

(19)日本国特許庁(JP)

(12)公表特許公報(A)

(11)公表番号
特表2024-534990
(P2024-534990A)

(43)公表日 令和6年9月26日(2024.9.26)

(51)国際特許分類	F I	テーマコード (参考)
H 0 5 H 1/46 (2006.01)	H 0 5 H 1/46 R	2 G 0 8 4
H 0 1 L 21/3065(2006.01)	H 0 1 L 21/302 1 0 1 G	4 K 0 3 0
H 0 1 L 21/31 (2006.01)	H 0 1 L 21/302 1 0 1 B	5 F 0 0 4
C 2 3 C 16/509(2006.01)	H 0 1 L 21/31 C	5 F 0 4 5
	C 2 3 C 16/509	
審査請求 未請求 予備審査請求 未請求 (全32頁)		

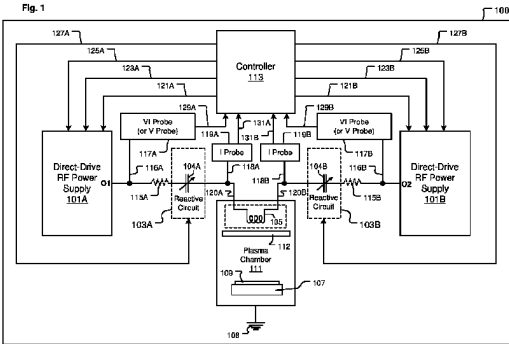
(21)出願番号 特願2024-515615(P2024-515615)	(71)出願人 592010081
(86)(22)出願日 令和4年9月14日(2022.9.14)	ラム リサーチ コーポレーション
(85)翻訳文提出日 令和6年5月10日(2024.5.10)	L A M R E S E A R C H C O R P O R A T I O N
(86)国際出願番号 PCT/US2022/043464	アメリカ合衆国, カリフォルニア 9 4
(87)国際公開番号 WO2023/043795	5 3 8, フレモント, クッシング パー
(87)国際公開日 令和5年3月23日(2023.3.23)	クウェイ 4 6 5 0
(31)優先権主張番号 63/245,773	(74)代理人 110000028
(32)優先日 令和3年9月17日(2021.9.17)	弁理士法人明成国際特許事務所
(33)優先権主張国・地域又は機関 米国(US)	(72)発明者 ドルフリー・ジョン
(81)指定国・地域 AP(BW,GH,GM,KE,LR,LS,MW,MZ,NA, RW,SD,SL,ST,SZ,TZ,UG,ZM,ZW),EA(AM,AZ,BY,KG,KZ,RU,TJ,TM),EP(AL,A T,BE,BG,CH,CY,CZ,DE,DK,EE,ES,FI,FR ,GB,GR,HR,HU,IE,IS,IT,LT,LU,LV,MC, 最終頁に続く	アメリカ合衆国 カリフォルニア州 9 4
	5 3 8 フレモント, クッシング・パー
	クウェイ, 4 6 5 0
	(72)発明者 パターソン・アレクサンダー・ミラー
	アメリカ合衆国 カリフォルニア州 9 4
	最終頁に続く

(54)【発明の名称】 ダイレクトドライブ無線周波電源に対するコイルの対称的結合

(57)【要約】

【解決手段】コイルは、プラズマ処理チャンバのとなり
に配置される。第1のダイレクトドライブ無線周波（R
F）電源は出力を含み、第1の整形増幅矩形波形信号は
出力を通過して伝送される。第1のリアクタンス回路は、
第1のダイレクトドライブRF電源の出力と、コイルの
第1の端との間に接続される。第1のリアクタンス回路
は、コイルの第1の端への途中で第1の整形増幅矩形波
形信号を第1の整形正弦波信号に変換する。第2のダイ
レクトドライブRF電源は出力を含み、第2の整形増幅
矩形波形信号は出力を通過して伝送される。第2のリア
クタンス回路は、第2のダイレクトドライブRF電源の出
力と、コイルの第2の端との間に接続される。第2のリア
クタンス回路は、コイルの第2の端への途中で第2の
整形増幅矩形波形信号を第2の整形正弦波信号に変換す
る。

【選択図】 図 1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

プラズマ処理システムであって、
プラズマ処理チャンバと、

前記プラズマ処理チャンバのとなりに配置され、第 1 の端と第 2 の端とを有するコイルと、

出力を有する第 1 のダイレクトドライブ無線周波電源であって、前記出力を通して第 1 の整形増幅矩形波形信号が伝送される第 1 のダイレクトドライブ無線周波電源と、

前記第 1 のダイレクトドライブ無線周波電源の前記出力と、前記コイルの前記第 1 の端との間に接続された第 1 のリアクタンス回路であって、前記コイルの前記第 1 の端への途中で前記第 1 の整形増幅矩形波形信号を第 1 の整形正弦波信号に変換するように構成されている第 1 のリアクタンス回路と、

出力を有する第 2 のダイレクトドライブ無線周波電源であって、前記出力を通して第 2 の整形増幅矩形波形信号が伝送される第 2 のダイレクトドライブ無線周波電源と、

前記第 2 のダイレクトドライブ無線周波電源の前記出力と、前記コイルの前記第 2 の端との間に接続された第 2 のリアクタンス回路であって、前記コイルの前記第 2 の端への途中で前記第 2 の整形増幅矩形波形信号を第 2 の整形正弦波信号に変換するように構成されている第 2 のリアクタンス回路と、

を含む、プラズマ処理システム。

【請求項 2】

請求項 1 に記載のプラズマ処理システムであって、前記第 1 のダイレクトドライブ無線周波電源と前記第 2 のダイレクトドライブ無線周波電源とは一致する構成を有し、前記第 1 のリアクタンス回路と前記第 2 のリアクタンス回路とは一致する構成を有する、システム。

【請求項 3】

請求項 2 に記載のプラズマ処理システムであって、前記第 1 のダイレクトドライブ無線周波電源は、第 1 の電気信号を第 1 のゲートドライバを通じてパルス変成器の 1 次巻線の第 1 の端に伝送するために接続された電気信号発生器を含み、

前記第 1 の電気信号発生器は、第 2 の電気信号を第 2 のゲートドライバを通じて前記パルス変成器の前記 1 次巻線の第 2 の端に伝送するためにさらに接続されており、

前記第 1 のダイレクトドライブ無線周波電源は、電圧源と基準接地電位との間に直列に接続された第 1 のトランジスタと第 2 のトランジスタとを含むハーフブリッジトランジスタ回路を含み、

前記第 1 のトランジスタは、前記パルス変成器の第 1 の 2 次巻線に接続されたゲートを有し、

前記第 2 のトランジスタは、前記パルス変成器の第 2 の 2 次巻線に接続されたゲートを有し、

前記第 1 のダイレクトドライブ無線周波電源の前記出力は、前記第 1 のトランジスタと前記第 2 のトランジスタとの間の接続に提供される、システム。

【請求項 4】

請求項 2 に記載のプラズマ処理システムであって、第 1 のリアクタンス回路は可変コンデンサを含む、システム。

【請求項 5】

プラズマ処理システムを操作する方法であって、

第 1 のダイレクトドライブ無線周波信号発生器を操作して第 1 の整形増幅矩形波形信号を生成することと、

前記第 1 の整形増幅矩形波形信号を第 1 のリアクタンス回路に伝送することと、

前記第 1 のリアクタンス回路を操作して前記第 1 の整形増幅矩形波形信号を第 1 の整形正弦波信号に変換することと、

前記第 1 の整形正弦波信号をプラズマ処理チャンバのコイルの第 1 の端に伝送し、前記

第 1 の整形正弦波信号は無線周波電力を前記コイルに伝える、前記第 1 の整形正弦波信号の伝送と、

第 2 のダイレクトドライブ無線周波信号発生器を操作して第 2 の整形増幅矩形波形信号を生成することと、

前記第 2 の整形増幅矩形波形信号を第 2 のリアクタンス回路に伝送することと、

前記第 2 のリアクタンス回路を操作して前記第 2 の整形増幅矩形波形信号を第 2 の整形正弦波信号に変換することと、

前記第 2 の整形正弦波信号を前記プラズマ処理チャンバの前記コイルの第 2 の端に伝送し、前記第 2 の整形正弦波信号は無線周波電力を前記コイルに伝える、前記第 2 の整形正弦波信号の伝送と、

を含む、プラズマ処理システムを操作する方法。

【請求項 6】

請求項 5 に記載の方法であって、前記第 1 の整形正弦波信号は、無線周波電力の総量の約半分を前記コイルに伝え、前記第 2 の整形正弦波信号は、前記無線周波電力の総量の約半分を前記コイルに伝える、方法。

【請求項 7】

請求項 5 に記載の方法であって、前記第 1 のダイレクトドライブ無線周波信号発生器と前記第 2 のダイレクトドライブ無線周波信号発生器とは一致する構成を有し、前記第 1 のリアクタンス回路と前記第 2 のリアクタンス回路とは一致する構成を有する、方法。

【請求項 8】

請求項 5 に記載の方法であって、前記第 1 のダイレクトドライブ無線周波信号発生器と前記第 2 のダイレクトドライブ無線周波信号発生器とは同じ直流レール電圧で操作される、方法。

【請求項 9】

請求項 8 に記載の方法であって、前記同じ直流レール電圧は、前記コイルにわたる電圧よりも小さい、方法。

【請求項 10】

請求項 5 に記載の方法であって、

無線周波電力のピーク量が前記第 1 のダイレクトドライブ無線周波電源から前記第 1 のリアクタンス回路を通じて前記コイルの前記第 1 の端に伝送されるように、前記第 1 のリアクタンス回路内の静電容量設定を調整することと、

無線周波電力のピーク量が前記第 2 のダイレクトドライブ無線周波電源から前記第 2 のリアクタンス回路を通じて前記コイルの前記第 2 の端に伝送されるように、前記第 2 のリアクタンス回路内の静電容量設定を調整することと、

をさらに含む、方法。

【請求項 11】

プラズマ処理システムであって、

プラズマ処理チャンバと、

前記プラズマ処理チャンバのとなりに配置され、第 1 の端と第 2 の端とを有するコイルと、

出力を有するダイレクトドライブ無線周波電源であって、前記出力を通して整形増幅矩形波形信号が伝送されるダイレクトドライブ無線周波電源と、

前記ダイレクトドライブ無線周波電源の前記出力と、前記コイルの前記第 1 の端との間に接続されたリアクタンス回路であって、前記コイルの前記第 1 の端への途中で前記整形増幅矩形波形信号を整形正弦波信号に変換するように構成されているリアクタンス回路と、

前記コイルの前記第 2 の端に接続された入力端子と、基準接地電位に接続された出力端子とを有する可変コンデンサと、

を含む、プラズマ処理システム。

【請求項 12】

請求項 1 1 に記載のプラズマ処理システムであって、前記コイルの前記第 2 の端は、前記コイルから前記プラズマ処理チャンバ内のプラズマへの無線周波電力の伝送に影響を及ぼすことができる 1 つの電気部品に接続され、前記 1 つの電気部品は前記可変コンデンサである、システム。

【請求項 1 3】

請求項 1 1 に記載のプラズマ処理システムであって、前記ダイレクトドライブ無線周波電源は、第 1 の電気信号を第 1 のゲートドライバを通じてパルス変成器の 1 次巻線の第 1 の端に伝送するために接続された電気信号発生器を含み、

前記電気信号発生器は、第 2 の電気信号を第 2 のゲートドライバを通じて前記パルス変成器の前記 1 次巻線の第 2 の端に伝送するためにさらに接続されており、

前記ダイレクトドライブ無線周波電源は、電圧源と、別の基準接地電位との間に直列に接続された第 1 のトランジスタと第 2 のトランジスタとを含むハーフブリッジトランジスタ回路を含み、

前記第 1 のトランジスタは、前記パルス変成器の第 1 の 2 次巻線に接続されたゲートを有し、

前記第 2 のトランジスタは、前記パルス変成器の第 2 の 2 次巻線に接続されたゲートを有し、

前記ダイレクトドライブ無線周波電源の前記出力は、前記第 1 のトランジスタと前記第 2 のトランジスタとの間の接続に提供される、システム。

【請求項 1 4】

プラズマ処理システムを操作する方法であって、

ダイレクトドライブ無線周波信号発生器を操作して整形増幅矩形波形信号を生成することと、

前記整形増幅矩形波形信号をリアクタンス回路に伝送することと、

前記リアクタンス回路を操作して前記整形増幅矩形波形信号を整形正弦波信号に変換することと、

前記整形正弦波信号をプラズマ処理チャンバのコイルの第 1 の端に伝送し、前記整形正弦波信号は無線周波電力を前記コイルに伝える、前記整形正弦波信号の伝送と、

前記コイルの第 2 の端と基準接地電位との間に接続された可変コンデンサの静電容量設定を調整することで、無線周波電力を前記コイルから前記プラズマ処理チャンバ内のプラズマに伝えることに関連するあらかじめ定められた状態を達成することと、

を含む、方法。

【請求項 1 5】

請求項 1 4 に記載の方法であって、前記あらかじめ定められた状態は、前記コイルにわたる電圧の実質的なバランスである、方法。

【請求項 1 6】

請求項 1 4 に記載の方法であって、前記あらかじめ定められた状態は、前記可変コンデンサのリアクタンスが前記コイルのリアクタンスの半分と実質的に等しいバランスのとれた無線周波電力供給状態である、方法。

【請求項 1 7】

請求項 1 4 に記載の方法であって、前記あらかじめ定められた状態は、前記プラズマ処理チャンバ内のプラズマ密度の最適化である、方法。

【請求項 1 8】

請求項 1 4 に記載の方法であって、前記あらかじめ定められた状態は、前記プラズマ処理チャンバ内のプラズマ電位の最適化である、方法。

【請求項 1 9】

請求項 1 4 に記載の方法であって、前記あらかじめ定められた状態は、前記プラズマ処理チャンバ内のプラズマシースにわたる電圧降下の最適化である、方法。

【請求項 2 0】

請求項 1 4 に記載の方法であって、前記あらかじめ定められた状態は、前記プラズマ処

10

20

30

40

50

理チャンバ内の前記プラズマ内の電子温度の最適化である、方法。

【発明の詳細な説明】

【背景技術】

【0001】

【発明者】

John Drewery; Alexander Miller Paterson

半導体ウェハ上における半導体デバイス、例えばチップ／ダイの製造に、プラズマ処理システムが使用される。プラズマ処理システムでは、半導体ウェハが様々な種のプラズマに曝露されることによって、材料堆積および／または材料除去および／または材料注入および／または材料改質などを通じて、半導体ウェハの状態に所定の変化を引き起こす。従来、プラズマ処理システムは、無線周波（RF）源、RF伝送ケーブル、RFインピーダンス整合ネットワーク、電極、およびプラズマ生成チャンバを含む。RF源は、RFインピーダンス整合ネットワークにRF伝送ケーブルを通じて接続される。RFインピーダンス整合ネットワークは、電極に導電体を通じて接続される。RF源によって生成されたRF電力は、RF伝送ケーブルおよびRFインピーダンス整合ネットワークを通じて電極に伝送される。電極から伝送されたRF電力によって、プロセスガスはプラズマ生成チャンバ内でプラズマに変化する。この文脈において、本開示に記載の実施形態が生じる。

