(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7539931号
(P7539931)

(45)発行日　令和6年8月26日(2024.8.26)

(24)登録日　令和6年8月16日(2024.8.16)

(51)国際特許分類		FI		
H05H	*1/46 (2006.01)*	H05H	1/46	R
H01L	*21/3065(2006.01)*	H01L	21/302	101B

請求項の数　39　（全56頁）

(21)出願番号　特願2021-572384(P2021-572384)
(86)(22)出願日　令和2年5月6日(2020.5.6)
(65)公表番号　特表2022-535282(P2022-535282A)
(43)公表日　令和4年8月5日(2022.8.5)
(86)国際出願番号　PCT/US2020/031723
(87)国際公開番号　WO2020/247138
(87)国際公開日　令和2年12月10日(2020.12.10)
審査請求日　令和5年5月1日(2023.5.1)
(31)優先権主張番号　62/858,538
(32)優先日　令和1年6月7日(2019.6.7)
(33)優先権主張国・地域又は機関
米国(US)

(73)特許権者　592010081
ラム リサーチ コーポレーション
LAM RESEARCH CORPORATION
アメリカ合衆国，カリフォルニア ９４５３８，フレモント，クッシング パークウェイ ４６５０
(74)代理人　110000028
弁理士法人明成国際特許事務所
(72)発明者　ホーバルト・アーサー・エム.
アメリカ合衆国 カリフォルニア州９４５３８ フレモント，クッシング・パークウェイ，４６５０
(72)発明者　ヴァルコア・ジョン・シー．・ジュニア
アメリカ合衆国 カリフォルニア州９４
最終頁に続く

(54)【発明の名称】　ＫＨＺ　ＲＦ発生器の動作サイクル内でＭＨＺ　ＲＦ発生器を調節するためのシステムおよび方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

調節方法であって、

第１の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルの第１のセットについて、第２の無線周波数発生器に関連する複数の反射パラメータ値にアクセスすることと、

前記複数の反射パラメータ値を無線周波数経路の少なくとも一部のコンピュータベースのモデルに適用することによって、前記複数の反射パラメータ値から複数の負荷インピーダンスパラメータ値を計算することであって、前記無線周波数経路は、前記第２の無線周波数発生器とプラズマチャンバの電極との間にあることと、

前記第２の無線周波数発生器によって生成される無線周波数信号の複数の周波数変調パラメータを受信することであって、受信される前記複数の周波数変調パラメータは、前記第１の無線周波数発生器の動作の前記１つまたは複数のサイクルのうちの１つに関連する周期関数を表す、ことと、

前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を前記コンピュータベースのモデルに適用することによって、前記複数の周波数変調パラメータの値を決定することであって、前記複数の周波数変調パラメータの前記値は、前記コンピュータベースのモデルの入力における反射係数パラメータを最小化するように決定されることと

前記第１の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルの第２のセットの間、前記複数の周波数変調パラメータの前記値に従って前記第２の無線周波数発生器を制御することと

を含む、方法。
【請求項２】
請求項１に記載の方法であって、
前記複数の反射パラメータ値に前記アクセスすること、前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を前記計算すること、前記周波数変調パラメータの前記値を前記決定すること、および前記第２の無線周波数発生器を前記制御することは、前記プラズマチャンバ内の基板の処理中に実行される、方法。
【請求項３】
請求項１に記載の方法であって、
前記複数の反射パラメータ値は、複数の電圧反射係数値を含み、前記反射係数パラメータは、平均電力反射係数である、方法。
【請求項４】
請求項１に記載の方法であって、
前記動作の１つまたは複数のサイクルの第２のセットは、前記動作の１つまたは複数のサイクルの第１のセットの後に続く、方法。
【請求項５】
請求項１に記載の方法であって、
前記第１のセットは、前記第１の無線周波数発生器の動作の２つ以上のサイクルを含み、前記複数の反射パラメータ値の各々は、前記第１のセットの前記２つ以上のサイクルにわたって計算された複数の反射係数値の平均である、方法。
【請求項６】
請求項１に記載の方法であって、
前記第１の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルの第３のセットについて、前記複数の反射パラメータ値に前記アクセスすること、前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を前記計算すること、および前記複数の周波数変調パラメータの前記値を前記決定することを繰り返すことと、
前記第１の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルの第４のセットの間、前記第２の無線周波数発生器を前記制御することを繰り返すことと
をさらに含み、
前記第３のセットは、前記第２のセットの後に続き、前記第４のセットは、前記第３のセットの後に続く、
方法。
【請求項７】
請求項１に記載の方法であって、
前記複数の反射パラメータ値は、複素電圧および複素電流の複数の値を含む、方法。
【請求項８】
請求項１に記載の方法であって、
前記コンピュータベースのモデルは、複数の回路要素を含み、前記複数の回路要素のうちの２つの隣接する回路要素は、接続を介して互いに結合され、前記コンピュータベースのモデルは、前記無線周波数経路のインピーダンスと実質的に同じインピーダンスを有する、方法。
【請求項９】
請求項１に記載の方法であって、
前記コンピュータベースのモデルは、複数の回路要素を含み、前記複数の回路要素のうちの２つの隣接する回路要素は、接続を介して互いに結合され、前記複数の回路要素は、前記無線周波数経路の複数の回路構成要素を表し、前記無線周波数経路の前記複数の回路構成要素と同じ方式で接続される、方法。
【請求項１０】
請求項１に記載の方法であって、
前記無線周波数経路は、

前記第２の無線周波数発生器をマッチネットワークの分岐部と結合する無線周波数ケーブルと、
前記分岐部と、
前記マッチネットワークと前記プラズマチャンバを結合する無線周波数伝送ラインと、
前記プラズマチャンバの電極と
を含む、方法。
【請求項１１】
請求項１に記載の方法であって、
前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を前記コンピュータベースのモデルに適用することによって、マッチネットワークに対する静電容量を決定することをさらに含み、前記マッチネットワークは、前記第２の無線周波数発生器と前記プラズマチャンバとの間、および前記第１の無線周波数発生器と前記プラズマチャンバとの間に結合される、方法。
【請求項１２】
請求項１に記載の方法であって、
前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を前記コンピュータベースのモデルに前記適用することは、
前記コンピュータベースのモデルの出力から前記コンピュータベースのモデルを介して前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を逆伝播し、前記コンピュータベースのモデルの前記入力での第１の複数の反射パラメータ入力値の計算を容易にすることであって、前記第１の複数の反射パラメータ入力値は、前記複数の周波数変調パラメータの量が前記コンピュータベースのモデルに利用可能であるときに決定されることと、
前記第１の複数の反射パラメータ入力値の第１の平均を計算することと、
前記コンピュータベースのモデルの前記出力から前記コンピュータベースのモデルを介して前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を逆伝播し、前記コンピュータベースのモデルの前記入力での第２の複数の反射パラメータ入力値の計算を容易にすることであって、前記第２の複数の反射パラメータ入力値は、前記複数の周波数変調パラメータの前記値が前記コンピュータベースのモデルに利用可能であるときに決定されることと、
前記第２の複数の反射パラメータ入力値の第２の平均を計算することと、
前記第２の平均が前記第１の平均よりも低いかどうかを決定することと
を含む、方法。
【請求項１３】
請求項１に記載の方法であって、
前記周期関数は、台形関数、正弦関数、パルス関数、および鋸歯状関数のうちの１つである、方法。
【請求項１４】
調節コントローラであって、
プロセッサであって、
第１の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルの第１のセットについて、第２の無線周波数発生器に関連する複数の反射パラメータ値にアクセスし、
前記複数の反射パラメータ値を無線周波数経路の少なくとも一部のコンピュータベースのモデルに適用することによって、前記複数の反射パラメータ値から複数の負荷インピーダンスパラメータ値を計算し、前記無線周波数経路は、前記第２の無線周波数発生器とプラズマチャンバの電極との間にあり、
前記第２の無線周波数発生器によって生成される無線周波数信号の複数の周波数変調パラメータを受信し、受信される前記複数の周波数変調パラメータは、前記第１の無線周波数発生器の動作の前記１つまたは複数のサイクルのうちの１つに関連する周期関数を表し、
前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を前記コンピュータベースのモデルに適用することによって、前記複数の周波数変調パラメータの値を決定し、前記複数の周波数変調パラメータの前記値は、前記コンピュータベースのモデルの入力における反射係数パ

ラメータを最小化するように決定され、
前記第１の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルの第２のセットの間、前記複数の周波数変調パラメータの前記値に従って前記第２の無線周波数発生器を制御するように構成されたプロセッサと、
前記プロセッサに結合されたメモリデバイスと、
を含む、調節コントローラ。
【請求項１５】
請求項１４に記載の調節コントローラであって、
前記複数の反射パラメータ値の前記アクセス、前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値の前記計算、前記周波数変調パラメータの前記値の前記決定、および前記第２の無線周波数発生器の前記制御は、前記プラズマチャンバ内の基板の処理中に発生する、調節コントローラ。
【請求項１６】
請求項１４に記載の調節コントローラであって、
前記複数の反射パラメータ値は、複数の電圧反射係数値を含み、前記反射係数パラメータは、平均電力反射係数である、調節コントローラ。
【請求項１７】
請求項１４に記載の調節コントローラであって、
前記動作の１つまたは複数のサイクルの第２のセットは、前記動作の１つまたは複数のサイクルの第１のセットの後に続く、調節コントローラ。
【請求項１８】
請求項１４に記載の調節コントローラであって、
前記第１のセットは、前記第１の無線周波数発生器の動作の２つ以上のサイクルを含み、前記複数の反射パラメータ値の各々は、前記第１のセットの前記２つ以上のサイクルにわたって計算された複数の反射係数値の平均である、調節コントローラ。
【請求項１９】
請求項１４に記載の調節コントローラであって、
前記プロセッサは、
前記第１の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルの第３のセットについて、前記複数の反射パラメータ値への前記アクセス、前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値の前記計算、および前記複数の周波数変調パラメータの前記値の前記決定を繰り返し、
前記第１の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルの第４のセットの間、前記第２の無線周波数発生器の前記制御を繰り返すように構成され、
前記第３のセットは、前記第２のセットの後に続き、前記第４のセットは、前記第３のセットの後に続く、調節コントローラ。
【請求項２０】
請求項１４に記載の調節コントローラであって、
前記複数の反射パラメータ値は、複素電圧および複素電流の複数の値を含む、調節コントローラ。
【請求項２１】
請求項１４に記載の調節コントローラであって、
前記コンピュータベースのモデルは、複数の回路要素を含み、前記複数の回路要素のうちの２つの隣接する回路要素は、接続を介して互いに結合され、前記コンピュータベースのモデルは、前記無線周波数経路のインピーダンスと実質的に同じインピーダンスを有する、調節コントローラ。
【請求項２２】
請求項１４に記載の調節コントローラであって、
前記コンピュータベースのモデルは、複数の回路要素を含み、前記複数の回路要素のうちの２つの隣接する回路要素は、接続を介して互いに結合され、前記複数の回路要素は、

前記無線周波数経路の複数の回路構成要素を表し、前記無線周波数経路の前記複数の回路構成要素と同じ方式で接続される、調節コントローラ。

【請求項２３】

請求項１４に記載の調節コントローラであって、

前記無線周波数経路は、

前記第２の無線周波数発生器をマッチネットワークの分岐部と結合する無線周波数ケーブルと、

前記分岐部と、

前記マッチネットワークと前記プラズマチャンバを結合する無線周波数伝送ラインと、

前記プラズマチャンバの電極と

を含む、調節コントローラ。

【請求項２４】

請求項１４に記載の調節コントローラであって、

前記プロセッサは、前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を前記コンピュータベースのモデルに適用することによって、マッチネットワークに対する静電容量を決定するように構成され、前記マッチネットワークは、前記第２の無線周波数発生器と前記プラズマチャンバとの間、および前記第１の無線周波数発生器と前記プラズマチャンバとの間に結合される、調節コントローラ。

【請求項２５】

請求項１４に記載の調節コントローラであって、

前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を前記コンピュータベースのモデルに適用するために、前記プロセッサは、

前記コンピュータベースのモデルの出力から前記コンピュータベースのモデルを介して前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を逆伝播して、前記コンピュータベースのモデルの前記入力での第１の複数の反射パラメータ入力値の計算を容易にし、前記第１の複数の反射パラメータ入力値は、前記複数の周波数変調パラメータの量が前記コンピュータベースのモデルに利用可能であるときに決定され、

前記第１の複数の反射パラメータ入力値の第１の平均を計算し、

前記コンピュータベースのモデルの前記出力から前記コンピュータベースのモデルを介して前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を逆伝播して、前記コンピュータベースのモデルの前記入力での第２の複数の反射パラメータ入力値の計算を容易にし、前記第２の複数の反射パラメータ入力値は、前記複数の周波数変調パラメータの前記値が前記コンピュータベースのモデルに利用可能であるときに決定され、

前記第２の複数の反射パラメータ入力値の第２の平均を計算し、

前記第２の平均が前記第１の平均よりも低いかどうかを決定するように構成されている、調節コントローラ。

【請求項２６】

請求項１４に記載の調節コントローラであって、

前記周期関数は、台形関数、正弦関数、パルス関数、および鋸歯状関数のうちの１つである、調節コントローラ。

【請求項２７】

プラズマシステムであって、

第１の無線周波数信号を生成するように構成された第１の無線周波数発生器と、

第２の無線周波数信号を生成するように構成された第２の無線周波数発生器と、

前記第１および第２の無線周波数信号を受信するために前記第１および第２の無線周波数発生器に結合されたインピーダンス整合回路であって、前記第１および第２の無線周波数信号に基づいて修正された無線周波数信号を出力するように構成されているインピーダンス整合回路と、

前記修正された無線周波数信号を受信するために前記インピーダンス整合回路に結合されたプラズマチャンバと、

前記第１および第２の無線周波数発生器に結合されたコンピュータであって、前記コンピュータは、

前記第１の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルの第１のセットについて、前記第２の無線周波数発生器に関連する複数の反射パラメータ値にアクセスし、

前記複数の反射パラメータ値を無線周波数経路の少なくとも一部のコンピュータベースのモデルに適用することによって、前記複数の反射パラメータ値から複数の負荷インピーダンスパラメータ値を計算し、前記無線周波数経路は、前記第２の無線周波数発生器とプラズマチャンバの電極との間にあり、

前記第２の無線周波数発生器によって生成される無線周波数信号の複数の周波数変調パラメータを受信し、受信される前記複数の周波数変調パラメータは、前記第１の無線周波数発生器の動作の前記１つまたは複数のサイクルのうちの１つに関連する周期関数を表し、

前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を前記コンピュータベースのモデルに適用することによって、前記複数の周波数変調パラメータの値を決定し、前記複数の周波数変調パラメータの前記値は、前記コンピュータベースのモデルの入力における反射係数パラメータを最小化するように決定され、

前記第１の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルの第２のセットの間、前記複数の周波数変調パラメータの前記値に従って前記第２の無線周波数発生器を制御するように構成されたコンピュータと、

を含む、プラズマシステム。

【請求項２８】

請求項２７に記載のプラズマシステムであって、

前記複数の反射パラメータ値の前記アクセス、前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値の前記計算、前記周波数変調パラメータの前記値の前記決定、および前記第２の無線周波数発生器の前記制御は、前記プラズマチャンバ内の基板の処理中に発生する、プラズマシステム。

【請求項２９】

請求項２７に記載のプラズマシステムであって、

前記複数の反射パラメータ値は、複数の電圧反射係数値を含み、前記反射係数パラメータは、平均電力反射係数である、プラズマシステム。

【請求項３０】

請求項２７に記載のプラズマシステムであって、

前記動作の１つまたは複数のサイクルの第２のセットは、前記動作の１つまたは複数のサイクルの第１のセットの後に続く、プラズマシステム。

【請求項３１】

請求項２７に記載のプラズマシステムであって、

前記第１のセットは、前記第１の無線周波数発生器の動作の２つ以上のサイクルを含み、前記複数の反射パラメータ値の各々は、前記第１のセットの前記２つ以上のサイクルにわたって計算された複数の反射係数値の平均である、プラズマシステム。

【請求項３２】

請求項２７に記載のプラズマシステムであって、

前記コンピュータは、

前記第１の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルの第３のセットについて、前記複数の反射パラメータ値への前記アクセス、前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値の前記計算、および前記複数の周波数変調パラメータの前記値の前記決定を繰り返し、

前記第１の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルの第４のセットの間、前記第２の無線周波数発生器の前記制御を繰り返すように構成され、

前記第３のセットは、前記第２のセットの後に続き、前記第４のセットは、前記第３のセットの後に続く、プラズマシステム。

【請求項３３】
請求項２７に記載のプラズマシステムであって、
前記複数の反射パラメータ値は、複素電圧および複素電流の複数の値を含む、プラズマシステム。
【請求項３４】
請求項２７に記載のプラズマシステムであって、
前記コンピュータベースのモデルは、複数の回路要素を含み、前記複数の回路要素のうちの２つの隣接する回路要素は、接続を介して互いに結合され、前記コンピュータベースのモデルは、前記無線周波数経路のインピーダンスと実質的に同じインピーダンスを有する、プラズマシステム。
【請求項３５】
請求項２７に記載のプラズマシステムであって、
前記コンピュータベースのモデルは、複数の回路要素を含み、前記複数の回路要素のうちの２つの隣接する回路要素は、接続を介して互いに結合され、前記複数の回路要素は、前記無線周波数経路の複数の回路構成要素を表し、前記無線周波数経路の前記複数の回路構成要素と同じ方式で接続される、プラズマシステム。
【請求項３６】
請求項２７に記載のプラズマシステムであって、
前記無線周波数経路は、
前記第２の無線周波数発生器をマッチネットワークの分岐部と結合する無線周波数ケーブルと、
前記分岐部と、
前記マッチネットワークと前記プラズマチャンバを結合する無線周波数伝送ラインと、
前記プラズマチャンバの電極と
を含む、プラズマシステム。
【請求項３７】
請求項２７に記載のプラズマシステムであって、
前記コンピュータは、前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を前記コンピュータベースのモデルに適用することによって、マッチネットワークに対する静電容量を決定するように構成され、前記マッチネットワークは、前記第２の無線周波数発生器と前記プラズマチャンバとの間、および前記第１の無線周波数発生器と前記プラズマチャンバとの間に結合される、プラズマシステム。
【請求項３８】
請求項２７に記載のプラズマシステムであって、
前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を前記コンピュータベースのモデルに適用するために、前記コンピュータは、
前記コンピュータベースのモデルの出力から前記コンピュータベースのモデルを介して前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を逆伝播して、前記コンピュータベースのモデルの前記入力での第１の複数の反射パラメータ入力値の計算を容易にし、前記第１の複数の反射パラメータ入力値は、前記複数の周波数変調パラメータの量が前記コンピュータベースのモデルに利用可能であるときに決定され、
前記第１の複数の反射パラメータ入力値の第１の平均を計算し、
前記コンピュータベースのモデルの前記出力から前記コンピュータベースのモデルを介して前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を逆伝播して、前記コンピュータベースのモデルの前記入力での第２の複数の反射パラメータ入力値の計算を容易にし、前記第２の複数の反射パラメータ入力値は、前記複数の周波数変調パラメータの前記値が前記コンピュータベースのモデルに利用可能であるときに決定され、
前記第２の複数の反射パラメータ入力値の第２の平均を計算し、
前記第２の平均が前記第１の平均よりも低いかどうかを決定するように構成されている、プラズマシステム。

【請求項３９】
請求項２７に記載のプラズマシステムであって、
前記周期関数は、台形関数、正弦関数、パルス関数、および鋸歯状関数のうちの１つである、プラズマシステム。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本実施形態は、キロヘルツ（ｋＨｚ）ＲＦ発生器の動作サイクル中にメガヘルツ（ＭＨｚ）無線周波数（ＲＦ）発生器を調節するためのシステムおよび方法に関する。
【背景技術】
【０００２】
ここで提供される背景の説明は、本開示の内容を概ね提示することを目的とする。この背景技術のセクションで説明される範囲内における、現時点で名前を挙げられている発明者らによる研究、ならびに出願の時点で先行技術として別途みなされ得ない説明の態様は、明示または暗示を問わず、本開示に対抗する先行技術として認められない。
【０００３】
プラズマツールでは、１つまたは複数の無線周波数（ＲＦ）発生器がインピーダンス整合回路に結合される。インピーダンス整合回路は、プラズマチャンバに結合される。ＲＦ信号は、ＲＦ発生器からインピーダンス整合回路に供給される。インピーダンス整合回路は、ＲＦ信号を受信するとＲＦ信号を出力する。ＲＦ信号は、プラズマチャンバ内でウエハを処理するために、インピーダンス整合回路からプラズマチャンバに供給される。ウエハの処理中、ある量の電力がプラズマチャンバのプラズマから、インピーダンス整合回路を介して１つまたは複数のＲＦ発生器に向かって反射される。反射電力は、ウエハの処理効率を低下させ、１つまたは複数のＲＦ発生器に対する損傷も引き起こす。
【０００４】
本開示に記載される実施形態は、このような状況で生じるものである。
【発明の概要】
【０００５】
本開示の実施形態は、キロヘルツ（ｋＨｚ）無線周波数（ＲＦ）発生器の動作サイクル中にメガヘルツ（ＭＨｚ）ＲＦ発生器を調節するための装置、方法、およびコンピュータプログラムを提供する。本実施形態は、多くの方法、例えば、プロセス、装置、システム、ハードウェアの一部、またはコンピュータ可読媒体上の方法で実施することができることを理解されたい。いくつかの実施形態を、以下に説明する。
【０００６】
いくつかのプラズマエッチングシステムは２つの異なるＲＦ周波数で動作し、１つは４００キロヘルツ（ｋＨｚ）などの低い周波数であり、もう１つは、例えば、６０メガヘルツ（ＭＨｚ）などの１００倍以上高い周波数である。より高いＲＦ周波数に対する負荷インピーダンスは、より低いＲＦ周波数によって強く変調され得る。各ＲＦ周波数に対する整合ネットワークは、１つの可変コンデンサと可変ＲＦ周波数を使用して調節される。例えば、より高いＲＦ周波数は、５７ＭＨｚ～６３ＭＨｚの範囲の値に調節される。負荷インピーダンスの単一の値は、電圧反射係数Γがゼロに近くなるように調節することができるが、より高いＲＦ周波数のインピーダンスは、より低い周波数ＲＦの位相によって変化するため、可変コンデンサと、より低いＲＦ周波数のサイクルのすべての部分で機能するより高いＲＦ周波数の単一の組み合わせを決定することは困難である。単一の組み合わせがない場合、時間－平均電力反射係数Γ^2は、５０％にもなる可能性がある。
【０００７】
一実施形態では、より高いＲＦ周波数が平均値に加えて平均値の周りの変動を有する方法が提供される。変動は、ＲＦ周波数が低いほど周期的であり、所定の関数形式を有する。例えば、変動は、より低いＲＦ周波数に相対的な振幅および位相を有する方形波である。別の例として、変動は、正弦関数または矩形関数である。さらに別の例として、変動は

、周波数ランプによって接続された高周波数セグメントおよび低周波数セグメントを有する台形関数である。

【０００８】

第１の実施形態では、より高い周波数のＲＦ発生器を制御するために、周波数パラメータおよびマッチネットワークパラメータを決定するための方法が提供される。第１の実施形態では、以下の動作が実施される：

１．プラズマツールは、より低い周波数の波形の周波数および位相を検出する。

一例として、より低い周波数は、より低い周波数のＲＦ発生器に問い合わせることによって検出され、より低い周波数の位相は、より低い周波数の電圧ゼロ交点を検出することから推定される。

２．プラズマツールは、センサおよび高速データ取得を使用して、より低い周波数の１サイクルまたは数サイクルの期間にわたってより高い周波数のＲＦ発生器と整合ネットワークとの間で測定されたより高い周波数の波形を保存する。一例として、センサは、複素電圧および複素電流を測定する。

３．コンピュータは、例えば、約０．１マイクロ秒の短い時間間隔で瞬間的な複素電圧反射係数Γを計算する。

コンピュータはまた、より低い周波数の期間にわたるより高い周波数のＲＦ発生器に関連する平均電力反射係数Γ^2を計算する。

４．コンピュータは、最適なパラメータのセットを計算し、平均電力反射係数の予測値を最小化する。例えば、コンピュータは、：

ａ．より低い周波数の測定された電圧波形を各々約０．１マイクロ秒の短いセグメントに分割し、より低い周波数の周期ごとに約２５個の短いセグメントを生成する。

ｂ．各セグメントに対するより高い周波数の複素電圧反射係数Γを計算する。

ｃ．プラズマツールのＲＦ経路のコンピュータベースのモデルを適用し、複素電圧反射係数Γから各セグメントに対する負荷インピーダンスを計算する。

計算への入力は、既知のＲＦ周波数および可変コンデンサ値を含む。

ｄ．より高い周波数の所定の関数形式について、より高い周波数のＲＦ発生器に関連する周期平均反射係数を最小化する周波数パラメータのセットを計算する。

一例として、周波数パラメータは、以下を含む：

ｉ．より高い周波数のＲＦ発生器の一定の平均周波数。

ｉｉ．台形周波数変動の振幅。

ｉｉｉ．　台形周波数変動の高セクションおよび低セクションの持続時間、ならびに

ｉｖ．より低い周波数の位相に対する台形周波数変動の位相、

５．平均電力反射係数を最小化するための最適化は、可変コンデンサの値ならびにより高い周波数を含む。

６．コンピュータは、周波数変動を適用する。

７．コンピュータは、動作２～５を繰り返す。

この方法を適用した後、より高い周波数のＲＦ発生器における電力反射係数は、約３５％から約３％に減少する。

【０００９】

第２の実施形態では、コンピュータベースのモデルの入力における電圧反射係数および電力反射係数を低減する方法が提供される。方法は、レシピ開発中に実行されて動作パラメータを決定し、動作パラメータは、基板の処理中に適用される。方法では、以下の動作が実施される：

