(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2025年5月15日(15.05.2025)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2025/100412 A1

(51) 国際特許分類:
H05H 1/46 (2006.01)

(21) 国際出願番号： PCT/JP2024/039311

(22) 国際出願日： 2024年11月5日(05.11.2024)

(25) 国際出願の言語： 日本語

(26) 国際公開の言語： 日本語

(30) 優先権データ：
特願 2023-192179 2023年11月10日(10.11.2023) JP

(71) 出願人: 東京エレクトロン株式会社(**TOKYO ELECTRON LIMITED**) [JP/JP]; 〒1076325 東京都港区赤坂五丁目３番１号 (JP).

(72) 発明者: 上 坂 友 佑 人 (**KOSAKA Yuto**); 〒9813629 宮城県黒川郡大和町テクノヒルズ１番 東京エレクトロン宮城株式会社内 (JP). 輿水 地塩(**KOSHIMIZU Chishio**); 〒9813629 宮城県黒川郡大和町テクノヒルズ１番 東京エレクトロン宮城株式会社内 (JP).

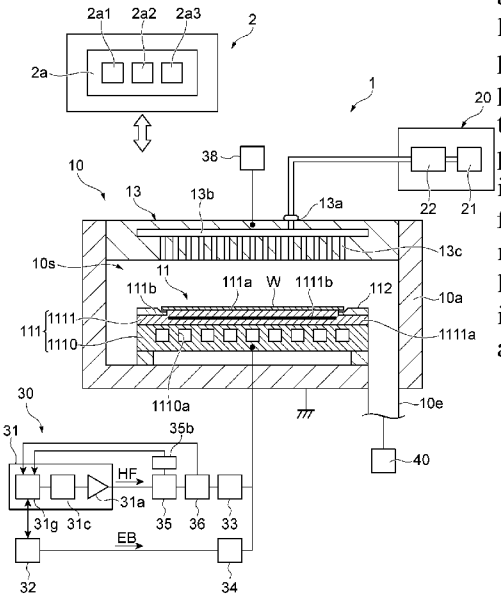
(74) 代理人: 長谷川 芳樹，外(**HASEGAWA Yoshiki** et al.); 〒1000005 東京都千代田区丸の内二丁目１番１号 丸の内ＭＹ ＰＬＡＺＡ（明治安田生命ビル） ９階 創英国際特許法律事務所 (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): 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, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, 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, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU,

(54) **Title:** PLASMA PROCESSING DEVICE, POWER SUPPLY SYSTEM, AND CONTROL METHOD

(54) 発明の名称： プラズマ処理装置、電源システム、及び制御方法



(57) **Abstract:** A power supply system of this disclosed plasma processing device includes a high-frequency power supply, a bias power supply, and a power supply control unit. The high-frequency power supply generates high-frequency power for plasma generation. The bias power supply supplies an electrical bias to a substrate support. The power supply control unit periodically modulates the power level of the high-frequency power during the repetition of a modulation cycle including at least two sub-periods. The power supply control unit is configured so as to, on the basis of changes in the degree of reflection of the high-frequency power and changes in the frequency of the high-frequency power in an n-th phase period during the repetition of the preceding modulation cycle, adjust the frequency of the high-frequency power for the n-th phase period in the modulation cycle included in a feedback period subsequent to the start time of each of the at least two sub-periods.

WO 2025/100412 A1

TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類：

一　国際調査報告（条約第21条(3)）

(57) 要約：開示されるプラズマ処理装置の電源システムは、高周波電源、バイアス電源、及び電源制御部を含む。高周波電源は、プラズマ生成用の高周波電力を発生する。バイアス電源は、基板支持部に電気バイアスを供給する。電源制御部は、少なくとも二つの副期間を含む変調周期の繰り返しにおいて高周波電力のパワーレベルを周期的に変調する。電源制御部は、少なくとも二つの副期間の各々の開始時点から続くフィードバック期間に含まれる変調周期内のｎ番目の位相期間のための高周波電力の周波数を、先行する変調周期の繰り返しにおける当該ｎ番目の位相期間の高周波電力の周波数の変化と高周波電力の反射の度合いの変化に基づき、調整するよう構成されている。

明　細　書

発明の名称 ： プラズマ処理装置、電源システム、及び制御方法

技術分野

[0001]　本開示の例示的実施形態は、プラズマ処理装置、電源システム、及び制御方法に関するものである。

背景技術

[0002]　プラズマ処理装置が、基板に対するプラズマ処理において用いられている。プラズマ処理装置では、チャンバ内で生成されたプラズマからイオンを基板に引き込むために、バイアス高周波電力が用いられる。下記の特許文献１は、バイアス高周波電力のパワーレベル及び周波数を変調するプラズマ処理装置を開示している。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特開２００９－２４６０９１号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004]　本開示は、高周波電力の反射を抑制する技術を提供する。

課題を解決するための手段

[0005]　一つの例示的実施形態において、プラズマ処理装置が提供される。プラズマ処理装置は、チャンバ、基板支持部、及び電源システムを含む。基板支持部は、チャンバ内に設けられている。電源システムは、高周波電源、バイアス電源、及び電源制御部を含む。高周波電源は、プラズマ処理装置のチャンバ内でプラズマを生成するために、高周波電力を供給するように構成されている。バイアス電源は、チャンバ内に設けられた基板支持部上の基板にプラズマからイオンを引き込むために、波形周期の時間間隔で繰り返して基板支持部に電気バイアスを供給するように構成されている。電源制御部は、変調周期の繰り返しにおいて高周波電力のパワーレベルを周期的に変調するよう

に構成されている。変調周期は複数の副期間を含む。複数の副期間は高周波電力のパワーレベルがゼロよりも大きく且つ互いに異なるレベルに設定される少なくとも二つの副期間を含む。少なくとも二つの副期間の各々はその開始時点から続くフィードバック期間を含む。電源制御部は、フィードバック期間に含まれる変調周期内のｎ番目の位相期間のための高周波電力の周波数を、先行する変調周期の繰り返しにおける当該ｎ番目の位相期間の高周波電力の周波数の変化と高周波電力の反射の度合いの変化に基づき、高周波電力の反射の度合いを抑制するように、調整するよう構成されている。

発明の効果

[0006] 一つの例示的実施形態によれば、高周波電力の反射を抑制することが可能となる。

図面の簡単な説明

[0007] [図1]プラズマ処理システムの構成例を説明するための図である。

[図2]容量結合型のプラズマ処理装置の構成例を説明するための図である。

[図3]電気バイアスの波形の例を示す図である。

[図4]一つの例示的実施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図5]一つの例示的実施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図6]一つの例示的実施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図7]一つの例示的実施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図8]一つの例示的実施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図9]一つの例示的実施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図10]一つの例示的実施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミン

グチャートである。

[図11]一つの例示的実施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図12]一つの例示的実施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図13]一つの例示的実施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図14]一つの例示的実施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図15]一つの例示的実施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図16]一つの例示的実施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図17]一つの例示的実施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。

[図18]図１８の（ａ）は、一つの例示的実施形態に係る制御方法の流れ図であり、図１８の（ｂ）は、図１８の（ａ）に示す工程ＳＴａの流れ図である。

[図19]図１８の（ｂ）に示す工程ＳＴｄにおける処理の例を示す流れ図である。

[図20]図１９に示す工程ＳＴ７における処理の例を示す流れ図である。

[図21]図１８の（ｂ）に示す工程ＳＴｄにおける処理の別の例を示す流れ図である。

[図22]図２１に示す工程ＳＴ７ａにおける処理の例を示す流れ図である。

[図23]一つの例示的実施形態に係る電源システムに関連するタイミングチャートである。

発明を実施するための形態

[0008] 以下、図面を参照して種々の例示的実施形態について詳細に説明する。な

お、各図面において同一又は相当の部分に対しては同一の符号を附すこととする。

[0009] 図１は、プラズマ処理システムの構成例を説明するための図である。一実施形態において、プラズマ処理システムは、プラズマ処理装置１及び制御部２を含む。プラズマ処理システムは、基板処理システムの一例であり、プラズマ処理装置１は、基板処理装置の一例である。プラズマ処理装置１は、プラズマ処理チャンバ１０、基板支持部１１及びプラズマ生成部１２を含む。プラズマ処理チャンバ１０は、プラズマ処理空間を有する。また、プラズマ処理チャンバ１０は、少なくとも１つの処理ガスをプラズマ処理空間に供給するための少なくとも１つのガス供給口と、プラズマ処理空間からガスを排出するための少なくとも１つのガス排出口とを有する。ガス供給口は、後述するガス供給部２０に接続され、ガス排出口は、後述する排気システム４０に接続される。基板支持部１１は、プラズマ処理空間内に配置され、基板を支持するための基板支持面を有する。

[0010] プラズマ生成部１２は、プラズマ処理空間内に供給された少なくとも１つの処理ガスからプラズマを生成するように構成される。プラズマ処理空間において形成されるプラズマは、容量結合プラズマ（ＣＣＰ：Ｃａｐａｃｉｔｉｖｅｌｙ Ｃｏｕｐｌｅｄ Ｐｌａｓｍａ）、誘導結合プラズマ（ＩＣＰ：Ｉｎｄｕｃｔｉｖｅｌｙ Ｃｏｕｐｌｅｄ Ｐｌａｓｍａ）、ＥＣＲプラズマ（Ｅｌｅｃｔｒｏｎ－Ｃｙｃｌｏｔｒｏｎ－Ｒｅｓｏｎａｎｃｅ Ｐｌａｓｍａ）、ヘリコン波励起プラズマ（ＨＷＰ：Ｈｅｌｉｃｏｎ Ｗａｖｅ Ｐｌａｓｍａ）、又は、表面波プラズマ（ＳＷＰ：Ｓｕｒｆａｃｅ Ｗａｖｅ Ｐｌａｓｍａ）等であってもよい。

[0011] 制御部２は、本開示において述べられる種々の工程をプラズマ処理装置１に実行させるコンピュータ実行可能な命令を処理する。制御部２は、ここで述べられる種々の工程を実行するようにプラズマ処理装置１の各要素を制御するように構成され得る。一実施形態において、制御部２の一部又は全てがプラズマ処理装置１に含まれてもよい。制御部２は、処理部２ａ１、記憶部

２ａ２及び通信インターフェース２ａ３を含んでもよい。制御部２は、例えばコンピュータ２ａにより実現される。処理部２ａ１は、記憶部２ａ２からプログラムを読み出し、読み出されたプログラムを実行することにより種々の制御動作を行うように構成され得る。このプログラムは、予め記憶部２ａ２に格納されていてもよく、必要なときに、媒体を介して取得されてもよい。取得されたプログラムは、記憶部２ａ２に格納され、処理部２ａ１によって記憶部２ａ２から読み出されて実行される。媒体は、コンピュータ２ａに読み取り可能な種々の記憶媒体であってもよく、通信インターフェース２ａ３に接続されている通信回線であってもよい。処理部２ａ１は、ＣＰＵ（Ｃｅｎｔｒａｌ　Ｐｒｏｃｅｓｓｉｎｇ　Ｕｎｉｔ）又はＦＰＧＡ（Ｆｉｅｌｄ－Ｐｒｏｇｒａｍｍａｂｌｅ　Ｇａｔｅ　Ａｒｒａｙ）のようなプログラム可能なロジックデバイスであってもよい。記憶部２ａ２は、ＲＡＭ（Ｒａｎｄｏｍ　Ａｃｃｅｓｓ　Ｍｅｍｏｒｙ）、ＲＯＭ（Ｒｅａｄ　Ｏｎｌｙ　Ｍｅｍｏｒｙ）、ＨＤＤ（Ｈａｒｄ　Ｄｉｓｋ　Ｄｒｉｖｅ）、ＳＳＤ（Ｓｏｌｉｄ　Ｓｔａｔｅ　Ｄｒｉｖｅ）、又はこれらの組み合わせを含んでもよい。通信インターフェース２ａ３は、ＬＡＮ（Ｌｏｃａｌ　Ａｒｅａ　Ｎｅｔｗｏｒｋ）等の通信回線を介してプラズマ処理装置１との間で通信してもよい。

[0012]　以下に、プラズマ処理装置１の一例としての容量結合型のプラズマ処理装置の構成例について説明する。図２は、容量結合型のプラズマ処理装置の構成例を説明するための図である。

[0013]　容量結合型のプラズマ処理装置１は、プラズマ処理チャンバ１０、ガス供給部２０、電源システム３０及び排気システム４０を含む。また、プラズマ処理装置１は、基板支持部１１及びガス導入部を含む。ガス導入部は、少なくとも１つの処理ガスをプラズマ処理チャンバ１０内に導入するように構成される。ガス導入部は、シャワーヘッド１３を含む。基板支持部１１は、プラズマ処理チャンバ１０内に配置される。シャワーヘッド１３は、基板支持部１１の上方に配置される。一実施形態において、シャワーヘッド１３は、

プラズマ処理チャンバ１０の天部（ｃｅｉｌｉｎｇ）の少なくとも一部を構成する。プラズマ処理チャンバ１０は、シャワーヘッド１３、プラズマ処理チャンバ１０の側壁１０ａ及び基板支持部１１により規定されたプラズマ処理空間１０ｓを有する。プラズマ処理チャンバ１０は接地される。基板支持部１１は、プラズマ処理チャンバ１０の筐体とは電気的に絶縁される。

[0014] 基板支持部１１は、本体部１１１及びリングアセンブリ１１２を含む。本体部１１１は、基板Ｗを支持するための中央領域１１１ａと、リングアセンブリ１１２を支持するための環状領域１１１ｂとを有する。ウェハは基板Ｗの一例である。本体部１１１の環状領域１１１ｂは、平面視で本体部１１１の中央領域１１１ａを囲んでいる。基板Ｗは、本体部１１１の中央領域１１１ａ上に配置され、リングアセンブリ１１２は、本体部１１１の中央領域１１１ａ上の基板Ｗを囲むように本体部１１１の環状領域１１１ｂ上に配置される。従って、中央領域１１１ａは、基板Ｗを支持するための基板支持面とも呼ばれ、環状領域１１１ｂは、リングアセンブリ１１２を支持するためのリング支持面とも呼ばれる。

[0015] 一実施形態において、本体部１１１は、基台１１１０及び静電チャック１１１１を含む。基台１１１０は、導電性部材を含む。静電チャック１１１１は、基台１１１０の上に配置される。静電チャック１１１１は、セラミック部材１１１１ａとセラミック部材１１１１ａ内に配置される静電電極１１１１ｂとを含む。セラミック部材１１１１ａは、中央領域１１１ａを有する。一実施形態において、セラミック部材１１１１ａは、環状領域１１１ｂも有する。なお、環状静電チャックや環状絶縁部材のような、静電チャック１１１１を囲む他の部材が環状領域１１１ｂを有してもよい。この場合、リングアセンブリ１１２は、環状静電チャック又は環状絶縁部材の上に配置されてもよく、静電チャック１１１１と環状絶縁部材の両方の上に配置されてもよい。

[0016] リングアセンブリ１１２は、１又は複数の環状部材を含む。一実施形態において、１又は複数の環状部材は、１又は複数のエッジリングと少なくとも

１つのカバーリングとを含む。エッジリングは、導電性材料又は絶縁材料で形成され、カバーリングは、絶縁材料で形成される。

[0017] また、基板支持部１１は、静電チャック１１１１、リングアセンブリ１１２及び基板のうち少なくとも１つをターゲット温度に調節するように構成される温調モジュールを含んでもよい。温調モジュールは、ヒータ、伝熱媒体、流路１１１０ａ、又はこれらの組み合わせを含んでもよい。流路１１１０ａには、ブラインやガスのような伝熱流体が流れる。一実施形態において、流路１１１０ａが基台１１１０内に形成され、１又は複数のヒータが静電チャック１１１１のセラミック部材１１１１ａ内に配置される。また、基板支持部１１は、基板Ｗの裏面と中央領域１１１ａとの間の間隙に伝熱ガスを供給するように構成された伝熱ガス供給部を含んでもよい。

[0018] シャワーヘッド１３は、ガス供給部２０からの少なくとも１つの処理ガスをプラズマ処理空間１０ｓ内に導入するように構成される。シャワーヘッド１３は、少なくとも１つのガス供給口１３ａ、少なくとも１つのガス拡散室１３ｂ、及び複数のガス導入口１３ｃを有する。ガス供給口１３ａに供給された処理ガスは、ガス拡散室１３ｂを通過して複数のガス導入口１３ｃからプラズマ処理空間１０ｓ内に導入される。また、シャワーヘッド１３は、少なくとも１つの上部電極を含む。なお、ガス導入部は、シャワーヘッド１３に加えて、側壁１０ａに形成された１又は複数の開口部に取り付けられる１又は複数のサイドガス注入部（ＳＧＩ：Ｓｉｄｅ　Ｇａｓ　Ｉｎｊｅｃｔｏｒ）を含んでもよい。

[0019] ガス供給部２０は、少なくとも１つのガスソース２１及び少なくとも１つの流量制御器２２を含んでもよい。一実施形態において、ガス供給部２０は、少なくとも１つの処理ガスを、それぞれに対応のガスソース２１からそれぞれに対応の流量制御器２２を介してシャワーヘッド１３に供給するように構成される。各流量制御器２２は、例えばマスフローコントローラ又は圧力制御式の流量制御器を含んでもよい。さらに、ガス供給部２０は、少なくとも１つの処理ガスの流量を変調又はパルス化する少なくとも１つの流量変調

デバイスを含んでもよい。

[0020] 排気システム４０は、例えばプラズマ処理チャンバ１０の底部に設けられたガス排出口１０ｅに接続され得る。排気システム４０は、圧力調整弁及び真空ポンプを含んでもよい。圧力調整弁によって、プラズマ処理空間１０ｓ内の圧力が調整される。真空ポンプは、ターボ分子ポンプ、ドライポンプ又はこれらの組み合わせを含んでもよい。

[0021] 電源システム３０は、高周波電源３１及びバイアス電源３２を含む。電源システム３０は、直流電源３８を更に含んでいてもよい。高周波電源３１は、一実施形態のプラズマ生成部１２を構成する。高周波電源３１は、高周波電力を発生するように構成されている。以下の説明では、高周波電源３１によって発生される高周波電力を、ソース高周波電力ＨＦという。ソース高周波電力ＨＦは、周波数を有する。以下の説明では、ソース高周波電力ＨＦの周波数を、ソース周波数という。ソース高周波電力ＨＦは、その周波数がソース周波数である正弦波状の波形を有する。ソース周波数は、１０ＭＨｚ～１５０ＭＨｚの範囲内の周波数であり得る。

[0022] 高周波電源３１は、整合器３３を介して高周波電極に電気的に接続されており、ソース高周波電力ＨＦを高周波電極に供給するように構成されている。高周波電極は、基板支持部１１内に設けられていてもよい。高周波電極は、基台１１１０の導電性部材又はセラミック部材１１１１ａ内に設けられた少なくとも一つの電極であってもよい。或いは、高周波電極は、上部電極であってもよい。ソース高周波電力ＨＦが高周波電極に供給されると、チャンバ１０内のガスからプラズマが生成される。

[0023] 整合器３３は、可変インピーダンスを有する。整合器３３の可変インピーダンスは、ソース高周波電力ＨＦの負荷からの反射を低減するよう、設定される。整合器３３は、例えば制御部２によって制御され得る。