【発明の概要】

【0002】

例示の実施形態において、プラズマ処理システムが開示される。プラズマ処理システムは、プラズマ処理チャンバと、プラズマ処理チャンバのとなりに配置されるコイルとを含む。コイルは、第1の端と第2の端とを含む。プラズマ処理システムはまた、出力を有する第1のダイレクトドライブRF電源を含む。第1の整形増幅矩形波形信号は、出力を通じて伝送される。プラズマ処理システムはまた、第1のダイレクトドライブRF電源の出力と、コイルの第1の端との間に接続された第1のリアクタンス回路を含む。第1のリアクタンス回路は、コイルの第1の端への途中で第1の整形増幅矩形波形信号を第1の整形正弦波信号に変換するように構成されている。プラズマ処理システムはまた、出力を有する第2のダイレクトドライブRF電源を含む。第2の整形増幅矩形波形信号は、出力を通じて伝送される。プラズマ処理システムはまた、第2のダイレクトドライブRF電源の出力と、コイルの第2の端との間に接続された第2のリアクタンス回路を含む。第2のリアクタンス回路は、コイルの第2の端への途中で第2の整形増幅矩形波形信号を第2の整形正弦波信号に変換するように構成されている。

【0003】

例示の実施形態において、プラズマ処理システムを操作する方法が開示される。方法は、第1のダイレクトドライブRF信号発生器を操作して第1の整形増幅矩形波形信号を生成することを含む。方法はまた、第1の整形増幅矩形波形信号を第1のリアクタンス回路に伝送することを含む。方法はまた、第1のリアクタンス回路を操作して第1の整形増幅矩形波形信号を第1の整形正弦波信号に変換することを含む。方法はまた、第1の整形正弦波信号をプラズマ処理チャンバのコイルの第1の端に伝送することを含む。第1の整形正弦波信号はRF電力をコイルに伝える。方法はまた、第2のダイレクトドライブRF信号発生器を操作して第2の整形増幅矩形波形信号を生成することを含む。方法はまた、第2の整形増幅矩形波形信号を第2のリアクタンス回路に伝送することを含む。方法はまた、第2のリアクタンス回路を操作して第2の整形増幅矩形波形信号を第2の整形正弦波信号に変換することを含む。方法はまた、第2の整形正弦波信号をプラズマ処理チャンバのコイルの第2の端に伝送することを含む。第2の整形正弦波信号はRF電力をコイルに伝える。

【0004】

例示の実施形態において、プラズマ処理システムが開示される。プラズマ処理システムは、プラズマ処理チャンバと、プラズマ処理チャンバのとなりに配置されるコイルとを含む。コイルは、第1の端と第2の端とを含む。プラズマ処理システムはまた、出力を有す

るダイレクトドライブRF電源を含む。整形増幅矩形波形信号は、出力を通して伝送される。プラズマ処理システムはまた、ダイレクトドライブRF電源の出力と、コイルの第1の端との間に接続されたリアクタンス回路を含む。リアクタンス回路は、コイルの第1の端への途中で整形増幅矩形波形信号を整形正弦波信号に変換するように構成されている。プラズマ処理システムはまた、コイルの第2の端に接続された入力端子を有する可変コンデンサを含む。可変コンデンサは、基準接地電位に接続された出力端子を有する。

【0005】

例示の実施形態において、プラズマ処理システムを操作する方法が開示される。方法は、ダイレクトドライブRF信号発生器を操作して整形増幅矩形波形信号を生成することを含む。方法はまた、整形増幅矩形波形信号をリアクタンス回路に伝送することを含む。方法はまた、リアクタンス回路を操作して整形増幅矩形波形信号を整形正弦波信号に変換することを含む。方法はまた、整形正弦波信号をプラズマ処理チャンバのコイルの第1の端に伝送することを含む。整形正弦波信号はRF電力をコイルに伝える。方法はまた、コイルの第2の端と基準接地電位との間に接続された可変コンデンサの静電容量設定を調整することで、RF電力をコイルからプラズマ処理チャンバ内のプラズマに伝えることに関連する所定の状態を達成することを含む。

【0006】

本実施形態の他の態様および利点が、以下の発明を実施するための形態および添付の図面からより明らかになるだろう。

【図面の簡単な説明】

【0007】

【図1】図1は、いくつかの実施形態に従う、対称的に結合されたダイレクトドライブRF電源を実装するプラズマ処理システムの図を示す。

【0008】

【図2】図2は、いくつかの実施形態に従う、第1のダイレクトドライブRF電源および第2のダイレクトドライブRF電源のそれぞれの構成概略図を示す。

【0009】

【図3】図3は、いくつかの実施形態に従う、第1のトランジスタおよび第2のトランジスタにわたる電圧リミッタを実装するハーフブリッジトランジスタ回路の回路概略図を示す。

【0010】

【図4A】図4Aは、いくつかの実施形態に従う、第1／第2のダイレクトドライブRF電源の出力において生成される整形増幅矩形波形例のパラメータの時間の関数としてのプロットを示す。

【0011】

【図4B】図4Bは、いくつかの実施形態に従う、第1／第2のリアクタンス回路の出力において生成される整形正弦波形例のパラメータの時間の関数としてのプロットを示す。

【0012】

【図5A】図5Aは、いくつかの実施形態に従う、第1／第2のリアクタンス回路の出力において生成される整形正弦波形例のパラメータの時間の関数としてのプロットを示す。

【0013】

【図5B】図5Bは、いくつかの実施形態に従う、第1／第2のリアクタンス回路の出力において生成される整形正弦波形例のパラメータの時間の関数としてのプロットを示す。

【0014】

【図5C】図5Cは、いくつかの実施形態に従う、第1／第2のリアクタンス回路の出力において生成される整形正弦波形例のパラメータの時間の関数としてのプロットを示す。

【0015】

【図5D】図5Dは、いくつかの実施形態に従う、第1／第2のリアクタンス回路の出力において生成される整形正弦波形例のパラメータの時間の関数としてのプロットを示す。

【0016】

10

20

30

40

50

【図 6】図 6 は、いくつかの実施形態に従う、第 1 / 第 2 のダイレクトドライブ R F 電源からプラズマ処理チャンバへ R F 電力を送達する方法のフローチャートを示す。

【0017】

【図 7】図 7 は、いくつかの実施形態に従う、コイルの第 1 の端に接続された第 1 のダイレクトドライブ R F 電源と、コイルの第 2 の端に接続された可変コンデンサとを有するプラズマ処理システムの図を示す。

【0018】

【図 8】図 8 は、いくつかの実施形態に従う、R F 電力をプラズマ処理チャンバに送達する方法のフローチャートを示す。

【発明を実施するための形態】

【0019】

以下の説明では、本開示の十分な理解を提供するために多くの特定の詳細が述べられる。本発明の実施形態は、しかしながら、これら特定の詳細の一部または全てを用いずに実施されてよいことが、当業者には明らかであるであろう。その他の例では、本開示を不必要に曖昧にしないように周知の処理動作は詳細に説明されていない。

【0020】

図 1 は、いくつかの実施形態に従う、対称的に結合されたダイレクトドライブ無線周波 (R F) 電源 101 A および 101 B を実装するプラズマ処理システム 100 の図を示す。プラズマ処理システム 100 は、接続 120 A として示されるように第 1 のリアクタンス回路 103 A を通じてコイル 105 の第 1 の端に接続される第 1 のダイレクトドライブ R F 電源 101 A を含む。プラズマ処理システム 100 はまた、接続 120 B として示されるように第 2 のリアクタンス回路 103 B を通じてコイル 105 の第 2 の端に接続される第 2 のダイレクトドライブ R F 電源 101 B を含む。このようにして、コイル 105 は、第 1 のダイレクトドライブ R F 電源 101 A および第 2 のダイレクトドライブ R F 電源 101 B に対して対称的に接続される。第 1 のダイレクトドライブ R F 電源 101 A および第 2 のダイレクトドライブ R F 電源 101 B のそれぞれは、R F 電力を生成し、R F 電力をプラズマ処理チャンバ 111 にコイル 105 を通じて伝送するが、プラズマ処理チャンバ 111 への送路において R F ケーブルおよびインピーダンス整合ネットワークを通じて R F 信号を伝送する必要がないように構成される。ダイレクトドライブ R F 電源 101 A および 101 B のそれぞれは、マッチレスプラズマ源 (M P S) とも称される。

【0021】

いくつかの実施形態では、コイル 105 は、プラズマ処理チャンバ 111 の窓 112 の上方に配置される。様々な実施形態において、窓 112 は、R F 電力がコイル 105 から窓 112 を通ってプラズマ処理チャンバ 111 に伝送されるのを可能にする、石英または他の同様の材料などの誘電材料によって形成される。プラズマ処理チャンバ 111 は、基準接地電位 108 に電氣的に接続される。R F 電力がプラズマ処理チャンバ 111 内へ、およびその中を伝送されると、R F 電力は、半導体ウェハ 109 に対する曝露時にプラズマ処理チャンバ 111 内においてプロセスガスをプラズマに変化させる。半導体ウェハ 109 は、プラズマ処理チャンバ 111 内において静電チャックなどの基板保持体 107 に支持される。様々な実施形態では、プラズマを使用することで、材料堆積および／または材料除去および／または材料注入および／または材料改質などを通じて、半導体ウェハ 109 の状態の変更を制御する。さらに、いくつかの実施形態では、プラズマ処理チャンバ 111 内でプラズマを発生させることで、プラズマ処理チャンバ 111 の洗浄を行う。ダイレクトドライブ R F 電源 101 A および 101 B は、図 2 に関して以下で詳細に説明される。本議論において、ダイレクトドライブ R F 電源 101 A および 101 B のそれぞれが、所定の波形を有する R F 信号を時間の関数として生成し、かつ生成された R F 信号をコイル 105 に送達するように構成されることを理解されたい。

【0022】

プラズマ処理チャンバ 111 内において、基板保持体 107 に保持されるウェハ 109 に対する曝露時に、R F 電力は、プロセスガスをプラズマに変化させる。さらに、プラズ

10

20

30

40

50

マ処理チャンバ 111 の操作中に、ウェハ 109 の処理により生じた排気ガスおよび副生成物がプラズマ処理チャンバ 111 から排出される。様々な実施形態では、プラズマ処理チャンバ 111 の操作は、数ある追加の操作うち、ウェハ 109 レベルにおけるバイアス電圧の生成によって、プラズマの電荷を帯びた成分をウェハ 109 へ向かってまたはウェハ 109 から離れるように吸着または反発させること、および／またはウェハ 109 の温度を制御すること、および／または追加の RF 電力を基板保持体 107 内に配置された 1 つまたは複数の電極に与えることで追加のプラズマを生成することなどの多くの他の追加の操作を含むことができることが理解されたい。さらに、様々な実施形態では、プラズマ処理チャンバ 111 は、次のうちの 1 つまたは複数を制御するための時間的スケジュールを指定する所定のレシピに従って操作される：プロセス処理チャンバ 111 の操作に関連する本質的に任意の数ある処理パラメータのうち、プラズマ処理チャンバ 111 への 1 つまたは複数のプロセスガスの供給、プラズマ処理チャンバ 111 内の圧力および温度、コイル 105 への RF 電力の供給、ウェハ 109 レベルでのバイアス電圧の供給、基板保持体 107 内の 1 つまたは複数の電極への RF 電力の供給など。

10

20

30

40

50

【0023】

プラズマ処理システム 100 は、第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101 A および第 2 のダイレクトドライブ RF 電源 101 B の操作を制御するためのコントローラ 113 を含む。いくつかの実施形態では、コントローラ 113 は、プロセッサおよびメモリデバイスを含む。いくつかの実施形態では、コントローラ 113 は、マイクロプロセッサ、特定用途向け集積回路 (ASIC)、中央演算装置、プロセッサ、プログラマブルロジックデバイス (PLD)、およびフィールドプログラマブルゲートアレイ (FPGA) のうちの 1 つまたは複数を含む。コントローラ 113 は、接続されることで接続 121 A を通じて第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101 A のための波形発生器制御信号を伝送する。同様に、コントローラ 113 は、接続されることで接続 121 B を通じて第 2 のダイレクトドライブ RF 電源 101 B のための波形発生器制御信号を伝送する。コントローラ 113 は、接続されることで接続 123 A を通じて第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101 A のための信号発生器制御信号を伝送する。同様に、コントローラ 113 は、接続されることで接続 123 B を通じて第 2 のダイレクトドライブ RF 電源 101 B のための信号発生器制御信号を伝送する。コントローラ 113 は、接続されることで接続 125 A を通じて第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101 A のための周波数入力制御信号を伝送する。同様に、コントローラ 113 は、接続されることで接続 125 B を通じて第 2 のダイレクトドライブ RF 電源 101 B のための周波数入力制御信号を伝送する。コントローラ 113 は、接続されることで、接続 127 A を通じて第 1 のリアクタンス回路 103 A 内の少なくとも 1 つの可変コンデンサ 104 A のためのリアクタンス回路制御信号を伝送する。同様に、コントローラ 113 は、接続されることで、接続 127 B を通じて第 1 のリアクタンス回路 103 B 内の少なくとも 1 つの可変コンデンサ 104 B のためのリアクタンス回路制御信号を伝送する。

【0024】

抵抗 115 A は、第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101 A の出力 O1 によって見られる。抵抗 115 A は、コイル 105 中の抵抗、プラズマがプラズマ処理チャンバ 111 内に存在する場合にはプラズマによって示される抵抗、および第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101 A の出力からコイル 105 への RF 電力伝送路の抵抗の組み合わせを表す。同様に、抵抗 115 B は、第 2 のダイレクトドライブ RF 電源 101 B の出力 O2 によって見られる。抵抗 115 B は、コイル 105 中の抵抗、プラズマがプラズマ処理チャンバ 111 内に存在する場合にはプラズマによって示される抵抗、および第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101 B の出力からコイル 105 への RF 電力伝送路の抵抗の組み合わせを表す。

【0025】

いくつかの実施形態では、接続 116 A によって示されるように、第 1 の電圧および電流 (VI) プローブ 117 A が、第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101 A の出力 O1

に結合される。V Iプローブ117Aは、出力O1での複素電流、出力O1での複素電圧、および出力O1での複素電圧と複素電流との間の位相差を測定するセンサである。複素電流は、大きさおよび位相を有する。同様に、複素電圧は、大きさおよび位相を有する。V Iプローブ117Aは、コントローラ113に結合されることでコントローラ113にフィードバック信号129Aを伝送する。いくつかの実施形態では、V Iプローブ117Aの代わりに電圧(V)プローブが使用される。これらの実施形態では、接続118Aによって示されるように、電流(I)プローブ119Aが第1のリアクタンス回路103Aの出力に結合される。これらの実施形態では、Vプローブは、出力O1における時間とともに変化する複素電圧の大きさおよび位相を測定するセンサである。Iプローブ119Aは、第1のリアクタンス回路103Aの出力における時間とともに変化する複素電流の大きさおよび位相を測定するセンサである。Iプローブ119Aは、コントローラ113に結合されることでコントローラ113にフィードバック信号131Aを伝送する。

