

(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
2015年1月29日(29.01.2015)



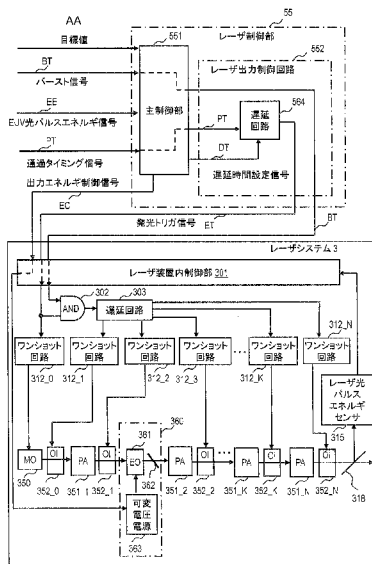
(10) 国際公開番号
WO 2015/012099 A1

- (51) 国際特許分類:
H01S 3/10 (2006.01) H01S 3/23 (2006.01)
H01S 3/13 (2006.01) H01L 21/027 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2014/068163
- (22) 国際出願日: 2014年7月8日(08.07.2014)
- (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 2013-154365 2013年7月25日(25.07.2013) JP
- (71) 出願人: ギガフォトン株式会社(GIGAPHOTON INC.) [JP/JP]; 〒3238558 栃木県小山市大字横倉新田400番地 Tochigi (JP).
- (72) 発明者: 庭野 素己(NIWANO, Motoki); 〒3238558 栃木県小山市大字横倉新田400番地 ギガフォトン株式会社内 Tochigi (JP). 斎藤 隆志
- (74) 代理人: 特許業務法人藤央特許事務所(TOU-OU PATENT FIRM); 〒1050001 東京都港区虎ノ門一丁目16番4号アーバン虎ノ門ビル 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, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

[続葉有]

(54) Title: LASER SYSTEM, EXTREME ULTRAVIOLET LIGHT GENERATION SYSTEM, AND METHOD FOR CONTROLLING LASER DEVICE

(54) 発明の名称: レーザシステム、極端紫外光生成システム及びレーザ装置の制御方法



(57) Abstract: Provided is a laser system capable of appropriately controlling the energy of a laser pulse. The laser system according to an embodiment of the present invention may control an optical isolator so that the optical isolator returns to an open state after switching from the open state to the open state with respect to each laser pulse repeatedly output from a master oscillator. The laser system may control an optical attenuator to set the transmittance of the optical attenuator with respect to each laser pulse repeatedly output from the master oscillator.

(57) 要約: レーザ光パルスのエネルギーを適切に制御し得るレーザシステムが提供され得る。本開示の一例のレーザシステムは、マスタオシレータから繰り返し出力されるレーザ光パルスのそれぞれに対して、光アイソレータが開状態から開状態へ切り替わった後に開状態へ戻るように、上記光アイソレータを制御してもよい。レーザシステムは、上記マスタオシレータから繰り返し出力されるレーザ光パルスのそれぞれに対して、光アッテネータの透過率を設定するように、上記光アッテネータを制御してもよい。

- 3 Laser system
55 Laser controller
301 Controller in laser device
303 Delay circuit
312 One shot circuit
315 Laser pulse energy sensor
363 Variable voltage source
551 Main controller
552 Laser output control circuit
564 Delay circuit
BT Burst signal
EE EUV optical pulse energy signal
PT Passing timing signal
EC Output energy control signal
DT Delay time setting signal
ET Light emitting trigger signal
AA Target value

WO 2015/012099 A1



(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, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, 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, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, 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:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

明 細 書

発明の名称：

レーザシステム、極端紫外光生成システム及びレーザ装置の制御方法

参照による取り込み

[0001] 本出願は、平成25年（2013年）7月25日に出願された日本出願である特願2013-154365の優先権を主張し、その内容を参照することにより、本出願に取り込む。

技術分野

[0002] 本開示は、レーザシステム、極端紫外光生成システム及びレーザ装置の制御方法に関する。

背景技術

[0003] 近年、半導体プロセスの微細化に伴って、半導体プロセスの光リソグラフィにおける転写パターンの微細化が急速に進展している。次世代においては、70nm～45nmの微細加工、さらには32nm以下の微細加工が要求されるようになる。このため、例えば32nm以下の微細加工の要求に応えるべく、波長13nm程度の極端紫外（EUV）光を生成するための装置と縮小投影反射光学系（reduced projection reflective optics）とを組み合わせた露光装置の開発が期待されている。

[0004] EUV光生成装置としては、ターゲット物質にレーザ光を照射することによって生成されるプラズマを用いたLPP（Laser Produced Plasma）方式の装置と、放電によって生成されるプラズマを用いたDPP（Discharge Produced Plasma）方式の装置と、軌道放射光を用いたSR（Synchrotron Radiation）方式の装置との3種類の装置が提案されている。

先行技術文献

特許文献

[0005] 特許文献1：特許第3 7 7 5 8 4 0号

特許文献2：特表2 0 1 0－5 1 4 2 1 4号

特許文献3：特表2 0 1 0－5 1 9 7 8 3号

特許文献4：特開2 0 1 2－2 1 6 7 6 9号

特許文献5：特開2 0 1 2－2 1 6 7 6 8号

特許文献6：特開2 0 1 1－2 1 0 7 0 4号

概要

[0006] 本開示の一例のレーザシステムは、レーザ光パルスを出力するマスタオシレータと、前記マスタオシレータから出力されたレーザ光パルスの光路上に配置され、前記レーザ光パルスを順次増幅する複数段の光増幅器と、前記光路上に配置され、開状態と閉状態とに切り替え可能な光アイソレータと、前記光路上に配置され、光の透過率を設定可能な光アッテネータと、前記光アイソレータ及び前記光アッテネータを制御する制御部と、を含んでもよい。前記制御部は、前記マスタオシレータから繰り返し出力されるレーザ光パルスのそれぞれに対して、前記光アイソレータが前記開状態から前記開状態へ切り替わった後に前記開状態へ戻るように、前記光アイソレータを制御してもよい。前記制御部は、前記マスタオシレータから繰り返し出力されるレーザ光パルスのそれぞれに対して、前記光アッテネータの前記透過率を設定するように、前記光アッテネータを制御してもよい。

図面の簡単な説明

[0007] 本開示のいくつかの実施形態を、単なる例として、添付の図面を参照して以下に説明する。

[図1]図1は、例示的なL P P方式のE U V光生成システムの構成を概略的に示す。

[図2]図2は、E U V光生成システムの構成の一部断面図を示す。

[図3]図3は、E U V光生成制御部による、ターゲット供給部及びレーザ装置の制御を説明するブロック図を示す。

[図4]図4は、レーザ装置及びレーザ制御部を含むレーザシステム構成の比較

例を模式的に示す。

[図5]図5は、レーザ制御部からレーザ装置への制御信号、パルスレーザ光及びEUV光のタイミングチャートを示す。

[図6A]図6Aは、バーストレーザ光パルスのパルスエネルギーの測定例を示す。

[図6B]図6Bは、バーストEUV光パルスのパルスエネルギーの測定例を示す。

[図7]図7は、光アイソレータの構成例を模式的に示す。

[図8]図8は、可変アッテネータを含むレーザ装置及びレーザ制御部を含むレーザシステム構成の例を模式的に示す。

[図9]図9は、可変アッテネータの構成及び動作を模式的に示す。

[図10]図10は、光アイソレータの動作タイミングを模式的に示す。

[図11]図11は、レーザ装置における制御信号、パルスレーザ光及びEUV光のタイミングチャートを示す。

[図12]図12は、バーストEUV光パルスにおけるパルスエネルギーの時間変化を模式的に示す。

[図13]図13は、可変アッテネータにおける印加電圧の制御のフローチャートの例を示す。

[図14]図14は、スパイク制御データテーブルの構成例を示す。

[図15A]図15Aは、スパイク制御における可変アッテネータでの印加電圧の測定例を示す。

[図15B]図15Bは、スパイク制御におけるEUV光パルスエネルギーの測定例を示す。

[図16]図16は、図13のフローチャートにおけるスパイク制御S114のフローチャートの例を示す。

[図17]図17は、図13のフローチャートにおけるスパイク制御データテーブル更新S116のフローチャートの例を示す。

[図18]図18は、図13のフローチャートにおけるフィードバック制御S1

17のフローチャートの例を示す。

[図19]図19は、図13のフローチャートにおけるフィードバック制御データの記憶S119のフローチャートの例を示す。

[図20]図20は、可変アッテネータにおける印加電圧の制御のフローチャートの例を示す。

[図21]図21は、図20のフローチャートにおける、ステップS202のフローチャート例を示す。

実施形態

[0008] <内容>

1. 概要
2. 用語の説明
3. EUV光生成システムの全体説明
 - 3.1 構成
 - 3.2 動作
4. EUV光生成システムにおけるターゲット供給部及びレーザ装置の制御
 - 4.1 EUV光生成システムの構成
 - 4.2 動作
5. レーザ装置及びレーザ制御部を含むレーザシステム構成の比較例
 - 5.1 構成
 - 5.2 動作
 - 5.3 課題
 - 5.3.1 EUV光パルスエネルギーの安定化
 - 5.3.2 光アイソレータの構成
 - 5.3.3 光アイソレータによるレーザ光パルス制御の課題
6. 可変アッテネータを含むレーザ装置及びレーザ制御部を含むレーザシステム
 - 6.1 構成
 - 6.2 動作

6. 3 作用

6. 4 その他

7. 可変アッテネータにおける印加電圧の制御方法

7. 1 第1の制御方法

7. 2 第2の制御方法

[0009] 以下、本開示の実施形態について、図面を参照しながら詳しく説明する。

以下に説明される実施形態は、本開示のいくつかの例を示すものであって、本開示の内容を限定するものではない。また、各実施形態で説明される構成及び動作の全てが本開示の構成及び動作として必須であるとは限らない。なお、同一の構成要素には同一の参照符号を付して、重複する説明を省略する。

[0010] 1. 概要

L P P方式E U V光生成システムは、レーザ装置から出力されたレーザ光をターゲットに照射することによってプラズマ化し、E U V光を生成し得る。露光装置用のL P P方式E U V光生成システムは、5 0～1 0 0 k H z以上の高い繰り返し周波数でE U V光パルスを生成し、E U V光パルス毎にパルスエネルギーを制御する必要がある。E U V光パルス毎にパルスエネルギーを制御するには、レーザ装置から出力されるレーザ光のパルスエネルギーをパルス毎に制御する必要がある。

[0011] しかし、5 0～1 0 0 k H z以上の高い繰り返し周波数において、レーザ光のパルスエネルギーを制御することは困難であった。また、E U V光生成システムシステムに限らず、レーザ加工装置のような他の装置においても、高い繰り返し周波数においてレーザ光のパルスエネルギーをパルス毎に制御することは困難であった。

[0012] 本開示の1つの観点によれば、レーザシステムは、マスタオシレータから繰り返し出力されるレーザ光パルスのそれぞれに対して、光アイソレータが閉状態から開状態へ切り替わった後に閉状態へ戻るように、上記光アイソレータを制御してもよい。さらに、レーザシステムは、マスタオシレータから

