

(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
2024年6月6日(06.06.2024)



(10) 国際公開番号

WO 2024/116938 A1

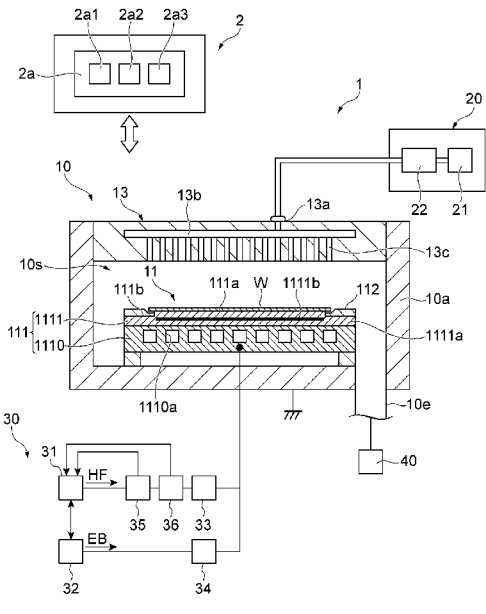
- (51) 国際特許分類:
H05H 1/46 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2023/041648
- (22) 国際出願日: 2023年11月20日(20.11.2023)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2022-191299 2022年11月30日(30.11.2022) JP
- (71) 出願人: 東京エレクトロン株式会社(TOKYO ELECTRON LIMITED) [JP/JP]; 〒1076325 東京都港区赤坂五丁目3番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 奥水 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 Miyagi (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 M Y P L A Z A (明治安田生命ビル) 9階 創英国際特許法律事務所 Tokyo (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, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ,

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

(54) 発明の名称: プラズマ処理装置、電源システム、及び周波数制御方法



(57) Abstract: In a disclosed plasma processing device, a high-frequency power supply changes the source frequency of source high-frequency power at a plurality of first time points within a waveform period of an electric bias, and, while interpolating the source frequency in each of a plurality of first divided periods within the waveform period that are divided at the plurality of first time points, identifies a first temporal-change pattern of the source frequency that most suppresses the level of reflection of the source high-frequency power. The high-frequency power supply changes the source frequency at a plurality of second time points within the waveform period from the first time pattern or a derivative pattern thereof, and, while interpolating the source frequency in each of a plurality of second divided periods within the waveform period at the plurality of second time points, identifies a second temporal-change pattern of the source frequency in the waveform period that most suppresses the level of reflection of the source high-frequency power.

WO 2024/116938 A1

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において、高周波電源は、電気バイアスの波形周期内の複数の第1の時点のソース高周波電力のソース周波数を変更し、複数の第1の時点で分割される波形周期内の複数の第1の分割期間の各々の中のソース周波数を補間しつつ、ソース高周波電力の反射の度合いを最も抑制するソース周波数の第1の時間変化パターンを特定する。高周波電源は、波形周期内の複数の第2の時点のソース周波数を第1の時間パターン又はその派生パターンから変更し、且つ、複数の第2の時点で波形周期内の複数の第2の分割期間の各々の中のソース周波数を補間しつつ、ソース高周波電力の反射の度合いを最も抑制する波形周期におけるソース周波数の第2の時間変化パターンを特定する。

明 細 書

発明の名称：

プラズマ処理装置、電源システム、及び周波数制御方法

技術分野

[0001] 本開示の例示的实施形態は、プラズマ処理装置、電源システム、及び周波数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。プラズマ処理装置は、ソース高周波電力を供給することによりチャンバ内でガスからプラズマを生成する。プラズマ処理装置は、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を用いる。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、ソース高周波電力の反射の度合いを低減する技術を提供する。

課題を解決するための手段

[0005] 一つの例示的实施形態において、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、高周波電源、及びバイアス電源を備える。基板支持部は、チャンバ内に設けられている、高周波電源は、チャンバ内でガスから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ている。バイアス電源は、波形周期を有する電気バイアスを基板支持部に供給するように構成されている。高周波電源は、ソース高周波電力

の反射の度合いを最も抑制する波形周期におけるソース周波数の第1の時間変化パターンを特定するように構成されている。高周波電源は、波形周期内の複数の第1の時点それぞれのソース高周波電力のソース周波数を変更しつつ、複数の第1の時点それぞれのソース周波数と複数の第1の分割期間の各々の中の補間されたソース周波数とを用いて、第1の時間変化パターンを特定する。複数の第1の分割期間は、複数の第1の時点によって分割される。高周波電源は、ソース高周波電力の反射の度合いを最も抑制する波形周期におけるソース周波数の第2の時間変化パターンを特定するように構成されている。高周波電源は、波形周期内の複数の第2の時点それぞれのソース高周波電力のソース周波数を第1の時間変化パターン又は第1の時間変化パターンから作成されたソース周波数の時間変化パターンから変更しつつ、複数の第2の時点それぞれのソース周波数と複数の第2の分割期間の各々の中の補間されたソース周波数とを用いて、第2の時間変化パターンを特定する。複数の第2の分割期間は、複数の第2の時点によって分割される。複数の第2の分割期間の個数は、複数の第1の分割期間の個数よりも多い。

発明の効果

[0006] 一つの例示的实施形態によれば、ソース高周波電力の反射の度合いを低減することが可能である。

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]一つの例示的实施形態に係るプラズマ処理装置における電源システムの構成例を示す図である。

[図4]図4 (a) 及び図4 (b) の各々は、電気バイアスの波形の例を示す図である。

[図5]ソース周波数の時間変化パターンの最適化処理の例を説明するための図である。

[図6]ソース周波数の時間変化パターンの最適化処理の例を説明するための図

である。

[図7]ソース周波数の時間変化パターンの最適化処理の例を説明するための図である。

[図8]ソース周波数の時間変化パターンの最適化処理の例を説明するための図である。

[図9]図9の(a)及び図9の(b)の各々は、ソース高周波電力と電気バイアスの一例のタイミングチャートである。

[図10]図10の(a)及び図10の(b)の各々は、ソース高周波電力と電気バイアスの一例のタイミングチャートである。

[図11]図11の(a)～図11の(c)の各々は、電気バイアスの一例のタイミングチャートである。

[図12]一つの例示的实施形態に係る周波数制御方法の流れ図である。

[図13]一つの例示的实施形態に係る周波数制御方法の工程S T Aの例を示す流れ図である。

[図14]一つの例示的实施形態に係る周波数制御方法の工程S T Aの例を示す流れ図である。

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实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

d-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 2 a 2 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 2 a 3 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 1 0、ガス供給部 2 0、電源システム 3 0 及び排気システム 4 0 を含む。また、プラズマ処理装置 1 は、基板支持部 1 1 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 1 0 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 1 3 を含む。基板支持部 1 1 は、プラズマ処理チャンバ 1 0 内に配置される。シャワーヘッド 1 3 は、基板支持部 1 1 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 1 3 は、プラズマ処理チャンバ 1 0 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 1 0 は、シャワーヘッド 1 3、プラズマ処理チャンバ 1 0 の側壁 1 0 a 及び基板支持部 1 1 により規定されたプラズマ処理空間 1 0 s を有する。プラズマ処理チャンバ 1 0 は接地される。基板支持部 1 1 は、プラズマ処理チャンバ 1 0 の筐体とは電氣的に絶縁される。

[0014] 基板支持部 1 1 は、本体部 1 1 1 及びリングアセンブリ 1 1 2 を含む。本体部 1 1 1 は、基板 W を支持するための中央領域 1 1 1 a と、リングアセンブリ 1 1 2 を支持するための環状領域 1 1 1 b とを有する。ウェハは基板 W の一例である。本体部 1 1 1 の環状領域 1 1 1 b は、平面視で本体部 1 1 1 の中央領域 1 1 1 a を囲んでいる。基板 W は、本体部 1 1 1 の中央領域 1 1

1 a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] 以下、図2と共に図3を参照する。図3は、一つの例示的实施形態に係るプラズマ処理装置における電源システムの構成例を示す図である。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。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、ソー

ス高周波電力HFを発生するように構成されている。ソース高周波電力HFは、ソース周波数 f_s を有する。即ち、ソース高周波電力HFは、その周波数がソース周波数 f_s である正弦波状の波形を有する。ソース周波数 f_s 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氣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_s 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。信号発生器31gは、後述する信号発生器32gと共に単一のプログラム可能なデバイス30pから構成されていてもよく、信号発生器32gとは別個のプログラム可能な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に電氣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氣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及び図3と共に図4(a)及び図4の(b)を参照する。図4(a)及び図4の(b)の各々は、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CY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CYの繰り返しである複数の波形周期CYの各々においてバイアス電極に与えられる。波形周期CYは、バイアス周波数で規定される。バイアス周波数は、例えば50kHz以上、27MHz以下の周波数である。波形周期CYの時間長は、バイアス周波数の逆数である。

[0028] 図4の(a)に示すように、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、バイアス電極に電氣的に接続される。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、図4の(b)に示すように、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CY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CY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CY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] 一実施形態において、バイアス電源32は、図3に示すように、信号発生器32g、D/A変換器32c、及び増幅器32aを含んでいてもよい。信号発生器32gは、指定された波形及び波形周期CYを有するバイアス信号を、周期的に発生する。信号発生器32gは、プログラム可能なプロセッサ又はFPGA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。

[0031] 信号発生器32gの出力は、D/A変換器32cの入力に接続されている。D/A変換器32cは、信号発生器32gからのバイアス信号をアナログ信号に変換する。D/A変換器32cの出力は、増幅器32aの入力に接続されている。増幅器32aは、D/A変換器32cからのアナログ信号を増幅して、電気バイアスEBを生成する。増幅器32aの増幅率は、制御部2からバイアス電源32に指定される。なお、バイアス電源32は、D/A変換器32cを含んでいなくてもよい。この場合には、信号発生器32gの出力は、増幅器32aの入力に接続され、増幅器32aは、信号発生器32gからのバイアス信号を増幅して、電気バイアスEBを生成する。なお、電気バイアスEBが電圧パルスVPである場合には、バイアス電源32は、高電圧電源の出力電圧とグラウンド電位又は他の電位との間で、その出力電圧を周

期的に切り替えることにより、電圧パルス V_P を周期的に発生してもよい。

[0032] 高周波電源31は、ソース高周波電力 H_F の反射の度合いを最も抑制する波形周期 C_Y 内のソース周波数 f_s の最適時間変化パターンを、複数の波形周期 C_Y の時系列においてソース周波数 f_s を変化させることにより特定するように構成されている。以下、ソース周波数 f_s の最適時間変化パターンを特定する処理を、「最適化処理」という。最適化処理において、高周波電源31は、時系列内の各波形周期 C_Y 内の複数の離散的な時点（位相）で、ソース周波数 f_s を設定してもよい。或いは、高周波電源31は、複数の波形周期 C_Y の時系列内の各波形周期 C_Y 内で時間的に連続的にソース周波数 f_s を設定してもよい。なお、最適化処理の演算は、高周波電源31の信号発生器31gにおいて行われ得る。最適化処理の演算は、制御部2によって行われてもよい。

[0033] プラズマ処理装置1は、最適化処理においてソース高周波電力 H_F の反射の度合いを決定するために、センサ35及び／又はセンサ36を更に備えていてもよい（図2参照）。センサ35は、ソース高周波電力 H_F の負荷からの反射波のパワーレベル P_r 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。なお、センサ35は、ソース高周波電力 H_F の進行波のパワーレベル P_f 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 P_r 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 P_f が、センサ35から高周波電源31に通知されてもよい。

[0034] 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 H_F 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。

- [0035] 高周波電源31は、通知された測定値から代表値を生成する。測定値は、センサ35によって取得される反射波のパワーレベル P_r であってもよい。測定値は、ソース高周波電力HFの出力パワーレベルに対する反射波のパワーレベル P_r の比の値（即ち、反射率）であってもよい。測定値は、センサ36によって取得される電圧 V_s と電流 I_s の位相差 θ であってもよい。測定値は、複数の位相期間SPの各々における高周波電源31の負荷側のインピーダンス Z_L であってもよい。インピーダンス Z_L は、センサ36によって取得される電圧 V_s と電流 I_s から決定される。測定値は、インピーダンス Z_L と高周波電源31の出力インピーダンスから求められる反射係数であってもよい。代表値は、各波形周期CYにおけるソース高周波電力HFの反射の度合いを表す。代表値は、各波形周期CYにおける測定値の平均値又は最大値であってもよい。或いは、代表値は、各波形周期CY内でソース周波数 f_s が変更された一部期間における測定値の平均値又は最大値であってもよい。
- [0036] 以下、図5～図8を参照して、最適化処理について詳細に説明する。図5～図8の各々は、ソース周波数の時間変化パターンの最適化処理の例を説明するための図である。最適化処理は、順に、第1の最適化処理、・・・、第Jの最適化処理を含む。Jは2以上の如何なる整数であってもよい。図5～図7に図示された例では、Jは、3である。
- [0037] 最適化処理では、高周波電源31は、複数の波形周期CYの時系列において最適時間変化パターンを探索する。最適化処理では、高周波電源31は、時系列内の初期の波形周期CYのソース周波数 f_s の時間パターンとして、予め準備されたソース周波数 f_s の初期の時間パターンを用いる。
- [0038] 次いで、高周波電源31は、第1の最適化処理を行う。第1の最適化処理において、高周波電源31は、ソース高周波電力HFの反射の度合いを最も抑制する波形周期CYにおけるソース周波数 f_s の第1の時間変化パターンを特定する。
- [0039] 第1の最適化処理において、高周波電源31は、時系列内の各波形周期CY内で複数の第1の時点（位相）それぞれのソース周波数 f_s と複数の第1の

分割期間 DP_1 の各々の中の補間されたソース周波数 f_s とを含むソース周波数 f_s の時間変化パターンを用いる。

- [0040] 各波形周期 CY 内の複数の第1の時点の個数は、2以上である。図5に示す例では、複数の第1の時点は、時点 T_{11} ～時点 T_{13} を含む。波形周期 CY は、複数の第1の時点により、複数の第1の分割期間 DP_1 に分割される。図5に示す例では、複数の第1の分割期間 DP_1 は、時点 T_{11} と時点 T_{12} との間の期間、時点 T_{12} と時点 T_{13} との間の期間、及び時点 T_{13} と波形周期 CY 内の最終の時点 T_E との間の期間を含む。波形周期 CY 内で最初の第1の時点 T_{11} のソース周波数 f_s と最終の時点 T_E のソース周波数 f_s は、同一である。
- [0041] 各波形周期 CY 内の複数の第1の時点（位相）は、予め定められていてもよい。或いは、複数の第1の時点は、上述の初期の時間パターンに対して、複数の第1の分割期間 DP_1 の各々が高周波電源31の負荷インピーダンスの変化量として第1の変化量を有するように設定されてもよい。或いは、複数の第1の時点は、上述の初期の時間パターンに対して、複数の第1の分割期間 DP_1 の各々がソース周波数の変化量として第1の変化量を有するように設定されてもよい。或いは、複数の第1の時点は、波形周期 CY 内において高周波電源31の負荷インピーダンス又はソース高周波電力 HF の反射の度合いが大きい区間ほどより多数の分割期間に分割されるように設定されてもよい。或いは、電気バイアス EB が電圧パルス VP を含む場合には、複数の第1の時点は、波形周期 CY 内で電圧パルス VP に応じた基板支持部11での電圧の変化量が大きい区間ほどより多数の分割期間に分割されるように設定されてもよい。或いは、電気バイアス EB が電圧パルス VP を含む場合には、複数の第1の分割期間 DP_1 のうち一つは、電圧パルス VP が基板支持部11に供給されている期間を含んでいてもよい。
- [0042] 第1の最適化処理では、高周波電源31は、時系列内の波形周期 CY_m のソース周波数 f_s の時間変化パターンを先行する波形周期 CY_{m-M1} 内のソース周波数 f_s の時間変化パターンから変更する。具体的には、高周波電源31は、複数の波形周期 CY の時系列において、複数の第1の時点それぞれのソース