１．高速データ取得デバイスおよびセンサはレシピ開発中に設置され、処理中に生産ツールで使用されないため、高速データ取得デバイスおよびセンサの使用に関連する問題および時間を削減する。高速データ取得デバイスの一例には、オシロスコープが挙げられる。

２．レシピ開発中、２つの動作が実施される：

ａ．より高い周波数のＲＦ発生器に適用される平均周波数の値を決定する、調節動作。

ｂ．平均周波数における周波数変動を決定する、高速データ検知、取得、およびコンピ

ュータ分析動作。一例として、２つの動作は、正と負の値が平均してゼロになり得る平均電圧反射係数を最小化するために実行される。これは、平均電力反射係数が大きくなる場合であっても、平均電圧反射係数がゼロになり得ることを意味する。さらに例示すると、周波数変動を選択する動作は、平均周波数を決定するための動作と一致する。平均周波数周辺の周波数変動は、平均周波数を決定するための動作と同時に決定される。複数のＲＦ発生器の場合、平均周波数は、基本周波数での反射電力の一部を最小化し、反射電力の１つまたは複数の変調された側波帯周波数での反射電力の残りの部分を無視することによって決定される。これは、基本周波数での反射電力のフーリエピークを最小化すること、または正と負の部分が互いに打ち消し合う複素数である平均電圧反射係数を最小化することと等価である。

３．レシピ開発中、平均周波数および周波数変動は、平均電圧反射係数が同時に最小化されるという追加の制約を加えて、第１の実施形態で上述したのと同じ方式で決定される。

４．コンピュータは、周波数パラメータを記憶する。

５．処理中、特定のレシピでは、ツール間の変動またはウエハ間の変動は、より高い周波数の平均値になる。レシピ開発中に決定された平均周波数は、処理中に適用されて平均電圧反射係数を最小化する。次に、平均周波数に加えて、そのレシピに対して以前に決定された周波数変動が、ツール間またはウエハ間で適用される。周波数変動のタイミングおよび持続時間は、より低い周波数のＲＦ発生器のゼロ交点および周期と同期される。第２の実施形態では、処理中に高速データ取得デバイスおよび／またはセンサを使用することはない。

【００１０】

一実施形態では、より高いＲＦ周波数が２つの部分で調節される方法が提供される。第１の部分は、より高いＲＦ周波数の平均値を決定し、これは、より低いＲＦ周波数の多くのサイクルで一定のままである。第２の部分は、より低いＲＦ周波数のサイクル内で適用される平均値の周りの高速変動を決定する。

【００１１】

第３の実施形態では、より低いＲＦ周波数のサイクル内で各ビンに対する電力反射係数を低減する方法が説明される。より低いＲＦ周波数は、複数のビンに分割される。第３の実施形態で使用される所定の関数形式は、存在しない。以下の動作が、第３の実施形態で実施される：

１．レシピ開発中、コンピュータは、より低いＲＦ周波数の周期またはサイクルをいくつかの短い時間ビンに細分することによって、高速周波数変動動作を実行する。例えば、より低いＲＦ周波数の周期は、１６個のビンに分割される。各ビンの長さまたは期間は、より低いＲＦ周波数の値に依存する。より低いＲＦ周波数の一例は、３４０ｋＨｚ～４４０ｋＨｚの範囲の周波数である。

２．レシピ開発中、コンピュータは、コンピュータベースのモデルを適用し、以下を変更することによってビンに対する平均電力反射係数を最小化する：

ａ．静電容量を決定する可変コンデンサ、

ｂ．より高いＲＦ周波数の平均周波数、

ｃ．平均周波数からの周波数変動、および

ｄ．平均電圧反射係数も最小化されるという制約の対象

３．基板が処理されるツール動作中、特定のレシピについて、ツール間またはウエハ間の変動は、より高いＲＦ周波数の平均値にあると想定される。

４．また、ツール動作中、より高いＲＦ周波数の平均周波数に加えて、そのレシピに対して以前に決定された周波数変動が、コンピュータによってビンからビンへと適用される。周波数変動のタイミングおよび持続時間は、より低いＲＦ周波数のゼロ交点および周期とコンピュータによって同期される。また、ツール動作中、レシピ開発中に決定された静電容量は、より低いＲＦ周波数のすべてのビンに適用される。

【００１２】

一実施形態では、調節方法が説明される。調節方法は、第１の無線周波数発生器の動作

の１つまたは複数のサイクルの第１のセットについて、第２の無線周波数発生器に関連する複数の反射パラメータ値にアクセスすることを含む。調節方法は、複数の反射パラメータ値を無線周波数経路の少なくとも一部のコンピュータベースのモデルに適用することによって、複数の反射パラメータ値から複数の負荷インピーダンスパラメータ値を計算することをさらに含む。無線周波数経路は、第２の無線周波数発生器とプラズマチャンバの電極との間にある。調節方法はまた、第２の無線周波数発生器によって生成される無線周波数信号の複数の周波数変調パラメータを受信することを含む。調節方法は、複数の負荷インピーダンスパラメータ値をコンピュータベースのモデルに適用することによって、複数の周波数変調パラメータの値を決定することをさらに含む。複数の周波数変調パラメータの値は、コンピュータベースのモデルの入力における反射係数パラメータを最小化するように決定される。調節方法は、第１の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルの第２のセットの間、複数の周波数変調パラメータの値に従って第２の無線周波数発生器を制御することを含む。

【００１３】

一実施形態では、調節方法が説明される。調節方法の一部は、レシピ開発中に実行され、調節方法の別の部分は、処理中に実行される。レシピ開発中に実行される部分は、第１の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルのセットについて、第２の無線周波数発生器に関連する複数の反射パラメータ値にアクセスすることを含む。さらに、レシピ開発中に実行される部分は、複数の反射パラメータ値を無線周波数経路の少なくとも一部のコンピュータベースのモデルに適用することによって、複数の反射パラメータ値から複数の負荷インピーダンスパラメータ値を計算することをさらに含む。無線周波数経路は、第２の無線周波数発生器とプラズマチャンバの電極との間にある。レシピ開発中に実行される部分はまた、第２の無線周波数発生器によって生成される無線周波数信号の複数の周波数変調パラメータを受信することを含む。レシピ開発中に実行される部分は、複数の負荷インピーダンスパラメータ値をコンピュータベースのモデルに適用することによって、複数の周波数変調パラメータの値を決定することをさらに含む。複数の周波数変調パラメータの値は、コンピュータベースのモデルの入力における１つまたは複数の反射係数パラメータを最小化するように決定される。方法の他の部分は、別のプラズマチャンバ内での基板の処理中に実行される。方法の他の部分は、レシピ開発中に決定された複数の周波数変調パラメータの値に従って第３の無線周波数発生器を制御することを含む。第３の無線周波数発生器を制御する動作は、第４の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルのセットの間に実施される。

【００１４】

一実施形態では、調節方法が説明される。調節方法の一部は、レシピ開発中に実行され、調節方法の別の部分は、処理中に実行される。レシピ開発中に実行される部分は、第１の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルのセットについて、第２の無線周波数発生器に関連する複数の反射パラメータ値にアクセスすることを含む。レシピ開発中に実行される部分は、複数の反射パラメータ値を第２の無線周波数発生器とプラズマチャンバの電極との間の無線周波数経路の少なくとも一部のコンピュータベースのモデルに適用することによって、複数の反射パラメータ値から複数の負荷インピーダンスパラメータ値を計算することをさらに含む。レシピ開発中に実行される部分はまた、第２の無線周波数発生器によって生成される無線周波数信号の複数の周波数変調パラメータを受信することを含み、複数の周波数変調パラメータは、無線周波数信号の周波数変動を含む。レシピ開発中に実行される部分は、複数の負荷インピーダンスパラメータ値をコンピュータベースのモデルに適用することによって、複数の周波数変調パラメータの値を決定することをさらに含む。複数の周波数変調パラメータの値は、コンピュータベースのモデルの入力における１つまたは複数の反射係数パラメータを最小化するように決定される。方法の他の部分は、別のプラズマチャンバ内での基板の処理中に実行される。方法の他の部分は、レシピ開発中に決定された複数の周波数変調パラメータの値に従って第３の無線周波数発生器を制御することを含む。第３の無線周波数発生器を制御する動作は、複数の周波数変調

パラメータの値を第３の無線周波数発生器の動作のベースライン周波数に適用することを含む。

【００１５】

一実施形態では、調節方法が説明される。調節方法の一部は、レシピ開発中に実行され、調節方法の別の部分は、処理中に実行される。レシピ開発中に実行される部分は、第１の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルのセットについて、第２の無線周波数発生器に関連する複数の反射パラメータ値にアクセスすることを含む。複数の反射パラメータ値の各々は、第１の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルの各々のビンに対応する。レシピ開発中に実行される部分は、複数の反射パラメータ値を無線周波数経路の少なくとも一部のコンピュータベースのモデルに適用することによって、複数の反射パラメータ値から複数の負荷インピーダンスパラメータ値を計算することをさらに含む。無線周波数経路は、第２の無線周波数発生器とプラズマチャンバの電極との間にある。レシピ開発中に実行される部分はまた、複数の負荷インピーダンスパラメータ値をコンピュータベースのモデルに適用することによって、複数の周波数変調パラメータの値を決定することを含む。複数の周波数変調パラメータの値は、ビンの各々についてコンピュータベースのモデルの入力における反射係数パラメータの複数の値を最小化するように決定される。方法の他の部分は、別のプラズマチャンバ内での基板の処理中に実行される。方法の他の部分は、レシピ開発中に決定された複数の周波数変調パラメータの値に従って第３の無線周波数発生器を制御することを含む。第３の周波数発生器を制御する動作は、第４の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルのセットの間に実施される。

【００１６】

本明細書で説明するシステムおよび方法のいくつかの利点は、キロヘルツＲＦ発生器の動作の各サイクル中にメガヘルツＲＦ発生器に向かって反射される電力および／または電圧を低減する、より高いＲＦ周波数および可変コンデンサの値を見つけることを含む。追加の利点は、基板の処理中にセンサおよび高速データ取得デバイスの数を低減することを含む。例えば、第２および第３の実施形態では、レシピ開発後に高速データ取得デバイスおよびセンサを使用する必要はない。より高いＲＦ周波数および可変コンデンサの値を有するレシピが決定されると、そのレシピは、基板の処理中に適用される。基板の処理中に複素電圧および複素電流を再度測定する必要はない。

【００１７】

さらなる利点は、所定の関数形式を適用することを含む。所定の関数形式の適用は、周波数パラメータの決定および動作パラメータの適用を単純化する。より高い周波数のＲＦ発生器を、所定の関数形式に従うように制御することが容易である。

【００１８】

さらに、コンピュータベースのモデルを使用するとき、ＲＦ経路でセンサを使用する必要はない。例えば、センサは、ＲＦ伝送ラインまたはインピーダンス整合ネットワークの出力に結合されない。むしろ、複素電圧および複素電流は、メガヘルツＲＦ発生器の出力に結合されたセンサによって測定され、コンピュータベースのモデルを介して伝播され、より高い周波数および可変コンデンサの値の決定を容易にする。コンピュータベースのモデルを使用するよりも、ＲＦ経路でセンサを使用する方が困難かつ時間がかかる。

【００１９】

他の態様は、添付の図面と併せて、以下の詳細な説明から明らかになるであろう。

【図面の簡単な説明】

【００２０】

実施形態は、添付の図面と併せて以下の説明を参照することによって最もよく理解され得る。

【００２１】

【図１Ａ】図１Ａは、Ｘキロヘルツ無線周波数（ＲＦ）発生器の動作の１つまたは複数のサイクルにわたる電圧反射係数の値の決定を例示するシステムの一実施形態の図である。

【００２２】

【図１Ｂ－１】図１Ｂ－１は、電圧反射係数の値が、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器の動作のサイクルにわたって周期的な時間間隔で得られる複素電圧および複素電流に基づいて決定されることを例示する表の一実施形態を示す図である。

【００２３】

【図１Ｂ－２】図１Ｂ－２は、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器によって生成されたＲＦ信号のサイクル中の電圧反射係数の値と時間間隔との間の対応を例示するグラフの一実施形態を示す図である。

【００２４】

【図１Ｃ】図１Ｃは、電圧反射係数の値からの負荷インピーダンス値の計算を例示するＲＦ経路モデルの一実施形態の図である。

【００２５】

【図１Ｄ－１】図１Ｄ－１は、ＲＦ経路モデルの入力における平均電力反射係数を最小化するＲＦ経路モデルの出力における負荷インピーダンス値の適用に基づいた、周波数パラメータおよびマッチネットワークパラメータを含む動作パラメータの決定を例示するＲＦ経路モデルの一実施形態の図である。

【００２６】

【図１Ｄ－２】図１Ｄ－２は、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器によって生成されるＲＦ信号の複数のサイクルを例示するグラフの一実施形態を示す図である。

【００２７】

【図１Ｄ－３】図１Ｄ－３は、基板の処理中に図１のＸキロヘルツ ＲＦ発生器の動作のサイクルのセット中に動作パラメータの値を適用するシステムの一実施形態の図である。

【００２８】

【図２Ａ】図２Ａは、ＲＦ信号のサイクルを例示するグラフの一実施形態を示す図である。

【００２９】

【図２Ｂ】図２Ｂは、Ｙメガヘルツ（ＭＨｚ）ＲＦ発生器によって供給されるＲＦ信号の順方向電圧波形を例示するグラフの一実施形態を示す図である。

【００３０】

【図２Ｃ】図２Ｃは、Ｙ ＭＨｚ ＲＦ発生器によって供給されるＲＦ信号の逆方向電圧波形を例示するグラフの一実施形態を示す図である。

【００３１】

【図２Ｄ】図２Ｄは、１つのグラフに順方向電圧波形および逆方向電圧波形を例示するグラフの一実施形態の図である。

【００３２】

【図２Ｅ】図２Ｅは、本明細書に記載の方法を適用する前のＹ ＭＨｚ ＲＦ発生器の出力における電圧反射係数の値を例示するスミスチャートの一実施形態を示す図である。

【００３３】

【図３Ａ】図３Ａは、本明細書に記載の方法を適用した後にＹメガヘルツ ＲＦ発生器から出力されるＲＦ信号の周波数と、方法を適用する前にＹメガヘルツ ＲＦ発生器から出力されるＲＦ信号との間の比較を例示するグラフの一実施形態の図である。

【００３４】

【図３Ｂ】図３Ｂは、本明細書に記載の方法を適用した後のＹ ＭＨｚ ＲＦ発生器の出力における電圧反射係数の値を例示するスミスチャートの一実施形態を示す図である。

【００３５】

【図４Ａ】図４Ａは、図１Ａに関して上述された方法が、基板の処理中ではなく、レシピ開発中に図４Ａのシステムに適用可能であることを例示するシステムの一実施形態の図である。

【００３６】

【図４Ｂ】図４Ｂは、図１Ｂ－１の表が基板の処理中にプロセッサによって生成されるのと同じ方式でレシピ開発中にプロセッサによって生成される表の一実施形態の図である。

【００３７】

【図４Ｃ】図４Ｃは、レシピ開発のためのまたはレシピ開発中の電圧反射係数の値からの負荷インピーダンス値の生成を例示するＲＦ経路モデルの一実施形態の図である。
【００３８】
【図４Ｄ】図４Ｄは、レシピ開発のためのまたはレシピ開発中の動作パラメータの値の決定を例示する一実施形態の図である。
【００３９】
【図４Ｅ】図４Ｅは、処理の間における、レシピ開発中に決定される動作パラメータの値の適用を例示するシステムの一実施形態の図である。
【００４０】
【図５Ａ】図５Ａは、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器の動作サイクルの各ビンに対するレシピ開発中のプロセッサによる電圧反射係数の値の生成を例示するシステムの一実施形態の図である。
【００４１】
【図５Ｂ】図５Ｂは、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器の動作の１つまたは複数のサイクルの各ビンに対するレシピ開発のためにプロセッサによって生成される表の一実施形態の図である。
【００４２】
【図５Ｃ】図５Ｃは、レシピ開発中の電圧反射係数の値からのＸキロヘルツ ＲＦ発生器の動作サイクルの各ビンに対する負荷インピーダンス値の生成を例示するＲＦ経路モデルの一実施形態の図である。
【００４３】
【図５Ｄ】図５Ｄは、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器の動作サイクルのビンに対する電力反射係数の値がレシピ開発中に最小化される動作パラメータの値の決定を例示するＲＦ経路モデルの一実施形態の図である。
【００４４】
【図５Ｅ】図５Ｅは、基板の処理中の各ビンに対する動作パラメータの使用を例示するシステムの一実施形態の図である。
【発明を実施するための形態】
【００４５】
以下の実施形態は、キロヘルツ（ｋＨｚ）ＲＦ発生器の動作サイクル中にメガヘルツ（ＭＨｚ）無線周波数（ＲＦ）発生器を調節するためのシステムおよび方法を説明する。本実施形態は、これらの具体的な詳細の一部またはすべてがなくても実践することができることは明らかであろう。他の例では、本実施形態を不必要に曖昧にしないように、周知のプロセス動作は詳細には説明されていない。
【００４６】
図１Ａは、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２の動作の１つまたは複数のサイクルにわたる電圧反射係数の値の決定を例示する、プラズマツールなどのシステム１００の一実施形態の図である。システム１００は、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２と、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器１１４と、コンピュータ１１８と、プラズマチャンバ１０８とを含む。システム１００はまた、インピーダンス整合ネットワーク１１０と、センサ１２０と、高速データ取得デバイス１２１とを含む。センサ１２０の一例は電圧センサであり、高速データ取得デバイスの一例はデジタル記憶オシロスコープである。高速データ取得デバイスの別の例は、高速データ取得回路基板である。センサ１２０および高速データ取得デバイス１２１は、共に順方向電圧および逆方向電圧を測定する。例示すると、センサ１２０および高速データ取得デバイス１２１は、順方向電圧振幅、逆方向電圧振幅、および順方向電圧振幅と逆方向電圧振幅との間の位相を測定する。逆方向電圧および反射電圧という用語は、本明細書では互換的に使用されることに留意されたい。
【００４７】
本明細書で説明されるようなＸキロヘルツ ＲＦ発生器の一例には、キロヘルツ周波数で動作する４００ｋＨｚ ＲＦ発生器または別のＲＦ発生器が挙げられる。本明細書で説明されるようなＹメガヘルツ ＲＦ発生器の一例には、２ＭＨｚ ＲＦ発生器または１３．５

６ＭＨｚ　ＲＦ発生器または２７ＭＨｚ　ＲＦ発生器または６０ＭＨｚ　ＲＦ発生器が挙げられる。本明細書で説明されるコンピュータの例には、デスクトップコンピュータ、ラップトップコンピュータ、スマートフォン、およびタブレットが挙げられる。

【００４８】

コンピュータ１１８は、プロセッサ１２６と、メモリデバイス１２８とを含む。プロセッサ１２６は、メモリデバイス１２８に結合され、ＲＦ電源１２２および１２４にも結合される。本明細書で使用される場合、プロセッサの代わりに、中央処理装置（ＣＰＵ）、コントローラ、特定用途向け集積回路（ＡＳＩＣ）、またはプログラマブル論理デバイス（ＰＬＤ）が使用され、これらの用語は、本明細書では互換的に使用される。メモリデバイスの例には、読み取り専用メモリ（ＲＯＭ）、ランダムアクセスメモリ（ＲＡＭ）、ハードディスク、揮発性メモリ、不揮発性メモリ、ストレージディスクの冗長アレイ、フラッシュメモリなどが挙げられる。プロセッサ１２６は、シリアル転送ケーブル、パラレル転送ケーブル、またはユニバーサルシリアルバス（ＵＳＢ）ケーブルなどのケーブルを介して、センサ１２０に結合された高速データ取得デバイス１２１に結合される。

【００４９】

本明細書で説明される高速データ取得デバイスの一例には、ＲＦ発生器の出力端子で出力されるＲＦ信号の電圧または電力の振動または振動の周波数に関するデータを取得するためのデバイスが挙げられる。センサ１２０は、方向性結合器を介してＸメガヘルツＲＦ発生器１１２の出力Ｏ１に結合される。Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器１１４は、複素電圧および複素電流プローブまたは複素電圧センサなどのセンサ１３１を含む。センサ１３１は、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器１１４の出力端子Ｏ２に結合される。センサ１３１はまた、ケーブルを介してプロセッサ１２６に結合された高速データ取得デバイス１２３に結合される。ケーブルの例は、上記の通りである。

【００５０】

インピーダンス整合ネットワーク１０６は、互いに結合された１つまたは複数の回路構成要素、例えば、１つまたは複数のインダクタ、または１つまたは複数のコンデンサ、または１つまたは複数のレジスタ、またはそれらの組み合わせもしくは２つ以上などを含む。例えば、インピーダンス整合ネットワーク１０６は、２つの分岐部を含む。２つの分岐部の各々は、直列または並列に互いに結合された複数の回路構成要素を含む。２つの分岐部のうちの１つは、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２に結合され、２つの分岐部のうちの他方は、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器１１４に結合され、分岐部は、インピーダンス整合ネットワーク１０６の出力に結合される。インピーダンス整合ネットワーク、マッチ、インピーダンス整合回路、マッチ回路、およびマッチネットワークという用語は、本明細書では互換的に使用されることに留意されたい。

【００５１】

プラズマチャンバ１０８の一例は、容量結合プラズマ（ＣＣＰ）チャンバであり、プラズマ励起電極１０４の上部電極１０６および底部電極は、互いに容量結合されるように載置される。例えば、上部電極１０６は、プラズマ励起電極１０４の上に載置され、上部電極１０６とプラズマ励起電極１０４との間にギャップを形成する。上部電極１０６は、接地電位に結合される。無線周波数電力は、ギャップを介して上部電極１０６とプラズマ励起電極１０４との間で容量結合される。下部電極および上部電極１０６の各々は、金属、例えば、陽極酸化アルミニウム、アルミニウム合金などで作製される。

【００５２】

Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２の出力端子Ｏ１は、ＲＦケーブルＲＦＣ１を介してインピーダンス整合ネットワーク１１０の入力端子Ｉ１に結合され、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器１１４の出力端子Ｏ２は、別のＲＦケーブルＲＦＣ２を介してインピーダンス整合ネットワーク１１０の別の入力端子Ｉ２に結合される。また、インピーダンス整合ネットワーク１１０の出力は、ＲＦ伝送ラインＲＦＴ１を介してプラズマ励起電極１０４の底部電極に結合される。

【００５３】

Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２は、ＲＦ発振器であるＲＦ電源１２２を含む。同様に、Ｙキロヘルツ ＲＦ発生器１１４は、ＲＦ発振器でもあるＲＦ電源１２４を含む。ＲＦ発振器１２２は出力端子Ｏ１に結合され、ＲＦ発振器１２４は出力端子Ｏ２に結合される。ＲＦケーブル ＲＦＣ２、インピーダンス整合ネットワーク１１０の入力Ｉ２と出力との間に結合されたインピーダンス整合ネットワーク１１０の分岐部、ＲＦ伝送ライン ＲＦＴ１、およびプラズマ励起電極１０４の組み合わせは、本明細書では ＲＦ経路１０２と呼ばれる。インピーダンス整合ネットワーク１１０の別の分岐部は、インピーダンス整合ネットワーク１１０の入力Ｉ１と出力との間に結合される。

【００５４】

半導体ウエハなどの基板Ｓは、処理されるためにプラズマ励起電極１０４の上面に載置され、処理は、基板Ｓの層のエッチング、または基板Ｓ上への材料の堆積、または基板Ｓのスパッタリング、または基板Ｓの洗浄、またはそれらの組み合わせを含み得る。基板Ｓの処理中、プロセッサ１２６は、１つまたは複数の電力値および１つまたは複数の周波数値をＸキロヘルツ ＲＦ発生器１１２の ＲＦ電源１２２に提供し、１つまたは複数の電力値および１つまたは複数の周波数値をＹメガヘルツ ＲＦ発生器１１４の ＲＦ電源１２４に提供する。

【００５５】

電力値および周波数値を受信すると、ＲＦ電源１２２は、電力値および周波数値を有する ＲＦ信号１３０を生成し、ＲＦ信号１３０を、出力Ｏ１および ＲＦケーブル ＲＦＣ１を介してインピーダンス整合ネットワーク１１０の入力Ｉ１に供給する。同様に、電力値および周波数値を受信すると、ＲＦ電源１２４は、電力値および周波数値を有する ＲＦ信号１３２を生成し、ＲＦ信号１３２を、出力Ｏ２および ＲＦケーブル ＲＦＣ２を介してインピーダンス整合ネットワーク１１０の入力Ｉ２に供給する。

【００５６】

インピーダンス整合ネットワーク１１０は、ＲＦ信号１３０および１３２を受信し、インピーダンス整合ネットワーク１１０の出力に結合された負荷のインピーダンスを、インピーダンス整合ネットワーク１１０の入力Ｉ１およびＩ２に結合されたソースのインピーダンスと整合させ、ＲＦ信号１３０および１３２を組み合わせてインピーダンス整合ネットワーク１１０の出力で修正された ＲＦ信号１３４を出力する。インピーダンス整合ネットワーク１１０の出力に結合された負荷の一例には、プラズマチャンバ１０８および ＲＦ伝送ライン ＲＦＴ１が挙げられる。入力Ｉ１１およびＩ２１に結合されたソースの一例には、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器１１４、ならびに ＲＦケーブル ＲＦＣ１および ＲＦＣ２が挙げられる。修正された ＲＦ信号１３４は、ＲＦ伝送ライン ＲＦＴ１を介してプラズマ励起電極１０４の下部電極に供給され、プラズマ励起電極１０４とプラズマチャンバ１０８の上部電極１０６との間に形成されたギャップにプラズマを衝突させるかまたは維持する。プラズマチャンバ１０８のプラズマは、基板Ｓを処理する ＲＦ電力を有する。