[0024] 一実施形態において、高周波電源３１は、信号発生器３１ｇ、Ｄ／Ａ変換器３１ｃ、及び増幅器３１ａを含んでいてもよい。信号発生器３１ｇは、ソース周波数ｆを有する高周波信号を発生する。信号発生器３１ｇは、プログ

ラム可能なプロセッサ又はＦＰＧＡ（Ｆｉｅｌｄ－Ｐｒｏｇｒａｍｍａｂｌｅ　Ｇａｔｅ　Ａｒｒａｙ）のようなプログラム可能なロジックデバイスから構成されていてもよい。

[0025]　信号発生器３１ｇの出力は、Ｄ／Ａ変換器３１ｃの入力に接続されている。Ｄ／Ａ変換器３１ｃは、信号発生器３１ｇからの高周波信号をアナログ信号に変換する。Ｄ／Ａ変換器３１ｃの出力は、増幅器３１ａの入力に接続されている。増幅器３１ａは、Ｄ／Ａ変換器３１ｃからのアナログ信号を増幅して、ソース高周波電力ＨＦを生成する。増幅器３１ａの増幅率は、制御部２から高周波電源３１に指定される。なお、高周波電源３１は、Ｄ／Ａ変換器３１ｃを含んでいなくてもよい。この場合には、信号発生器３１ｇの出力は、増幅器３１ａの入力に接続され、増幅器３１ａは、信号発生器３１ｇからの高周波信号を増幅して、ソース高周波電力ＨＦを生成する。

[0026]　バイアス電源３２は、基板支持部１１に電気的に結合されている。バイアス電源３２は、基板支持部１１内のバイアス電極に電気的に接続されており、電気バイアスＥＢをバイアス電極に供給するように構成されている。バイアス電極は、基台１１１０の導電性部材又はセラミック部材１１１１ａ内に設けられた少なくとも一つの電極であってもよい。バイアス電極は、高周波電極と共通であってもよい。電気バイアスＥＢがバイアス電極に供給されると、プラズマからのイオンが基板Ｗに引き付けられる。

[0027]　以下、図２と共に図３を参照する。図３は、電気バイアスの波形の例を示す図である。バイアス電源３２は、波形周期C_Wを有する電気バイアスＥＢをバイアス電極に周期的に与えるように構成されている。即ち、電気バイアスＥＢは、波形周期C_Wの繰り返しである複数の波形周期C_Wの各々においてバイアス電極に与えられる。波形周期C_Wは、バイアス周波数f_{EB}で規定される。バイアス周波数f_{EB}は、例えば５０ｋＨｚ以上、２７ＭＨｚ以下の周波数である。波形周期C_Wの時間長は、バイアス周波数の逆数である。

[0028]　電気バイアスＥＢは、バイアス周波数を有するバイアス高周波電力ＬＦであってもよい。即ち、電気バイアスＥＢは、その周波数がバイアス周波数で

ある正弦波状の波形を有していてもよい。この場合には、バイアス電源３２は、整合器３４を介して、バイアス電極に電気的に接続される。整合器３４の可変インピーダンスは、バイアス高周波電力ＬＦの負荷からの反射を低減するよう、設定される。

[0029] 或いは、電気バイアスＥＢは、電圧パルスＶＰを含んでいてもよい。電圧パルスＶＰは、波形周期C_W内においてバイアス電極に印加される。電圧パルスＶＰは、波形周期C_Wの時間長と同じ長さの時間間隔で周期的にバイアス電極に印加される。電圧パルスＶＰの波形は、矩形波、三角波、又は任意の波形であり得る。電圧パルスＶＰの電圧の極性は、基板Ｗとプラズマとの間に電位差を生じさせてプラズマからのイオンを基板Ｗに引き込むことができるように設定される。電圧パルスＶＰは、基板Ｗの電位が負電位である期間を波形周期C_Wが含むようにバイアス電極に印加される。バイアス電極に印加される電圧パルスＶＰは、負電位を有してもよく、正電位を有してもよく、或いは、正の電位と負の電位との間で変化する電位を有していてもよい。電圧パルスＶＰは、負の電圧のパルス又は負の直流電圧のパルスであってもよい。なお、電気バイアスＥＢが電圧パルスＶＰである場合には、プラズマ処理装置１は整合器３４を備えていなくてもよい。

[0030] 図２に示すように、プラズマ処理装置１は、センサ３５及び／又はセンサ３６を更に備えていてもよい。センサ３５は、ソース高周波電力ＨＦの負荷からの反射波のパワーレベルＰｒを測定するように構成されている。センサ３５は、例えば方向性結合器を含む。方向性結合器は、高周波電源３１と整合器３３との間に設けられていてもよい。センサ３５は、ソース高周波電力ＨＦの進行波のパワーレベルＰｆを更に測定するように構成されていてもよい。センサ３５によって測定された反射波のパワーレベルＰｒは、高周波電源３１に通知される。加えて、進行波のパワーレベルＰｆが、センサ３５から高周波電源３１に通知されてもよい。センサ３５は、反射率、即ち、Ｐｒ／Ｐｆを高周波電源３１に通知してもよい。反射率は、高周波電源３１においてパワーレベルＰｆ及びパワーレベルＰｒから特定されてもよい。なお、

センサ３５と高周波電源３１との間に検波回路３５ｂが接続されていてもよく、パワーレベルＰｆ及びパワーレベルＰｒは検波回路３５ｂの出力から特定されてもよい。

[0031] センサ３６は、電圧センサ及び電流センサを含む。センサ３６は、高周波電源３１と高周波電極とを互いに接続する給電路における電圧V_S及び電流I_Sを測定するように構成されている。ソース高周波電力ＨＦは、この給電路を経由して高周波電極に供給される。センサ３６は、高周波電源３１と整合器３３との間に設けられていてもよい。電圧V_S及び電流I_Sは、高周波電源３１に通知される。センサ３６は、電圧V_S及び電流I_Sから特定した高周波電源３１の負荷のインピーダンスZ_Lを高周波電源３１に通知してもよい。インピーダンスZ_Lは、高周波電源３１において電圧V_S及び電流I_Sから特定されてもよい。センサ３６は、電圧V_Sと電流I_Sの間の位相差θを高周波電源３１に通知してもよい。位相差θは、高周波電源３１において電圧V_S及び電流I_Sから特定されてもよい。センサ３６は、電圧V_S及び電流I_Sから特定した反射係数Γを高周波電源３１に通知してもよい。反射係数Γは、高周波電源３１において電圧V_S及び電流I_Sから特定されてもよい。

[0032] 直流電源３８は、上部電極に直流電圧ＤＣＳを印加するように構成されている。直流電源３８は、負の直流電圧を上部電極に印加してもよい。直流電源３８は、可変直流電源であってもよい。

[0033] 以下、図２及び図３と共に、図４～図１７を参照する。図４～図１７の各々は、一つの例示的実施形態に係る電源システムに関連する一例のタイミングチャートである。図４～図１７の各々には、ソース高周波電力ＨＦのパワーレベル及び電気バイアスＥＢのレベルが示されている。図４～図１７の各々において、電気バイアスＥＢの「ＯＮ」は、電気バイアスＥＢが供給されていることを示しており、電気バイアスＥＢの「ＯＦＦ」は、電気バイアスＥＢの供給が停止されていることを示している。図４～図１７の各々において、電気バイアスＥＢの「ＨＩＧＨ」は、「ＬＯＷ」で示されるレベルよりも高いレベルを有する電気バイアスＥＢが供給されていることを示している

。なお、電気バイアスＥＢがバイアス高周波電力ＬＦである場合には、電気バイアスＥＢのレベルは、バイアス高周波電力ＬＦのパワーレベルである。電気バイアスＥＢが電圧パルスＶＰを含む場合には、電気バイアスＥＢは、基板Ｗに引き付けられるイオンのエネルギーが高くなるほど、高いレベルを有する。電気バイアスＥＢが電圧パルスＶＰを含む場合には、電気バイアスＥＢのレベルは、基準電圧（例えば０Ｖ）に対する電圧パルスＶＰの負方向への電圧レベルの絶対値であってもよい。また、図１４においては、デューティ比D_{VP}が更に示されている。デューティ比D_{VP}は、波形周期C_Wにおいて電圧パルスＶＰが供給されている時間長が占める時間長の割合である。また、図１５においては、バイアス周波数f_{EB}が更に示されている。また、図１６及び図１７においては、直流電圧ＤＣＳが更に示されている。図１６及び図１７の各々において、直流電圧ＤＣＳの「ＯＮ」は、直流電圧ＤＣＳが供給されていることを示しており、直流電圧ＤＣＳの「ＯＦＦ」は、直流電圧ＤＣＳの供給が停止されていることを示している。図１６及び図１７の各々において、直流電圧ＤＣＳの「ＨＩＧＨ」は、「ＬＯＷ」で示されるレベルよりも高いレベルを有する直流電圧ＤＣＳが供給されていることを示している。なお、直流電圧ＤＣＳのレベルは、その基準電圧レベル（例えば０Ｖ）に対する直流電圧ＤＣＳの負方向への電圧レベルの絶対値であってもよい。

[0034]　図４～図１７に示すように、高周波電源３１からのソース高周波電力ＨＦのパワーレベルは、変調される。高周波電源３１からのソース高周波電力ＨＦのパワーレベルは、電源制御部によって指定される。電源制御部は、図４～図１７に示すように、変調周期C_Mの繰り返しにおいてソース高周波電力ＨＦのパワーレベルを周期的に変調するように構成されている。電源制御部は、高周波電源３１内に設けられていてもよく、高周波電源３１の外部に設けられていてもよい。信号発生器３１ｇが電源制御部として機能してもよく、高周波電源３１内の別のデバイスが電源制御部として機能してもよい。或いは、制御部２が、電源制御部として機能してもよい。

[0035]　また、図４～図１７に示すように、電源制御部は、変調周期C_Mの繰り返し

において電気バイアスＥＢの条件を周期的に変調するように構成されていてもよい。電源制御部は、変調周期C_Mの繰り返しにおいて電気バイアスＥＢのレベルを周期的に変調してもよい。図１４に示すように、電源制御部は、変調周期C_Mの繰り返しにおいてデューティ比D_{VP}を周期的に変調してもよい。図１５に示すように、電源制御部は、変調周期C_Mの繰り返しにおいてバイアス周波数f_{EB}を周期的に変調してもよい。さらに、電源制御部は、図１６及び図１７に示すように、変調周期C_Mの繰り返しにおいて直流電圧ＤＣＳの電圧レベルを周期的に変調してもよい。

[0036] 図４～図１７に示すように、変調周期C_Mは複数の副期間P_Sを含む。これらの図において、P_Sに続く括弧内の数値は、変調周期C_M内の副期間P_Sの順番を表している。図４～図１７に示すように、変調周期C_Mは、ソース高周波電力ＨＦのパワーレベルがゼロよりも大きく且つ互いに異なるレベルに設定される少なくとも二つの副期間P_Sを含む。図４～図１５に示す例では、複数の副期間P_Sの各々は、ソース高周波電力ＨＦのパワーレベル及び電気バイアスＥＢの条件の各々が同一の設定のまま継続する期間である。図１６及び図１７の各々に示す例では、複数の副期間P_Sの各々は、ソース高周波電力ＨＦのパワーレベル、電気バイアスＥＢの条件、及び直流電源３８の出力電圧レベル（即ち、直流電圧ＤＣＳの電圧レベル）の各々が同一の設定のまま継続する期間である。

[0037] 複数の副期間P_Sの各々は、その中でソース高周波電力ＨＦが０ワットよりも大きいパワーレベルを有する場合に、その開始時点から続くフィードバック期間P_F［１］（第１のフィードバック期間）を含む。図４～図１２に示すように、複数の副期間P_Sの各々は、フィードバック期間P_F［１］に続く残りの期間としてフィードバック期間P_F［２］（第２のフィードバック期間）を更に含んでいてもよい。或いは、複数の副期間P_Sのうち少なくとも一つの副期間は、フィードバック期間P_F［１］だけを含んでいてもよい。即ち、複数の副期間P_Sのうち少なくとも一つの副期間は、フィードバック期間P_F［１］と一致していてもよい。図１３に示す例では、副期間P_S［１］はフィー

ドバック期間P_F［１］だけを含んでいる。或いは、複数の副期間P_Sの各々は、フィードバック期間P_F［１］だけを含んでいてもよい。即ち、複数の副期間P_Sの各々は、フィードバック期間P_F［１］と一致していてもよい。

[0038] 高周波電源３１は、ソース高周波電力ＨＦの負荷からの反射を抑制するために、変調周期C_M内の各位相期間P_Hのためのソース周波数ｆを調整する。ソース周波数ｆは、電源制御部から高周波電源３１に指定される。以下、図２～図１７と共に、図１８の（ａ）及び図１８の（ｂ）を参照しつつ、ソース周波数ｆの調整について説明する。図１８の（ａ）は、一つの例示的実施形態に係る制御方法の流れ図であり、図１８の（ｂ）は、図１８の（ａ）に示す工程ＳＴａの流れ図である。図１８の（ａ）に示す制御方法（以下、「方法ＭＴ」という）において、電源システム３０の各部は、電源制御部によって制御される。

[0039] 図１８の（ａ）に示すように、方法ＭＴは、工程ＳＴａ及び工程ＳＴｂを含んでいる。工程ＳＴａでは、プラズマ処理装置１のチャンバ１０内でプラズマを生成するために高周波電源３１からソース高周波電力ＨＦが高周波電極に供給される。また、工程ＳＴｂにおいて、基板支持部１１上の基板Ｗにプラズマからイオンを引き込むために、波形周期C_Wの時間間隔で繰り返して基板支持部１１（即ち、バイアス電極）に電気バイアスＥＢが供給される。

[0040] 図１８の（ｂ）に示すように、工程ＳＴａは、工程ＳＴｃ及び工程ＳＴｄを含む。工程ＳＴｃでは、図４～図１７の例のように、変調周期C_Mの繰り返しにおいてソース高周波電力ＨＦのパワーレベルが周期的に変調される。なお、工程ＳＴｂでは、変調周期C_Mの繰り返しにおいて電気バイアスＥＢのレベルが周期的に変調されてもよい。また、図１６及び図１７に示すように、変調周期C_Mの繰り返しにおいて直流電圧ＤＣＳのレベルが周期的に変調されてもよい。

[0041] 工程ＳＴｄでは、各変調周期C_M内の各位相期間P_Hのためのソース周波数ｆが、ソース高周波電力ＨＦの反射の度合いを抑制するように調整される。以下、工程ＳＴｄにおける処理についてより詳細に説明する。以下の説明に

おいて、変調周期C_M［ｙ］は、変調周期C_Mの繰り返しにおけるｙ番目の変調周期C_Mを表す。位相期間P_H［ｋ］は、変調周期C_M内のｋ番目の位相期間を表す。また、位相期間P_H［ｊ］は、波形周期C_W内のｊ番目の位相期間を表す。また、波形周期C_W［ｍ］は、フィードバック期間P_F［１］及びフィードバック期間P_F［２］の各々におけるｍ番目の波形周期C_Wを表す。

[0042] ＜１番目の変調周期～Y_1番目の変調周期におけるソース周波数の設定＞

[0043] 変調周期C_M［１］～変調周期C_M［Y_1］の各々における各フィードバック期間P_F［１］の中の位相期間P_H［ｋ］では、その位相期間のために予め準備された周波数が、ソース周波数ｆとして用いられる。或いは、変調周期C_M［１］～変調周期C_M［Y_1］の各々におけるフィードバック期間P_F［１］の中の波形周期C_W［ｍ］内の複数の位相期間P_Hでは、その波形周期のために予め準備された周波数セットに含まれる複数の周波数がそれぞれ、ソース周波数ｆとして用いられる。なお、「Y_1」は、１以上の整数であり、例えば５である。

[0044] 変調周期C_M［１］～変調周期C_M［Y_1］の各々におけるフィードバック期間P_F［２］の中の波形周期C_W［ｍ］内の複数の位相期間P_Hの各々では、後述する第２のフィードバックによって決定される周波数が、ソース周波数ｆとして用いられてもよい。或いは、変調周期C_M［１］～変調周期C_M［Y_1］の各々におけるフィードバック期間P_F［２］内の複数の波形周期C_Wの各々の中の複数の位相期間P_Hでは、直前のフィードバック期間P_F［１］内の最終の波形周期C_Wの中の複数の位相期間P_Hにおいて用いられた複数のソース周波数ｆがそれぞれ用いられてもよい。

[0045] ＜Y_2番目の変調周期以降の変調周期におけるソース周波数の設定＞

[0046] Y_2番目の変調周期C_M［Y_2］以降の各変調周期C_Mにおけるフィードバック期間P_F［１］の中の位相期間P_H［ｋ］では、後述する第１のフィードバックによって決定される周波数が、ソース周波数ｆとして用いられる。或いは、変調周期C_M［Y_2］以降の各変調周期C_Mにおけるフィードバック期間P_F［１］の中の波形周期C_W［ｍ］内の複数の位相期間P_Hの各々では、後述す

る第１のフィードバックによって決定される周波数が、ソース周波数ｆとして用いられる。

[0047] 変調周期C_M［Y_2］以降の各変調周期C_Mにおけるフィードバック期間P_F［２］の中の波形周期C_W［ｍ］内の複数の位相期間P_Hの各々では、後述する第２のフィードバックによって決定される周波数が、ソース周波数ｆとして用いられてもよい。或いは、変調周期C_M［Y_2］以降の各変調周期C_Mにおけるフィードバック期間P_F［２］内の複数の波形周期C_Wの各々の中の複数の位相期間P_Hでは、直前のフィードバック期間P_F［１］内の最終の波形周期C_Wの中の複数の位相期間P_Hにおいて用いられた複数のソース周波数ｆがそれぞれ用いられてもよい。

[0048] なお、「Y_2」は、Y_1＋１であり得る。或いは、変調周期C_M［Y_1］から変調周期C_M［Y_2］までの間に、遅延時間が設けられてもよい。遅延時間は、数秒程度であってもよい。遅延時間が設けられる場合には、変調周期C_M［Y_1］の直後、変調周期C_M［Y_2］の直前までの各変調周期C_Mにおける複数の位相期間P_Hのソース周波数としては、変調周期C_M［Y_1］における複数の位相期間P_Hで用いられた複数のソース周波数ｆがそれぞれ用いられてもよい。

[0049] 以下、第１のフィードバック及び第２のフィードバックについて、図１９及び図２０を参照しつつ説明する。図１９は、図１８の（ｂ）に示す工程ＳＴｄにおける処理の例を示す流れ図である。図２０は、図１９に示す工程ＳＴ７における処理の例を示す流れ図である。

[0050] 第１のフィードバックでは、変調周期C_Mの繰り返し、即ち複数の変調周期C_Mが周期系列C_Sを形成する。第２のフィードバックでは、変調周期C_M［ｙ］内のフィードバック期間P_F［２］内の複数の波形周期C_Wとそのフィードバック期間P_F［２］の直前のI_{ref}個の波形周期C_Wが周期系列C_Sを形成する。第１のフィードバックでは、変調周期C_Mの位相期間P_H［ｋ］のソース周波数ｆが、先行する変調周期C_Mの系列における位相期間P_H［ｋ］のソース周波数ｆの変化とソース高周波電力ＨＦの反射の度合いの変化に基づき、