周波数 f_s を順に変更する。より具体的には、高周波電源 31 は、時系列内の波形周期 CY_m 内の第 1 の時点 T_{1n} のソース周波数 $f_s [m, T_{1n}]$ を、先行する波形周期 CY_{m-M1} 内の第 1 の時点 T_{1n} のソース周波数 $f_s [m-M1, T_{1n}]$ に対して一方の変化を有する周波数に設定する。一方の変化は、周波数の減少又は増加である。なお、「 m 」は、時系列内の波形周期 CY の順番を表す自然数である。「 n 」は、波形周期 CY 内の複数の第 1 の時点の各々の順番を表す自然数である。「 $M1$ 」は、1 以上の整数であり、例えば 1 である。また、 $f_s [m, T_{1n}]$ は、波形周期 CY_m 内の第 1 の時点 T_{1n} のソース周波数 f_s を表す。

[0043] 高周波電源 31 は、複数の第 1 の分割期間 DP_1 の各々の中のソース周波数 f_s を、複数の第 1 の時点及び時点 T_E のうち直前の時点のソース周波数 f_s と直後の時点のソース周波数 f_s から補間する。高周波電源 31 は、ソース周波数 f_s の補間において、線形補間を用い得る。或いは、高周波電源 31 は、ソース周波数 f_s の補間において、高次式による補間を用いてもよい。なお、図 5 に示す例では、第 1 の時点 T_{12} のソース周波数 f_s が変更されている状況が示されている。

[0044] 高周波電源 31 は、第 1 の最適化処理において、上記の一方の変化によりソース高周波電力 HF の反射の度合いが減少した場合に、時系列内の後続の波形周期 CY_{m+M1} 内のソース周波数 $f_s [m+M1, T_{1n}]$ を、ソース周波数 $f_s [m, T_{1n}]$ に対して一方の変化を有する周波数に設定する。高周波電源 31 は、上記の一方の変化によりソース高周波電力 HF の反射の度合いが増加した場合に、時系列内の後続の波形周期 CY_{m+M1} 内の周波数 $f_s [m+M1, T_{1n}]$ を、ソース周波数 $f_s [m, T_{1n}]$ に対して他方の変化を有する周波数に設定する。他方の変化は、周波数の減少又は増加であり、一方の変化と反対の変化である。

[0045] 高周波電源 31 は、第 1 の最適化処理において第 1 の時間変化パターンを特定するために、ソース高周波電力 HF の反射の度合いを抑制するよう、複数の第 1 の時点それぞれのソース周波数 f_s を順に最適化してもよい。或いは

、高周波電源31は、第1の時間変化パターンを特定するために、複数の第1の時点それぞれのソース周波数 f_s を順に調整すること（又は変化させること）を繰り返すことにより、第1の時間変化パターンを特定してもよい。何れの場合においても、複数の第1の時点のうちそのソース周波数 f_s を最適化又は調整する時点の順番は、予め定められていてもよく、如何なる順番であってもよい。例えば、複数の第1の時点のうちその時点でのソース周波数 f_s の変更が反射の度合いに与える影響が大きいことが経験的に分かっている時点から順に、そのソース周波数 f_s を最適化又は調整してもよい。

[0046] 高周波電源31は、第1の最適化処理において、ソース高周波電力HFの反射の度合いが第1の条件を満たしたときの波形周期CYのソース周波数 f_s の時間変化パターンを、第1の時間変化パターンとして特定する。第1の条件は、ソース高周波電力HFの反射の度合いが十分に抑制されていることを示す条件として予め定められている。例えば、第1の条件は、ソース高周波電力HFの反射の度合いが第1の許容範囲内に含まれる場合に、満たされてもよい。なお、図5において、初期の時間パターンが、実線で示されており、第1の最適化処理において用いられた時間変化パターンが破線で示されている。

[0047] 高周波電源31は、第1の最適化処理の後に第2の最適化処理を行う。第2の最適化処理において、高周波電源31は、第1の基準パターンに基づいて、ソース高周波電力HFの反射の度合いを最も抑制する波形周期CYにおけるソース周波数 f_s の第2の時間変化パターンを特定する。第1の基準パターンは、第1の時間変化パターン又は第1の時間変化パターンから生成されたソース周波数 f_s の第1の派生時間パターンである。

[0048] 第2の最適化処理において、高周波電源31は、時系列内の各波形周期CY内で複数の第2の時点（位相）それぞれのソース周波数 f_s と複数の第2の分割期間DP₂の各々の中の補間されたソース周波数 f_s とを含むソース周波数 f_s の時間変化パターンを用いる。

[0049] 各波形周期CY内の複数の第2の時点の個数は、第1の最適化処理におけ

る各波形周期CY内の複数の第1の時点の個数よりも多い。図6に示す例では、複数の第2の時点は、時点 T_{21} ～時点 T_{27} を含む。波形周期CYは、複数の第2の時点により、複数の第2の分割期間 DP_2 に分割される。各波形周期CY内の複数の第2の分割期間 DP_2 の個数は、第1の最適化処理における波形周期CY内の複数の第1の分割期間 DP_1 の個数よりも多い。図6に示す例では、複数の第2の分割期間 DP_2 は、時点 T_{21} と時点 T_{22} との間の期間、時点 T_{22} と時点 T_{23} との間の期間、時点 T_{23} と時点 T_{24} との間の期間、時点 T_{24} と時点 T_{25} との間の期間、時点 T_{25} と時点 T_{26} との間の期間、時点 T_{26} と時点 T_{27} との間の期間、及び時点 T_{27} と波形周期CY内の最終の時点 T_E との間の期間を含む。波形周期CY内で最初の第2の時点 T_{21} のソース周波数 f_s と最終の時点 T_E のソース周波数 f_s は、同一である。

[0050] 各波形周期CY内の複数の第2の時点（位相）は、予め定められていてもよい。或いは、複数の第2の時点は、上述の第1の基準パターンに対して、複数の第2の分割期間 DP_2 の各々が高周波電源31の負荷インピーダンスの変化量として第2の変化量を有するように設定されてもよい。この場合において、第2の変化量は、第1の変化量よりも小さい。或いは、複数の第2の時点は、第1の基準パターンに対して、複数の第2の分割期間 DP_2 の各々がソース周波数の変化量として第2の変化量を有するように設定されてもよい。この場合においても、第2の変化量は、第1の変化量よりも小さい。或いは、複数の第2の時点は、波形周期CY内において高周波電源31の負荷インピーダンス又はソース高周波電力HFの反射の度合いが大きい区間ほどより多数の分割期間に分割されるように設定されてもよい。或いは、電気バイアスEBが電圧パルスVPを含む場合には、複数の第2の時点は、波形周期CY内で電圧パルスVPに応じた基板支持部11での電圧の変化量が大きい区間ほどより多数の分割期間に分割されるように設定されてもよい。なお、複数の第2の時点は、波形周期CY内で複数の第1の時点とそれぞれ同じ複数の時点を含んでいてもよい。

[0051] 第2の最適化処理では、高周波電源31は、時系列内の波形周期 CY_m のソ

ース周波数 f_s の時間変化パターンを先行する波形周期 CY_{m-M_2} 内のソース周波数 f_s の時間変化パターンから変更する。第2の最適化処理の初期においては、波形周期 CY のソース周波数 f_s の時間変化パターンは、第1の基準パターンを変更することにより得られる。

[0052] 具体的には、高周波電源31は、複数の波形周期 CY の時系列において、複数の第2の時点それぞれのソース周波数 f_s を順に変更する。より具体的には、第2の最適化処理では、高周波電源31は、時系列内の波形周期 CY_m 内の第2の時点 T_{2n} のソース周波数 $f_s [m, T_{2n}]$ を、先行する波形周期 CY_{m-M_2} 内の第2の時点 T_{2n} のソース周波数 $f_s [m-M_2, T_{2n}]$ に対して一方の変化を有する周波数に設定する。一方の変化は、周波数の減少又は増加である。「 m 」は、時系列内の波形周期 CY の順番を表す自然数である。「 n 」は、波形周期 CY 内の複数の第2の時点の各々の順番を表す自然数である。「 M_2 」は、1以上の整数であり、例えば1である。また、 $f_s [m, T_{2n}]$ は、波形周期 CY_m 内の第2の時点 T_{2n} のソース周波数 f_s を表す。

[0053] 高周波電源31は、複数の第2の分割期間 DP_2 の各々の中のソース周波数 f_s を、複数の第2の時点及び時点 T_E のうち直前の時点のソース周波数 f_s と直後の時点のソース周波数 f_s から補間する。高周波電源31は、ソース周波数 f_s の補間において、線形補間を用い得る。或いは、高周波電源31は、ソース周波数 f_s の補間において、高次式による補間を用いてもよい。

[0054] 高周波電源31は、第2の最適化処理において、上記の一方の変化によりソース高周波電力 HF の反射の度合いが減少した場合に、時系列内の後続の波形周期 CY_{m+M_2} 内のソース周波数 $f_s [m+M_2, T_{2n}]$ を、ソース周波数 $f_s [m, T_{2n}]$ に対して一方の変化を有する周波数に設定する。高周波電源31は、上記の一方の変化によりソース高周波電力 HF の反射の度合いが増加した場合に、時系列内の後続の波形周期 CY_{m+M_2} 内の周波数 $f_s [m+M_2, T_{2n}]$ を、ソース周波数 $f_s [m, T_{2n}]$ に対して他方の変化を有する周波数に設定する。他方の変化は、周波数の減少又は増加であり、一方の変化と反対の変化である。

- [0055] 高周波電源31は、第2の最適化処理において第2の時間変化パターンを特定するために、ソース高周波電力HFの反射の度合いを抑制するよう、複数の第2の時点それぞれのソース周波数 f_s を順に最適化してもよい。或いは、高周波電源31は、第2の時間変化パターンを特定するために、複数の第2の時点それぞれのソース周波数 f_s を順に調整すること（又は変化させること）を繰り返すことにより、第2の時間変化パターンを特定してもよい。何れの場合においても、複数の第2の時点のうちそのソース周波数 f_s を最適化又は調整する時点の順番は、予め定められていてもよく、如何なる順番であってもよい。例えば、複数の第2の時点のうちその時点でのソース周波数 f_s の変更が反射の度合いに与える影響が大きいことが経験的に分かっている時点から順に、そのソース周波数 f_s を最適化又は調整してもよい。
- [0056] 高周波電源31は、第2の最適化処理において、ソース高周波電力HFの反射の度合いが第2の条件を満たしたときの波形周期CYのソース周波数 f_s の時間変化パターンを、第2の時間変化パターンとして特定する。第2の条件は、ソース高周波電力HFの反射の度合いが十分に抑制されていることを示す条件として予め定められている。例えば、第2の条件は、ソース高周波電力HFの反射の度合いが第2の許容範囲内に含まれる場合に、満たされてもよい。なお、図6において、第1の基準パターンが、実線で示されており、第2の最適化処理において用いられた時間変化パターンが破線で示されている。
- [0057] 高周波電源31は、第2の最適化処理の後に第3の最適化処理を更に行ってもよい。さらに、高周波電源31は、第3の最適化処理の後に第4の最適化処理を更に行ってもよい。以下、各最適化処理の順番を示す符号として「j」を用い、第2の最適化処理～第Jの最適化処理の各々を表す第jの最適化処理について説明する。
- [0058] 第jの最適化処理において、高周波電源31は、第(j-1)の基準パターンに基づいて、ソース高周波電力HFの反射の度合いを最も抑制する波形周期CYにおけるソース周波数 f_s の第jの時間変化パターンを特定する。第

($j - 1$) の基準パターンは、第 ($j - 1$) の時間変化パターン又は第 ($j - 1$) の時間変化パターンから生成されたソース周波数 f_s の第 ($j - 1$) の派生時間パターンである。

[0059] 高周波電源 31 は、第 j の最適化処理において、時系列内の各波形周期 CY 内で複数の第 j の時点 (位相) それぞれのソース周波数 f_s と複数の第 j の分割期間 DP_j の各々の中の補間されたソース周波数 f_s とを含むソース周波数 f_s の時間変化パターンを用いる。

[0060] 各波形周期 CY 内の複数の第 j の時点の個数は、第 ($j - 1$) の最適化処理における各波形周期 CY 内の複数の第 j の時点の個数よりも多い。波形周期 CY は、複数の第 j の時点により、複数の第 j の分割期間 DP_j に分割される。各波形周期 CY 内の複数の第 j の分割期間 DP_j の個数は、第 ($j - 1$) の最適化処理における波形周期 CY 内の複数の第 ($j - 1$) の分割期間 $DP_{(j-1)}$ の個数よりも多い。波形周期 CY 内で最初の第 j の時点 T_{j1} のソース周波数 f_s と最終の時点 T_E のソース周波数 f_s は、同一である。

[0061] 図 7 に示す例では、複数の第 3 の時点は、時点 T_{31} ~ 時点 T_{3b} を含む。図 7 に示す例では、複数の第 3 の分割期間 DP_3 は、時点 T_{31} と時点 T_{32} との間の期間、時点 T_{32} と時点 T_{33} との間の期間、時点 T_{33} と時点 T_{34} との間の期間、時点 T_{34} と時点 T_{35} との間の期間、時点 T_{35} と時点 T_{36} との間の期間、時点 T_{36} と時点 T_{37} との間の期間、時点 T_{37} と時点 T_{38} との間の期間、時点 T_{37} と時点 T_{38} との間の期間、時点 T_{38} と時点 T_{39} との間の期間、時点 T_{39} と時点 T_{3a} との間の期間、時点 T_{3a} と時点 T_{3b} との間の期間、時点 T_{3b} と波形周期 CY 内の最終の時点 T_E との間の期間を含む。波形周期 CY 内で最初の第 3 の時点 T_{31} のソース周波数 f_s と最終の時点 T_E のソース周波数 f_s は、同一である。

[0062] 各波形周期 CY 内の複数の第 j の時点 (位相) は、予め定められていてもよい。或いは、複数の第 j の時点は、上述の第 ($j - 1$) の基準パターンに対して、複数の第 j の分割期間 DP_j の各々が高周波電源 31 の負荷インピーダンスの変化量として第 j の変化量を有するように設定されてもよい。この場合において、第 j の変化量は、第 ($j - 1$) の変化量よりも小さい。或い

は、複数の第 j の時点は、第 $(j - 1)$ の基準パターンに対して、複数の第 j の分割期間 DP_j の各々がソース周波数の変化量として第 j の変化量を有するように設定されてもよい。この場合においても、第 j の変化量は、第 $(j - 1)$ の変化量よりも小さい。或いは、複数の第 j の時点は、波形周期 CY 内において高周波電源 31 の負荷インピーダンス又はソース高周波電力 HF の反射の度合いが大きい区間ほどより多数の分割期間に分割されるように設定されてもよい。或いは、電気バイアス EB が電圧パルス VP を含む場合には、複数の第 j の時点は、波形周期 CY 内で電圧パルス VP に応じた基板支持部 11 での電圧の変化量が大きい区間ほどより多数の分割期間に分割されるように設定されてもよい。なお、複数の第 j の時点は、波形周期 CY 内で複数の第 $(j - 1)$ の時点とそれぞれ同じ複数の時点を含んでいてもよい。