繰り返し出力されるレーザ光パルスのそれぞれに対して、光アッテネータの透過率を設定するように、上記光アッテネータを制御してもよい。

[0013] 本開示の1つの観点によれば、レーザ装置の動作安定性の低下を抑制しつつ、レーザ光のパルスエネルギーを、パルス毎に適切に制御し得る。

[0014] 2. 用語の説明

本願において使用される用語を以下に説明する。「プラズマ生成領域」は、EUV光を生成するためのプラズマの生成が開始される領域を意味し得る。プラズマ生成領域においてプラズマの生成が開始されるためには、プラズマ生成領域にターゲットが供給され、かつ、ターゲットがプラズマ生成領域に到達するタイミングでプラズマ生成領域にパルスレーザ光が集光される必要があり得る。

[0015] 「バーストレーザ光パルス」は、一群の連続するレーザ光パルスを意味し得る。「バーストEUV光パルス」は、一群の連続するEUV光パルスを意味し得る。「発光トリガ信号」は、発光トリガパルスを含む信号を意味し得る。「バースト期間」は、バースト信号がONである期間を意味し得る。

[0016] 3. EUV光生成システムの全体説明

3. 1 構成

図1に、例示的なLPP方式のEUV光生成システムの構成を概略的に示す。EUV光生成装置1は、少なくとも1つのレーザ装置3と共に用いられてもよい。本願においては、EUV光生成装置1及びレーザ装置3を含むシステムを、EUV光生成システム11と称する。図1に示し、かつ、以下に詳細に説明するように、EUV光生成装置1は、チャンバ2、ターゲット供給部26を含んでもよい。

[0017] チャンバ2は、密閉可能であってもよい。ターゲット供給部26は、例えば、チャンバ2の壁を貫通するように取り付けられてもよい。ターゲット供給部26から供給されるターゲット物質の材料は、スズ、テルビウム、ガドリニウム、リチウム、キセノン、又は、それらの内のいずれか2つ以上の組合せを含んでもよいが、これらに限定されない。

- [0018] チャンバ2の壁には、少なくとも1つの貫通孔が設けられていてもよい。その貫通孔には、ウインドウ21が設けられてもよく、ウインドウ21をレーザ装置3から出力されるパルスレーザ光32が透過してもよい。チャンバ2の内部には、例えば、回転楕円面形状の反射面を有するEUV集光ミラー23が配置されてもよい。EUV集光ミラー23は、第1及び第2の焦点を有し得る。
- [0019] EUV集光ミラー23の表面には、例えば、モリブデンとシリコンとが交互に積層された多層反射膜が形成されていてもよい。EUV集光ミラー23は、例えば、その第1の焦点がプラズマ生成領域25に位置し、その第2の焦点が中間集光点（IF）292に位置するように配置されるのが好ましい。EUV集光ミラー23の中央部には貫通孔24が設けられていてもよく、貫通孔24をパルスレーザ光33が通過してもよい。
- [0020] EUV光生成装置1は、EUV光生成制御部5、ターゲットセンサ4等を含んでもよい。ターゲットセンサ4は、撮像機能を有してもよく、ターゲット27の存在、軌跡、位置、速度の少なくとも一つを検出するように構成されてもよい。
- [0021] また、EUV光生成装置1は、チャンバ2の内部と露光装置6の内部とを連通させる接続部29を含んでもよい。接続部29内部には、アパーチャが形成された壁291が設けられてもよい。壁291は、そのアパーチャがEUV集光ミラー23の第2の焦点位置に位置するように配置されてもよい。
- [0022] さらに、EUV光生成装置1は、レーザ光進行方向制御部34、レーザ光集光ミラー22、ターゲット27を回収するためのターゲット回収部28等を含んでもよい。レーザ光進行方向制御部34は、レーザ光の進行方向を規定するための光学素子と、この光学素子の位置、姿勢等を調整するためのアクチュエータとを備えてもよい。
- [0023] 3. 2 動作

図1を参照すると、レーザ装置3から出力されたパルスレーザ光31は、レーザ光進行方向制御部34を経て、パルスレーザ光32としてウインドウ

21を透過してチャンバ2内に入射してもよい。パルスレーザ光32は、少なくとも1つのレーザ光経路に沿ってチャンバ2内を進み、レーザ光集光ミラー22で反射されて、パルスレーザ光33として少なくとも1つのターゲット27に照射されてもよい。

[0024] ターゲット供給部26は、ターゲット27をチャンバ2内部のプラズマ生成領域25に向けて出力するよう構成されてもよい。ターゲット27には、パルスレーザ光33に含まれる少なくとも1つのパルスが照射されてもよい。パルスレーザ光が照射されたターゲット27はプラズマ化し、そのプラズマから放射光251が放射され得る。

[0025] 放射光251に含まれるEUV光252は、EUV集光ミラー23によって選択的に反射されてもよい。EUV集光ミラー23によって反射されたEUV光252は、中間集光点292で集光され、露光装置6に出力されてもよい。なお、1つのターゲット27に、パルスレーザ光33に含まれる複数のパルスが照射されてもよい。

[0026] EUV光生成制御部5は、EUV光生成システム11全体の制御を統括するよう構成されてもよい。EUV光生成制御部5は、ターゲットセンサ4によって撮像されたターゲット27のイメージデータ等処理するよう構成されてもよい。また、EUV光生成制御部5は、例えば、ターゲット27が供給されるタイミング、ターゲット27の出力方向等を制御するよう構成されてもよい。

[0027] さらに、EUV光生成制御部5は、例えば、レーザ装置3の発光タイミングの制御、パルスレーザ光32の進行方向の制御および、パルスレーザ光33の集光位置の制御の内少なくとも1つを行うよう構成されてもよい。上述の様々な制御は単なる例示に過ぎず、必要に応じて他の制御が追加されてもよい。

[0028] 4. EUV光生成システムにおけるターゲット供給部及びレーザ装置の制御
4. 1 EUV光生成システムの構成

図2は、EUV光生成システム11の構成例の一部断面図を示す。図2に

示されるように、チャンバ2の内部には、レーザ光集光光学系22aと、EUV集光ミラー23と、ターゲット回収部28と、EUV集光ミラーホルダ81と、プレート82及び83とが設けられてもよい。

[0029] チャンバ2には、プレート82が固定されてもよい。プレート82には、プレート83が固定されてもよい。EUV集光ミラー23は、EUV集光ミラーホルダ81を介してプレート82に固定されてもよい。

[0030] レーザ光集光光学系22aは、軸外放物面ミラー221及び平面ミラー222と、ホルダ223及び224とを含んでもよい。軸外放物面ミラー221及び平面ミラー222は、それぞれ、ホルダ223及び224によって保持されてもよい。ホルダ223及び224は、プレート83に固定されてもよい。

[0031] 軸外放物面ミラー221及び平面ミラー222によって反射されたパルスレーザ光33がプラズマ生成領域25で集光されるように、これらのミラーの位置及び姿勢が保持されてもよい。ターゲット回収部28は、ターゲット27の軌道の延長線上に配置されてもよい。

[0032] チャンバ2には、ターゲット供給部26が取り付けられてもよい。ターゲット供給部26は、リザーバ61を有していてもよい。リザーバ61は、図3に示すヒータ261を用いてターゲットの材料を溶融した状態で内部に貯蔵してもよい。リザーバ61には、ノズル孔62としての開孔が形成されていてもよい。

[0033] リザーバ61の一部が、チャンバ2の壁面に形成された貫通孔2aを貫通しており、リザーバ61に形成されたノズル孔62の位置がチャンバ2の内部に位置していてもよい。ターゲット供給部26は、ノズル孔62を介して、溶融したターゲットの材料をドロップレット状のターゲット27としてチャンバ2内のプラズマ生成領域25に供給してもよい。貫通孔2aの周囲のチャンバ2の壁面には、リザーバ61のフランジ部61aが密着して固定されてもよい。

[0034] チャンバ2には、ターゲットセンサ4と発光部45とが取り付けられても

よい。ターゲットセンサ４は、光センサ４１と、結像光学系４２と、容器４３とを含んでもよい。発光部４５は、光源４６と、集光光学系４７と、容器４８とを含んでもよい。光源４６の出力光は、集光光学系４７によって集光され得る。その集光位置はターゲット２７のほぼ軌道上であってもよい。

[0035] ターゲットセンサ４と発光部４５とは、ターゲット２７の軌道を挟んで互いに反対側に配置されていてもよい。チャンバ２にはウインドウ２１a及び２１bが取り付けられていてもよい。ウインドウ２１aは、発光部４５とターゲット２７の軌道との間に位置していてもよい。

[0036] 発光部４５は、ウインドウ２１aを介してターゲット２７の軌道の所定位置に光を集光してもよい。ターゲット２７が発光部４５による光の集光位置を通過するとき、ターゲットセンサ４は、ターゲット２７の軌道及びその周囲を通る光の変化を検出してもよい。結像光学系４２は、ターゲット２７の検出精度を向上させるために、ターゲット２７の軌道及びその周囲における像をターゲットセンサ４の受光面に結像してもよい。

[0037] ターゲットセンサ４によって検出されるターゲット２７の中心位置を、ターゲット検出位置４０とする。図２に示された例において、ターゲット検出位置４０は、発光部４５による光の集光位置とほぼ一致し得る。

[0038] チャンバ２には、ＥＵＶ光パルスエネルギーセンサ７が取り付けられてもよい。ＥＵＶ光パルスエネルギーセンサ７は、プラズマ生成領域２５で生成されたＥＵＶ光パルスのエネルギーを測定できる位置に配置してもよい。ＥＵＶ光パルスエネルギーセンサ７は、ＥＵＶ光パルスのエネルギーの測定値を、ＥＵＶ光生成制御部５に出力してもよい。

[0039] チャンバ２の外部には、レーザ光進行方向制御部３４と、ＥＵＶ光生成制御部５とが設けられてもよい。レーザ光進行方向制御部３４は、高反射ミラー３４１及び３４２と、ホルダ３４３及び３４４とを含んでもよい。高反射ミラー３４１及び３４２は、それぞれ、ホルダ３４３及び３４４によって保持されてもよい。高反射ミラー３４１及び３４２は、レーザ装置３が出力するパルスレーザ光を、ウインドウ２１を介してレーザ光集光光学系２２aに

導いてもよい。

[0040] E U V 光生成制御部 5 は、露光装置 6 からの制御信号を受信してもよい。

E U V 光生成制御部 5 は、露光装置 6 からの制御信号に従って、ターゲット供給部 2 6 及びレーザ装置 3 を制御してもよい。

[0041] 4. 2 動作

図 3 は、E U V 光生成制御部 5 による、ターゲット供給部 2 6 及びレーザ装置 3 の制御を説明するブロック図を示す。E U V 光生成制御部 5 は、ターゲット供給制御部 5 1 とレーザ制御部 5 5 とを含んでもよい。ターゲット供給制御部 5 1 は、ターゲット供給部 2 6 の動作を制御してもよい。レーザ制御部 5 5 は、レーザ装置 3 の動作を制御してもよい。

[0042] ターゲット供給部 2 6 は、ターゲット 2 7 の材料を溶融した状態で内部に貯蔵するリザーバ 6 1 に加え、ヒータ 2 6 1、温度センサ 2 6 2、圧力調節器 2 6 3、ピエゾ素子 2 6 4、及び、ノズル 2 6 5 を含んでもよい。