反射の度合いを抑制するように、決定される。第２のフィードバックでは、変調周期C_M［ｙ］内のフィードバック期間P_F［２］内の波形周期C_W［ｍ］における位相期間P_H［ｊ］のソース周波数ｆが、同一のフィードバック期間P_F［２］内において先行する複数の波形周期C_Wの系列における位相期間P_H［ｊ］のソース周波数ｆの変化とソース高周波電力ＨＦの反射の度合いの変化に基づき、反射の度合いを抑制するように、決定される。第１のフィードバック及び第２のフィードバックの各々においてソース周波数ｆは、電源制御部によって決定される。

[0051] 以下、第１のフィードバックにおける変調周期C_Mの系列における位相期間P_H［ｋ］及び第２のフィードバックにおける波形周期C_Wの系列における位相期間P_H［ｊ］の各々を、周期系列C_Sの位相期間P_H［ｎ］として参照する。また、第１のフィードバックにおける変調周期C_M及び第２のフィードバックにおける波形周期C_Wの各々を周期C_Rとして参照する。

[0052] 図１９に示すように、工程ＳＴｄは、工程ＳＴ１～工程ＳＴ７を含んでいてもよい。工程ＳＴ１～工程ＳＴ７は、周期系列C_Sにおける各周期C_R内の各位相期間P_Hに対して行われる。

[0053] 工程ＳＴ１では、電源制御部は、ｉを$I_{ini}-I_{ref}$に設定する。「ｉ」は、周期系列C_Sに含まれる周期C_Rの順番を表している。第１のフィードバックにおいて、「I_{ini}」は、初期的には、上述の「Y_2」である。第１のフィードバックでは、「$I_{ini}-I_{ref}$」は、周期系列C_Sに含まれるI_{ini}番目の周期C_Rの一つ前の周期C_Rの順番を表しており、「I_{ref}」は１である。また、第２のフィードバックにおいて、「I_{ini}」は、初期的には、「１」である。第２のフィードバックでは、「$I_{ini}-I_{ref}$」は、周期系列C_Sに含まれるI_{ini}番目の周期C_RのI_{ref}個前の周期C_Rの順番を表しており、「I_{ref}」は１以上の整数である。第２のフィードバックにおいて、「I_{ref}」は、１であってもよく、２であってもよく、２より大きい整数であってもよい。なお、第２のフィードバックにおいて、I_{ref}が２以上の場合には、第２のフィードバックにおける各位相期間P_Hのためのソース周波数の決定のための処理

時間として比較的長い処理時間が確保される。

[0054] 続く工程ＳＴ２では、電源制御部は、反射の度合いP_d［ｉ，ｎ］が周波数変更条件を満たすほどに大きいか否かを判定する。なお、P_d［ｉ，ｎ］は、周期系列C_Sに含まれるｉ番目の周期C_R［ｉ］内の位相期間P_H［ｎ］の反射の度合いを表している。工程ＳＴ２において、周波数変更条件は、反射の度合いP_d［ｉ，ｎ］が閾値よりも大きい場合に満たされる。工程ＳＴ２において、周波数変更条件は、P_d［ｉ，ｎ］が第１の閾値P_{th1}［ｎ］よりも大きい場合に満たされてもよい。なお、複数の位相期間P_Hそれぞれのための第１の閾値P_{th1}は、互いに同一であってもよく、異なっていてもよい。

[0055] 工程ＳＴ２において周波数変更条件が満たされていると判定された場合には、電源制御部は、工程ＳＴ３において、ソース周波数ｆ［ｉ＋l_{ref}，ｎ］を、式（１）により設定する。

$$f[i+l_{ref}, n] = f[i, n] + \Delta f[i, n] \quad \cdots (1)$$

なお、ｆ［ｉ，ｎ］は、周期系列C_Sに含まれるｉ番目の周期C_R［ｉ］内の位相期間P_H［ｎ］のソース周波数ｆを表している、また、Δｆ［ｉ，ｎ］は、シフト値であり、その初期値は事前に設定されている。

[0056] 一方、工程ＳＴ２において周波数変更条件が満たされていないと判定された場合には、電源制御部は、工程ＳＴ４において、ソース周波数ｆ［ｉ＋l_{ref}，ｎ］を、式（２）により設定する。

$$f[i+l_{ref}, n] = f[i, n] \quad \cdots (2)$$

[0057] 次いで、工程ＳＴ５～工程ＳＴ７が行われる。工程ＳＴ５～工程ＳＴ７は、終了の指示があるまで繰り返される。工程ＳＴ５は、工程ＳＴ５ａ、工程ＳＴ５ｂ、及び工程ＳＴ５ｃを含む。工程ＳＴ５ａでは、l_{ref}が１より大きいか否かが判定される。l_{ref}が１である場合には、処理は工程ＳＴ５ｃに進む。l_{ref}が１より大きい場合には、工程ＳＴ５ｂにおいて、電源制御部は、ｆ［ｉ＋ｈ、ｎ］をｆ［ｉ，ｎ］に設定する。工程ＳＴ５ｂの処理は、ｈを１からl_{ref}－１まで１ずつ増分しつつ行われる。そして、処理は工程ＳＴ５ｃに進む。

[0058] 工程ＳＴ５ｃでは、電源制御部は、ｉを１＋I_{ref}だけ増分する。続く工程ＳＴ６では、電源制御部は、周期系列C_Sにおける周期C_R［ｉ］内の位相期間P_H［ｎ］において、ソース周波数ｆ［ｉ，ｎ］を有するソース高周波電力ＨＦを、高周波電源３１から供給する。

[0059] 続く工程ＳＴ７では、電源制御部は、反射の度合いP_d［ｉ，ｎ］に応じて周期系列C_Sにおける後の周期C_R［ｉ＋I_{ref}］内の位相期間P_H［ｎ］のためのソース周波数ｆ［ｉ＋I_{ref}，ｎ］を決定する。

[0060] 図２０に示すように、工程ＳＴ７は、工程ＳＴ７０１で開始する。工程ＳＴ７０１では、電源制御部は、反射の度合いP_d［ｉ，ｎ］が増加傾向であるか否かを判定する。工程ＳＴ７０１において、反射の度合いP_d［ｉ，ｎ］は、P_d［ｉ，ｎ］＞P_d［ｉ－I_{ref}，ｎ］が満たされる場合に、増加傾向であると判定されてもよい。或いは、周期系列C_Sにおけるｉ番目の周期C_R［ｉ］までのＸ個の周期C_Rにわたって位相期間P_H［ｎ］における反射の度合いが増加傾向である場合に、反射の度合いP_d［ｉ，ｎ］が増加傾向であると判定されてもよい。ここで、「Ｘ」は、２以上の整数である。周期系列C_Sにおけるｉ番目の周期C_R［ｉ］までのＸ個の周期C_Rは、C_R［ｉ－ｘ×I_{ref}］で表され、「ｘ」は、０から（Ｘ－１）までの整数である。

[0061] 工程ＳＴ７０１において反射の度合いP_d［ｉ，ｎ］が増加傾向でないと判定された場合には、電源制御部は、工程ＳＴ７０２において、シフト値Δｆ［ｉ，ｎ］の符号を維持する。即ち、電源制御部は、工程ＳＴ７０２において、シフト値Δｆ［ｉ，ｎ］を式（３）により設定する。

$$\Delta f[i, n] = \Delta f[i - I_{ref}, n] \quad \cdots (3)$$

[0062] 一方、工程ＳＴ７０１において反射の度合いP_d［ｉ，ｎ］が増加傾向であると判定された場合には、電源制御部は、工程ＳＴ７０３において、シフト値Δｆ［ｉ，ｎ］の符号を変更する。即ち、電源制御部は、工程ＳＴ７０３において、シフト値Δｆ［ｉ，ｎ］を式（４）により設定する。

$$\Delta f[i, n] = -\Delta f[i - I_{ref}, n] \quad \cdots (4)$$

[0063] 続く工程ＳＴ７０４では、電源制御部は、シフト方向変更条件を満たすか

否かを判定する。シフト方向変更条件は、ソース周波数ｆ［ｉ，ｎ］と周期C_R［ｉ］内の（ｎ－ｕ）番目の位相期間P_H［ｎ－ｕ］のソース周波数ｆ［ｉ，ｎ－ｕ］との差の絶対値及びソース周波数ｆ［ｉ，ｎ］と周期C_R［ｉ］内の（ｎ＋ｕ）番目の位相期間P_H［ｎ＋ｕ］のソース周波数ｆ［ｉ，ｎ＋ｕ］との差の絶対値の各々と所定値との比較の結果、ソース周波数の変化が大きいと判断され、且つ、ソース周波数ｆ［ｉ，ｎ－ｕ］及びソース周波数ｆ［ｉ，ｎ＋ｕ］の双方がソース周波数ｆ［ｉ，ｎ］よりも大きいか、小さい場合に、満たされる。例えば、シフト方向変更条件は、ソース周波数ｆ［ｉ，ｎ］とソース周波数ｆ［ｉ，ｎ－ｕ］との差の絶対値及びソース周波数ｆ［ｉ，ｎ］とソース周波数ｆ［ｉ，ｎ＋ｕ］との差の絶対値の各々が所定値よりも大きく、且つ、ソース周波数ｆ［ｉ，ｎ－ｕ］及びソース周波数ｆ［ｉ，ｎ＋ｕ］の双方がソース周波数ｆ［ｉ，ｎ］よりも大きいか、小さい場合に、満たされる。

[0064] 工程ＳＴ７０４において、ｕは、１であってもよく、１よりも大きい数値であってもよい。或いは、工程ＳＴ７０４において、シフト方向変更条件は、ｕが１から１より大きい数値の範囲内のいずれかの数値であるときに満たされてもよい。

[0065] 工程ＳＴ７０４においてシフト方向変更条件が満たされていると判定された場合には、電源制御部は、工程ＳＴ７０５において、シフト値Δｆ［ｉ，ｎ］の符号を変更する。即ち、電源制御部は、工程ＳＴ７０５において、シフト値Δｆ［ｉ，ｎ］を、式（５）により設定する。

$$\Delta f[i, n] = |\Delta f[i - I_{ref}, n]| * \mathrm{sign}(f[i, n] - f[i, n-u]) \quad \cdots (5)$$

ここで、ｓｉｇｎ（）は、括弧内の数値の符号を返す関数である。また、ｕは、シフト方向変更条件を満たすときのｕの値である。

[0066] 一方、工程ＳＴ７０４においてシフト方向変更条件が満たされないと判定された場合には、電源制御部は、工程ＳＴ７０６において、シフト値Δｆ［ｉ，ｎ］の符号を維持する。即ち、電源制御部は、工程ＳＴ７０６において

、シフト値Δｆ［ｉ，ｎ］を、式（６）により設定する。

$$\Delta f[i, n] = \Delta f[i, n] \quad \cdots (6)$$

[0067] 続く工程ＳＴ７０７では、電源制御部は、周期系列C_Sにおける周期C_R［ｉ］内の位相期間P_H［ｎ］におけるソース高周波電力ＨＦの反射の度合いP_d［ｉ，ｎ］が周波数変更条件を満たすほどに大きいか否かを判定する。工程ＳＴ７０７において、周波数変更条件は、周期系列C_Sにおける周期C_R［ｉ］内の位相期間P_H［ｎ］におけるソース高周波電力ＨＦの反射の度合いP_d［ｉ，ｎ］が閾値よりも大きい場合に満たされる。

[0068] 工程ＳＴ７０７において周波数変更条件が満たされていると判定された場合には、電源制御部は、工程ＳＴ７０８において、周期系列C_Sにおける後の周期C_R［$i+l_{ref}$］内の位相期間P_H［ｎ］のためのソース周波数ｆ［$i+l_{ref}$，ｎ］を、式（７）により設定する。

$$f[i+l_{ref}, n] = f[i, n] + \Delta f[i, n] \quad \cdots (7)$$

[0069] 一方、工程ＳＴ７０７において周波数変更条件が満たされていない場合には、電源制御部は、工程ＳＴ７０９において、ソース周波数ｆ［$i+l_{ref}$，ｎ］を、式（８）により設定する。

$$f[i+l_{ref}, n] = f[i, n] \quad \cdots (8)$$

[0070] 一実施形態では、周期系列C_S内の何れかの周期C_Rにおける位相期間P_H［ｎ］での反射の度合いと第１の閾値P_{th1}［ｎ］との間の工程ＳＴ７０７における比較の結果、当該反射の度合いが小さいと判断された場合には、以後の工程ＳＴ７０７において周期C_Rにおける位相期間P_H［ｎ］での反射の度合いと第２の閾値P_{th2}［ｎ］との比較の結果、当該反射の度合いが大きいと判定されるまで、工程ＳＴ７０７において周波数変更条件が満たされなくてもよい。第２の閾値P_{th2}［ｎ］は、第１の閾値P_{th1}［ｎ］以上である。第２の閾値P_{th2}［ｎ］は、第１の閾値P_{th1}［ｎ］よりも大きくてもよい。なお、複数の位相期間P_H［ｎ］それぞれのための第２の閾値P_{th2}［ｎ］は、互いに同一であってもよく、異なっていてもよい。

[0071] 具体的には、周期系列C_S内の何れかの周期C_Rにおける位相期間P_H［ｎ］

での反射の度合いが工程ＳＴ７０７において第１の閾値P_{th1}［ｎ］以下であると判断された場合には、以後に工程ＳＴ７０７において位相期間P_H［ｎ］での反射の度合いと比較される閾値として、第２の閾値P_{th2}［ｎ］が用いられてもよい。そして、周期系列C_S内の何れかの波形周期における位相期間P_H［ｎ］での反射の度合いが工程ＳＴ７０７において第２の閾値P_{th2}［ｎ］よりも大きいと判断された場合には、以後に工程ＳＴ７０７において位相期間P_H［ｎ］での反射の度合いと比較される閾値として、第１の閾値P_{th1}［ｎ］が用いられてもよい。

[0072] 方法ＭＴでは、反射の度合いP_d［ｉ，ｎ］に応じてソース周波数ｆ［ｉ＋l_{ref}，ｎ］を調整することにより、ソース高周波電力ＨＦの反射が抑制される。また、シフト方向変更条件が満たされる場合、即ち、各周期C_R内で大きなソース周波数の増加又は減少に続いて大きなソース周波数の減少又は増加をもたらすソース周波数の大きな変動が生じ得る場合には、シフト値の符号が変更される。したがって、方法ＭＴによれば、周期C_R内でのソース周波数の大きな変動が抑制される。また、上述したように、周波数変更条件の判定において第１の閾値P_{th1}及び第２の閾値P_{th2}を用いることにより、ソース周波数が過度に変更されることが抑制される。さらに、方法ＭＴを繰り返す場合には、ソース周波数の時間変化の高い再現性が達成され得る。なお、図２０に示す工程ＳＴ７は、工程ＳＴ７０４～工程ＳＴ７０６を含んでいなくてもよい。

[0073] 以下、図２１及び図２２を参照して、工程ＳＴｄにおける処理の別の例を説明する。図２１は、図１８の（ｂ）に示す工程ＳＴｄにおける処理の別の例を示す流れ図である。図２２は、図２１に示す工程ＳＴ７ａにおける処理の例を示す流れ図である。以下、図２１及び図２２に示す工程ＳＴｄにおける処理について、図１９及び図２０に示す処理に対する相違点の観点から説明する。図２１及び図２２に示す処理では、電源制御部は、シフト値Δｆ［ｉ，ｎ］を反射の度合いP_d［ｉ，ｎ］の大きさに応じた値に設定する。

[0074] 具体的には、図２１に示すように、電源制御部は、工程ＳＴ１と工程ＳＴ

３との間の工程において、ソース周波数ｆ［ｉ，ｎ］及び係数α［ｉ，ｎ］を設定する。工程ＳＴ１と工程ＳＴ３との間の工程では、ソース周波数ｆ［ｉ，ｎ］及び係数α［ｉ，ｎ］、即ち、ソース周波数ｆ［１，ｎ］及び係数α［１，ｎ］は、初期的には事前に設定されたそれぞれの数値に設定される。

[0075] 工程ＳＴ２において周波数変更条件が満たされていると判定された場合には、電源制御部は、工程ＳＴ２と工程ＳＴ３の間の工程ＳＴ３ａにおいて、シフト値Δｆ［ｉ，ｎ］を式（９）により設定する。

$$\Delta f[i,n]=\alpha[i,n]*(P_d[i,n]-P_{th1}[n]) \quad \cdots (9)$$

ここで、係数α［１，ｎ］は、事前に設定された数値である。

[0076] そして、工程ＳＴ６に続く工程ＳＴ７ａにおいて、電源制御部は、反射の度合い$P_d[i,n]$に応じて周期系列C_Sにおける後の周期$C_R[i+l_{ref}]$内の位相期間$P_H[n]$のためのソース周波数$f[i+l_{ref},n]$を決定する。

[0077] 図２２に示すように、工程ＳＴ７ａは、工程ＳＴ７０１で開始する。工程ＳＴ７０１において反射の度合い$P_d[i,n]$が増加傾向でないと判定された場合には、電源制御部は、工程ＳＴ７０２ａにおいて、係数α［ｉ，ｎ］の符号を維持する。即ち、電源制御部は、工程ＳＴ７０２ａにおいて、係数α［ｉ，ｎ］を式（１０）により設定する。

$$\alpha[i,n]=\alpha[i-l_{ref},n] \quad \cdots (10)$$

[0078] 一方、工程ＳＴ７０１において反射の度合い$P_d[i,n]$が増加傾向であると判定された場合には、電源制御部は、工程ＳＴ７０３ａにおいて、係数α［ｉ，ｎ］の符号を変更する。即ち、電源制御部は、工程ＳＴ７０３ａにおいて、係数α［ｉ，ｎ］を式（１１）により設定する。

$$\alpha[i,n]=-\alpha[i-l_{ref},n] \quad \cdots (11)$$

[0079] 図２２に示すように、工程ＳＴ７０４においてシフト方向変更条件が満たされていると判定された場合には、電源制御部は、工程ＳＴ７０５ａにおい

て、係数α［ｉ，ｎ］の符号を変更する。即ち、電源制御部は、工程ＳＴ７０５ａにおいて、係数α［ｉ，ｎ］を、式（１２）により設定する。

$\alpha[i, n] = |\alpha[i - l_{ref}, n]| * \mathrm{sign}(f[i, n] - f[i, n-u])$ …（１２）

ここで、ｕは、シフト方向変更条件を満たすときのｕの値である。

[0080] 一方、工程ＳＴ７０４においてシフト方向変更条件が満たされないと判定された場合には、電源制御部は、工程ＳＴ７０６ａにおいて、係数α［ｉ，ｎ］の符号を維持する。即ち、電源制御部は、工程ＳＴ７０６ａにおいて、係数α［ｉ，ｎ］を、式（１３）により設定する。

$\alpha[i, n] = \alpha[i, n]$ …（１３）

[0081] 図２２に示すように、工程ＳＴ７０７において周波数変更条件が満たされていると判定された場合には、工程ＳＴ７０７と工程ＳＴ７０８との間の工程ＳＴ７０８ａにおいて、電源制御部は、シフト値Δｆ［ｉ，ｎ］を式（１４）により設定する。