[0063] 第 j の最適化処理では、高周波電源 31 は、時系列内の波形周期 CY_m のソース周波数 f_s の時間変化パターンを先行する波形周期 CY_{m-M_j} 内のソース周波数 f_s の時間変化パターンから変更する。第 2 の最適化処理の初期においては、波形周期 CY のソース周波数 f_s の時間変化パターンは、第 $(j - 1)$ の基準パターンを変更することにより得られる。

[0064] 具体的には、高周波電源 31 は、複数の波形周期 CY の時系列において、複数の第 j の時点それぞれのソース周波数 f_s を順に変更する。より具体的に、第 j の最適化処理では、高周波電源 31 は、時系列内の波形周期 CY_m 内の第 j の時点 T_{j_n} のソース周波数 $f_s [m, T_{j_n}]$ を、先行する波形周期 CY_{m-M_j} 内の第 j の時点 T_{j_n} のソース周波数 $f_s [m - M_j, T_{j_n}]$ に対して一方の変化を有する周波数に設定する。一方の変化は、周波数の減少又は増加である。「 m 」は、時系列内の波形周期 CY の順番を表す自然数である。「 n 」は、波形周期 CY 内の複数の第 j の時点の各々の順番を表す自然数である。「 M_j 」は、1 以上の整数であり、例えば 1 である。また、 $f_s [m, T_{j_n}]$ は、波形周期 CY_m 内の第 j の時点 T_{j_n} のソース周波数 f_s を表す。

[0065] 高周波電源 31 は、複数の第 j の分割期間 DP_j の各々の中のソース周波数 f_s を、複数の第 j の時点及び時点 T_E のうち直前の時点のソース周波数 f_s と

直後の時点のソース周波数 f_s から補間する。高周波電源 31 は、ソース周波数 f_s の補間において、線形補間を用い得る。或いは、高周波電源 31 は、ソース周波数 f_s の補間において、高次式による補間を用いてもよい。

[0066] 高周波電源 31 は、第 j の最適化処理において、上記の一方の変化によりソース高周波電力 $H F$ の反射の度合いが減少した場合に、時系列内の後続の波形周期 $C Y_{m+M_j}$ 内のソース周波数 $f_s [m+M_j, T_{j,n}]$ を、ソース周波数 $f_s [m, T_{j,n}]$ に対して一方の変化を有する周波数に設定する。高周波電源 31 は、上記の一方の変化によりソース高周波電力 $H F$ の反射の度合いが増加した場合に、時系列内の後続の波形周期 $C Y_{m+M_j}$ 内の周波数 $f_s [m+M_j, T_{j,n}]$ を、ソース周波数 $f_s [m, T_{j,n}]$ に対して他方の変化を有する周波数に設定する。他方の変化は、周波数の減少又は増加であり、一方の変化と反対の変化である。

[0067] 高周波電源 31 は、第 j の最適化処理において第 j の時間変化パターンを特定するために、ソース高周波電力 $H F$ の反射の度合いを抑制するよう、複数の第 j の時点それぞれのソース周波数 f_s を順に最適化してもよい。或いは、高周波電源 31 は、第 j の時間変化パターンを特定するために、複数の第 j の時点それぞれのソース周波数 f_s を順に調整すること（又は変化させること）を繰り返すことにより、第 j の時間変化パターンを特定してもよい。何れの場合においても、複数の第 j の時点のうちそのソース周波数 f_s を最適化又は調整する時点の順番は、予め定められていてもよく、如何なる順番であってもよい。例えば、複数の第 j の時点のうちその時点でのソース周波数 f_s の変更が反射の度合いに与える影響が大きいことが経験的に分かっている時点から順に、そのソース周波数 f_s を最適化又は調整してもよい。

[0068] 高周波電源 31 は、第 j の最適化処理において、ソース高周波電力 $H F$ の反射の度合いが第 j の条件を満たしたときの波形周期 $C Y$ のソース周波数 f_s の時間変化パターンを、第 j の時間変化パターンとして特定する。第 j の条件は、ソース高周波電力 $H F$ の反射の度合いが十分に抑制されていることを示す条件として予め定められている。例えば、第 j の条件は、ソース高周波

電力HFの反射の度合いが第jの許容範囲内に含まれる場合に、満たされてもよい。なお、図7において、第3の基準パターンが、実線で示されており、第3の最適化処理において用いられた時間変化パターンが破線で示されている。

[0069] 高周波電源31は、最終の最適化処理により得られた、波形周期CY内の反射の度合いを最も抑制する時間変化パターンを、最適時間変化パターンとして用い、時系列における後続の波形周期CYにおいて用い得る。

[0070] 一実施形態において、高周波電源31は、第jの最適化処理（jは2以上の整数）を行っている際にソース高周波電力HFの反射の度合いが予め定められた条件を満たさないほどに大きくなった場合には、第1の最適化処理を再度行ってよい。しかる後に、高周波電源31は、第2～第Jの最適化処理を更に行ってもよい。この実施形態によれば、第jの最適化処理の際にプラズマの異常放電が生じた場合に、波形周期CY内でソース高周波電力HFの反射の度合いを抑制するソース周波数HFの時間変化パターンを再度探索することが可能となる。

[0071] 一実施形態において、高周波電源31は、第(j-1)の最適化処理の後、第jの最適化処理の前に、第(j-1)の時間変化パターンからソース周波数 f_s の第(j-1)の派生時間パターンを求めてもよい。

[0072] 具体的には、高周波電源31は、時系列内の複数の波形周期CYにおいて、第(j-1)の時間変化パターンを時間方向にシフトさせる。時間方向へのシフトの最小量は、波形周期CY内でソース周波数が設定される複数の離散的な時点の時間ピッチよりも小さくてもよい。高周波電源31は、第(j-1)の時間変化パターンを時間方向にシフトさせることにより得られる複数の時間変化パターンのうち波形周期CY内においてソース高周波電力HFの反射の度合いを最も抑制する時間変化パターンを、第(j-1)の派生時間パターンとして特定してもよい。第(j-1)の派生時間パターンは、第jの最適化処理において、第(j-1)の基準パターンとして用いられ得る。

[0073] 図8に示す例では、高周波電源31は、第1の最適化処理の後、第2の最適化処理の前に、第1の時間変化パターンからソース周波数 f_s の派生時間パターンを求めている。高周波電源31は、時系列内の複数の波形周期CYにおいて、第1の時間変化パターンを時間方向にシフトさせる。高周波電源31は、第1の時間変化パターンを時間方向にシフトさせることにより得られる複数の時間変化パターンのうちソース高周波電力HFの反射の度合いを最も抑制する時間変化パターンを、第1の派生時間パターンとして特定してもよい。第1の派生時間パターンは、第2の最適化処理において、第1の基準パターンとして用いられ得る。なお、図8において、実線は第1の時間変化パターンを示しており、破線は、第1の時間変化パターンを時間方向にシフトすることにより得られる複数の時間変化パターンを示している。

[0074] なお、波形周期CYにおけるソース周波数 f_s の時間変化パターンを時間方向にシフトさせて反射を抑制する時間変化パターンを特定する上述の処理は、第1～第Jの最適化処理の各々において任意のタイミングで用いられてもよい。

[0075] 一実施形態において、ソース高周波電力HF及び電気バイアスEBは、同時且つ連続的に供給される。即ち、一実施形態において、ソース高周波電力HFの連続波及び電気バイアスEBの連続波が、同時に供給される。ソース高周波電力HFの連続波及び電気バイアスEBの連続波が同時に供給される場合には、上述の最適化処理の一種である第1の処理が適用される。第1の処理では、上述の時系列における複数の波形周期CYとして、複数の連続する波形周期CYに、上述の最適化処理が適用される。

[0076] 別の実施形態において、バイアス電源32は、電気バイアスEBのパルスEBPを周期的にバイアス電極に供給する。パルスEBPは、複数のパルス期間PPの各々においてバイアス電極に供給される。複数のパルス期間PPの各々は、波形周期CYの繰り返しを含む。即ち、複数のパルス期間PPの各々では、電気バイアスEBが周期的にバイアス電極に供給される。

[0077] ここで、図9の(a)、図9の(b)、図10の(a)、及び図10の(

b) を参照する。図9の(a)、図9の(b)、図10の(a)、及び図10の(b)の各々は、ソース高周波電力HFと電気バイアスEBの一例のタイミングチャートである。これらの図において、ソース高周波電力HFの「ON」は、ソース高周波電力HFが供給されていることを示しており、ソース高周波電力HFの「OFF」は、ソース高周波電力HFの供給が停止されていることを示している。また、これらの図において、電気バイアスEBの「ON」は、電気バイアスEBがバイアス電極に与えら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がバイアス電極に与えられていないことを示している。また、これらの図において、電気バイアスEBの「HIGH」は、「LOW」で示される電気バイアスEBのレベルよりも高いレベルを有する電気バイアスEBがバイアス電極に与えられていることを示している。

[0078] 複数のパルス期間PPは、時間的に順に出現する。複数のパルス期間PPは、パルス周波数の逆数の時間間隔(周期)で順に出現する。以下の説明において、パルス期間 PP_k は、複数のパルス期間PPのうちk番目のパルス期間を表している。パルス周波数は、バイアス周波数よりも低く、例えば、 $1/k$ Hz以上、 $100/k$ Hz以下の周波数である。上述したように、電気バイアスEBは、複数のパルス期間PPの各々において、周期的にバイアス電極に与えられる。複数のパルス期間PP以外の期間において、電気バイアスEBは、バイアス電極に与えられなくてもよい。或いは、複数のパルス期間PPにおける電気バイアスEBのレベルよりも低いレベルを有する電気バイアスEBが、複数のパルス期間PP以外の期間において、バイアス電極に与えられてもよい。

[0079] 図9の(a)に示すように、ソース高周波電力HFは、連続波として供給されてもよい。図9の(a)に示す例では、ソース高周波電力HFと電気バイアスEBが同時に供給される複数の重複期間OPはそれぞれ、複数のパルス期間PPと一致する。

[0080] 或いは、図9の(b)、図10の(a)、及び図10の(b)に示すよう

に、ソース高周波電力HFのパルスが、供給されてもよい。図9の(b)に示すように、ソース高周波電力HFのパルスは、複数のパルス期間PPとそれぞれ一致する複数の期間の各々において供給されてもよい。図9の(b)に示す例では、ソース高周波電力HFと電気バイアスEBが同時に供給される複数の重複期間OPはそれぞれ、複数のパルス期間PPと一致する。図10の(a)及び図10の(b)に示すように、ソース高周波電力HFのパルスは、複数のパルス期間PPとそれぞれ部分的に重複する複数の期間の各々において供給されてもよい。図10の(a)及び図10の(b)の各々に示す例では、ソース高周波電力HFと電気バイアスEBが同時に供給される複数の重複期間OPの各々は、複数のパルス期間PPのうち対応のパルス期間PPの一部である。なお、以下の説明において、重複期間 OP_k は、複数の重複期間OPのうちk番目の重複期間を表している。また、波形周期 CY_m は、複数の重複期間OPの各々における複数の波形周期CYのうちm番目の波形周期を表している。

[0081] 以下、バイアス電源32が電気バイアスEBのパルスEBPを周期的にバイアス電極に供給する場合の最適化処理について、図11の(a)～図11の(c)を参照しつつ説明する。図11の(a)～図11の(c)の各々は、電気バイアスの一例のタイミングチャートである。

[0082] 高周波電源31は、重複期間 $OP_1 \sim OP_{Ka}$ の各々の中の波形周期 $CY_1 \sim CY_{Ma}$ の各々のソース周波数 f_s の時間パターンとして、予め準備された初期の時間パターンを用いる。なお、 Ka は、1以上の整数であり、例えば5である。また、 Ma は、1以上の整数である。

[0083] 高周波電源31は、複数の連続する波形周期CYの時系列として、重複期間 $OP_1 \sim OP_{Ka}$ の各々の中の波形周期 $CY_{Ma+1} \sim CY_M$ に対して、の第1の処理を行う。

[0084] 重複期間 $OP_{Ka+1} \sim$ 最終の重複期間では、高周波電源31は、複数の時系列の各々に第2の処理を適用する。複数の時系列の各々は、重複期間 $OP_{Ka+1} \sim$ 最終の重複期間それぞれの中の波形周期 $CY_1 \sim CY_{Mb}$ のうち同

一順の波形周期 CY_m を含む。即ち、複数の時系列は、第1～第 Mb の時系列を含む。 Mb は、1以上の整数である。複数の時系列の各々は、複数の波形周期 CY を含む。具体的に、第1の時系列は、重複期間 OP_{Ka+1} ～最終の重複期間それぞれの中の波形周期 CY_1 を含む。第2の時系列は、重複期間 OP_{Ka+1} ～最終の重複期間それぞれの中の波形周期 CY_2 を含む。第 Mb の時系列は、重複期間 OP_{Ka+1} ～最終の重複期間それぞれの中の波形周期 CY_{Mb} を含む。第2の処理において、かかる複数の時系列の各々が、上述の最適化処理（即ち、第1の最適化処理～第 J の最適化処理）が適用される複数の波形周期 CY の時系列である。

[0085] また、高周波電源31は、複数の連続する波形周期 CY の時系列として、重複期間 OP_{Ka+1} ～最終の重複期間の各々の中の波形周期 CY_{Mb+1} ～波形周期 CY_M に対して、上述の第1の処理を適用する。

[0086] 以上説明したプラズマ処理装置1によれば、波形周期 CY におけるソース高周波電力 HF の反射の度合いを低減することが可能である。また、プラズマ処理装置1によれば、ソース高周波電力 HF の反射の度合いを抑制するように、各波形周期 CY においてソース周波数 f_s を滑らかに変化させることが可能である。

[0087] 以下、図12～図14を参照して、一つの例示的实施形態に係る周波数制御方法について説明する。図12は、一つの例示的实施形態に係る周波数制御方法の流れ図である。図13及び図14の各々は、一つの例示的实施形態に係る周波数制御方法の工程 STA の例を示す流れ図である。図12に示す周波数制御方法（以下、「方法 MT 」という）は、プラズマ処理装置1を用いて行われ得る。方法 MT において、プラズマ処理装置1の各部は、制御部2によって制御され得る。

[0088] 方法 MT は、工程 STA で開始する。工程 STA では、チャンバ10内でガスから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 が供給される。工程 STB では、電気バイアス EB が基板支持部11のバイアス電極に供給される。工程 STA は、工程 STB が実行されているとき

に行われる。

[0089] 図13及び図14に示すように工程STAの工程Staでは、複数の波形周期CYの時系列の中の初期の一つ又は幾つかの波形周期CYにおいて、上述の初期の時間パターンが、ソース周波数 f_s の時間パターンとして用いられる。

[0090] 次いで、工程STAの工程Stb～工程Stcにおいて、第1の最適化処理が行われる。第1の最適化処理では、上述したように、複数の波形周期CYの時系列において複数の第1の時点それぞれのソース周波数 f_s が変更されつつ、複数の第1の時点それぞれのソース周波数 f_s と複数の第1の分割期間 DP_1 の各々の中の補間されたソース周波数とが用いられる。

[0091] 工程Stbでは、第1の最適化処理について上述したように、時系列内の波形周期 CY_m のソース周波数 f_s の時間変化パターンが、先行する波形周期 CY_{m-M_1} 内のソース周波数 f_s の時間変化パターンから変更される。

[0092] 続く工程StJaでは、ソース高周波電力HFの反射の度合いが、上述した第1の条件を満たすか否かが判定される。第1の条件が満たされない場合には、工程Stbが再び行われる。第1の条件が満たされる場合には、第1の最適化処理において最終的に得られた時間変化パターンが、工程Stcにおいて上述の第1の時間変化パターンとして特定される。