【００５７】

基板Ｓの処理中、センサ１２０および高速データ取得デバイス１２１は、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２から出力される ＲＦ信号１３０の電圧または電力を測定し、電圧波形または電力波形などの波形を出力する。センサ１２０および高速データ取得デバイス１２１によって測定される波形は、ＲＦ信号１３０の位相φを有する。ＲＦ信号１３０の位相φは、ＲＦ信号１３０の波形が電圧または電力のゼロ値と交差する交点または時間を提供する。ＲＦ信号１３０の波形は、正弦波または実質的に正弦波であり、周期的な時間間隔で電圧または電力のゼロ値と交差する。

【００５８】

プロセッサ１２６は、ケーブルを介してセンサ１２０および高速データ取得デバイス１２１によって測定された波形の値を受信し、ＲＦ信号１３０の波形の位相φを決定する。例えば、プロセッサ１２６は、ＲＦ信号１３０の波形が正の交点でゼロになる時間を決定し、その時間は、位相φを定義する。正の交点において、ＲＦ信号１３０の波形は、負の

値から正の値に遷移する。

【００５９】

また、基板Ｓの処理中、センサ１３１および高速データ取得デバイスは、ＹメガヘルツＲＦ発生器１１４の出力Ｏ２で順方向電圧振幅、逆方向電圧振幅、および順方向電圧振幅と逆方向電圧振幅との間の位相を測定し、振幅および位相をケーブルを介してプロセッサ１２６に提供する。プロセッサ１２６は、順方向電圧振幅、逆方向電圧振幅、および位相に基づいて、ＲＦ信号１３０の１サイクル（例えば、１期間）にわたる電圧反射係数の複数の値Γ１１、Γ２１～Γｎ１を決定し、ｎは、２よりも大きい整数である。例えば、プロセッサ１２６は、出力Ｏ２でＹメガヘルツＲＦ発生器１１４に向かって反射される電圧と、出力Ｏ２でＹメガヘルツＲＦ発生器１１４から供給される電圧の比として電圧反射係数の値を決定する。反射電圧は、振幅および位相を有する複素数であり、供給電圧もまた、振幅および位相を有する複素数である。供給電圧および順方向電圧という用語は、本明細書では互換的に使用される。ＹメガヘルツＲＦ発生器１１４に向かって反射される電圧は、ＲＦ経路１０２を介してプラズマチャンバ１０８から反射される。反射される電圧および出力Ｏ２で供給される電圧は、順方向電圧振幅、逆方向電圧振幅、およびセンサ１３１によって測定された振幅と高速データ取得デバイス１２３との間の位相から、プロセッサ１２６によって識別される。プロセッサ１２６は、メモリデバイス１２８に電圧反射係数の値Γ１１、Γ２１～Γｎ１を記憶し、メモリデバイス１２８から値Γ１１、Γ２１～Γｎ１にアクセスする（例えば、取得または読み取りのために）。電圧反射係数は、反射パラメータまたは反射係数パラメータの一例である。反射パラメータの別の例は、複素電圧および複素電流、または複素値を有する別のパラメータである。

【００６０】

一実施形態では、プロセッサ１２６は、ＲＦ発生器のデジタル信号プロセッサ、およびＲＦ発生器の１つまたは複数の電力コントローラ、およびＲＦ発生器の１つまたは複数の周波数チューナを介して、ＲＦ発生器のＲＦ電源に結合される。デジタル信号プロセッサは、プロセッサ１２６、１つまたは複数の電力コントローラ、および１つまたは複数の周波数チューナに結合される。電力コントローラは、高論理状態および低論理状態などの異なる状態の間にＲＦ発生器のＲＦ電源から出力される電力値を制御し、周波数チューナは、異なる状態の間にＲＦ発生器のＲＦ電源から出力される周波数値を制御するコントローラである。

【００６１】

一実施形態では、センサ１２０および高速データ取得デバイス１２１は、出力Ｏ１でＲＦ信号１３０の電圧を測定する。測定された電圧は、電圧センサをプロセッサ１２６に結合するケーブルを介して、電圧センサからプロセッサ１２６に提供される。プロセッサ１２６は、正の交点と交差している間に測定された電圧がゼロである時間を決定し、ＲＦ信号１３０の電圧の位相φを決定する。

【００６２】

一実施形態では、センサ１２０は、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２またはＲＦ信号１３０の所定の数の初期動作サイクルのために、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２の出力Ｏ１に結合される。所定の数の初期サイクルの後、センサ１２０は出力Ｏ１から切断される。プロセッサ１２６は、ＲＦ信号１３０の位相が、センサ１２０から受信されたＲＦ信号１３０の電圧の測定値で決定されたものと同じであり続けることを決定する。

【００６３】

一実施形態では、センサ１３１は、ＹメガヘルツＲＦ発生器１１４の外側に位置し、ＹメガヘルツＲＦ発生器１１４の出力Ｏ２に結合される。一実施形態では、センサ１２０は、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２内に位置する。

【００６４】

一実施形態では、修正されたＲＦ信号１３４をプラズマ励起電極１０４の下部電極に適用し、上部電極１０６を接地電位に結合する代わりに、修正されたＲＦ信号１３４は、上部電極１０６に適用され、プラズマ励起電極１０４の下部電極は、接地電位に結合される

ことに留意されたい。

【００６５】

一実施形態では、上部電極１０６を接地電位に結合する代わりに、上部電極は、インピーダンス整合ネットワークを介して１つまたは複数のＲＦ発生器に結合される。

【００６６】

一実施形態では、センサ１２０の代わりに、複素電圧および複素電流を測定する電圧および電流プローブ（ＶＩプローブ）が使用される。複素電圧および複素電流は、電流振幅、電圧振幅、および電流振幅と電圧振幅との間の位相を含む。

【００６７】

一実施形態では、ＲＦ信号のサイクルを生成するために、ＲＦ発生器の動作サイクルが発生する。例えば、本明細書で説明されるＲＦ発生器の動作の１サイクルの間、ＲＦ信号の１周期がＲＦ発生器によって生成される。

【００６８】

一実施形態では、センサ１３１および高速データ取得デバイス１２３は、電圧振幅、電流振幅、および電圧振幅と電流振幅との間の位相を含む、複素電圧および複素電流を測定する。センサ１３１および高速データ取得デバイス１２３は、振幅および位相をケーブルを介してプロセッサ１２６に提供する。プロセッサ１２６は、電圧振幅、電流振幅、および位相に基づいて、ＲＦ信号１３０の１サイクルにわたる電圧反射係数の複数の値Γ１１、Γ２１～Γｎ１を決定する。

【００６９】

一実施形態では、センサ１２０および１３１の両方が、同じ高速データ取得デバイス１２１または１２３に結合される。

【００７０】

一実施形態では、値および量という用語は、本明細書では互換的に使用される。例えば、周波数変調パラメータの値および周波数変調パラメータの量という用語は、本明細書では互換的に使用される。例示すると、量は、周波数変調パラメータの量を表し、値は、周波数変調パラメータの別の量を表す。

【００７１】

図１Ｂ－１は、電圧反射係数の値Γ１１、Γ２１～Γｎ１が、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２（図１）の動作サイクルにわたって、０．１マイクロ秒（μｓ）ごとまたは０．２μｓごとなどの周期的な時間間隔で得られる複素電圧および複素電流に基づいて決定されることを例示する表１３０の一実施形態である。例えば、値Γ１１は、ＲＦ信号１３０（図１）のサイクル中の正の交点から０．１μｓ後に測定された複素電圧および複素電流からプロセッサ１２６（図１）によって計算され、値Γ１２は、ＲＦ信号１３０のサイクル中の正の交点から０．２μｓ後に測定された複素電圧および複素電流からプロセッサ１２６（図１）によって計算される。同様に、値Γｎ１は、ＲＦ信号１３０のサイクルの正の交点から０．ｎマイクロ秒後に測定された複素電圧および複素電流に対応する。

【００７２】

一実施形態では、値Γ１１、Γ２１～Γｎ１の各々は、ＲＦ信号１３０の複数のサイクルのセットにわたってプロセッサ１２６によって計算された平均である。例えば、プロセッサ１２６は、値Γ１１、Γ２１～Γｎ１が計算されるのと同じ方式で、出力Ｏ２で測定された複素電圧および複素電流から電圧反射係数の複数の値Γ１１Ａ、Γ２１Ａ～Γｎ１Ａを計算する。値Γｎ１Ａが計算されるまで、値Γ１１Ａは、ＲＦ信号１３０の第１のサイクルが開始した時点から０．１μｓで測定された複素電圧および複素電流から計算され、値Γ２１Ａは、ＲＦ信号１３０の第２のサイクルが開始した時点から０．１μｓで測定された複素電圧および複素電流から計算され、以下同様である。ＲＦ信号１３０の第２のサイクルは、ＲＦ信号１３０の第１のサイクルに連続している。プロセッサ１２６は、値Γ１１Ａ、Γ２１Ａ～Γｎ１Ａの平均として値Γ１１を計算する。同様に、値Γｎ１は、電圧反射係数の複数の値の平均であり、電圧反射係数の値は、ＲＦ信号１３０の各対応するサイクルが開始した時点から０．ｎ　μｓで測定された複素電圧および複素電流から計

算される。

【００７３】

一実施形態では、電圧反射係数の値Γ１１、Γ２１～Γｎ１を計算する代わりに、ＲＦ信号１３０の１サイクルにわたる複素電圧および複素電流の測定値は、プロセッサ１２６によって使用される。

【００７４】

図１Ｂ－２は、ＲＦ信号１３０（図１）のサイクル１中の値Γ１１、Γ２１～Γｎ１と時間間隔との間の対応を例示するグラフ１４０の一実施形態である。グラフ１４０は、時間ｔに対するＲＦ信号１３０の電圧波形１４２をプロットしている。電圧波形１４２は、正弦波または実質的に正弦波であり、サイクル１およびサイクル２などの複数のサイクルにわたって振動する。サイクル２は、サイクル１に連続している。例えば、サイクル１と２との間に、ＲＦ信号１３０の他のサイクルは存在しない。

【００７５】

値Γ１１は、０μｓ～０．１μｓの間の時間間隔に対応する。０．１μｓの時点で、電圧波形１４２は、正の交点を有する。同様に、値Γｎ１が（ｎ－１）μｓ～０．ｎ　μｓの間の時間間隔に対応するまで、値Γ２１は、０．１～０．２μｓの間の時間間隔に対応し、以下同様である。

【００７６】

図１Ｃは、電圧反射係数の値Γ１１、Γ２１～Γｎ１からの負荷インピーダンス値ＺＬ１１～ＺＬｎ１の計算を例示するＲＦ経路モデル１５０の一実施形態の図である。ＲＦ経路モデル１５０は、コンピュータベースのモデルであり、ＲＦ経路１０２の少なくとも一部からプロセッサ１２６によって生成または実行されるか、あるいは生成および実行される。例えば、ＲＦ経路モデル１５０は、ＲＦ経路１０２の一部またはＲＦ経路１０２の回路構成要素と同じ方式で接続される複数の回路要素を含む。回路要素の例には、コンデンサ、インダクタ、およびレジスタが挙げられる。ＲＦ経路モデル１０２の任意の２つの隣接する回路要素は、ＲＦ経路１０２の一部の対応する２つの隣接する回路構成要素が互いに結合されるのと同じ方式で、接続を介して互いに結合される。例示すると、ＲＦ経路１０２の２つのコンデンサが互いに直列に結合されるとき、ＲＦ経路モデル１５０の２つのコンデンサもまた、互いに直列に結合される。ＲＦ経路モデル１５０の２つのコンデンサの各々は、ＲＦ経路１０２の２つのコンデンサのうちの対応する１つのものと同じ静電容量を有するか、またはＲＦ経路モデル１５０の２つのコンデンサは、ＲＦ経路１０２の２つのコンデンサの合計または組み合わされた静電容量と同じ合計または組み合わされた静電容量を有する。別の例示として、ＲＦ経路１０２の２つのコンデンサが互いに並列に結合されるとき、ＲＦ経路モデル１５０の２つのコンデンサも互いに並列に結合され、ＲＦ経路モデル１５０の２つのコンデンサは、ＲＦ経路１０２の２つのコンデンサの合計または組み合わされた静電容量と同じ合計または組み合わされた静電容量を有する。

【００７７】

さらに別の例示として、ＲＦ経路モデル１５０は、ＲＦ経路１０２の一部またはＲＦ経路１０２の回路構成要素の組み合わされたインピーダンスと同じインピーダンスまたは実質的に同じインピーダンスを有する。ＲＦ経路モデル１５０は、ＲＦ経路モデル１５０のインピーダンスが組み合わされたインピーダンスから所定の範囲内にあるとき、ＲＦ経路１０２の一部の回路構成要素の組み合わされたインピーダンスと実質的に同じインピーダンスを有する。所定の範囲は、メモリデバイス１２８に記憶され、プロセッサ１２６によってアクセスされる。一例として、ＲＦ経路モデル１５０は、プロセッサ１２６によって入力デバイスを介して受信され、プロセッサ１２６によって実行される。ＲＦ経路モデル１５０は、入力デバイス１５０を動作するユーザによって生成される。ＲＦ経路モデル１５０は、プロセッサ１２６によって実行されるコンピュータプログラムを使用することによって、ユーザによって生成される。別の例として、ＲＦ経路モデル１５０は、プロセッサ１２６によって生成され、プロセッサ１２６によって実行される。別の例として、ＲＦ経路モデル１５０は、いくつかのモジュールを含み、各モジュールは、１つまたは複数の

レジスタ、または１つまたは複数のコンデンサ、または１つまたは複数のインダクタ、またはそれらの組み合わせを含む。例示として、各モジュールは、抵抗およびリアクタンスを含む方程式として表される。

【００７８】

ＲＦ経路１０２の一部の例には、ＲＦケーブルＲＦＣ２（図１）、またはインピーダンス整合ネットワーク１１０の入力Ｉ２（図１）とインピーダンス整合ネットワーク１１０の出力との間に結合されたインピーダンス整合ネットワーク１１０（図１）の分岐部、またはＲＦ伝送ラインＲＦＴ１（図１）、またはプラズマ励起電極１０４（図１）が挙げられる。ＲＦ経路１０２の一部の追加の例には、ＲＦケーブルＲＦＣ２と、インピーダンス整合ネットワーク１１０の入力Ｉ２とインピーダンス整合ネットワーク１１０の出力との間に結合されたインピーダンス整合ネットワーク１１０の分岐部の組み合わせ、またはＲＦケーブルＲＦＣ２と、インピーダンス整合ネットワーク１１０の分岐部およびＲＦ伝送ラインＲＦＴ１の組み合わせ、またはＲＦケーブルＲＦＣ２と、インピーダンス整合ネットワーク１１０の分岐部ならびにＲＦ伝送ラインＲＦＴ１およびプラズマ励起電極１０４の組み合わせが挙げられる。

【００７９】

プロセッサ１２６は、値Γ１１、Γ２１～Γｎ１をＲＦ経路モデル１５０の入力Ｉｎに提供し、ＲＦ経路モデル１５０の出力Ｏｕｔで負荷インピーダンス値ＺＬ１１～ＺＬｎ１を生成する。例えば、プロセッサ１２６は、値Γ１１を入力ＩｎからＲＦ経路モデル１５０の回路要素を介して順方向に伝播し、出力Ｏｕｔで負荷インピーダンス値ＺＬ１１を生成する。順方向伝播の前および最中、ＲＦ経路モデル１５０は、静電容量Ｃｋｎｏｗｎ１および無線周波数ＲＦｋｎｏｗｎを有するように初期化される。静電容量Ｃｋｎｏｗｎ１は、基板Ｓ（図１Ａ）の処理中のインピーダンス整合ネットワーク１１０の入力Ｉ２と出力との間のインピーダンス整合ネットワーク１１０の分岐部のコンデンサの静電容量であり、無線周波数ＲＦｋｎｏｗｎは、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器１１４（図１Ａ）の動作周波数である。例示すると、無線周波数ＲＦｋｎｏｗｎは、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器１１４の動作周波数である。Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器１１４は、一例として、５７ＭＨｚ～６３ＭＨｚで動作する。さらに例示すると、周波数ＲＦｋｎｏｗｎは、０～０．１μｓの間の時間間隔、０．１μｓ～０．２μｓの間の時間間隔など、時間間隔ごとに異なる。値Ｃｋｎｏｗｎ１およびＲＦｋｎｏｗｎは、入力／出力インターフェース、例えば、シリアルインターフェース、パラレルインターフェース、ユニバーサルシリアルバス（ＵＳＢ）インターフェースなどを介してプロセッサ１２６に接続された入力デバイスを介して、ユーザによってプロセッサ１３４への入力として提供される。入力デバイスの例には、マウス、キーボード、スタイラス、キーパッド、ボタン、およびタッチスクリーンが挙げられる。

【００８０】

例を続けると、プロセッサ１２６は、値Γ１１、Γ２１～Γｎ１から、ＲＦ経路モデル１５０の入力Ｉｎでのインピーダンス値Ｚ１１、Ｚ２１～Ｚｎ１を決定する。例示すると、プロセッサ１２６は、メモリデバイス１２８から、インピーダンス値Ｚ１１と値Γ１１との間のマッピングまたは１対１の関係などの対応にアクセスし、インピーダンス値Ｚ１１を識別する。同様の方式で、ＲＦ経路モデル１５０の入力Ｉｎでのインピーダンス値Ｚ２１～Ｚｎ１は、値Γ２１～Γｎ１からプロセッサ１２６によって決定される。

【００８１】

例をさらに続けると、プロセッサ１２６は、インピーダンス値Ｚ１１をＲＦ経路モデル１５０の回路要素を介して伝播し、ＲＦ経路モデル１５０の出力Ｏｕｔで値ＺＬ１１を計算する。例示すると、プロセッサ１２６は、値Ｚ１１とＲＦ経路モデル１５０の回路要素のインピーダンスの値の方向和（ｄｉｒｅｃｔｉｏｎａｌ　ｓｕｍ）を計算し、ＲＦ経路モデル１５０の出力での負荷インピーダンス値ＺＬ１１を計算する。回路要素のインピーダンスの値は、メモリデバイス１２８に記憶される。同様の方式で、プロセッサ１２６は、ＲＦ経路モデル１５０の入力Ｉｎでのインピーダンス値Ｚ２１～Ｚｎ１から、ＲＦ経路モデル１５０の出力Ｏｕｔでの負荷インピーダンス値ＺＬ２１～ＺＬｎ１を決定する。

【００８２】
一実施形態では、ＲＦ経路モデル１５０の入力Ｉｎでの電圧反射係数の値Γ１１、Γ２１～Γｎ１を受信する代わりに、複素電圧および複素電流の値は、センサ１３１およびＹ　ＭＨｚ　ＲＦ発生器１１４（図１Ａ）の出力に結合された高速データ取得デバイス１２３（図１Ａ）からのＲＦ経路モデル１５０によって入力Ｉｎで受信される。この実施形態では、プロセッサ１２６は、複素電圧および複素電流の値から電圧反射係数の値Γ１１、Γ２１～Γｎ１を計算する必要はない。負荷インピーダンスの値ＺＬ１１～ＺＬｎ１は、ＲＦ経路モデル１５０を介して、センサ１３１および高速データ取得デバイス１２３によって測定された複素電圧および複素電流の値を伝播することによって、プロセッサ１２６によって計算される。例えば、プロセッサ１２６は、メモリデバイス１２８から、ＲＦ経路モデル１５０の回路要素の各々に関連するインピーダンスの値または複素電圧および複素電流の値にアクセスし、入力Ｉｎでの複素電圧および複素電流の値の各々と、ＲＦ経路モデル１５０の回路要素に関連するインピーダンスまたは複素電圧および複素電流の値の方向和を計算し、ＲＦ経路モデル１５０の出力Ｏｕｔでの負荷インピーダンスの値ＺＬ１１～ＺＬｎ１を計算する。

【００８３】
図１Ｄ－１は、ＲＦ経路モデル１５０の入力における平均電力反射係数$\Gamma 1avmin^2$を最小化するＲＦ経路モデル１５０の出力における負荷インピーダンスの値ＺＬ１１～ＺＬｎ１の適用に基づいた、周波数パラメータまたは周波数パラメータおよびマッチネットワークパラメータを含む動作パラメータの決定を例示するＲＦ経路モデル１５０の一実施形態の図である。例えば、プロセッサ１２６は、Ｙ　ＭＨｚ　ＲＦ発生器１１４（図１Ａ）から出力されるＲＦ信号１３２の周期波形のタイプを示す入力デバイスを介して入力を提供される。例示すると、プロセッサ１２６は、入力デバイスを介して入力を提供され、入力は、以下に説明される動作パラメータの初期値を含む。入力は、入力デバイスを動作しているユーザによって提供される。別の例示として、動作パラメータは、入力としてユーザによって提供され、プロセッサ１２６は、動作パラメータの値を初期化する。周期波形のタイプまたは動作パラメータは、ＲＦ信号１３２のエンベロープの形状を定義する。例えば、周期波形のタイプまたは動作パラメータは、ＲＦ信号１３２のピークツーピーク振幅の形状を提供する。周期波形のタイプまたは周期波形の形状の例には、正弦波形、台形波形、鋸歯状波形、矩形波形、および方形波形が挙げられる。この例では、正弦波、台形、矩形、鋸歯状、および方形は、ＲＦ信号１３２のエンベロープの形状である。場合によっては、周期波形および周期関数という用語は、本明細書では互換的に使用される。電力反射係数は、反射パラメータまたは反射係数パラメータの別の例である。

【００８４】
例を続けると、ＲＦ経路モデル１５０の出力での負荷インピーダンスの値ＺＬ１１～ＺＬｎ１は、ＲＦ経路モデル１５０の回路要素を介して逆伝播され、ＲＦ経路モデル１５０の入力での負荷インピーダンスの複数の値ＺＬ１ａ～ＺＬｎａを決定する。プロセッサ１２６は、値ＺＬ１１と、ＲＦ経路モデルの回路要素のインピーダンスの値の方向和を計算して値ＺＬ１ａを決定し、値ＺＬ２１と、ＲＦ経路モデル１５０の回路要素のインピーダンスの値の方向和を計算して値ＺＬ２ａを決定する。同様の方式で、値ＺＬｎａは、値ＺＬｎ１からプロセッサ１２６によって決定される。

【００８５】
例を続けると、プロセッサ１２６は、ＲＦ経路モデル１５０の入力での負荷インピーダンスの値ＺＬ１ａ～ＺＬｎａから、ＲＦ経路モデル１５０の入力での電力反射係数の値Γ$1a^2$～Γna^2を決定する。例えば、プロセッサ１２６は、メモリデバイス１２６から、電圧反射係数の値Γ１ａ～Γｎａと負荷インピーダンスの値ＺＬ１ａ～ＺＬｎａとの間のマッピングまたはリンクなどの対応にアクセスし、電圧反射係数の値Γ１ａ～Γｎａを識別または決定する。例示すると、メモリデバイス１２６は、値Γ１ａと値ＺＬ１ａとの間の対応を記憶し、値Γｎａと値ＺＬｎａとの間の別の対応を記憶する。

【００８６】

例をさらに続けると、プロセッサ１２６は、ＲＦ経路モデル１５０の入力での電圧反射係数の値Γ１ａ～Γｎａの各々の二乗を計算し、ＲＦ経路モデル１５０の入力Ｉｎでの電力反射係数の値Γ１ａ^2～Γｎａ^{2}を決定する。プロセッサ１２６は、電力反射係数の値Γ１ａ^2～Γｎａ^{2}の平均をさらに計算し、第１の平均値ＡａｖｍｉｎＡ^{2}を生成する。プロセッサ１２６は、第１の平均値ＡａｖｍｉｎＡ^{2}が計算される動作パラメータのｙＭＨｚａｖｆｒｅｑＡ、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎＡ、ｔｈｉｇｈＡ、ｔｌｏｗＡ、φｒｅｌａｔｉｖｅＡ、およびＣＡなどの値を決定し、ここで、ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑＡは、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器１１４が動作する平均動作周波数であり、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎＡは、平均周波数の変動であり、ｔｈｉｇｈＡは、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器１１４の電力レベルまたは電圧レベルが高レベルに留まる高滞留時間であり、ｔｌｏｗＡは、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器１１４の電力レベルまたは電圧レベルが低レベルに留まる低滞留時間であり、φｒｅｌａｔｉｖｅＡは、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２によって出力されるＲＦ信号１３０（図１Ａ）の位相と比較した、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器１１４によって出力されるＲＦ信号１３２（図１Ａ）の相対位相であり、ＣＡは、インピーダンス整合ネットワーク１１０（図１Ａ）の入力Ｉ２とインピーダンス整合ネットワーク１１０の出力との間に結合されたインピーダンス整合ネットワーク１１０の分岐部に適用される総静電容量である。低レベルは、高レベルに対応する電圧または電力レベルよりも低い電圧または電力レベルである。高レベルは、本明細書では高状態と呼ばれることがあり、低レベルは、本明細書では低状態と呼ばれることがある。また、低レベルは、ＲＦ信号の複数の値の底部エンベロープまたは底部境界であり、高レベルは、ＲＦ信号の複数の値の上部エンベロープまたは上部境界である。ＲＦ信号は、低レベルと高レベルとの間で振動する。