10

【0026】

いくつかの実施形態では、接続116Bによって示されるように、第2の電圧および電流(VI)プローブ117Bが、第2のダイレクトドライブRF電源101Bの出力O2に結合される。V Iプローブ117Bは、出力O2での複素電流、出力O2での複素電圧、および出力O2での複素電圧と複素電流との間の位相差を測定するセンサである。複素電流は、大きさおよび位相を有する。同様に、複素電圧は、大きさおよび位相を有する。V Iプローブ117Bは、コントローラ113に結合されることでコントローラ113にフィードバック信号129Bを伝送する。いくつかの実施形態では、V Iプローブ117Bの代わりに電圧(V)プローブが使用される。これらの実施形態では、接続118Bによって示されるように、電流(I)プローブ119Bが第2のリアクタンス回路103Bの出力に結合される。これらの実施形態では、Vプローブは、出力O2における時間とともに変化する複素電圧の大きさおよび位相を測定するセンサである。Iプローブ119Bは、第2のリアクタンス回路103Bの出力における時間とともに変化する複素電流の大きさおよび位相を測定するセンサである。Iプローブ119Bは、コントローラ113に結合されることでコントローラ113にフィードバック信号131Bを伝送する。

20

【0027】

図2は、いくつかの実施形態に従う、第1のダイレクトドライブRF電源101Aおよび第2のダイレクトドライブRF電源101Bのそれぞれの構成概略図を示す。第1のダイレクトドライブRF電源101Aおよび第2のダイレクトドライブRF電源101Bは、同じ構成を有することを理解されたい。図2において、所与の参照符号末尾の「A」は、所与の参照符号に対応する構成要素／特徴が、第1のダイレクトドライブRF電源101Aのものであることを示す。同様に、所与の参照符号末尾の「B」は、所与の参照符号に対応する構成要素／特徴が、第2のダイレクトドライブRF電源101Bのものであることを示す。例えば、接続121A／Bは、第1のダイレクトドライブRF電源101A内に存在する接続121Aと、第2のダイレクトドライブRF電源101B内に存在する接続121Bとを表す。

30

【0028】

第1のダイレクトドライブRF電源101Aおよび第2のダイレクトドライブRF電源101Bのそれぞれは、入力部201A／Bと、出力部203A／Bとを含む。入力部201A／Bは、電気信号発生器209A／Bと、ゲートドライバ207A／Bの一部とを含む。出力部203A／Bは、ゲートドライバ207A／Bの残りの部分と、ハーフブリッジトランジスタ（例えば電界効果トランジスタ(FET)）回路233A／Bとを含む。ハーフブリッジトランジスタ回路233A／Bは、増幅回路／ツリーとも称され、ゲートドライバ207A／Bに結合される。いくつかの実施形態では、入力部201A／Bは、制御基板205A／Bを含み、制御基板205A／B上には、電気信号発生器209A／B、波形発生器213A／B、および周波数入力コントローラ211A／Bが実装される。電気信号発生器209A／Bは、接続されることで信号発生器制御信号をコントローラ113から接続123A／Bを通じて受信する。波形発生器213A／Bは、接続され

40

50

ることで波形発生器制御信号をコントローラ 113 から接続 121 A / B を通じて受信する。周波数入力コントローラ 211 A / B は、接続されることで周波数入力制御信号をコントローラ 113 から接続 125 A / B を通じて受信する。周波数入力コントローラ 211 A / B は、接続されることで周波数入力を電気信号発生器 209 A / B に接続 212 A / B を通じて供給する。

【0029】

いくつかの実施形態では、ゲートドライバ 207 A / B の全体が制御基板 205 A / B 上に実装される。入力部 201 A / B は、複数の矩形波信号を生成し、かつ矩形波信号を出力部 203 A / B に提供する。出力部 203 A / B は、入力部 201 A / B から受信した複数の矩形波信号から、増幅矩形波形を生成する。出力部 203 A / B はまた、増幅矩形波形のピーク・ツー・ピークの大きさなどの包絡線を整形する。例えば、整形制御信号 214 A / B を入力部 201 A / B 内の波形発生器 213 A / B から出力部 203 A / B 内のハーフブリッジトランジスタ回路 233 A / B に供給することで、包絡線を生成する。整形制御信号 214 A / B は、整形増幅矩形波形を生成するために、増幅矩形波形を整形するための複数の電圧値を有する。第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101 A に関して、整形増幅矩形波形は、出力部 203 A から第 1 のリアクタンス回路 103 A に伝送される。第 2 のダイレクトドライブ RF 電源 101 B に関して、整形増幅矩形波形は、出力部 203 B から第 2 のリアクタンス回路 103 B に伝送される。

【0030】

第 1 のリアクタンス回路 103 A および第 2 のリアクタンス回路 103 B のそれぞれは、フィルタリングによる除去など、整形増幅矩形波形の高次高調波を除去することにより、基本周波数を有する整形正弦波形を生成する。整形正弦波形は、整形増幅矩形波形と同じ包絡線を有する。第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101 A に関して、RF 電力が、第 1 のリアクタンス回路 103 A からコイル 105 の第 1 の端へ基本周波数を有する整形正弦波形の形で伝送される。第 2 のダイレクトドライブ RF 電源 101 B に関して、RF 電力が、第 2 のリアクタンス回路 103 B からコイル 105 の第 2 の端へ基本周波数を有する整形正弦波形の形で伝送される。コイル 105 に伝送された RF 電力は、プラズマ処理チャンバ 111 内に伝送されることによって、図 1 に関して上述したように、プラズマ処理チャンバ 111 内の 1 つまたは複数のプロセスガスをウェハ 109 を処理するためのプラズマに変化させる。

【0031】

いくつかの実施形態では、第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101 A に関して、第 1 の Q 値制御信号をコントローラ 113 から接続 127 A を通じて第 1 のリアクタンス回路 103 A へ伝送することによって、第 1 のリアクタンス回路 103 A のリアクタンスが修正される。第 1 の Q 値制御信号は、第 1 のリアクタンス回路 103 A 内の少なくとも 1 つの可変コンデンサ 104 A の静電容量設定の変更の実行を方向づけることなどによって、第 1 のリアクタンス回路 103 A のリアクタンスにおける特定の変更の実行を方向づける。いくつかの実施形態では、第 2 のダイレクトドライブ RF 電源 101 B に関して、第 2 の Q 値制御信号をコントローラ 113 から接続 127 B を通じて第 2 のリアクタンス回路 103 B へ伝送することによって、第 2 のリアクタンス回路 103 B のリアクタンスが修正される。第 2 の Q 値制御信号 127 B は、第 2 のリアクタンス回路 103 B 内の少なくとも 1 つの可変コンデンサ 104 B の静電容量設定の変更の実行を方向づけることなどによって、第 2 のリアクタンス回路 103 B のリアクタンスにおける特定の変更の実行を方向づける。

【0032】

いくつかの実施形態では、フィードバック信号 129 A / B が VI プローブ 117 A / B からコントローラ 113 へ送信される。いくつかの実施形態では、フィードバック信号 129 A / B は、出力部 203 A / B の出力 O1 / O2 における整形増幅矩形波形の、時間とともに変化する電圧と時間とともに変化する電流との間の位相差を決定するために使用され、それによって位相差を減少させる、または取り除くために出力部 203 A / B を

制御することが可能になる。いくつかの実施形態では、第1のダイレクトドライブRF電源101Aに関して、フィードバック信号129Aに加えて、または替えて、フィードバック信号131Aがエプロープ119Aからコントローラ113に伝送される。いくつかの実施形態では、第1のリアクタンス回路103Aの出力O1における整形正弦波形の、時間とともに変化する電圧と時間とともに変化する電流との間の位相差がフィードバック信号131Aから決定され、それによって位相差を減少させる、または取り除くために出力部203Aを制御すること、および／または第1のリアクタンス回路103Aを制御することが可能になる。いくつかの実施形態では、第2のダイレクトドライブRF電源101Bに関して、フィードバック信号129Bに加えて、または替えて、フィードバック信号131Bがエプロープ119Bからコントローラ113に伝送される。いくつかの実施形態では、第2のリアクタンス回路103Bの出力O2における整形正弦波形の、時間とともに変化する電圧と時間とともに変化する電流との間の位相差がフィードバック信号131Bから決定され、それによって位相差を減少させる、または取り除くために出力部203Bを制御すること、および／または第2のリアクタンス回路103Bを制御することが可能になる。

10

20

30

40

50

【0033】

電気信号発生器209A/Bは、デジタル波形またはパルス列などの矩形波信号を生成する矩形波発振器である。電気信号発生器209A/Bによって出力される矩形波信号は、ハイ（または1）などの第1の論理レベルと、ロー（または0）などの第2の論理レベルとの間でパルスを発する。電気信号発生器209A/Bは、周波数入力コントローラ211A/Bから電気信号発生器209A/Bに供給された周波数入力に従い、数ある動作周波数のうち、400キロヘルツ（kHz）、または2MHz、または13.56MHz、または27MHz、または60MHzなどの所定の動作周波数の矩形波信号を生成する。

【0034】

ゲートドライバ207A/Bは、入力部201A/B内の第1の部分を含み、第1の部分は、ゲートドライバ小部分215A/Bと、コンデンサ223A/Bと、抵抗器225A/Bと、パルス変成器217A/Bの1次巻線227A/Bとを含む。ゲートドライバ207A/Bはまた、出力部203A/B内の第2の部分を含み、第2の部分は、パルス変成器217A/Bの2次巻線229A/Bおよび231A/Bを含む。ゲートドライバ小部分215A/Bは、複数のゲートドライバ219A/Bおよび221A/Bを含む。ゲートドライバ219A/Bおよび221A/Bのそれぞれは、その一端が正電圧源（+）に結合され、反対の端が負電圧源（-）に結合される。

【0035】

いくつかの実施形態では、ハーフブリッジトランジスタ回路233A/Bは、導電体237A/Bを通じて第1のトランジスタ239A/Bの第1の端子に電氣的に接続される電圧源Vdcを含む直流（DC）レール235A/Bを含み、第1のトランジスタ239A/Bの第2の端子が第2のトランジスタ241A/Bの第1の端子に電氣的に接続され、第2のトランジスタ241A/Bの第2の端子が基準接地電位242A/Bに電氣的に接続される。このように、ハーフブリッジトランジスタ回路233A/Bは、プッシュプル方式で互いに結合される第1のトランジスタ239A/Bと第2のトランジスタ241A/Bとを含む。いくつかの実施形態では、第1のトランジスタ239A/Bおよび第2のトランジスタ241A/Bは、少なくとも閾値電圧がそれらのゲート導電体に与えられたときにオンになるn型FETである。しかしながら、他の実施形態では、第1のトランジスタ239A/Bおよび第2のトランジスタ241A/Bは、少なくとも閾値電圧がそれらのゲート導電体に与えられたときにオフになるp型FETである。いくつかの実施形態では、第1のトランジスタ239A/Bおよび第2のトランジスタ241A/Bのそれぞれは、金属酸化物半導体電界効果トランジスタ（MOSFET）として実装される。いくつかの実施形態では、第1のトランジスタ239A/Bおよび第2のトランジスタ241A/Bは、数あるうちの、絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ（IGBT）、または

金属半導体電界効果トランジスタ（MESFET）、または接合型電界効果トランジスタ（JFET）などの別の種類のトランジスタとして実装されてよい。いくつかの実施形態では、第1のトランジスタ239A/Bおよび第2のトランジスタ241A/Bのそれぞれは、炭化ケイ素、またはケイ素、または窒化ガリウムからなる。第1のトランジスタ239A/Bおよび第2のトランジスタ241A/Bのそれぞれは、約0.010hm〜約100hmsにおよぶ範囲内などの、予め決められた範囲内にある出力インピーダンスを有する。第1のダイレクトドライブRF電源101Aの出力01は、第1のトランジスタ239Aの第2の端子（ソース端子）と第2のトランジスタ241Aの第1の端子（ドレイン端子）との間のノード接続である。同様に、第2のダイレクトドライブRF電源101Bの出力02は、第1のトランジスタ239Bの第2の端子（ソース端子）と第2のトランジスタ241Bの第1の端子（ドレイン端子）との間のノード接続である。

10

【0036】

コントローラ113は、周波数入力コントローラ211A/Bに接続125A/Bを通じて結合されることによって、周波数入力（動作周波数）を電気信号発生器209A/Bに提供する。コントローラ113は、さらに波形発生器213A/Bに結合されることによって、DCレール235A/Bに提供される整形制御信号214A/Bを制御する。電気信号発生器209A/Bは、それぞれゲートドライバ219A/Bおよび221A/Bに接続される出力を有する。ゲートドライバ219A/Bの出力は、コンデンサ223A/Bの入力端子に結合される。ゲートドライバ221A/Bの出力は、抵抗器225A/Bの入力端子に結合される。コンデンサ223A/Bは、パルス変成器217A/Bの1次巻線227A/Bの第1の端に結合される。抵抗器225A/Bは、パルス変成器217A/Bの1次巻線227A/Bの第2の端に結合される。コンデンサ223A/Bは、1次巻線227A/Bのインダクタンスを打ち消すまたは無効にする機能を有する。1次巻線227A/Bのインダクタンスを打ち消す、または無効化することは、ゲートドライバ219A/Bおよび221A/Bが出力するゲートドライブ信号の矩形の生成を促進する。さらに、抵抗器225A/Bは、電気信号発生器209A/Bが生成する矩形波信号の発振を低減する。

20

【0037】

パルス変成器217A/Bの2次巻線229A/Bの第1の端は、第1のトランジスタ239A/Bのゲート端子に電氣的に接続される。2次巻線229A/Bの第2の端は、第1のトランジスタ239A/Bの第2の端子および第2のトランジスタ241A/Bの第1の端子の両方に電氣的に接続され、第1のトランジスタ239A/Bの第2の端子および第2のトランジスタ241A/Bの第1の端子は両方とも、ハーフブリッジトランジスタ回路233A/Bの出力01/O2に電氣的に接続される。パルス変成器217A/Bの2次巻線231A/Bの第1の端は、第2のトランジスタ241A/Bのゲート端子に電氣的に接続される。2次巻線231A/Bの第2の端は、基準接地電位242A/Bに電氣的に接続される。ハーフブリッジトランジスタ回路233A/Bの出力01/O2は、第1/第2のリアクタンス回路103A/Bの入力に電氣的に接続される。抵抗115A/Bは、ハーフブリッジトランジスタ回路233A/Bの出力01/O2によって見られる。抵抗115A/Bは、第1/第2のダイレクトドライブRF電源101A/Bが接続されるコイル105中の抵抗、プラズマがプラズマ処理チャンバ111内に存在する場合にはプラズマによって示される抵抗、および出力01/O2からコイル105へのRF電力伝送路の抵抗の組み合わせを表す。

