルタリングすることができる。これらの高周波信号は、例えば、約１ＭＨｚ～２００ＭＨｚの、例えば約１ＭＨｚまたは１０ＭＨｚを超える周波数を有することができる。フィルターインダクタ１８０は、例えば、約１０ｎＨ～１０μＨの、例

えば約１μＨを超える値を有することができる。いくつかの実施形態では、フィルターインダクタ１８０は、その間で低いカップリング容量を有することができる。いくつかの実施形態では、カップリング容量は、１ｎＦ未満であってもよい。

【００６２】

いくつかの実施形態では、フィルターコンデンサ１８５およびフィルターインダクタ１８０のいずれかまたは両方が、ＲＦ発生器１０８によって生成されるパルスを、パルサー段１０１によって生成されるパルスから分離すること（またはその逆）ができる。例えば、フィルターコンデンサ１８５は、パルサー段１０１によって生成されたパルスを、ＲＦ発生器１０８によって生成されたパルスから分離することができる。フィルターインダクタ１８０は、ＲＦ発生器１０８によって生成されたパルスを、パルサー段１０１によって生成されたパルスから分離することができる。

【００６３】

図２は、いくつかの実施形態による、負荷段を駆動する抵抗出力段２２０を有する電力システム２００の回路図である。この実施例では、エネルギー回収回路１１０は、パルサーおよびプラズマシステム１００から取り除かれ、抵抗出力段２２０に置き換えられる。

【００６４】

抵抗出力段２２０は、当該技術分野で公知の任意の抵抗出力段を含んでもよい。例えば、抵抗出力段２２０は、「ＨＩＧＨ　ＶＯＬＴＡＧＥ　ＲＥＳＩＳＴＩＶＥ　ＯＵＴＰＵＴ　ＳＴＡＧＥ　ＣＩＲＣＵＩＴ」と題する米国特許出願第１６／１７８，５３８号に記載の任意の抵抗出力段を含むことができ、これは、あらゆる目的のためにその全体が本開示に組み込まれる。

【００６５】

例えば、抵抗出力段２２０は、インダクタＬ１１、抵抗器Ｒ１０、抵抗器Ｒ１１、およびコンデンサＣ１１を含むことができる。いくつかの実施形態では、インダクタＬ１１は、約５μＨ～約２５μＨのインダクタンスを含むことができる。いくつかの実施形態では、抵抗器Ｒ１１は、約５０Ω～約２５０Ωの抵抗を含むことができる。いくつかの実施形態では、抵抗器Ｒ１０は、抵抗出力段２２０に浮遊抵抗を含むことができる。

【００６６】

いくつかの実施形態では、抵抗器Ｒ１１は、直列および／または並列に配置される複数の抵抗器を含むことができる。コンデンサＣ１１は、直列および／または並列配置の抵抗器の静電容量を含む抵抗器Ｒ１１の浮遊容量を表すことができる。浮遊容量Ｃ１１の静電容量は、例えば、５００ｐＦ、２５０ｐＦ、１００ｐＦ、５０ｐＦ、１０ｐＦ、１ｐＦ等未満であってもよい。例えば、浮遊容量Ｃ１１の静電容量は、負荷容量、例えば、１２、１３、および／または１８の静電容量より小さくてもよい。

【００６７】

いくつかの実施形態では、抵抗器Ｒ１１は、負荷（例えば、プラズマシース静電容量）を放電することができる。いくつかの実施形態では、抵抗出力段２２０は、各パルスサイクル中に約１キロワットを超える平均電力を放電するように、および／または各パルスサイクルにおいて１ジュール以下のエネルギーを放電するように構成されることができる。いくつかの実施形態では、抵抗出力段２２０の抵抗器Ｒ１１の抵抗値は、２００Ω未満であることができる。いくつかの実施形態では、抵抗器Ｒ１１は、約２００ｐＦ未満の合成容量を有する、直列または並列に配置された複数の抵抗器を備えることができる（例えば、１１１）。

【００６８】

いくつかの実施形態では、抵抗出力段２２０は、負荷の電圧波形の形状を制御するために使用できる回路素子の集合を含むことができる。いくつかの実施形態では、抵抗出力段２２０は、受動素子（例えば、抵抗器、コンデンサ、インダクタ等）のみを含むことができる。いくつかの実施形態では、抵抗出力段２２０は、受動回路素子だけでなく、能動回路素子（例えば、スイッチ）を含むことができる。いくつかの実施形態では、抵抗出力段２２０を使用して、例えば、電圧波形の立ち上がり時間および／または電圧波形の立ち下

がり時間を制御することができる。

【００６９】

いくつかの実施形態では、抵抗出力段２２０は、容量性負荷（例えば、ウェーハおよび／またはプラズマ）を放電することができる。例えば、これらの容量性負荷は、小さい静電容量（例えば、約１０ｐＦ、１００ｐＦ、５００ｐＦ、１ｎＦ、１０ｎＦ、１００ｎＦ等）を有することができる。

【００７０】

いくつかの実施形態では、抵抗出力段２２０は、高いパルス電圧（例えば、１ｋＶ、１０ｋＶ、２０ｋＶ、５０ｋＶ、１００ｋＶ等を超える電圧）、および／または高周波数（例えば、１ｋＨｚ、１０ｋＨｚ、１００ｋＨｚ、２００ｋＨｚ、５００ｋＨｚ、１ＭＨｚ等を超える周波数）、および／または約４００ｋＨｚ、０．５ＭＨｚ、２．０ＭＨｚ、４．０ＭＨｚ、１３．５６ＭＨｚ、２７．１２ＭＨｚ、４０．６８ＭＨｚ、５０ＭＨｚ等の周波数を有するパルスを有する回路で使用されることができる。

【００７１】

いくつかの実施形態では、抵抗出力段２２０は、高平均電力、高ピーク電力、高速立ち上がり時間および／または高速立ち下がり時間を処理するように選択されてもよい。例えば、平均電力定格は約０．５ｋＷ、１．０ｋＷ、１０ｋＷ、２５ｋＷ等を超える可能性があり、および／またはピーク電力定格は約１ｋＷ、１０ｋＷ、１００ｋＷ、１ＭＷ等を超える可能性がある。

【００７２】

いくつかの実施形態では、抵抗出力段２２０は、直列または並列の受動素子のネットワークを含むことができる。例えば、抵抗出力段２２０は、直列の抵抗器、コンデンサ、およびインダクタを含むことができる。別の実施例として、抵抗出力段２２０は、インダクタと並列のコンデンサ、および抵抗器と直列のコンデンサ－インダクタの組み合わせを含むことができる。例えば、Ｌ１１は、整流器から電圧が出ている場合に大きなエネルギーが抵抗出力段２２０に注入されないように十分な大きさが選択されることができる。Ｌ／Ｒ時間で、負荷内の好適なコンデンサがＲＦ周波数よりも速く放電できるように、Ｒ１０およびＲ１１の値は選択されることができる

【００７３】

いくつかの実施形態では、パルサーおよびプラズマシステム１００または電力システム２００のいずれかのパルサー段１０１は、スナバ回路を含むことができる。いくつかの実施形態では、スナバ回路は、スナバコンデンサＣ５を含むことができる。いくつかの実施形態では、スナバ回路は、スナバコンデンサＣ５およびスナバ抵抗器Ｒ３を含むことができる。いくつかの実施形態では、スナバ回路は、スナバコンデンサＣ５、スナバインダクタＬ３、およびスナバ抵抗器Ｒ３を含むことができる。

【００７４】

いくつかの実施形態では、スナバ回路は、スナバ抵抗器Ｒ３を含んでもよく、および／またはスナバインダクタＬ３は、スナバダイオードＤ４との並列回路に配置されてもよい。スナバインダクタＬ３およびスナバ抵抗器Ｒ３とスナバダイオードＤ４との配置は、スナバコンデンサＣ５と直列に配置されることができる。いくつかの実施形態では、スナバ抵抗器Ｒ３および／またはスナバダイオードＤ４は、スイッチＳ６のコレクタとトランスＴ１の一次巻線との間に配置されることができる。スナバダイオードＤ４を使用して、スイッチング時の過電圧を緩和することができる。大型および／または高速スナバコンデンサＣ５は、スイッチＳ６のエミッタ側またはコレクタ側のいずれかに接続してもよい。フリーホイールダイオードＤ２はまた、スイッチＳ１のエミッタ側に接続してもよい。図に示されていない様々な他の素子が含まれてもよい。一つもしくは複数のスイッチおよびまたは回路を並列または直列に配置することができる。