【００８７】

動作パラメータのｙＭＨｚａｖｆｒｅｑＡ、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎＡ、ｔｈｉｇｈＡ、ｔｌｏｗＡ、φｒｅｌａｔｉｖｅＡ、およびＣＡなどの値の決定を例示すると、プロセッサ１２６は、動作パラメータの値をＲＦ経路モデル１５０に提供する。値をＲＦ経路モデル１５０に提供することによって、プロセッサ１２６は、値をＲＦ経路モデル１５０に利用可能にする。ＲＦ経路モデル１５０がプロセッサ１２６から動作パラメータの値を受信し、その値によって特徴付けられると、プロセッサ１２６は、ＲＦ経路モデル１５０の出力での負荷インピーダンスの値ＺＬ１１～ＺＬｎ１を逆伝播し、ＲＦ経路モデル１５０の入力での電圧反射係数の値Γ１ａ～Γｎａを決定する。プロセッサ１２６は、メモリデバイス１２６から動作パラメータの値にアクセスして値を利用可能にし、例えば、電圧反射係数の値Γ１ａ～Γｎａが決定されるＲＦ経路モデル１５０にその値を提供する。

【００８８】

例を続けると、ＲＦ経路モデル１５０の出力での負荷インピーダンスの値ＺＬ１１～ＺＬｎ１は、ＲＦ経路モデル１５０の回路要素を介して逆伝播され、ＲＦ経路モデル１５０の入力での負荷インピーダンスの複数の値ＺＬ１ｘ～ＺＬｎｘを決定する。プロセッサ１２６は、値ＺＬ１１と、ＲＦ経路モデル１５０の回路要素のインピーダンスの値の方向和を計算して値ＺＬ１ｘを決定し、値ＺＬ２１と、ＲＦ経路モデル１５０の回路要素のインピーダンスの値の方向和を計算して値ＺＬ２ｘを決定する。同様の方式で、値ＺＬｎｘは、値ＺＬｎ１からプロセッサ１２６によって決定される。

【００８９】

例を続けると、プロセッサ１２６は、ＲＦ経路モデル１５０の入力での負荷インピーダンスの値ＺＬ１ｘ～ＺＬｎｘから、ＲＦ経路モデル１５０の入力での電力反射係数の値Γ１１^2～Γｎ１^{2}を計算する。例えば、プロセッサ１２６は、メモリデバイス１２６から、電圧反射係数の値Γ１１～Γｎ１と負荷インピーダンスの値ＺＬ１ｘ～ＺＬｎｘとの間のマッピングまたはリンクなどの対応にアクセスし、電圧反射係数の値Γ１１～Γｎ１を識別または決定する。例示すると、メモリデバイス１２６は、値Γ１１と値ＺＬ１ｘとの間の対応を記憶し、値Γｎ１と値ＺＬｎｘとの間の別の対応を記憶する。

【００９０】
例をさらに続けると、プロセッサ１２６は、ＲＦ経路モデル１５０の入力での電圧反射係数の値Γ１１～Γｎ１の各々の二乗を計算し、ＲＦ経路モデル１５０の入力での電力反射係数の値Γ_{11}^2～Γ_{n1}^2を決定する。プロセッサ１２６は、電力反射係数の値Γ_{11}^2～Γ_{n1}^2の平均をさらに計算し、第２の平均値Γ_{1avmin}^2を生成する。
【００９１】
プロセッサ１２６は、第１の平均値Γ_{1avmin}^2が計算される動作パラメータのｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１などの値を決定し、ここで、ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１は、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器１１４が動作する平均動作周波数であり、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１は、平均周波数の変動であり、ｔｈｉｇｈ１は、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器１１４の電力レベルまたは電圧レベルが高レベルに留まる高滞留時間であり、ｔｌｏｗ１は、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器１１４の電力レベルまたは電圧レベルが低レベルに留まる低滞留時間であり、φｒｅｌａｔｉｖｅ１は、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２によって出力される ＲＦ信号１３０（図１Ａ）の位相と比較した、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器１１４によって出力される ＲＦ信号１３２（図１Ａ）の相対位相であり、Ｃ１は、インピーダンス整合ネットワーク１１０（図１Ａ）の入力Ｉ２（図１Ａ）とインピーダンス整合ネットワーク１１０の出力との間のインピーダンス整合ネットワーク１１０の分岐部の総（組み合わされた）静電容量である。動作パラメータのｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１などの値の決定を例示すると、プロセッサ１２６は、動作パラメータの値をＲＦ経路モデル１５０に提供する。値をＲＦ経路モデル１５０に提供することによって、プロセッサ１２６は、値をＲＦ経路モデル１５０に利用可能にする。ＲＦ経路モデル１５０がプロセッサ１２６から動作パラメータの値を受信し、その値によって特徴付けられると、プロセッサ１２６は、ＲＦ経路モデル１５０の出力での負荷インピーダンスの値ＺＬ１１～ＺＬｎ１を逆伝播し、ＲＦ経路モデル１５０の入力での電圧反射係数の値Γ１１～Γｎ１を決定する。プロセッサ１２６は、メモリデバイス１２６から動作パラメータの値にアクセスして値を利用可能にし、例えば、電圧反射係数の値Γ１１～Γｎ１が決定されるＲＦ経路モデル１５０にその値を提供する。
【００９２】
プロセッサ１２６は、ＲＦ経路モデル１５０の入力での電力反射係数の第２の平均値Γ_{1avmin}^2が、ＲＦ経路モデル１５０の入力での電力反射係数の第１の平均値Γ_{Aavmin}^2よりも小さいまたは低いと決定する。決定に応じて、プロセッサ１２６は、ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑＡ、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎＡ、ｔｈｉｇｈＡ、ｔｌｏｗＡ、φｒｅｌａｔｉｖｅＡをＹメガヘルツ ＲＦ発生器１１４に適用する代わりに、周波数パラメータｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１を適用することを決定し、マッチネットワークパラメータＣＡをインピーダンス整合ネットワーク１１０に適用する代わりに、マッチネットワークパラメータＣ１を適用することを決定する。プロセッサ１２６が値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１を決定すると、プロセッサ１２６は、動作パラメータの初期値を、動作パラメータの決定された値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１で更新する。
【００９３】
動作パラメータの決定された値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１は、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２の動作の１つまたは複数のサイクルの次のセットの間に適用され、次のセットは、以下のように、適用される動作パラメータがプロセッサ１２６によって決定されるＸキロヘルツ ＲＦ発生器１１２の動作の１つまたは複数のサイクルのセットの

後に続く。例えば、プロセッサ１２６は、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２の動作の１０サイクルについて、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器１１４の出力Ｏ２（図１Ａ）で測定された複素電圧および複素電流を受け取り、複素電圧および複素電流から動作パラメータを決定し、後続のＸキロヘルツ ＲＦ発生器１１２の動作の１０サイクルの間に動作パラメータをＹＭＨｚ ＲＦ発生器１１４に適用する。後続の１０サイクルは、プロセッサ１２６が動作パラメータを決定するのに要した時間量の後に発生する。時間量の例には、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２の動作の１０サイクルの一部、およびＸキロヘルツ ＲＦ発生器１１２の動作の１０サイクルに連続している１つまたは複数のサイクルが挙げられる。１つまたは複数の連続するサイクルは、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２の動作である。プロセッサ１２６は、メモリデバイス１２８に動作パラメータの値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１などの値を記憶する。

【００９４】

一実施形態では、プロセッサ１２６は、動作パラメータの値が所定の範囲内に収束するまで、動作または動作パラメータを決定する方法を繰り返す。例えば、動作パラメータの値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１が決定される１０サイクルの後に続く１０サイクル中、プロセッサ１２６は、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器１１４を制御して値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、および値を適用し、インピーダンス整合ネットワーク１１０の入力Ｉ２（図１Ａ）と出力との間のインピーダンス整合ネットワーク１１０の分岐部の１つまたは複数の可変コンデンサを制御して値Ｃ１を適用する。動作パラメータの値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１が適用される１０サイクルの後に続く１０サイクル中、または動作パラメータの値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１が適用される同じ１０サイクル中、プロセッサ１２６は、値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１が、プロセッサ１２６がＲＦ経路モデル１５０を開始して値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１およびｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１の方向和である無線周波数を有し、静電容量Ｃ１を有することを除いて決定されるのと同じ方式で、動作パラメータの値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑＶＡＬ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎＶＡＬ１、ｔｈｉｇｈＶＡＬ１、ｔｌｏｗＶＡＬ１、φｒｅｌａｔｉｖｅＶＡＬ１、およびＣＶＡＬ１を決定する。プロセッサ１２６は、残りの値ｔｈｉｇｈＶＡＬ１、ｔｌｏｗＶＡＬ１、φｒｅｌａｔｉｖｅＶＡＬ１、およびＣＶＡＬ１とｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１について、値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑＶＡＬ１が値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１から所定の範囲内にあるか、または値ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎＶＡＬ１が値ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１から所定の範囲内にあるかなどを決定する。残りの値ｔｈｉｇｈＶＡＬ１、ｔｌｏｗＶＡＬ１、φｒｅｌａｔｉｖｅＶＡＬ１、およびＣＶＡＬ１とｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１について、値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑＶＡＬ１が値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１から所定の範囲内にあり、値ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎＶＡＬ１が値ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１から所定の範囲内にあることなどを決定すると、プロセッサ１２６は、動作パラメータの値の収束を決定し、動作パラメータの値をさらに決定しない。

【００９５】

一方、実施形態を続けると、残りの値ｔｈｉｇｈＶＡＬ１、ｔｌｏｗＶＡＬ１、φｒｅｌａｔｉｖｅＶＡＬ１、およびＣＶＡＬ１とｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１について、値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑＶＡＬ１が値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１から所定の範囲内にないこと、または値ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎＶＡＬ１が値ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１から所定の範囲内にないことなどを決定す

ると、プロセッサ１２６は、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２のさらなる動作サイクルの間、動作および方法を適用し、動作パラメータのさらなる値を決定し続ける。プロセッサ１２６は、プロセッサ１２６が図１Ｄ－３を参照して以下に説明するように動作パラメータの値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１を適用するのと同じ方式で、値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑＶＡＬ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎＶＡＬ１、ｔｈｉｇｈＶＡＬ１、ｔｌｏｗＶＡＬ１、φｒｅｌａｔｉｖｅＶＡＬ１、およびＣＶＡＬ１が決定される１０サイクルの後に続く次の１０サイクル中、値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑＶＡＬ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎＶＡＬ１、ｔｈｉｇｈＶＡＬ１、ｔｌｏｗＶＡＬ１、φｒｅｌａｔｉｖｅＶＡＬ１、およびＣＶＡＬ１を適用する。

【００９６】

動作パラメータの値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１は、台形波形用であることに留意されたい。一実施形態では、本明細書に記載の方法を適用した後、本明細書に記載のＹメガヘルツＲＦ発生器によって出力される別のタイプの波形について、異なるタイプの値が計算される。例えば、波形のタイプが正弦波であるとき、動作パラメータは、平均周波数、平均周波数からの周波数振幅などの周波数変動、本明細書で説明されるＸ　ｋＨｚ　ＲＦ発生器によって生成されるＲＦ信号の周期と同じ周期、およびＸ　ｋＨｚ　ＲＦ発生器によって生成されるＲＦ信号の位相に対する位相を含む。別の例として、波形のタイプが矩形であるとき、動作パラメータは、高周波数値、高周波数値が維持される高周波時間、低周波数値、低周波数値が維持される低周波数時間、本明細書で説明されるＸ　ｋＨｚ　ＲＦ発生器によって生成されるＲＦ信号の周期と同じ周期、およびＸ　ｋＨｚ　ＲＦ発生器によって生成されるＲＦ信号の位相に対する位相を含む。高周波数値は、低周波数値よりも大きい。さらに別の例として、波形のタイプが三角形であるとき、動作パラメータは、高周波数値、低周波数値、高周波数値と低周波数値との間の第１のランプ速度または第１のランプ時間、低周波数値と高周波数値との間の第２のランプ速度または第２のランプ時間、本明細書で説明されるＸ　ｋＨｚ　ＲＦ発生器によって生成されるＲＦ信号の周期と同じ周期、およびＸ　ｋＨｚ　ＲＦ発生器によって生成されるＲＦ信号の位相に対する位相を含む。高周波数値は、低周波数値よりも大きい。第１のランプ速度は、第２の速度よりも低いか、同じか、または大きい。

【００９７】

一実施形態では、マッチネットワークパラメータＣ１は、プロセッサ１２６によって決定されず、マッチネットワークパラメータＣ１の決定は、任意である。

【００９８】

一実施形態では、周波数パラメータおよび周波数変調パラメータという用語は、本明細書では互換的に使用される。

【００９９】

図１Ｄ－２は、本明細書で説明されるＸキロヘルツＲＦ発生器によって生成されるＲＦ信号１７２の複数のサイクルを例示するグラフ１７０の一実施形態である。例えば、ＲＦ信号１７２は、図１ＡのＲＦ信号１３０の一例である。グラフ１７０は、時間ｔに対するＲＦ信号１７２の電圧をプロットしている。ＲＦ信号１７２は、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器によって出力される電圧を表す電圧波形である。ＲＦ信号１７２は、正弦波または実質的に正弦波であり、周期的に電圧の正の値と負の値との間で振動する。例えば、ＲＦ信号１７２は、電圧波形の値が負から正になる時間である正の交点ＰＣ１を有する。同様に、ある期間の後、ＲＦ信号１７２は、電圧波形の値が負から正になる別の時間である別の正の交点ＰＣ２を有する。

【０１００】

ＲＦ信号１７２のサイクル１は、電圧波形の発生期間を表す。ＲＦ信号１７２の別のサイクル２は、電圧波形の発生期間の別の例を表す。サイクル２は、サイクル１に連続している。例えば、サイクル１と２との間にサイクルは存在しない。また、ＲＦ信号１７２の

追加のサイクル３～（ｍ－１）は、サイクル２に連続している。サイクル３は、サイクル２に連続している。サイクル１～（ｍ－１）は、ＲＦ信号１７２のサイクルのセット１を形成し、ｍは、２よりも大きい整数である。

【０１０１】

さらに、（ｍ＋ｑ）がＲＦ信号１７２のサイクルのセット２を形成するまで、サイクルｍ、（ｍ＋１）、以下同様であり、ｑは、１よりも大きい整数である。セット２は、セット１に連続している。例えば、セット１と２との間にサイクルのセットは存在しない。セット１の１～（ｍ－１）のサイクル数と同じｍ～（ｍ＋ｑ）のサイクル数。一例として、動作パラメータの値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１を決定するために、複素電圧および複素電流がＹメガヘルツＲＦ発生器１１４（図１Ａ）の出力Ｏ２で測定される上述の１０サイクルは、セット１のサイクル１～（ｍ－１）の一例である。また、動作パラメータの値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１が適用される上述の１０サイクルは、セット２のサイクルｍ～（ｍ＋ｑ）の一例である。

【０１０２】

一実施形態では、電圧波形の代わりに、ＲＦ信号１７２の電力波形が使用される。

【０１０３】

図１Ｄ－３は、基板Ｓの処理中にＸキロヘルツＲＦ発生器１１２の動作のサイクルのセット２中に動作パラメータの値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１を適用する、プラズマツールなどのシステム１８０の一実施形態の図である。システム１８０は、システム１８０が高速データ取得デバイス１２３、センサ１３１、および高速データ取得デバイス１２１を除外し、電圧センサ１８２、コンパレータ１８４、モータシステム１８６、およびドライバシステム１８８を含むことを除いて、構造および機能がシステム１００と同じである。コンパレータ１８４の一例には、プロセッサまたは特定用途向け集積回路またはプログラマブル論理デバイスが挙げられる。モータシステム１８６の一例には、１つまたは複数の電気モータが挙げられ、各電気モータは、固定子および回転子を有する。ドライバシステム１８８の一例には、モータシステム１８６から１つまたは複数の信号を受信すると、１つまたは複数の電流信号を出力するために互いに結合された１つまたは複数のトランジスタが挙げられる。コンパレータ１８４は、電圧センサ１８２に結合され、プロセッサ１２６にも結合される。電圧センサ１８２は、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２の出力Ｏ１に結合される。

【０１０４】

ドライバシステム１８８はプロセッサ１２６に結合され、モータシステム１８６はドライバシステム１８８に結合される。モータシステム１８６は、対応する１つまたは複数の接続構成要素を介して、インピーダンス整合ネットワーク１１０の１つまたは複数の回路構成要素に結合される。各接続構成要素の一例には、１つまたは複数のロッド、または１つまたは複数のロッドと１つまたは複数のギアの組み合わせが挙げられる。

【０１０５】

ＲＦ信号１３０は、図１Ａを参照して上述したのと同様の方式でＸキロヘルツＲＦ発生器１１２によって生成され、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２の出力Ｏ１およびＲＦケーブルＲＦＣ１を介して、インピーダンス整合ネットワーク１１０の入力Ｉ１に送信される。例えば、ＲＦ信号１３０のサイクルのセット２は、Ｘキロヘルツのｒｆ発生器１１２から出力される。電圧センサ１８２は、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２の出力Ｏ１でＲＦ信号１３０の電圧を測定する。コンパレータ１８４は、電圧センサ１８２によって測定された電圧をゼロの値と比較して比較結果を出力し、比較結果をプロセッサ１２６に提供する。比較結果は、電圧がゼロよりも上か下か、またはゼロかどうか、例えば、電圧が正か負かゼロかを提供する。プロセッサ１２６は、比較結果から、電圧がゼロであり、負から正になりそうな複数の時間または複数のインスタンスを決定する。プロセッサ１２６によって

決定される複数の時間または複数のインスタンスに基づいて、ＲＦ信号１３０の位相は、プロセッサ１２６によって決定される。

【０１０６】

さらに、プロセッサ１２６は、メモリデバイス１２８からの周波数パラメータの値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１にアクセスし、その値をＲＦ電源１２４に提供する。相対位相φｒｅｌａｔｉｖｅ１は、基板Ｓの処理中に決定されるＲＦ信号１３０の位相からプロセッサ１２６によって決定される。周波数パラメータを受信すると、ＲＦ電源１２４は、値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、およびφｒｅｌａｔｉｖｅ１を有するＲＦ信号１９０を生成する。例えば、ＲＦ信号１９０は、台形形状またはパルス形状または方形波形状または正弦波形状であるエンベロープまたはピークツーピーク振幅を有する。ＲＦ信号１９０の相対位相φｒｅｌａｔｉｖｅ１は、遅れなど、電圧センサ１８２、コンパレータ１８４、およびプロセッサ１２６を使用して決定されるＲＦ信号１３０の位相に相対的である。ＲＦ信号１９０は、それ自体が正弦波信号または実質的に正弦波信号である。ＲＦ信号１９０は、ＲＦ電源１２４によって、出力Ｏ２およびＲＦケーブルＲＦＣ２を介して、インピーダンス整合ネットワーク１１０の入力Ｉ２に供給される。

【０１０７】

さらに、プロセッサ１２６は、メモリデバイス１２８から値Ｃ１にアクセスし、命令信号を生成し、命令信号をドライバシステム１８８に送信する。命令信号の一例は、インピーダンス整合ネットワーク１１０の入力Ｉ２と出力との間のインピーダンス整合ネットワーク１１０の分岐部の組み合わされた静電容量を達成するようにモータシステム１８６を制御するために、ドライバシステム１８８によって出力される１つまたは複数の量の電流を含むものである。命令信号を受信すると、ドライバシステム１８６は、１つまたは複数の電流信号を生成し、電流信号をモータシステム１８６に送信する。

【０１０８】

モータシステム１８６は、１つまたは複数の電流信号に従って動作し、インピーダンス整合ネットワーク１１０の分岐部の静電容量Ｃ１を達成するために、インピーダンス整合ネットワーク１１０の入力Ｉ２と出力との間の分岐部の１つまたは複数の可変コンデンサを制御する。例えば、モータシステム１８６のモータは、インピーダンス整合ネットワーク１１０内の可変コンデンサのプレートを直線方向に回転または移動させ、コンデンサのプレートと別のプレートとの間の距離または面積を変更してコンデンサの静電容量を変更し、インピーダンス整合ネットワーク１１０の入力Ｉ２と出力との間の分岐部の静電容量Ｃ１を達成するように動作する。

【０１０９】

静電容量Ｃ１を有するインピーダンス整合ネットワーク１１０は、ＲＦ信号１３０および１９０を受信し、ＲＦ信号１３０および１３２（図１Ａ）に関して上述の方式でＲＦ信号１３０および１９０を処理して修正されたＲＦ信号１９２を出力する。例えば、インピーダンス整合ネットワーク１１０は、インピーダンス整合ネットワーク１１０の出力に結合された負荷のインピーダンスを、インピーダンス整合ネットワーク１１０の入力Ｉ１およびＩ２に結合されたソースのインピーダンスと整合させ、修正されたＲＦ信号１９２を出力する。１つまたは複数のプロセスガスがプラズマ励起電極１０４の上部電極１０６と下部電極との間のギャップに供給され、プラズマ励起電極１０４の下部電極がインピーダンス整合ネットワーク１１０の出力からＲＦ伝送ラインＲＦＴ１を介して修正されたＲＦ信号１９２を受信するとき、プラズマは、プラズマチャンバ１０８内で衝突または維持され、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２の動作のセット２のサイクル中に基板Ｓを処理する。プロセスガスの一例には、O_2などの酸素含有ガスが挙げられる。プロセスガスの他の例には、フッ素含有ガス、例えば、テトラフルオロメタン（CF_4）、六フッ化硫黄（SF_6）、ヘキサフルオロエタン（C_2F_6）などが挙げられる。

【０１１０】

一実施形態では、コンパレータ１８４は、プロセッサ１２６の一部であり、コンパレータ１８４によって実施されるものとして本明細書に記載されている機能は、プロセッサ１２６によって実施される。

【０１１１】

静電容量Ｃ１が決定されない実施形態では、プロセッサ１２６は、静電容量Ｃ１を達成するためにインピーダンス整合ネットワーク１１０を制御しない。

【０１１２】

一実施形態では、センサ１２０（図１Ａ）は、動作パラメータの値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１が決定された後、またはプロセッサ１２６による収束後に決定された後、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２の出力Ｏ１から切り離される。また、センサ１３１は、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器１１４の出力Ｏ２から切り離される。

【０１１３】

図２Ａは、ＲＦ信号２０２の動作サイクルを例示するグラフ２００の一実施形態である。ＲＦ信号２０２は、図１ＡのＲＦ信号１３０の一例である。グラフ２００は、マイクロ秒単位の時間ｔに対するＲＦ信号１３０の電圧をプロットしている。

【０１１４】

図２Ｂは、本明細書で説明されるＹ ＭＨｚ ＲＦ発生器によって供給されるＲＦ信号の順方向電圧波形２０８を例示するグラフ２０６の一実施形態である。例えば、順方向電圧波形２０８は、図１ＡのＲＦ信号１３２の順方向電圧の一例である。グラフ２０６は、ＲＦ信号２０２（図２Ａ）の１サイクル中のマイクロ秒単位の時間ｔに対するＹ ＭＨｚ ＲＦ発生器の出力で供給される順方向電圧または電圧をプロットしている。順方向電圧波形２０８は、図２Ａを参照して上述した、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器によって供給されるＲＦ信号２０２の１サイクル中に複数のサイクルを有することに留意されたい。

【０１１５】

図２Ｃは、本明細書で説明されるＹ ＭＨｚ ＲＦ発生器によって供給されるＲＦ信号の逆方向電圧波形２１２を例示するグラフ２１０の一実施形態である。例えば、逆方向電圧波形２１２は、図１ＡのＲＦ信号１３２の逆方向電圧の一例である。グラフ２１０は、ＲＦ信号２０２（図２Ａ）の１サイクル中のマイクロ秒単位の時間ｔに対するＲＦ発生器の出力に向かって反射された逆方向電圧または電圧をプロットしている。逆方向電圧波形２１２は、図２Ａを参照して上述した、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器によって供給されるＲＦ信号２０２の１サイクル中に複数のサイクルを有することに留意されたい。

【０１１６】

図２Ｂの順方向電圧波形２０８および図２Ｃの逆方向電圧波形２１２から、電圧反射係数は、振幅および位相を有する複素数であることが示されている。順方向電圧は、同様のピークツーピーク振幅または実質的に一定のエンベロープを有する。逆方向電圧のピークツーピーク振幅またはエンベロープは、周期的に低くなり、かつ周期的に高くなる。順方向電圧および逆方向電圧は、共に複素数の電圧反射係数を生成する。複素数は、振幅および位相を含む。

【０１１７】

図２Ｄは、１つのグラフに順方向電圧波形２０８および逆方向電圧波形２１２を例示するグラフ２１４の一実施形態の図である。この場合も、順方向電圧波形２０８および逆方向電圧波形２１２のピークツーピーク振幅の変化は、複素数の電圧反射係数を生成する。

【０１１８】

図２Ｅは、本明細書で説明されるＹ ＭＨｚ ＲＦ発生器の出力における電圧反射係数の値を例示するスミスチャート２２０の一実施形態である。例えば、スミスチャート２２０は、本明細書に記載の方法がＸキロヘルツ ＲＦ発生器１１２（図１Ａ）の動作の１サイクルに適用されない場合のＹ ＭＨｚ ＲＦ発生器１１４（図１Ａ）の出力Ｏ２での電圧反射係数の値を例示する。例えば、図２Ｅに示すように、電圧反射係数のほとんどの値は、スミスチャート２２０の中心に近くない。したがって、本明細書に記載の方法を適用せずに