30

40

【0038】

コントローラ113は、周波数入力コントローラ211A/Bを通じて電気信号発生器209A/Bに提供される周波数入力などの設定を生成する。周波数入力、2MHz、13.56MHzなどの、目標動作周波数の値である。電気信号発生器209A/Bは、目標動作周波数を有する入力RF信号を生成する。入力RF信号は、矩形波信号である。ゲートドライバ219A/Bおよび221A/Bは、入力RF信号を増幅することによって増幅RF信号を生成するとともに、増幅RF信号をパルス変成器217A/Bの1次巻

50

線 2 2 7 A / B に提供する。

【 0 0 3 9 】

所与の時刻における増幅 R F 信号の電流の方向性に基づいて、2 次巻線 2 2 9 A / B または 2 次巻線 2 3 1 A / B が、所与の時刻において閾値電圧を有するゲートドライブ信号を生成する。例えば、増幅 R F 信号の電流が、1 次巻線 2 2 7 A / B の正に帯電した端子から、1 次巻線 2 2 7 A / B の負に帯電した端子に流れる場合、2 次巻線 2 2 9 A / B は、少なくとも閾値電圧を有するゲートドライブ信号を生成して第 1 のトランジスタ 2 3 9 A / B をオンにし、2 次巻線 2 3 1 A / B は、第 2 のトランジスタ 2 4 1 A / B がオフとなるよう閾値電圧を生成しない。反対に、増幅 R F 信号の電流が、1 次巻線 2 2 7 A / B の負に帯電した端子から正に帯電した端子に流れる場合、2 次巻線 2 3 1 A / B は、少なくとも閾値電圧を有するゲートドライブ信号を生成して第 2 のトランジスタ 2 4 1 A / B をオンにし、2 次巻線 2 2 9 A / B は、第 1 のトランジスタ 2 3 9 A / B がオフとなるよう閾値電圧を生成しない。

10

【 0 0 4 0 】

第 1 のトランジスタ 2 3 9 A / B のゲートおよび第 2 のトランジスタ 2 4 1 A / B のゲートに伝送されるゲートドライブ信号のそれぞれは、目標動作周波数を有する矩形波信号、例えばデジタル信号またはパルス信号である。例えば、第 1 のトランジスタ 2 3 9 A / B のゲートおよび第 2 のトランジスタ 2 4 1 A / B のゲートに伝送されるゲートドライブ信号のそれぞれは、ローレベルとハイレベルとの間を遷移する。第 1 のトランジスタ 2 3 9 A / B のゲートおよび第 2 のトランジスタ 2 4 1 A / B のゲートに伝送されるゲートドライブ信号は、目標動作周波数を有し、かつ互いに対して逆同期している。より具体的には、第 1 のトランジスタ 2 3 9 A / B のゲートに伝送されるゲートドライブ信号がローレベルからハイレベルに遷移する時間間隔、あるいはその時刻において、第 2 のトランジスタ 2 4 1 A / B のゲートに伝送されるゲートドライブ信号は同時にハイレベルからローレベルに遷移する。同様に、第 1 のトランジスタ 2 3 9 A / B のゲートに伝送されるゲートドライブ信号がハイレベルからローレベルに遷移する時間間隔、あるいはその時刻において、第 2 のトランジスタ 2 4 1 A / B のゲートに伝送されるゲートドライブ信号は同時にローレベルからハイレベルに遷移する。このゲートドライブ信号の逆同期によって、時間とともに変化する矩形波信号の目標動作周波数に従って、反復的に、第 1 のトランジスタ 2 3 9 A / B と第 2 のトランジスタ 2 4 1 A / B とが連続的にオンにされ、かつ連続的にオフにされることが可能になる。第 1 のトランジスタ 2 3 9 A / B と第 2 のトランジスタ 2 4 1 A / B とは、連続的に操作される。例えば、第 1 のトランジスタ 2 3 9 A / B がオンにされると、第 2 のトランジスタ 2 4 1 A / B はオフにされる。さらに、第 2 のトランジスタ 2 4 1 A / B がオンにされると、第 1 のトランジスタ 2 3 9 A / B はオフにされる。第 1 のトランジスタ 2 3 9 A / B および第 2 のトランジスタ 2 4 1 A / B は、同じ時刻または同じ期間においてオンとならない。目標動作周波数以外の周波数では、第 1 / 第 2 のリアクタンス回路 1 0 3 A / B は、他の非目標動作周波数において大きな電流が第 1 / 第 2 のダイレクトドライブ R F 電源 1 0 1 A / B から出ないように高負荷をもたらす役割を担う。

20

30

【 0 0 4 1 】

第 1 のトランジスタ 2 3 9 A / B がオンであり、かつ第 2 のトランジスタ 2 4 1 A / B がオフである場合、電圧源 V d c と出力 O 1 / O 2 との間を電流が流れることで、出力 O 1 / O 2 において電圧が発生する。出力 O 1 / O 2 にける電圧は、コントローラ 1 1 3 から波形発生器 2 1 3 A / B を通じて受信した整形制御信号 2 1 4 A / B に従って生成される。第 2 のトランジスタ 2 4 1 A / B がオフのとき、出力 O 1 / O 2 から、第 2 のトランジスタ 2 4 1 A / B の第 2 の端子に接続された基準接地電位 2 4 2 A / B へ流れる電流は存在しない。第 1 のトランジスタ 2 3 9 A / B がオンのとき、電流は、電圧源 V d c から、ハーフブリッジトランジスタ回路 2 3 3 A / B の出力 O 1 / O 2 を通って第 1 / 第 2 のリアクタンス回路 1 0 3 A / B の入力へと流れる。さらに、第 2 のトランジスタ 2 4 1 A / B がオンであり、かつ第 1 のトランジスタ 2 3 9 A / B がオフである場合、電流は、ハ

40

50

ーフブリッジトランジスタ回路 2 3 3 A / B の出力 O 1 / O 2 から、第 2 のトランジスタ 2 4 1 A / B の第 2 の端子に接続された基準接地電位 2 4 2 A / B へ流れる。第 1 のトランジスタ 2 3 9 A / B がオフのとき、電圧源 V d c からーフブリッジトランジスタ回路 2 3 3 A / B の出力 O 1 / O 2 へ流れる電流は存在しない。

【 0 0 4 2 】

いくつかの実施形態では、コントローラ 1 1 3 は、波形発生器 2 1 3 A / B に、D C レール 2 3 5 A / B を制御するために用いる電圧値を示す整形制御信号 2 1 4 A / B を生成するように方向づける。整形制御信号 2 1 4 A / B は、導電体を通じて電圧源 V d c に伝送される。D C レール 2 3 5 A / B は、コントローラ 1 1 3 による（および、任意選択で波形発生器 2 1 3 A / B による）電圧源 V d c の高速制御がある点でアジャイルである。コントローラ 1 1 3 および電圧源 V d c の両方が電子回路であり、それによってコントローラ 1 1 3 は電圧源 V d c を実質的に瞬時に制御可能である。例えば、コントローラ 1 1 3 が整形制御信号 2 1 4 A / B 内の電圧値を電圧源 V d c に（直接、または波形発生器 2 1 3 A / B を通じて）送信するときに、電圧源 V d c はそれに応じて実質的に瞬時に出力電圧レベルを変化させる。いくつかの実施形態では、整形制御信号 2 1 4 A / B が示す電圧値は、約 0 ボルト～約 8 0 ボルトにわたる範囲内にあり、したがって D C レール 2 3 5 A / B はこの電圧範囲内で動作する。整形制御信号 2 1 4 A / B が示す電圧値は、ーフブリッジトランジスタ回路 2 3 3 A / B の出力 O 1 / O 2 における、すなわち第 1 / 第 2 のダイレクトドライブ R F 電源 1 0 1 A / B の出力における整形増幅矩形波形の整形包絡線を定義するために電圧源 V d c によって生成される電圧信号の大きさである。例えば、第 1 / 第 2 のダイレクトドライブ R F 電源 1 0 1 A B が連続波形を生成するように操作される場合、整形制御信号 2 1 4 A / B が示す電圧値は、時間の関数として、ーフブリッジトランジスタ回路 2 3 3 A / B の出力 O 1 / O 2 において生成される連続波形のパラメータのピーク・ツー・ピークの大きさを制御する。パラメータは、例として、電力、電圧、および電流のうちの 1 つまたは複数である。連続波形のピーク・ツー・ピークの大きさは、ーフブリッジトランジスタ回路 2 3 3 A / B の出力 O 1 / O 2 における連続波形の整形包絡線を時間の関数として定義する。

【 0 0 4 3 】

別の例では、第 1 / 第 2 のダイレクトドライブ R F 電源 1 0 1 A / B が、ーフブリッジトランジスタ回路 2 3 3 A / B の出力 O 1 / O 2 においてパルス形状の整形包絡線をもつよう整形増幅矩形波形を生成するように操作される場合、整形制御信号 2 1 4 A / B が示す電圧値は、所与の時刻または所与の予め決められた期間において、実質的に瞬時に（段階関数のような方式で）変更される。それによって、整形増幅矩形波形のピーク・ツー・ピークの大きさは、第 1 のパラメータレベル（例えばハイレベル）から第 2 のパラメータレベル（例えばローレベル）へ変化するか、または第 2 のパラメータレベルから第 1 のパラメータレベルに変化する。パラメータは、例として、電力、電圧、および電流のうちの 1 つまたは複数である。別の例では、第 1 / 第 2 のダイレクトドライブ R F 電源 1 0 1 A / B が、ーフブリッジトランジスタ回路 2 3 3 A / B の出力 O 1 / O 2 において任意の形状の整形包絡線をもつよう整形増幅矩形波形を生成するように操作される場合、整形制御信号 2 1 4 A / B が示す電圧値は、波形発生器 2 1 3 A / B を通じてコントローラ 1 1 3 により方向づけられたように、所定かつ制御された任意の方法で変更される。それによって、整形増幅矩形波形のピーク・ツー・ピークの大きさは、所定かつ制御された任意の方法で変化する。別の例では、第 1 / 第 2 のダイレクトドライブ R F 電源 1 0 1 A / B が、ーフブリッジトランジスタ回路 2 3 3 A / B の出力 O 1 / O 2 においてマルチステートパルス形状を有する整形増幅矩形波形を生成するように操作される場合、整形制御信号 2 1 4 A / B が示す電圧値は、所与の時刻または所与の予め決められた期間において、実質的に瞬時に（段階関数のような方式で）変更される。それによって、整形増幅矩形波形のピーク・ツー・ピークの大きさは、異なる状態間で変化する。異なる状態はそれぞれ、特定のパラメータレベル、例えば数あるうちの、電力レベル、電圧レベル、および／または電流レベルなどの、異なるピーク・ツー・ピークの大きさを有する。様々な実施形態

において、異なる状態の数は2つ以上であり、コントローラ113によって特定される。

【0044】

ハーフブリッジトランジスタ回路233A/Bの出力O1/O2において生成される整形増幅矩形波形は、ゲートドライバ219A/Bおよび221A/Bによって出力されるゲートドライブ信号に従う第1のトランジスタ239A/Bおよび第2のトランジスタ241A/Bの（時間の関数としての）操作と、整形制御信号214A/Bに従う電圧源Vdcによる電圧の（時間の関数としての）供給とに基づく。整形増幅矩形波形の増幅量は、ハーフブリッジトランジスタ回路233A/Bの第1のトランジスタ239A/Bおよび第2のトランジスタ241A/Bの出力インピーダンスと、整形制御信号214A/Bにおける、コントローラ113によって（および、任意選択で波形発生器213A/Bによって）電圧源Vdcへ供給される電圧値と、電圧源Vdcにおける実現可能な最大電圧値とに基づく。第1/第2のリアクタンス回路103A/Bは、整形増幅矩形波形を受信し、整形増幅矩形波形の高次高調波を減少させる、または取り除くように機能することによって基本周波数を有する整形正弦波形を生成する。第1/第2のリアクタンス回路103A/Bによって出力される整形正弦波形は、第1/第2のリアクタンス回路103A/Bに入力される整形増幅矩形波形と同じ整形包絡線を有することが理解されたい。第1/第2のリアクタンス回路103A/Bによって出力される整形正弦波形は、プラズマ処理チャンバ111内でプラズマを生成するためのRF信号としてコイル105に提供される。

10

【0045】

いくつかの実施形態では、VIプローブ117A/Bは、ハーフブリッジトランジスタ回路233A/Bの出力O1/O2における整形増幅矩形波形の複素電圧および複素電流を計測し、対応するフィードバック信号をコントローラ113に接続129A/Bを通じて提供する。フィードバック信号は、複素電圧および複素電流を示す。コントローラ113は、フィードバック信号から、整形増幅矩形波形の複素電圧と、整形増幅矩形波形の複素電流との間の位相差を特定し、かつ位相差が所定の許容範囲内にあるかどうかを判定する。例えば、コントローラ113は、位相差がゼロか、あるいはゼロから離れた所定の許容範囲（パーセンテージ）内にあるかどうかを判定する。位相差が所定の許容範囲内ないと判定すると、コントローラ113は、動作周波数の周波数値を変更し、電気信号発生器209A/Bに提供される周波数入力を周波数入力コントローラ211A/Bを通じて変更する。変更された周波数値は、周波数入力コントローラ211A/Bから電気信号発生器209A/Bへ提供され、電気信号発生器209A/Bの動作周波数を変更する。いくつかの実施形態では、動作周波数は約10マイクロ秒以下の間に変更される。電気信号発生器209A/Bの動作周波数は、VIプローブ117A/Bによって測定される複素電圧と複素電流との間の位相差が所定の許容範囲内にあるとコントローラ113が判定するまで変更される。複素電圧と複素電流との間の位相差が所定の許容範囲内であると判定すると、コントローラ113は、それ以上電気信号発生器209A/Bへの周波数入力を変更しない。位相差が所定の許容範囲内にある場合、所定の量の電力が、第1/第2のダイレクトドライブRF電源101A/Bの出力O1/O2から第1/第2のリアクタンス回路103A/Bを通じてコイル105へ提供される。

20

30

40

【0046】

いくつかの実施形態では、電気信号発生器209A/Bへの周波数入力の変更に加えて、または替えて、電圧源Vdcによって生成される電圧信号を変更するために、電圧源Vdcに供給されている整形制御信号214A/Bにおける電圧値を変更する。電圧源Vdcは、整形制御信号214A/Bによって示される電圧値に従って電圧レベルを変更する。コントローラ113は、整形増幅矩形波形が所定の電力設定値を達成するまで、整形制御信号214A/Bにおける電圧値の変更を継続する。いくつかの実施形態では、所定の電力設定値は、コントローラ113のメモリデバイスに記憶される。様々な実施形態では、出力O1/O2における整形増幅矩形波形の電圧の変更に替えて、整形増幅矩形波形における電流が変更される。例えば、整形制御信号214A/Bにおける電圧値の変更を方