[0093] 方法MTは、第1の最適化処理の後、第2の最適化処理の前に行われる工程Stdを含んでいてもよい。工程Stdでは、上述したように、第1の時間変化パターンを時間方向にシフトさせることにより得られる複数の時間変化パターンからソース高周波電力HFの反射の度合いを最も抑制する時間変化パターンが、第1の派生時間パターンとして特定される。

[0094] 方法MTの工程Ste～工程Stfでは、上述の第2の最適化処理が行われる。第2の最適化処理では、上述したように、複数の波形周期CYの時系列において複数の第2の時点それぞれのソース周波数 f_s が変更されつつ、複数の第2の時点それぞれのソース周波数 f_s と複数の第2の分割期間 DP_2 の各々の中の補間されたソース周波数とが用いられる。

- [0095] 工程STeでは、第2の最適化処理について上述したように、時系列内の波形周期CY_mのソース周波数f_sの時間変化パターンが、先行する波形周期CY_{m-M₂}内のソース周波数f_sの時間変化パターンから変更される。第2の最適化処理の初期においては、波形周期CYのソース周波数f_sの時間変化パターンは、第1の基準パターンを変更することにより得られる。
- [0096] 工程STeの後には、工程STJbが行われてもよい。工程STJbでは、変更されたソース周波数f_sの時間変化パターンを波形周期CY_mで用いることによりソース高周波電力HFの反射の度合いが予め定められた条件を満たさないほどに大きくなったか否かが判定される。STJbの判定の結果、変更されたソース周波数f_sの時間変化パターンを波形周期CY_mで用いることによりソース高周波電力HFの反射の度合いが予め定められた条件を満たさないほどに大きくなったと判定される場合には、処理は工程STaに戻る。一方、STJbの判定の結果、変更されたソース周波数f_sの時間変化パターンを波形周期CY_mで用いることによりソース高周波電力HFの反射の度合いが予め定められた条件を満たさないほどに大きくなっていなければ、処理は工程STJcに進む。
- [0097] 続く工程STJcでは、ソース高周波電力HFの反射の度合いが、上述した第2の条件を満たすか否かが判定される。第2の条件が満たされない場合には、工程STeが再び行われる。第2の条件が満たされる場合には、第2の最適化処理において最終的に得られた時間変化パターンが、工程STfにおいて上述の第2の時間変化パターンとして特定される。
- [0098] 方法MTは、工程STg～工程SThを更に含んでもよい。工程STg～工程SThでは、第3の最適化処理が行われる。第3の最適化処理では、上述したように、時系列において複数の第3の時点それぞれのソース周波数f_sが変更されつつ、複数の第3の時点それぞれのソース周波数f_sと複数の第3の分割期間DP₃の各々の中の補間されたソース周波数とが用いられる。
- [0099] 工程STgでは、第3の最適化処理について上述したように、時系列内の

波形周期 $C Y_m$ のソース周波数 f_s の時間変化パターンが、先行する波形周期 $C Y_{m-M_3}$ 内のソース周波数 f_s の時間変化パターンから変更される。第3の最適化処理の初期においては、波形周期 $C Y$ のソース周波数 f_s の時間変化パターンは、第2の基準パターンを変更することにより得られる。

[0100] 工程 $S T_g$ の後には、工程 $S T J d$ が行われてもよい。工程 $S T J d$ では、変更されたソース周波数 f_s の時間変化パターンを波形周期 $C Y_m$ で用いることによりソース高周波電力 $H F$ の反射の度合いが予め定められた条件を満たさないほどに大きくなったか否かが判定される。 $S T J d$ の判定の結果、変更されたソース周波数 f_s の時間変化パターンを波形周期 $C Y_m$ で用いることによりソース高周波電力 $H F$ の反射の度合いが予め定められた条件を満たさないほどに大きくなったと判定される場合には、処理は工程 $S T a$ に戻る。一方、 $S T J d$ の判定の結果、変更されたソース周波数 f_s の時間変化パターンを波形周期 $C Y_m$ で用いることによりソース高周波電力 $H F$ の反射の度合いが予め定められた条件を満たさないほどに大きくなっていなければ、処理は工程 $S T J e$ に進む。

[0101] 続く工程 $S T J e$ では、ソース高周波電力 $H F$ の反射の度合いが、上述した第3の条件を満たすか否かが判定される。第3の条件が満たされない場合には、工程 $S T_g$ が再び行われる。第3の条件が満たされる場合には、第3の最適化処理において最終的に得られた時間変化パターンが、工程 $S T h$ において上述の第3の時間変化パターンとして特定される。

[0102] 方法 $M T$ は、工程 $S T h$ の後に終了してもよい。或いは、方法 $M T$ では、上述したように第4～第 J の最適化処理が更に行われてもよい。第4～第 J の最適化処理については、上述の第 j の最適化処理の説明を参照されたい。

[0103] 以上、種々の例示的实施形態について説明してきたが、上述した例示的实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ることで他の実施形態を形成することが可能である。

[0104] 別の実施形態においては、プラズマ処理装置は、誘導結合型のプラズマ処

理装置、ECRプラズマ処理装置、ヘリコン波励起プラズマ処理装置、又は表面波プラズマ処理装置であってもよい。何れのプラズマ処理装置においても、ソース高周波電力HFは、プラズマの生成のために用いられる。

[0105] ここで、本開示に含まれる種々の例示的实施形態を、以下の[E 1]～[E 16]に記載する。

[0106] [E 1]

チャンバと、

前記チャンバ内に設けられた基板支持部と、

前記チャンバ内でガスから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、

波形周期を有する電気バイアスを前記基板支持部に供給するように構成されたバイアス電源と、

を備え、

前記高周波電源は、

前記波形周期内の複数の第1の時点それぞれの前記ソース高周波電力のソース周波数を変更しつつ、該複数の第1の時点それぞれの該ソース周波数と該複数の第1の時点によって分割される該波形周期の複数の第1の分割期間の各々の中の補間されたソース周波数とを用いて、前記ソース高周波電力の反射の度合いを最も抑制する前記波形周期における前記ソース周波数の第1の時間変化パターンを特定し、

前記波形周期内の複数の第2の時点それぞれの前記ソース高周波電力のソース周波数を前記第1の時間変化パターン又は該第1の時間変化パターンから作成された前記ソース周波数の時間変化パターンに対して変更しつつ、該複数の第2の時点それぞれの該ソース周波数と該複数の第2の時点によって分割される該波形周期の複数の第2の分割期間の各々の中の補間されたソース周波数とを用いて、前記ソース高周波電力の反射の度合いを最も抑制する前記波形周期における前記ソース周波数の第2の時間変化パターンを特定する、

ように構成されており、
前記複数の第2の分割期間の個数は、前記複数の第1の分割期間の個数よりも多い、
プラズマ処理装置。

[0107] [E 2]

前記高周波電源は、
前記第1の時間変化パターンを特定するために、前記複数の第1の時点それぞれの前記ソース周波数を、前記ソース高周波電力の反射の度合いを抑制するように順に最適化し、
前記第2の時間変化パターンを特定するために、前記複数の第2の時点それぞれの前記ソース周波数を、前記ソース高周波電力の反射の度合いを抑制するように順に最適化する、
ように構成されている、
E 1に記載のプラズマ処理装置。

[0108] [E 3]

前記高周波電源は、
前記第1の時間変化パターンを特定するために、前記複数の第1の時点それぞれの前記ソース周波数を順に調整することを繰り返し、
前記第2の時間変化パターンを特定するために、前記複数の第2の時点それぞれの前記ソース周波数を順に調整することを繰り返し、
ように構成されている、
E 1に記載のプラズマ処理装置。

[0109] [E 4]

前記複数の第1の時点及び前記複数の第2の時点は、予め定められている、
E 1～E 3の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0110] [E 5]

前記複数の第1の時点は、前記第1の時間変化パターンを特定するために初期的に用いられる前記波形周期における前記ソース周波数の時間変化パタ

ーンに対して前記複数の第1の分割期間の各々が前記高周波電源の負荷インピーダンスの変化量として第1の変化量を有するように設定され、

前記複数の第2の時点は、前記第1の時間変化パターン又は該第1の時間変化パターンから作成された前記ソース周波数の時間変化パターンに対して前記複数の第2の分割期間の各々が前記高周波電源の負荷インピーダンスの変化量として第2の変化量を有するように設定される、

E 1～E 3の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0111] [E 6]

前記第2の変化量は、前記第1の変化量よりも小さい、E 5に記載のプラズマ処理装置。

[0112] [E 7]

前記複数の第1の時点は、前記第1の時間変化パターンを特定するために初期的に用いられる前記波形周期における前記ソース周波数の時間変化パターンに対して前記複数の第1の分割期間の各々が前記ソース周波数の変化量として第1の変化量を有するように設定され、

前記複数の第2の時点は、前記第1の時間変化パターン又は該第1の時間変化パターンから作成された前記時間変化パターンに対して前記複数の第2の分割期間の各々が前記ソース周波数の変化量として第2の変化量を有するように設定される、

E 1～E 3の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0113] [E 8]

前記第2の変化量は、前記第1の変化量よりも小さい、E 7に記載のプラズマ処理装置。

[0114] [E 9]

前記複数の第1の時点及び前記複数の第2の時点は、前記波形周期内において前記高周波電源の負荷インピーダンス又は前記ソース高周波電力の反射の度合いが大きい区間ほどより多数の分割期間に分割されるように設定される、

E 1 ～ E 3 の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0115] [E 1 0]

前記電気バイアスは、前記波形周期を有するバイアス高周波電力であるか、前記波形周期の時間長と同じ時間間隔で発生される電圧パルスを含む、
E 1 ～ E 9 の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0116] [E 1 1]

前記電気バイアスは、前記波形周期の時間長と同じ時間間隔で発生される電圧パルスを含み、

前記複数の第 1 の時点及び前記複数の第 2 の時点は、前記波形周期内において前記電圧パルスに応じた前記基板支持部での電圧の変化量が大きい区間ほどより多数の分割期間に分割されるように設定される、

E 1 ～ E 3 の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0117] [E 1 2]

前記電気バイアスは、前記波形周期の時間長と同じ時間間隔で発生される電圧パルスを含み、

前記複数の第 1 の分割期間のうち一つは、前記電圧パルスが前記基板支持部に供給されている期間を含む、

E 1 ～ E 4 の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0118] [E 1 3]

前記高周波電源は、前記第 1 の時間変化パターンを時間方向にシフトさせた時間変化パターンを、該時間方向へのシフト量を変更しつつ用いて、前記ソース高周波電力の反射の度合いを最も抑制する前記波形周期における前記ソース周波数の時間変化パターンを特定し、特定した時間変化パターンを、前記第 1 の時間変化パターンから作成された前記ソース周波数の前記時間変化パターンとして用いるように構成されている、E 1 ～ E 1 2 の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0119] [E 1 4]

前記高周波電源は、前記第 2 の時間変化パターンを特定する際に、前記ソ

ース高周波電力の反射の度合いが予め定められた基準を満たさないほどに大きくなった場合に、前記第1の時間変化パターンを求めることを再度行うように構成されている、E1～E13の何れか一項に記載のプラズマ処理装置。

[0120] [E15]

プラズマを生成するために用いられるソース高周波電力を発生するように構成された高周波電源と、

前記プラズマからのイオンを引き込むために用いられる電気バイアスを発生するように構成されたバイアス電源であり、該電気バイアスは波形周期を有する、該バイアス電源と、

を備え、

前記高周波電源は、

前記波形周期内の複数の第1の時点それぞれの前記ソース高周波電力のソース周波数を変更しつつ、該複数の第1の時点それぞれの該ソース周波数と該複数の第1の時点によって分割される該波形周期の複数の第1の分割期間の各々の中の補間されたソース周波数とを用いて、前記ソース高周波電力の反射の度合いを最も抑制する前記波形周期における前記ソース周波数の第1の時間変化パターンを特定し、

前記波形周期内の複数の第2の時点それぞれの前記ソース高周波電力のソース周波数を前記第1の時間変化パターン又は該第1の時間変化パターンから作成された前記ソース周波数の時間変化パターンに対して変更しつつ、該複数の第2の時点それぞれの該ソース周波数と該複数の第2の時点によって分割される該波形周期の複数の第2の分割期間の各々の中の補間されたソース周波数とを用いて、前記ソース高周波電力の反射の度合いを最も抑制する前記波形周期における前記ソース周波数の第2の時間変化パターンを特定する、

ように構成されており、

前記複数の第2の分割期間の個数は、前記複数の第1の分割期間の個数よ

りも多い、
電源システム。

[0121] [E 1 6]

プラズマ処理装置のチャンバ内でガスから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、

前記チャンバ内に配置された基板支持部に波形周期を有する電気バイアスを供給する工程と、

を含み、

前記ソース高周波電力を供給する工程は、

前記波形周期内の複数の第1の時点それぞれの前記ソース高周波電力のソース周波数を変更しつつ、該複数の第1の時点それぞれの該ソース周波数と該複数の第1の時点によって分割される該波形周期の複数の第1の分割期間の各々の中の補間されたソース周波数とを用いて、前記ソース高周波電力の反射の度合いを最も抑制する前記波形周期における前記ソース周波数の第1の時間変化パターンを特定する工程と、

前記波形周期内の複数の第2の時点それぞれの前記ソース高周波電力のソース周波数を前記第1の時間変化パターン又は該第1の時間変化パターンから作成された前記ソース周波数の時間変化パターンに対して変更しつつ、該複数の第2の時点それぞれの該ソース周波数と該複数の第2の時点によって分割される該波形周期の複数の第2の分割期間の各々の中の補間されたソース周波数とを用いて、前記ソース高周波電力の反射の度合いを最も抑制する前記波形周期における前記ソース周波数の第2の時間変化パターンを特定する工程と、

を含み、

前記複数の第2の分割期間の個数は、前記複数の第1の分割期間の個数よりも多い、
周波数制御方法。

[0122] 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

[0123] 1…プラズマ処理装置、10…チャンバ、11…基板支持部、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、
前記チャンバ内に設けられた基板支持部と、
前記チャンバ内でガスから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、
波形周期を有する電気バイアスを前記基板支持部に供給するように構成されたバイアス電源と、
を備え、
前記高周波電源は、
前記波形周期内の複数の第1の時点それぞれの前記ソース高周波電力のソース周波数を変更しつつ、該複数の第1の時点それぞれの該ソース周波数と該複数の第1の時点によって分割される該波形周期の複数の第1の分割期間の各々の中の補間されたソース周波数とを用いて、前記ソース高周波電力の反射の度合いを最も抑制する前記波形周期における前記ソース周波数の第1の時間変化パターンを特定し、
前記波形周期内の複数の第2の時点それぞれの前記ソース高周波電力のソース周波数を前記第1の時間変化パターン又は該第1の時間変化パターンから作成された前記ソース周波数の時間変化パターンに対して変更しつつ、該複数の第2の時点それぞれの該ソース周波数と該複数の第2の時点によって分割される該波形周期の複数の第2の分割期間の各々の中の補間されたソース周波数とを用いて、前記ソース高周波電力の反射の度合いを最も抑制する前記波形周期における前記ソース周波数の第2の時間変化パターンを特定する、
ように構成されており、
前記複数の第2の分割期間の個数は、前記複数の第1の分割期間の個数よりも多い、
プラズマ処理装置。

[請求項2]