【００７５】

いくつかの実施形態では、チャンバー内のイオン電流を抑制するために、パルスが終了した後、パルサー段１０１から正の電流を流すことができる。これは、例えば、スナバイ

ンダクタＬ３のインダクタンスを調整することによって達成されることができ（これは、例えば除去されることができる）、スナバ抵抗器Ｒ３の抵抗値および／もしくはスナバコンデンサＣ５の静電容量は、スナバコンデンサＣ５がパルス中に放電することができ、ならびに／または次のパルスの前に完全には充電されない可能性があるような値である。これは、例えば、パルス中に電流が流れるのと同じ方向に減衰電流がエネルギー蓄積コンデンサＣ７および／または電圧源Ｖ１から流出することを可能にすることができる。これにより、ドループを含まない波形形状がウェーハ上に生成される可能性がある。

【００７６】

ドループは、パルサー段１０１によって生成されるパルス間の電圧上昇として現れる場合もある。ドループは、０．２Ｖ／ｎｓ（例えば、静電容量が約５ｎＦでイオン電流が１Ａｍｐのチャックの場合）または１Ｖ／ｎｓ（例えば、静電容量が約５ｎＦでイオン電流が５Ａｍｐのチャックの場合）の電圧上昇で構成される。

【００７７】

ＲＦ発生器１０８は、プラズマチャンバー１０６と電気的に接続してもよい。ＲＦ発生器１０８は、例えば，高周波ＲＦ信号をプラズマチャンバー内に導入することができ、これによりチャンバー内の構成要素からプラズマを生成することができる。

【００７８】

ＲＦ発生器１０８は、カソードに印加されるＲＦ電力を発生させる任意のタイプの装置を含むことができる。ＲＦ発生器１０８は、例えば、ナノ秒パルサー、ハーフブリッジまたはフルブリッジ回路によって駆動される共振システム、ＲＦ増幅器、非線形伝送路、ＲＦプラズマ発生器等を含むことができる。いくつかの実施形態では、ＲＦ発生器１０８は、インピーダンスマッチングネットワークを含むことができる。

【００７９】

いくつかの実施形態では、ＲＦ発生器１０８は、複数の異なるＲＦ周波数、例えば、２ＭＨｚ、１３．５６ＭＨｚ、２７ＭＨｚ、６０ＭＨｚ、および８０ＭＨｚを有するＲＦ電力信号を発生させることができる一つまたは複数のＲＦドライバーを含むことができる。典型的なＲＦ周波数は、例えば、２００ｋＨｚ～８００ＭＨｚの周波数を含むことができる。いくつかの実施形態では、ＲＦ発生器１０８は、プラズマチャンバー内でプラズマを発生および維持することができる。ＲＦ発生器１０８は、例えば、カソード（および／またはアンテナ）にＲＦ信号を供給し、チャンバー内の様々なガスおよび／またはイオンを励起してプラズマを発生させる。

【００８０】

いくつかの実施形態では、ＲＦ発生器１０８は、インピーダンスマッチング回路に接続してもよい、またはインピーダンスマッチング回路を含んでもよく、この回路は、ＲＦ発生器１０８の非標準出力インピーダンスを、５０Ωの同軸ケーブルまたは任意のケーブルの業界標準特性インピーダンスに整合させることができる。

【００８１】

いくつかの実施形態では、ＲＦ発生器１０８は、パルサー段１０１によって生成されるパルスのパルス繰返し周波数よりも高いＲＦ周波数でバーストを生成することができる。

【００８２】

いくつかの実施形態では、パルサーおよびプラズマシステム１００は、フィルターコンデンサ１８５および／またはフィルターインダクタ１８０を含むことができる。フィルターコンデンサ１８５は、例えば、パルサー段１０１からの低周波数信号をフィルタリングすることができる。これらの低周波信号は、例えば、約１００ｋＨｚおよび約１０ＭＨｚ、例えば約１０ＭＨｚの周波数（例えば、スペクトル成分の大部分）を有することができる。フィルターコンデンサ１８５は、例えば、約１ｐＦ～１ｎＦの、例えば約１００ｐＦ未満の値を有することができる。

【００８３】

いくつかの実施形態では、フィルターインダクタ１８０は、例えば、ＲＦ発生器１０８からの高周波信号をフィルタリングすることができる。これらの高周波信号は、例えば、

約１ＭＨｚ～２００ＭＨｚの、例えば約１ＭＨｚまたは１０ＭＨｚを超える周波数を有することができる。フィルターインダクタ１８０は、例えば、約１０ｎＨ～１０μＨの、例えば約１μＨを超える値を有することができる。いくつかの実施形態では、フィルターインダクタ１８０は、その間で低いカップリング容量を有することができる。いくつかの実施形態では、カップリング容量は、１ｎＦ未満であってもよい。

【００８４】

いくつかの実施形態では、フィルターコンデンサ１８５およびフィルターインダクタ１８０のいずれかまたは両方が、ＲＦ発生器１０８によって生成されるパルスを、パルサー段１０１によって生成されるパルスから分離すること（またはその逆）ができる。例えば、フィルターコンデンサ１８５は、パルサー段１０１によって生成されたパルスを、ＲＦ発生器１０８によって生成されたパルスから分離することができる。フィルターインダクタ１８０は、ＲＦ発生器１０８によって生成されたパルスを、パルサー段１０１によって生成されたパルスから分離することができる。

【００８５】

図３は、いくつかの実施形態による、ＲＦ電力なしで（例えば、ＲＦ発生器１０８からのＲＦ信号なしで）電力システムによって生成される二つの波形の例である。この実施例では、チャック波形３０５はチャック電圧（例えば、回路点１２１）であり、ウェーハ波形３１０はウェーハ上で測定される電圧（例えば、回路点１２２）である。この実施例では、スナバ抵抗器Ｒ３の抵抗は７５ｍΩであり、スナバコンデンサＣ５の静電容量は１２μＦであり、パルス幅は１００ｎｓであり、フィルターインダクタ１８０のインダクタンスは、例えば約１００ｎＨであることができる。電圧源Ｖ１によって供給されるＤＣ電圧は５００Ｖである。図に示すように、ウェーハ波形３１０はパルス間でほぼ平坦である。例えば、パルス間で、ウェーハ波形８１０は、１Ｖ／ｎｓ、０．５Ｖ／ｎｓ、０．２Ｖ／ｎｓ、０．１Ｖ／ｎｓ等よりも小さい傾きを有する。

【００８６】

図４は、いくつかの実施形態による、（例えば、ＲＦ発生器１０８からのＲＦ信号を有する）ＲＦ電力を有する電力システムによって生成される二つの波形の例である。この実施例では、チャック波形４０５はチャック電圧（例えば、回路点１２１）であり、ウェーハ波形４１０はウェーハ上（例えば、回路点１２２）で測定された電圧である。この実施例では、スナバ抵抗器Ｒ３の抵抗は７５ｍΩであり、スナバコンデンサＣ５の静電容量は１２μＦであり、パルス幅は１００ｎｓであり、フィルターインダクタ１８０のインダクタンスは約１００ｎＨである。電圧源Ｖ１によって供給されるＤＣ電圧は５００Ｖである。図に示すように、ウェーハ波形４１０はパルス間でほぼ平坦である。ウェーハ波形４１０は、例えば、連続するパルス間の変化が１Ｖ／ｎｓ未満であるより小さい連続パルス変化によって変化する可能性がある。

【００８７】

図５は、いくつかの実施形態による、ＲＦ電力なしで（例えば、ＲＦ発生器１０８からのＲＦ信号なしで）電力システムによって生成される二つの波形の例である。この実施例では、チャック波形５０５はチャック電圧（例えば、回路点１２１）であり、ウェーハ波形５１０はウェーハ上（例えば、回路点１２２）で測定された電圧である。この実施例では、スナバ抵抗器Ｒ３の抵抗は１０ｍΩであり、スナバコンデンサＣ５の静電容量は３５μＦであり、パルス幅は１５０ｎｓであり、フィルターインダクタ１８０のインダクタンスは約０ｎＨである。電圧源Ｖ１によって供給されるＤＣ電圧は７５０Ｖである。図に示すように、ウェーハ波形５１０はパルス間でほぼ平坦である。例えば、パルス間で、ウェーハ波形５１０は、１Ｖ／ｎｓ、０．５Ｖ／ｎｓ、０．２Ｖ／ｎｓ、０．１Ｖ／ｎｓ等よりも小さい傾きを有する。