50

向づけることによって、コントローラ 113 は、整形増幅矩形波形が所定の電流設定値を達成するまで、出力 O1 / O2 における整形増幅矩形波形の電流を変更する。いくつかの実施形態では、所定の電流設定値は、コントローラ 113 のメモリデバイスに記憶される。いくつかの実施形態では、出力 O1 / O2 における整形増幅矩形波形の電圧または電流の変更に替えて、整形増幅矩形波形の電力が変更される。例えば、整形制御信号 214 A / B における電圧値の変更を方向づけることによって、コントローラ 113 は、整形増幅矩形波形が所定の電力設定値を達成するまで、出力 O1 / O2 における整形増幅矩形波形の電力を変更する。いくつかの実施形態では、所定の電力設定値は、コントローラ 113 のメモリデバイスに記憶される。出力 O1 / O2 において生成される整形増幅矩形波形の電圧、電流、または電力のいかなる変化も、第 1 / 第 2 のリアクタンス回路 103 A / B によって出力される整形正弦波形の電圧、電流、または電力についてそれぞれ同じ変化をもたらすことに留意されたい。

10

【0047】

いくつかの実施形態では、コントローラ 113 は、モータドライバおよびモータ（例えばステッピングモータ）を通じて第 1 / 第 2 のリアクタンス回路 103 A / B に結合される。いくつかの実施形態では、モータドライバは、1 つまたは複数のトランジスタを含む集積回路デバイスとして実装される。コントローラ 113 は、Q 値制御信号を接続 127 A / B を通じて第 1 / 第 2 のリアクタンス回路 103 A / B 内のモータドライバに送信し、そしてそれによってモータドライバからモータへ伝送される電気信号の生成を方向づける。モータは、モータドライバから受信した電気信号に従って動作することで、第 1 / 第 2 のリアクタンス回路 103 A / B のリアクタンスを変化させる。例えば、いくつかの実施形態では、モータは、可変コンデンサ 104 A / B 内の導電性プレート間の面積（または間隔）を変化させることによって第 1 / 第 2 のリアクタンス回路 103 A / B のリアクタンスを変化させるように動作する。いくつかの実施形態では、第 1 / 第 2 のリアクタンス回路 103 A / B のリアクタンスは、第 1 / 第 2 のリアクタンス回路 103 A / B の所定の Q 値を維持するように変更される。

20

【0048】

コイル 105 のインダクタンスと組合わされる第 1 / 第 2 のリアクタンス回路 103 A / B は、高 Q 値（Q）を有する。例えば、第 1 / 第 2 のリアクタンス回路 103 A / B で失われる、出力 O1 / O2 において生成される整形増幅矩形波形の電力量は、第 1 / 第 2 のリアクタンス回路 103 A / B の出力からコイル 105 に伝送される整形正弦波形の電力量よりも少ない。第 1 / 第 2 のリアクタンス回路 103 A / B の高 Q 値（Q）は、プラズマ処理チャンバ 111 内におけるプラズマの高速点火を促進する。さらに、第 1 / 第 2 のリアクタンス回路 103 A / B は、コイル 105 およびプラズマの誘導性リアクタンスと共振するように構成および設定され、したがって、第 1 / 第 2 のダイレクトドライブ RF 電源 101 A / B の出力 O1 / O2 は抵抗 115 A / B を見るが、本質的にはいかなるリアクタンスも伴わない。例えば、第 1 のリアクタンス回路 103 A は、コイル 105、プラズマ、および第 1 のリアクタンス回路 103 A とコイル 105 との間の RF 電力伝送接続のリアクタンスを無効にするまたは打ち消すなど、低減させるリアクタンスを有するように制御される。いくつかの実施形態では、第 1 のリアクタンス回路 103 A のリアクタンスは、可変コンデンサ 104 A の静電容量設定を制御することによって制御される。同様に、第 2 のリアクタンス回路 103 B は、コイル 105、プラズマ、および第 2 のリアクタンス回路 103 B とコイル 105 との間の RF 電力伝送接続のリアクタンスを無効にするまたは打ち消すなど、低減させるリアクタンスを有するように制御される。いくつかの実施形態では、第 2 のリアクタンス回路 103 B のリアクタンスは、可変コンデンサ 104 B の静電容量設定を制御することによって制御される。

30

40

【0049】

いくつかの実施形態では、第 1 のトランジスタ 239 A / B および第 2 のトランジスタ 241 A / B は、低内部抵抗および高速切り替え時間を有するように、かつ第 1 のトランジスタ 239 A / B および第 2 のトランジスタ 241 A / B の冷却を促進するように、炭

50

化ケイ素から製造される。炭化ケイ素の第1のトランジスタ239A/Bおよび炭化ケイ素の第2のトランジスタ241A/Bの低内部抵抗は、第1のトランジスタ239A/Bおよび第2のトランジスタ241A/Bによって生成される熱量を減少させる。それによって、冷却プレートまたはヒートシンクを用いた第1のトランジスタ239A/Bおよび第2のトランジスタ241A/Bの冷却が容易になる。さらに、第1のトランジスタ239A/Bおよび第2のトランジスタ241A/Bの低内部抵抗は、高効率をもたらし、それによって第1のトランジスタ239A/Bおよび第2のトランジスタ241A/Bが、10マイクロ秒未満などで、ほとんど瞬時にオンになり即座にオフになることが可能になる。いくつかの実施形態では、第1のトランジスタ239A/Bおよび第2のトランジスタ241A/Bのそれぞれは、10マイクロ秒未満など、予め決められた期間未満でオンおよびオフとなるように構成される。いくつかの実施形態では、第1のトランジスタ239A/Bおよび第2のトランジスタ241A/Bのそれぞれは、約0.5マイクロ秒〜約10マイクロ秒にわたる期間内にオンおよびオフとなるように構成される。いくつかの実施形態では、第1のトランジスタ239A/Bおよび第2のトランジスタ241A/Bのそれぞれは、約1マイクロ秒〜約5マイクロ秒にわたる期間内にオンおよびオフとなるように構成される。いくつかの実施形態では、第1のトランジスタ239A/Bおよび第2のトランジスタ241A/Bのそれぞれは、約3マイクロ秒〜約7マイクロ秒にわたる期間内にオンおよびオフとなるように構成される。第1のトランジスタ239A/Bおよび第2のトランジスタ241A/Bのそれぞれにおけるオンおよびオフ状態間の遷移には、本質的に遅延が生じないことが理解されたい。このようにして、第1のトランジスタ239A/Bがオンになると、第2のトランジスタ241A/Bは本質的に同時にオフになる。さらに、第1のトランジスタ239A/Bがオフになると、第2のトランジスタ241A/Bは本質的に同時にオンになる。第1のトランジスタ239A/Bおよび第2のトランジスタ241A/Bは、第1のトランジスタ239A/Bおよび第2のトランジスタ241A/Bを通じて電圧源Vdcから基準接地電位242A/Bに電流が直接流れることを避けるために、第1のトランジスタ239A/Bおよび第2のトランジスタ241A/Bが同時にオンとならないことを確実にするのに十分な高速でオンおよびオフに切り替わるように構成される。

10

20

30

40

50

【0050】

第1/第2のダイレクトドライブRF電源101A/Bのトランジスタなどの部品が電子部品であることが理解されたい。さらに、第1/第2のダイレクトドライブRF電源101A/Bからコイル105へのRF電力伝送路内にRFインピーダンス整合ネットワークおよびRFケーブルが存在しないことが理解されない。第1/第2のダイレクトドライブRF電源101A/B内の電子部品と組み合わせて、第1/第2のダイレクトドライブRF電源101A/Bからコイル105へのRF電力伝送路内におけるRFインピーダンス整合ネットワークおよびRFケーブルの不在が、異なるプラズマ処理チャンバ111にわたる/その間でのプラズマの高速点火ならびにプラズマの持続可能性に関する再現性および一貫性をもたらす。

【0051】

図3は、いくつかの実施形態に従う、第1のトランジスタ239A/Bおよび第2のトランジスタ241A/Bにわたる電圧リミッタを実装するハーフブリッジトランジスタ回路233A/Bの回路概略図を示す。ダイオード303A/Bが第1のトランジスタ239A/Bのドレイン端子(D)とソース端子(S)との間に接続され、第1のトランジスタ239A/Bにわたる電圧を制限する。第1のトランジスタ239A/Bがオンにされ、かつ第2のトランジスタ241A/Bがオフにされると、第1のトランジスタ239A/Bにわたる電圧は、電圧がダイオード303A/Bによって制限されるまで増加する。ダイオード303A/Bは、電流が、第1のトランジスタ239A/Bを通じて直接電圧源Vdcから基準接地電位242A/Bへ不利にシュートすることを防ぐ働きをする。同様に、ダイオード305A/Bが第2のトランジスタ241A/Bのドレイン端子(D)とソース端子(S)との間に接続され、第2のトランジスタ241A/Bにわたる電圧を

制限する。第2のトランジスタ241A/Bがオンにされ、かつ第1のトランジスタ239A/Bがオフにされると、第2のトランジスタ241A/Bにわたる電圧は、電圧がダイオード305A/Bによって制限されるまで増加する。ダイオード305A/Bは、電流が、第2のトランジスタ241A/Bを通じて直接電圧源Vdcから基準接地電位242A/Bへ不利にシュートすることを防ぐ働きをする。コンデンサ301A/Bが第1のトランジスタ239A/Bのドレイン端子(D)と、第2のトランジスタ241A/Bのソース端子(S)との間に接続される。第1のトランジスタ239A/Bおよび/または第2のトランジスタ241A/Bのオフおよびオンに遅延が生じる場合には、電圧源Vdcからコンデンサ301A/Bを通じて基準接地電位242A/Bへ電流が流れ、それによって、第1/第2のダイレクトドライブRF電源101A/Bの出力O1/O2を通じてコイル105へ流れる電流の不利な、かつ潜在的にダメージを与える量を有する可能性を低減する。

10

【0052】

図4Aは、いくつかの実施形態に従う、第1/第2のダイレクトドライブRF電源101A/Bの出力O1/O2において生成される整形増幅矩形波形401例のパラメータの時間の関数としてのプロットを示す。整形増幅矩形波形401のパラメータは、電力、電圧、または電流のいずれかである。整形増幅矩形波形401は、コントローラ113および/または波形発生器213A/Bによって方向づけられたように整形制御信号214A/Bが示す電圧値に従って生成された整形包絡線403を有する。整形包絡線403は、整形増幅矩形波形401のパラメータの絶対の大きさが、第1のレベルL1（ローレベル）と第2のレベルL2（ハイレベル）との間で遷移するように制御される。パラメータは、第1のレベルL1において、第2のレベルL2よりも低いピーク・ツー・ピークの大きさを有する。整形包絡線403は、整形制御信号214A/Bが示す電圧値に応じて、図4Aに示すものとは異なる形状を有することができる。例えば、整形制御信号214A/Bは、整形包絡線403が連続波形状、三角形状、マルチレベルパルス形状、または本質的にあらゆる所定かつ制御された任意の形状を有するように方向づけるように生成可能である。

20

【0053】

図4Bは、いくつかの実施形態に従う、第1/第2のリアクタンス回路103A/Bの出力において生成される整形正弦波形405例のパラメータの時間の関数としてのプロットを示す。整形正弦波形405のパラメータは、電力、電圧、または電流のいずれかである。整形正弦波形405は、第1/第2のリアクタンス回路103A/Bに時間の関数として入力される整形増幅矩形波形401に基づく。整形増幅矩形波形401は、基本周波数正弦波形405Aと、複数の高次高調波正弦波形405B、405Cなどとの組み合わせである。例えば、正弦波形405Bは、基本周波数正弦波形405Aの二次高調波を表す。さらに、正弦波形405Cは、基本周波数正弦波形405Aの三次高調波を表す。第1/第2のリアクタンス回路103A/Bは、整形増幅矩形波形405から高次高調波正弦波形405B、405Cを除去するように機能し、それによって基本周波数正弦波形405Aのみが第1/第2のリアクタンス回路103A/Bの出力において時間の関数として提供される。第1/第2のリアクタンス回路103A/Bの高Q値は、第1/第2のダイレクトドライブRF電源101A/Bから出力される整形増幅矩形波形401からの、高次高調波正弦波形405B、405Cの除去を促進する。基本周波数正弦波形405Aは、整形正弦波形としてコイル105に伝送され、したがってRF電力をコイル105に伝送する。

30

40

【0054】

図5Aは、いくつかの実施形態に従う、第1/第2のリアクタンス回路103A/Bの出力において生成される整形正弦波形501例のパラメータの時間の関数としてのプロットを示す。整形正弦波形501のパラメータは、電力、電圧、または電流のいずれかである。整形正弦波形501は、コントローラ113および/または波形発生器213A/Bによって方向づけられたように整形制御信号214A/Bが示す電圧値に従って生成され

50

た整形包絡線 503 を有する。整形包絡線 503 は、整形正弦波形 501 のパラメータにおけるピーク・ツー・ピークの変化を時間の関数として定義する。整形包絡線 503 例は、パルス整形包絡線などの、実質的に矩形の包絡線を表す。

【0055】

図 5 B は、いくつかの実施形態に従う、第 1 / 第 2 のリアクタンス回路 103 A / B の出力において生成される整形正弦波形 505 例のパラメータの時間の関数としてのプロットを示す。整形正弦波形 505 のパラメータは、電力、電圧、または電流のいずれかである。整形正弦波形 505 は、コントローラ 113 および / または波形発生器 213 A / B によって方向づけられたように整形制御信号 214 A / B が示す電圧値に従って生成された整形包絡線 507 を有する。整形包絡線 507 は、整形正弦波形 505 のパラメータにおけるピーク・ツー・ピークの変化を時間の関数として定義する。整形包絡線 505 例は、実質的に三角形の包絡線を表す。

【0056】

図 5 C は、いくつかの実施形態に従う、第 1 / 第 2 のリアクタンス回路 103 A / B の出力において生成される整形正弦波形 509 例のパラメータの時間の関数としてのプロットを示す。整形正弦波形 509 のパラメータは、電力、電圧、または電流のいずれかである。整形正弦波形 509 は、コントローラ 113 および / または波形発生器 213 A / B によって方向づけられたように整形制御信号 214 A / B が示す電圧値に従って生成された整形包絡線 511 を有する。整形包絡線 511 は、整形正弦波形 509 のパラメータにおけるピーク・ツー・ピークの変化を時間の関数として定義する。整形包絡線 511 例は、3 つの異なる状態 S1、S2、および S3 を含むマルチステート形状包絡線を表す。整形包絡線 511 は、第 1 の状態 S1 での整形正弦波形 509 のパラメータにおけるピーク・ツー・ピークの変化が、第 2 の状態 S2 での整形正弦波形 509 のパラメータにおけるピーク・ツー・ピークの変化よりも大きくなるように定義される。整形包絡線 511 はまた、第 2 の状態 S2 での整形正弦波形 509 のパラメータにおけるピーク・ツー・ピークの変化が、第 3 の状態 S3 での整形正弦波形 509 のパラメータにおけるピーク・ツー・ピークの変化よりも大きくなるように定義される。整形包絡線 511 は、第 3 の状態 S3 の後、第 1 の状態 S1 に戻る。状態 S1、S2、および S3 は、第 1 / 第 2 のダイレクトドライブ RF 電源 101 A / B によって出力される整形増幅矩形波形の周波数未満の周波数で繰り返される。したがって、状態 S1、S2、および S3 は、整形正弦波形 509 の周波数未満の周波数で繰り返される。様々な実施形態において、マルチステート形状包絡線は 4 つ以上の異なる状態を含み、異なる状態のそれぞれが、整形正弦波形 509 のパラメータにおける時間の関数としての異なるピーク・ツー・ピークの変化に対応する。さらに、様々な実施形態において、マルチステート形状包絡線は、整形包絡線の 3 つ以上の異なる状態のいずれかが、整形包絡線における次の状態に対して低いまたは高い、整形正弦波形 509 のパラメータのピーク・ツー・ピークの大きさを有するように制御可能である。