前記高周波電源は、

前記第1の時間変化パターンを特定するために、前記複数の第1の時点それぞれの前記ソース周波数を、前記ソース高周波電力の反射の度合いを抑制するように順に最適化し、

前記第2の時間変化パターンを特定するために、前記複数の第2の時点それぞれの前記ソース周波数を、前記ソース高周波電力の反射の度合いを抑制するように順に最適化する、

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] 前記高周波電源は、

前記第1の時間変化パターンを特定するために、前記複数の第1の時点それぞれの前記ソース周波数を順に調整することを繰り返し、

前記第2の時間変化パターンを特定するために、前記複数の第2の時点それぞれの前記ソース周波数を順に調整することを繰り返し、

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] 前記複数の第1の時点及び前記複数の第2の時点は、予め定められている、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5] 前記複数の第1の時点は、前記第1の時間変化パターンを特定するために初期的に用いられる前記波形周期における前記ソース周波数の時間変化パターンに対して前記複数の第1の分割期間の各々が前記高周波電源の負荷インピーダンスの変化量として第1の変化量を有するように設定され、

前記複数の第2の時点は、前記第1の時間変化パターン又は該第1の時間変化パターンから作成された前記ソース周波数の時間変化パターンに対して前記複数の第2の分割期間の各々が前記高周波電源の負荷インピーダンスの変化量として第2の変化量を有するように設定される、

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6] 前記第2の変化量は、前記第1の変化量よりも小さい、請求項5に記載のプラズマ処理装置。
- [請求項7] 前記複数の第1の時点は、前記第1の時間変化パターンを特定するために初期的に用いられる前記波形周期における前記ソース周波数の時間変化パターンに対して前記複数の第1の分割期間の各々が前記ソース周波数の変化量として第1の変化量を有するように設定され、
前記複数の第2の時点は、前記第1の時間変化パターン又は該第1の時間変化パターンから作成された前記時間変化パターンに対して前記複数の第2の分割期間の各々が前記ソース周波数の変化量として第2の変化量を有するように設定される、
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] 前記第2の変化量は、前記第1の変化量よりも小さい、請求項7に記載のプラズマ処理装置。
- [請求項9] 前記複数の第1の時点及び前記複数の第2の時点は、前記波形周期内において前記高周波電源の負荷インピーダンス又は前記ソース高周波電力の反射の度合いが大きい区間ほどより多数の分割期間に分割されるように設定される、
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10] 前記電気バイアスは、前記波形周期を有するバイアス高周波電力であるか、前記波形周期の時間長と同じ時間間隔で発生される電圧パルスを含む、
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11] 前記電気バイアスは、前記波形周期の時間長と同じ時間間隔で発生される電圧パルスを含み、
前記複数の第1の時点及び前記複数の第2の時点は、前記波形周期内において前記電圧パルスに応じた前記基板支持部での電圧の変化量が大きい区間ほどより多数の分割期間に分割されるように設定される、

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12] 前記電気バイアスは、前記波形周期の時間長と同じ時間間隔で発生される電圧パルスを含み、

前記複数の第 1 の分割期間のうち一つは、前記電圧パルスが前記基板支持部に供給されている期間を含む、

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13] 前記高周波電源は、前記第 1 の時間変化パターンを時間方向にシフトさせた時間変化パターンを、該時間方向へのシフト量を変更しつつ用いて、前記ソース高周波電力の反射の度合いを最も抑制する前記波形周期における前記ソース周波数の時間変化パターンを特定し、特定した時間変化パターンを、前記第 1 の時間変化パターンから作成された前記ソース周波数の前記時間変化パターンとして用いるように構成されている、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14] 前記高周波電源は、前記第 2 の時間変化パターンを特定する際に、前記ソース高周波電力の反射の度合いが予め定められた基準を満たさないほどに大きくなった場合に、前記第 1 の時間変化パターンを求めることを再度行うように構成されている、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15] プラズマを生成するために用いられるソース高周波電力を発生するように構成された高周波電源と、

前記プラズマからのイオンを引き込むために用いられる電気バイアスを発生するように構成されたバイアス電源であり、該電気バイアスは波形周期を有する、該バイアス電源と、
を備え、

前記高周波電源は、

前記波形周期内の複数の第 1 の時点それぞれの前記ソース高周波電力のソース周波数を変更しつつ、該複数の第 1 の時点それぞれの該ソース周波数と該複数の第 1 の時点によって分割される該波形周期の

複数の第1の分割期間の各々の中の補間されたソース周波数とを用いて、前記ソース高周波電力の反射の度合いを最も抑制する前記波形周期における前記ソース周波数の第1の時間変化パターンを特定し、

前記波形周期内の複数の第2の時点それぞれの前記ソース高周波電力のソース周波数を前記第1の時間変化パターン又は該第1の時間変化パターンから作成された前記ソース周波数の時間変化パターンに対して変更しつつ、該複数の第2の時点それぞれの該ソース周波数と該複数の第2の時点によって分割される該波形周期の複数の第2の分割期間の各々の中の補間されたソース周波数とを用いて、前記ソース高周波電力の反射の度合いを最も抑制する前記波形周期における前記ソース周波数の第2の時間変化パターンを特定する、

ように構成されており、

前記複数の第2の分割期間の個数は、前記複数の第1の分割期間の個数よりも多い、
電源システム。

[請求項16]

プラズマ処理装置のチャンバ内でガスから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、

前記チャンバ内に配置された基板支持部に波形周期を有する電気バイアスを供給する工程と、
を含み、

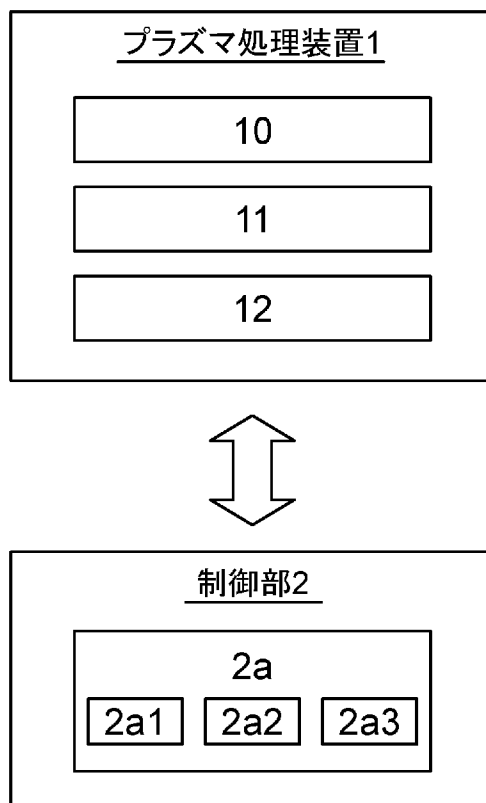
前記ソース高周波電力を供給する工程は、

前記波形周期内の複数の第1の時点それぞれの前記ソース高周波電力のソース周波数を変更しつつ、該複数の第1の時点それぞれの該ソース周波数と該複数の第1の時点によって分割される該波形周期の複数の第1の分割期間の各々の中の補間されたソース周波数とを用いて、前記ソース高周波電力の反射の度合いを最も抑制する前記波形周期における前記ソース周波数の第1の時間変化パターンを特定する工程と、

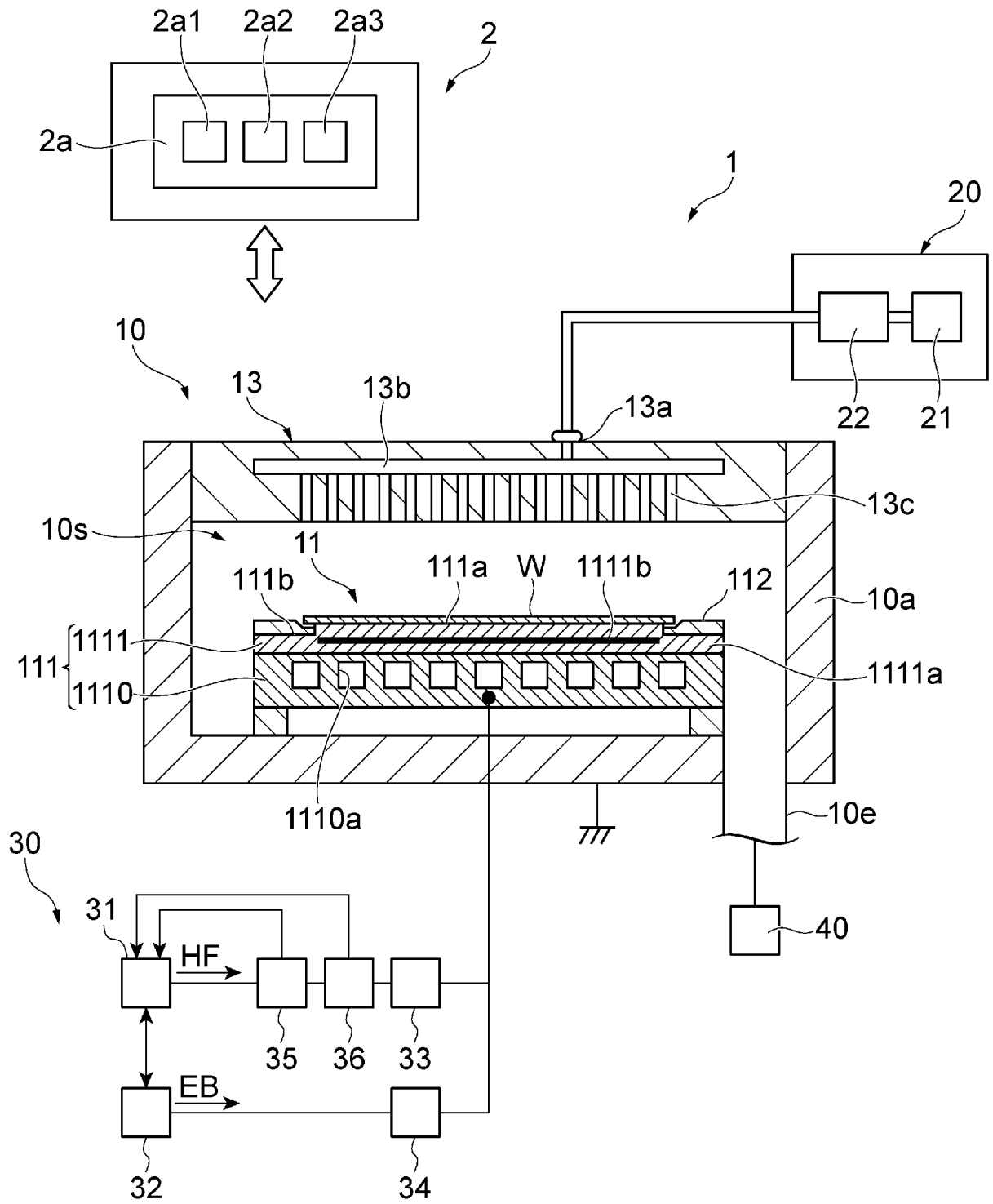
前記波形周期内の複数の第2の時点それぞれの前記ソース高周波電力のソース周波数を前記第1の時間変化パターン又は該第1の時間変化パターンから作成された前記ソース周波数の時間変化パターンに対して変更しつつ、該複数の第2の時点それぞれの該ソース周波数と該複数の第2の時点によって分割される該波形周期の複数の第2の分割期間の各々の中の補間されたソース周波数とを用いて、前記ソース高周波電力の反射の度合いを最も抑制する前記波形周期における前記ソース周波数の第2の時間変化パターンを特定する工程と、
を含み、

前記複数の第2の分割期間の個数は、前記複数の第1の分割期間の個数よりも多い、
周波数制御方法。

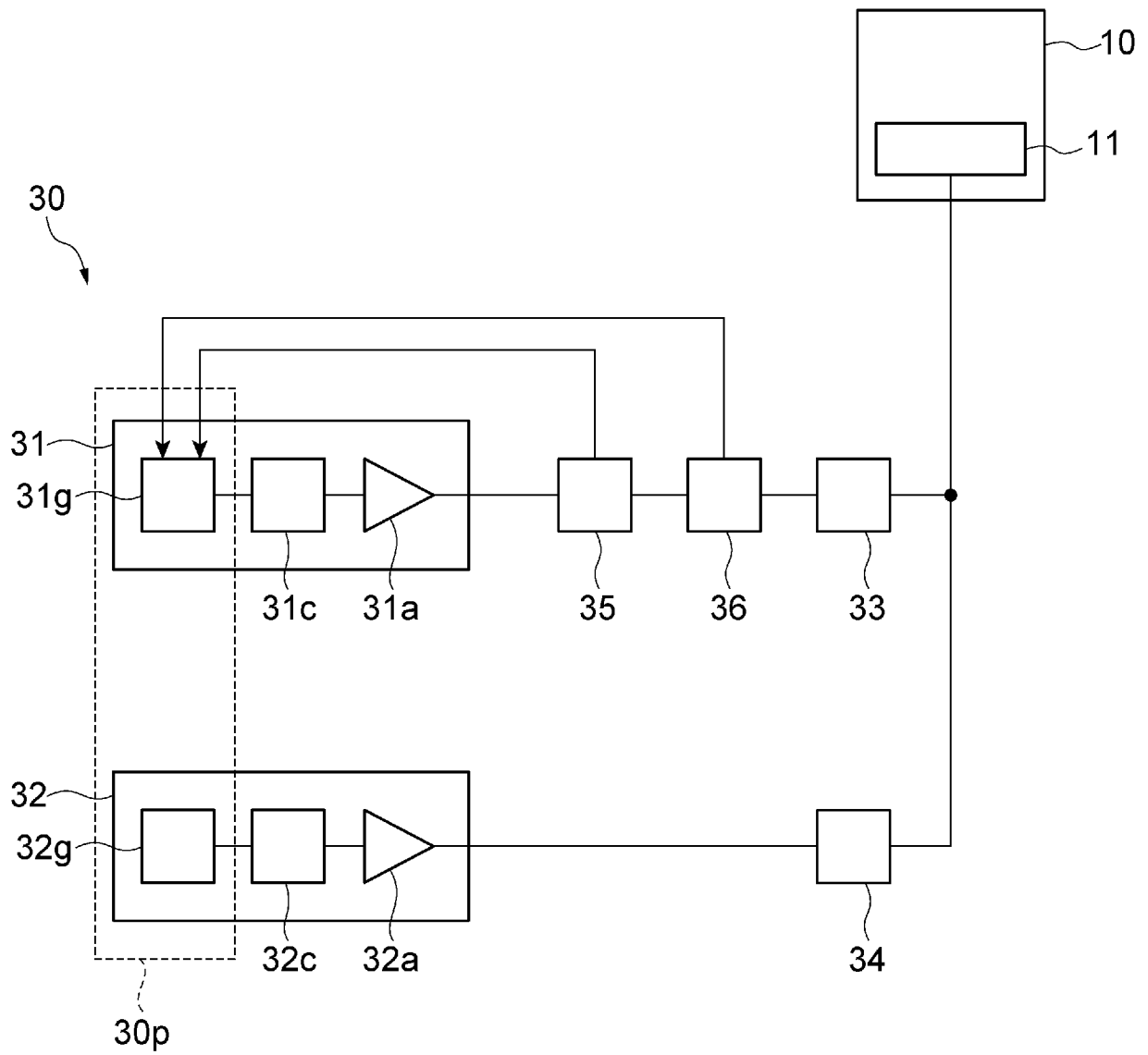
[図1]