[0043] ヒータ 2 6 1 と温度センサ 2 6 2 とは、リザーバ 6 1 に固定されていてもよい。ピエゾ素子 2 6 4 は、ノズル 2 6 5 に固定されていてもよい。ノズル 2 6 5 は、例えば液体スズであるターゲット 2 7 を出力する、図 2 に示したノズル孔 6 2 を有していてもよい。圧力調節器 2 6 3 は、図示しない不活性ガス供給部からリザーバ 6 1 内に供給される不活性ガスの圧力を調節するよう、図示しない不活性ガス供給部とリザーバ 6 1 との間の配管上に設置されていてもよい。

[0044] ターゲット供給制御部 5 1 は、温度センサ 2 6 2 の測定値に基づいてヒータ 2 6 1 を制御してもよい。例えば、ターゲット供給制御部 5 1 は、リザーバ 6 1 内のスズの融点以上の所定の温度になるように、ヒータ 2 6 1 を制御してもよい。その結果、リザーバ 6 1 に貯蔵されたスズは融解し得る。スズの融点は 2 3 2 °C であり、所定の温度は、例えば、2 5 0 °C ~ 3 0 0 °C の温度であってよい。

[0045] ターゲット供給制御部 5 1 は、圧力調節器 2 6 3 によりリザーバ 6 1 内の圧力を制御してもよい。圧力調節器 2 6 3 は、ターゲット供給制御部 5 1 の

制御により、ターゲット 27 が所定の速度でプラズマ生成領域 25 に到達するように、リザーバ 61 内の圧力を調節してもよい。ターゲット供給制御部 51 は、ピエゾ素子 264 に所定周波数の電気信号を送ってもよい。ピエゾ素子 264 は、受信した電気信号により振動し、ノズル 265 を上記周波数で振動させ得る。

[0046] その結果、ノズル孔 62 から JET 状の液体スズが出力され、ピエゾ素子 264 によるノズル孔 62 の振動によって、ドロップレット状のターゲット 27 が生成され得る。このようなドロップレットの生成方法は、コンティニュアスジェット法と呼ばれる場合がある。このように、ターゲット供給部 26 は、所定速度及び所定間隔で、プラズマ生成領域 25 にドロップレット状のターゲット 27 を供給し得る。例えば、ターゲット供給部 26 は、50 kHz ~ 100 kHz における所定周波数で、ドロップレットを生成してもよい。

[0047] ターゲットセンサ 4 は、ターゲット 27 が発光部 45 による光の集光位置を通過するとき、ターゲット 27 の軌道及びその周囲を通る光の変化を検出し、ターゲット 27 の検出信号として通過タイミング信号 PT を出力してもよい。1 つのターゲット 27 が検出される毎に、通過タイミング信号 PT において 1 つの検出パルスがレーザ制御部 55 に出力されてもよい。

[0048] EUV 光パルスエネルギーセンサ 7 は、プラズマ生成領域 25 における EUV 光パルスのエネルギーを測定し、測定値をレーザ制御部 55 に出力してもよい。

[0049] レーザ制御部 55 は、露光装置 6 から、EUV 光生成制御部 5 を介してバースト信号 BT 及び EUV 光パルスエネルギーの目標値を受信してもよい。EUV 光生成制御部 5 は、EUV 光パルスエネルギーセンサ 7 の測定値が、露光装置 6 から受信した目標値に近づくように、レーザ制御部 55 を介してレーザ装置 3 を制御してもよい。

[0050] バースト信号 BT は、所定期間において EUV 光を生成すべきことを EUV 光生成システム 11 に指示する信号であってもよい。レーザ制御部 55 は

、当該所定期間の間、EUV光を露光装置6に出力するための制御を行ってもよい。

[0051] 具体的には、レーザ制御部55は、バースト信号BTがONの期間において、レーザ装置3が通過タイミング信号PTに応じてレーザ光パルスを出力するように制御してもよい。レーザ制御部55は、バースト信号BTがOFFの期間において、レーザ装置3がレーザ光パルスの出力を停止するように制御してもよい。

[0052] 例えば、レーザ制御部55は、露光装置6から受信したバースト信号BTと、通過タイミング信号PTに対して所定の時間遅延させた発光トリガ信号ETとを、レーザ装置3に出力してもよい。バースト信号BTがONである間、レーザ装置3は、発光トリガ信号ETにおける発光トリガパルスに応答して、レーザ光パルスを出力し得る。

[0053] 一方、露光装置6からのバースト信号BTがOFFの場合、レーザ装置3は、発光トリガ信号ETにおける発光トリガパルスが入力されていても、パルスレーザ光を出力しなくともよい。その結果、EUV光は生成され得ない。

[0054] EUV光パルスエネルギーセンサ7は、EUV光のパルスエネルギーを測定し、レーザ制御部55に、EUV光の測定パルスエネルギーを示すEUV光パルスエネルギー信号EEを出力し得る。レーザ制御部55は、測定されたEUV光のパルスエネルギーと、露光装置6から受信した目標値とに基づいて、レーザ装置3から出力されるレーザ光パルスエネルギーの目標値を計算し、レーザ装置3にフィードバック信号を送信してもよい。

[0055] 以上のようにして、露光装置6からのバースト信号BTに応じて、所定期間内において連続する一群のEUV光のパルスを生成し得る。この一群のパルスをバーストEUV光パルスとも呼ぶ。同様に、バースト信号BTに応じて所定期間内において連続する一群のレーザ光のパルスを、バーストレーザ光パルスとも呼ぶ。

[0056] 5. レーザ装置及びレーザ制御部を含むレーザシステム構成の比較例

5. 1 構成

図4は、レーザ装置3及びレーザ制御部55を含むレーザシステム構成の比較例を模式的に示している。レーザ制御部55は、主制御部551及びレーザ出力制御回路552を含んでもよい。

[0057] 主制御部551は、露光装置6からバースト信号BTを受信し、レーザ出力制御回路552に出力してもよい。主制御部551は、ターゲットセンサ4から通過タイミング信号PTを受信し、レーザ出力制御回路552に出力してもよい。

[0058] 主制御部551は、EUV光パルスエネルギーセンサ7から、EUV光パルスエネルギー信号EEを受信し、その信号が示す値からレーザ光パルスエネルギー平均値の目標値を決定してもよい。主制御部551は、目標値をレーザ装置3に送信してもよい。

[0059] レーザ出力制御回路552は、主制御部551から受信した通過タイミング信号PTから、発光トリガ信号ETを生成してもよい。レーザ出力制御回路552は、レーザ装置3に発光トリガ信号ETを出力してもよい。レーザ出力制御回路552は、露光装置6から主制御部551を介して受信したバースト信号BTをレーザ装置3に出力してもよい。

[0060] レーザ出力制御回路552は、遅延回路564を含んでもよい。遅延回路564の入力は主制御部551に接続され、出力はレーザ装置3に接続されていてもよい。主制御部551は、遅延時間設定信号DTにより、遅延回路564の遅延時間tdを設定してもよい。遅延回路564は、通過タイミング信号PTを受信し、通過タイミング信号PTを遅延時間tdだけ遅延させた発光トリガ信号ETを生成し、レーザ装置3に出力してもよい。

[0061] レーザ装置3は、レーザ装置内制御部301と、AND回路302と、遅延回路303と、ワンショット回路312__MO、312__0～312__Nと、レーザ光パルスエネルギーセンサ315と、を含んでもよい。レーザ装置3は、さらに、マスタオシレータ(MO)350と、光増幅器(PA)351__1～351__Nと、光アイソレータ(OI)352__0～352__Nと

、ビームスプリッタ 318 と、を含んでいてもよい。

[0062] マスタオシレータ 350 は、例えば、Q スイッチを含む CO₂ レーザ発振器、又は、CO₂ レーザガスの増幅波長域で発振する量子カスケードレーザ (QCL) であってもよい。マスタオシレータ 350 から出力されるパルスレーザ光は、直線偏光であってもよい。

[0063] 光増幅器 351__1 ~ 351__N は、マスタオシレータ 350 から出力されるパルスレーザ光の光路上に直列に配置され、マスタオシレータ 350 から出力されるパルスレーザ光を順次増幅してもよい。光増幅器 351__1 ~ 351__N は、第 1 段から第 N 段の光増幅器であり得る。光増幅器の段数は、設計により変化し得る。

[0064] 光増幅器 351__1 ~ 351__N は、それぞれ、CO₂ レーザガスを含む放電励起式の増幅器であってもよい。光増幅器 351__1 ~ 351__N は、それぞれ、CO₂ レーザガス、一对の電極、及び、一对の電極間で高周波放電させる電源を含んでもよい。マスタオシレータ 350 が QCL のような小出力 (数十 mW) の装置である場合、第 1 段の光増幅器 351__1 は、光共振器、EO (Electro-Optic) ポッケルスセル、及び、偏光子を含む、再生増幅器であってもよい。

[0065] 光アイソレータ 352__0 ~ 352__N は、マスタオシレータ 350 と光増幅器 351__1 との間、二つの連続する光増幅器のそれぞれの間、光増幅器 351__N の下流側、の光路上に配置されていてもよい。

[0066] 光アイソレータ 352__0 ~ 352__N の一部は、省略されていてもよい。例えば、光増幅器 351__k (k は 1 ~ N のいずれか) から下流側の全ての光アイソレータは、レーザ光に対して耐性がない場合、省略されていてもよい。少なくとも一つの光アイソレータは、パルスエネルギーが低い上流側の一箇所、例えば、マスタオシレータ 350 と光増幅器 351__1 との間、光増幅器 351__1 と光増幅器 351__2 との間又は光増幅器 351__1 と PA 3 間の少なくとも 1 箇所の光路上に配置してもよい。

[0067] ビームスプリッタ 318 は、最下流の光アイソレータ 352__N の下流側

の光路上に配置されていてもよい。ビームスプリッタ 318 は、パルスレーザ光の一部を透過し、一部をレーザ光パルスエネルギーセンサ 315 に向けて反射してもよい。

[0068] レーザ光パルスエネルギーセンサ 315 は、ビームスプリッタ 318 から受光したレーザ光のレーザ光パルスエネルギーを測定してもよい。レーザ光パルスエネルギーセンサ 315 は、レーザ光パルスエネルギーの測定値を、レーザ装置内制御部 301 に送信してもよい。

[0069] レーザ装置内制御部 301 は、レーザ装置 3 内の他の構成要素を制御してもよい。レーザ装置内制御部 301 は、レーザ制御部 55 から、発光トリガ信号 E T、バースト信号 B T、及び、レーザ光パルスエネルギー平均値の目標値を受信してもよい。

[0070] レーザ装置内制御部 301 は、レーザ光パルスエネルギーセンサ 315 の測定値からレーザ光パルスエネルギー平均値を算出し、平均値が目標値に近づくように、光増幅器 351 __ 1 ~ 351 __ N の励起強度を制御してもよい。例えば、レーザ装置内制御部 301 は、光増幅器の電極に印加する電圧を制御して励起強度を制御してもよい。

[0071] レーザ装置内制御部 301 は、発光トリガ信号 E T 及びバースト信号 B T を A N D 回路 302 に出力してもよい。レーザ装置内制御部 301 は、発光トリガ信号 E T をワンショット回路 312 __ M O に出力してもよい。

[0072] A N D 回路 302 の二つの入力、レーザ装置内制御部 301 からの二つの出力に接続されていてもよい。一方の入力は発光トリガ信号 E T を受信し、もう一方の入力はバースト信号 B T を受信してもよい。A N D 回路 302 は、発光トリガ信号 E T 及びバースト信号 B T の双方が O N の場合に O N 信号を出力し、少なくとも一方が O F F のときに O F F 信号を出力してもよい。本開示において、O N 信号は H I G H レベルであり、O F F 信号は L O W レベルであってもよい。