【0057】

図 5 D は、いくつかの実施形態に従う、第 1 / 第 2 のリアクタンス回路 103 A / B の出力において生成される整形正弦波形 513 例のパラメータの時間の関数としてのプロットを示す。整形正弦波形 513 のパラメータは、電力、電圧、または電流のいずれかである。整形正弦波形 513 は、コントローラ 113 および / または波形発生器 213 A / B によって方向づけられたように整形制御信号 214 A / B が示す電圧値に従って生成された整形包絡線 515 を有する。整形包絡線 515 は、整形正弦波形 513 のパラメータにおけるピーク・ツー・ピークの変化を時間の関数として定義する。整形包絡線 515 例は、実質的に平らであり、したがって整形正弦波形 513 は、実質的に固定されたピーク・ツー・ピークの大きさである連続波信号を表す。

【0058】

図 6 は、いくつかの実施形態に従う、第 1 / 第 2 のダイレクトドライブ RF 電源 101 A / B からプラズマ処理チャンバ 111 へ RF 電力を送達する方法のフローチャートを示

す。方法は、第1の整形増幅矩形波形信号を第1のダイレクトドライブRF電源101Aの出力から第1のリアクタンス回路103Aへ伝送するためであり、第1のリアクタンス回路103Aは、第1の整形増幅矩形波形信号を第1の整形正弦波信号に変換するように動作する操作601Aを含む。いくつかの実施形態では、第1のダイレクトドライブRF電源101Aは、非50ohm出力インピーダンスを有する。方法はまた、第1の整形正弦波信号を、第1のリアクタンス回路103Aの出力からプラズマ処理チャンバ111のコイル105の第1の端に伝送するための操作603Aを含む。第1の整形正弦波信号は、RF電力をコイル105に伝える。

【0059】

方法はまた、RF電力のピーク量が第1のダイレクトドライブRF電源101Aから第1のリアクタンス回路103Aを通じてコイル105に伝送されるように、第1のリアクタンス回路103A内の静電容量設定を調整するための任意選択の操作605Aを含む。いくつかの実施形態では、操作605Aにおいて静電容量設定を調整することは、第1のダイレクトドライブRF電源101Aがコイル105を通じて接続される負荷が主に抵抗負荷となるように、第1のダイレクトドライブRF電源101Aがコイル105を通じて接続される負荷の誘導分を本質的に打ち消す。いくつかの実施形態では、操作605Aにおいて静電容量設定を調整することは、第1のダイレクトドライブRF電源101Aの出力から第1のリアクタンス回路103Aに伝送される第1の整形増幅矩形波形信号の非基本高調波要素を除去する。

【0060】

方法は、第2の整形増幅矩形波形信号を第2のダイレクトドライブRF電源101Bの出力から第2のリアクタンス回路103Bへ伝送するためであり、第2のリアクタンス回路103Bは、第2の整形増幅矩形波形信号を第2の整形正弦波信号に変換するように動作する操作601Bを含む。いくつかの実施形態では、第2のダイレクトドライブRF電源101Bは、非50ohm出力インピーダンスを有する。方法はまた、第2の整形正弦波信号を、第2のリアクタンス回路103Bの出力からプラズマ処理チャンバ111のコイル105の第2の端に伝送するための操作603Bを含む。第2の整形正弦波信号は、RF電力をコイル105に伝える。

【0061】

方法はまた、RF電力のピーク量が第2のダイレクトドライブRF電源101Bから第2のリアクタンス回路103Bを通じてコイル105に伝送されるように、第2のリアクタンス回路103B内の静電容量設定を調整するための任意選択の操作605Bを含む。いくつかの実施形態では、操作605Bは、第2のリアクタンス回路103B内の可変コンデンサ104Bの静電容量設定を調整することによって第1のリアクタンス回路103A内の可変コンデンサ104Aの静電容量設定と実質的に整合させることを含む。いくつかの実施形態では、操作605Bにおいて静電容量設定を調整することは、第2のダイレクトドライブRF電源101Bがコイル105を通じて接続される負荷が主に抵抗負荷となるように、第2のダイレクトドライブRF電源101Bがコイル105を通じて接続される負荷の誘導分を本質的に打ち消す。いくつかの実施形態では、操作605Bにおいて静電容量設定を調整することは、第2のダイレクトドライブRF電源101Bの出力から第2のリアクタンス回路103Bに伝送される第2の整形増幅矩形波形信号の非基本高調波要素を除去する。方法操作601A、601B、603A、603B、ならびに任意選択で605Aおよび605Bは、互いに並行して行われることが理解されたい。

【0062】

いくつかの実施形態では、第1のダイレクトドライブRF電源101Aによって出力される第1の整形増幅矩形波形信号は、約2メガヘルツ(MHz)の周波数を有し、第1のリアクタンス回路103A内の可変コンデンサ104Aの静電容量設定は、操作605Aにおいて約2500ピコファラッド(pF)~約4500pFにわたる範囲内に調整される。さらに、第2のダイレクトドライブRF電源101Bによって出力される第2の整形増幅矩形波形信号もまた、約2MHzの周波数を有し、第2のリアクタンス回路103B

内の可変コンデンサ 104B の静電容量設定は、操作 605B において、第 1 のリアクタンス回路 103A 内の可変コンデンサ 104A と実質的に同じ静電容量設定を有するように調整される。いくつかの実施形態では、第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101A によって出力される第 1 の整形増幅矩形波形信号は、約 13.56 MHz の周波数を有し、第 2 のリアクタンス回路 103A 内の可変コンデンサ 104A の静電容量設定は、操作 605A において約 5 pF ～ 約 1000 pF にわたる範囲内に調整される。さらに、第 2 のダイレクトドライブ RF 電源 101B によって出力される第 2 の整形増幅矩形波形信号もまた、約 13.56 MHz の周波数を有し、第 2 のリアクタンス回路 103B 内の可変コンデンサ 104B の静電容量設定は、操作 605B において、第 1 のリアクタンス回路 103A 内の可変コンデンサ 104A と実質的に同じ静電容量設定を有するように調整される。

10

【0063】

いくつかの実施形態では、第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101A は、約 2 MHz の周波数を有する第 1 の整形増幅矩形波形信号をコイル 105 の第 1 の端に供給するように構成され、第 2 のダイレクトドライブ RF 電源 101B は、同じく約 2 MHz の周波数を有する第 2 の整形増幅矩形波形信号をコイル 105 の第 2 の端に同時に供給するように構成される。これらの実施形態のいくつかでは、第 1 のリアクタンス回路 103A は、約 2500 pF ～ 約 4500 pF にわたる範囲内の静電容量を、第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101A の出力 O1 とコイル 105 の第 1 の端との間に提供するように構成される。さらに、第 2 のリアクタンス回路 103B は、第 1 のリアクタンス回路 103A によって提供される静電容量と実質的に等しい静電容量を、第 2 のダイレクトドライブ RF 電源 101B の出力 O2 とコイル 105 の第 2 の端との間に提供するように構成される。これらの実施形態のいくつかでは、第 1 のリアクタンス回路 103A は、互いに並列に接続された可変コンデンサ 104A と固定コンデンサとを含み、第 2 のリアクタンス回路 103B は、互いに並列に接続された可変コンデンサ 104B と固定コンデンサとを含む。これらの実施形態のいくつかでは、可変コンデンサ 104A および 104B のそれぞれの静電容量設定は、約 100 pF ～ 約 2000 pF にわたる範囲内に調節可能である。さらに第 1 のリアクタンス回路 103A 内および第 2 のリアクタンス回路 103B 内の固定コンデンサのそれぞれの静電容量設定は、約 2000 pF ～ 約 3500 pF にわたる範囲内にあり、第 2 のリアクタンス回路 103B は、第 1 のリアクタンス回路 103A と実質的に同等の様式で構成される。

20

30

【0064】

いくつかの実施形態では、第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101A は、約 13.56 MHz の周波数を有する第 1 の整形増幅矩形波形信号をコイル 105 の第 1 の端に供給するように構成され、第 2 のダイレクトドライブ RF 電源 101B は、同じく約 13.56 MHz の周波数を有する第 2 の整形増幅矩形波形信号をコイル 105 の第 2 の端に同時に供給するように構成される。これらの実施形態のいくつかでは、第 1 のリアクタンス回路 103A は、約 5 pF ～ 約 1000 pF にわたる範囲内の静電容量を、第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101A の出力 O1 とコイル 105 の第 1 の端との間に提供するように構成される。さらに、第 2 のリアクタンス回路 103B は、第 1 のリアクタンス回路 103A によって提供される静電容量と実質的に等しい静電容量を、第 2 のダイレクトドライブ RF 電源 101B の出力 O2 とコイル 105 の第 2 の端との間に提供するように構成される。

40

【0065】

プラズマ処理システム 100 では、RF 電力は、コイル 105 を通じて、第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101A と第 2 のダイレクトドライブ RF 電源 101B との組み合わせによって実質的に対称的な方法で駆動される。第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101A は、RF 電力設定値の半分をコイル 105 に送達し、第 2 のダイレクトドライブ RF 電源 101B は、RF 電力設定値の半分をコイル 105 に送達する。第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101A のハーフブリッジトランジスタ回路 233A の出力 O1 に対す

50

るコイル 105 の第 1 の端の接続と併せて、第 2 のダイレクトドライブ RF 電源 101 B のハーフブリッジトランジスタ回路 233 B の出力 02 に対するコイル 105 の第 2 の端の接続によって、コイル 105 が、DC レール 235 A/B 電圧 (V_{dc}) の半分を使用して特定の RF 電力レベルで駆動されることが可能になる。DC レール 235 A/B 電圧 (V_{dc}) は、他様にコイル 105 が第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101 A および第 2 のダイレクトドライブ RF 電源 101 B のうちの 1 つのみによって駆動される場合に必要とされる電圧である。所与の DC レール 235 A/B 電圧 (V_{dc}) においてコイル 105 にはより高い電圧が生じる。したがって、コイル 105 の対向する端を第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101 A および第 2 のダイレクトドライブ RF 電源 101 B に対称的に結合させることで、プラズマ処理システム 100 は、所与の DC レール 235 A/B 電圧 (V_{dc}) においてコイル 105 を通じて駆動される RF 電力を 2 倍にすることができる。これによって、DC レール 235 A/B は、所与の RF レベルのためにより低い電圧 (V_{dc}) で操作されることが可能になり、これは、DC レール 235 A/B 内の第 1 のトランジスタ 239 A/B および第 2 のトランジスタ 241 A/B の最大電圧定格を満たす（下回った状態にする）にあたり有用である。いくつかの実施形態では、コイル 105 に RF 電力を供給するために対称的に接続された第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101 A および第 2 のダイレクトドライブ RF 電源 101 B を有する場合、DC レール 235 A/B 内の第 1 のトランジスタ 239 A/B および第 2 のトランジスタ 241 A/B の電圧制限の超過なしに、コイル 105 に送達される総 RF 電力は約 8 キロワット (kW) より大きい、または約 10 kW より大きい。さらに、第 1 のリアクタンス回路 103 A および第 2 のリアクタンス回路 103 B は、コイル 105 全体にわたる電圧バランスを維持するために、実質的に同等の静電容量レベルを提供するように構成される。コイル 105 に対する第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101 A および第 2 のダイレクトドライブ RF 電源 101 B の対称的結合は、高インダクタンスおよび低電流を有する用途において特に有益である。

10

20

30

40

50

【0066】

図 7 は、いくつかの実施形態に従う、コイル 105 の第 1 の端に接続された第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101 A と、コイル 105 の第 2 の端に接続された可変コンデンサ 701 とを有するプラズマ処理システム 700 の図を示す。プラズマ処理システム 700 において、可変コンデンサ 701 は、図 1～6 に関して記載した第 2 のダイレクトドライブ RF 電源 101 B の代替である。コイル 105 の第 2 の端は可変コンデンサ 701 の第 1 の端子に接続される。可変コンデンサ 701 の第 2 の端子は、端子基準接地電位 703 に接続される。いくつかの実施形態では、可変コンデンサ 701 の静電容量設定は、コイル 105 にわたる電圧バランスを達成するために調整され、したがってコイル 105 の第 1 の端の電圧は、コイル 105 の第 2 の端の電圧と実質的に等しい。いくつかの実施形態では、可変コンデンサ 701 の静電容量設定は、可変コンデンサ 701 のリアクタンスがコイル 105 のリアクタンスの半分と実質的に等しいバランスのとれた RF 電力供給状態を達成するために調整される。いくつかの実施形態では、可変コンデンサ 701 の静電容量設定は、プラズマ処理チャンバ 111 内のプラズマ密度を最適化（例えば最大化）するために調整される。いくつかの実施形態では、可変コンデンサ 701 の静電容量設定は、プラズマ処理チャンバ 111 内のプラズマ電位を最適化（例えば最小化）するために調整される。いくつかの実施形態では、可変コンデンサ 701 の静電容量設定は、プラズマ処理チャンバ 111 内のプラズマシースにわたる電圧降下を最適化（例えば最小化）するために調整される。いくつかの実施形態では、可変コンデンサ 701 の静電容量設定は、プラズマ処理チャンバ 111 内のプラズマ内の電子温度を最適化するために調整される。

【0067】

図 8 は、いくつかの実施形態に従う、RF 電力をプラズマ処理チャンバ 700 に送達する方法のフローチャートを示す。方法は、整形増幅矩形波形信号を第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101 A の出力から第 1 のリアクタンス回路 103 A へ伝送するためであり、第 1 のリアクタンス回路 103 A は、整形増幅矩形波形信号を整形正弦波信号に変換す