$\Delta f[i, n] = \alpha[i, n] * (P_d[i, n] - P_{th1}[n])$ …（１４）

[0082] 図２２の例においても、周期系列C_S内の何れかの周期C_Rにおける位相期間P_H［ｎ］での反射の度合いと第１の閾値P_{th1}［ｎ］との間の工程ＳＴ７０７における比較の結果、当該反射の度合いが小さいと判断された場合には、以後の工程ＳＴ７０７において周期C_Rにおける位相期間P_H［ｎ］での反射の度合いと第２の閾値P_{th2}［ｎ］との比較の結果、当該反射の度合いが大きいと判定されるまで、工程ＳＴ７０７において周波数変更条件が満たされなくてもよい。第２の閾値P_{th2}［ｎ］は、第１の閾値P_{th1}［ｎ］以上である。第２の閾値P_{th2}［ｎ］は、第１の閾値P_{th1}［ｎ］よりも大きくてもよい。なお、複数の位相期間P_H［ｎ］それぞれのための第２の閾値P_{th2}［ｎ］は、互いに同一であってもよく、異なっていてもよい。

[0083] 具体的には、周期系列C_S内の何れかの周期C_Rにおける位相期間P_H［ｎ］での反射の度合いが工程ＳＴ７０７において第１の閾値P_{th1}［ｎ］以下であ

ると判断された場合には、以後に工程ＳＴ７０７において位相期間P_H［ｎ］での反射の度合いと比較される閾値として、第２の閾値P_{th2}［ｎ］が用いられてもよい。そして、周期系列C_S内の何れかの波形周期における位相期間P_H［ｎ］での反射の度合いが工程ＳＴ７０７において第２の閾値P_{th2}［ｎ］よりも大きいと判断された場合には、以後に工程ＳＴ７０７において位相期間P_H［ｎ］での反射の度合いと比較される閾値として、第１の閾値P_{th1}［ｎ］が用いられてもよい。なお、図２２に示す工程ＳＴ７ａは、工程ＳＴ７０４、工程ＳＴ７０５ａ、及び工程ＳＴ７０６ａを含んでいなくてもよい。

[0084] 以下、反射の度合いP_d［ｉ，ｎ］について説明する。反射の度合いP_d［ｉ，ｎ］は、周期系列C_S内の周期ＣＲ［ｉ］内の位相期間P_H［ｎ］における複数のサンプル時点のそれぞれでの複数の評価値を取得することにより得られる。複数の評価値は、複数のサンプル時点のそれぞれにおけるソース高周波電力ＨＦの反射の大きさを反映する。複数の位相期間P_Hそれぞれにおけるサンプル時点の個数は、同一であり得る。

[0085] 反射の度合いP_d［ｉ，ｎ］は、周期系列C_S内の周期ＣＲ［ｉ］内の位相期間P_H［ｎ］における複数のサンプル時点それぞれでの評価値の代表値である。代表値は、複数の評価値の平均値、複数の評価値の加重平均値、又は複数の評価値の最大値等である。複数の評価値の各々は、センサ３５，３６によって取得される測定値のように、反射波のパワーレベルＰｒ、反射率（即ち、Ｐｒ／Ｐｆ）、インピーダンスZ_Lと特性インピーダンスとの間の差の大きさ、又は反射係数Γであってもよい。複数の評価値の各々は、整合器３３の入口（即ち、高周波電源３１側の整合器３３の入力）又は高周波電源３１から見たソース高周波電力ＨＦの伝送系の抵抗値と所定の抵抗値（５０Ω等）との間の差であってもよい。或いは、複数の評価値の各々は、ソース高周波電力ＨＦの伝送系又は整合器の入口における電圧V_S及び電流I_Sとの間の位相差と所定の値（９０度等）との間の差であってもよい。

[0086] 一実施形態では、反射の度合いP_d［ｉ，ｎ］は、周期系列C_S内の周期ＣＲ［ｉ］内の位相期間P_H［ｎ］における複数のサンプル時点それぞれでの評

価値の加重平均値である。加重平均値を求めるために、電源制御部は、複数の評価値に窓関数を掛けることにより得られる複数の値の平均値を求める。窓関数は、位相期間P_H［ｎ］の中央からの時間差に応じて減少する重みを有する。窓関数としては、三角窓、ガウス窓、ハニング窓、又はハミング窓等が用いられる。かかる窓関数を用いた加重平均値によれば、各位相期間P_Hにおけるソース高周波電力ＨＦの位相に起因して生じ得る反射の度合いP_d［ｉ，ｎ］の計算値のばらつきを抑制することが可能である。

[0087] ここで、図２３を参照する。図２３は、一つの例示的実施形態に係る電源システムに関連するタイミングチャートである。高周波電源３１は、波形周期C_Wの全期間にわたって連続的にソース高周波電力ＨＦを供給してもよい。或いは、高周波電源３１は、波形周期C_W内でソース高周波電力ＨＦをパルス化してもよい。即ち、高周波電源３１は、波形周期C_W内でソース高周波電力ＨＦのパルスを供給してもよい。

[0088] 以上、種々の例示的実施形態について説明してきたが、上述した例示的実施形態に限定されることなく、様々な追加、省略、置換、及び変更がなされてもよい。また、異なる実施形態における要素を組み合わせて他の実施形態を形成することが可能である。

[0089] ここで、本開示に含まれる種々の例示的実施形態を、以下の［Ｅ１］～［Ｅ１０］に記載する。

[0090] ［Ｅ１］

チャンバと、

前記チャンバ内に配置された基板支持部と、

電源システムと、

を備え、

前記電源システムは、

前記チャンバ内でプラズマを生成するために、ソース高周波電力を供給するように構成された高周波電源と、

前記基板支持部上の基板に前記プラズマからイオンを引き込むために、

波形周期の時間間隔で繰り返して前記基板支持部に電気バイアスを供給するように構成されたバイアス電源と、

電源制御部と、

を含み、

前記電源制御部は、変調周期の繰り返しにおいて前記ソース高周波電力のパワーレベルを周期的に変調するように構成されており、

前記変調周期は複数の副期間を含み、該複数の副期間は前記ソース高周波電力のパワーレベルがゼロよりも大きく且つ互いに異なるレベルに設定される少なくとも二つの副期間を含み、該少なくとも二つの副期間の各々はその開始時点から続くフィードバック期間を含み、

前記電源制御部は、前記フィードバック期間に含まれる前記変調周期内のｋ番目の位相期間のための前記ソース高周波電力のソース周波数を、先行する前記変調周期の繰り返しにおける前記ｋ番目の位相期間の前記ソース周波数の変化と前記ソース高周波電力の反射の度合いの変化に基づき、該ソース高周波電力の該反射の度合いを抑制するように、調整するよう構成されている、

プラズマ処理装置。

[0091] ［Ｅ２］

前記電源システムは、前記複数の副期間の各々において前記ソース高周波電力のパワーレベル及び前記電気バイアスの条件の各々を同一の設定のまま継続するように構成されている、Ｅ１に記載のプラズマ処理装置。

[0092] ［Ｅ３］

前記電源システムは、前記基板支持部の上方に配置された上部電極に電気的に接続された直流電源を更に含み、

前記電源システムは、前記複数の副期間の各々において前記ソース高周波電力のパワーレベル、前記電気バイアスの条件、及び前記直流電源の出力電圧レベルの各々を同一の設定のまま継続するように構成されている、

Ｅ１に記載のプラズマ処理装置。

[0093] ［Ｅ４］

前記電気バイアスは、前記波形周期の時間間隔で周期的に発生される電圧パルスを含み、

前記電気バイアスの前記条件は、前記電圧パルスの電圧レベル、前記電圧パルスのデューティ比、及び前記波形周期の時間長の逆数であるバイアス周波数からなる群から選択される少なくとも一つを含む、

Ｅ２又はＥ３に記載のプラズマ処理装置。

[0094] ［Ｅ５］

前記電気バイアスは、前記波形周期の時間長の逆数であるバイアス周波数を有するバイアス高周波電力であり、

前記電気バイアスの前記条件は、前記バイアス高周波電力の電力レベル及び前記バイアス周波数からなる群から選択される少なくとも一つを含む、

Ｅ２又はＥ３に記載のプラズマ処理装置。

[0095] ［Ｅ６］

前記フィードバック期間は、第１のフィードバック期間であり、

前記少なくとも二つの副期間の各々は、前記第１のフィードバック期間に続く第２のフィードバック期間を含み、

前記電源制御部は、前記第２のフィードバック期間の直前の前記波形周期において用いられた前記ソース周波数の系列を該第２のフィードバック期間において繰り返して用いるように前記高周波電源を制御するよう構成されている、

Ｅ１～Ｅ５の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0096] ［Ｅ７］

前記フィードバック期間は、第１のフィードバック期間であり、

前記少なくとも二つの副期間の各々は、前記第１のフィードバック期間に続く第２のフィードバック期間を含み、

前記電源制御部は、前記少なくとも二つの副期間の各々の前記第２のフィードバック期間における各波形周期内のｊ番目の位相期間のための前記ソー

ス周波数を、前記少なくとも二つの副期間の各々において先行する前記波形周期の繰り返しにおける前記ｊ番目の位相期間の前記ソース周波数の変化と前記ソース高周波電力の反射の度合いの変化に基づき、該ソース高周波電力の該反射の度合いを抑制するように、調整するよう構成されている、

Ｅ１～Ｅ５の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0097] ［Ｅ８］

前記少なくとも二つの副期間の各々の長さは、前記フィードバック期間の長さと一致する、Ｅ１～Ｅ５の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0098] ［Ｅ９］

プラズマ処理装置のチャンバ内でプラズマを生成するために、ソース高周波電力を供給するように構成された高周波電源と、

前記チャンバ内に設けられた基板支持部上の基板に前記プラズマからイオンを引き込むために、波形周期の時間間隔で繰り返して前記基板支持部に電気バイアスを供給するように構成されたバイアス電源と、

電源制御部と、

を備え、

前記電源制御部は、変調周期の繰り返しにおいて前記ソース高周波電力のパワーレベルを周期的に変調するように構成されており、

前記変調周期は複数の副期間を含み、該複数の副期間は前記ソース高周波電力のパワーレベルがゼロよりも大きく且つ互いに異なるレベルに設定される少なくとも二つの副期間を含み、該少なくとも二つの副期間の各々はその開始時点から続くフィードバック期間を含み、

前記電源制御部は、前記フィードバック期間に含まれる前記変調周期内のｋ番目の位相期間のための前記ソース高周波電力のソース周波数を、先行する前記変調周期の繰り返しにおける前記ｋ番目の位相期間の前記ソース周波数の変化と前記ソース高周波電力の反射の度合いの変化に基づき、該ソース高周波電力の該反射の度合いを抑制するように、調整するよう構成されている、

電源システム。

[0099] ［Ｅ１０］

（ａ）プラズマ処理装置のチャンバ内でプラズマを生成するために高周波電源からソース高周波電力を供給する工程と、

（ｂ）前記チャンバ内に配置された基板支持部上の基板に前記プラズマからイオンを引き込むために、波形周期の時間間隔で繰り返して前記基板支持部に電気バイアスを供給する工程と、

を含み、

前記（ａ）は、

（ｃ）変調周期の繰り返しにおいて前記ソース高周波電力のパワーレベルを周期的に変調する工程であり、前記変調周期は複数の副期間を含み、該複数の副期間は前記ソース高周波電力のパワーレベルがゼロよりも大きく且つ互いに異なるレベルに設定される少なくとも二つの副期間を含み、該少なくとも二つの副期間の各々はその開始時点から続くフィードバック期間を含む、該工程と、

（ｄ）前記フィードバック期間に含まれる前記変調周期内のｋ番目の位相期間のための前記ソース高周波電力のソース周波数を調整する工程であり、該変調周期内の該ｋ番目の位相期間のための該ソース周波数は、先行する前記変調周期の繰り返しにおける前記ｋ番目の位相期間の前記ソース周波数の変化と前記ソース高周波電力の反射の度合いの変化に基づき、該ソース高周波電力の該反射の度合いを抑制するように、調整される、該工程と、

を含む、制御方法。

[0100] 以上の説明から、本開示の種々の実施形態は、説明の目的で本明細書で説明されており、本開示の範囲及び主旨から逸脱することなく種々の変更をなし得ることが、理解されるであろう。したがって、本明細書に開示した種々の実施形態は限定することを意図しておらず、真の範囲と主旨は、添付の特許請求の範囲によって示される。

符号の説明

[0101] １…プラズマ処理装置、１０…チャンバ、１１…基板支持部、３０…電源システム、３１…高周波電源、３２…バイアス電源。

請求の範囲

[請求項1] チャンバと、

前記チャンバ内に配置された基板支持部と、

電源システムと、

を備え、

前記電源システムは、

前記チャンバ内でプラズマを生成するために、高周波電力を供給するように構成された高周波電源と、

前記基板支持部上の基板に前記プラズマからイオンを引き込むために、波形周期の時間間隔で繰り返して前記基板支持部に電気バイアスを供給するように構成されたバイアス電源と、

電源制御部と、

を含み、

前記電源制御部は、変調周期の繰り返しにおいて前記高周波電力のパワーレベルを周期的に変調するように構成されており、

前記変調周期は複数の副期間を含み、該複数の副期間は前記高周波電力のパワーレベルがゼロよりも大きく且つ互いに異なるレベルに設定される少なくとも二つの副期間を含み、該少なくとも二つの副期間の各々はその開始時点から続くフィードバック期間を含み、

前記電源制御部は、前記フィードバック期間に含まれる前記変調周期内のｋ番目の位相期間のための前記高周波電力の周波数を、先行する前記変調周期の繰り返しにおける前記ｋ番目の位相期間の前記高周波電力の周波数の変化と前記高周波電力の反射の度合いの変化に基づき、該高周波電力の該反射の度合いを抑制するように、調整するよう構成されている、

プラズマ処理装置。

[請求項2] 前記電源システムは、前記複数の副期間の各々において前記高周波電力のパワーレベル及び前記電気バイアスの条件の各々を同一の設定

のまま継続するように構成されている、請求項１に記載のプラズマ処理装置。

［請求項3］　前記電源システムは、前記基板支持部の上方に配置された上部電極に電気的に接続された直流電源を更に含み、

前記電源システムは、前記複数の副期間の各々において前記高周波電力のパワーレベル、前記電気バイアスの条件、及び前記直流電源の出力電圧レベルの各々を同一の設定のまま継続するように構成されている、

請求項１に記載のプラズマ処理装置。

［請求項4］　前記電気バイアスは、前記波形周期の時間間隔で周期的に発生される電圧パルスを含み、

前記電気バイアスの前記条件は、前記電圧パルスの電圧レベル、前記電圧パルスのデューティ比、及び前記波形周期の時間長の逆数であるバイアス周波数からなる群から選択される少なくとも一つを含む、

請求項２又は３に記載のプラズマ処理装置。

［請求項5］　前記電気バイアスは、前記波形周期の時間長の逆数であるバイアス周波数を有するバイアス高周波電力であり、

前記電気バイアスの前記条件は、前記バイアス高周波電力の電力レベル及び前記バイアス周波数からなる群から選択される少なくとも一つを含む、

請求項２又は３に記載のプラズマ処理装置。

［請求項6］　前記フィードバック期間は、第１のフィードバック期間であり、

前記少なくとも二つの副期間の各々は、前記第１のフィードバック期間に続く第２のフィードバック期間を含み、

前記電源制御部は、前記第２のフィードバック期間の直前の前記波形周期において用いられた前記高周波電力の前記周波数の系列を該第２のフィードバック期間において繰り返して用いるように前記高周波電源を制御するよう構成されている、

請求項１～３の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[請求項7] 前記フィードバック期間は、第１のフィードバック期間であり、

前記少なくとも二つの副期間の各々は、前記第１のフィードバック期間に続く第２のフィードバック期間を含み、

前記電源制御部は、前記少なくとも二つの副期間の各々の前記第２のフィードバック期間における各波形周期内のｊ番目の位相期間のための前記高周波電力の前記周波数を、前記少なくとも二つの副期間の各々において先行する前記波形周期の繰り返しにおける前記ｊ番目の位相期間の前記高周波電力の前記周波数の変化と前記高周波電力の反射の度合いの変化に基づき、該高周波電力の該反射の度合いを抑制するように、調整するよう構成されている、

請求項１～３の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[請求項8] 前記少なくとも二つの副期間の各々の長さは、前記フィードバック期間の長さと一致する、請求項１～３の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[請求項9] プラズマ処理装置のチャンバ内でプラズマを生成するために、高周波電力を供給するように構成された高周波電源と、

前記チャンバ内に設けられた基板支持部上の基板に前記プラズマからイオンを引き込むために、波形周期の時間間隔で繰り返して前記基板支持部に電気バイアスを供給するように構成されたバイアス電源と、

電源制御部と、

を備え、

前記電源制御部は、変調周期の繰り返しにおいて前記高周波電力のパワーレベルを周期的に変調するように構成されており、

前記変調周期は複数の副期間を含み、該複数の副期間は前記高周波電力のパワーレベルがゼロよりも大きく且つ互いに異なるレベルに設定される少なくとも二つの副期間を含み、該少なくとも二つの副期間

の各々はその開始時点から続くフィードバック期間を含み、

前記電源制御部は、前記フィードバック期間に含まれる前記変調周期内のｋ番目の位相期間のための前記高周波電力の周波数を、先行する前記変調周期の繰り返しにおける前記ｋ番目の位相期間の前記高周波電力の前記周波数の変化と前記高周波電力の反射の度合いの変化に基づき、該高周波電力の該反射の度合いを抑制するように、調整するよう構成されている、

電源システム。

[請求項10] （ａ）プラズマ処理装置のチャンバ内でプラズマを生成するために高周波電源から高周波電力を供給する工程と、

（ｂ）前記チャンバ内に配置された基板支持部上の基板に前記プラズマからイオンを引き込むために、波形周期の時間間隔で繰り返して前記基板支持部に電気バイアスを供給する工程と、

を含み、

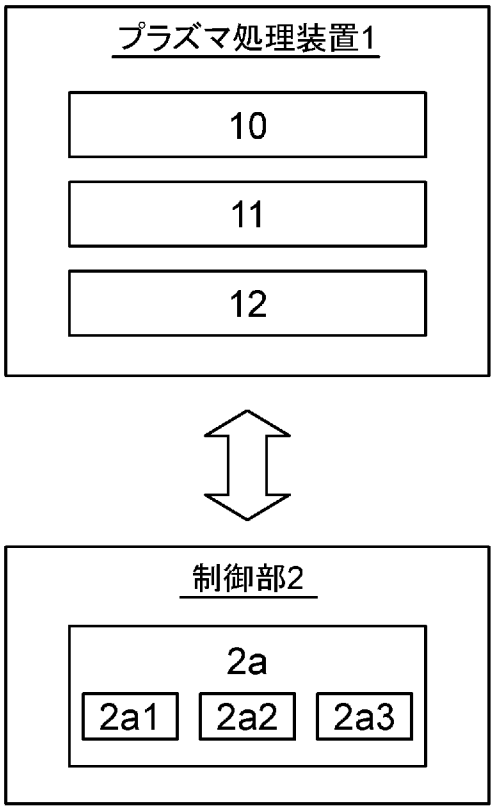
前記（ａ）は、

（ｃ）変調周期の繰り返しにおいて前記高周波電力のパワーレベルを周期的に変調する工程であり、前記変調周期は複数の副期間を含み、該複数の副期間は前記高周波電力のパワーレベルがゼロよりも大きく且つ互いに異なるレベルに設定される少なくとも二つの副期間を含み、該少なくとも二つの副期間の各々はその開始時点から続くフィードバック期間を含む、該工程と、