【００８８】

図６は、いくつかの実施形態による、（例えば、ＲＦ発生器１０８からのＲＦ信号を有する）ＲＦ電力を有する電力システムによって生成される二つの波形の例である。この実施例では、チャック波形６０５はチャック電圧（例えば、回路点１２１）であり、ウェー

ハ波形６１０はウェーハ上（例えば、回路点１２２）で測定された電圧である。この実施例では、スナバ抵抗器Ｒ３の抵抗は１０ｍΩであり、スナバコンデンサＣ５の静電容量は３５μＦであり、パルス幅は１５０ｎｓであり、フィルターインダクタ１８０のインダクタンスは約０ｎＨである。電圧源Ｖ１によって供給されるＤＣ電圧は７５０Ｖである。図に示すように、ウェーハ波形６１０はパルス間でほぼ平坦である。例えば、パルス間で、ウェーハ波形６１０は、１Ｖ／ｎｓ、０．５Ｖ／ｎｓ、０．２Ｖ／ｎｓ、０．１Ｖ／ｎｓ等よりも小さい傾きを有する。

【００８９】

図７は、いくつかの実施形態による、ＲＦ電力なしで（例えば、ＲＦ発生器１０８からのＲＦ信号なしで）電力システムによって生成される二つの波形の例である。この実施例では、チャック波形７０５はチャック電圧（例えば、回路点１２１）であり、ウェーハ波形７１０はウェーハ上（例えば、回路点１２２）で測定された電圧である。この実施例では、スナバ抵抗器Ｒ３の抵抗は１０ｍΩであり、スナバコンデンサＣ５の静電容量は３５μＦであり、パルス幅は２５０ｎｓであり、フィルターインダクタ１８０のインダクタンスは約０ｎＨである。電圧源Ｖ１によって供給されるＤＣ電圧は７００Ｖである。図に示すように、ウェーハ波形７１０はパルス間でほぼ平坦である。例えば、パルス間で、ウェーハ波形７１０は、１Ｖ／ｎｓ、０．５Ｖ／ｎｓ、０．２Ｖ／ｎｓ、０．１Ｖ／ｎｓ等よりも小さい傾きを有する。

【００９０】

図８は、いくつかの実施形態による、（例えば、ＲＦ発生器１０８からのＲＦ信号を有する）ＲＦ電力を有する電力システムによって生成される二つの波形の例である。この実施例では、チャック波形８０５はチャック電圧（例えば、回路点１２１）であり、ウェーハ波形８１０はウェーハ上（例えば、回路点１２２）で測定された電圧である。この実施例では、スナバ抵抗器Ｒ３の抵抗は１０ｍΩであり、スナバコンデンサＣ５の静電容量は３５μＦであり、パルス幅は２５０ｎｓであり、フィルターインダクタ１８０のインダクタンスは約０ｎＨである。電圧源Ｖ１によって供給されるＤＣ電圧は８００Ｖである。図に示すように、ウェーハ波形８１０はパルス間でほぼ平坦である。例えば、パルス間で、ウェーハ波形８１０は、１Ｖ／ｎｓ、０．５Ｖ／ｎｓ、０．２Ｖ／ｎｓ、０．１Ｖ／ｎｓ等よりも小さい傾きを有する。

【００９１】

図９は、いくつかの実施形態による、システムなしにナノ秒パルサーによって生成されるドループ補償有無の波形を並べて表示した例である。この実施例では、チャック波形９０５はドループ補償なしのチャッキング電圧であり、チャッキング波形９１５はドループ補償ありのチャッキング電圧である。この実施例では、ウェーハ波形９１０はドループ補償なしのチャッキング電圧であり、ウェーハ波形９２０はドループ補償ありのチャッキング電圧である。この実施例では、ドループ補償なしの場合、スナバ抵抗器Ｒ３の抵抗値は１．２５Ω、スナバコンデンサＣ５の静電容量は２μＦであり、ドループ補償ありの場合、スナバ抵抗器Ｒ３は７５Ωに低下し、スナバコンデンサＣ５の静電容量は１２μＦである。

【００９２】

図１０Ａは、いくつかの実施形態による、ドループ補償なしのウェーハ電位のヒストグラムである。図１０Ｂは、いくつかの実施形態による、ドループ補償ありのウェーハ電位のヒストグラムである。

【００９３】

図１１は、いくつかの実施形態による、プラズマチャンバー１０６を駆動するドループ補償回路１６５を有する電力システム１１００の回路図である。いくつかの実施形態では、ドループ補償回路１６５は、クローバーダイオード１３０およびドループコンデンサ１７０を含むことができる。ドループコンデンサ１７０は、約１ｎＦ～約１００ｎＦのコンデンサを有することができる。この実施例では、ドループコンデンサ１７０の追加により、クローバーダイオード１３０およびエネルギー回収回路１１０を通って流れる電流は、

ドループコンデンサ１７０の両端間の電圧変化を誘導し、降下を打ち消すことができる。ドループコンデンサ１７０は、ドループコンデンサ１７０が充電されて低下がなくなるまで、電流の流れを制限することができる。スイッチ１７１は、パルス中にドループコンデンサ１７０から接地に電荷を放電するために使用されることができる。スイッチ１７１は、例えば、同じ信号を使用して、スイッチ１７１と同じスイッチング周波数および／または周期で切り替えられることができる。例えば、スイッチ１７１が閉じている場合、パルサー段１０１がパルスを発し、スイッチ１７１が閉じてドループコンデンサ１７０を放電する。

【００９４】

いくつかの実施形態では、電源１７４は、必要に応じて、ＤＣオフセットまたはバイアスを可能にすることができる。いくつかの実施形態では、ドループコンデンサ１７０から電荷が放電される場合、電源１７４も充電されることができる

【００９５】

いくつかの実施形態では、インダクタ１７２は電流制限インダクタであってもよい。インダクタ１７２は、例えば、約１０ｎＨ～約５００ｎＨのインダクタンスを有してもよい。ダイオード１７３および／またはダイオード１７５は、クローバーダイオードであってもよい。ダイオード１７５は、例えば、スイッチ１７１が開いている場合、電流が流れることを可能にすることができ、電圧スパイクが接地に流れることを可能にすることができる。

【００９６】

いくつかの実施形態では、インダクタ１７２、ダイオード１７３および／またはダイオード１７５を、抵抗器に置き換えてもよい。

【００９７】

スイッチ１７１は、高周波で高電圧を切り替えることができる任意のタイプのスイッチを含むことができる。いくつかの実施形態では、スイッチ１７１は、「ＨＩＧＨ　ＶＯＬＴＡＧＥ　ＳＷＩＴＣＨ　ＦＯＲ　ＮＡＮＯＳＥＣＯＮＤ　ＰＵＬＳＩＮＧ」と題する米国特許出願第６２／７１７，６３７号、および／または「ＨＩＧＨ　ＶＯＬＴＡＧＥ　ＳＷＩＴＣＨ　ＦＯＲ　ＮＡＮＯＳＥＣＯＮＤ　ＰＵＬＳＩＮＧ」と題する米国特許出願第１６／１７８，５６５号に記載されている高電圧スイッチを含み、これはあらゆる目的のためにその全体が本開示に組み込まれる。

【００９８】

いくつかの実施形態では、エネルギー回収回路１１０は、取り除かれるか、または一次シンク回路および／もしくは抵抗出力段と置き換えられることができる。いくつかの実施形態では、エネルギー回収回路１１０は、エネルギー回収インダクタ１１５の後に接地に接続してもよい。

【００９９】

この実施例では、ＤＣバイアス回路１０４は、バイアス補償を全く含まない。ＤＣバイアス回路１０４は、例えば出力電圧を正または負のどちらかにバイアスすることができるオフセット供給電圧Ｖ５を含む。いくつかの実施形態では、オフセット供給電圧Ｖ５は、ウェーハ電圧とチャック電圧との間の電位を変化させるために調整されることができる。いくつかの実施形態では、オフセット供給電圧Ｖ５は、約±５ｋＶ、±４ｋＶ、±３ｋＶ、±２ｋＶ、±１ｋＶ等のｋＶの電圧を有することができる。ＤＣバイアス回路１０４は、電力システム１１００に含まれても含まれなくてもよい。

【０１００】

電力システム１１００は、ＲＦ発生器１０８およびフィルターインダクタ１８０を含むことができる。フィルターインダクタ１８０は、例えば、ＲＦ発生器１０８からの高周波信号をフィルタリングすることができる。これらの高周波信号は、例えば、約１ＭＨｚ～２００ＭＨｚの、例えば約１ＭＨｚまたは１０ＭＨｚを超える周波数を有することができる。フィルターインダクタ１８０は、例えば、約１０ｎＨ～１０μＨの、例えば約１μＨを超える値を有することができる。いくつかの実施形態では、フィルターインダクタ１８