、大量の電圧がＹメガヘルツＲＦ発生器に向かって反射される。

【０１１９】

図３Ａは、本明細書に記載の方法を適用した後に本明細書で説明されるＹメガヘルツＲＦ発生器から出力されるＲＦ信号の周波数と、方法を適用する前にＹメガヘルツＲＦ発生器から出力されるＲＦ信号との間の比較を例示するグラフ３００の一実施形態の図である。グラフ３００は、マイクロ秒単位の時間ｔに対するＲＦ信号の周波数３０２および別のＲＦ信号の別の周波数３０４をプロットしている。周波数３０２は、本明細書に記載の方法を適用する前にＹメガヘルツＲＦ発生器によって出力されるＲＦ信号のものであり、周波数３０４は、方法を適用した後にＹメガヘルツＲＦ発生器によって出力されるＲＦ信号のものである。

【０１２０】

周波数３０４は、本明細書に記載の方法を適用した後のＲＦ信号１９０（図１Ｄ－３）の周波数の一例であり、周波数３０２は、方法を適用する前のＲＦ信号１３２の周波数である。周波数３０２は、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器から出力されるＲＦ信号のエンベロープの周波数またはピークツーピーク振幅であり、周波数３０４は、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器から出力されるＲＦ信号の別のエンベロープの周波数またはピークツーピーク振幅である。示されるように、周波数３０２によって示されるＲＦ信号のエンベロープは、実質的に一定であるか、または実質的に同じである。他方、周波数３０４によって示されるＲＦ信号のエンベロープは、台形形状を有する。

【０１２１】

グラフ３００はまた、本明細書に記載の方法を適用した後のＹメガヘルツＲＦ発生器から出力されるＲＦ信号の周波数パラメータを示している。例えば、周波数パラメータ３０６は、値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１の一例である。例示すると、周波数パラメータ３０６は、Ｘ ＭＨｚ ＲＦ発生器１１２のサイクルまたはサイクルのセットの間のＲＦ信号１９０の平均周波数である。別の例として、周波数パラメータ３０８は、値ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１の一例である。例示すると、周波数パラメータ３０８は、本明細書に記載の方法を適用した後のＹメガヘルツＲＦ発生器から出力されるＲＦ信号の平均周波数からの正方向または負方向の変動の値である。正方向は、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器から出力されたＲＦ信号の電圧値が平均周波数ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１と比較して正である方向であり、負方向は、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器から出力されるＲＦ信号の電圧値が平均周波数ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１と比較して負である方向である。さらに別の例として、周波数パラメータ３１０は、値ｔｈｉｇｈ１の一例である。例示すると、周波数パラメータ３１０は、本明細書に記載の方法を適用した後にＹメガヘルツＲＦ発生器から出力されるＲＦ信号の周波数が、例えば、所定の高周波数範囲内で高い期間である。さらに別の例として、周波数パラメータ３１２は、値ｔｌｏｗ１の一例である。例示すると、周波数パラメータ３１２は、本明細書に記載の方法を適用した後にＹメガヘルツＲＦ発生器から出力されるＲＦ信号の周波数が、例えば、所定の低周波数範囲内で低い期間である。

【０１２２】

図３Ｂは、本明細書に記載の方法を適用した後の本明細書で説明されるＹメガヘルツＲＦ発生器の出力における電圧反射係数の値を例示するスミスチャート３５０の一実施形態の図である。例えば、スミスチャート３５０は、ＲＦ信号１９０（図１Ｄ－３）がＹメガヘルツＲＦ発生器１１４によって生成されたときの、図１Ｄ－３のＹメガヘルツＲＦ発生器１１４の出力Ｏ２での電圧反射係数の値を示している。スミスチャート３５０は、本明細書で説明されるＸキロヘルツＲＦ発生器１１２（図１Ａ）などのＸキロヘルツＲＦ発生器の動作の１サイクルについてプロットされている。図３Ｂに示されるように、電圧反射係数の値のほとんどは、図２Ｅのスミスチャート２２０に示される電圧反射係数の値と比較して、スミスチャート３５０の中心に近い。

【０１２３】

図４Ａは、図１Ａに関して上述された方法が、基板Ｓ（図１Ａ）の処理中ではなく、レシピ開発中にシステム４００に適用可能であることを例示する、プラズマツールなどのシ

ステム４００の一実施形態の図である。システム４００は、システム４００において、基板Ｓを処理する代わりに、ダミー基板４０２がレシピ開発に使用されることを除いて、図１Ａのシステム１００と構造および機能が同じである。例えば、ダミー基板４０２は、プラズマチャンバ１０８内のプラズマ励起電極１０４の上面に載置される。Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２は、ＲＦ信号１３０を生成し、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器１１４は、ＲＦ信号１３２を生成する。ＲＦ信号１３０および１３２は、上述の方式でインピーダンス整合ネットワーク１１０によって修正され、修正されたＲＦ信号１３４を生成する。修正されたＲＦ信号１３４は、プラズマ励起電極１０４に埋め込まれた下部電極に供給されてプラズマチャンバ１０８内にプラズマを生成するが、ダミー基板４０２の処理はない。例えば、１つまたは複数のプロセスガスは、レシピ開発中にプラズマチャンバ１０８に供給されない。

【０１２４】

センサ１２０および高速データ取得デバイス１２１は、出力Ｏ１で電圧を測定して電圧波形を生成し、これは、図１Ａを参照して上述した方式でプロセッサ１２６によって分析され、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２によって供給されるＲＦ信号１３０の位相を決定する。また、センサ１３１および高速データ取得デバイス１２３は、出力Ｏ２で複素電圧および複素電流を測定し、これは、プロセッサ１２６によって分析され、図１Ａを参照して上述した方式で、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２の動作の１サイクルに対する電圧反射係数の値Γ１１、Γ２１～Γｎ１を決定する。

【０１２５】

図４Ｂは、図１Ｂ－１の表１３０が基板Ｓ（図１Ａ）の処理中にプロセッサ１２６によって生成されるのと同じ方式でレシピ開発中にプロセッサ１２６（図４Ａ）によって生成される表１３０の一実施形態の図である。プロセッサ１２６は、レシピ開発中のＸキロヘルツ ＲＦ発生器１１２（図４Ａ）の動作の１サイクルに対する電圧反射係数の値Γ１１、Γ２１～Γｎ１を決定する。

【０１２６】

上述のように、一実施形態では、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２の１サイクルの動作について、各値Γ１１、Γ２１～Γｎ１を決定する代わりに、電圧反射係数の各値Γ１１、Γ２１～Γｎ１は、レシピ開発中のＸキロヘルツ ＲＦ発生器１１２の動作のサイクルのセット中に出力Ｏ２で測定された複素電圧および複素電流からプロセッサ１２６によって決定される電圧反射係数の値の平均である。

【０１２７】

図４Ｃは、レシピ開発のためのまたはレシピ開発中の電圧反射係数の値Γ１１、Γ２１～Γｎ１からの負荷インピーダンス値ＺＬ１１～ＺＬｎ１の生成を例示するＲＦ経路モデル１５０の一実施形態の図である。負荷インピーダンス値ＺＬ１１～ＺＬｎ１は、負荷インピーダンス値が基板Ｓ（図１Ａ）の処理中ではなくレシピ開発中に生成されることを除いて、値Γ１１、Γ２１～Γｎ１から、図１Ｃに関して上述したのと同じ方式でプロセッサ１２６（図４Ａ）によって生成される。

【０１２８】

図４Ｄは、レシピ開発のためのまたはレシピ開発中の動作パラメータの値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１の決定を例示する一実施形態の図である。レシピ開発のためのまたはレシピ開発中の動作パラメータの値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１は、平均電力反射係数が最小化される図１Ｄ－１を参照して上述したのと同じ方式で決定される。

【０１２９】

一実施形態では、プロセッサ１２６は、レシピ開発のためのまたはレシピ開発中の動作パラメータの値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１を決定し、平均電力反射係数

と平均電圧反射係数の両方を最小化する。例えば、プロセッサ１２６は、図１Ｄ－１を参照して上述したのと同じ方式で、ＲＦ経路モデル１５０の出力での負荷インピーダンスの値ＺＬ１１～ＺＬｎ１のＲＦ経路モデル１５０の入力における電圧反射係数の値Γ１ａ～Γｎａおよび電力反射係数の値Γ１ａ^2～Γｎａ^{2}を決定する。電圧反射係数の値Γ１ａ～Γｎａおよび電力反射係数の値Γ１ａ^2～Γｎａ^{2}を決定する前に、ＲＦ経路モデル１５０は、プロセッサ１２６によって初期化され、静電容量Ｃｋｎｏｗｎ１および無線周波数ＲＦｋｎｏｗｎを有する。静電容量Ｃｋｎｏｗｎ１は、インピーダンス整合ネットワーク１１０の入力Ｉ２とインピーダンス整合ネットワーク１１０の出力との間のインピーダンス整合ネットワーク１１０の分岐部のコンデンサの静電容量であり、無線周波数ＲＦｋｎｏｗｎは、レシピ開発中にＹメガヘルツＲＦ発生器１１４が動作している値である。

【０１３０】

プロセッサ１２６は、ＲＦ経路モデル１５０の入力における電力反射係数の値Γ１ａ^2～Γｎａ^{2}の平均をさらに計算し、電力反射係数の第１の平均値ＧＡａｖｍｉｎ^{2}を生成する。また、プロセッサ１２６は、ＲＦ経路モデル１５０の入力における電圧反射係数の値Γ１ａ～Γｎａの平均を計算し、電圧反射係数の第１の平均値ＧＡａｖｍｉｎを生成する。プロセッサ１２６は、第１の平均値ＧＡａｖｍｉｎ^{2}およびＧＡａｖｍｉｎが計算される動作パラメータのｙＭＨｚａｖｆｒｅｑＡ、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎＡ、ｔｈｉｇｈＡ、ｔｌｏｗＡ、φｒｅｌａｔｉｖｅＡ、およびＣＡなどの値を決定し、ここで、ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑＡは、基板の処理中にＹメガヘルツＲＦ発生器（図４Ｅ）が動作する平均動作周波数であり、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎＡは、平均周波数の変動であり、ｔｈｉｇｈＡは、Ｙメガヘルツ発生器の電力レベルまたは電圧レベルが高レベルに留まる高滞留時間であり、ｔｌｏｗＡは、Ｙメガヘルツ発生器の電力レベルまたは電圧レベルが低レベルに留まる低滞留時間であり、φｒｅｌａｔｉｖｅＡは、基板の処理に使用されるＸキロヘルツＲＦ発生器によって出力されるＲＦ信号の位相と比較した、Ｙメガヘルツ発生器によって出力されるＲＦ信号の相対位相であり、ＣＡは、基板の処理に使用されるインピーダンス整合ネットワークの分岐部に適用される総静電容量である。インピーダンス整合ネットワークの分岐部は、Ｙメガヘルツ発生器に結合されたインピーダンス整合ネットワークの入力とインピーダンス整合ネットワークの出力との間にある。

【０１３１】

さらに、プロセッサ１２６は、図１Ｄ－１を参照して上述したのと同じ方式で、ＲＦ経路モデル１５０の出力での負荷インピーダンスの値ＺＬ１１～ＺＬｎ１のＲＦ経路モデル１５０の入力における電力反射係数の値Γ１１^2～Γｎ１^{2}および電圧反射係数の値Γ１１～Γｎ１を決定する。電力反射係数の値Γ１１^2～Γｎ１^{2}および電圧反射係数の値Γ１１～Γｎ１を決定する前に、ＲＦ経路モデル１５０は、プロセッサ１２６によって初期化され、静電容量Ｃｋｎｏｗｎ１および無線周波数ＲＦｋｎｏｗｎを有する。

【０１３２】

プロセッサ１２６は、電力反射係数の値Γ１１^2～Γｎ１^{2}の平均をさらに計算して第２の平均値Γ１ａｖｍｉｎ^{2}を生成し、また、電圧反射係数の値Γ１１～Γｎ１の平均を計算してＲＦ経路モデル１５０の入力での電圧反射係数の第２の平均値Γ１ａｖｍｉｎを生成する。プロセッサ１２６は、第２の平均値Γ１ａｖｍｉｎ^{2}およびΓ１ａｖｍｉｎが計算される動作パラメータのｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１などの値を決定し、ここで、ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１は、Ｙメガヘルツ発生器が基板を処理するために動作する平均動作周波数であり、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１は、平均周波数の変動であり、ｔｈｉｇｈ１は、Ｙメガヘルツ発生器の電力レベルまたは電圧レベルが高レベルに留まる高滞留時間であり、ｔｌｏｗ１は、Ｙメガヘルツ発生器の電力レベルまたは電圧レベルが低レベルに留まる低滞留時間であり、φｒｅｌａｔｉｖｅ１は、基板を処理するためにＸキロヘルツＲＦ発生器によって出力されるＲＦ信号の位相と比較した、Ｙメガヘルツ発生器によって出力されるＲＦ信号の相対位相であり、Ｃ１は、基板

の処理に使用されるインピーダンス整合ネットワークの分岐部に適用される総静電容量である。

【０１３３】

プロセッサ１２６は、ＲＦ経路モデル１５０の入力での電力反射係数の第２の平均値Γ１ａｖｍｉｎ^{2}がＲＦ経路モデル１５０の入力での電力反射係数の第１の平均値ＲＡａｖｍｉｎ^{2}よりも小さいまたは低いと決定し、また、ＲＦ経路モデル１５０の入力での電圧反射係数の第２の平均値Γ１ａｖｍｉｎがＲＦ経路モデル１５０の入力での電圧反射係数の第１の平均値ΓＡａｖｍｉｎよりも小さいまたは低いと決定する。決定に応じて、プロセッサ１２６は、ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑＡ、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎＡ、ｔｈｉｇｈＡ、ｔｌｏｗＡ、φｒｅｌａｔｉｖｅＡをＹメガヘルツＲＦ発生器に適用する代わりに、周波数パラメータｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１を適用することを決定し、マッチネットワークパラメータＣＡを基板の処理に使用されるインピーダンス整合ネットワークに適用する代わりに、マッチネットワークパラメータＣ１を適用することを決定する。プロセッサ１２６は、別のメモリデバイス４６８（図４Ｅ）からプロセッサ４６４（図４Ｅ）によって後でアクセスするために、メモリデバイス１２８に動作パラメータの値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１などの値を記憶する。

【０１３４】

図４Ｅは、レシピ開発中に決定される動作パラメータの値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１の適用を例示する、プラズマツールなどのシステム４５０の一実施形態の図である。動作パラメータの値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１は、プラズマチャンバ４５８での基板ＳＵの処理中に適用される。一例として、基板ＳＵの処理は、レシピ開発を実施するエンティティによって行われ、レシピ開発の後に実施される。システム４５０は、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器４５２、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器４５４、プラズマチャンバ４５８、インピーダンス整合ネットワーク４５６、コンピュータ４６３、ドライバシステム４７０、モータシステム４７２、コンパレータ４８０、および電圧センサ４８２を含む。

【０１３５】

Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器４５２は、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２（図４Ａ）のものと構造および機能が同様であり、ＲＦ電源４７４を含む。例えば、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器４５２は、４００ｋＨｚ　ＲＦ発生器である。ＲＦ電源４７４もまた、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２のＲＦ電源１２２（図４Ａ）と同様の構造および機能である。例示すると、ＲＦ電源４７４は、ＲＦ発振器である。

【０１３６】

同様に、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器４５４は、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器１１４（図４Ａ）のものと構造および機能が同様であり、ＲＦ電源４７６を含む。例えば、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器４５４は、６０ＭＨｚ　ＲＦ発生器である。ＲＦ電源４７６もまた、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器１１４のＲＦ電源１２４（図４Ａ）と同様の構造および機能である。例示すると、ＲＦ電源４７６は、ＲＦ発振器である。

【０１３７】

コンパレータ４８０は、図１Ｄ－３のコンパレータ１８４のものと構造および機能が同様である。例えば、コンパレータ４８０は、コンピュータ４６３のプロセッサ４６４の一部として実装され得る。

【０１３８】

インピーダンス整合ネットワーク４５６はまた、図４Ａのインピーダンス整合ネットワーク１１０のものと構造および機能が同様である。例えば、インピーダンス整合ネットワーク４５６の入力Ｉ２１とインピーダンス整合ネットワーク４５６の出力との間のインピ

ーダンス整合ネットワーク４５６の分岐部は、インピーダンス整合ネットワーク１１０の入力Ｉ２と出力との間の分岐部の組み合わされたインピーダンスから所定の範囲内にある組み合わされたインピーダンスを有する。一例として、本明細書で説明するように、インピーダンス整合ネットワークの分岐部の組み合わされたインピーダンスは、インピーダンス整合ネットワークの分岐部のすべての電気構成要素のインピーダンスの組み合わせまたは合計である。

【０１３９】

モータシステム４７２は、モータシステム１８６（図１Ｄ－３）のものと構造および機能が同様であり、ドライバシステム４７０もまた、ドライバシステム１８８（図１Ｄ－３）のものと構造および機能が同様である。例えば、７２のモータシステムは、１つまたは複数の電気モータを含み、７０のドライバシステムは、トランジスタのネットワークを含む。

【０１４０】

コンピュータ４６３などのコンピュータの例は、上に提供されている。コンピュータ４６３は、プロセッサ４６４と、メモリデバイス４６８とを含む。プロセッサ４６４などのプロセッサの例は、上に提供されている。メモリデバイス４６８などのメモリデバイスの例は、上に提供されている。プロセッサ４６４は、メモリデバイス４６８に結合され、ＲＦ電源４７４および４７６にも結合される。

【０１４１】

プラズマチャンバ４５８は、プラズマ励起電極４６２と、接地電位に結合された上部電極４６０とを含む。プラズマ励起電極４６２は、プラズマチャンバ１０８（図４Ａ）のプラズマ励起電極１０４のものと構造および機能が同様である。例えば、プラズマ励起電極４６２の下部電極は、アルミニウムまたはアルミニウムの合金から製作される。また、上部電極４６０は、図４Ａの上部電極１０６のものと構造および機能が同様であり、プラズマ励起電極４６２の上に載置され、上部電極４６０とプラズマ励起電極４６２との間にギャップを形成する。例えば、上部電極４６０は、アルミニウムまたはアルミニウムの合金から製作される。

【０１４２】

Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器４５２のＲＦ電源４７４は、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器４５２の出力Ｏ１１およびＲＦケーブルＲＦＣ１１を介して、インピーダンス整合ネットワーク４５６の入力Ｉ１１に結合される。同様の方式で、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器４５４のＲＦ電源４７６は、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器４５４の出力Ｏ２１およびＲＦケーブルＲＦＣ２１を介して、インピーダンス整合ネットワーク４５６の入力Ｉ２１に結合される。

【０１４３】

インピーダンス整合ネットワーク４５６の出力は、ＲＦ伝送ラインＲＦＴ１１を介して、プラズマ励起電極４６２の下部電極に結合される。プロセッサ４６４は、ドライバシステム４７０およびコンパレータ４８０に結合される。駆動システム４７０は、モータシステム４７２に結合され、モータシステム４７２は、１つまたは複数の接続構成要素を介してインピーダンス整合ネットワーク４５６に接続され、その例は上に提供されている。電圧センサ４８２は、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器４５２の出力Ｏ１１に結合され、コンパレータ４８０に結合される。

【０１４４】

Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器４５２のＲＦ電源４７４は、１つまたは複数のサイクルのＲＦ信号４８４を生成し、ＲＦ信号４８４を、出力Ｏ１１およびＲＦケーブルＲＦＣ１１を介して、インピーダンス整合ネットワーク４５６の入力Ｉ１１に供給する。電圧センサ４８２は、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器４５２の出力Ｏ１１でＲＦ信号４８４の電圧を測定する。コンパレータ４８０は、電圧センサ４８２によって測定された電圧をゼロの値と比較して、比較結果を出力し、比較結果をプロセッサ４６４に提供する。比較結果は、電圧がゼロよりも上か下か、またはゼロかどうか、例えば、電圧が正か負かゼロかを提供する。プロセッサ４６４は、比較結果から、電圧がゼロであり、負から正になりそうな複数の時間ま

たはインスタンスを決定する。プロセッサ４６４によって決定される時間またはインスタンスに基づいて、ＲＦ信号４８４の位相は、プロセッサ４６４によって決定される。

【０１４５】

コンピュータ４６３は、図４Ａのコンピュータ１１８から動作パラメータの値を受信する。例えば、動作パラメータの値は、コンピュータ１１８のプロセッサ１２６から、インターネットまたはイントラネットまたはそれらの組み合わせなどのコンピュータネットワークを介して、コンピュータ４６３のプロセッサ４６４によって受信される。プロセッサ４６４は、コンピュータ４６３のメモリデバイス４６８に動作パラメータの値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１、およびＣ１などの値を記憶する。

【０１４６】

さらに、プロセッサ４６４は、周波数パラメータの値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、φｒｅｌａｔｉｖｅ１をＲＦ電源４７６に提供する。相対位相φｒｅｌａｔｉｖｅ１は、基板ＳＵの処理中に決定されるＲＦ信号４８４の位相からプロセッサ４６４によって決定される。周波数パラメータを受信すると、ＲＦ電源４７６は、値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、およびφｒｅｌａｔｉｖｅ１を有するＲＦ信号４８６を生成する。例えば、ＲＦ信号４８６は、台形形状またはパルス形状または方形波形状または正弦波形状であるエンベロープまたはピークツーピーク振幅を有する。ＲＦ信号４８６は、それ自体が正弦波信号または実質的に正弦波信号である。ＲＦ信号４８６は、ＲＦ電源４７６によって、出力Ｏ２１およびＲＦケーブルＲＦＣ２１を介して、インピーダンス整合ネットワーク４５６の入力Ｉ２１に供給される。ＲＦ信号４８６は、ＲＦ信号４８４の１つまたは複数のサイクルの間に生成される。

【０１４７】

さらに、プロセッサ４６４は、命令信号を生成し、命令信号をドライバシステム４７０に送信する。命令信号の一例は、インピーダンス整合ネットワーク４５６の入力Ｉ２１と出力との間の分岐部の組み合わされた静電容量を達成するようにモータシステム４７２を制御するために、ドライバシステム４７０によって出力される１つまたは複数の量の電流を含むものである。命令信号を受信すると、ドライバシステム４７０は、１つまたは複数の電流信号を生成し、電流信号をモータシステム４７２に送信する。

【０１４８】

モータシステム４７２は、１つまたは複数の電流信号に従って動作し、インピーダンス整合ネットワーク４５６の静電容量Ｃ１を達成するために、インピーダンス整合ネットワーク４５６の１つまたは複数の可変コンデンサを制御する。例えば、モータシステム４７２のモータは、インピーダンス整合ネットワーク４５６内のコンデンサのプレートを直線方向に回転または移動させ、コンデンサのプレートと別のプレートとの間の面積または距離を変更してコンデンサの静電容量を変更し、インピーダンス整合ネットワーク４５６の静電容量Ｃ１を達成するように動作する。

【０１４９】

静電容量Ｃ１を有するインピーダンス整合ネットワーク４５６は、ＲＦ信号４８４および４８６を受信し、ＲＦ信号１３０および１３２（図４Ａ）に関して上述の方式でＲＦ信号４８４および４８６を処理して修正されたＲＦ信号４８８を出力する。例えば、インピーダンス整合ネットワーク４５６は、インピーダンス整合ネットワーク４５６の出力に結合された負荷のインピーダンスを、インピーダンス整合ネットワーク４５６の入力Ｉ１１およびＩ２１に結合されたソースのインピーダンスと整合させ、修正されたＲＦ信号４８８を出力する。インピーダンス整合ネットワーク４５６の出力に結合された負荷の一例には、プラズマチャンバ４５８およびＲＦ伝送ラインＲＦＴ１１が挙げられる。入力Ｉ１１およびＩ２１に結合されたソースの一例には、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器４５２、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器４５４、ならびにＲＦケーブルＲＦＣ１１およびＲＦＣ２１が挙げられる。

【０１５０】

プラズマ励起電極４６２の下部電極は、インピーダンス整合ネットワーク４５６の出力から、ＲＦ伝送ラインＲＦＴ１１を介して修正されたＲＦ信号４８８を受信する。修正されたＲＦ信号４８８を受信することに加えて、１つまたは複数のプロセスガスがプラズマチャンバ４５８によって受信され、プラズマチャンバ４５８内でプラズマを衝突または維持する。プラズマは、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器４５２の動作の１つまたは複数のサイクルの間、基板ＳＵの処理を容易にする。

【０１５１】

一実施形態では、図４Ｅを参照して本明細書で説明される方法は、プラズマチャンバ４５８内で多くの基板を処理するために使用されるか、またはシステム４５０と構造および機能が同様である異なるシステムに使用される。

【０１５２】

一実施形態では、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器の平均周波数の代わりに、ベースライン周波数が使用または決定される。ベースライン周波数の例には、平均周波数および中央値周波数が挙げられる。

【０１５３】

一実施形態では、基板ＳＵの処理中、プロセッサ１２６は、レシピ開発中に決定する周波数パラメータを、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器４５４のベースライン周波数に適用し続ける。例えば、基板Ｓの処理中、値ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、およびφｒｅｌａｔｉｖｅ１は、プロセッサ１２６によってＹメガヘルツ ＲＦ発生器４５４の平均動作周波数に適用される。例示すると、プロセッサ１２６は、値ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、およびｔｌｏｗ１によって基板ＳＵの処理中のＹ ＭＨｚ ＲＦ発生器４５４の平均周波数を修正しながら、Ｙ ＭＨｚ ＲＦ発生器４５４によって生成されたＲＦ信号４８６とＸ ＭＨｚ ＲＦ発生器４５２によって生成されたＲＦ信号４８４との間でφｒｅｌａｔｉｖｅ１の相対位相を達成する。