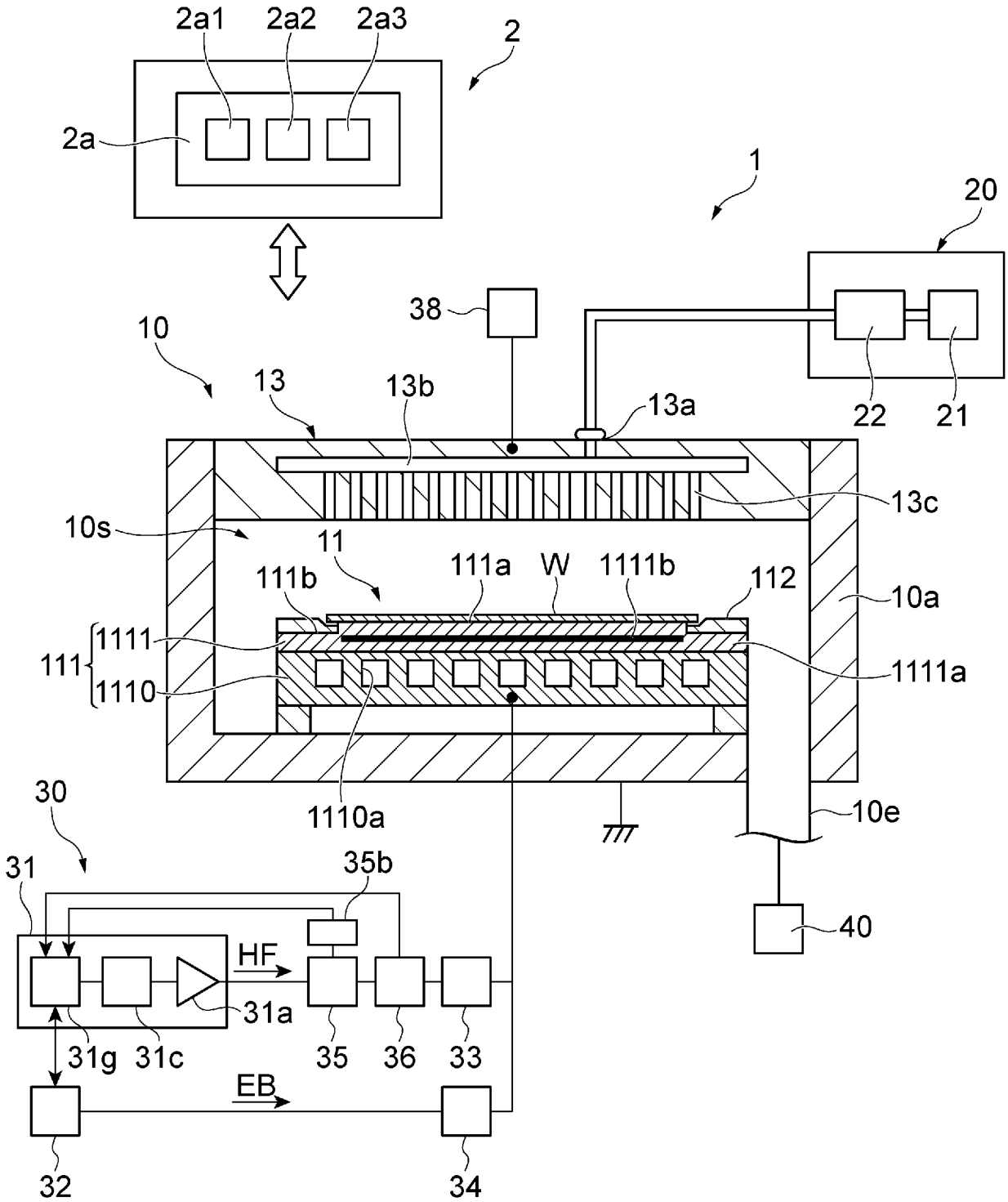
（ｄ）前記フィードバック期間に含まれる前記変調周期内のｋ番目の位相期間のための前記高周波電力の周波数を調整する工程であり、該変調周期内の該ｋ番目の位相期間のための前記高周波電力の前記周波数は、先行する前記変調周期の繰り返しにおける前記ｋ番目の位相期間の前記高周波電力の前記周波数の変化と前記高周波電力の反射の度合いの変化に基づき、該高周波電力の該反射の度合いを抑制するように、調整される、該工程と、

を含む、制御方法。

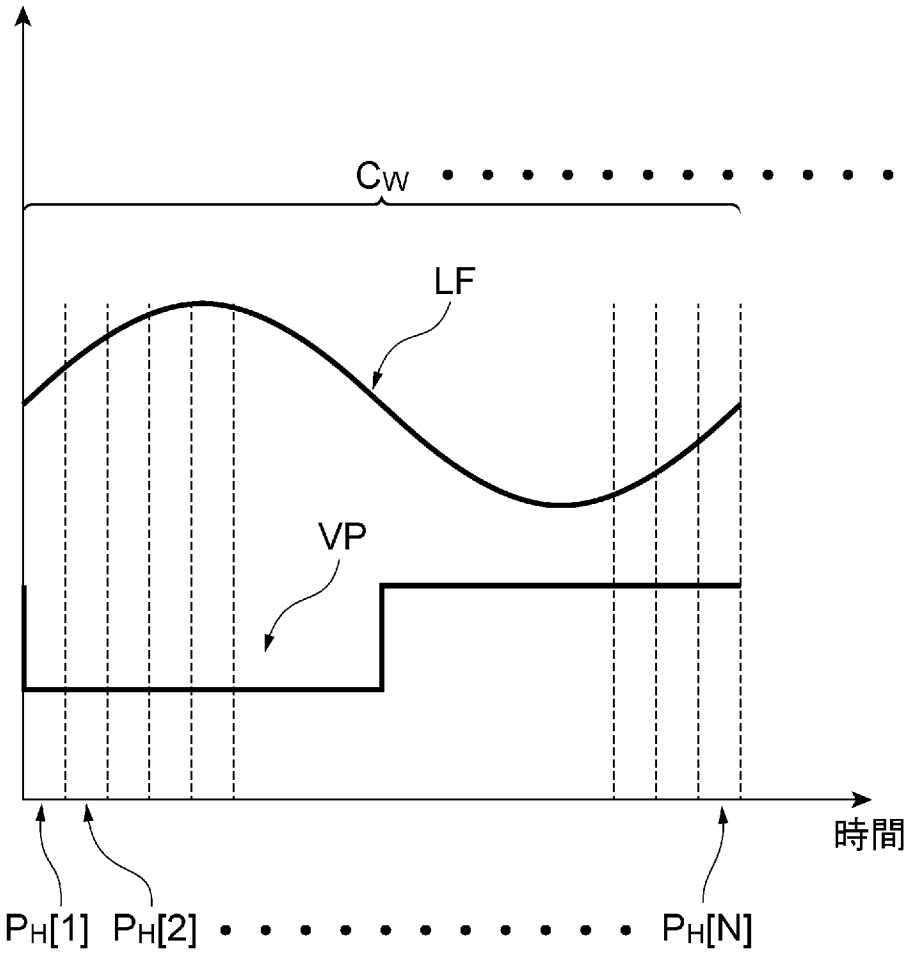
[図1]



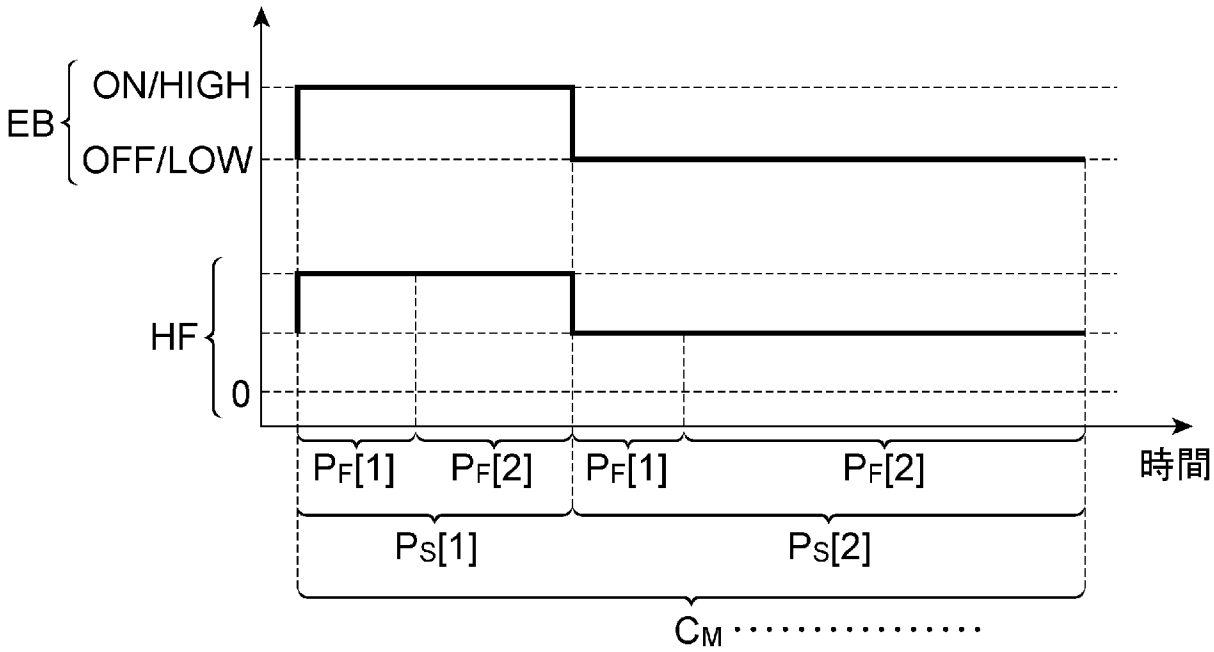
[図2]


2a1
2a2
2a3
2
2a
1
20
38
10
13
13b
13a
22
21
13c
10s
11
111a
W
1111b
112
111b
10a
111
1111
1110
1111a
1110a
10e
30
31
35b
40
HF
31a
31g
31c
35
36
33
EB
32
34

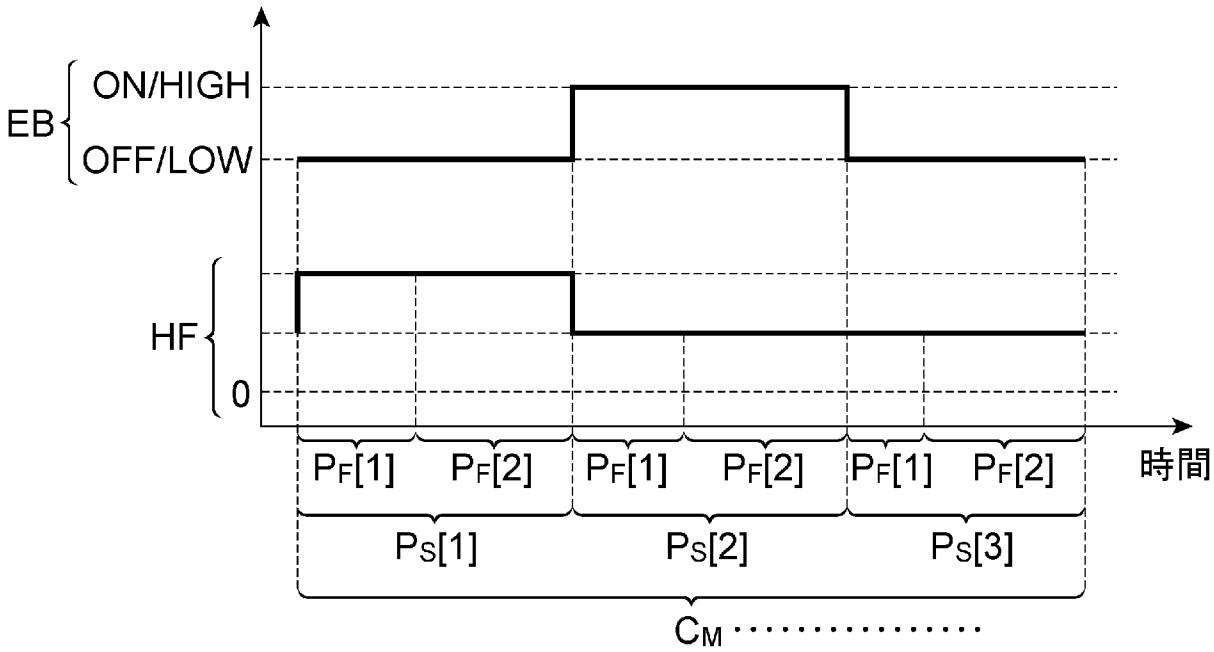
[図3]



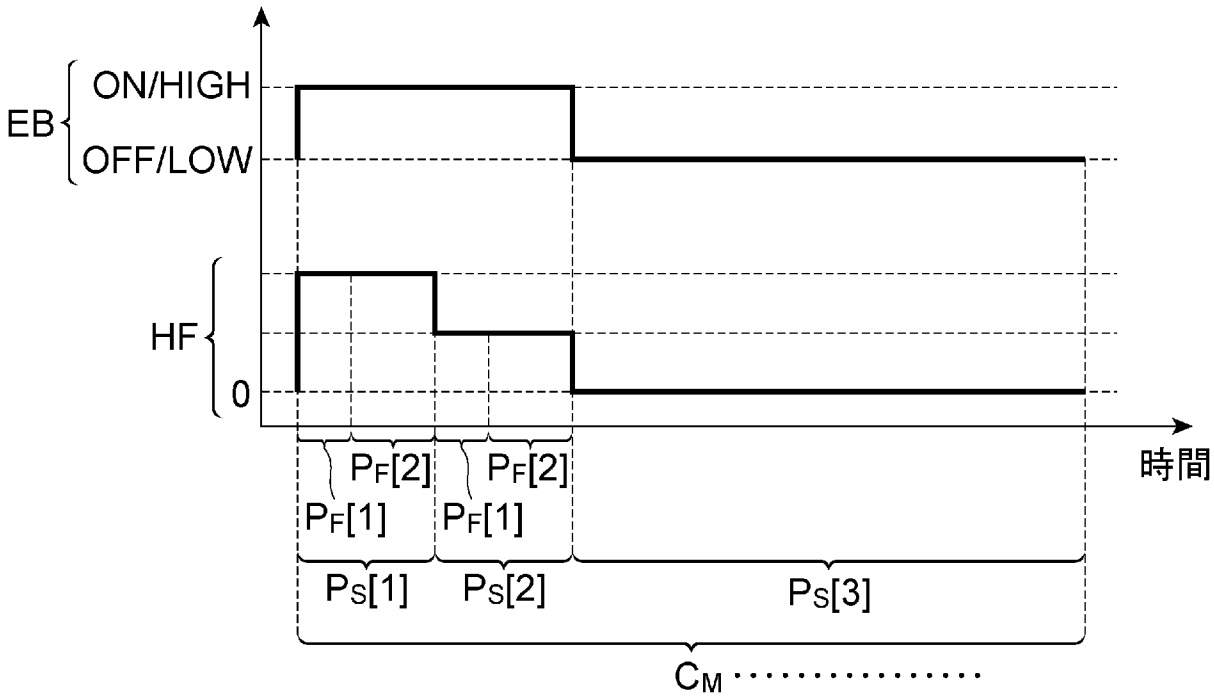
[図4]



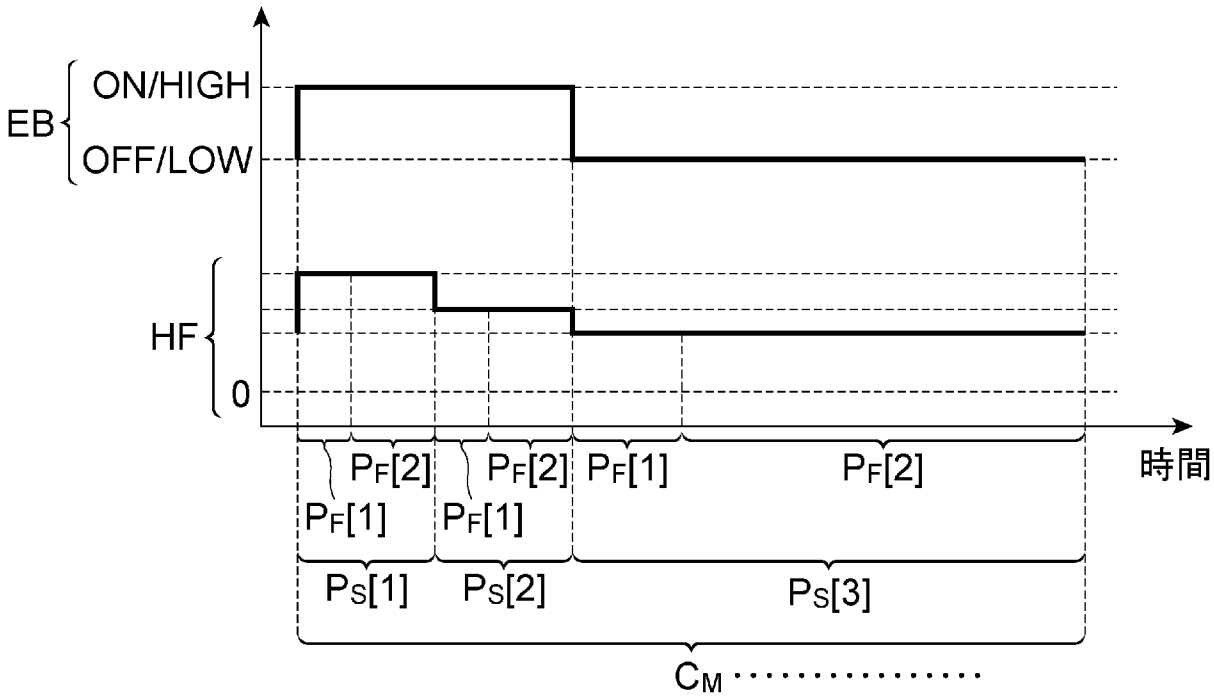
[図5]