[0073] 遅延回路 303 の入力、A N D 回路 302 の出力に接続されてもよい。遅延回路 303 は、A N D 回路 302 から受信した信号から遅延時間が異なる

信号を生成し、それぞれワンショット回路 3 1 2 __ 0 ~ 3 1 2 __ N に出力してもよい。出力信号の遅延時間は、ワンショット回路 3 1 2 __ 0 ~ 3 1 2 __ N の順で増加してもよい。

[0074] ワンショット回路 3 1 2 __ MO の入力、レーザ装置内制御部 3 0 1 の出力に接続され、発光トリガ信号 E T を受信してもよい。ワンショット回路 3 1 2 __ 0 ~ 3 1 2 __ N の入力、遅延回路 3 0 3 の出力に接続され、それぞれ遅延時間が異なる信号を受信してもよい。

[0075] ワンショット回路 3 1 2 __ MO、3 1 2 __ 0 ~ 3 1 2 __ N の出力は、それぞれ、マスタオシレータ 3 5 0、光アイソレータ 3 5 2 __ 0 ~ 3 5 2 __ N の入力に接続されていてもよい。ワンショット回路 3 1 2 __ MO、3 1 2 __ 0 ~ 3 1 2 __ N は、入力信号のエッジに応答して、所定パルス幅のパルス信号を出力してもよい。

[0076] 5. 2 動作

主制御部 5 5 1 は、遅延時間設定信号 D T を遅延回路 5 6 4 に出力して、所定の遅延時間 t_d を設定してもよい。遅延時間 t_d は、ターゲットセンサ 4 によって検出されたターゲット 2 7 がプラズマ生成領域 2 5 に到達するタイミングで、パルスレーザ光がプラズマ生成領域 2 5 に集光されるように設定され得る。

[0077] 遅延時間 t_d は、例えば、以下の式によって与えられ得る。

$$t_d = L / v - \alpha$$

L は、ターゲット検出位置 4 0 からプラズマ生成領域 2 5 の中心位置までの距離でもよい。v は、ターゲット 2 7 の速度でもよい。 α は、レーザ装置 3 にパルスレーザ光の発光を指示する発光トリガパルスが出力されてから、パルスレーザ光がプラズマ生成領域 2 5 で集光されるまでの所要時間でもよい。

[0078] 以下において、図 5 を参照しつつ、レーザ制御部 5 5 の制御によるレーザ装置 3 の動作の例を説明する。図 5 は、レーザ制御部 5 5 からレーザ装置 3 への制御信号、パルスレーザ光及び E U V 光のタイミングチャートを示して

いる。

[0079] 図5 (A) ~ (F) は、それぞれ、バースト信号B Tの時間変化、通過タイミング信号P Tの時間変化、発光トリガ信号E Tの時間変化、マスタオシレータ350の出力の時間変化、プラズマ生成領域25に照射されるパルスレーザ光の時間変化、EUV光の時間変化を示す。

[0080] レーザ装置内制御部301は、主制御部551からの指示に応じて、光増幅器351__1~351__Nの励起強度がそれぞれ所定の値となるように、光増幅器351__1~351__Nを制御してもよい。具体的には、レーザ装置内制御部301は、光増幅器351__1~351__Nのそれぞれにおいて、不図示の電源によって高周波放電を起こさせ、CO₂レーザガスをポンピングしておいてもよい。これによって、光増幅器351__1~351__Nの励起強度が所定の値となり得る。

[0081] 主制御部551は、露光装置6からのバースト信号B Tを、レーザ装置内制御部301に出力してもよい。図5 (A) に示すように、バースト信号B Tは、ONの期間とOFFの期間とを有していてもよい。バースト信号B TがONの期間においてパルスレーザ光がプラズマ生成領域25に出力され得る。バースト信号B TがOFFの期間においてパルスレーザ光はプラズマ生成領域25に出力され得ない。

[0082] 主制御部551は、ターゲットセンサ4からの通過タイミング信号P Tを遅延回路564に出力してもよい。図5 (B) に示すように、通過タイミング信号P Tは、ターゲット27の検出を示すパルスを含んでいてもよい。遅延回路564は、通過タイミング信号P Tを遅延時間t_dだけ遅延させて発光トリガ信号E Tを生成し、レーザ装置内制御部301に出力してもよい。図5 (C) に示すように、発光トリガ信号E Tは、通過タイミング信号P Tにおけるパルスを遅延させた発光トリガパルスを含んでいてもよい。

[0083] 発光トリガ信号E Tは、レーザ装置内制御部301を介して、AND回路302と、ワンショット回路312__MOとに入力されてもよい。ワンショット回路312__MOは、発光トリガ信号E Tのエッジに応答して、所定幅

のパルスをマスタオシレータ 350 に出力してもよい。図 5 (D) に示すように、マスタオシレータ 350 は、ワンショット回路 312__MO からのパルスに同期してパルスレーザ光を出力し得る。

[0084] バースト信号 BT は、レーザ装置内制御部 301 を介して、AND 回路 302 に入力されてもよい。AND 回路 302 の出力は、発光トリガ信号 ET とバースト信号 BT の双方が ON のとき ON であり、少なくとも一方が OFF のとき OFF であり得る。つまり、AND 回路 302 は、バースト信号 BT が ON の時のみ、発光トリガ信号 ET を遅延回路 303 に出力し得る。

[0085] バースト信号 BT が ON の時、遅延回路 303 から出力されるパルスは、ワンショット回路 312__0 ~ 312__N のそれぞれに、異なる遅延時間で入力され得る。遅延時間は、ワンショット回路 312__0 ~ 312__N の順で増加し得る。ワンショット回路 312__0 ~ 312__N は、入力信号のエッジに応答して、順次、所定幅のパルスを光アイソレータ 352__0 ~ 352__N に出力してもよい。

[0086] 遅延回路 303 から出力されるパルスは、ワンショット回路 312__MO に入力される発光トリガパルスに対して遅延し得る。そのため、ワンショット回路 312__MO、ワンショット回路 312__0 ~ 312__N からの出力パルスは順次遅延し、この順序で、マスタオシレータ 350、光アイソレータ 352__0 ~ 352__N に出力され得る。

[0087] 光アイソレータ 352__0 ~ 352__N は、開状態と閉状態を有していてもよい。光アイソレータ 352__0 ~ 352__N は、ワンショット回路 312__0 ~ 312__N からの入力信号が ON のとき開状態であり、OFF のとき閉状態であり得る。

[0088] 遅延回路 303 は、マスタオシレータ 350 からのレーザ光パルスがそれぞれの光アイソレータ 352__0 ~ 352__N を通過するように、ワンショット回路 312__0 ~ 312__N に信号を出力してもよい。

[0089] 光アイソレータ 352__0 ~ 352__N は、ワンショット回路 312__0 ~ 312__N からのパルスにより、レーザ光パルスの通過タイミングに合わ

せて閉状態から開状態に変化し、レーザ光パルスを通過させ得る。光アイソレータ 352__0～352__Nは、レーザ光パルスの通過後閉状態に変化し、次のレーザ光パルスが通過する直前まで閉状態を維持し得る。

[0090] 光アイソレータ 352__0～352__Nは、レーザ光パルスを通過させる時のみ開状態に変化し得る。これにより、ターゲット 27からの反射光がマスタオシレータ 350及び光増幅器 351__1～351__Nに入力することによる、マスタオシレータ 350及び光増幅器 351__1～351__Nの不安定動作や、光増幅器 351__1～351__Nの自励発振を抑制し得る。

[0091] バースト信号 BTがOFFの期間において、光アイソレータ 352__0～352__Nは閉状態を維持してもよい。この場合、図5（E）に示すように、マスタオシレータ 350から出力されたパルスレーザ光は、光増幅器 351__1～351__Nによる増幅が抑制されて、レーザ装置 3からパルスレーザ光は出力され得ない。

[0092] 一方、バースト信号 BTがONの期間において、光アイソレータ 352__0～352__Nは開状態に変化し得る。この場合、図5（E）に示すように、マスタオシレータ 350から出力されたパルスレーザ光は、光増幅器 351__1～351__Nによって順次増幅され、プラズマ生成領域 25に照射され得る。

[0093] レーザ装置 3から出力されたパルスレーザ光は、レーザ光進行方向制御部 34及びウインドウ 21を通過して、レーザ光集光光学系 22aによって、プラズマ生成領域 25に到達したターゲット 27に照射し得る。その結果、ターゲット 27はプラズマ化し、EUV光が生成され得る。

[0094] 図5（E）に示すように、バースト信号 BTがOFFからONに変化した直後及びその後の複数の連続するレーザ光パルスにおいて、レーザ光パルスエネルギーが漸減し、さらに、レーザ光パルスエネルギーが後続のパルスと比較して高い傾向があり得る。図5（F）に示すように、バーストEUV光パルスにおいて、照射されるパルスレーザ光と同様に、バーストの先頭パルス及びその後の複数パルスにおいて、EUV光パルスエネルギーが漸減し、さらに

、後続のパルスと比較して高い傾向があり得る。

[0095] 図 6 A 及び図 6 B は、それぞれ、バーストレーザ光パルスとバースト E U V 光パルスのパルスエネルギーの測定例を示す。図 6 A において、横軸はバーストレーザ光パルスにおける先頭パルスからのパルス数を示し、縦軸はレーザ光パルスエネルギーを示す。図 6 B において、横軸はバースト E U V 光パルスにおける先頭パルスからのパルス数を示し、縦軸は E U V 光パルスエネルギーを示す。また、図 6 A において、レーザ光パルスの繰り返し周波数は 1 0 0 k H z であり、周期は 1 0 μ s である。

[0096] パルスレーザ光のパルスエネルギーと E U V 光のパルスエネルギーは、双方ともバーストパルスの先頭パルスから 2 0 パルス程度までは、パルスエネルギーが非常に不安定となっている。具体的には、先頭パルスから 2 0 パルス程度までパルスエネルギーが漸減し、そのエネルギー変化率は、後続パルスのエネルギー変化率よりも大きい。

[0097] 5. 3 課題

5. 3. 1 E U V 光パルスエネルギーの安定化

E U V 光生成装置 1 は、適切な露光を行うため、安定した目標エネルギーの E U V 光パルスを露光装置 6 に出力することが要求され得る。上述のように、E U V 光パルスエネルギーは、パルス毎に変化し得る。したがって、E U V 光生成装置 1 が、E U V 光パルス毎に、パルスエネルギーを制御することが重要であり得る。

[0098] また、バースト E U V 光パルスの先頭パルスから数十パルスにおいて、パルスエネルギーが非常に不安定となり得る。バースト先頭とその後の数十パルスのエネルギーの安定化制御が重要であり得る。

[0099] E U V 光のパルスエネルギーを目標値に安定化するためには、E U V 光生成装置 1 は、高速かつ高精度に、レーザ装置 3 からのパルスレーザ光のパルスエネルギーを制御する必要がある。例えば、パルスレーザ光の繰り返し周波数は 1 0 0 k H z 程、つまり、パルスレーザ光の周期は 1 0 μ s 程であり得る。したがって、パルスレーザ光エネルギー制御は、周期 1 0 μ s の半分以