０は、その間で低いカップリング容量を有することができる。いくつかの実施形態では、カップリング容量は、１ｎＦ未満であってもよい。

【０１０１】

図１２は、いくつかの実施形態による、プラズマチャンバー１０６を駆動するドループ補償回路１９０を有するパルサーおよびプラズマシステム１２００の回路図である。ドループ補償回路１９０は、負のＤＣ電源１８２、スイッチ１８１、および限流抵抗器１８３または限流インダクタ１８４を含むことができる。限流抵抗器１８３は、例えば、約０．１Ω～約５０Ω、または約１０ｍΩ～約５００Ωの抵抗を有することができる。限流インダクタ１８４は、例えば、約１ｎＨ～約１００ｎＨのインダクタンスを有することができる。スイッチ１８１が閉じている場合、負のＤＣ電源１８２は、電圧を引き下げてドループを除去および制限することができる。

【０１０２】

スイッチ１８１は、高周波で高電圧を切り替えることができる任意のタイプのスイッチを含むことができる。いくつかの実施形態では、スイッチ１８１は、「ＨＩＧＨ　ＶＯＬＴＡＧＥ　ＳＷＩＴＣＨ　ＦＯＲ　ＮＡＮＯＳＥＣＯＮＤ　ＰＵＬＳＩＮＧ」と題する米国特許出願第６２／７１７，６３７号、および／または「ＨＩＧＨ　ＶＯＬＴＡＧＥ　ＳＷＩＴＣＨ　ＦＯＲ　ＮＡＮＯＳＥＣＯＮＤ　ＰＵＬＳＩＮＧ」と題する米国特許出願第１６／１７８，５６５号に記載されている高電圧スイッチを含み、これはあらゆる目的のためにその全体が本開示に組み込まれる。

【０１０３】

いくつかの実施形態では、パルサーおよびプラズマシステム１２００は、抵抗出力段２０ではなく、エネルギー回収回路（例えば、エネルギー回収回路１１０）を含むことができる。

【０１０４】

パルサーおよびプラズマシステム１２００は、ＲＦ発生器１０８およびフィルターインダクタ１８０を含むことができる。フィルターインダクタ１８０は、例えば、ＲＦ発生器１０８からの高周波信号をフィルタリングすることができる。これらの高周波信号は、例えば、約１ＭＨｚ～２００ＭＨｚの、例えば約１ＭＨｚまたは１０ＭＨｚを超える周波数を有することができる。フィルターインダクタ１８０は、例えば、約１０ｎＨ～１０μＨの、例えば約１μＨを超える値を有することができる。いくつかの実施形態では、フィルターインダクタ１８０は、その間で低いカップリング容量を有することができる。いくつかの実施形態では、カップリング容量は、１ｎＦ未満であってもよい。

【０１０５】

図１３は、いくつかの実施形態による、パルサーおよびプラズマシステム１３００の回路図である。パルサーおよびプラズマシステム１３００は、例えば、フルブリッジ構成で示されているが、ハーフブリッジ構成であってもよいパルスドライバー１３０５、ドループ補償回路１３１０、トランス１３４５、および電圧源Ｖ１を含むことができる。ドループ補償回路１３１０は、例えば、電圧ドループを軽減または減少させることができる。

【０１０６】

この実施例では、パルサーおよびプラズマシステム１３００は、パルスドライバー１３０５を含むことができる。パルスドライバー１３０５は、例えば、ハーフブリッジドライバーまたはフルブリッジドライバーであってもよい。パルスドライバー１３０５は、ＤＣ電圧源（例えば、容量性源、ＡＣ－ＤＣコンバータ等）であってもよい電圧源Ｖ１を含むことができる。いくつかの実施形態では、パルスドライバー１３０５は、四つのブリッジスイッチ６６１、６６２、６６４、６６４を含んでもよい。いくつかの実施形態では、パルスドライバー１３０５は、直列または並列の複数のスイッチ６６１、６６２、６６４、および６６４を含むことができる。これらのスイッチ６６１、６６２、６６４、および６６４は、例えば、任意のタイプの固体スイッチ、例えば、ＩＧＢＴ、ＭＯＳＦＥＴ、ＳｉＣ　ＭＯＳＦＥＴ、ＳｉＣ接合トランジスタ、ＦＥＴ、ＳｉＣスイッチ、ＧａＮスイッチ、光導電スイッチ等を含むことができる。これらのスイッチ６６１、６６２、６６４、お

よび６６４は、高周波数で切り替えることができ、ならびに／または高電圧パルスを生成することができる。これらの周波数は、例えば、約４００ｋＨｚ、０．５ＭＨｚ、２．０ＭＨｚ、４．０ＭＨｚ、１３．５６ＭＨｚ、２７．１２ＭＨｚ、４０．６８ＭＨｚ、５０ＭＨｚ等の周波数を含むことができる。

【０１０７】

スイッチ６６１、６６２、６６４、および６６４の各スイッチは、それぞれのブリッジダイオードと並列に接続することができ、浮遊インダクタンスを含むことができる。いくつかの実施形態では、ブリッジスイッチの浮遊インダクタンスは等しくてもよい。いくつかの実施形態では、ブリッジスイッチの浮遊インダクタンスは、約５０ｎＨ、１００ｎＨ、１５０ｎＨ、５００ｎＨ、１，０００ｎＨ等よりも小さくてもよい。スイッチ（６６１、６６２、６６４、または６６４）とそれぞれのブリッジダイオードとの組み合わせは、それぞれのブリッジインダクタと直列に接続することができる。例えば、スイッチ６６３および６６４に関連付けられたブリッジインダクタは、接地に接続することができる。例えば、スイッチ６６１に関連付けられたブリッジインダクタは、ブリッジスイッチ６６４と、ならびにドループ補償回路１３１０の抵抗器１３１５および／またはインダクタ１３１６とに電気的に接続することができる。また、スイッチ６６２に関連付けられたブリッジインダクタは、例えば、ブリッジスイッチ６６３およびドループ補償回路１３１０のダイオード１３１３と電気的に接続することができる。

【０１０８】

パルスドライバー１３０５内のスイッチが共振周波数ｆｒｅｓｏｎａｎｔで切り替えられる場合、トランス１３４５の出力電圧が増幅される。いくつかの実施形態では、共振周波数は、約４００ｋＨｚ、０．５ＭＨｚ、２．０ＭＨｚ、４．０ＭＨｚ、１３．５６ＭＨｚ、２７．１２ＭＨｚ、４０．６８ＭＨｚ、５０ＭＨｚ等である。

【０１０９】

いくつかの実施形態では、トランス１３４５（またはトランスＴ１）は、「Ｈｉｇｈ Ｖｏｌｔａｇｅ Ｔｒａｎｓｆｏｒｍｅｒ」と題する米国特許出願第１５／３６５，０９４号に開示されているようなトランスを含むことができ、これはあらゆる目的のためにその全体が本開示に組み込まれる。

【０１１０】

例えば、ブリッジスイッチ６６１を開閉する信号Ｓｉｇ１のデューティサイクルを変更すること、ブリッジスイッチ６６２を開閉する信号Ｓｉｇ２のデューティサイクルを変更すること、ブリッジスイッチ６６４を開閉する信号Ｓｉｇ３のデューティサイクルを変更すること、およびブリッジスイッチ６６３を開閉する信号Ｓｉｇ４のデューティサイクルを変更することによって、スイッチのデューティサイクルを調節することができる。

【０１１１】

いくつかの実施形態では、パルスドライバー１３０５内の各ブリッジスイッチ６６１、６６２、６６４、または６６４は、独立して、または一つもしくは複数の他のスイッチと連動して切り替えられることができる。例えば、信号Ｓｉｇ１は、信号Ｓｉｇ３と同じ信号であってもよい。別の例として、信号Ｓｉｇ２は、信号Ｓｉｇ４と同じ信号であってもよい。別の例として、各信号は独立していてもよく、各ブリッジスイッチ６６１、６６２、６６４、または６６４を独立してまたは別々に制御してもよい。

【０１１２】

いくつかの実施形態では、ドループ補償回路１３１０の出力は、トランス１３４５の二次側またはトランス１３４５の一次側に配置されることができるブロッキングダイオードを含むことができる半波整流器に接続することができる。