るように動作する操作 801 を含む。方法はまた、整形正弦波信号を第 1 のリアクタンス回路 103 A の出力からプラズマ処理チャンバ 111 のコイル 105 の第 1 の端に伝送するための操作 803 を含み、整形正弦波信号は RF 電力をコイル 105 に伝える。方法はまた、RF 電力のピーク量が第 1 のダイレクトドライブ RF 電源 101 A から第 1 のリアクタンス回路 103 A を通じてコイル 105 に伝送されるように、第 1 のリアクタンス回路 103 A を用いて静電容量設定を調整するための任意選択の操作 805 を含む。方法はまた、コイル 105 の第 2 の端と基準接地電位 703 との間に接続された可変コンデンサ 701 の静電容量設定を調整することによって、コイルからプラズマ処理チャンバ 111 内のプラズマへの RF 電力の送達に関連する所定の状態を達成する操作 807 を含む。いくつかの実施形態では、操作 807 は、コイル 105（コイル 105 の第 1 および第 2 の端の間）にわたる電圧の実質的なバランスを達成するために行われる。いくつかの実施形態では、操作 807 は、可変コンデンサ 701 のリアクタンスがコイル 105 のリアクタンスの半分と実質的に等しいバランスのとれた RF 電力供給状態を達成するために行われる。いくつかの実施形態では、操作 807 は、プラズマ処理チャンバ 111 内のプラズマ密度を最適化（例えば最大化）するために行われる。いくつかの実施形態では、操作 807 は、プラズマ処理チャンバ 111 内のプラズマ電位を最適化（例えば最小化）するために行われる。いくつかの実施形態では、操作 807 は、プラズマ処理チャンバ 111 内のプラズマシース全体にわたる電圧降下を最適化（例えば最小化）するために行われる。いくつかの実施形態では、操作 807 は、プラズマ処理チャンバ 111 内のプラズマ内の電子温度を最適化するために行われる。

10

20

【0068】

本明細書に記載の様々な実施形態は、ハンドヘルドのハードウェアユニット、マイクロプロセッサシステム、マイクロプロセッサベースの、またはプログラム可能な家電、ミニコンピュータ、メインフレームコンピュータなどを含む、様々なコンピュータシステム構成と併せて実施されてよい。本明細書に記載の様々な実施形態はまた、コンピュータネットワークを介してリンクされた遠隔処理ハードウェアユニットによってタスクが実行される、分散コンピューティング環境と併せて実行可能である。

【0069】

いくつかの実施形態では、例えばホストコンピュータシステムなどの制御システムが、プラズマ処理システム 100 および 700 の制御のために提供される。様々な実施形態では、プラズマ処理システム 100 および 700 は、1 つまたは複数の処理ツール、1 つまたは複数のチャンバ、1 つまたは複数の処理用プラットフォーム、ならびに／あるいは特定の処理部品（数ある部品のうち、ウェハ台座やガス流システムなど）などの半導体処理機器を含む。様々な実施形態では、プラズマ処理システム 100 および 700 は、半導体ウェハまたは基板の処理前、処理中、および処理後のそれらのシステムの動作を制御するために電子部品と一体化される。電子部品は、プラズマ処理システム 100 および 700 の様々な部品および／または副部品を制御するように構成かつ接続されるコントローラ内に実装される。コントローラは、基板／ウェハ処理要件および／またはプラズマ処理システム 100 および 700 の特定の構成に応じて、数あるうちの、1 つまたは複数のプロセスガスの送達、温度設定（例えば加熱および／または冷却）、圧力設定、真空設定、電力設定、第 1／第 2 のダイレクトドライブ RF 電源 101 A／101 B 設定、第 1／第 2 のリアクタンス回路 103 A／B 設定、可変コンデンサ 701 設定、電気信号周波数設定、ガス流量設定、流体送達設定、位置および動作設定、プラズマ処理チャンバ 111 への、ならびに／あるいはプラズマ処理システム 100 および 700 と接続またはインターフェース接続されたロードロックへの基板／ウェハの搬出入などを含む、本明細書で開示されたいずれかの処理および／または構成要素を制御するようにプログラムされる。

30

40

【0070】

概括的には、様々な実施形態において、プラズマ処理システム 100 および 700 の動作を制御するために接続されたコントローラは、数あるタスク／操作のうち、命令を受信する、命令を出す、デバイス動作を制御する、洗浄操作を可能にする、エンドポイント測

50

定を可能にする、計量測定（光、熱、電気など）を可能にするなど様々なタスク／操作を方向づける、および制御する各種集積回路、ロジック、メモリ、および／またはソフトウェアを有する電子部品として定義される。いくつかの実施形態では、コントローラ内の集積回路は、数あるコンピューティングデバイスのうち、プログラム命令を記憶する1つまたは複数のファームウェア、デジタルシグナルプロセッサ（DSP）、特定用途向け集積回路（ASIC）チップ、プログラマブルロジックデバイス（PLD）、プログラム命令（例えばソフトウェア）を実行する1つまたは複数のマイクロプロセッサおよび／またはマイクロコントローラなどを含む。いくつかの実施形態では、プログラム命令は、様々な個別の設定（またはプログラムファイル）の形式でコントローラに通信され、プログラム命令は、プラズマ処理システム100および700内における基板／ウェハ上への処理を実行するための操作パラメータを定義する。いくつかの実施形態では、操作パラメータは、1つまたは複数の層、材料、金属、酸化物、ケイ素、二酸化ケイ素、表面、回路、および／または基板／ウェハ上のダイの製作中に1つまたは複数の処理ステップを達成するためにプロセスエンジニアによって定義されるレシピに含まれる。

10

【0071】

いくつかの実施態様では、コントローラは、プラズマ処理システム100および700に統合されるか、または接続されるか、そうでなければプラズマ処理システム100および700にネットワーク接続されるか、それらの組み合わせであるコンピュータの一部であるか、あるいはそのようなコンピュータと接続される。例えば、いくつかの実施形態では、コントローラは、「クラウド」内、あるいは製作工場のホストコンピュータシステムの全体または一部で実装され、それによってプラズマ処理システム100および700による基板／ウェハ処理を制御するための遠隔アクセスが可能になる。コントローラは、プラズマ処理システム100および700への遠隔アクセスを可能にすることで、製作作業の現在の進行状況を監視する、過去の製作作業の履歴を調査する、複数の製作作業にから傾向または性能基準を調査する、処理パラメータを変更する、後続の処理ステップの設定をする、および／または新たな基板／ウェハ製作処理を始める。

20

【0072】

いくつかの例では、サーバコンピュータシステムなどの遠隔コンピュータが、コンピュータネットワークを介してプラズマ処理システム100および700のコントローラに処理レシピを提供し、ネットワークは、ローカルネットワークおよび／またはインターネットを含む。遠隔コンピュータは、パラメータおよび／または設定の入力またはプログラミングを可能にするユーザインターフェースを含み、パラメータおよび／または設定はその後遠隔コンピュータからプラズマ処理システム100および700のコントローラに通信される。いくつかの例では、コントローラは、プラズマ処理システム100および700内で基板／ウェハを処理するための設定の形式で命令を受け取る。設定は、基板／ウェハ上に行われる処理の種類と、コントローラがインターフェース接続するまたは制御するツール／デバイス／部品の種類とに特有のものであることが理解されたい。いくつかの実施形態では、コントローラは、互いにネットワーク接続ならびに同期されて共通の目的（基板／ウェハ上の所定の処理を行うためにプラズマ処理システム100および700を操作するなど）に向かって働く1つまたは複数の離散コントローラを含むことなどによって分散される。そのような目的のための分散型コントローラの例としては、遠隔に配置されて（プラットフォームレベルで、または遠隔コンピュータの一部としてなど）チャンバ内での処理を制御するために協同する1つまたは複数の集積回路と通信する、チャンバ上の1つまたは複数の集積回路が挙げられる。プラズマ処理システム100および700によって行われる処理動作に応じて、コントローラは、他のツール回路またはモジュール、他のツール構成要素、クラスタツール、他のツールインターフェース、隣接ツール、近接ツール、工場全体に配置されたツール、メインコンピュータ、別のコントローラ、あるいは基板／ウェハの容器を半導体製造工場内のツール位置および／またはロードポート内外に移送する材料搬送に使用されるツールのうちの、1つまたは複数と通信する。

30

40

【0073】

50

いくつかの実施形態では、プラズマ処理システム100および700の操作は、コンピュータシステム内に記憶されたデータを伴う様々なコンピュータ実装操作の実行を含むことが理解されたい。これらのコンピュータ実装操作は、物理量を操作する。様々な実施形態において、コンピュータ実装操作は、汎用コンピュータまたは専用コンピュータのいずれかによって実行される。いくつかの実施形態では、コンピュータ実装操作は、選択的にアクティブ化されたコンピュータによって実行される、ならびに／あるいはコンピュータメモリに記憶されるか、またはコンピュータネットワークを介して取得された1つまたは複数のコンピュータプログラムによって方向づけられる。コンピュータネットワークを介してコンピュータプログラムおよび／またはデジタルデータが取得される場合、デジタルデータは、コンピュータネットワーク上の他のコンピュータ、例えばコンピューティングリソースのクラウドによって処理されてよい。コンピュータプログラムおよびデジタルデータは、非一時的コンピュータ可読媒体上にコンピュータ可読コードとして記憶される。非一時的コンピュータ可読媒体は、データを記憶する任意のデータ記憶ハードウェアユニット（例えばメモリデバイスなど）であり、後にコンピュータシステムによって可読である。非一時的コンピュータ可読媒体の例としては、ハードドライブ、ネットワークアタッチトストレージ（NAS）、ROM、RAM、コンパクトディスクROM（CD-ROMs）、CDレコーダブル（CD-Rs）、CDリライタブル（CD-RWs）、デジタルビデオ／多用途ディスク（DVD）、磁気テープ、ならびに他の光学および非光学データ記憶ハードウェアユニットが挙げられる。いくつかの実施形態では、コンピュータプログラムおよび／またはデジタルデータは、結合されたコンピュータシステムのネットワーク内における異なるコンピュータシステムに位置する複数のコンピュータ可読媒体の間に分散され、それによってコンピュータプログラムおよび／またはデジタルデータは、分散方式で実行および／または記憶される。

10

20

30

【0074】

前述の開示は、明確な理解のためにある程度の詳細を含むが、特定の変更および修正を添付の特許請求の範囲の範囲内で実践できることは明らかであろう。例えば、本明細書で開示される任意の実施形態からの1つまたは複数の特徴は、本明細書で開示される任意の他の実施形態の1つまたは複数の特徴と組み合わせてよいことが理解されたい。したがって、本実施形態は、限定ではなく例示と見なされるべきであり、特許請求の範囲は本明細書に述べられる詳細に限定されるべきではなく、記載された実施形態の範囲および均等物の範囲内で修正されてもよい。