下の応答時間が要求され得る。

[0100] 光増幅器の励起強度の制御は、周期 $10\ \mu\text{s}$ の半分以下の応答時間のパルスエネルギー制御を実現し得ない。光アイソレータは、光の透過強度を変化させ得るため、パルスレーザ光エネルギー制御に使用し得る。しかし、光アイソレータでは、高精度にパルスレーザ光のエネルギーを制御することは困難であり得る。以下、この点について説明する。

[0101] 5. 3. 2 光アイソレータの構成

光アイソレータ 352__1 (1 は 0~N のいずれか) の構成例を説明する。図 7 は、光アイソレータ 352__1 の構成例を模式的に示している。光アイソレータ 352__1 は、高電圧電源 393 と、EO ポッケルスセル 394 と、第 1 偏光子 396 と、第 2 偏光子 397 と、 $\lambda/2$ 板 398 と、を含んでもよい。EO ポッケルスセル 394 は、電気光学結晶 399 を挟んで対向する位置に設けられた一対の電極 395 a、395 b 含んでもよい。

[0102] 第 2 偏光子 397 と、 $\lambda/2$ 板 398 とは、EO ポッケルスセル 394 の入力側の光路に配置されていてもよい。第 1 偏光子 396 は、EO ポッケルスセル 394 の出力側の光路に配置されていてもよい。

[0103] 高電圧電源 393 は、EO ポッケルスセル 394 の制御電圧を出力してもよい。高電圧電源 393 は、レーザ装置 3 に含まれるワンショット回路 312__1 から、パルス信号を受信してもよい。

[0104] 高電圧電源 393 は、パルス信号が ON である場合に 0 V とは異なる所定の電圧を生成し、その電圧を EO ポッケルスセル 394 の一対の電極 395 a、395 b 間に印加してもよい。高電圧電源 393 は、パルス信号が OFF である場合に、EO ポッケルスセル 394 の一対の電極 395 a、395 b 間に約 0 V の電圧を印加してもよい。

[0105] レーザ装置 3 の光増幅器 351__1 から出力されたパルスレーザ光は、偏光方向が紙面に平行な直線偏光であってもよい。第 2 偏光子 397 は、偏光方向が紙面に平行な直線偏光であるパルスレーザ光を高い透過率で透過させ、偏光方向が紙面に垂直な直線偏光を入射光路と異なる方向に反射してもよ

い。 $\lambda/2$ 板398は、パルスレーザ光の偏光方向を90度回転させて透過させてもよい。つまり、 $\lambda/2$ 板398から出力されたパルスレーザ光は、偏光方向が紙面に垂直な直線偏光であってもよい。

[0106] EOポッケルスセル394は、一对の電極395a、395b間に所定の高電圧が印加されている時に、パルスレーザ光の直交する偏光成分の位相差を180度変えて透過させてもよい。つまり、パルスレーザ光の偏光方向を90度回転させて透過させてもよい。EOポッケルスセル394は、一对の電極395a、395b間に電圧が印加されていないときに、パルスレーザ光の直交する偏光成分の位相差を変えずに透過させてもよい。つまり、パルスレーザ光の偏光方向を変えずに透過させてもよい。

[0107] 第1偏光子396は、パルスレーザ光における偏光方向が紙面に平行な直線偏光を透過させ、偏光方向が紙面に垂直な直線偏光をパルスレーザ光の光路と異なる方向に反射してもよい。

[0108] すなわち、第1偏光子396は、ワンショット回路312__1からのパルス信号がONである場合に、EOポッケルスセル394によって偏光方向が回転させられたパルスレーザ光を透過させてもよい。第1偏光子396は、ワンショット回路312__1からのパルス信号がOFFである場合に、EOポッケルスセル394によって偏光方向が回転させられなかったパルスレーザ光を入射光路と異なる方向に反射してもよい。

[0109] このように、光アイソレータ352__1は、EOポッケルスセル394に高電圧が印加されている場合は上流及び下流からの光を高透過し、高電圧が印加されず印加電圧が約0Vのとき、上流及び下流からの双方向の光の透過を抑制し、光アイソレータとしての機能を示し得る。

[0110] 高電圧電源393は高電圧側と接続される充電スイッチとGNDと接続された放電スイッチをそれぞれ高速で切り替えることによって、パルス状に一对の電極395a、395bに高電圧を印加し得る。

[0111] 5. 3. 3 光アイソレータによるレーザ光パルス制御の課題

光アイソレータ352__1は、レーザ光パルス毎に、高電圧電源393か

らE Oポッケルスセル394への印加電圧を変化させることで、レーザ光パルス毎に透過率を制御し得る。

[0112] しかし、光アイソレータ352__1は、ターゲット27からの反射光の遮断ため、レーザ光パルスの通過前後において、閉状態を維持することが必要であり得る。光アイソレータ352__1がレーザ光パルスの通過エネルギーをパルス毎に変化させるためには、E Oポッケルスセル394への印加電圧を、レーザ光パルス毎に、0Vから目的電圧に高精度かつ高速に変化させることが必要であり得る。一般の高電圧電源393は、このように、高精度かつ高速に出力電圧を制御することは困難であり得る。

[0113] 6. 可変アッテネータを含むレーザ装置及びレーザ制御部を含むレーザシステム

本実施形態のレーザ装置3は、パルスレーザ光の光路上に、光アイソレータに加え、可変アッテネータを含んでもよい。可変アッテネータは、透過するレーザ光パルスのエネルギーを連続的に変化させ得る。光の遮断と透過を切替える光アイソレータに加えて可変アッテネータを使用することで、レーザ装置3から出力されるパルスレーザ光のエネルギーをパルス毎に適切に制御し得る。

[0114] 6. 1 構成

図8は、可変アッテネータを含むレーザ装置3及びレーザ装置3を制御するレーザ制御部55の構成例を模式的に示している。以下においては、図4に示す比較例と異なる部分を主に説明する。

[0115] レーザ装置3は、光アイソレータ352__1と光増幅器351__2との間の光路上に配置された可変アッテネータ360を含んでもよい。可変アッテネータ360は、E Oポッケルスセル361と、偏光子362と、可変電圧電源363と、を含んでもよい。

[0116] レーザ制御部55の主制御部551は、レーザ装置内制御部301に、出力エネルギー制御信号ECを出力してもよい。レーザ装置内制御部301は、主制御部551から受信した出力エネルギー制御信号ECを、可変アッテネー

タ 360 に出力してもよい。

[0117] 図9は、可変アッテネータ360の構成を模式的に示している。EOポッケルスセル361は、電気光学結晶365を挟んで対向する位置に設けられた一对の電極364a、364b含んでもよい。

[0118] 可変電圧電源363は、一对の電極364a、364bに $0 \sim V_{max}$ の範囲の電圧値の電圧 V を印加し得る。EOポッケルスセル361は、一对の電極364a、364bに印加される電圧 V ($0 \sim V_{max}$) に応じて、パルスレーザ光の直交する偏光成分の位相差を、 $0 \sim \lambda/2$ の範囲において連続的に変化させ得る。

[0119] 電気光学結晶365に電圧が印加されていない $V=0$ の時、紙面に対して垂直な直線偏光方向のパルスレーザ光は、偏光状態を維持しながら電気光学結晶365を透過し得る。透過光は、偏光子362によって反射され得る。

[0120] 電気光学結晶365に特定の電圧 V が印加されている $0 < V < V_{max}$ の時、紙面に対して垂直な直線偏光方向のパルスレーザ光は、EOポッケルスセル361によって楕円偏光に変換され得る。紙面に平行な偏光成分は偏光子362を透過し、紙面に垂直な偏光成分は、偏光子362によって反射され得る。

[0121] 最大の高電圧 $V = V_{max}$ を印加すると、位相が $\lambda/2$ ずれて、紙面に対して垂直な方向の直線偏光が、紙面に平行な方向の直線偏光に変換され得る。紙面に平行な方向の直線偏光は、偏光子362を透過し得る。偏光子362における透過率は、電圧 V の増加と共に増加し、 V_{max} において最も高い透過率を示し得る。

[0122] 以上のように、可変アッテネータ360は、可変電圧電源363を制御することによって、電気光学結晶365に印加する電圧 V を制御し得る。可変アッテネータ360は、電圧 V を制御することにより、パルスレーザ光の偏光状態を変化させ、偏光子362を透過するパルスレーザ光の透過率を変化させ得る。その結果、通過するパルスレーザ光のエネルギーを高速かつ高精度に変化させ得る。

[0123] 6. 2 動作

主に図8に基づいて、可変アッテネータ360を含むレーザ装置及びレーザ制御部を含むレーザシステムの動作を説明する。レーザ制御部55の主制御部551は、露光装置6からEUV光のエネルギーについての目標値を受信してもよい。目標値は、後述する、EUV光のパルスエネルギー値 P_{ext} や、移動積算パルス数 S であってもよい。

[0124] 主制御部551は、EUV光パルスエネルギー信号 EE によって、EUV光パルスエネルギーセンサ7の検出値 P を受信してもよい。主制御部551は、検出値 P と目標値とに基づいて、可変アッテネータ360の可変電圧電源363がEOポッケルスセル361に印加する電圧値 V を決定してもよい。主制御部551は、出力エネルギー制御信号 EC によって、決定した電圧値 V を可変アッテネータ360に送信してもよい。可変電圧電源363は、主制御部551から受信した電圧値 V の電圧を、EOポッケルスセル361に印加し得る。

[0125] バースト信号 BT がONの期間において発光トリガパルスが入力されると、マスタオシレータ350は、直線偏光のパルスレーザ光を出力し得る。パルスレーザ光は、光アイソレータ352__0を通過し、光増幅器351__1によって増幅され得る。増幅された直線偏光のパルスレーザ光は、光アイソレータ352__1を通過し、可変アッテネータ360に入射し得る。

[0126] 入射パルスレーザ光は、紙面に垂直な直線偏光であってもよい。EOポッケルスセル361は、一对の電極364a、364b間に印加されている電圧値に応じて、パルスレーザ光の直交する偏光成分の位相差を変化させ得る。可変アッテネータ360に入射したパルスレーザ光は、EOポッケルスセル361に印加される電圧に応じて、偏光状態が変化し得る。

[0127] 例えば、パルスレーザ光は、直線偏光から楕円偏光に変化し得る。楕円偏光は、偏光子362に入射し、紙面に垂直な偏光成分は反射され、紙面に平行な偏光成分は透過し得る。その結果、偏光子362を透過したパルスレーザ光は、減衰し、直線偏光となり得る。