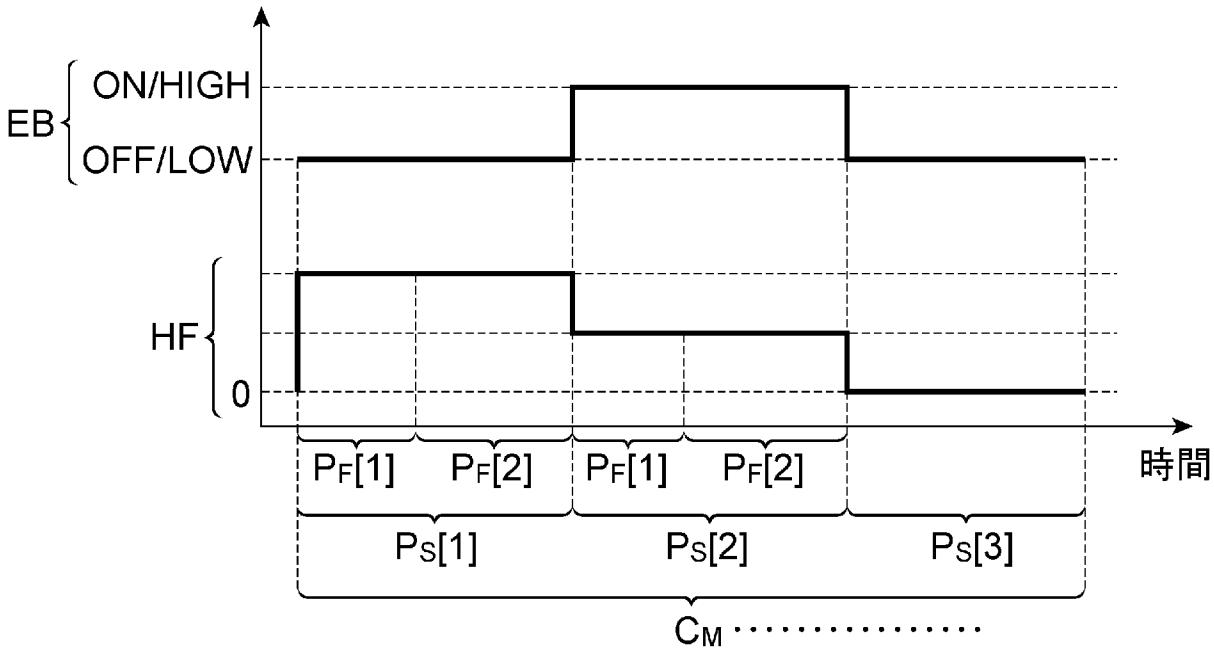
[図6]



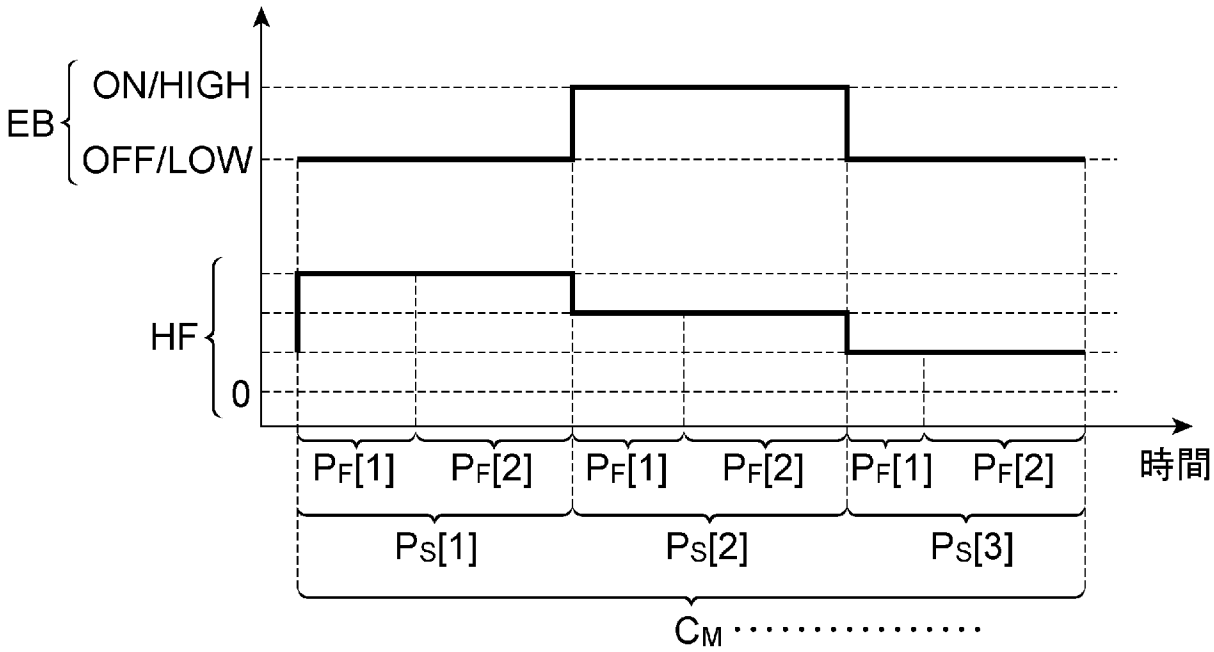
[図7]



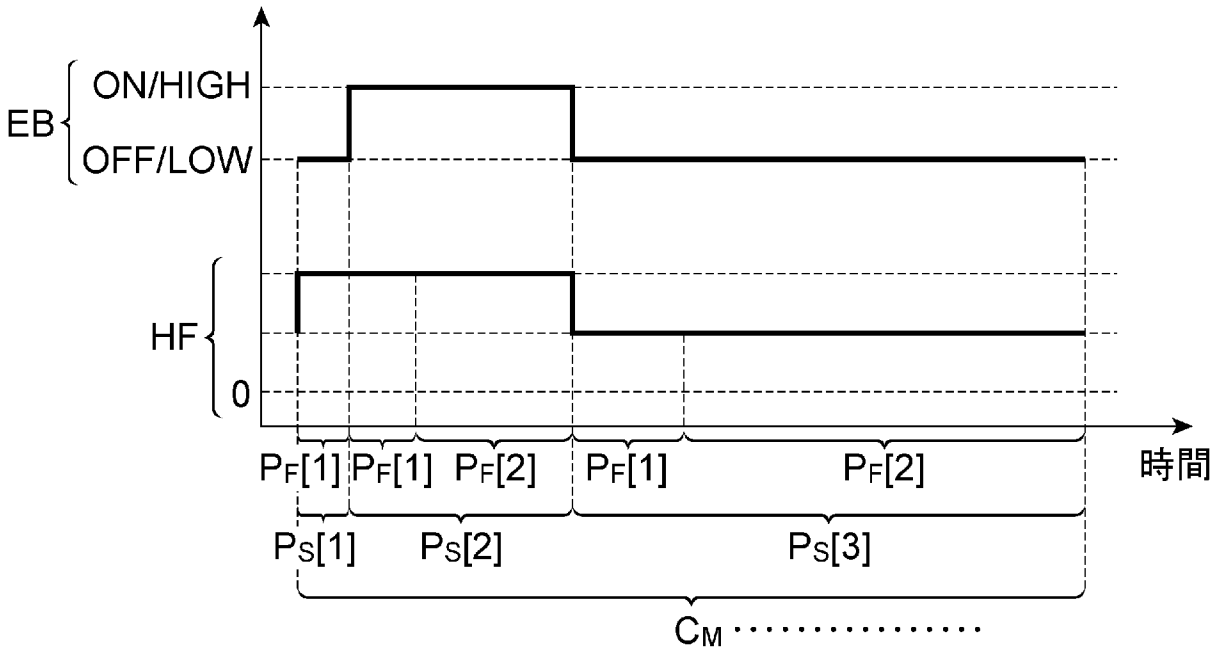
[図8]



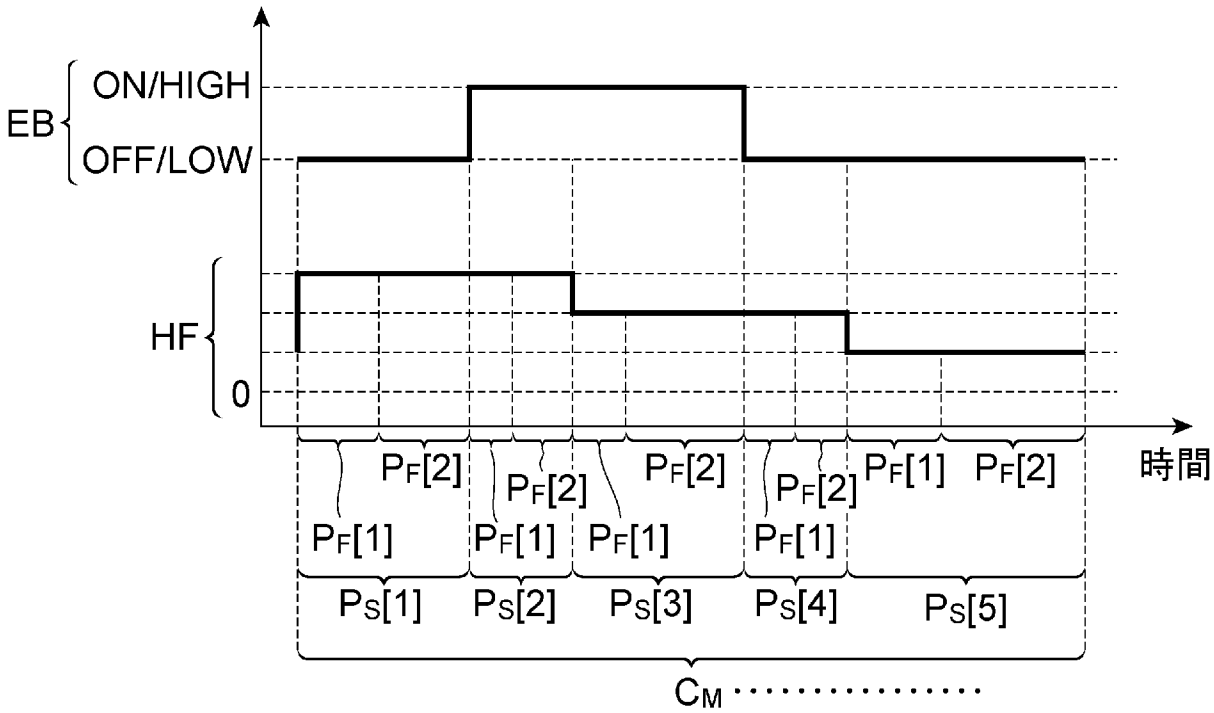
[図9]



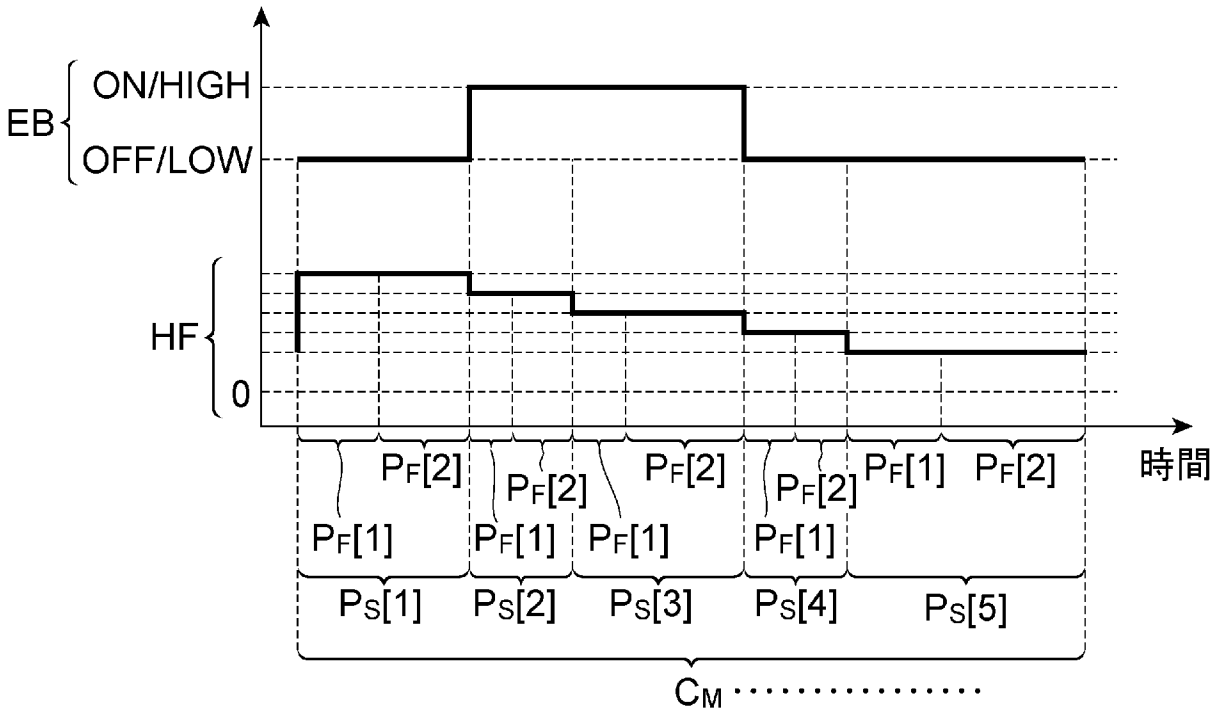
[図10]



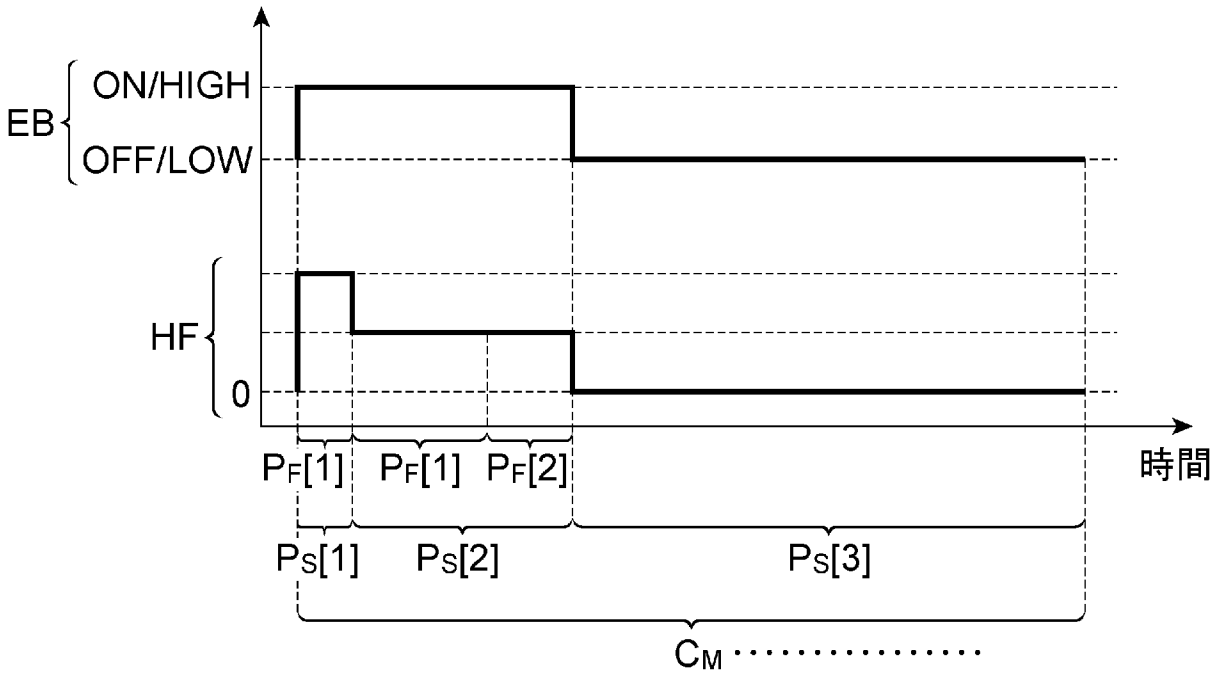
[図11]


EB
ON/HIGH
OFF/LOW
HF
0
時間
PF[1]
PF[2]
PF[1]
PF[2]
PF[1]
PF[2]
PF[1]
PF[2]
PF[1]
PF[2]
PS[1]
PS[2]
PS[3]
PS[4]
PS[5]
CM

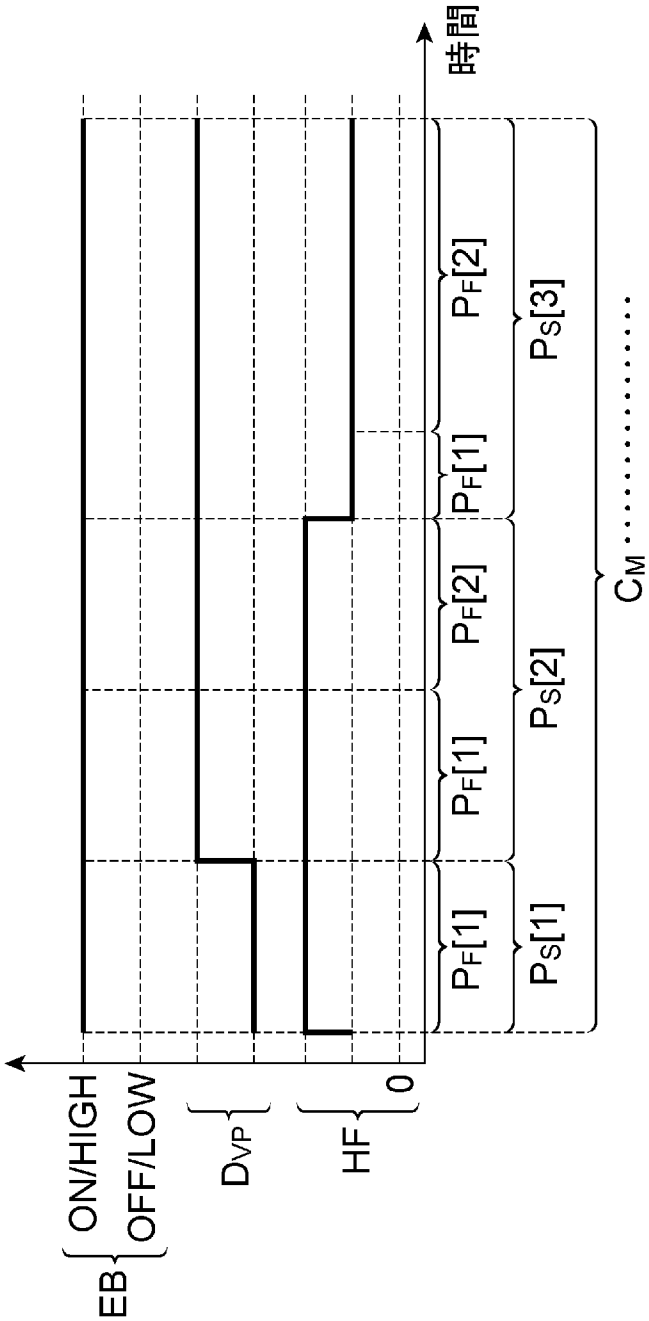
[図12]