【０１１３】

いくつかの実施形態では、ドループ補償回路１３１０の出力は、抵抗出力段、例えば、図１２に示される抵抗出力段２２０に接続することができる。抵抗出力段は、当該技術分野で公知の任意の抵抗出力段を含んでもよい。例えば、抵抗出力段は、「ＨＩＧＨ ＶＯＬＴＡＧＥ ＲＥＳＩＳＴＩＶＥ ＯＵＴＰＵＴ ＳＴＡＧＥ ＣＩＲＣＵＩＴ」と題する

米国特許出願第１６／１７８，５３８号に記載の任意の抵抗出力段を含むことができ、これは、あらゆる目的のためにその全体が本開示に組み込まれる。

【０１１４】

パルサーおよびプラズマシステム１３００は、従来のマッチングネットワーク、例えば、５０Ωマッチングネットワークも、外部マッチングネットワークもスタンドアロンマッチングネットワークも含まない。実際、本文書内で説明されている実施形態は、ウェーハチャンバーに印加されるスイッチング電力を調整するために、５０Ωのマッチングネットワークを必要としない。さらに、本文書内で説明される実施形態は、従来のマッチングネットワークなしで可変出力インピーダンスＲＦ発生器を提供する。これにより、プラズマチャンバーによって引き出される電力を急速に変化させることができる。通常、このマッチングネットワークの調整には、少なくとも１００μｓ～２００μｓかかる。いくつかの実施形態では、電力変化は、一つまたは二つのＲＦサイクル、例えば、４００ｋＨｚで２．５μｓ～５．０μｓ内で発生する可能性がある。

【０１１５】

いくつかの実施形態では、パルスドライバー１３０５は、示すようにフルブリッジトポロジー、または二つのスイッチを有するハーフブリッジトポロジーに配置されたスイッチを備えることができる。スイッチ６６１、６６２、６６３、６６４は、エネルギー蓄積コンデンサＣ７内に蓄積されたＤＣ電荷を切り替えることができる。ＤＣ電圧源（例えば、容量性電源、ＡＣ－ＤＣコンバータ等）であることができる電圧源Ｖ１は、エネルギー蓄積コンデンサＣ７を充電することができる。パルスドライバー１３０５は、例えば、ドループ補償回路１３１０の共振周波数と実質的に等しいか、または実施的に等しくないパルス周波数でドループ補償回路１３１０を駆動してもしなくてもよい。

【０１１６】

いくつかの実施形態では、パルスドライバー１３０５を、二つのスイッチを備えるハーフブリッジトポロジーに置き換えることができる。

【０１１７】

ドループ補償回路１３１０は、ダイオード１３１３、インダクタ１３１２、インダクタ１３１４、インダクタ１３１６、抵抗器１３１５、および／または抵抗器１３１１を含むことができる。ダイオード１３１３は、パルスドライバー１３０５とトランス１３４５との間で順バイアスされることができる。抵抗器１３１５は、例えば、非常に小さくてもよい。例えば、抵抗器１３１５は、約１Ω未満、例えば、約５０、２５、１０、５mΩ等の抵抗を有することができる。別の例として、抵抗器１３１５は、０Ωまで低くすることができる。例えば、抵抗器１３１１は非常に小さくてもよい。例えば、抵抗器１３１１は、約５Ω未満、例えば、約１０、５、２、１、０．７５、０．５、０．２５Ω等の抵抗を有することができる。インダクタ１３１６および／またはインダクタ１３１４は、例えば、約１００ｎＨ未満、例えば、約７５、５０、２５、１０、５ｎＨ等のインダクタンスを有することができる。

【０１１８】

インダクタ１３１２は、約５０Ｈ未満、例えば、約２５、１０、５、２．５、１Ｈ等のインダクタンスを有することができる。

【０１１９】

パルサーおよびプラズマシステム１３００は、ＲＦ発生器１０８およびフィルターインダクタ１８０を含むことができる。フィルターインダクタ１８０は、例えば、ＲＦ発生器１０８からの高周波信号をフィルタリングすることができる。これらの高周波信号は、例えば、約１ＭＨｚ～２００ＭＨｚの、例えば約１ＭＨｚまたは１０ＭＨｚを超える周波数を有することができる。フィルターインダクタ１８０は、例えば、約１０ｎＨ～１０μＨの、例えば約１μＨを超える値を有することができる。いくつかの実施形態では、フィルターインダクタ１８０は、その間で低いカップリング容量を有することができる。いくつかの実施形態では、カップリング容量は、１ｎＦ未満であってもよい。

【０１２０】

図１４は、パルサーならびに、パルサーとプラズマシステム１３００をエネルギー回収回路１１０で組み合わせたプラズマシステム１４００の回路図である。別の例として、エネルギー回収回路１１０をパルサーおよびプラズマシステム１３００と組み合わせる代わりに、ドループ補償回路１９０をパルサーおよびプラズマシステム１３００と組み合わせてもよい。

【０１２１】

他に断りがない限り、用語「実質的に」は、言及された値の５％または１０％以内、または製造公差内であることを意味する。他に断りがない限り、用語「約」は、言及された値の５％または１０％以内、または製造公差内であることを意味する。

【０１２２】

接続詞「または」は包括的である。

【０１２３】

用語「第一」、「第二」、「第三」等は、それぞれの要素を区別するために使用され、他に断りがない限り、または順序が明示的に説明または要求されない限り、これらの要素の特定の順序を示すためには使用されない。

【０１２４】

特許請求の範囲に記載された主題を完全に理解するために、多数の具体的な詳細が記載されている。しかし、当業者は、特許請求の範囲に記載された主題がこれらの具体的な詳細なしで実施されることができることを理解するであろう。他の例では、特許請求の範囲に記載された主題を不明瞭にしないように、当業者に公知であろう方法、装置、またはシステムは詳細には説明されていない。

【０１２５】

開示された方法の実施形態は、このようなコンピューティングデバイスの操作で実行されてもよい。上記の例に示されているブロックの順序を変更する、例えば、ブロックを並べ替える、組み合わせる、および／またはサブブロックに分割することができる。いくつかのブロックまたはプロセスは、並列に実施されることができる。

【０１２６】

「適応される」または「構成される」の使用は、追加のタスクまたは工程を実行するように適応または構成されたデバイスを排除しない、オープンで包括的な言語を意味する。さらに、「に基づく」の使用は、一つまたは複数の列挙された条件または値に「基づく」プロセス、工程、計算、またはその他の処理が、実際には、列挙されたものを超える追加の条件または値に基づく場合があるという点で、オープンで包括的であることを意味する。含まれている見出し、リスト、および番号は、説明を簡単にするためのみのものであり、限定することを意図したものではない。

【０１２７】

本主題は、その特定の実施形態に関して詳細に説明されてきたが、当業者は、前述の理解に達すると、このような実施形態の変更、変形、および等価物を容易に作製できることが理解されるであろう。したがって、本開示は、限定ではなく例として提示されたものであり、当業者には容易に明らかであるように、本主題へのこのような変更、変形および／または追加を含めることを排除しないことは言うまでもない。