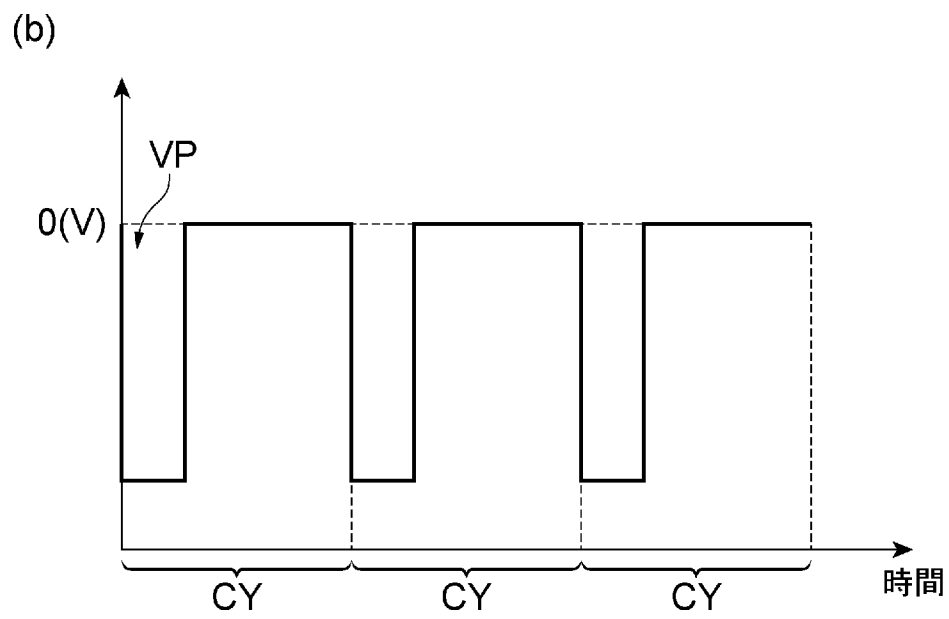
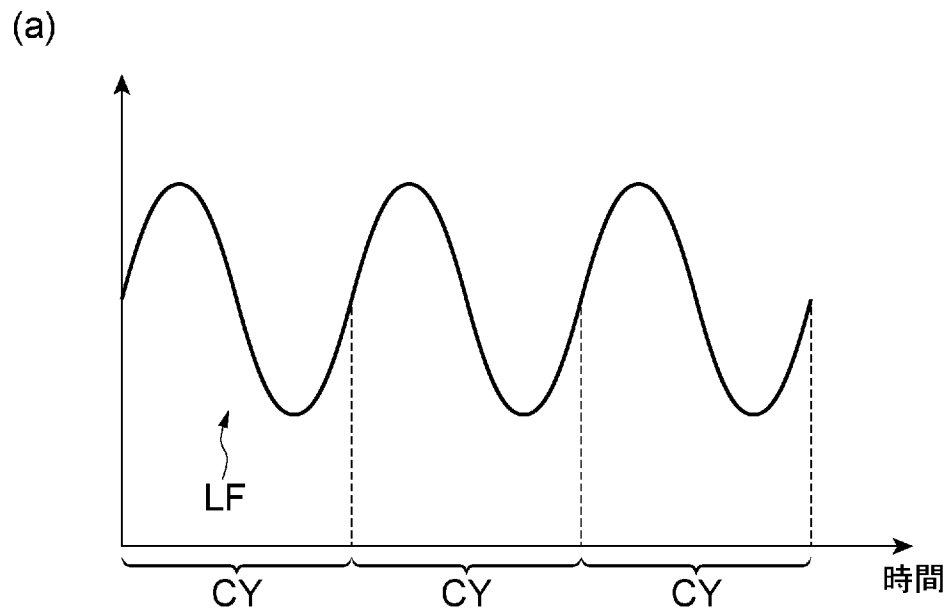
[図2]



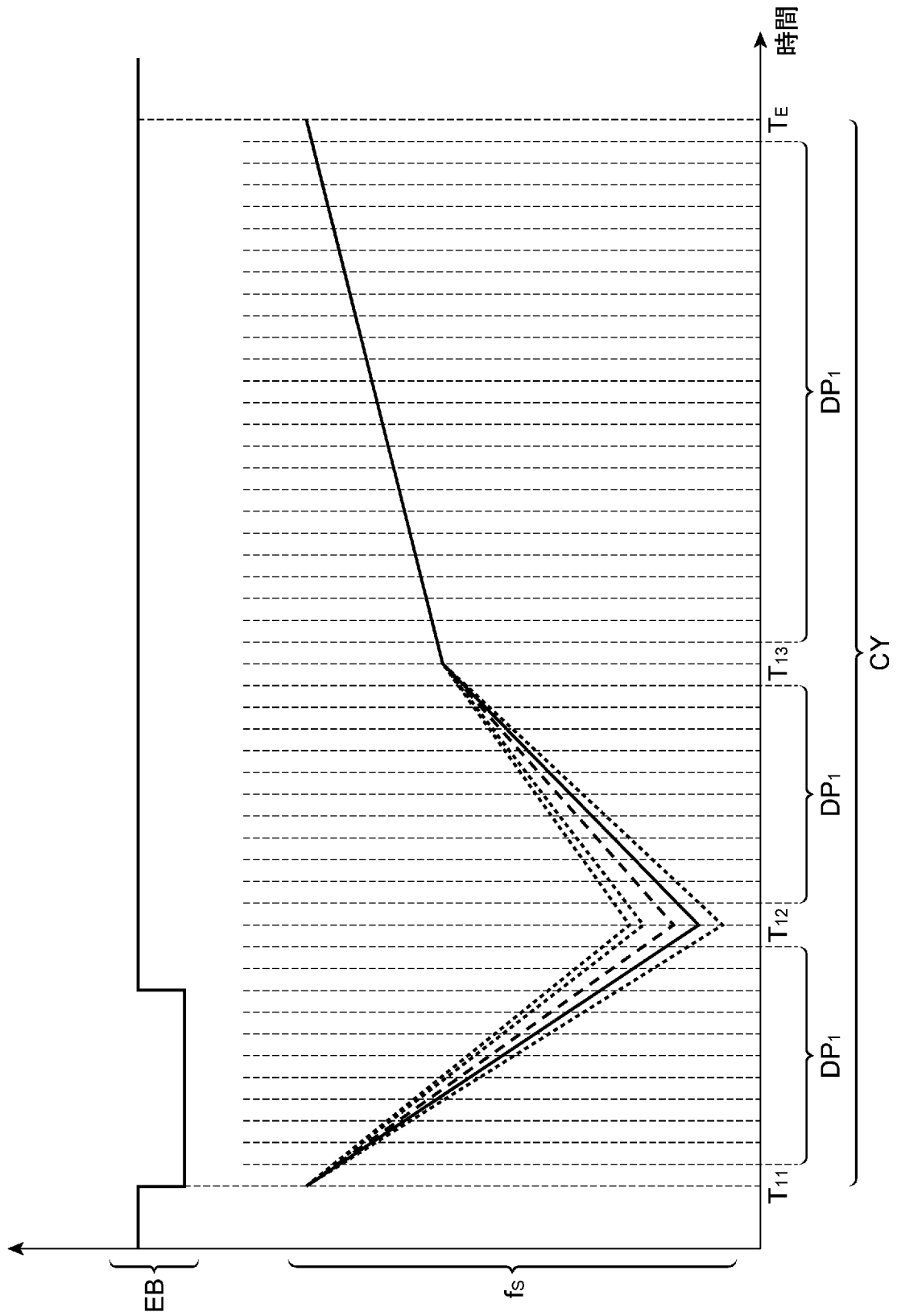
[図3]



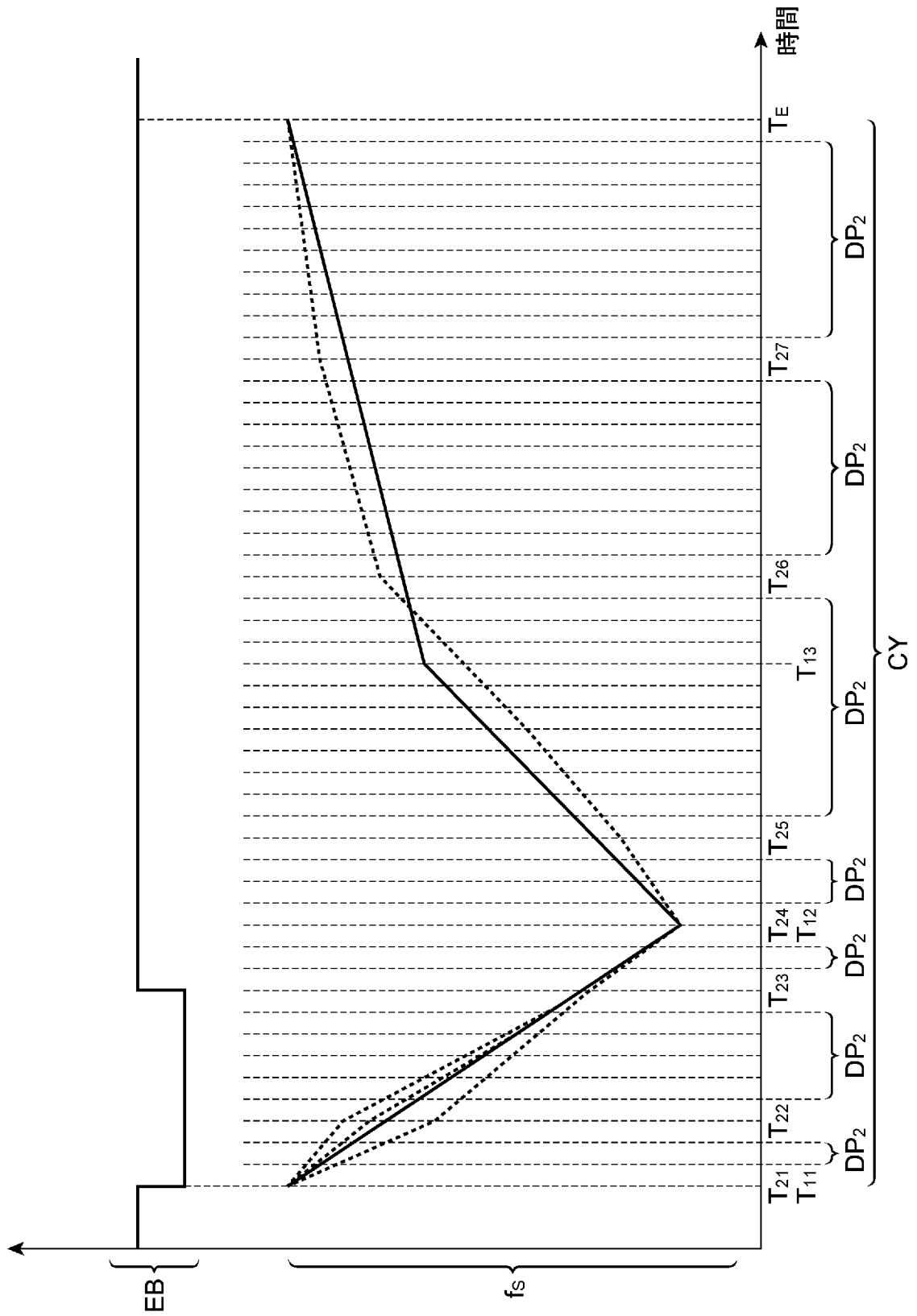
[図4]



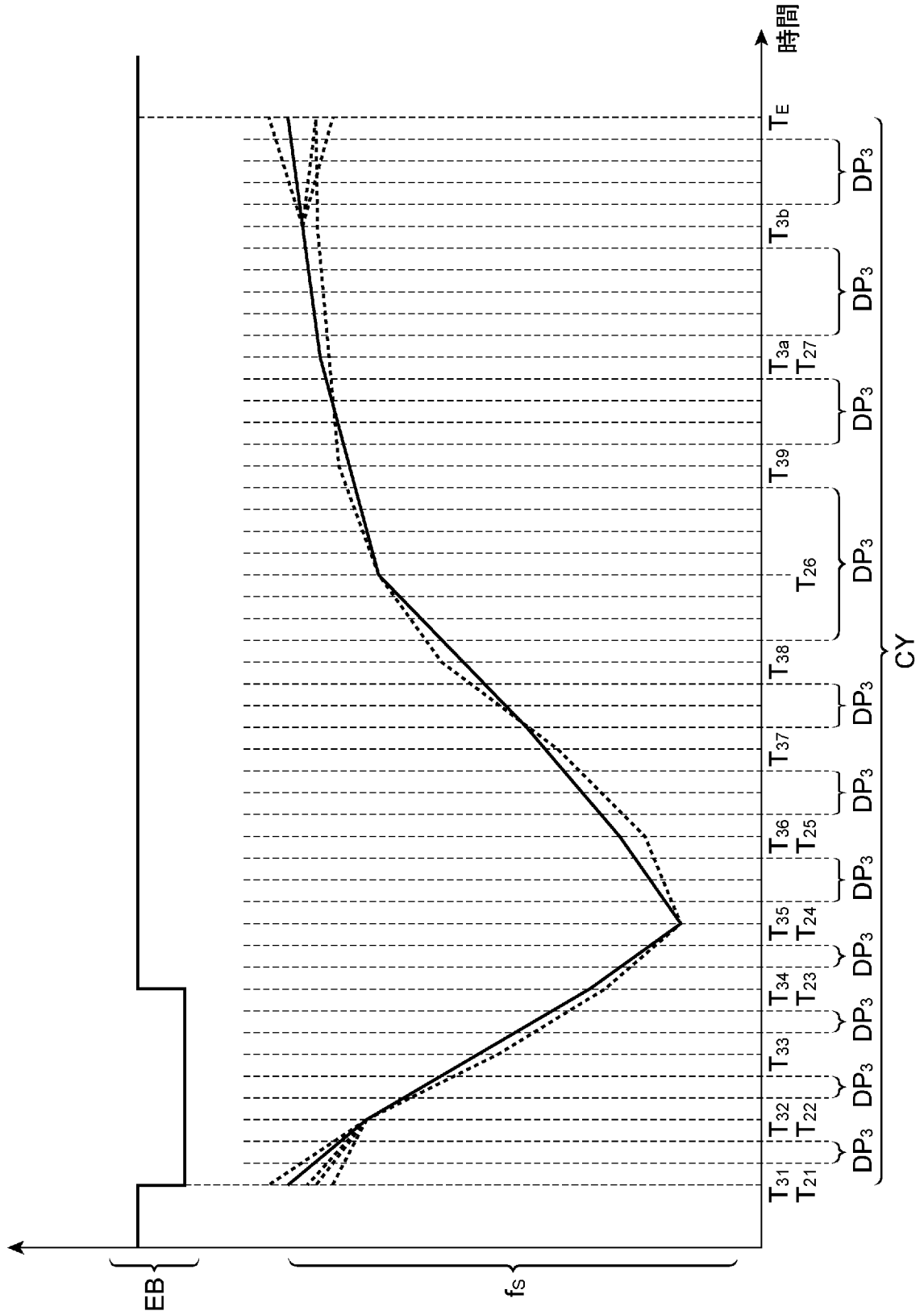
[図5]