EB
ON/HIGH
OFF/LOW
HF
0
時間
PF[1]
PF[2]
PF[1]
PF[2]
PF[1]
PF[2]
PF[1]
PF[2]
PF[1]
PF[2]
PS[1]
PS[2]
PS[3]
PS[4]
PS[5]
CM

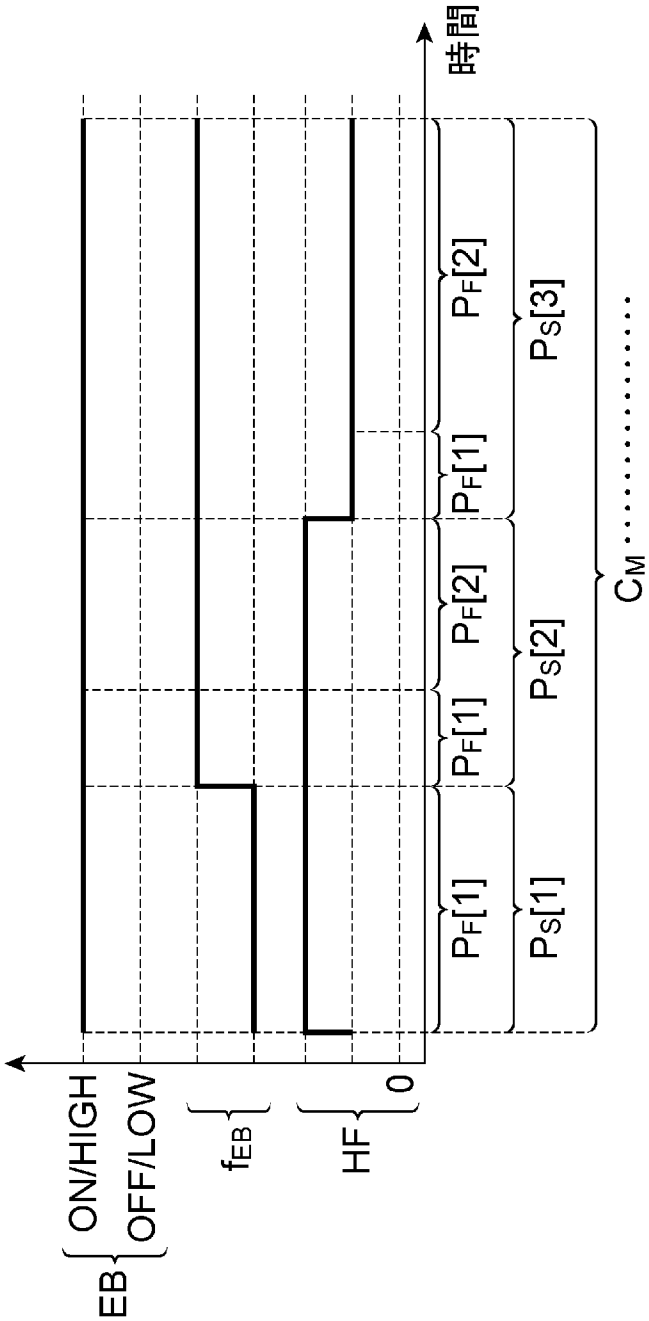
[図13]



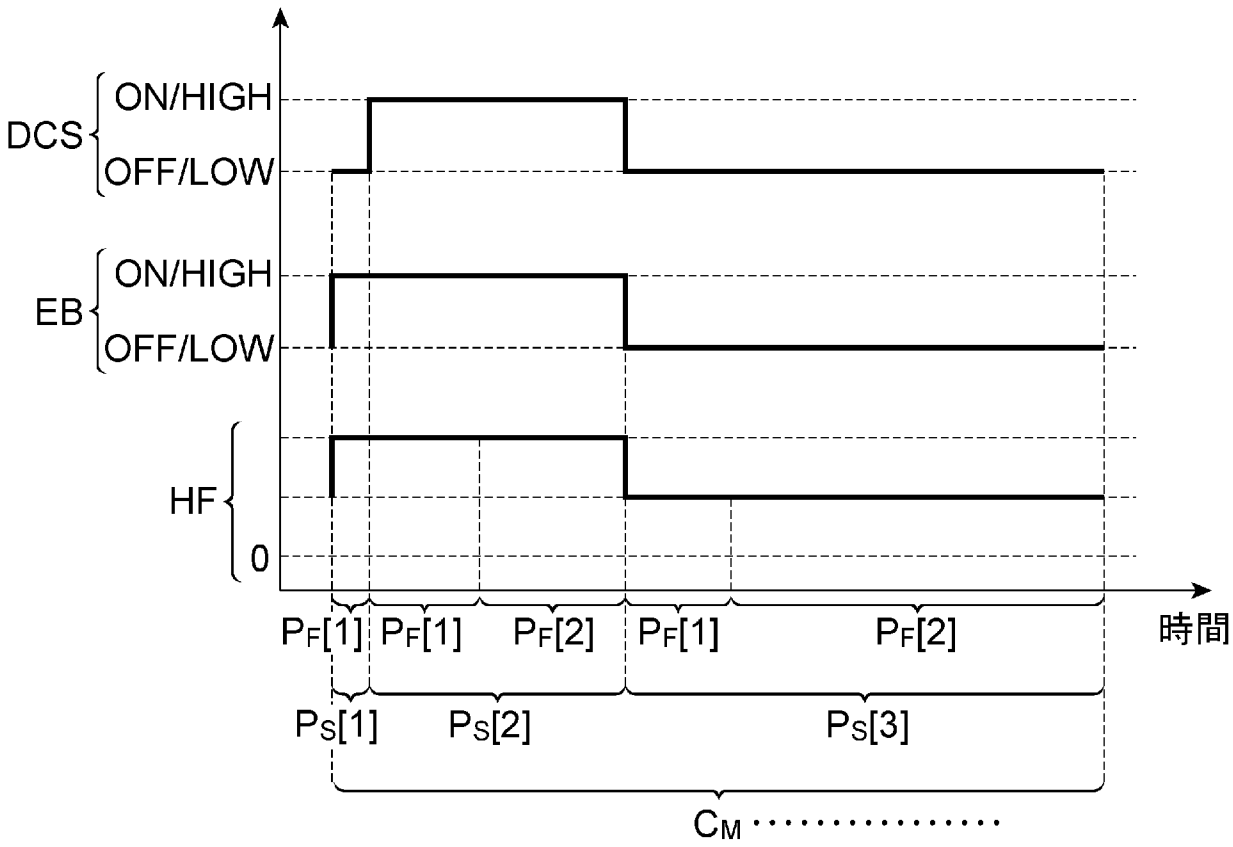
[図14]


EB
ON/HIGH
OFF/LOW
DVP
HF
0
時間
PF[1]
PF[1]
PF[2]
PF[2]
PF[1]
PF[2]
PS[1]
PS[2]
PS[3]
CM

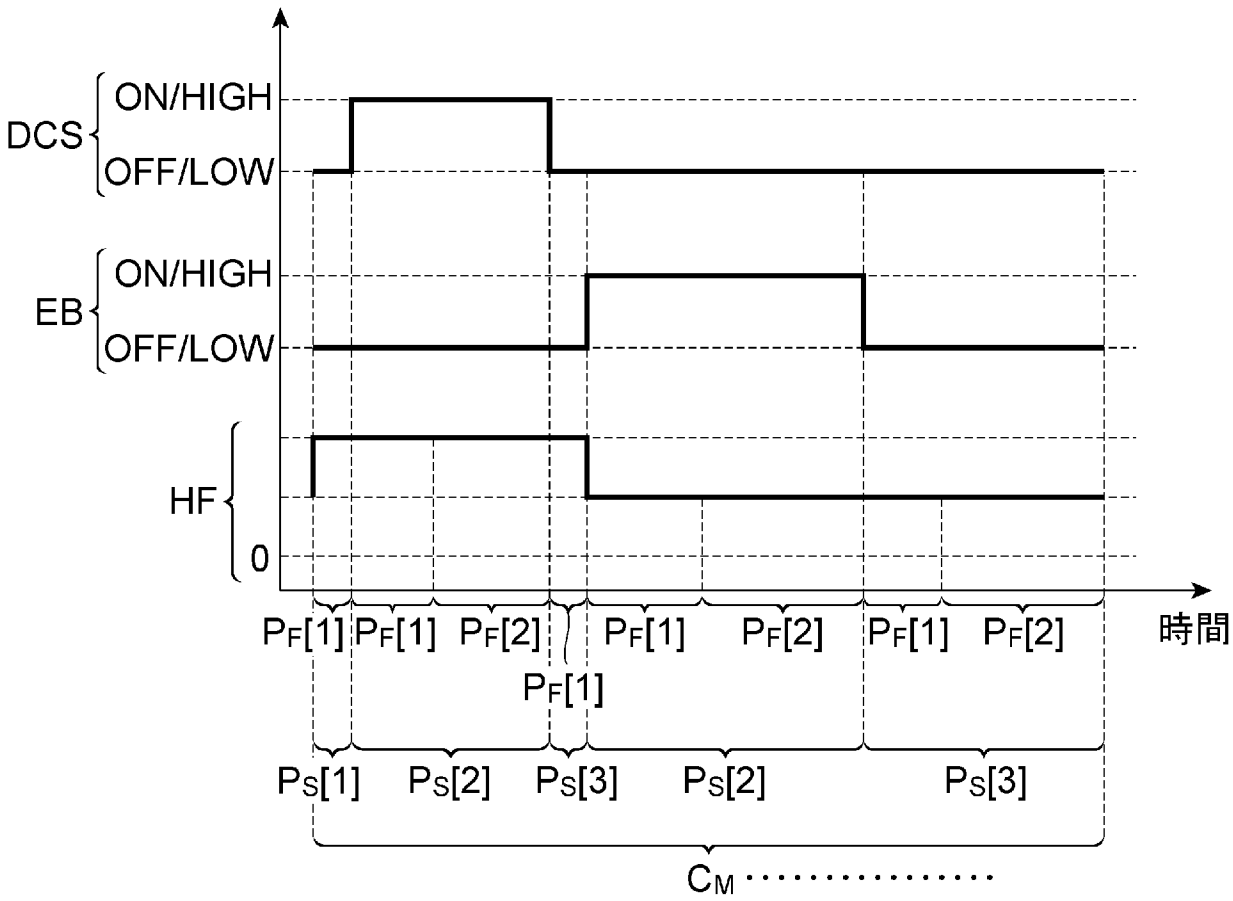
[図15]



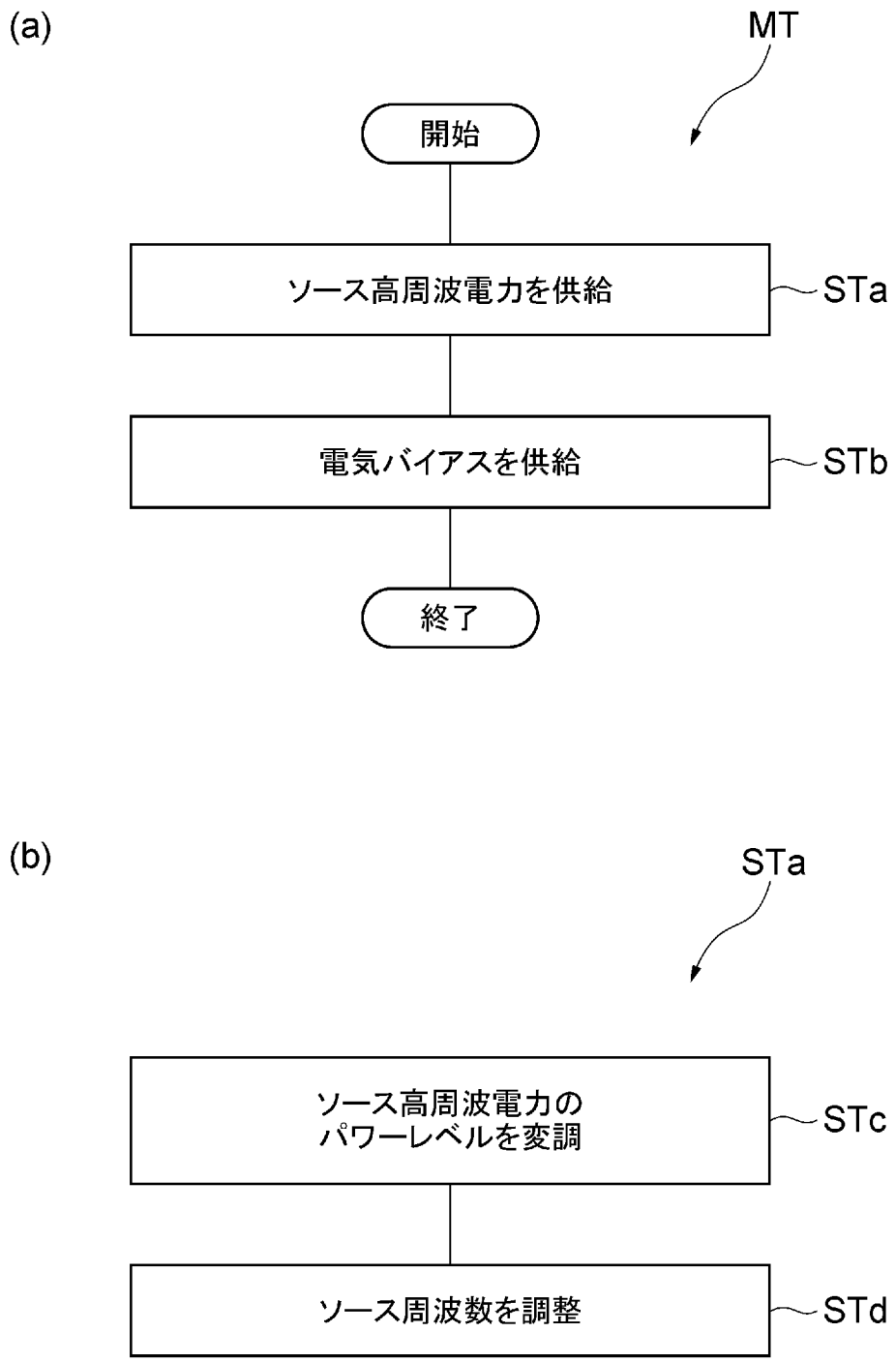
[図16]


DCS
ON/HIGH
OFF/LOW
EB
ON/HIGH
OFF/LOW
HF
0
時間
PF[1]
PF[1]
PF[2]
PF[1]
PF[2]
PS[1]
PS[2]
PS[3]
CM

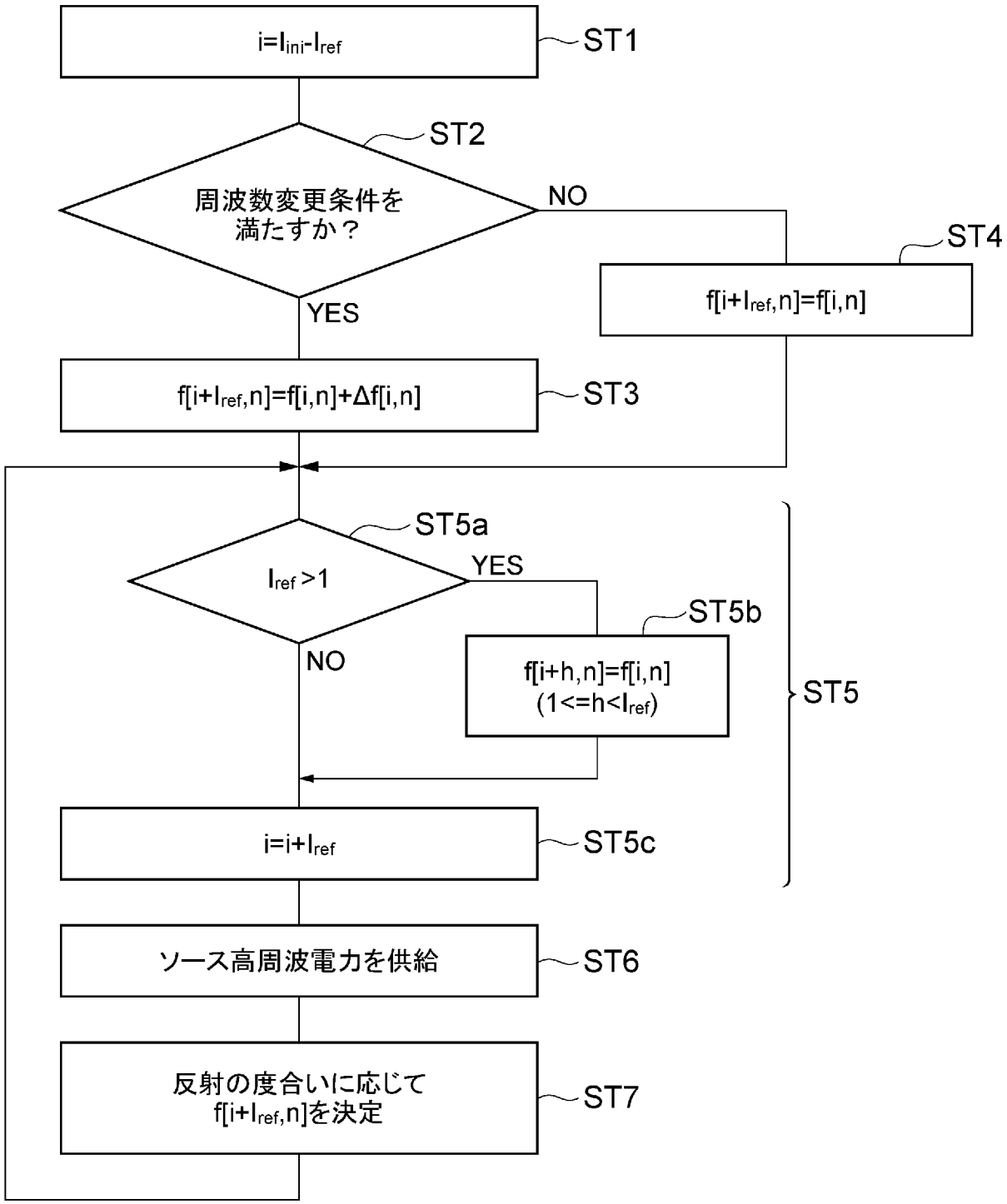
[図17]


DCS
ON/HIGH
OFF/LOW
EB
ON/HIGH
OFF/LOW
HF
0
時間
PF[1]
PF[1]
PF[2]
PF[1]
PF[2]
PF[1]
PF[2]
PF[1]
PS[1]
PS[2]
PS[3]
PS[2]
PS[3]
CM