（付記１）

電源システムであって、

ＲＦ周波数を有するＲＦ信号を生成するＲＦドライバーと、

前記ＲＦ周波数よりも低いパルス繰返し周波数、パルス幅、および２ｋＶを超えるピーク電圧を有する高電圧パルスを生成するナノ秒パルサーであって、前記ナノ秒パルサーが、

約７．５ｍΩ～１．２５Ωの抵抗を有するスナバ抵抗器と、

約２μＦ～３５μＦの静電容量を有するスナバコンデンサと、を含むスナバ回路を備える、ナノ秒パルサーと、

前記ＲＦドライバーと前記プラズマチャンバーとの間に配置されるフィルター回路と、

を備える、電源システム。

（付記２）
前記ナノ秒パルサーが矩形波を生成する、付記１に記載の電源。
（付記３）
前記フィルター回路が、約０～２．５μＨのインダクタンスを有するフィルターインダクタを含む、付記１に記載の電源。
（付記４）
前記電源が、約８００ｎＨ未満の浮遊インダクタンスを有する、付記１に記載の電源。
（付記５）
前記パルス幅が約１００～２５０ｎｓの持続時間を有する、付記１に記載の電源。
（付記６）
前記ＲＦ信号のない二つの連続パルス間の前記電圧が、１Ｖ／ｎｓ未満変化する、付記１に記載の電源。
（付記７）
二つの連続するパルス間の平均電圧が１Ｖ／ｎｓ未満変化する、付記１に記載の電源。
（付記８）
前記電源が、複数の高電圧パルスのそれぞれの間にＲＦ信号を有する波形を出力する、付記１に記載の電源。
（付記９）
半導体処理システムであって、
プラズマチャンバーと、
前記プラズマチャンバーに接続し、前記ＲＦ信号および前記駆動パルスを前記プラズマチャンバー内に導入する、付記１に記載の電源と、を備える、半導体処理システム。
（付記１０）
前記プラズマチャンバーが約２０ｎＨ未満のインダクタンスを有する、付記９に記載の電源。
（付記１１）
前記チャンバーが、約１０ｎＦ未満の静電容量を有するチャックを含む、付記９に記載の電源。
（付記１２）
パルス発生器であって、
２ｋＶを超える電圧を供給する電源と、
トランスであって、
トランスコアと、
前記トランスコアの少なくとも一部の周りに巻き付けられた一次巻線であって、前記一次巻線が第一のリード線および第二のリード線を有する、一次巻線と、
前記トランスコアの少なくとも一部の周りに巻き付けられた二次巻線と、を備えるトランスと、
前記一次巻線の第一のリード線と電気的に接続するドループ補償回路と、
前記ドループ補償回路および前記電源と電気的に接続する第一のスイッチと、
前記一次巻線の前記第二のリード線および前記電源に電気的に接続する第二のスイッチであって、前記第一のスイッチと前記第二のスイッチが異なる時間間隔で開閉する、第二のスイッチと、
矩形波パルスを出力する前記トランスの前記二次巻線と電気的に接続するパルス出力と、を備える、パルス発生器。
（付記１３）
前記パルス出力は、約２ｋＶを超える電圧を有し、および１ｋＨｚを超えるパルス周波数を有するパルスを出力する、付記１２に記載のパルス発生器。
（付記１４）
前記ドループ補償回路は、電流が前記第一のスイッチから前記トランスに向かって流れるようにバイアスされたドループダイオードを含む、付記１２に記載のパルス発生器。

（付記１５）
前記ドループ補償回路が、直列に配置され、前記ドループダイオードの両端に電気的に接続する第一のインダクタおよび第一の抵抗器を含む、付記１４に記載のパルス発生器。
（付記１６）
前記第一のインダクタが約５０μＨ未満のインダクタンスを有する、付記１５に記載のパルス発生器。
（付記１７）
前記第一の抵抗器が約１Ω未満の抵抗を有する、付記１５に記載のパルス発生器。
（付記１８）
前記ドループ回路が、前記ドループダイオードおよび前記一次巻線の前記第一のリード線と電気的に接続する第二のインダクタをさらに備える、付記１５に記載のパルス発生器。
（付記１９）
第二のインダクタが約５０ｎＨ未満のインダクタンスを有する、付記１８に記載のパルス発生器。
（付記２０）
前記第二のスイッチと前記一次巻線の前記第二のリード線との間に直列に配置された第三の抵抗器と第三のインダクタとをさらに備える、付記１８に記載のパルス発生器。
（付記２１）
第三のインダクタが約３５ｎＨ未満のインダクタンスを有する、付記２０に記載のパルス発生器。
（付記２２）
前記第三の抵抗器が約１Ω未満の抵抗を有する、付記２０に記載のパルス発生器。
（付記２３）
パルス発生器であって、
２ｋＶを超える電圧を供給するＤＣ電源と、
トランスであって、
トランスコアと、
前記トランスコアの少なくとも一部の周りに巻き付けられた一次巻線であって、前記一次巻線が第一のリード線および第二のリード線を有する、一次巻線と、
前記トランスコアの少なくとも一部の周りに巻き付けられた二次巻線と、を備えるトランスと、
フルブリッジ構成で配置された複数のスイッチであって、前記複数のスイッチの第一の部分は、前記ドループ補償回路および前記電源に電気的に接続し、前記複数のスイッチの第二の部分は、前記一次巻線の前記第二のリード線および前記電源と電気的に接続し、前記複数のスイッチの前記第一の部分と前記複数のスイッチの前記第二の部分が、異なる時間間隔で開閉される、複数のスイッチと、
前記複数のスイッチの前記第一の部分および／または前記複数のスイッチの前記第二の部分と前記トランスとの間に電気的に配置される減衰回路であって、前記減衰回路が、
前記複数のスイッチの前記第一の部分から第一のリード線に向かってバイアスされたダイオードと、
前記ダイオードと前記第一のリード線との間に配置される第一の抵抗器と、
第一のインダクタと、
前記第一のインダクタと直列に配置され、前記ダイオードの両端に電気的に接続する第二の抵抗器と、を備える、減衰回路と、
約２ｋＶを超える電圧を有し、および１ｋＨｚを超えるパルス周波数を有するパルスを出力する前記トランスの前記二次巻線と電気的に接続するパルス出力と、を備える、パルス発生器。
（付記２４）
第一のインダクタが約３５ｎＨ未満のインダクタンスを有する、付記２３に記載のパルス発生器。

（付記２５）
前記第一の抵抗器が約１Ω未満の抵抗を有する、付記２３に記載のパルス発生器。
（付記２６）
前記第二の抵抗器が約１Ω未満の抵抗を有する、付記２３に記載のパルス発生器。
（付記２７）
前記複数のスイッチの前記第二の部分と前記第二のリード線との間に直列に配置される第二のインダクタおよび第三の抵抗器をさらに備える、付記２３に記載のパルス発生器。
【図面】
【図１】