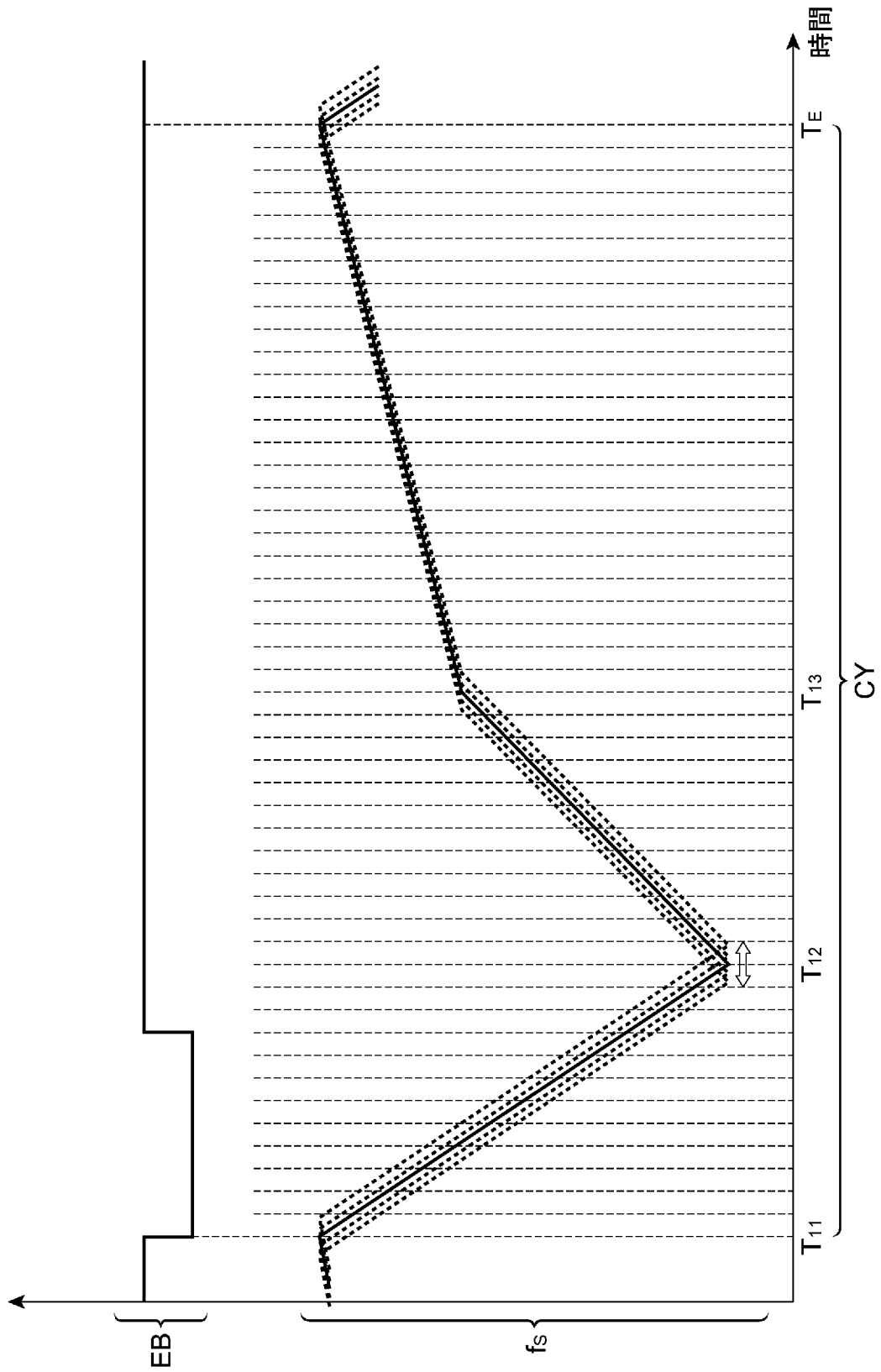
[図6]



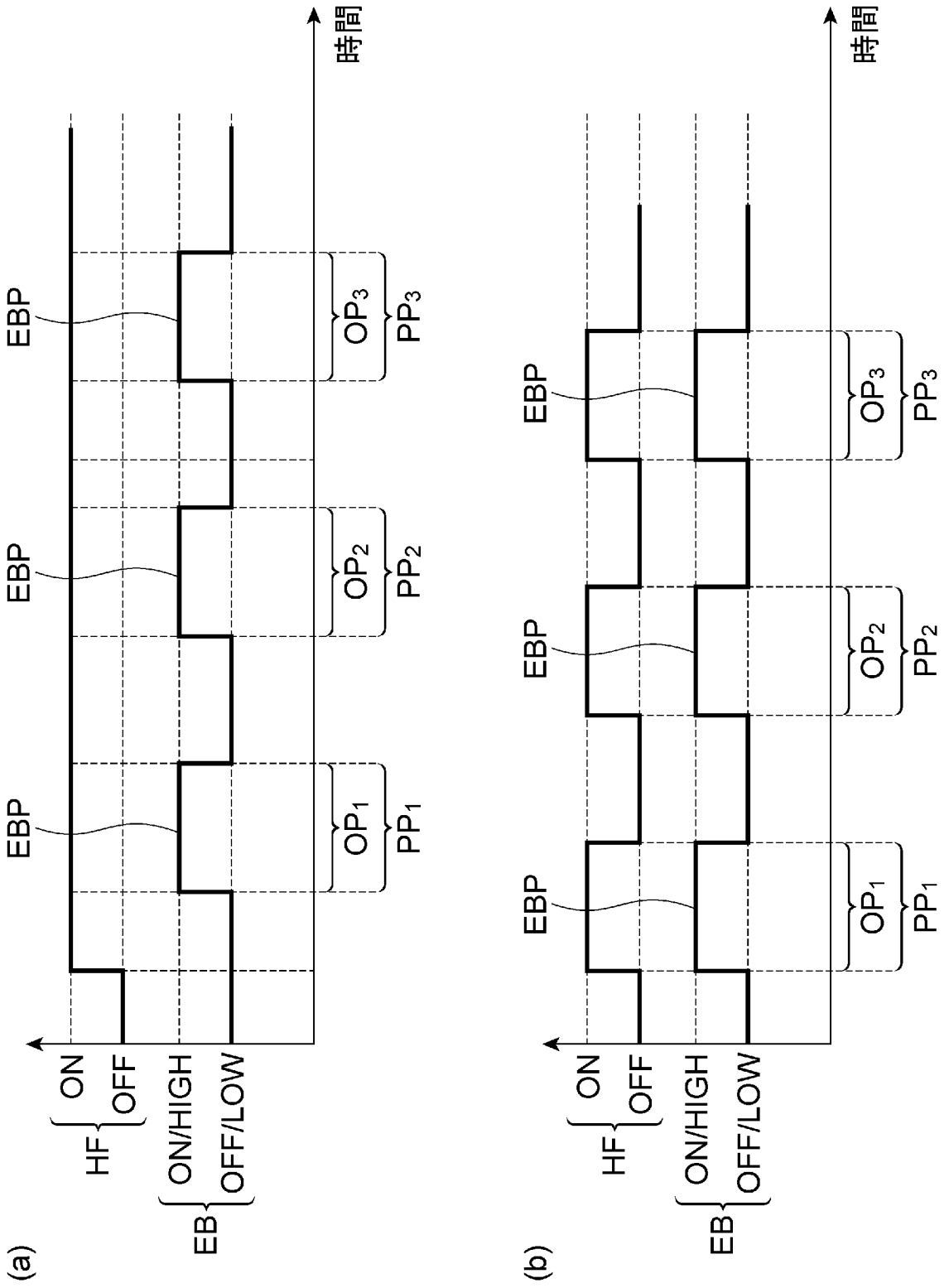
[図7]



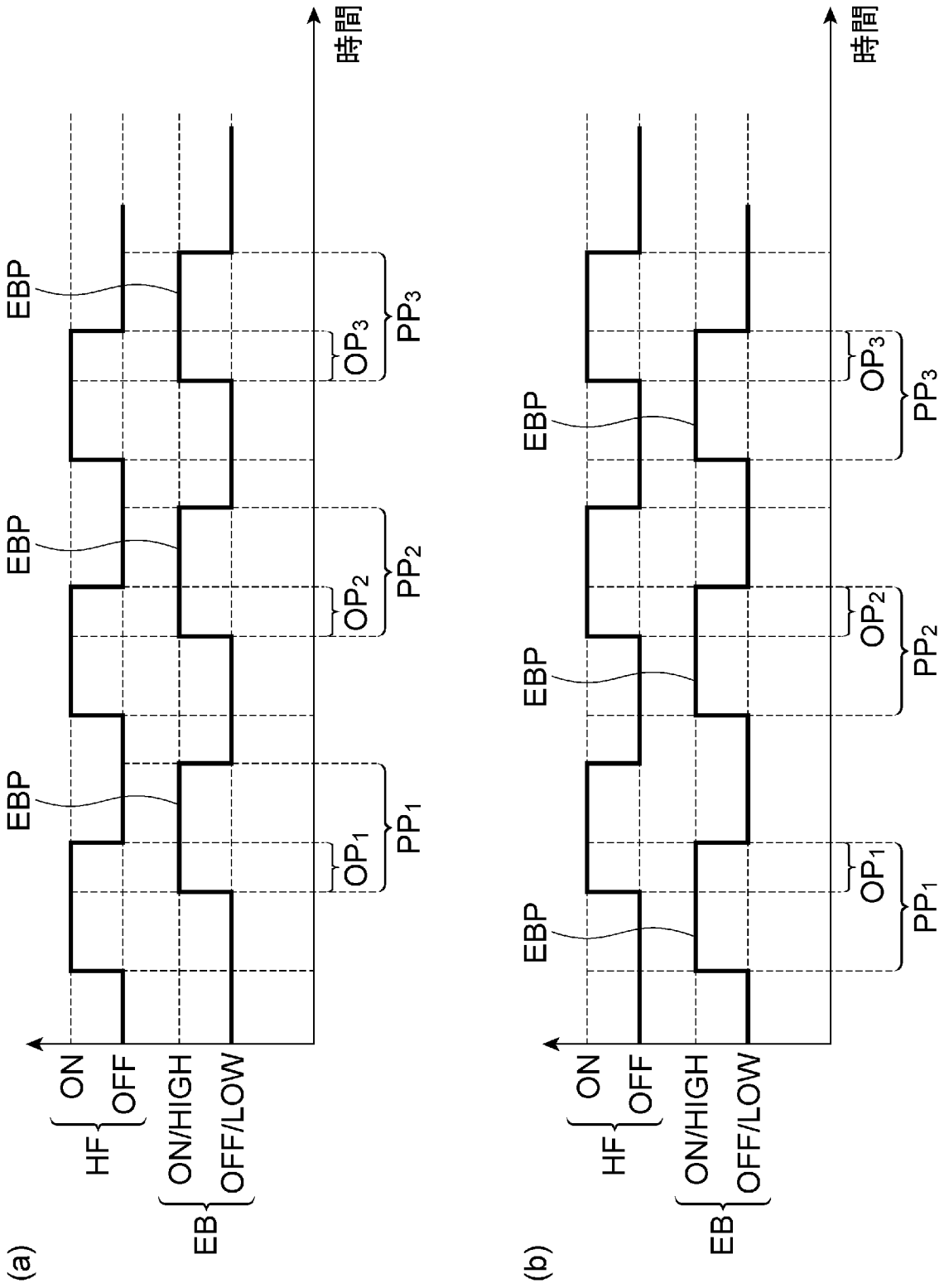
[図8]



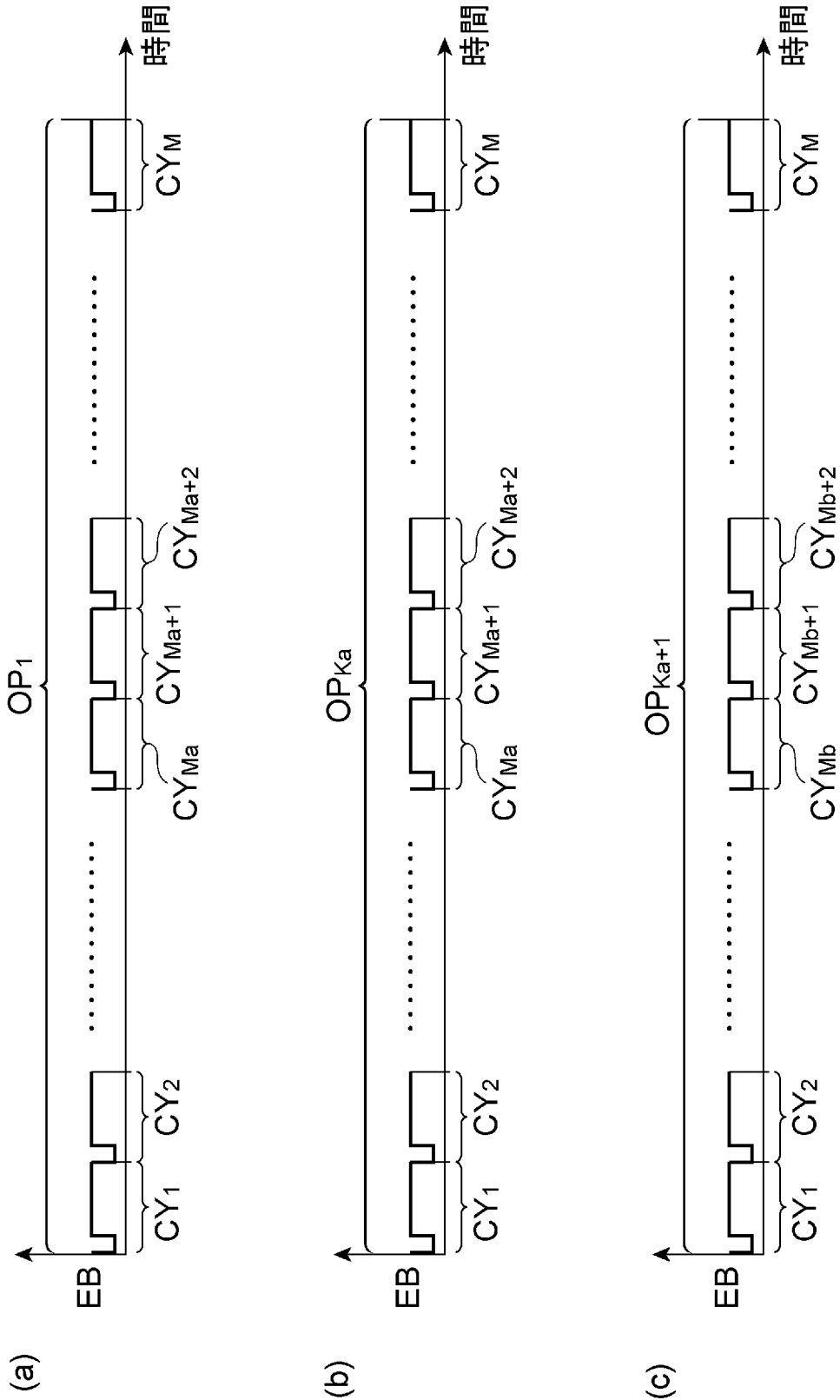
[図9]



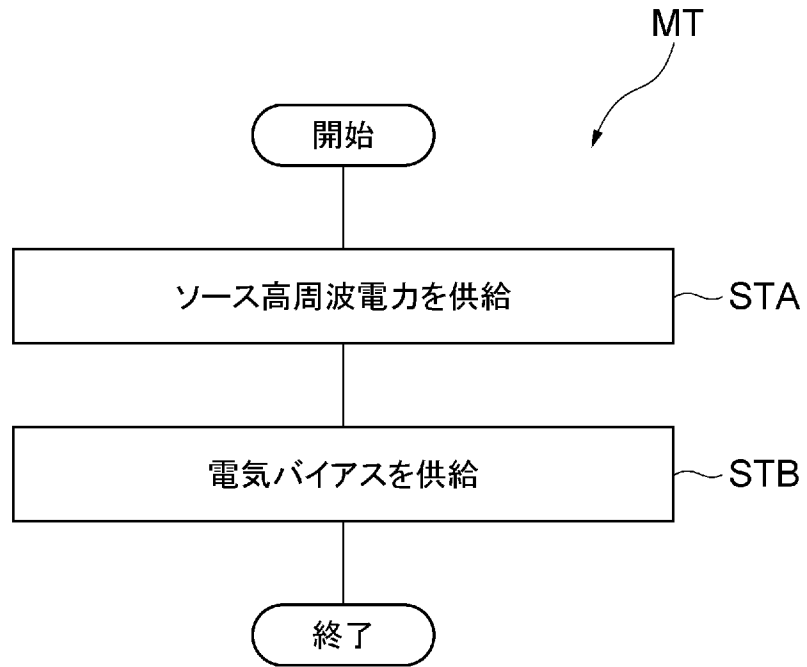
[図10]