- [0128] 減衰した直線偏光のパルスレーザ光は、光増幅器 3 5 1 __ 2 によって増幅され、光アイソレータ 3 5 2 __ 2 を透過し、順次、増幅器と光アイソレータを通過し、増幅され得る。最終段光増幅器 3 5 1 __ N で増幅されたパルスレーザ光は、光アイソレータ 3 5 2 __ N を透過して、ビームスプリッタ 3 1 8 に入射し得る。
- [0129] ビームスプリッタ 3 1 8 は入射光の一部をレーザ光パルスエネルギーセンサ 3 1 5 に反射してもよい。レーザ光パルスエネルギーセンサ 3 1 5 は、レーザ装置 3 から出力されるパルスレーザ光のパルスエネルギーを測定し、測定データをレーザ装置内制御部 3 0 1 に送信してもよい。
- [0130] レーザ装置 3 から出力されたパルスレーザ光は、レーザ光進行方向制御部 3 4 及びウインドウ 2 1 を通過して、レーザ光集光光学系 2 2 a によって、プラズマ生成領域 2 5 に到達したターゲット 2 7 に照射し得る。その結果、ターゲット 2 7 はプラズマ化し、EUV 光が生成され得る。
- [0131] EUV 光パルスエネルギーセンサ 7 は、EUV 光のパルスエネルギーを測定してもよい。EUV 光パルスエネルギーセンサ 7 は、EUV 光のパルスエネルギーの測定データをレーザ制御部 5 5 に、EUV 光パルスエネルギー信号 E E によって送信し得る。
- [0132] レーザ制御部 5 5 は、露光装置 6 から受信した目標値と、測定された EUV 光のパルスエネルギー P に基づいて、測定された EUV 光パルスエネルギー P から得られる値が目標値に近づくように、EO ポッケルスセル 3 6 1 に印加する電圧 V を決定してもよい。レーザ制御部 5 5 は、決定した値を出力エネルギー制御信号 E C として、レーザ装置 3 に送信してもよい。
- [0133] 図 1 0 は、光アイソレータ 3 5 2 __ 0 ~ 3 5 2 __ N の動作タイミングを模式的に示している。例えば、レーザ装置 3 内における、マスタオシレータ 3 5 0 ~ 光アイソレータ 3 5 2 __ N の光路長は、5 0 m ~ 2 0 0 m であり得る。
- [0134] 図 1 0 に示すように、マスタオシレータ 3 5 0 は、入力された発光トリガパルス 9 0 1 に同期して Q スイッチを動作させ、所定幅のレーザ光パルス 9

02を出力し得る。所定幅は、例えば、10ns～20nsであってもよい。

[0135] マスタオシレータ350から出力されたレーザ光パルス902は、光速（ $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ）で、光路上を進行し得る。

[0136] 光アイソレータ352__0～352__Nのそれぞれに、レーザ光パルス902が通過する直前に、所定値の電圧903__0～903__Nが印加されてもよい。光アイソレータ352__0～352__NのEOポッケルスセルは、上記所定値の電圧において、レーザ光パルス902の位相差を $\lambda/2$ ずらし得る。

[0137] 光アイソレータ352__0～352__Nへの印加電圧903__0～903__Nは、レーザ光パルス902が通過した直後に約0Vに変化されてもよい。このように、印加電圧903__0～903__Nはパルス状であってもよく、その幅は、例えば、30ns～100nsであってもよい。

[0138] 可変アッテネータ360は、印加電圧904に応じて、レーザ光パルス902のエネルギーを減衰させてもよい。可変アッテネータ360のEOポッケルスセル361への印加電圧904は、レーザ光パルスが通過するタイミングでパルス状に変化しなくともよい。図10に示す時間範囲において、EOポッケルスセル361への印加電圧904は、EOポッケルスセル361の所望の透過率に対応したほぼ一定の値に維持され得る。

[0139] 図11は、レーザ装置3における制御信号、パルスレーザ光及びEUV光のタイミングチャートを示している。図11（A）～（E）は、それぞれ、発光トリガ信号ETの時間変化、マスタオシレータ350の出力の時間変化、バースト信号BTの時間変化、一つの光アイソレータの制御電圧の時間変化、アッテネータ制御電圧の時間変化、を示す。図11（F）、（G）は、それぞれ、プラズマ生成領域25に照射されるパルスレーザ光の時間変化、EUV光の時間変化を示す。

[0140] 図11（A）、（B）が示すように、マスタオシレータ350は、発光トリガパルスに同期して、レーザ光パルスを出し得る。発光トリガパルスの

周期は、例えば、 $10\mu\text{s}$ であってもよい。

[0141] 図11(C)に示すように、バースト信号BTは、所定期間、ONであり得る。この所定期間を、以下においてバースト期間とも呼ぶ。図11(D)に示すように、光アイソレータ352__1には、バースト期間において、レーザ光パルスに対応するパルス状の制御電圧が印加され得る。

[0142] 一方、可変アッテネータ360は、図11(E)に示すように、バースト期間において、レーザ光パルスに応じて段階的に変化し得る制御電圧を可変電圧電源363からEOポッケルスセル361に印加してもよい。可変アッテネータ360は、EOポッケルスセル361への制御電圧を、前回のレーザ光パルスにおける電圧値から、今回のレーザ光パルスの電圧値へ変化させてもよい。

[0143] 光アイソレータ352__0～352__Nが反射光を遮蔽するため、可変アッテネータ360は閉状態に変化しなくともよい。そのため、可変アッテネータ360の制御電圧は、光アイソレータ352__0～352__Nのパルス状制御電圧と異なり、段階的に変化し得る。可変アッテネータ360の制御電圧は、レーザ光パルス間での変化量が小さく、同一値に維持される時間も長くてよい。ため、可変電圧電源363は、高精度にEOポッケルスセル361への印加電圧を制御し得る。

[0144] 特に、EOポッケルスセル361の透過率は、10%～90%の範囲において、他の領域よりも、印加電圧に対して高い依存性を示し得る。本実施形態の可変アッテネータ360における印加電圧制御は、このような特性を有するEOポッケルスセル361の透過率を高精度に制御し得る。

[0145] 6.3 作用

本実施形態は、可変アッテネータ360のEOポッケルスセル361に印加する電圧を制御することによって、各レーザ光パルスの透過率を、パルスレーザ光の繰り返し周波数に対応する速度で制御し得る。パルスレーザ光が可変アッテネータ360を透過することによって、各レーザ光パルスのエネルギーを変化させ得る。これにより、後段の光増幅器351__2～351__1__

Nによって増幅されるレーザ光パルス及びレーザ光パルスにより生成されるEUV光パルスのエネルギーも変化させ得る。

[0146] 6. 4 その他

図8の例において、可変アッテネータ360は、光アイソレータ352__1と光増幅器351__2との間の光路上に配置されている。可変アッテネータ360は、これと異なる位置に配置されていてもよく、マスタオシレータ350からプラズマ生成領域25までのパルスレーザ光の光路上に、配置されていればよい。

[0147] 好ましくは、可変アッテネータ360は、パルスレーザ光のエネルギーが低いマスタオシレータ350から光増幅器351__3の間の光路上に配置されてもよい。さらに好ましくは、可変アッテネータ360は、光増幅器351__1と光アイソレータ352__1との間、又は、光アイソレータ352__1と光増幅器351__2の間の光路上に配置されてもよい。レーザ装置3は、複数の可変アッテネータを含んでもよい。

[0148] 7. 可変アッテネータ360における印加電圧の制御

7. 1 第1の制御方法

以下において、レーザ制御部55による、可変アッテネータ360における印加電圧の制御の例を説明する。図12は、バーストEUV光パルスにおけるパルスエネルギーの時間変化を模式的に示している。レーザ制御部55は、バーストEUV光パルスをスパイク制御領域851とフィードバック制御領域852とに分けて、EUV光のパルスエネルギーを制御してもよい。

[0149] 以下において、PL(m)は、先頭からm番目のパルスを示す。図12において、スパイク制御領域851は、先頭EUV光パルスPL(1)～EUV光パルスPL(k_s)までのパルスで構成されていてもよい。k_sは1より大きい整数であり、例えば、20であってもよい。フィードバック制御領域852は、スパイク制御領域851の後続の全てのEUV光パルスで構成されていてもよい。

[0150] 先頭パルス近傍のEUV光のパルスエネルギーの変化は、バーストOFFの

時間である休止期間 T_r に依存し得る。休止期間 T_r は、前回のバーストEUVパルスの最終パルスから、今回のバーストEUVパルスの先頭パルスまでの時間を示し得る。レーザ装置3の制御において、休止期間 T_r は、例えば、前回のバースト期間の終了時刻から今回のバースト期間の開始時刻までの期間で表され得る。

[0151] レーザ制御部55は、スパイク制御領域851とフィードバック制御領域852とにおいて、異なる制御を行ってもよい。レーザ制御部55は、スパイク制御領域851において、直前の休止期間 T_r 及び制御対象のパルス順序が対応する過去の制御結果に基づき、可変アッテネータのEOポッケルスセルの印加電圧 V を制御してもよい。レーザ制御部55は、フィードバック制御領域852において、直前のEUV光パルスの制御結果に基づいて、可変アッテネータのEOポッケルスセルの印加電圧 V を制御してもよい。

[0152] (制御方法の全体的な流れ)

図13は、可変アッテネータ360における印加電圧の制御のフローチャートの例を示す。本制御方法は、目標値として露光装置6から受信した目標EUV光パルスエネルギー P_{ext} に、EUV光パルスエネルギー測定値が近づくように、可変アッテネータ360における印加電圧を制御してもよい。

[0153] 図13において、レーザ制御部55は、スパイク制御領域851のパルス数 k_s の初期値（例えば、20）を取得してもよい（S101）。次に、レーザ制御部55は、初期構成のスパイク制御データテーブルを取得してもよい（S102）。レーザ制御部55は、例えば、不揮発性記憶装置等の不図示の記憶部にパルス数 k_s の初期値及び初期構成のスパイク制御データテーブルを格納していてもよい。スパイク制御データテーブルの詳細は後述する。

[0154] レーザ制御部55は、バーストOFFタイマをリセットして、スタートしてもよい（S103）。バーストOFFタイマは、休止期間 T_r を測定し得る。レーザ制御部55は、EUV光の目標EUV光パルスエネルギー P_{ext} を取得してもよい（S104）。レーザ制御部55は、露光装置6から目標

EUV光パルスエネルギー P_{ext} を予め受信し、保持していてもよい。

[0155] レーザ制御部55は、露光装置6からのバースト信号BTを監視し、バースト信号BTがOFFからONに変化したか否か判定してもよい(S105)。バースト信号BTがOFFからONに変化していない場合(S105:N)、レーザ制御部55は、バースト信号BTがONであるか否か判定してもよい(S106)。

[0156] バースト信号BTがOFFである場合(S106:N)、レーザ制御部55は、ステップS105に戻ってもよい。バースト信号BTがONである場合(S106:Y)、レーザ制御部55は、通過タイミング信号PTを監視してもよい(S107:N)。ターゲット27の通過を示す通過タイミングパルスが入力されると(S107:Y)、レーザ制御部55は、変数kの値をk+1に変更してもよい(S108)。変数kは、制御対象のパルスの先頭パルスからのパルス番号を示し得る。その後、レーザ制御部55は、ステップS112に進んでもよい。

[0157] ステップS105において、レーザ制御部55が、バースト信号BTがOFFからONへ変化したと判定した場合(S105:Y)、レーザ制御部55は、通過タイミング信号PTを監視してもよい(S109:N)。ターゲット27の通過を示す通過タイミングパルスが入力されると(S109:Y)、レーザ制御部55は、変数TrにバーストOFFタイマの値を代入してもよい(S110)。変数Trは、今回のバーストEUV光パルスに対する休止期間を示し得る。次に、レーザ制御部55は、変数kに1を代入し(S111)、ステップS112に進んでもよい。

[0158] ステップS112において、レーザ制御部55は、変数Ptに目標EUV光パルスエネルギー P_{ext} を代入してもよい。変数Ptは、今回の制御対象のEUV光パルスのパルスエネルギーを示し得る。次に、レーザ制御部55は、変数kとスパイク制御領域851のパルス数ksとを比較して、今回のEUV光パルスがスパイク制御領域851内のパルスであるか判定してもよい(S113)。