【０１５４】

実施形態では、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器４５４のベースライン周波数は、多くの方法のうちの１つを適用することによって、プロセッサ４６４によって決定される。例えば、複素電圧および複素電流センサなどのセンサは、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器４５４の出力Ｏ２１に結合される。センサはまた、プロセッサ４６４に結合される。プロセッサ４６４に結合されたセンサは、複素電圧および複素電流を測定し、複素電圧および複素電流をプロセッサ４６４に提供する。プロセッサ４６４は、複素電圧および複素電流から、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器４５４の基本動作周波数でＹメガヘルツ ＲＦ発生器４５４に向かって反射される平均電力、側波帯を含む、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器４５２およびＹメガヘルツ ＲＦ発生器４５４の基本周波数でＹメガヘルツ ＲＦ発生器４５４に向かって反射される平均電力、側波帯のない、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器４５２およびＹメガヘルツ ＲＦ発生器４５４の基本周波数でＹメガヘルツ ＲＦ発生器４５４に向かって反射される平均電力、平均電力反射係数、ならびに平均電力反射係数および平均電圧反射係数などの電力ベースのパラメータを計算または決定する。側波帯は、例えば、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器４５２およびＹメガヘルツ ＲＦ発生器４５４の基本周波数に関連する、例えば、そこから生成される、それに基づくなどの高調波周波数を含む。一例として、プロセッサ４５４は、メモリデバイス４６８に記憶されたルックアップテーブルにアクセスし、プロセッサ４５４に結合されたセンサによって測定された複素電圧および複素電流から電力ベースのパラメータを決定する。

【０１５５】

実施形態を続けると、プロセッサ４６４は、センサから受信された決定された電力ベースのパラメータの１つまたは複数の値が、メモリデバイス４６８に記憶された電力ベースのパラメータ値から事前設定された範囲内にあるかどうかを決定する。決定された電力ベースのパラメータの１つまたは複数の値が、メモリデバイス４６８に記憶された電力ベースのパラメータ値からの事前設定された範囲内にないと決定すると、プロセッサ４６４は、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器４５４の動作周波数を変更する。プロセッサ４６４は、センサ

から受信された決定された電力ベースのパラメータの１つまたは複数の値が、メモリデバイス４６８に記憶された電力ベースのパラメータ値から事前設定された範囲内に入るまで、ＹメガヘルツＲＦ発生器４５４の動作周波数を変更し続ける。プロセッサ４６４は、センサから受信された決定された電力ベースのパラメータの１つまたは複数の値が、メモリデバイス４６８に記憶された電力ベースのパラメータ値から事前設定された範囲内にある、ＹメガヘルツＲＦ発生器４５４の動作周波数の値の平均を決定し、ベースライン周波数を決定する。別の例として、ＹメガヘルツＲＦ発生器４５４の動作周波数の値の平均の代わりに、ＹメガヘルツＲＦ発生器４５４の動作周波数の値の中央値は、ベースライン周波数であるとプロセッサ４６８によって決定される。電力ベースのパラメータに基づく平均周波数の決定は、あるプラズマツールから別のプラズマツールへの、例えば、あるプラズマツールのＲＦ発生器から別のプラズマツールのＲＦ発生器へのベースライン周波数の変動を可能にする。プラズマツールのＲＦ発生器は、別のプラズマツールのＲＦ発生器とは異なるベースライン周波数で動作する。値ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１、ｔｈｉｇｈ１、ｔｌｏｗ１、およびφｒｅｌａｔｉｖｅ１をプラズマツールのＲＦ発生器の異なるベースライン周波数に適用すると、ベースライン周波数におけるツール間の変動が可能になる。

【０１５６】

図５Ａは、レシピ開発中のプロセッサ１２６による電圧反射係数の値Γ１１、Γ２１～Γｎ１の生成を例示する、プラズマツールなどのシステム５００の一実施形態の図である。システム５００は、システム５００において、値Γ１１、Γ２１～Γｎ１が、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器１１２によって出力されるＲＦ信号１３０のサイクルの期間の各ビンまたはセグメントまたは部分に対して決定されることを除いて、システム１００（図１Ａ）またはシステム４００（図４Ａ）と同じである。システム５００は、システム５００において、値Γｎ１がＲＦ信号１３０のサイクルの第ｎのビンの間にセンサ１３１および高速データ取得デバイス１２３によって測定された複素電圧および複素電流の値から生成されるまで、値Γ１１がＲＦ信号１３０のサイクルの第１のビンの間にセンサ１３１および高速データ取得デバイス１２３によって測定された複素電圧および複素電流の値から生成され、値Γ１２がＲＦ信号１３０のサイクルの第２のビンの間にセンサ１３１および高速データ取得デバイス１２３によって測定された複素電圧および複素電流の値から生成され、以下同様であることを除いて、システム１００またはシステム４００と同じ構造および同じ機能を有する。第ｎのビンがＲＦ信号１３０のサイクルの第（ｎ－１）のビンに連続するまで、第２のビンは第１のビンに連続し、ＲＦ信号１３０のサイクルの第３のビンは第２のビンに連続し、以下同様である。一例として、０～０．１マイクロ秒のＲＦ信号１４２（図１Ｂ－２）の時間セグメントは、第１のビンの一例であり、０．１マイクロ秒～０．２マイクロ秒のＲＦ信号１４２の時間セグメントは、第２のビンの一例であり、０．２マイクロ秒～０．３マイクロ秒のＲＦ信号１４２の時間セグメントは、第３のビンの一例であり、０．（ｎ－１）マイクロ秒～０．ｎマイクロ秒のＲＦ信号１４２の時間セグメントは、第ｎのビンの一例である。システム５００は、システム５００において、ダミー基板４０２が使用され、値Γ１１、Γ２１～Γｎ１がＲＦ信号１３０のサイクルのビンに対して生成されることを除いて、システム１００または４００と同様に動作する。システム５００では、基板Ｓの処理はない。

【０１５７】

図５Ｂは、レシピ開発のためにプロセッサ１２６（図５Ａ）によって生成される表５１０の一実施形態の図である。表５１０は、表において、値Γ１１、Γ２１～Γｎ１の各々がＲＦ信号１３０（図５Ａ）のサイクルの異なるビンに対応することを除いて、図１Ｂ－１または図４Ｂの表１３０と同じである。例えば、値Γ１１は、ＲＦ信号１３０のサイクルのビン１、例えば、第１のビンの間に測定される複素電圧および複素電流の値からプロセッサ１２６によって決定され、値Γ２１は、ＲＦ信号１３０のサイクルのビン２、例えば、第２のビンの間に測定される複素電圧および複素電流の値に基づいてプロセッサ１２６によって決定される。表５１０は、プロセッサ１２６によってメモリデバイス１２８（

図５Ａ）に記憶される。

【０１５８】

一実施形態では、電圧反射係数の各値Γ１１、Γ２１～Γｎ１は、ＲＦ信号１３０の複数のサイクルにわたって対応するビンについてプロセッサ１２６によって計算される平均である。例えば、値Γ１１は、電圧反射係数の複数の値の平均であり、複数の値の各々は、ＲＦ信号１３０の対応する各サイクルのビン１についてプロセッサ１２６によって決定される。例示すると、値Γ１１は、第１の値および第２の値の平均である。第１の値は、ＲＦ信号１３０の第１のサイクルのビン１の間にセンサ１３１および高速データ取得デバイス１２３（図５Ａ）によって測定される複素電圧および複素電流の値に基づいて、プロセッサ１２６によって計算される。同様に、第２の値は、ＲＦ信号１３０の第２のサイクルのビン１の間にセンサ１３１および高速データ取得デバイス１２３によって測定される複素電圧および複素電流の値に基づいて、プロセッサ１２６によって計算される。第２のサイクルは、第１のサイクルに連続している。第１および第２のサイクルの各々は、プロセッサ１２６によって、１からｎまでのｎ個のビンに分割される。

【０１５９】

図５Ｃは、レシピ開発中の電圧反射係数の値Γ１１、Γ２１～Γｎ１からのＲＦ信号１３０（図５Ａ）のサイクルの各ビンに対する負荷インピーダンス値ＺＬ１１～ＺＬｎ１の生成を例示するＲＦ経路モデル１５０の一実施形態の図である。例えば、ビンｎに対する負荷インピーダンス値ＺＬｎ１が値Γｎ１からプロセッサ１２６によって決定されるまで、ビン１に対する負荷インピーダンス値ＺＬ１１は、値Γ１１からプロセッサ１２６によって決定され、ビン２に対する負荷インピーダンス値ＺＬ２１は、値Γ２１からプロセッサ１２６によって決定され、以下同様である。ＲＦ信号１３０のサイクルの各ビンに対する負荷インピーダンス値ＺＬ１１～ＺＬｎ１は、図１Ｃに関して上述したのと同じ方式で、電圧反射係数の値Γ１１、Γ２１～Γｎ１から決定されることに留意されたい。

【０１６０】

一実施形態では、電圧反射係数の値Γ１１、Γ２１～Γｎ１の代わりに、複素電圧および複素電流の測定値は、プロセッサ１２６によって適用され、ＲＦ信号１３０のサイクルの各ビンに対する負荷インピーダンス値ＺＬ１１～ＺＬｎ１を決定する。

【０１６１】

図５Ｄは、ＲＦ信号１３０（図５Ａ）のサイクル１３０のビンに対する電力反射係数の値がレシピ開発中に最小化される動作パラメータの値の決定を例示するＲＦ経路モデル１５０の一実施形態の図である。プロセッサ１２６（図５Ａ）に提供される動作パラメータの所定の波形または初期値は、存在しない。例えば、Ｙ　ＭＨｚ　ＲＦ発生器１１４から出力されるＲＦ信号１３２の周期波形のタイプは、ＲＦ経路モデル１５０に提供されない。

【０１６２】

各ビンに対する動作パラメータの値は、負荷インピーダンスの値がＲＦ経路モデル１５０の出力に適用されるときにＲＦ経路モデル１５０の入力での電力反射係数の値が最小化されるプロセッサ１２６によって決定される。例えば、ＲＦ経路モデル１５０は、静電容量Ｃｋｎｏｗｎ１および無線周波数ＲＦｋｎｏｗｎを有するように初期化される。静電容量Ｃｋｎｏｗｎ１は、インピーダンス整合ネットワーク１１０の入力Ｉ２と出力の間のインピーダンス整合ネットワーク１１０の分岐部の回路構成要素のコンデンサの静電容量であり、無線周波数ＲＦｋｎｏｗｎは、レシピ開発中に動作しているＹメガヘルツＲＦ発生器１１４での値である。ＲＦ経路モデル１５０の出力での負荷インピーダンスの値ＺＬ１１は、ＲＦ経路モデル１５０の回路要素を介して逆伝播され、ＲＦ経路モデル１５０の入力での負荷インピーダンスの値ＺＬ１ａを決定する。プロセッサ１２６は、値ＺＬ１１と、ＲＦ経路モデル１５０の回路要素のインピーダンスの値の方向和を計算して値ＺＬ１ａを決定する。

【０１６３】

例を続けると、プロセッサ１２６は、ＲＦ経路モデル１５０の入力での負荷インピーダンスの値ＺＬ１ａから、ＲＦ経路モデル１５０の入力での電力反射係数の値$\Gamma 1a^2$を計算

する。例えば、プロセッサ１２６は、メモリデバイス１２６から、電圧反射係数の値Γ１ａと負荷インピーダンスの値ＺＬ１ａとの間のマッピングまたはリンクなどの対応にアクセスし、電圧反射係数の値Γ１ａを識別または決定する。

【０１６４】

例をさらに続けると、プロセッサ１２６は、ＲＦ経路モデル１５０の入力での電圧反射係数の値Γ１ａの二乗を計算し、ＲＦ経路モデル１５０の入力での電力反射係数の値$\Gamma 1a^2$を決定する。プロセッサ１２６は、ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１ＡおよびｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１Ａなどの値、ならびに電力反射係数の値$\Gamma 1a^2$が計算される動作パラメータのＣ１Ａを決定し、ここで、ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１Ａは、Ｘ　ＫＨｚ　ＲＦ発生器４５２（図５Ｅ）から出力されるＲＦ信号のサイクルのビン１の間にＹメガヘルツＲＦ発生器４５４（図５Ｅ）が動作する平均動作周波数であり、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１Ａは、ビン１の間の平均周波数ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１Ａの変動であり、Ｃ１Ａは、インピーダンス整合ネットワーク４５６（図５Ｅ）の入力Ｉ２１と出力との間の分岐部に適用される総静電容量である。

【０１６５】

動作パラメータのｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１Ａ、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１Ａ、およびＣ１Ａなどの値の決定を例示すると、プロセッサ１２６は、動作パラメータの値をＲＦ経路モデル１５０に提供する。値をＲＦ経路モデル１５０に提供することによって、プロセッサ１２６は、値をＲＦ経路モデル１５０に利用可能にする。ＲＦ経路モデル１５０がプロセッサ１２６から動作パラメータの値を受信し、その値によって特徴付けられると、プロセッサ１２６は、ＲＦ経路モデル１５０の出力での負荷インピーダンスの値ＺＬ１１を逆伝播し、ＲＦ経路モデル１５０の入力での電圧反射係数の値Γ１ａを決定する。プロセッサ１２６は、メモリデバイス１２６から動作パラメータの値にアクセスして値を利用可能にし、例えば、電圧反射係数の値Γ１ａが決定されるＲＦ経路モデル１５０にその値を提供する。

【０１６６】

例を続けると、ＲＦ経路モデル１５０の出力での負荷インピーダンスの値ＺＬ１１は、ＲＦ経路モデル１５０の回路要素を介してプロセッサ１２６によって逆伝播され、ＲＦ経路モデル１５０の入力での負荷インピーダンスの値ＺＬ１ｘを決定する。プロセッサ１２６は、値ＺＬ１１と、ＲＦ経路モデルの回路要素のインピーダンスの値の方向和を計算し、値ＺＬ１ｘを決定する。

【０１６７】

例を続けると、プロセッサ１２６は、ＲＦ経路モデル１５０の入力での負荷インピーダンスの値ＺＬ１ｘから、ＲＦ経路モデル１５０の入力での電力反射係数の値$\Gamma 11^2$を計算する。例えば、プロセッサ１２６は、メモリデバイス１２６から、電圧反射係数の値Γ１１と負荷インピーダンスの値ＺＬ１ｘとの間のマッピングまたはリンクなどの対応にアクセスし、電圧反射係数の値Γ１１を識別または決定する。

【０１６８】

例をさらに続けると、プロセッサ１２６は、ＲＦ経路モデル１５０の入力での電圧反射係数の値Γ１１の二乗を計算し、ＲＦ経路モデル１５０の入力での電力反射係数の値$\Gamma 11^2$を決定する。プロセッサ１２６は、電力反射係数の値$\Gamma 11^2$が計算される動作パラメータのｙＭＨｚａｖｆｒｅｑｎ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ１、およびＣｎ１などの値を決定し、ここで、ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑｎ１は、Ｙメガヘルツ ＲＦ発生器４５４（図５Ｅ）が動作する平均動作周波数であり、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ１は、平均周波数の変動であり、Ｃｎ１は、インピーダンス整合ネットワーク４５６（図５Ｅ）の入力Ｉ２１と出力との間の分岐部に適用される総静電容量である。

【０１６９】

動作パラメータのｙＭＨｚａｖｆｒｅｑｎ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ１、およびＣｎ１などの値の決定を例示すると、プロセッサ１２６は、動作パラメータの値をＲＦ経路モデル１５０に提供する。値をＲＦ経路モデル１５０に提供することによっ

て、プロセッサ１２６は、値をＲＦ経路モデル１５０に利用可能にする。ＲＦ経路モデル１５０がプロセッサ１２６から動作パラメータの値を受信し、その値によって特徴付けられると、プロセッサ１２６は、ＲＦ経路モデル１５０の出力での負荷インピーダンスの値ＺＬ１１を逆伝播し、ＲＦ経路モデル１５０の入力での電圧反射係数の値Γ１１を決定する。プロセッサ１２６は、メモリデバイス１２６から動作パラメータの値にアクセスして値を利用可能にし、例えば、電圧反射係数の値Γ１１が決定されるＲＦ経路モデル１５０にその値を提供する。

【０１７０】

プロセッサ１２６は、ＲＦ経路モデル１５０の入力での電力反射係数の値$\Gamma 11^2$が、ビン１に対するＲＦ経路モデル１５０の入力での電力反射係数の値$\Gamma 1a^2$よりも小さいまたは低いと決定する。決定に応じて、プロセッサ１２６は、周波数パラメータｙＭＨｚａｖｆｒｅｑ１ＡおよびｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎ１ＡをＹメガヘルツＲＦ発生器４５４（図５Ｅ）に適用する代わりに、周波数パラメータｙＭＨｚａｖｆｒｅｑｎ１およびｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ１を適用することを決定し、マッチネットワークパラメータＣ１Ａをインピーダンス整合ネットワーク４５６（図５Ｅ）に適用する代わりに、マッチネットワークパラメータＣｎ１を適用することを決定する。

【０１７１】

同様の方式で、動作パラメータの値ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ２およびＣｎ１は、ビン２について、プロセッサ１２６が値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑｎ２を、ビン１に対して計算された値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑｎ１と値ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ１の方向和であると決定することを除いて、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器４５２（図５Ｅ）によって生成されるＲＦ信号４８４（図５Ｅ）のビン２に対してプロセッサ１２６によって決定される。また、ビン２の場合、プロセッサ１２６は、ＲＦ経路モデル１５０を開始し、値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑｎ２になるようにする。また、同様に、値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑｎｎ、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎｎ、およびＣｎ１は、Ｘキロヘルツ ＲＦ発生器４５２（図５Ｅ）によって生成されるＲＦ信号４８４のビンｎに対してプロセッサ１２６によって決定される。プロセッサ１２６は、メモリデバイス１２８にビン１～ｎの動作パラメータの値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑｎ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ２、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎｎ、およびＣｎ１などの値を記憶する。

【０１７２】

一実施形態では、ＲＦ経路モデル１５０のマッチネットワークパラメータの値Ｃｎ１は、ビン１～ｎについてのＲＦ経路モデル１５０の周波数パラメータの値を決定した後に決定される。例えば、プロセッサ１２６は、プロセッサ１２６が値Ｃｎ１およびＣ１Ａを決定しないことを除いて、図５Ｄを参照して上述したのと同様の方式で、値ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎｎまで値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑｎ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ１、およびｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ２などを決定する。値ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎｎまで値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑｎ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ２などが決定された後、プロセッサ１２６は、ＲＦ経路モデル１５０の入力での電力反射係数の値の平均が最小になる値Ｃｎ１を決定する。例示すると、プロセッサ１２６は、ＲＦ経路モデル１５０の入力における電力反射係数の値$\Gamma 1a^2$、$\Gamma 2a^2$、およびΓna^2の第１の平均を計算してＲＦ経路モデル１５０が第１の平均を達成するための値Ｃ１Ａを有すると決定し、ＲＦ経路モデル１５０の入力での電力反射係数の値$\Gamma 11^2$、$\Gamma 21^2$、および$\Gamma n1^2$の第２の平均値$\Gamma 1avmin^2$を計算してＲＦ経路モデル１５０が第２の平均値$\Gamma 1avmin^2$を達成するための値Ｃｎ１を有すると決定する。プロセッサ１２６は、第２の平均値$\Gamma 1avmin^2$が第１の平均よりも低いとさらに決定する。第２の平均値$\Gamma 1avmin^2$が第１の平均よりも低いと決定すると、プロセッサ１２６は、第２の平均値$\Gamma 1avmin^2$が計算されるマッチネットワークパラメータの値Ｃｎ１が図５Ｅのインピーダンス整合ネットワーク４５６に適用されることを決定する。プロセッサ１２６は、メモリデバイス

１２８（図５Ａ）に動作パラメータの値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑｎ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ２、およびｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎｎ、ならびに値Ｃｎ１を記憶する。

【０１７３】

図５Ｅは、基板ＳＵの処理中の値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑｎ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ２、およびｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎｎ、ならびに値Ｃｎ１の使用を例示するシステム４５０の一実施形態の図である。システム４５０では、コンピュータ４６３は、図５Ａのコンピュータ１１８から動作パラメータの値を受信する。例えば、動作パラメータの値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑｎ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ２、およびｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎｎ、および値Ｃｎ１は、コンピュータネットワークを介してコンピュータ１１８のプロセッサ１２６からコンピュータ４６３のプロセッサ４６４によって受信される。プロセッサ４６４は、コンピュータ４６３のメモリデバイス４６８に動作パラメータの値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑｎ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ１、ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ２、およびｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎｎ、ならびに値Ｃｎ１などの値を記憶する。

【０１７４】

プラズマチャンバ４５８内で基板ＳＵを処理している間、プロセッサ４６４は、ＲＦ信号４８４の位相が、ＲＦ信号４８４がゼロ交差を横切って、負の電圧または電力値から正の電圧または電力値を達成するようなものであると決定することに応じて、ＲＦ信号４８４のビン１に対する周波数パラメータの値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑｎ１およびｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ１をＲＦ電源４７６に送信する。値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑｎ１およびｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ１を受信すると、ＲＦ電源４７６は、ＲＦ信号４８４の第１のサイクルのビン１の期間中、値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑｎ１およびｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ１の方向和である周波数を有するＲＦ信号５５０を生成する。

【０１７５】

プロセッサ４６４は、ＲＦ信号４８４の第１のサイクルのビン２の期間が開始されようとしていると決定する。そのように決定すると、プロセッサ４６４は、メモリデバイス４６８から値ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ２にアクセスし、値ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ２をＲＦ電源４７６に提供する。ＲＦ信号４８４の第１のサイクルのビン２の期間中、ＲＦ電源４７６は、周波数パラメータの平均値と値ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ２の方向和を有するＲＦ信号５５０を出力する。ＲＦ信号４８４のビン２に対する周波数パラメータの平均値は、値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑｎ１とｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ１の方向和である。同様の方式で、プロセッサ４６４は、ＲＦ信号５５０を出力するためにＸキロヘルツＲＦ発生器４５２によって生成されたＲＦ信号４８４の第１のサイクルの残りのビンの間、３～ｎの残りのビンに対する周波数パラメータの残りの値をＲＦ電源４７６に提供する。

【０１７６】

ＲＦ信号４８４の次のサイクルの間、次の各サイクルのビン１～ｎの周波数パラメータは、第１のサイクルのビン１～ｎの間の周波数パラメータと同じである。例えば、ＲＦ信号５５０は、ＲＦ信号４８４の第２のサイクルのビン１の間、値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑｎ１およびｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ１を有する。ＲＦ信号５５０は、周波数パラメータの平均値と、ＲＦ信号４８４の第２のサイクルのビン２の間の値ｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ２の方向和を有する。ＲＦ信号４８４の第２のサイクルのビン２の周波数パラメータの平均値は、値ｙＭＨｚａｖｆｒｅｑｎ１とｙＭＨｚｆｒｅｑｖａｒｉａｔｉｏｎｎ１の方向和である。

【０１７７】

さらに、プロセッサ４６４は、図４Ｅを参照して上述したのと同じ方式でモータシステム４７２を制御することによって、インピーダンス整合ネットワーク４５６の入力Ｉ２１

と出力との間の分岐部の組み合わされた静電容量を制御する。例えば、プロセッサ４６４は、ドライバシステム４７０およびモータシステム４７２を介してインピーダンス整合ネットワーク４５６の１つまたは複数のコンデンサを制御し、基板ＳＵの処理中にインピーダンス整合ネットワーク４５６の入力Ｉ２１と出力との間の分岐部の静電容量Ｃｎ１を達成する。

【０１７８】

ＲＦ電源４７６は、ＲＦ信号５５０を、ＹメガヘルツＲＦ発生器４５４の出力Ｏ２１およびＲＦケーブルＲＦＣ２１を介して、組み合わされた静電容量Ｃｎ１を有するインピーダンス整合ネットワーク４５６の入力Ｉ２１に供給する。ＲＦ信号４８４および５５０を受信すると、インピーダンス整合ネットワーク４５６は、インピーダンス整合ネットワーク４５６の出力に結合された負荷のインピーダンスを、インピーダンス整合ネットワーク４５６の入力Ｉ１１およびＩ２１に結合されたソースのインピーダンスと整合させ、インピーダンス整合ネットワーク４５６の出力で修正されたＲＦ信号５５２を出力する。プラズマチャンバ４５８の下部電極が修正されたＲＦ信号５５２を受信し、１つまたは複数のプロセスガスがプラズマチャンバ４５８のプラズマ励起電極４６２の上部電極４６０と下部電極との間のギャップに供給されると、プラズマは、プラズマチャンバ４５８内で衝突または維持され、プラズマチャンバ４５８内の基板ＳＵを処理する。

【０１７９】

一実施形態では、本明細書で使用される方向和は、ベクトル和である。

【０１８０】

一実施形態では、図５Ｅを参照して本明細書で説明される方法は、プラズマチャンバ４５８内で多くの基板を処理するために使用されるか、またはシステム４５０と構造および機能が同様である異なるシステムに使用される。

【０１８１】

一実施形態では、ＲＦ信号をプラズマ励起電極４６２の下部電極に適用し、上部電極４６０を接地電位に結合する代わりに、ＲＦ信号が上部電極４６０に適用され、プラズマ励起電極４６２の下部電極が接地電位に結合されることに留意されたい。

【０１８２】

本明細書に記載の実施形態は、ハンドヘルド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またはプログラム可能な家庭用電化製品、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で実践することができる。本明細書に記載の実施形態は、コンピュータネットワークを介してリンクされたリモート処理ハードウェアユニットによってタスクが実施される分散コンピューティング環境でも実践することができる。