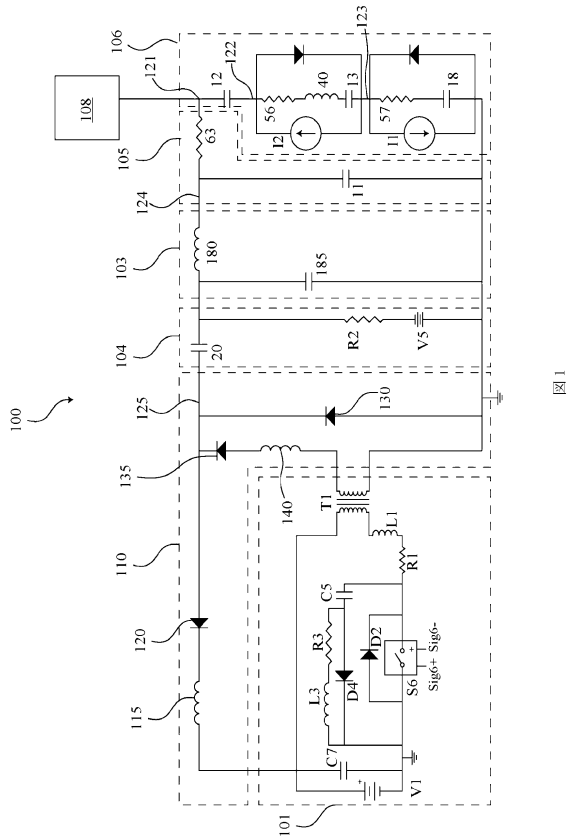


図１

【図２】

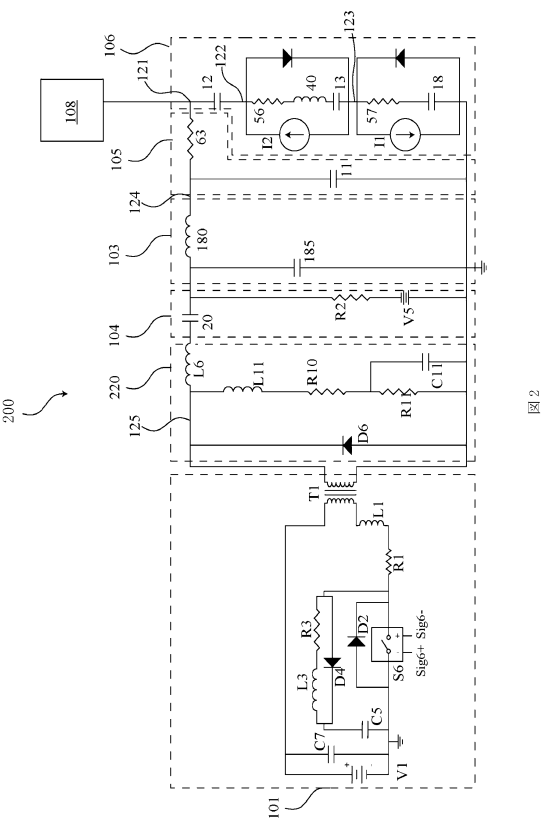


図２

【図３】

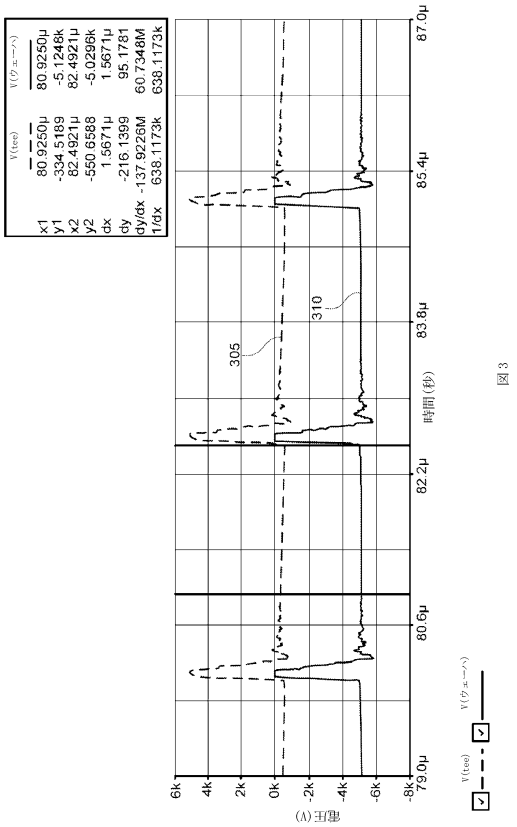


図３

【図４】

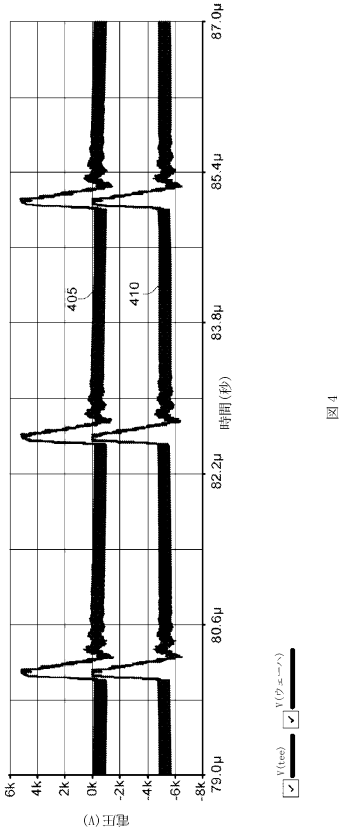


図４

【図５】

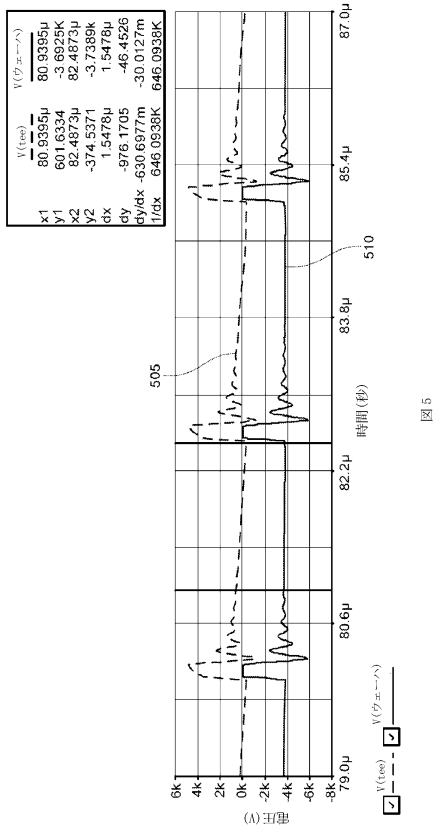


図５

【図６】

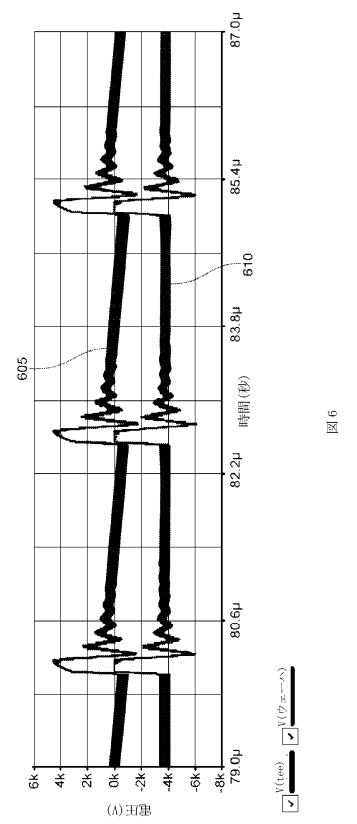


図６

【図７】

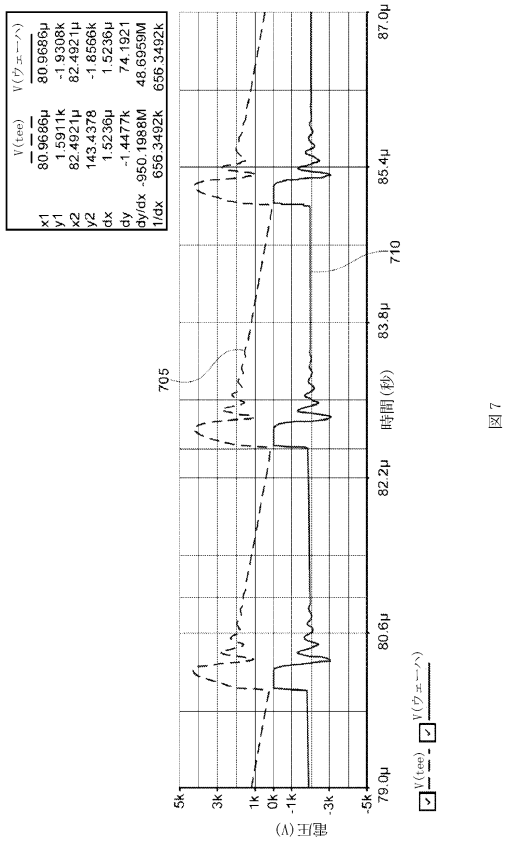


図７

【図８】

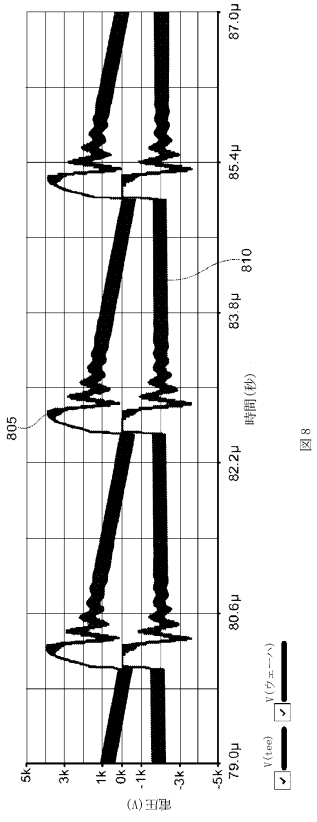


図８

【図９】

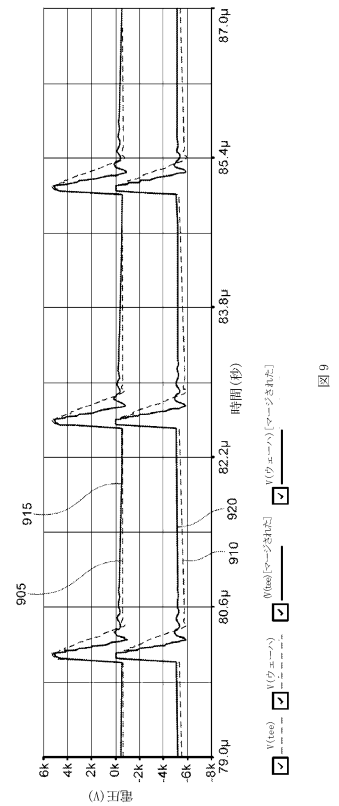


図９

【図１０Ａ】

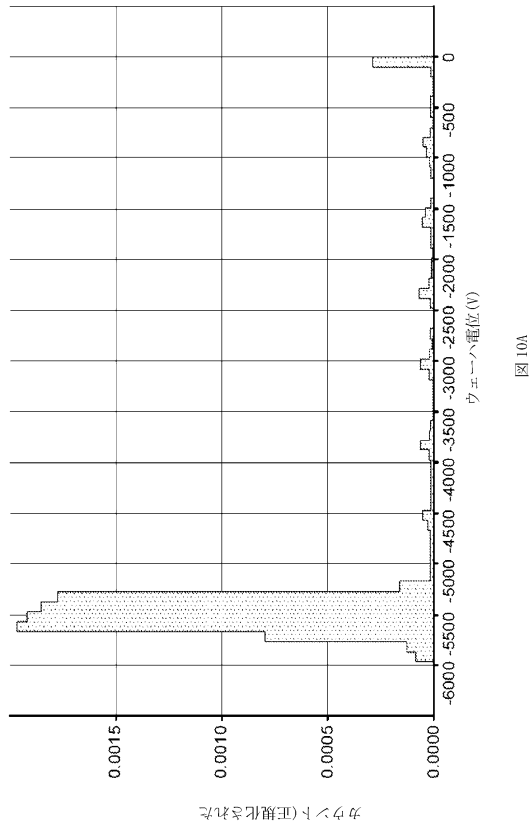


図10A

【図１０Ｂ】

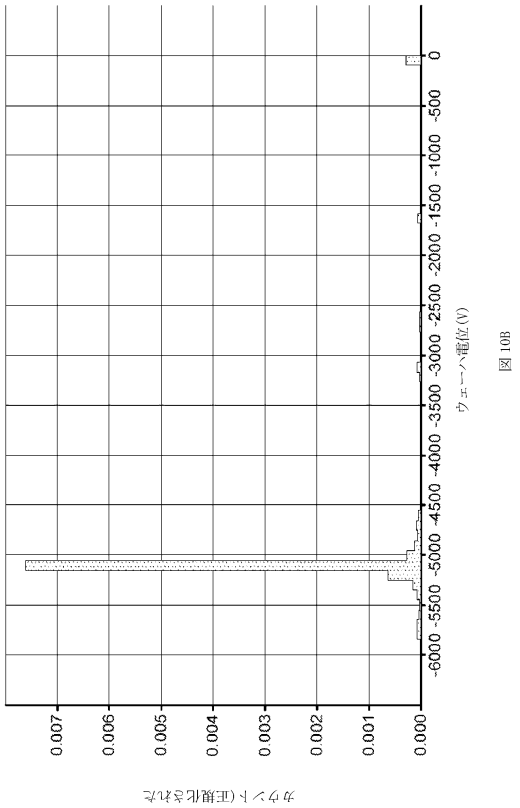


図 10B

【図１１】

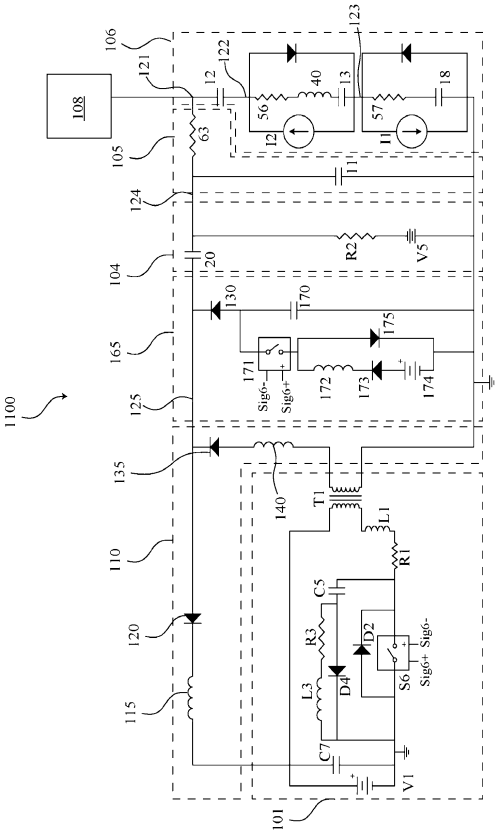


図 11

【図１２】

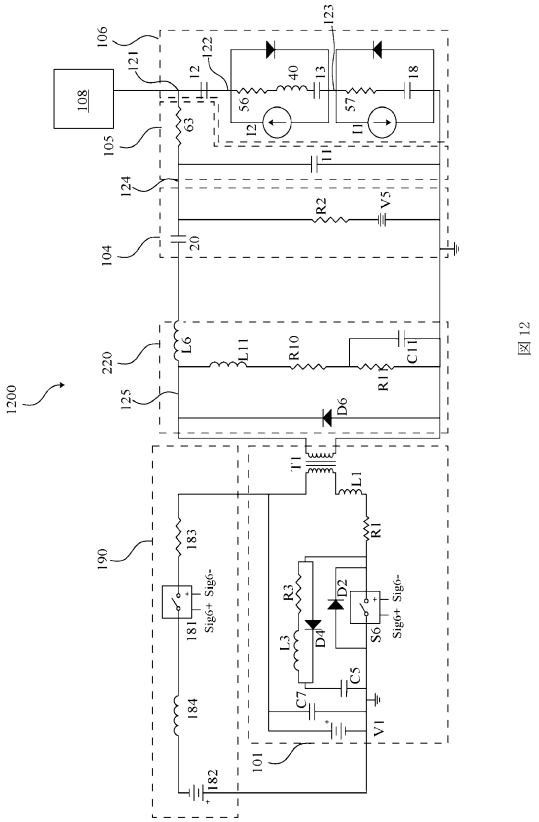


図 12

【図１３】

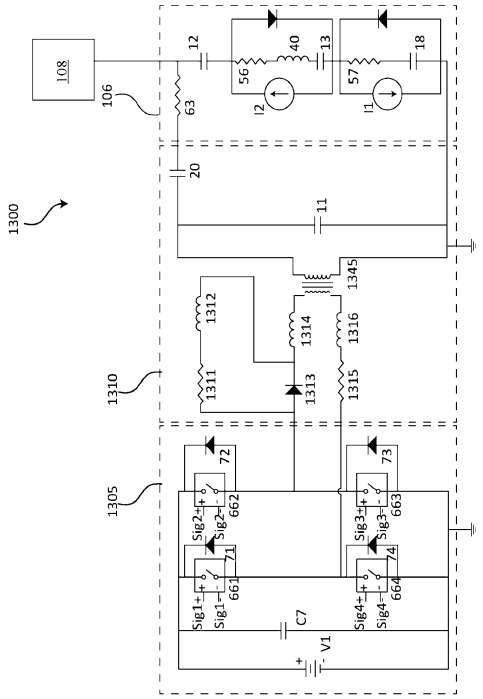