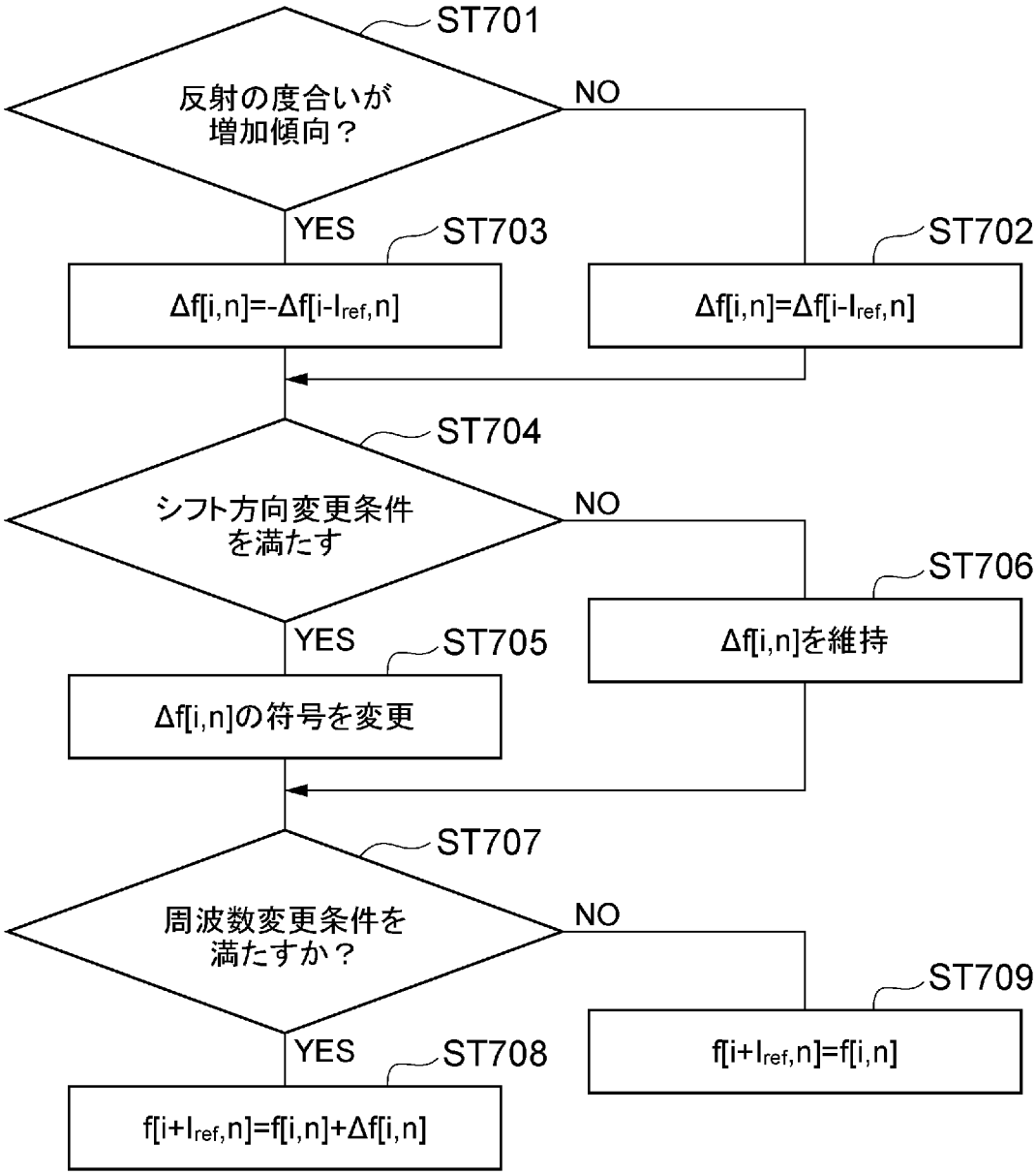
[図18]


(a)
MT
開始
ソース高周波電力を供給
STa
電気バイアスを供給
STb
終了
(b)
STa
ソース高周波電力の
パワーレベルを変調
STc
ソース周波数を調整
STd

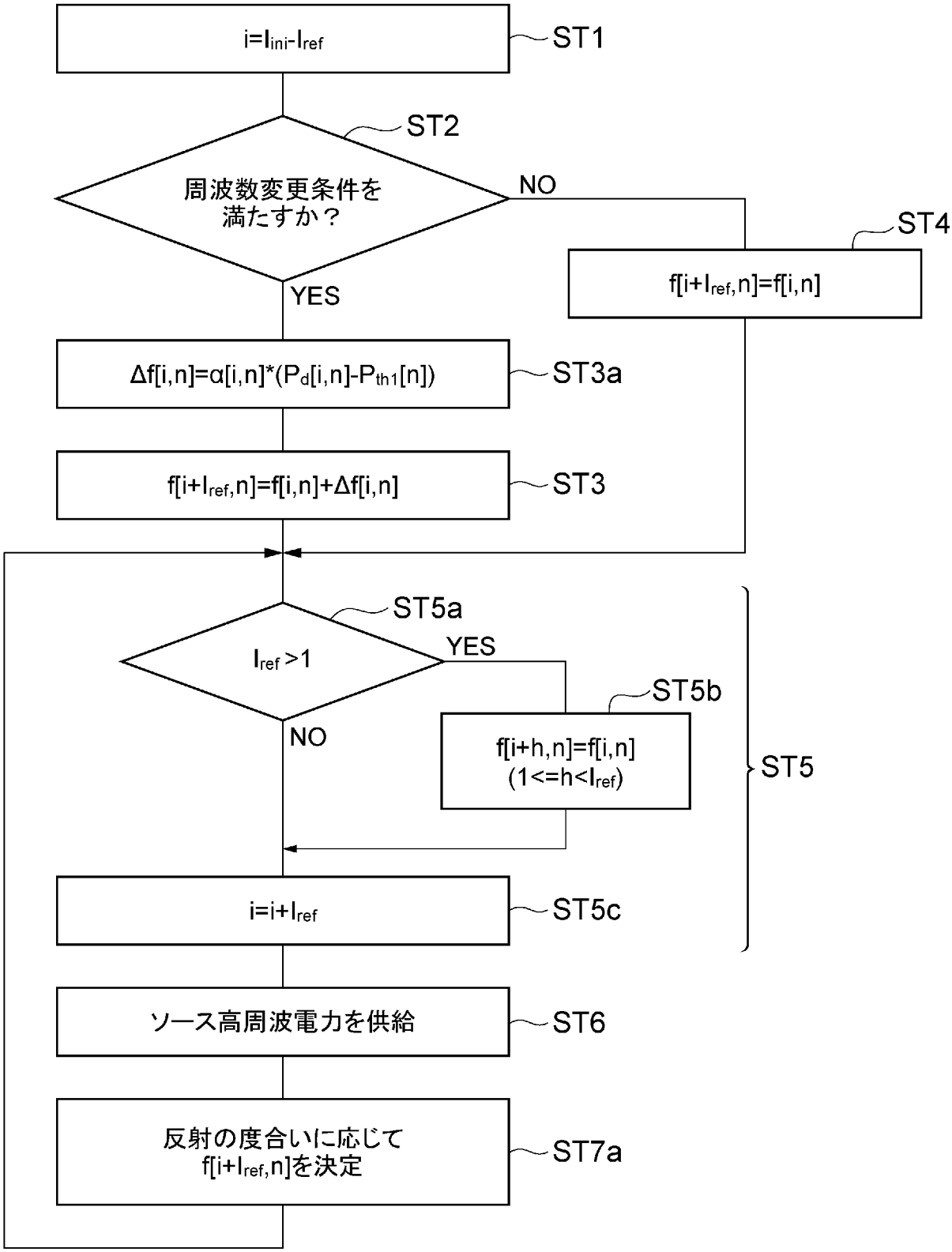
[図19]


i=Iini-Iref
ST1
ST2
周波数変更条件を
満たすか？
NO
ST4
f[i+Iref,n]=f[i,n]
YES
f[i+Iref,n]=f[i,n]+Δf[i,n]
ST3
ST5a
Iref >1
YES
ST5b
NO
f[i+h,n]=f[i,n]
(1<=h<Iref)
ST5
i=i+Iref
ST5c
ソース高周波電力を供給
ST6
反射の度合いに応じて
f[i+Iref,n]を決定
ST7

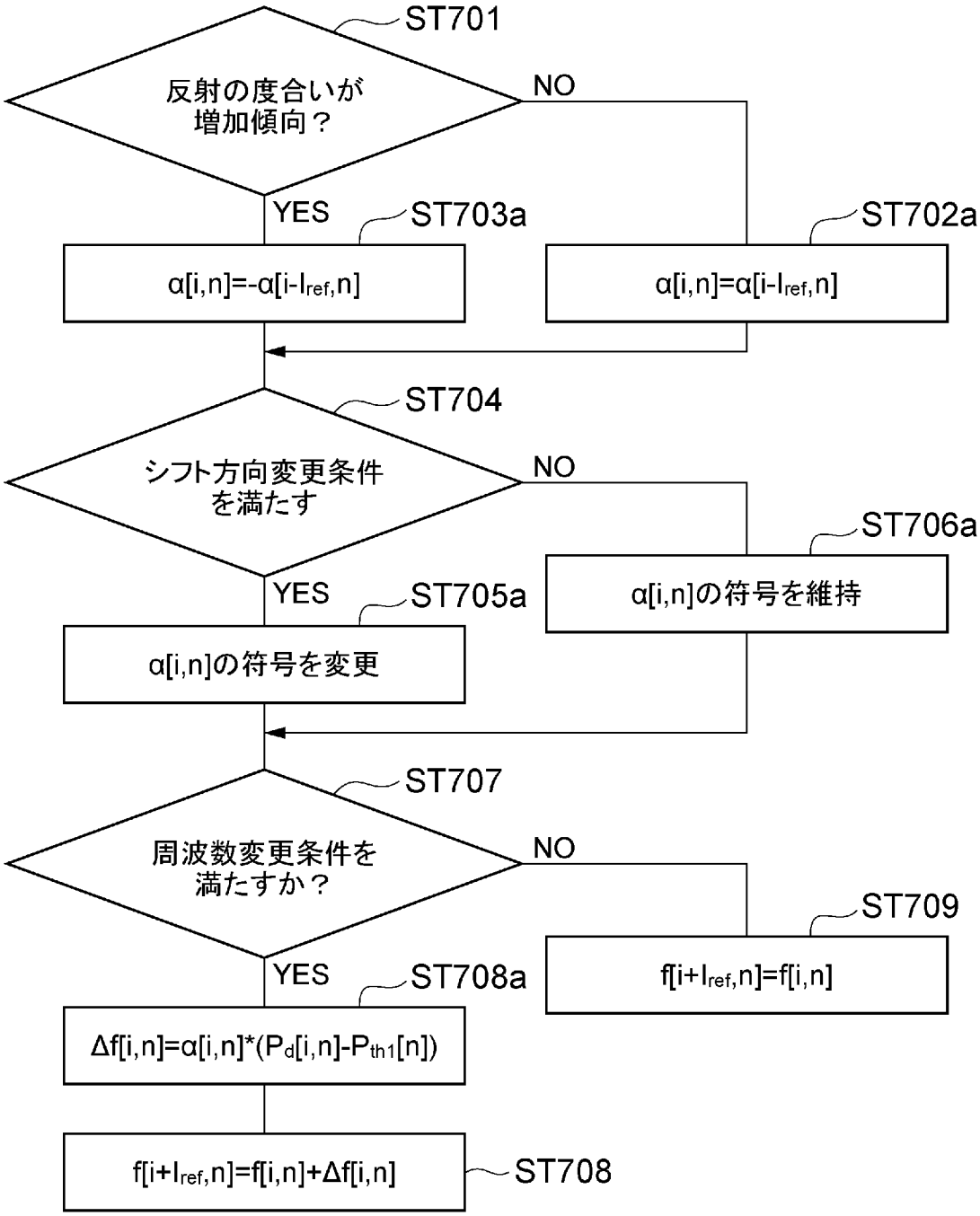
[図20]


ST701
反射の度合いが
増加傾向？
NO
YES
ST703
ST702
Δf[i,n]=-Δf[i-Iref,n]
Δf[i,n]=Δf[i-Iref,n]
ST704
シフト方向変更条件
を満たす
NO
ST706
YES
ST705
Δf[i,n]を維持
Δf[i,n]の符号を変更
ST707
周波数変更条件を
満たすか？
NO
ST709
YES
ST708
f[i+Iref,n]=f[i,n]
f[i+Iref,n]=f[i,n]+Δf[i,n]

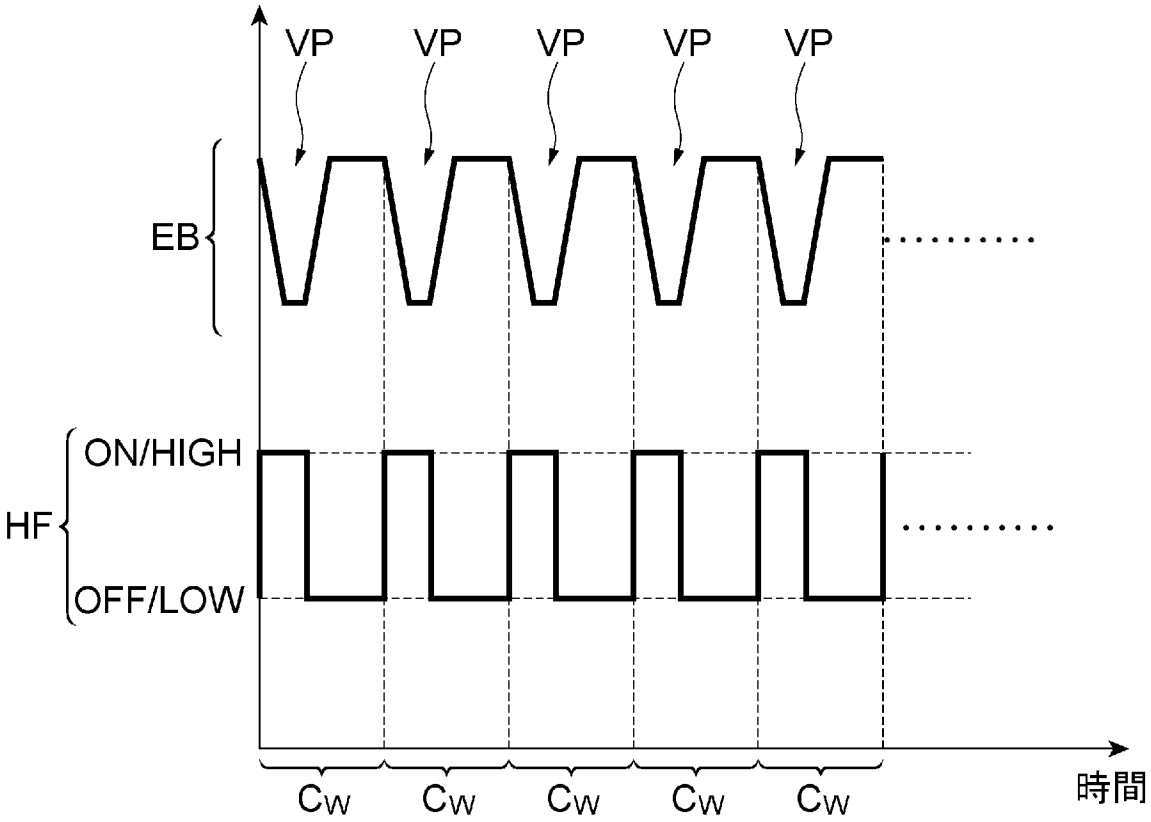
[図21]


i=Iini-Iref
ST1
ST2
周波数変更条件を
満たすか？
NO
ST4
f[i+Iref,n]=f[i,n]
YES
Δf[i,n]=α[i,n]*(Pd[i,n]-Pth1[n])
ST3a
f[i+Iref,n]=f[i,n]+Δf[i,n]
ST3
ST5a
Iref >1
YES
ST5b
NO
f[i+h,n]=f[i,n]
(1<=h<Iref)
ST5
i=i+Iref
ST5c
ソース高周波電力を供給
ST6
反射の度合いに応じて
f[i+Iref,n]を決定
ST7a

[図22]


ST701
反射の度合いが
増加傾向？
NO
YES
ST703a
ST702a
α[i,n]=-α[i-I_ref,n]
α[i,n]=α[i-I_ref,n]
ST704
シフト方向変更条件
を満たす
NO
ST706a
YES
ST705a
α[i,n]の符号を維持
α[i,n]の符号を変更
ST707
周波数変更条件を
満たすか？
NO
ST709
YES
ST708a
f[i+I_ref,n]=f[i,n]
Δf[i,n]=α[i,n]*(P_d[i,n]-P_th1[n])
f[i+I_ref,n]=f[i,n]+Δf[i,n]
ST708

[図23]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2024/039311

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H05H 1/46(2006.01)i
FI: H05H1/46 R

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)

H05H1/00-1/54

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996
Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2024
Registered utility model specifications of Japan 1996-2024
Published registered utility model applications of Japan 1994-2024

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2017-073247 A (TOKYO ELECTRON LIMITED) 13 April 2017 (2017-04-13) abstract, fig. 18	1-10
A	JP 2021-106354 A (DAIHEN CORP.) 26 July 2021 (2021-07-26) abstract, fig. 1	1-10
A	JP 2022-071824 A (TOKYO ELECTRON LIMITED) 16 May 2022 (2022-05-16) paragraphs [0067]-[0085], fig. 7-9	1-10
A	US 2021/0057188 A1 (ADVANCED MICRO-FABRICATION EQUIPMENT INC.) 25 February 2021 (2021-02-25) abstract, fig. 4	1-10

☐ 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	Date of mailing of the international search report
11 December 2024	**24 December 2024**
Name and mailing address of the ISA/JP **Japan Patent Office (ISA/JP)** **3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915** **Japan**	Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/JP2024/039311

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
JP 2017-073247 A	13 April 2017	US 2017/0099723 A1 abstract, fig. 18 KR 10-2017-0041142 A CN 106941067 A TW 201719751 A SG 10201608348S A	
JP 2021-106354 A	26 July 2021	US 2021/0202211 A1 abstract, fig. 1 KR 10-2021-0084273 A	
JP 2022-071824 A	16 May 2022	US 2022/0130643 A1 paragraphs [0091]-[0112], fig. 7-9 KR 10-2022-0056805 A CN 114496697 A TW 202220500 A	
US 2021/0057188 A1	25 February 2021	CN 110299279 A abstract, fig. 4 TW 202110287 A	

国際調査報告

国際出願番号
PCT/JP2024/039311

A.　発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

H05H 1/46(2006.01)i
FI: H05H1/46 R

B.　調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（ＩＰＣ））

H05H1/00-1/54

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	１９２２－１９９６年
日本国公開実用新案公報	１９７１－２０２４年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０２４年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０２４年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C.　関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー*	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
A	JP 2017-073247 A (東京エレクトロン株式会社) 13.04.2017 (2017-04-13) 要約および第１８図	1-10
A	JP 2021-106354 A (株式会社ダイヘン) 26.07.2021 (2021-07-26) 要約および第１図	1-10
A	JP 2022-071824 A (東京エレクトロン株式会社) 16.05.2022 (2022-05-16) 第［００６７］－［００８５］段落および第７－９図	1-10
A	US 2021/0057188 A1 (ADVANCED MICRO-FABRICATION EQUIPMENT INC.) 25.02.2021 (2021-02-25) 要約および第４図	1-10

☐ Ｃ欄の続きにも文献が列挙されている。

☑ パテントファミリーに関する別紙を参照。

*　引用文献のカテゴリー
“A”　特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
“D”　国際出願で出願人が先行技術文献として記載した文献
“E”　国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
“L”　優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
“O”　口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
“P”　国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献
“T”　国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
“X”　特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
“Y”　特に関連のある文献であって、当該文献と他の１以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
“&”　同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日	国際調査報告の発送日
11.12.2024	24.12.2024

名称及びあて先

日本国特許庁(ISA/JP)
〒100-8915
日本国
東京都千代田区霞が関三丁目４番３号

権限のある職員（特許庁審査官）

藤本　加代子 2G 4458

電話番号 03-3581-1101 内線 3226

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号
PCT/JP2024/039311

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP 2017-073247 A	13.04.2017	US 2017/0099723 A1 要約および第１８図 KR 10-2017-0041142 A CN 106941067 A TW 201719751 A SG 10201608348S A	
JP 2021-106354 A	26.07.2021	US 2021/0202211 A1 要約および第１図 KR 10-2021-0084273 A	
JP 2022-071824 A	16.05.2022	US 2022/0130643 A1 第［００９１］－［０１１２］段落および第７－９図 KR 10-2022-0056805 A CN 114496697 A TW 202220500 A	
US 2021/0057188 A1	25.02.2021	CN 110299279 A 要約および第４図 TW 202110287 A	