【０１８３】

いくつかの実施態様では、コントローラは、上述の例の一部であり得るシステムの一部である。そのようなシステムは、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、および／または特定の処理構成要素（ウエハ台座、ガス流システムなど）を含む半導体処理装置を含む。これらのシステムは、半導体ウエハまたは基板の処理前、処理中、および処理後の動作を制御するための電子機器と一体化される。そのような電子機器は「コントローラ」と呼ばれることがあり、システムの様々な構成要素または副部品を制御してもよい。コントローラは、処理要件および／またはシステムのタイプに応じて、本明細書に開示されるプロセスのいずれかを制御するようにプログラムされる。そのようなプロセスとしては、処理ガスの送給、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、ＲＦ発生器設定、ＲＦ整合回路設定、周波数設定、流量設定、流体送給設定、位置および動作設定、ツールに対するウエハの搬入と搬出、ならびに、システムに接続または連動する他の搬送ツールおよび／またはロードロックに対するウエハの搬入と搬出が含まれる。

【０１８４】

広義には、様々な実施形態において、コントローラは、命令を受信し、命令を発行し、

動作を制御し、洗浄動作を可能にし、エンドポイント測定を可能にするなどの様々な集積回路、論理、メモリ、および／またはソフトウェアを有する電子機器として定義される。集積回路は、プログラム命令を記憶するファームウェアの形式のチップ、デジタル信号プロセッサ（ＤＳＰ）、ＡＳＩＣとして定義されたチップ、ＰＬＤ、および／または１つまたは複数のマイクロプロセッサ、すなわちプログラム命令（例えば、ソフトウェア）を実行するマイクロコントローラを含む。プログラム命令は、様々な個々の設定（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る命令であって、プロセスを半導体ウエハ上で、または半導体ウエハ用に実施するための動作パラメータを定義する。動作パラメータは、いくつかの実施形態では、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／またはウエハダイの製作における１つまたは複数の処理ステップを実現するためプロセスエンジニアによって定義されるレシピの一部である。

【０１８５】

コントローラは、いくつかの実施態様では、システムと統合または結合されるか、他の方法でシステムにネットワーク接続されるコンピュータの一部であり、またはそのようなコンピュータに結合され、またはそれらの組み合わせである。例えば、コントローラは、「クラウド」内にあってもよいし、ファブホストコンピュータシステムのすべてもしくは一部である。これにより、ウエハ処理のリモートアクセスが可能となる。コンピュータは、システムへのリモートアクセスを可能にして、製作動作の現在の進捗状況を監視し、過去の製作動作の履歴を検討し、複数の製作動作から傾向または性能基準を検討し、現在の処理のパラメータを変更し、現在の処理に続く処理ステップを設定するか、または新しいプロセスを開始してもよい。

【０１８６】

いくつかの例では、リモートコンピュータ（例えば、サーバ）は、ネットワークを通じてプロセスレシピをシステムに提供する。そのようなネットワークは、ローカルネットワークまたはインターネットを含む。リモートコンピュータは、パラメータおよび／または設定のエントリ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、そのようなパラメータおよび／または設定は、その後リモートコンピュータからシステムに通信される。いくつかの例では、コントローラは、ウエハを処理するための設定の形式で命令を受信する。設定は、ウエハ上で実施されるプロセスのタイプ、およびコントローラがインターフェースまたは制御するツールのタイプに固有であることを理解されたい。したがって、上述したように、コントローラは、例えば、互いにネットワーク接続され共通の目的（本明細書で説明される実行プロセスなど）に向けて協働する１つまたは複数の個別のコントローラを含むことによって分散される。このような目的のための分散型コントローラの例として、チャンバ上の１つまたは複数の集積回路であって、（例えば、プラットフォームレベルで、またはリモートコンピュータの一部として）遠隔配置されておりチャンバにおけるプロセスを制御するよう組み合わせられる１つまたは複数の集積回路と通信するものが挙げられる。

【０１８７】

様々な実施形態において、システムは、プラズマエッチングチャンバ、堆積チャンバ、スピンリンスチャンバ、金属めっきチャンバ、洗浄チャンバ、ベベルエッジエッチングチャンバ、物理気相堆積（ＰＶＤ）チャンバ、化学気相堆積（ＣＶＤ）チャンバ、原子層堆積（ＡＬＤ）チャンバ、原子層エッチング（ＡＬＥ）チャンバ、イオン注入チャンバ、追跡チャンバ、ならびに半導体ウエハの製作および／または製造に関連するか使用される任意の他の半導体処理システムを含むが、これらに限定されない。

【０１８８】

上述の動作は、平行プレートプラズマチャンバ、例えば、容量結合プラズマチャンバなどを参照して説明されているが、いくつかの実施形態では、上述の動作は、他のタイプのプラズマチャンバ、例えば、誘導結合プラズマ（ＩＣＰ）リアクタを含むプラズマチャンバ、トランス結合プラズマ（ＴＣＰ）リアクタ、導体ツール、誘電体ツール、電子サイク

ロトロン共鳴（ＥＣＲ）リアクタを含むプラズマチャンバなどに適用されることにさらに留意されたい。例えば、Ｘ　ＭＨｚ　ＲＦ発生器、Ｙ　ＭＨｚ　ＲＦ発生器、およびＺ　ＭＨｚ　ＲＦ発生器は、ＩＣＰプラズマチャンバ内のインダクタに結合される。

【０１８９】

上述のように、ツールによって実施されるプロセス動作に応じて、コントローラは、１つまたは複数の他のツール回路もしくはモジュール、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、隣接するツール、近接するツール、工場全体に位置するツール、メインコンピュータ、別のコントローラ、または半導体製造工場内のツール場所および／もしくはロードポートに対してウエハの容器を搬入および搬出する材料搬送に使用されるツールと通信する。

【０１９０】

上記の実施形態を念頭に置いて、実施形態のいくつかは、コンピュータシステムに記憶されたデータを伴う様々なコンピュータ実装動作を用いることを理解されたい。これらのコンピュータ実装動作は、物理量を操作する動作である。

【０１９１】

実施形態のいくつかはまた、これらの動作を実施するためのハードウェアユニットまたは装置に関する。装置は、専用コンピュータ用に特別に構築されている。専用コンピュータとして定義されるとき、コンピュータは、その専用の目的のために動作可能でありつつ、専用の目的の一部ではない他の処理、プログラム実行、またはルーチンを実施する。

【０１９２】

いくつかの実施形態では、上述の動作は、コンピュータメモリに記憶されるかコンピュータネットワークを介して取得される１つもしくは複数のコンピュータプログラムによって、選択的にアクティブ化または構成されるコンピュータによって実施される。コンピュータネットワークを介してデータが取得される場合、そのデータは、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、計算資源のクラウド）によって処理されてもよい。

【０１９３】

上述の１つまたは複数の実施形態は、非一時的コンピュータ可読媒体上のコンピュータ可読コードとして製作することもできる。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ストレージ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、データはその後コンピュータシステムによって読み取られる。非一時的コンピュータ可読媒体の例は、ハードドライブ、ネットワーク接続ストレージ（ＮＡＳ）、ＲＯＭ、ＲＡＭ、コンパクトディスクＲＯＭ（ＣＤ－ＲＯＭ）、ＣＤレコーダブル（ＣＤ－Ｒ）、ＣＤリライタブル（ＣＤ－ＲＷ）、磁気テープ、ならびに他の光学および非光学データストレージハードウェアユニットを含む。いくつかの実施形態では、非一時的コンピュータ可読媒体は、コンピュータ可読コードが分散方式で記憶および実行されるように、ネットワーク結合コンピュータシステム上に分散されたコンピュータ可読有形媒体を含む。

【０１９４】

上述のいくつかの方法動作は特定の順序で説明されたが、様々な実施形態において、各方法動作の間に他のハウスキーピング動作が実施されるか、または各方法動作がわずかに異なる時間に発生するように調整されるか、または各方法動作を様々な間隔で発生可能にするシステムに分散されるか、または上述の順序とは異なる順序で実施されることを理解されたい。

【０１９５】

一実施形態では、本開示で説明される様々な実施形態で説明される範囲から逸脱することなく、上述の任意の実施形態の１つまたは複数の特徴が他の任意の実施形態の１つまたは複数の特徴と組み合わされることにさらに留意されたい。

【０１９６】

前述の実施形態は、明確な理解のために多少詳しく説明されているが、一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。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、実施形態は本明細書に述べ

られる詳細に限定されるべきではなく、添付の特許請求の範囲および均等物の範囲内で修正されてもよい。本開示は以下の適用例を含む。

［適用例１］

調節方法であって、

第１の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルの第１のセットについて、第２の無線周波数発生器に関連する複数の反射パラメータ値にアクセスすることと、

前記複数の反射パラメータ値を無線周波数経路の少なくとも一部のコンピュータベースのモデルに適用することによって、前記複数の反射パラメータ値から複数の負荷インピーダンスパラメータ値を計算することであって、前記無線周波数経路は、前記第２の無線周波数発生器とプラズマチャンバの電極との間にあることと、

前記第２の無線周波数発生器によって生成される無線周波数信号の複数の周波数変調パラメータを受信することと、

前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を前記コンピュータベースのモデルに適用することによって、前記複数の周波数変調パラメータの値を決定することであって、前記複数の周波数変調パラメータの前記値は、前記コンピュータベースのモデルの入力における反射係数パラメータを最小化するように決定されることと

前記第１の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルの第２のセットの間、前記複数の周波数変調パラメータの前記値に従って前記第２の無線周波数発生器を制御することと

を含む、方法。

［適用例２］

適用例１に記載の方法であって、

前記複数の反射パラメータ値に前記アクセスすること、前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を前記計算すること、前記周波数変調パラメータの前記値を前記決定すること、および前記第２の無線周波数発生器を前記制御することは、前記プラズマチャンバ内の基板の処理中に実行される、方法。

［適用例３］

適用例１に記載の方法であって、

前記複数の反射パラメータ値は、複数の電圧反射係数値を含み、前記反射係数パラメータは、平均電力反射係数である、方法。

［適用例４］

適用例１に記載の方法であって、

前記動作の１つまたは複数のサイクルの第２のセットは、前記動作の１つまたは複数のサイクルの第１のセットの後に続く、方法。

［適用例５］

適用例１に記載の方法であって、

前記第１のセットは、前記第１の無線周波数発生器の動作の２つ以上のサイクルを含み、前記複数の反射パラメータ値の各々は、前記第１のセットの前記２つ以上のサイクルにわたって計算された複数の反射係数値の平均である、方法。

［適用例６］

適用例１に記載の方法であって、

前記第１の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルの第３のセットについて、前記複数の反射パラメータ値に前記アクセスすること、前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を前記計算すること、および前記複数の周波数変調パラメータの前記値を前記決定することを繰り返すことと、

前記第１の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルの第４のセットの間、前記第２の無線周波数発生器を前記制御することを繰り返すことと

をさらに含み、

前記第３のセットは、前記第２のセットの後に続き、前記第４のセットは、前記第３のセットの後に続く、

方法。
［適用例７］
適用例１に記載の方法であって、
前記複数の反射パラメータ値は、複素電圧および複素電流の複数の値を含む、方法。
［適用例８］
適用例１に記載の方法であって、
前記コンピュータベースのモデルは、複数の回路要素を含み、前記複数の回路要素のうちの２つの隣接する回路要素は、接続を介して互いに結合され、前記コンピュータベースのモデルは、前記無線周波数経路のインピーダンスと実質的に同じインピーダンスを有する、方法。
［適用例９］
適用例１に記載の方法であって、
前記コンピュータベースのモデルは、複数の回路要素を含み、前記複数の回路要素のうちの２つの隣接する回路要素は、接続を介して互いに結合され、前記複数の回路要素は、前記無線周波数経路の複数の回路構成要素を表し、前記無線周波数経路の前記複数の回路構成要素と同じ方式で接続される、方法。
［適用例１０］
適用例１に記載の方法であって、
前記無線周波数経路は、
前記第２の無線周波数発生器をマッチネットワークの分岐部と結合する無線周波数ケーブルと、
前記分岐部と、
前記マッチネットワークと前記プラズマチャンバを結合する無線周波数伝送ラインと、
前記プラズマチャンバの電極と
を含む、方法。
［適用例１１］
適用例１に記載の方法であって、
前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を前記コンピュータベースのモデルに適用することによって、マッチネットワークに対する静電容量を決定することをさらに含み、
前記マッチネットワークは、前記第２の無線周波数発生器と前記プラズマチャンバとの間、および前記第１の無線周波数発生器と前記プラズマチャンバとの間に結合される、方法。
［適用例１２］
適用例１に記載の方法であって、
前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を前記コンピュータベースのモデルに前記適用することは、
前記コンピュータベースのモデルの出力から前記コンピュータベースのモデルを介して前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を逆伝播し、前記コンピュータベースのモデルの前記入力での第１の複数の反射パラメータ入力値の計算を容易にすることであって、前記第１の複数の反射パラメータ入力値は、前記複数の周波数変調パラメータの量が前記コンピュータベースのモデルに利用可能であるときに決定されることと、
前記第１の複数の反射パラメータ入力値の第１の平均を計算することと、
前記コンピュータベースのモデルの前記出力から前記コンピュータベースのモデルを介して前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を逆伝播し、前記コンピュータベースのモデルの前記入力での第２の複数の反射パラメータ入力値の計算を容易にすることであって、前記第２の複数の反射パラメータ入力値は、前記複数の周波数変調パラメータの前記値が前記コンピュータベースのモデルに利用可能であるときに決定されることと、
前記第２の複数の反射パラメータ入力値の第２の平均を計算することと、
前記第２の平均が前記第１の平均よりも低いかどうかを決定することと
を含む、方法。
［適用例１３］

適用例１に記載の方法であって、
受信される前記複数の周波数変調パラメータは、前記第１の無線周波数発生器の動作の前記１つまたは複数のサイクルのうちの１つに関連する周期関数を表す、方法。
［適用例１４］
適用例１３に記載の方法であって、
前記周期関数は、台形関数、正弦関数、パルス関数、および鋸歯状関数のうちの１つである、方法。
［適用例１５］
調節方法であって、
レシピ開発中、
第１の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルのセットについて、第２の無線周波数発生器に関連する複数の反射パラメータ値にアクセスすることと、
前記複数の反射パラメータ値を無線周波数経路の少なくとも一部のコンピュータベースのモデルに適用することによって、前記複数の反射パラメータ値から複数の負荷インピーダンスパラメータ値を計算することであって、前記無線周波数経路は、前記第２の無線周波数発生器とプラズマチャンバの電極との間にあることと、
前記第２の無線周波数発生器によって生成される無線周波数信号の複数の周波数変調パラメータを受信することと、
前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を前記コンピュータベースのモデルに適用することによって、前記複数の周波数変調パラメータの値を決定することであって、前記複数の周波数変調パラメータの前記値は、前記コンピュータベースのモデルの入力における１つまたは複数の反射係数パラメータを最小化するように決定されることと、
別のプラズマチャンバ内での基板の処理中、
前記レシピ開発中に決定された前記複数の周波数変調パラメータの前記値に従って第３の無線周波数発生器を制御することであって、前記第３の無線周波数発生器を前記制御することは、第４の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルのセットの間に実施されることと
を含む、方法。
［適用例１６］
適用例１５に記載の方法であって、
前記レシピ開発中に最小化される前記１つまたは複数の反射係数パラメータは、平均電力反射係数を含み、前記複数の反射パラメータ値は、電圧反射係数の複数の値を含む、方法。
［適用例１７］
適用例１５に記載の方法であって、
前記第３の無線周波数発生器は、前記第２の無線周波数発生器と同じ動作周波数を有するように指定され、前記第４の無線周波数発生器は、前記第１の無線周波数発生器と同じ動作周波数を有するように指定される、方法。
［適用例１８］
適用例１５に記載の方法であって、
前記第１の無線周波数発生器の動作の前記１つまたは複数のサイクルのセットは、前記第１の無線周波数発生器の動作の２つ以上のサイクルを含み、前記複数の反射パラメータ値の各々は、前記第１の無線周波数発生器の動作の前記２つ以上のサイクルにわたって決定される複数の反射係数値の平均である、方法。
［適用例１９］
適用例１５に記載の方法であって、
前記複数の反射パラメータ値は、複素電圧および複素電流の複数の値を含む、方法。
［適用例２０］
適用例１５に記載の方法であって、
前記複数の周波数変調パラメータは、台形関数、または正弦関数、または矩形関数、ま

たは三角形関数を定義する、方法。
［適用例２１］
適用例１５に記載の方法であって、
前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を前記コンピュータベースのモデルに適用することによって、マッチネットワークに対する静電容量を決定することをさらに含み、前記マッチネットワークは、前記第３の無線周波数発生器と前記他のプラズマチャンバとの間、および前記第４の無線周波数発生器と前記他のプラズマチャンバとの間に結合される、方法。
［適用例２２］
適用例１５に記載の方法であって、
前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を前記コンピュータベースのモデルに前記適用することは、
前記コンピュータベースのモデルの出力から前記コンピュータベースのモデルを介して前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を逆伝播し、前記コンピュータベースのモデルの前記入力での第１の複数の反射パラメータ入力値を計算することであって、前記第１の複数の反射パラメータ入力値は、前記複数の周波数変調パラメータの量が前記コンピュータベースのモデルに利用可能であるときに決定されることと、
前記第１の複数の反射パラメータ入力値の第１の平均を計算することと、
前記コンピュータベースのモデルの前記出力から前記コンピュータベースのモデルを介して前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を逆伝播し、前記コンピュータベースのモデルの前記入力での第２の複数の反射パラメータ入力値を計算することであって、前記第２の複数の反射パラメータ入力値は、前記複数の周波数変調パラメータの前記値が前記コンピュータベースのモデルに利用可能であるときに決定されることと、
前記第２の複数のパラメータ入力値の第２の平均を計算することと、
前記第２の平均が前記第１の平均よりも低いと決定することと
を含む、方法。
［適用例２３］
調節方法であって、
レシピ開発中、
第１の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルのセットについて、第２の無線周波数発生器に関連する複数の反射パラメータ値にアクセスすることと、
前記複数の反射パラメータ値を前記第２の無線周波数発生器とプラズマチャンバの電極との間の無線周波数経路の少なくとも一部のコンピュータベースのモデルに適用することによって、前記複数の反射パラメータ値から複数の負荷インピーダンスパラメータ値を計算することと、
前記第２の無線周波数発生器によって生成される無線周波数信号の複数の周波数変調パラメータを受信することであって、前記複数の周波数変調パラメータは、前記無線周波数信号の周波数変動を含むことと、
前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を前記コンピュータベースのモデルに適用することによって、前記複数の周波数変調パラメータの値を決定することであって、前記複数の周波数変調パラメータの前記値は、前記コンピュータベースのモデルの入力における１つまたは複数の反射係数パラメータを最小化するように決定されることと、
別のプラズマチャンバ内での基板の処理中、
前記レシピ開発中に決定された前記複数の周波数変調パラメータの前記値に従って第３の無線周波数発生器を制御することであって、前記第３の無線周波数発生器を前記制御することは、前記複数の周波数変調パラメータの前記値を前記第３の無線周波数発生器の動作のベースライン周波数に適用することを含むことと
を含む、方法。
［適用例２４］
適用例２３に記載の方法であって、

前記複数の周波数変調パラメータは、台形関数、または正弦関数、または矩形関数、または三角形関数を定義する、方法。

［適用例２５］

適用例２３に記載の方法であって、

前記レシピ開発中に最小化される前記１つまたは複数の反射係数パラメータは、平均電力反射係数を含み、前記複数の反射パラメータ値は、電圧反射係数の複数の値を含む、方法。

［適用例２６］

適用例２３に記載の方法であって、

前記ベースライン周波数は、前記第３の無線周波数発生器に関連する電力ベースのパラメータを最小化するために使用される、方法。

［適用例２７］

調節方法であって、

レシピ開発中、

第１の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルのセットについて、第２の無線周波数発生器に関連する複数の反射パラメータ値にアクセスすることであって、前記複数の反射パラメータ値の各々は、前記第１の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルの各々のビンに対応することと、

前記複数の反射パラメータ値を無線周波数経路の少なくとも一部のコンピュータベースのモデルに適用することによって、前記複数の反射パラメータ値から複数の負荷インピーダンスパラメータ値を計算することであって、前記無線周波数経路は、前記第２の無線周波数発生器とプラズマチャンバの電極との間にあることと、

前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を前記コンピュータベースのモデルに適用することによって、複数の周波数変調パラメータの値を決定することであって、前記複数の周波数変調パラメータの前記値は、前記ビンの各々について前記コンピュータベースのモデルの入力における反射係数パラメータの複数の値を最小化するように決定されることと、

別のプラズマチャンバ内での基板の処理中、

前記レシピ開発中に決定された前記複数の周波数変調パラメータの前記値に従って第３の無線周波数発生器を制御することであって、前記第３の周波数発生器を前記制御することは、第４の無線周波数発生器の動作の１つまたは複数のサイクルのセットの間に実施されることと

を含む、方法。

［適用例２８］

適用例２７に記載の方法であって、

前記反射係数パラメータは、電力反射係数パラメータを含む、方法。

［適用例２９］

適用例２７に記載の方法であって、

前記第１の無線周波数発生器の動作の前記１つまたは複数のサイクルのセットは、前記第１の無線周波数発生器の動作の２つ以上のサイクルを含み、前記複数の反射パラメータ値の各々は、前記第１の無線周波数発生器の動作の前記２つ以上のサイクルにわたって決定される複数の反射係数値の平均である、方法。

［適用例３０］

適用例２７に記載の方法であって、

前記複数の周波数変調パラメータは、前記第３の無線周波数発生器によって出力される無線周波数信号の平均周波数と、前記第３の無線周波数発生器によって出力される前記無線周波数信号の周波数変動とを含み、前記周波数変動は、前記第４の無線周波数発生器によって生成される無線周波数信号の各ビンに対するものである、方法。

［適用例３１］

適用例２７に記載の方法であって、

前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値は、前記コンピュータベースのモデルに適用されてマッチネットワークに対する静電容量を決定し、前記マッチネットワークは、前記第３の無線周波数発生器と前記他のプラズマチャンバとの間、および前記第４の無線周波数発生器と前記他のプラズマチャンバとの間に結合される、方法。

［適用例３２］

適用例２７に記載の方法であって、

前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値を前記コンピュータベースのモデルに前記適用することは、

前記コンピュータベースのモデルの出力から前記コンピュータベースのモデルを介して前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値の第１の値を逆伝播し、前記コンピュータベースのモデルの前記入力での第１の反射パラメータ入力値の計算を容易にすることであって、前記第１の反射パラメータ入力値は、前記複数の周波数変調パラメータの量が前記コンピュータベースのモデルに利用可能であるときに決定されることと、

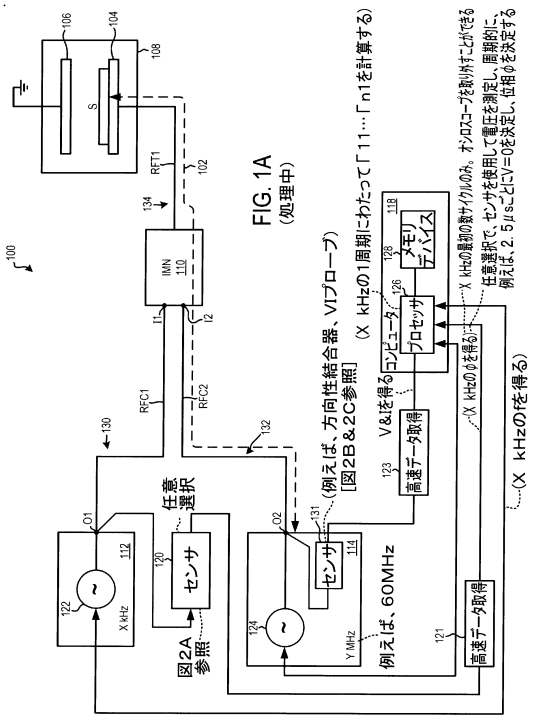
前記コンピュータベースのモデルの前記出力から前記コンピュータベースのモデルを介して前記複数の負荷インピーダンスパラメータ値の前記第１の値を逆伝播し、前記コンピュータベースのモデルの前記入力での第２の反射パラメータ入力値を計算することであって、前記第２の反射パラメータ入力値は、前記複数の周波数変調パラメータの前記値が前記コンピュータベースのモデルに利用可能であるときに決定されることと、