- [0159] 制御対象パルスがスパイク制御領域 8 5 1 内のパルスである場合 (S 1 1 3 : Y)、レーザ制御部 5 5 は、スパイク制御により可変アッテネータ 3 6 0 の印加電圧値を決定してもよい (S 1 1 4)。スパイク制御の詳細は後述する。レーザ制御部 5 5 は、E U V 光パルスエネルギーの測定を監視してもよい (S 1 1 5 : N)。
- [0160] E U V 光パルスエネルギーセンサ 7 から E U V 光パルスエネルギーの測定値を受信すると (S 1 1 5 : Y)、レーザ制御部 5 5 は、スパイク制御データテーブルを更新してもよい (S 1 1 6)。スパイク制御データテーブル及びスパイク制御データテーブルの更新の詳細は後述する。
- [0161] ステップ S 1 1 3 において、制御対象パルスがスパイク制御領域 8 5 1 内のパルスではない場合 (S 1 1 3 : N)、すなわち、フィードバック制御領域 8 5 2 内のパルスである場合、レーザ制御部 5 5 は、フィードバック制御により可変アッテネータ 3 6 0 の印加電圧値を決定してもよい (S 1 1 7)。フィードバック制御の詳細は後述する。レーザ制御部 5 5 は、E U V 光パルスエネルギーの測定を監視してもよい (S 1 1 8 : N)。
- [0162] E U V 光パルスエネルギーセンサ 7 から E U V 光パルスエネルギーの測定値を受信すると (S 1 1 8 : Y)、レーザ制御部 5 5 は、フィードバック制御データを例えばメモリ等の不図示の記憶部内に記憶してもよい (S 1 1 9)。フィードバック制御の詳細は後述する。
- [0163] ステップ S 1 1 9 の後、レーザ制御部 5 5 は、バースト信号 B T が O N から O F F に変化したか監視してもよい (S 1 2 0)。バースト信号 B T が O N のままである場合 (S 1 2 0 : N)、レーザ制御部 5 5 は、ステップ S 1 0 7 に戻り次の通過タイミングパルスを待ってもよい。
- [0164] バースト信号 B T が O F F に変化した場合 (S 1 2 0 : Y)、今回のバースト E U V 光パルスは終了しているので、レーザ制御部 5 5 は、ステップ S 1 0 5 に戻って、次のバースト期間を待ってもよい。
- [0165] (スパイク制御データテーブル)

図 1 4 は、スパイク制御データテーブル 9 2 5 の構成例を示す。スパイク

制御データテーブル 925 は、スパイク制御領域 851 における制御結果の履歴を格納してもよい。スパイク制御は、スパイク制御データテーブル 925 のデータを使用して、可変アッテネータ 360 での印加電圧 V を決定してもよい。

[0166] スパイク制御データテーブル 925 は、スパイク制御領域の各 E U V 光パルスのパルスエネルギー $P(k)$ と可変アッテネータ 360 での印加電圧 $V(k)$ との関係を示してもよい。図 14 の例において、スパイク制御領域 851 は、20 の E U V 光パルスで構成されている。

[0167] スパイク制御データテーブル 925 において、休止期間 T_r は複数の範囲に分割されていてもよい。スパイク制御データテーブル 925 は、複数の範囲のそれぞれにおいて、パルスエネルギー $P(k)$ と印加電圧 $V(k)$ との関係を示してもよい。図 14 の例において、休止期間 T_r は 6 つの範囲に分割されている。 $P(k)_{-m}$ 、 $V(k)_{-m}$ は、 m 番目の領域のパルスエネルギー及び印加電圧を示す。

[0168] レーザ制御部 55 は、予め初期値を格納しているスパイク制御データテーブル 925 を記憶部に保持していてもよい。図 13 のフローチャートが示す動作の開始後、レーザ制御部 55 は、初期値を格納しているスパイク制御データテーブル 925 を使用してスパイク制御を実行してもよい (S114)。その後、レーザ制御部 55 は、実際のスパイク制御における印加電圧 $V(k)$ とパルスエネルギー $P(k)$ とによって、スパイク制御データテーブル 925 を順次更新してもよい (S116)。

[0169] 図 15 A、図 15 B は、スパイク制御における可変アッテネータ 360 での印加電圧及び E U V 光パルスの測定例を示す。図 15 A、15 B は、異なる範囲に属する休止期間 T_r のバースト E U V 光パルスの測定結果を示す。

[0170] 図 15 A は、スパイク制御において可変アッテネータ 360 の E O ポッケルスセル 361 に印加した電圧 $V(1) \sim V(20)$ の測定例を示す。横軸はバースト E U V 光パルスにおけるパルスの順番を示し、縦軸は E O ポッケルスセル 361 に印加した電圧 V を示す。図 15 B は、図 15 A と同一測定

における、EUV光パルスエネルギー $P(1) \sim P(20)$ の測定結果を示す。横軸はバーストEUV光パルスにおけるパルスの順番を示し、縦軸はEUV光パルスのエネルギーを示す。

[0171] レーザ制御部55は、図15A、図15Bに示すような制御結果によって、スパイク制御データテーブル925を順次更新してもよい。異なる休止期間 T_r のバーストEUV光パルスの測定により、レーザ制御部55は、スパイク制御データテーブル925における全ての値を初期値から実際の制御結果に変更し得る。

[0172] (スパイク制御)

図16は、図13のフローチャートにおけるスパイク制御S114のフローチャートの例を示している。まず、レーザ制御部55は、今回のバーストEUV光パルスの直前の休止期間 T_r の測定値 T が含まれる休止期間範囲(m)を特定してもよい(S151)。

[0173] 次に、レーザ制御部55は、スパイク制御データテーブル925を参照し、特定された休止期間範囲(m)のカラムにおいて、今回のパルス順番(k)のEUV光パルスエネルギー $P(k)_{_m}$ 及びEOポッケルスセルの印加電圧 $V(k)_{_m}$ を取得してもよい(S152)。 $P(k)_{_m}$ 、 $V(k)_{_m}$ は、初期値、又は、休止期間範囲(m)における $P(k)$ 、 $V(k)$ の前の測定値を示し得る。

[0174] レーザ制御部55は、スパイク制御データテーブル925から取得したEUV光パルスエネルギー $P(k)_{_m}$ 、EOポッケルスセルの印加電圧 $V(k)_{_m}$ から、以下の数式に従ってEOポッケルスセル361に印加する電圧 V の値を算出してもよい(S153)。

$$\Delta P = P(k)_{_m} - P_{ext}$$

$$V = V(k)_{_m} - G \cdot \Delta P$$

[0175] P_{ext} は露光装置6から受信した目標値であり、 G は定数であり得る。レーザ制御部55は、算出した電圧 V の値を、出力エネルギー制御信号 EC によってレーザ装置内制御部301に送信してもよい。レーザ制御部55は、

レーザ装置内制御部 301 を介して可変電圧電源 363 を制御し、算出した電圧 V を E O ポッケルスセル 361 に印加してもよい (S 154)。

[0176] (スパイク制御データテーブル更新)

図 17 は、図 13 のフローチャートにおけるスパイク制御データテーブル更新 S 116 のフローチャートの例を示している。まず、レーザ制御部 55 は、EUV 光パルスエネルギー測定値 P を、EUV 光パルスエネルギーセンサ 7 から取得してもよい (S 161)。レーザ制御部 55 は、今回のバースト EUV 光パルスの直前の休止期間 T_r の測定値 T が含まれる休止期間範囲 (m) を決定してもよい (S 162)。

[0177] レーザ制御部 55 は、スパイク制御データテーブル 925 の、特定された休止期間範囲 (m) のカラムにおいて、 $P(k) \sim m$ 及び $V(k) \sim m$ の値を、今回の EUV 光パルスエネルギー測定値 P 及び E O ポッケルスセル 361 への今回の印加電圧 V で更新してもよい (S 163)。

[0178] (フィードバック制御)

図 18 は、図 13 のフローチャートにおけるフィードバック制御 S 117 のフローチャートの例を示している。レーザ制御部 55 は、バースト EUV 光パルスにおける直前パルスの EUV 光パルスエネルギー $P(k-1)$ 及び直前パルスの E O ポッケルスセル 361 への印加電圧 $V(k-1)$ を記憶部から取得してもよい (S 171)。

[0179] レーザ制御部 55 は、取得した値から、以下の数式に従って E O ポッケルスセル 361 に印加する電圧 V の値を算出してもよい (S 172)。

$$\Delta P = P(k-1) - P_{ext}$$

$$V = V(k-1) - G \cdot \Delta P$$

[0180] P_{ext} は露光装置 6 から受信した目標値であり、 G は定数であり得る。レーザ制御部 55 は、算出した電圧 V の値を、出力エネルギー制御信号 EC によってレーザ装置内制御部 301 に送信してもよい。レーザ制御部 55 は、レーザ装置内制御部 301 を介して可変電圧電源 363 を制御し、算出した電圧 V を E O ポッケルスセル 361 に印加してもよい (S 173)。

[0181] (フィードバック制御データの記憶)

図19は、図13のフローチャートにおけるフィードバック制御データの記憶S119のフローチャートの例を示している。まず、レーザ制御部55は、EUV光パルスエネルギー測定値Pを、EUV光パルスエネルギーセンサ7から取得してもよい(S181)。次に、レーザ制御部55は、今回のEUV光パルスエネルギー測定値P及びEOポッケルスセル361への今回の印加電圧Vを、 $P(k)$ 及び $V(k)$ として記憶部に書き込んでもよい(S182)。

[0182] (作用)

上記制御は、EUV光パルスのエネルギーが露光装置6からの目標EUV光パルスエネルギー P_{ext} に近づくように、レーザ光パルス毎にスパイク制御又はフィードバック制御を行うことによって、露光装置6に入射するEUV光パルスのエネルギーを安定化し得る。

[0183] 上記スパイク制御は、過去の制御結果を使用して可変アッテネータ360の透過率を制御することで、レーザ光パルスエネルギーの変化率が大きいスパイク制御領域851において、適切に可変アッテネータ360を制御し得る。

[0184] 上記スパイク制御は、休止期間 T_r を複数領域に分割してパルスエネルギー $P(k)$ と印加電圧 $V(k)$ とを管理することで、スパイク制御領域851において、休止期間 T_r に応じて適切に可変アッテネータ360を制御し得る。

[0185] 上記フィードバック制御は、同一バーストEUV光パルスにおける過去のパルスの制御結果を使用して可変アッテネータ360の透過率を制御することで、レーザ光パルスエネルギーの変化率が小さいフィードバック制御領域852において、適切に可変アッテネータ360を制御し得る。

[0186] 7. 2 第2の制御方法

以下において、レーザ制御部55による、可変アッテネータ360における印加電圧の第2の制御方法を説明する。以下においては、上記第1の制御

方法との相違点を主に説明する。第2の制御方法と第1の制御方法との間において、スパイク制御が異なり、フィードバック制御は同一であってもよい。第2の制御方法は、EUV光パルスエネルギー測定値の移動積算値を使用して、目標EUV光パルスエネルギーを決定してもよい。移動積算値は、直近の n 個（ n は2以上の整数）の値の積算値である。

[0187] 図20は、可変アッテネータ360における印加電圧の制御のフローチャートの例を示す。以下においては、図13のフローチャートとの相違点を説明する。レーザ制御部55は、ステップS103の実行後、目標EUV光パルスエネルギー P_{ext} を取得し、さらに、移動積算パルス数 S を取得してもよい（S201）。