図 13

【図１４】

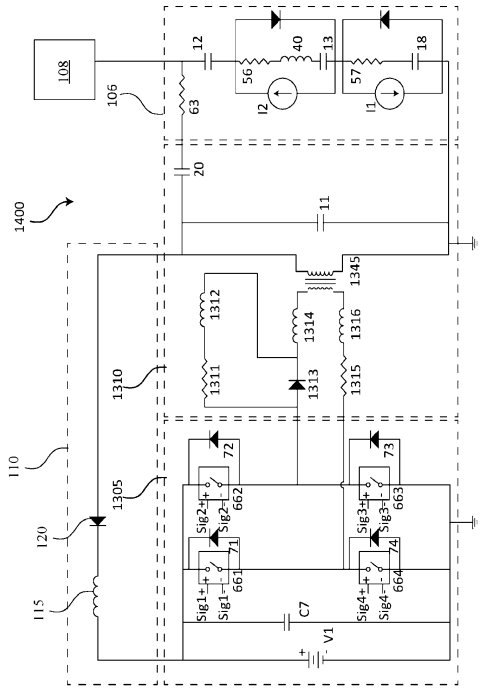

108
106
12
40
13
18
56
57
63
I2
I1
20
11
1400
1345
1312
1314
1316
1310
1311
1313
1315
110
72
73
1305
Sig2+
Sig2−
662
Sig3+
Sig3−
663
120
71
74
Sig1+
Sig1−
661
Sig4+
Sig4−
664
115
C7
V1

図14

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)
アメリカ合衆国 ９８１１９ ワシントン州 シアトル，ウェスタン アベニュー １６９ ダブリュ スイート ２６３
(72)発明者 ミラー，ケネス
アメリカ合衆国 ９８１１９ ワシントン州 シアトル，ウェスタン アベニュー １６９ ダブリュ スイート ２６３
(72)発明者 ジエンバ，ティモシー
アメリカ合衆国 ９８１１９ ワシントン州 シアトル，ウェスタン アベニュー １６９ ダブリュ スイート ２６３
審査官 藤本 加代子
(56)参考文献 米国特許出願公開第２０２０／０１４４０３０（ＵＳ，Ａ１）
米国特許出願公開第２０２０／０１２６７６０（ＵＳ，Ａ１）
特開２００１－１８１８３０（ＪＰ，Ａ）
特開２００９－２６３７７８（ＪＰ，Ａ）
(58)調査した分野 (Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｈ０５Ｈ １／００－１／５４
Ｈ０３Ｈ １／００－３／００
Ｈ０３Ｈ ５／００－７／１３