前記第２の反射パラメータ入力値が前記第１の反射パラメータ入力値よりも低いかどうかを決定することと

を含む、方法。

【図面】

【図１Ａ】



【図１Ｂ－１】

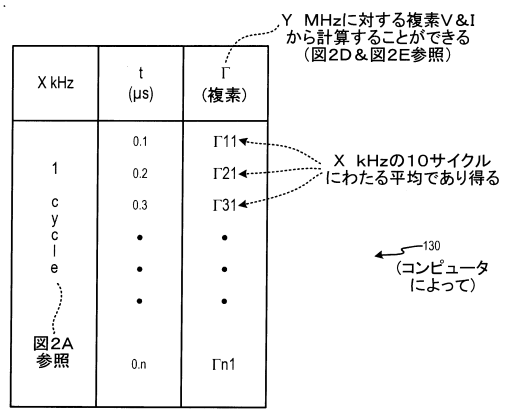


FIG. 1B-1
（処理中）

【図１Ｂ－２】

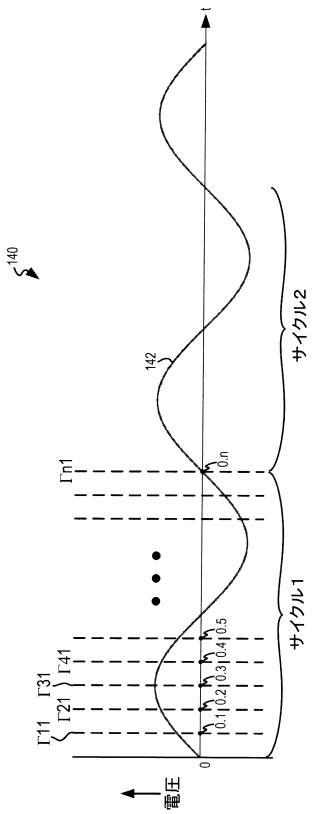


FIG. 1B-2

【図１Ｃ】

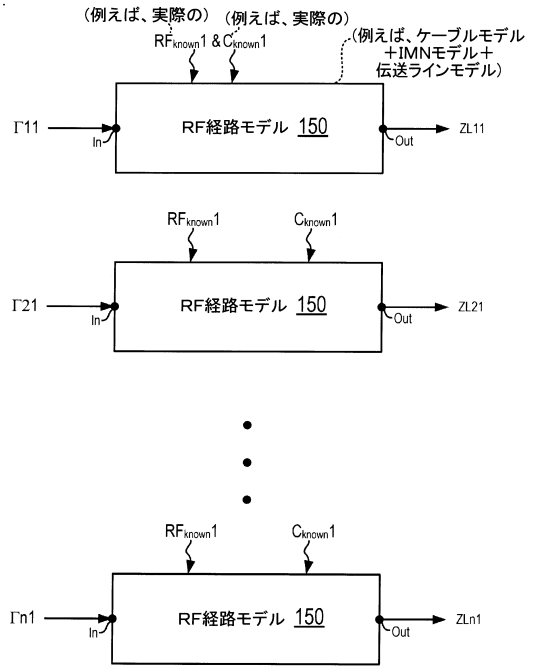


FIG. 1C
（処理中）

【図１Ｄ－１】

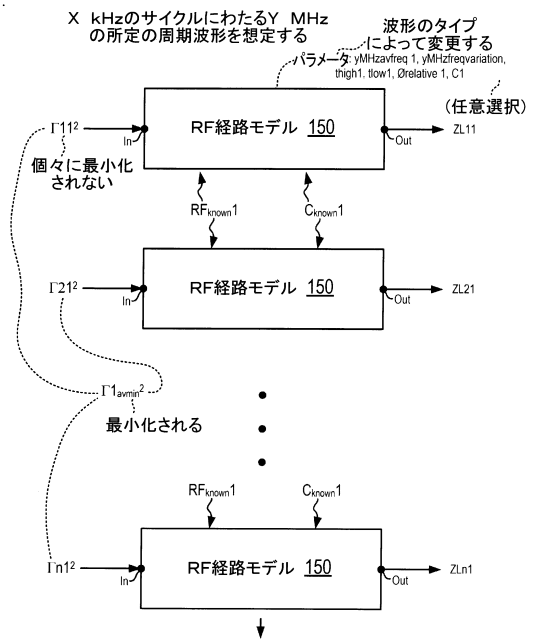


FIG. 1D-1
（処理中）

【図１Ｄ－２】

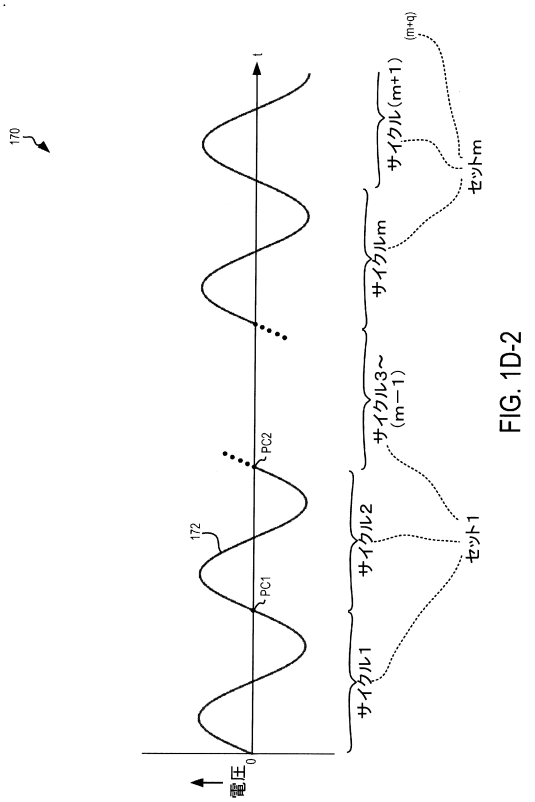
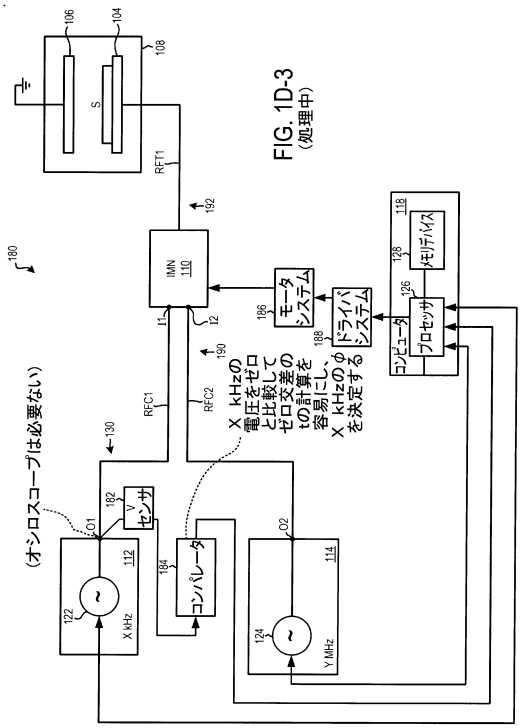


FIG. 1D-2

【図１Ｄ－３】



【図２Ａ】

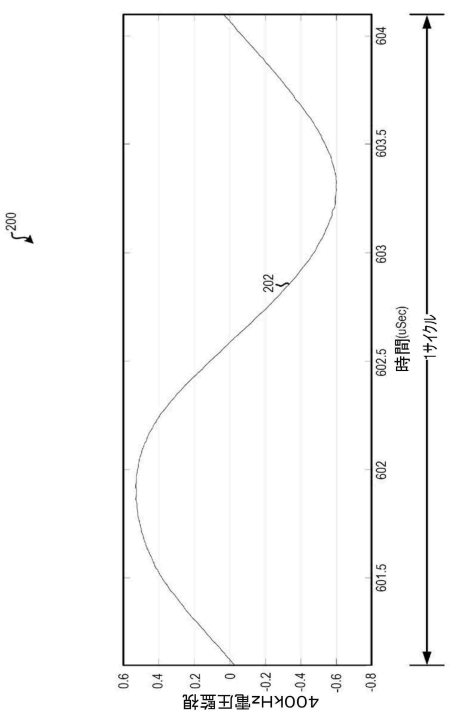


FIG. 2A

【図２Ｂ】

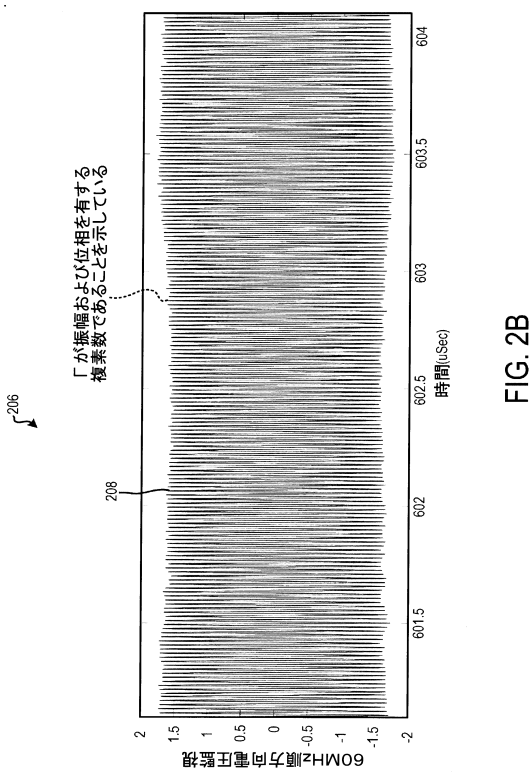


FIG. 2B

【図２Ｃ】

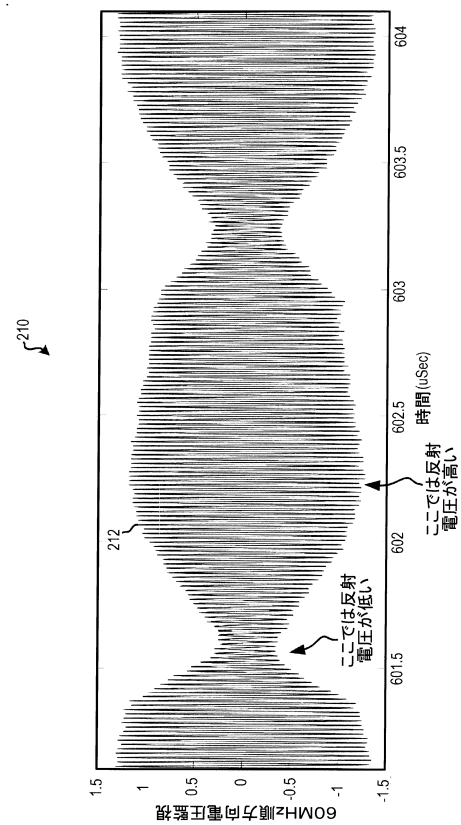


FIG. 2C

【図２Ｄ】

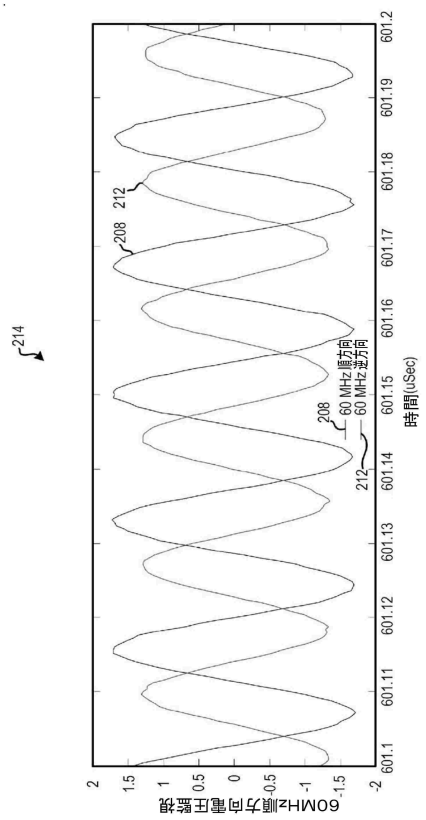


FIG. 2D
（Γが位相を有する複素数であることを示している）

【図２Ｅ】

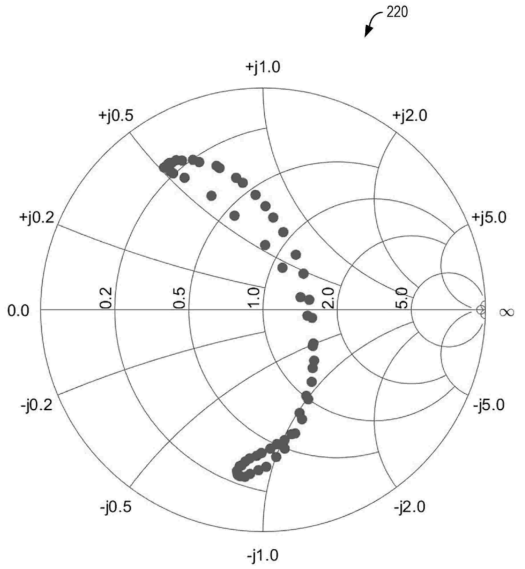


FIG. 2E
（x kHzの1サイクルにわたるΓ）

【図３Ａ】

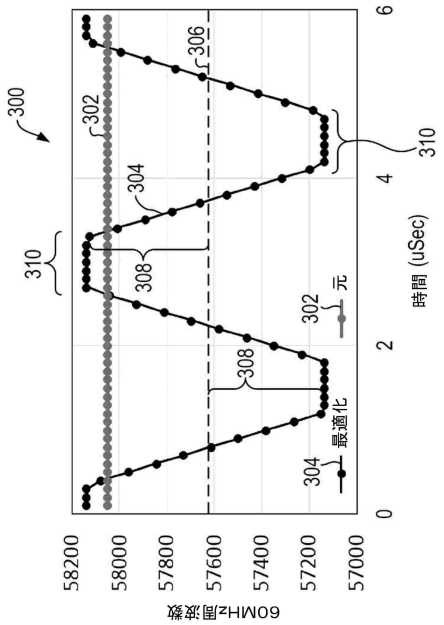


FIG. 3A
（方法を適用した後）

【図３Ｂ】

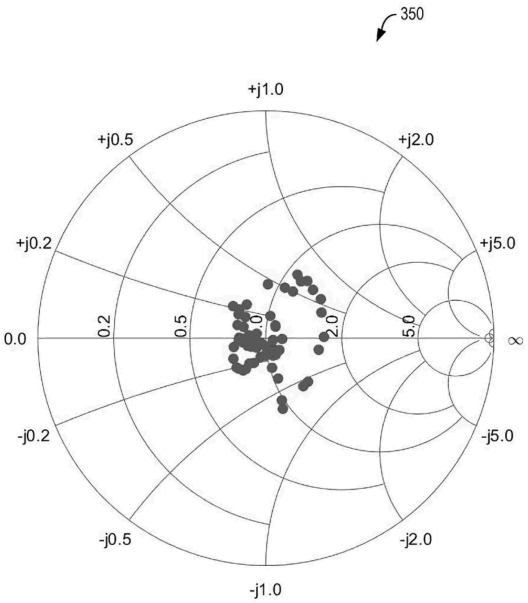
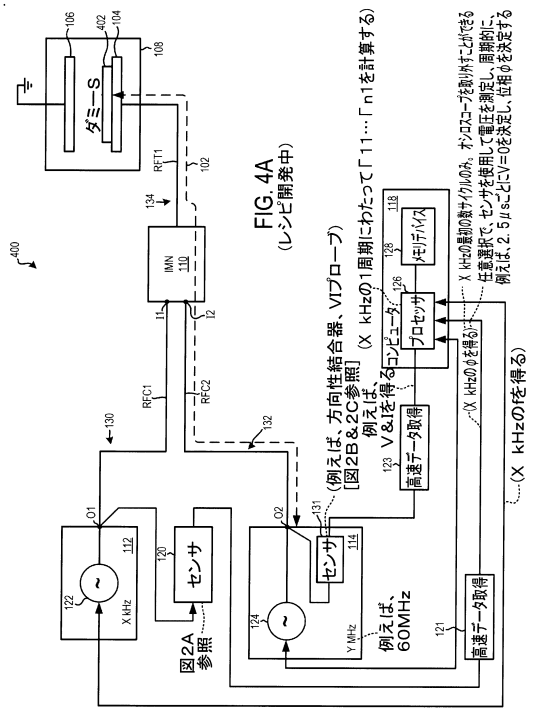


FIG. 3B
（方法を適用した後のΓ）

【図４Ａ】



【図４Ｂ】

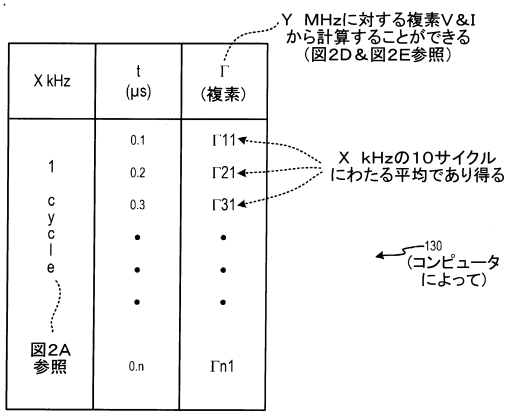


FIG. 4B
(レシピ開発中)

【図４Ｃ】

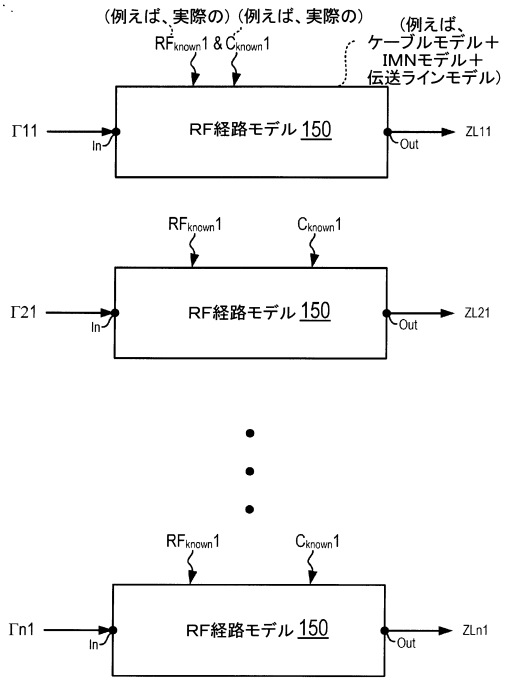


FIG. 4C
(レシピ開発中)

【図４Ｄ】

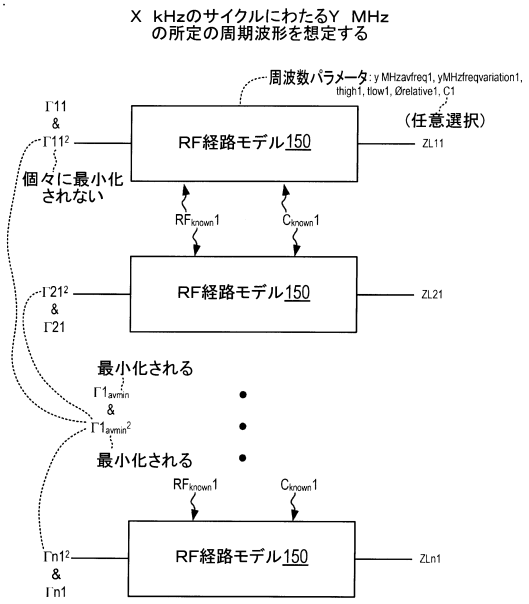
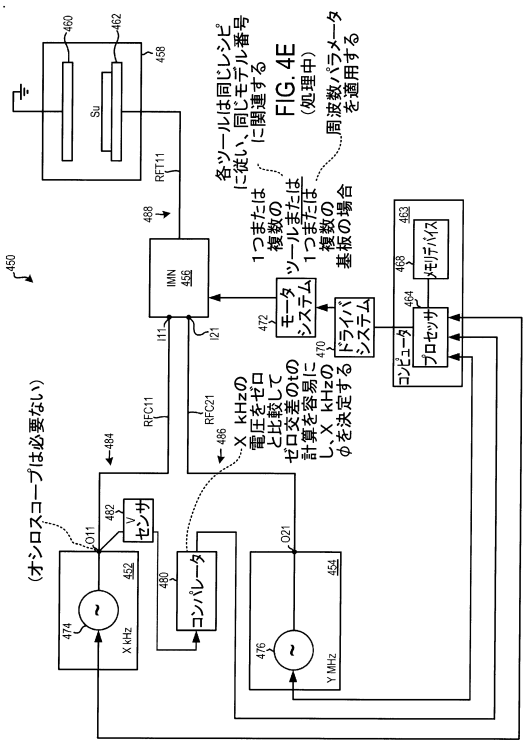
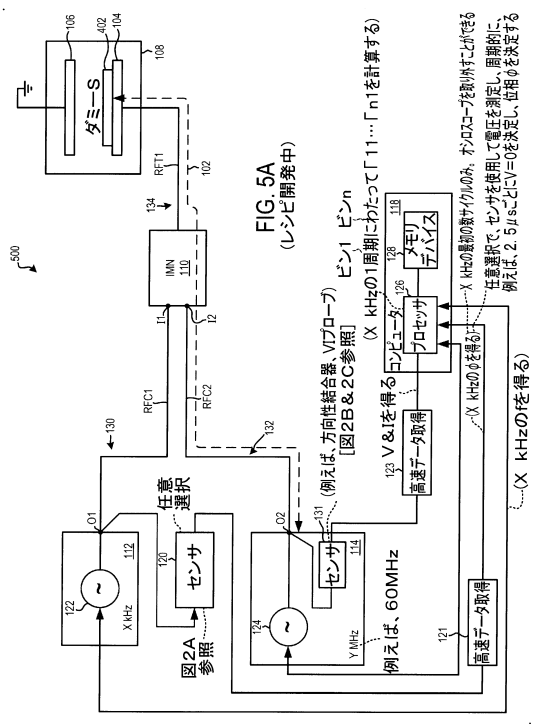


FIG. 4D

【図４Ｅ】



【図５Ａ】



【図５Ｂ】

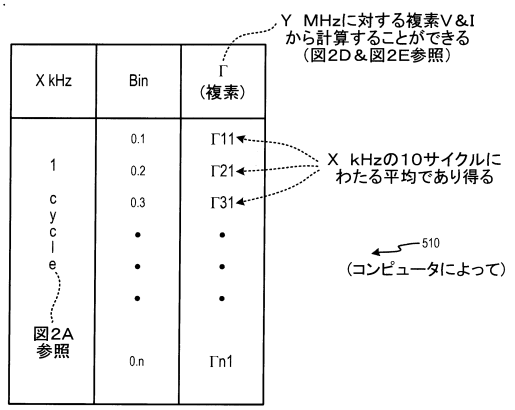


FIG. 5B

【図５Ｃ】

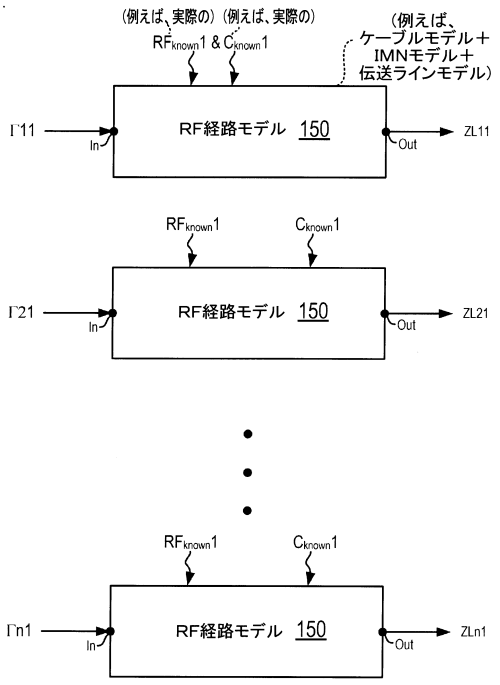


FIG. 5C

【図５Ｄ】

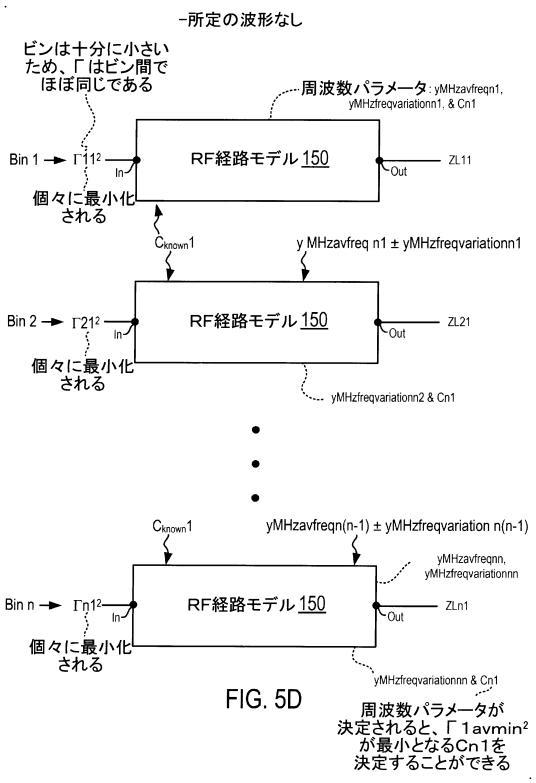
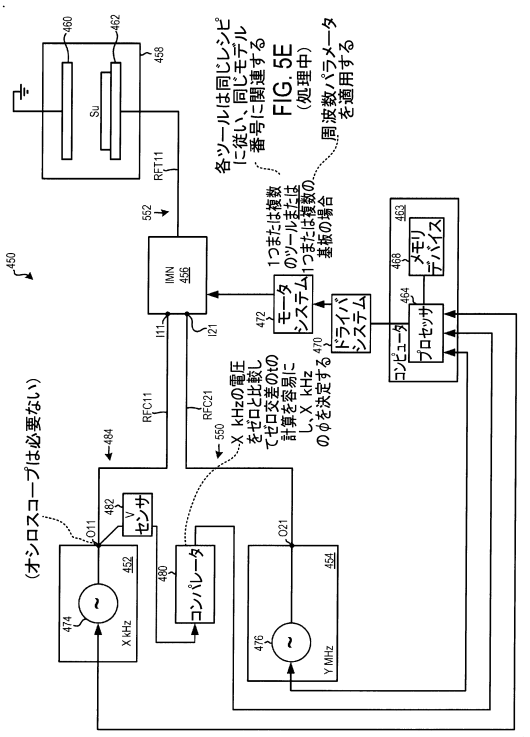


FIG. 5D

【図５Ｅ】



フロントページの続き

５３８ フレモント，クッシング・パークウェイ，４６５０

審査官　小林 幹

(56)参考文献　特開２０１７－１８８４３４（ＪＰ，Ａ）
特開２０１５－０９０７７０（ＪＰ，Ａ）
米国特許出願公開第２０１９／００２７３４２（ＵＳ，Ａ１）

(58)調査した分野　(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｈ０５Ｈ　１／００－１／５４
Ｈ０１Ｌ　２１／３０６５