【0075】

特許請求の範囲は、以下の通りである。

40

50

【図面】
【図 1】

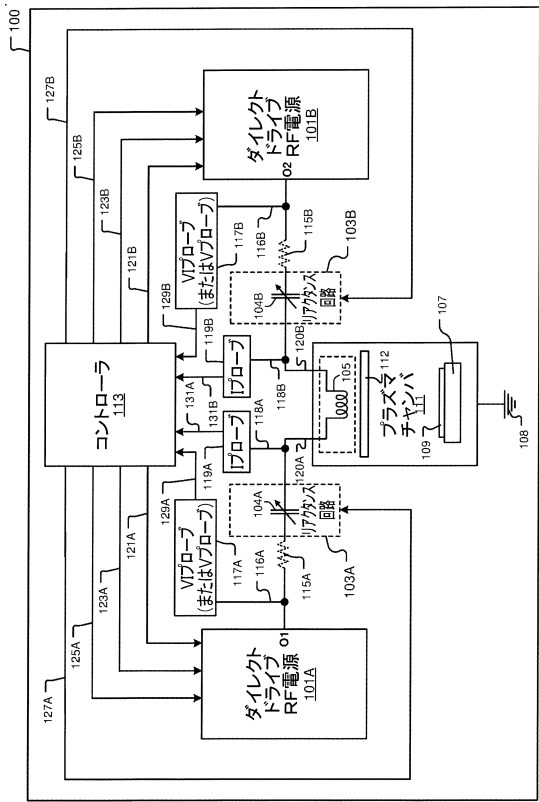


Fig. 1

【図 2】

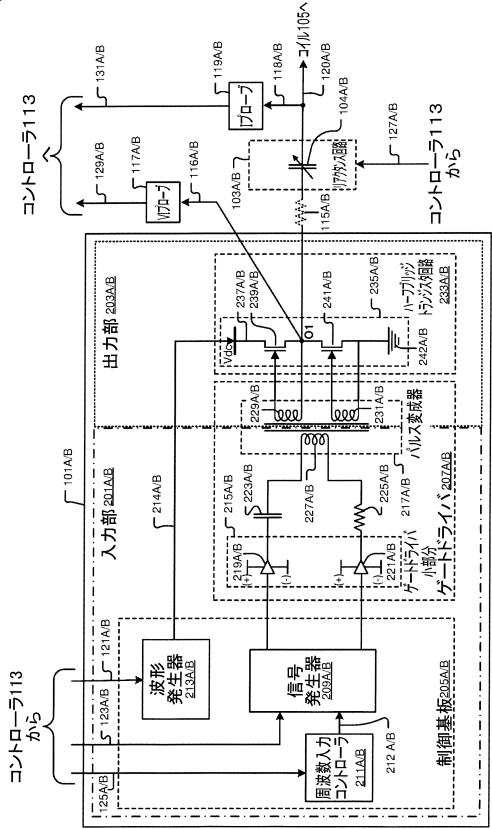


Fig. 2

【図 3】

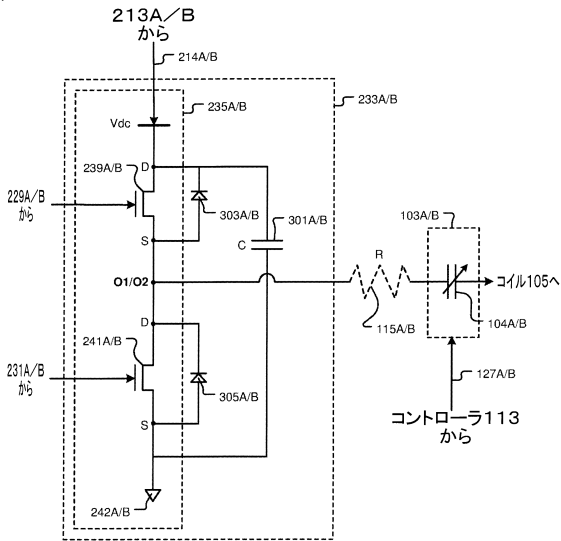


Fig. 3

【図 4 A】

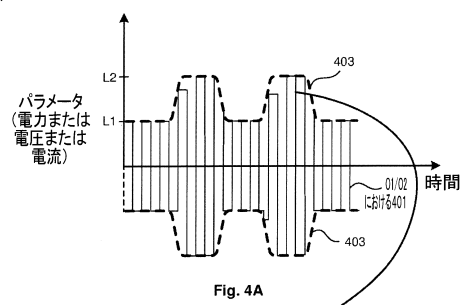


Fig. 4A

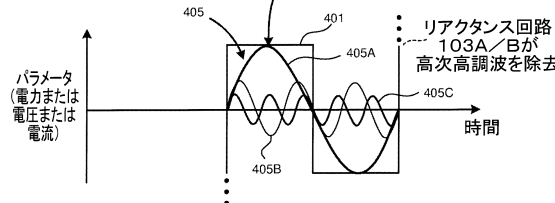


Fig. 4B

10

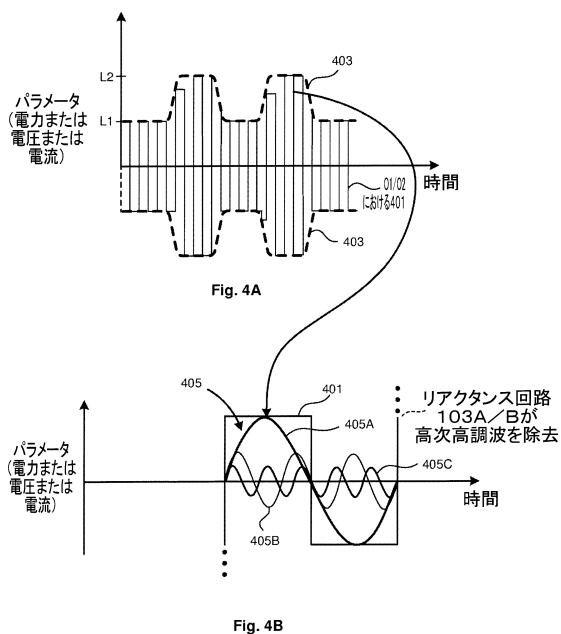
20

30

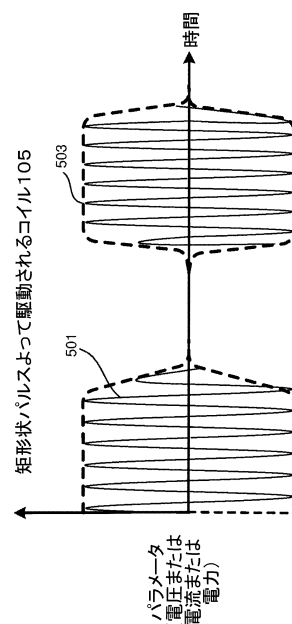
40

50

【図 4 B】

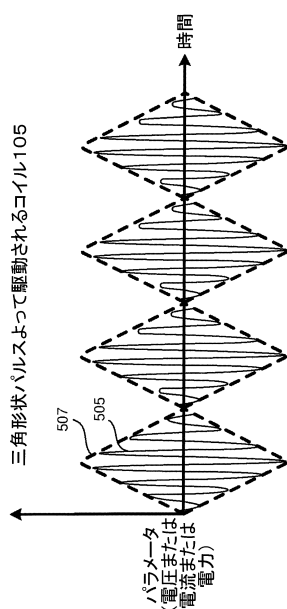


【図 5 A】

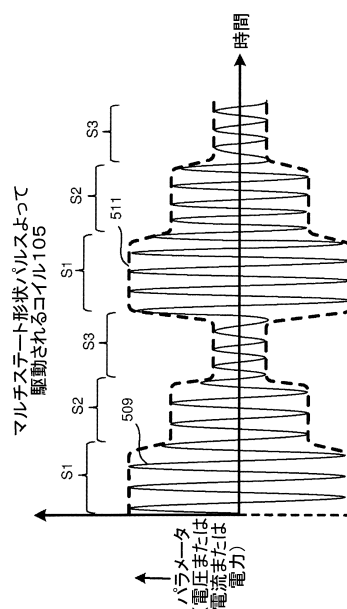


10

【図 5 B】



【図 5 C】



20

30

40

50

【図 5 D】

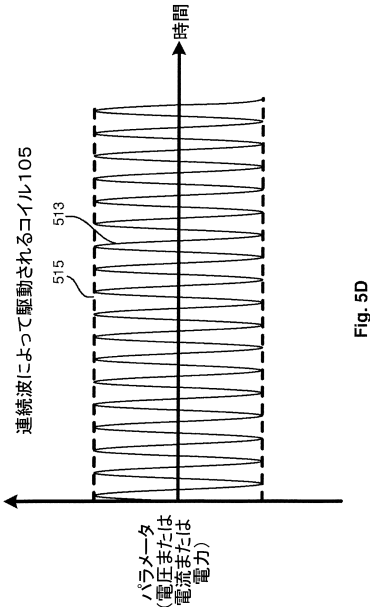


Fig. 5D

【図 6】

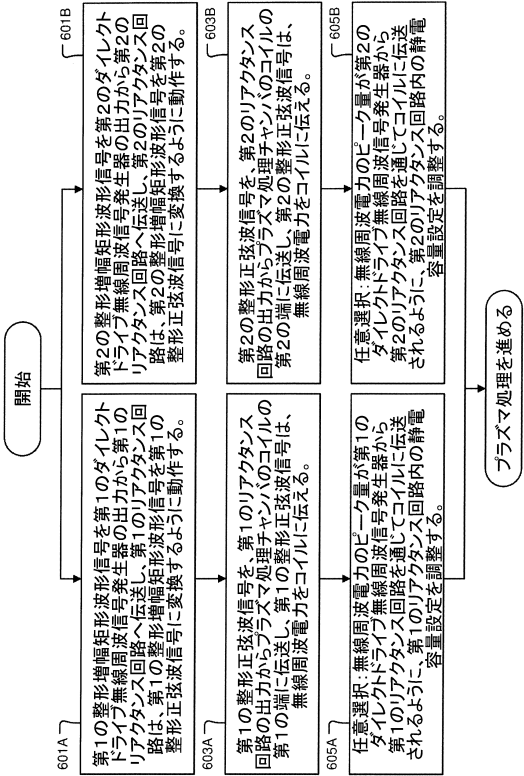


Fig. 6

【図 7】

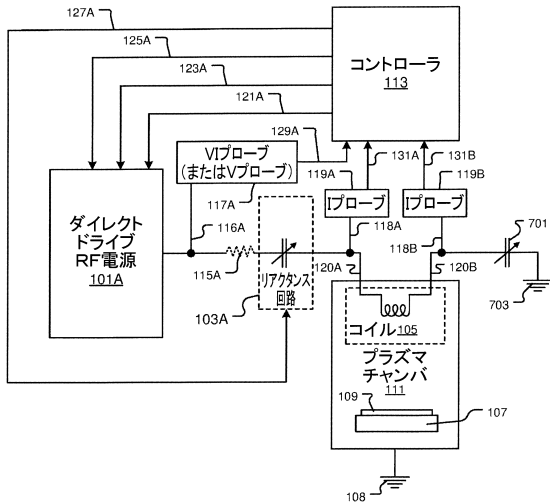


Fig. 7

【図 8】

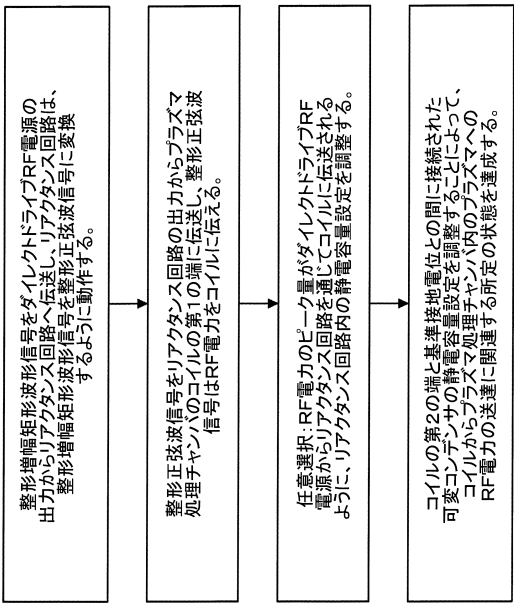


Fig. 8

10

20

30

40

50

【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/US2022/043464

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER H01J 37/32(2006.01)i According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) H01J 37/32(2006.01); C23C 14/35(2006.01); C23C 16/46(2006.01); H01J 37/34(2006.01); H05H 1/46(2006.01) Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Korean utility models and applications for utility models Japanese utility models and applications for utility models Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) eKOMPASS(KIPO internal) & Keywords: direct-drive, radiofrequency(RF), power, reactive, square waveform, sinusoidal signal, reactance, variable capacitor, capacitance		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	US 2019-0116656 A1 (LAM RESEARCH CORPORATION) 18 April 2019 (2019-04-18) See paragraphs 6-273, claims 1-24 and figures 1-12H.	1-20
Y	WO 2020-223127 A1 (LAM RESEARCH CORPORATION) 05 November 2020 (2020-11-05) See paragraphs 37-51, claims 12-24 and figures 1-4.	1-20
Y	US 2020-0357616 A1 (APPLIED MATERIALS, INC.) 12 November 2020 (2020-11-12) See paragraphs 81-102, claims 16-20 and figure 6.	11-13,15-20
A	US 2019-0177848 A1 (APPLIED MATERIALS, INC.) 13 June 2019 (2019-06-13) See the entire document.	1-20
A	US 2018-0092196 A1 (DAIHEN CORPORATION) 29 March 2018 (2018-03-29) See the entire document.	1-20
☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☒ See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "D" document cited by the applicant in the international application "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 10 January 2023		Date of mailing of the international search report 10 January 2023
Name and mailing address of the ISA/KR Korean Intellectual Property Office 189 Cheongsa-ro, Seo-gu, Daejeon 35208, Republic of Korea Facsimile No. +82-42-481-8578		Authorized officer PARK, Hye Lyun Telephone No. +82-42-481-3463

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 2022)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/US2022/043464

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
US	2019-0116656	A1	18 April 2019	CN	111247620	A	05 June 2020
				EP	3698395	A1	26 August 2020
				JP	2021-500701	A	07 January 2021
				KR	10-2020-0059310	A	28 May 2020
				TW	201929613	A	16 July 2019
				US	10264663	B1	16 April 2019
				US	10638593	B2	28 April 2020
				US	11224116	B2	11 January 2022
				US	2019-0215942	A1	11 July 2019
				US	2020-0253034	A1	06 August 2020
				US	2022-0117074	A1	14 April 2022
				WO	2019-079325	A1	25 April 2019
WO	2020-223127	A1	05 November 2020	CN	114041204	A	11 February 2022
				JP	2022-530803	A	01 July 2022
				KR	10-2021-0149894	A	09 December 2021
				US	2022-0199365	A1	23 June 2022
US	2020-0357616	A1	12 November 2020	CN	102414793	A	11 April 2012
				CN	102439697	A	02 May 2012
				CN	102439697	B	19 August 2015
				CN	102859029	A	02 January 2013
				CN	102859029	B	06 August 2014
				CN	102918175	A	06 February 2013
				CN	102918175	B	17 February 2016
				CN	105513952	A	20 April 2016
				JP	2012-522894	A	27 September 2012
				JP	2013-524012	A	17 June 2013
				JP	2013-525609	A	20 June 2013
				JP	5714565	B2	07 May 2015
				JP	5722428	B2	20 May 2015
				JP	5784703	B2	24 September 2015
				KR	10-1801760	B1	27 November 2017
				KR	10-1841236	B1	22 March 2018
				KR	10-1968691	B1	12 April 2019
				KR	10-2012-0004502	A	12 January 2012
				KR	10-2012-0004508	A	12 January 2012
				KR	10-2013-0008596	A	22 January 2013
				KR	10-2013-0100061	A	09 September 2013
				KR	10-2016-0142413	A	12 December 2016
				KR	10-2017-0037678	A	04 April 2017
				KR	10-2017-0137227	A	12 December 2017
				KR	10-2018-0100730	A	11 September 2018
				KR	10-2042091	B1	07 November 2019
				TW	201038757	A	01 November 2010
				TW	201104004	A	01 February 2011
				TW	201137148	A	01 November 2011
				TW	201142068	A	01 December 2011
				TW	I488987	B	21 June 2015
				TW	I499682	B	11 September 2015
				TW	I521081	B	11 February 2016
				TW	I537406	B	11 June 2016

Form PCT/ISA/210 (patent family annex) (July 2022)

10

20

30

40

50

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/US2022/043464

Patent document cited in search report				Publication date (day/month/year)		Patent family member(s)		Publication date (day/month/year)	
				US	10060024	B2		28 August 2018	
				US	10763090	B2		01 September 2020	
				US	2010-0252416	A1		07 October 2010	10
				US	2010-0252417	A1		07 October 2010	
				US	2011-0240464	A1		06 October 2011	
				US	2011-0240466	A1		06 October 2011	
				US	2017-0029941	A1		02 February 2017	
				US	2017-0350001	A1		07 December 2017	
				US	8795487	B2		05 August 2014	
				US	8795488	B2		05 August 2014	
				US	9752228	B2		05 September 2017	
				WO	2010-114823	A2		07 October 2010	
				WO	2010-114823	A3		13 January 2011	
				WO	2010-114823	A4		03 March 2011	
				WO	2010-115128	A2		07 October 2010	
				WO	2010-115128	A3		13 January 2011	20
				WO	2010-115128	A4		03 March 2011	
				WO	2010-115128	A9		24 March 2011	
				WO	2011-123399	A2		06 October 2011	
				WO	2011-123399	A3		26 January 2012	
				WO	2011-139439	A2		10 November 2011	
				WO	2011-139439	A3		26 January 2012	
US	2019-0177848	A1	13 June 2019	US	10125422	B2		13 November 2018	
				US	10450653	B2		22 October 2019	
				US	2014-0302256	A1		09 October 2014	
				US	2020-0010957	A1		09 January 2020	
US	2018-0092196	A1	29 March 2018	JP	2018-049768	A		29 March 2018	
				JP	6746865	B2		26 August 2020	
				US	10306744	B2		28 May 2019	30

Form PCT/ISA/210 (patent family annex) (July 2022)

10

20

30

40

50

フロントページの続き

MK,MT,NL,NO,PL,PT,RO,RS,SE,SI,SK,SM,TR),OA(BF,BJ,CF,CG,CI,CM,GA,GN,GQ,GW,KM,ML,MR,N
 E,SN,TD,TG),AE,AG,AL,AM,AO,AT,AU,AZ,BA,BB,BG,BH,BN,BR,BW,BY,BZ,CA,CH,CL,CN,CO,CR,CU,
 CV,CZ,DE,DJ,DK,DM,DO,DZ,EC,EE,EG,ES,FI,GB,GD,GE,GH,GM,GT,HN,HR,HU,ID,IL,IN,IQ,IR,IS,IT,J
 M,JO,JP,KE,KG,KH,KN,KP,KR,KW,KZ,LA,LC,LK,LR,LS,LU,LY,MA,MD,ME,MG,MK,MN,MW,MX,MY
 ,MZ,NA,NG,NI,NO,NZ,OM,PA,PE,PG,PH,PL,PT,QA,RO,RS,RU,RW,SA,SC,SD,SE,SG,SK,SL,ST,SV,SY,T
 H,TJ,TM,TN,TR,TT,TZ,UA,UG,US,UZ,VC,VN,WS,ZA,ZM,ZW

538 フレモント, クッシング・パークウェイ, 4650

F ターム (参考)	2G084	AA02 AA05 AA07 AA08 BB03 EE15 EE17 EE24 HH02 HH05 HH20 HH21 HH22 HH27 HH52
	4K030	FA03 KA02 KA30
	5F004	BA09 BB13 BB18 BB25 BB26 CA03 CA06 CA08 CB05 CB09 CB12
	5F045	AA08 DP03 EH14 EH19 GB05 GB06