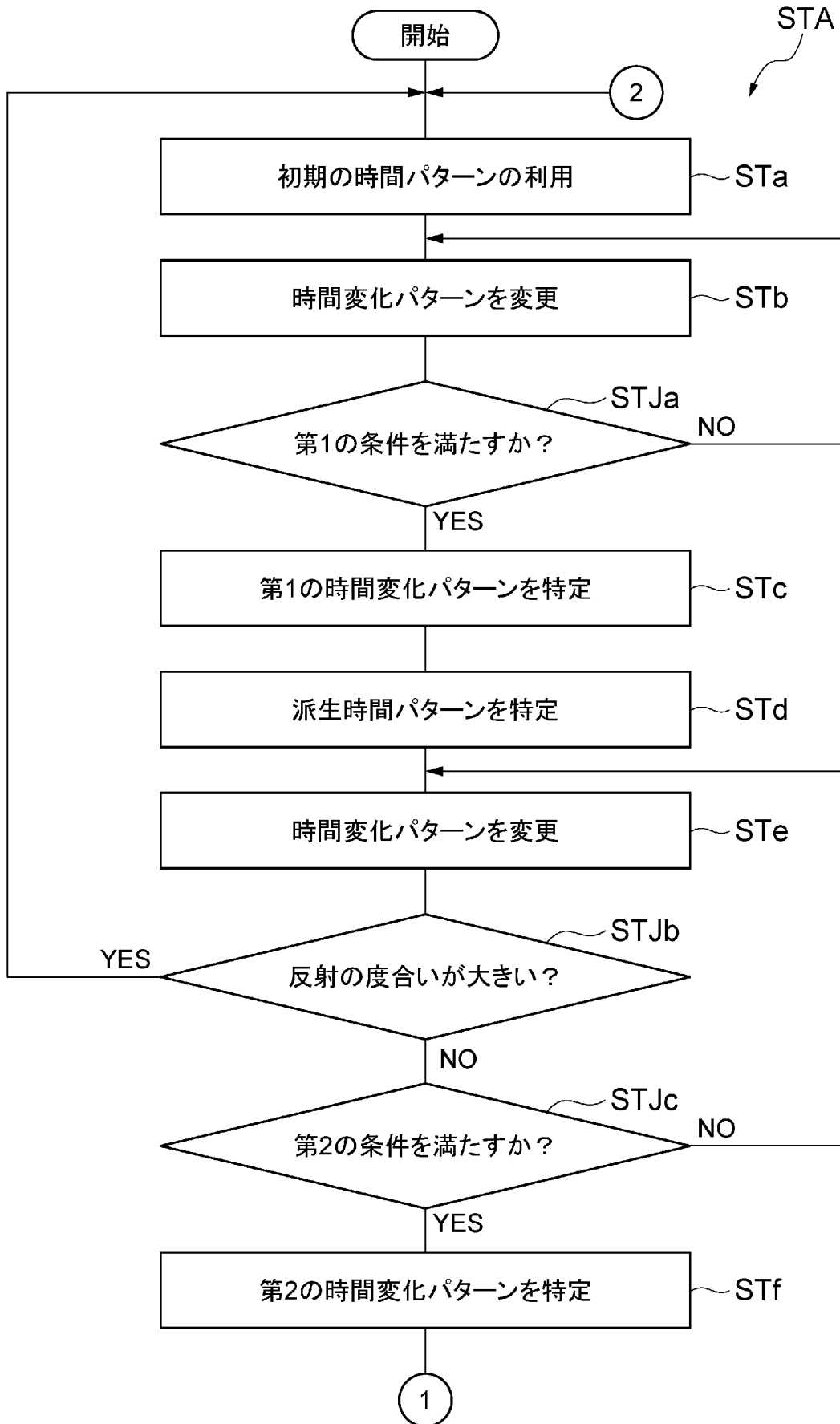
[図11]



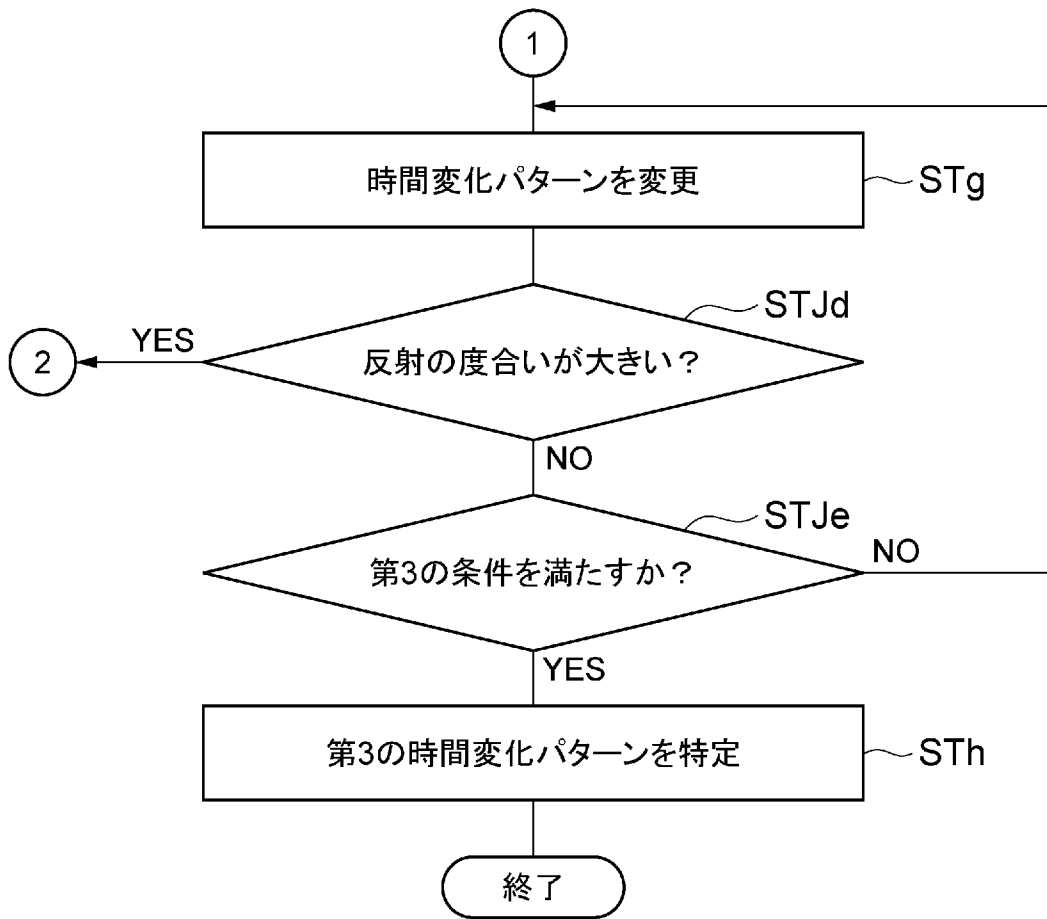
[図12]



[図13]



[図14]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2023/041648

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
<i>H05H 1/46</i> (2006.01)i FI: H05H1/46 M		
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) H05H1/46, H01J37/32		
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 1971-2023 Registered utility model specifications of Japan 1996-2023 Published registered utility model applications of Japan 1994-2023		
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	WO 2019/244734 A1 (TOKYO ELECTRON LIMITED) 26 December 2019 (2019-12-26) claim 20, paragraphs [0137], [0145], fig. 17	1-16
A	WO 2022/163530 A1 (TOKYO ELECTRON LIMITED) 04 August 2022 (2022-08-04) paragraphs [0050], [0052], fig. 5-6	1-16
A	JP 2020-515001 A (APPLIED MATERIALS, INCORPORATED) 21 May 2020 (2020-05-21) claims 1-2, paragraphs [0035]-[0039], fig. 5A-5B	1-16
A	WO 2022/010686 A1 (LAM RESEARCH CORPORATION) 13 January 2022 (2022-01-13) claim 12, paragraphs [0051]-[0052], fig. 3	1-16
A	WO 2021/262827 A1 (LAM RESEARCH CORPORATION) 30 December 2021 (2021-12-30) paragraphs [0045]-[0046], fig. 2	1-16
A	JP 2021-535574 A (LAM RESEARCH CORPORATION) 16 December 2021 (2021-12-16) paragraphs [0133], [0146], fig. 15A-17B	1-16
A	JP 2018-536295 A (MKS INSTRUMENTS, INC.) 06 December 2018 (2018-12-06) paragraph [0049], fig. 8-9	1-16
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> 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 "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 07 December 2023		Date of mailing of the international search report 19 December 2023
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

International application No.

PCT/JP2023/041648

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2021-106354 A (DAIHEN CORP) 26 July 2021 (2021-07-26) claim 1, paragraphs [0027]-[0043], fig. 3A-3B	1-16
A	JP 2021-86659 A (DAIHEN CORP) 03 June 2021 (2021-06-03) paragraphs [0028]-[0029], fig. 3	1-16
P, A	WO 2023/127655 A1 (TOKYO ELECTRON LIMITED) 06 July 2023 (2023-07-06) paragraphs [0061], [0071], fig. 5	1-16

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2023/041648

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
WO	2019/244734	A1	26 December 2019	JP 2020-4710 A claim 20, paragraphs [0137], [0145], fig. 17	
				US 2020/0411286 A1 paragraphs [0179], [0186], fig. 17	
				CN 111886935 A	
				KR 10-2021-0019400 A	
				TW 202006818 A	
WO	2022/163530	A1	04 August 2022	TW 202239273 A	
JP	2020-515001	A	21 May 2020	WO 2018/169631 A1 claims 1-2, paragraphs [0042]-[0046], fig. 5A-5B	
				US 2018/0261430 A1 claims 1-2, paragraphs [0042]-[0046], fig. 5A-5B	
				CN 110313049 A	
				KR 10-2019-0120343 A	
				TW 201843694 A	
WO	2022/010686	A1	13 January 2022	KR 10-2023-0034970 A	
WO	2021/262827	A1	30 December 2021	JP 2023-531914 A paragraphs [0045]-[0046], fig. 2	
				KR 10-2023-0043073 A	
JP	2021-535574	A	16 December 2021	WO 2020/068107 A1 paragraphs [0133], [0146], fig. 15A-17B	
				US 2021/0319980 A1 paragraphs [0133], [0146], fig. 15A-17B	
				KR 10-2021-0053354 A	
				TW 202034371 A	
JP	2018-536295	A	06 December 2018	WO 2017/040415 A1 paragraph [0058], fig. 8-9	
				US 2017/0062187 A1 paragraph [0057], fig. 8-9	
				EP 3840013 A1	
				CN 108140530 A	
				KR 10-2018-0038059 A	
				TW 201719711 A	
JP	2021-106354	A	26 July 2021	US 2021/0202211 A1 claim 1, paragraphs [0033]-[0049], fig. 3A-3B	
				KR 10-2021-0084273 A	
JP	2021-86659	A	03 June 2021	US 2021/0159051 A1 paragraphs [0057]-[0058], fig. 3A-3B	
				KR 10-2021-0064053 A	
WO	2023/127655	A1	06 July 2023	(Family: none)	

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 M		
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）） H05H1/46, H01J37/32 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 - 2023年 日本国実用新案登録公報 1996 - 2023年 日本国登録実用新案公報 1994 - 2023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	WO 2019/244734 A1（東京エレクトロン株式会社）26.12.2019（2019 - 12 - 26） 請求項20, [0137], [0145], 図17	1-16
A	WO 2022/163530 A1（東京エレクトロン株式会社）04.08.2022（2022 - 08 - 04） [0050], [0052], 図5-6	1-16
A	JP 2020-515001 A（アプライド マテリアルズ インコーポレイテッド）21.05.2020 （2020 - 05 - 21） 請求項1-2, [0035]-[0039], 図5A-5B	1-16
A	WO 2022/010686 A1（LAM RESEARCH CORPORATION）13.01.2022（2022 - 01 - 13） Claim12, [0051]-[0052], figure3	1-16
A	WO 2021/262827 A1（LAM RESEARCH CORPORATION）30.12.2021（2021 - 12 - 30） [0045]-[0046], 図2	1-16
A	JP 2021-535574 A（ラム リサーチ コーポレーション）16.12.2021（2021 - 12 - 16） [0133], [0146], 図15A-17B	1-16
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input checked="" type="checkbox"/> 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、一般的な技術水準を示すもの “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	07. 12. 2023	国際調査報告の発送日 19. 12. 2023
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） 佐藤 海 2G 3806 電話番号 03-3581-1101 内線 3226	

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 2018-536295 A (エムケーエス インストゥルメンツ, インコーポレイテッド) 06.12.2018 (2018 - 12 - 06) [0049], 図8-9	1-16
A	JP 2021-106354 A (株式会社ダイヘン) 26.07.2021 (2021 - 07 - 26) 請求項1, [0027]-[0043], 図3A-3B	1-16
A	JP 2021-86659 A (株式会社ダイヘン) 03.06.2021 (2021 - 06 - 03) [0028]-[0029], 図3	1-16
P, A	WO 2023/127655 A1 (東京エレクトロン株式会社) 06.07.2023 (2023 - 07 - 06) [0061], [0071], 図5	1-16

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/JP2023/041648

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
WO 2019/244734 A1	26.12.2019	JP 2020-4710 A 請求項20, [0137], [0145], 図17 US 2020/0411286 A1 [0179], [0186], figure17 CN 111886935 A KR 10-2021-0019400 A TW 202006818 A	
WO 2022/163530 A1	04.08.2022	TW 202239273 A	
JP 2020-515001 A	21.05.2020	WO 2018/169631 A1 Claims1-2, [0042]-[0046], figures5A-5B US 2018/0261430 A1 Claims1-2. [0042]-[0046], figures5A-5B CN 110313049 A KR 10-2019-0120343 A TW 201843694 A	
WO 2022/010686 A1	13.01.2022	KR 10-2023-0034970 A	
WO 2021/262827 A1	30.12.2021	JP 2023-531914 A [0045]-[0046], 図2 KR 10-2023-0043073 A	
JP 2021-535574 A	16.12.2021	WO 2020/068107 A1 [0133], [0146], figures15A-17B US 2021/0319980 A1 [0133], [0146], figures15A-17B KR 10-2021-0053354 A TW 202034371 A	
JP 2018-536295 A	06.12.2018	WO 2017/040415 A1 [0058], figures8-9 US 2017/0062187 A1 [0057], figures8-9 EP 3840013 A1 CN 108140530 A KR 10-2018-0038059 A TW 201719711 A	
JP 2021-106354 A	26.07.2021	US 2021/0202211 A1 Claim1, [0033]-[0049], figures3A-3B KR 10-2021-0084273 A	
JP 2021-86659 A	03.06.2021	US 2021/0159051 A1 [0057]- [0058], figures3A-3B KR 10-2021-0064053 A	
WO 2023/127655 A1	06.07.2023	(ファミリーなし)	