[0188] レーザ制御部55は、露光装置6から目標EUV光パルスエネルギー P_{ext} を予め受信し、保持していてもよい。移動積算パルス数 S は、例えば、レーザ制御部55の不揮発性記憶装置等の記憶部に予め格納されていてもよい。レーザ制御部55は、ステップS108又はS111の後、移動積算エネルギーが一定となる目標EUV光パルスエネルギーを計算してもよい（S202）。他のステップは、図13のフローチャートと同様である。

[0189] （目標EUV光パルスエネルギーの計算）

図21は、図20のフローチャートにおける、ステップS202のフローチャート例を示す。レーザ制御部55は、先頭EUV光パルスから今回のEUV光パルスまでのパルス数 k が、移動積算パルス数 S より大きいかなんかを判定してもよい（S251）。パルス数 k が移動積算パルス数 S 以下である場合（S251：Y）、レーザ制御部55は、今回のEUV光パルスの目標EUV光パルスエネルギー P_t を、 P_{ext} と決定してもよい（S252）。

[0190] パルス数 k が移動積算パルス数 S より大きい場合（S251：N）、レーザ制御部55は、記憶部からEUV光のパルスエネルギー $P(1)$ 、 $P(2)$ 、 $\dots$ 、 $P(k)$ を読み出してもよい（S253）。そして、レーザ制御部55は、移動積算値が一定値（ $P_{ext} \cdot S$ ）となる、目標EUV光パルスエネルギー P_t を求めてもよい（S254）。 $P_{ext} \cdot S$ は、今回のEUV

V光パルスエネルギーを含む移動積算値の目標値を示し得る。レーザ制御部55は、例えば、以下の数式に従って目標EUV光パルスエネルギー P_t を求めてもよい。

[数1]

$$P_t = P_{ext} \cdot S - \sum_{i=k-S+1}^{k-1} P(i)$$

[0191] 数1は、 $P_{ext} \cdot S$ と、前回パルスから前の($S-1$)個の連続するEUV光パルスのパルスエネルギーの和との差分を示し得る。

[0192] (作用)

上記スパイク制御は、EUV光パルスエネルギーの移動積算値の測定値と、目標積算値とによって、今回のEUV光パルスエネルギー目標値を決定することで、実際に露光のウエハ上に露光されるパルスエネルギーの積算値を目標値に近づけ得る。

[0193] 以上、実施形態を参照して本発明を説明したが、上記の説明は、制限ではなく単なる例示を意図したものである。従って、特許請求の範囲を逸脱することなく本開示の実施形態に変更を加えることができることは、当業者には明らかであろう。

[0194] 例えば、本発明は、EUV光生成システムに限らず、他の装置に適用し得る。例えば、本発明は、レーザ加工装置に適用してもよい。レーザ装置は、本発明に従って、パルスレーザ光のパルスエネルギーをパルス毎に制御し得る。本発明の可変アッテネータの制御方法は、上記方法に限定されない。可変アッテネータ及び光アイソレータの構成も、上記構成に限定されない。

[0195] レーザ制御部55やレーザ装置内制御部301等、上記の各構成要素及び機能は、それらの一部又は全部を、例えば電気回路で設計する等によりハードウェアで実現してもよい。また、上記の各構成要素及び機能等は、プロセッサがそれぞれの機能を実現するプログラムを解釈し、実行することによりソフトウェアで実現してもよい。

[0196] ある実施形態の構成の一部を他の実施形態の構成に置き換え得る。ある実施形態の構成に他の実施形態の構成を加え得る。各実施形態の構成の一部について、削除、他の構成の追加、他の構成による置換をし得る。

[0197] 本明細書及び添付の特許請求の範囲全体で使用される用語は、「限定的でない」用語と解釈されるべきである。例えば、「含む」又は「含まれる」という用語は、「含まれるものとして記載されたものに限定されない」と解釈されるべきである。「有する」という用語は、「有するものとして記載されたものに限定されない」と解釈されるべきである。また、本明細書及び添付の特許請求の範囲に記載される修飾句「1つの」は、「少なくとも1つ」又は「1又はそれ以上」を意味すると解釈されるべきである。

符号の説明

[0198] 2 チャンバ、3 レーザ装置、4 ターゲットセンサ、5 EUV光生成制御部、6 露光装置、7 EUV光パルスエネルギーセンサ、11 EUV光生成システム、21 ウィンドウ、25 プラズマ生成領域、26 ターゲット供給部、27 ターゲット、31～33 パルスレーザ光、34 レーザ光進行方向制御部、51 ターゲット供給制御部、55 レーザ制御部、301 レーザ装置内制御部、302 AND回路、303 遅延回路、312__マスタオシレータ、312__0～312__N ワンショット回路、315 レーザ光パルスエネルギーセンサ、318 ビームスプリッタ、350 マスタオシレータ、351__1～351__N 光増幅器、352__0～352__N 光アイソレータ、360 可変アッテネータ、361 ポッケルスセル、362 偏光子、363 可変電圧電源、364 a、364 b 電極、365 電気光学結晶、393 高電圧電源、394 ポッケルスセル、395 a、395 b 電極、396、397 偏光子、398 $\lambda/2$ 板、399 電気光学結晶、551 主制御部、903__0～903__N 印加電圧、552 レーザ出力制御回路、564 遅延回路、851 スパイク制御領域、852 フィードバック制御領域、901 発光トリガパルス、902 レーザ光パルス、904 印加電圧、925 スパイク制御デ

ータテーブル

請求の範囲

[請求項1]

レーザ光パルスを出力する、マスタオシレータと、
前記マスタオシレータから出力されたレーザ光パルスの光路上に配置され、前記レーザ光パルスを順次増幅する、複数段の光増幅器と、
前記光路上に配置され、開状態と閉状態とに切り替え可能な、光アイソレータと、
前記光路上に配置され、光の透過率を設定可能な、光アッテネータと、
前記光アイソレータ及び前記光アッテネータを制御する制御部と、
を含み、
前記制御部は、
前記マスタオシレータから繰り返し出力されるレーザ光パルスのそれぞれに対して、前記光アイソレータが前記閉状態から前記開状態へ切り替わった後に前記閉状態へ戻るように、前記光アイソレータを制御し、
前記マスタオシレータから繰り返し出力されるレーザ光パルスのそれぞれに対して、前記光アッテネータの前記透過率を設定するように、前記光アッテネータを制御する、レーザシステム。

[請求項2]

請求項1に記載のレーザシステムと、
前記レーザシステムからのレーザ光パルスが入射するプラズマ生成領域を収容するチャンバと、
前記チャンバ内の前記プラズマ生成領域にターゲットを順次供給するように構成されたターゲット供給部と、
前記ターゲット供給部から出力され、前記ターゲット供給部と前記プラズマ生成領域との間の所定位置を通過したターゲットを検出するように構成された、ターゲット検出部と、
前記レーザ光パルスのエネルギー及び前記プラズマ生成領域で生成されたEUV光パルスエネルギーの一方を測定するセンサと、を含み、

前記レーザ制御部は、前記ターゲット検出部からの検出信号に応じて前記マスタオシレータと前記光アイソレータとを制御し、前記センサの測定値に応じて前記光アッテネータの前記透過率を設定する、極端紫外光生成システム。

[請求項3]

レーザ光パルスを出力する、マスタオシレータと、

前記マスタオシレータから出力されたレーザ光パルスの光路上に配置され、前記レーザ光パルスを順次増幅する、複数段の光増幅器と、

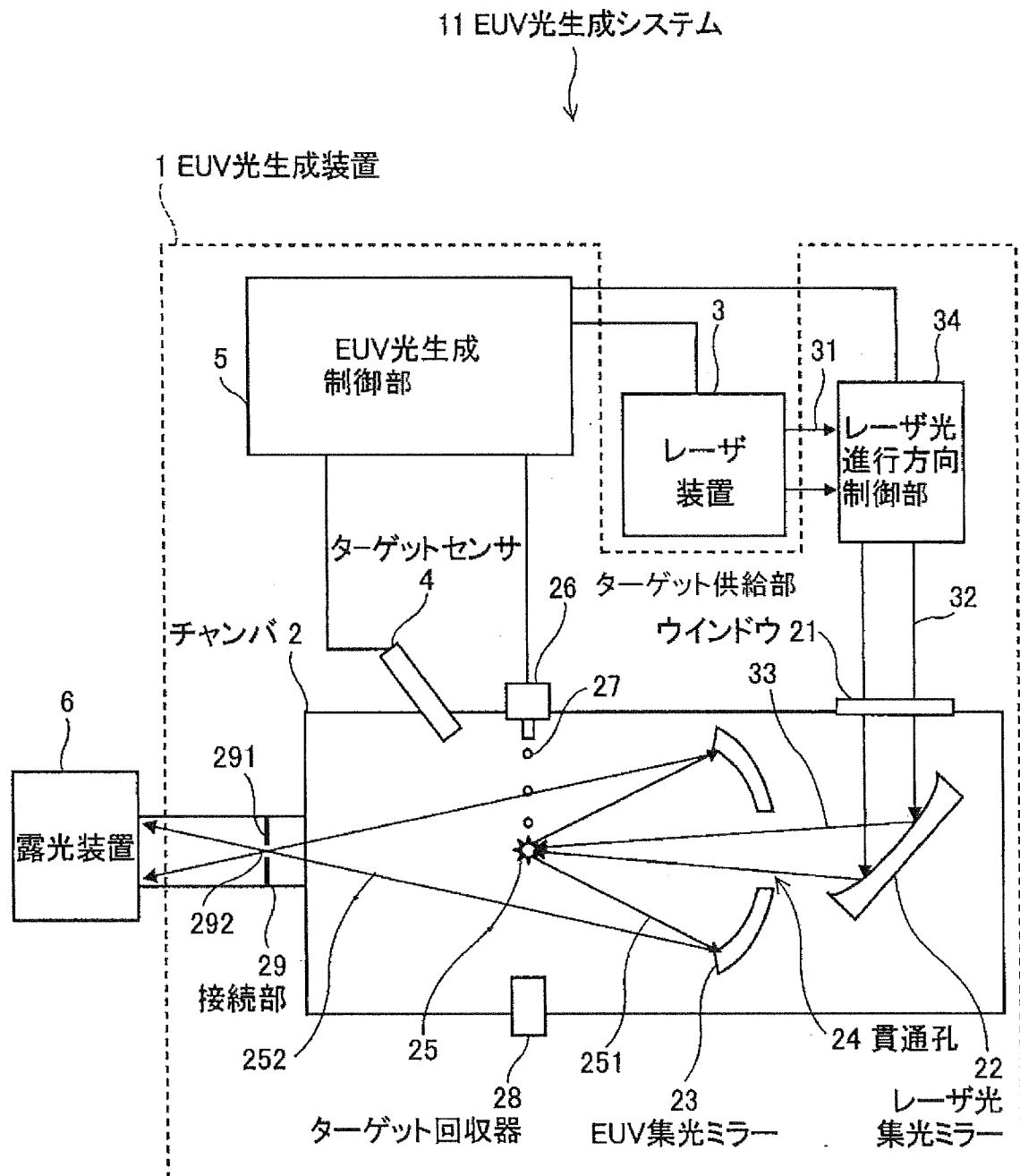
前記光路上に配置され、開状態と閉状態とを切り替え可能な、光アイソレータと、

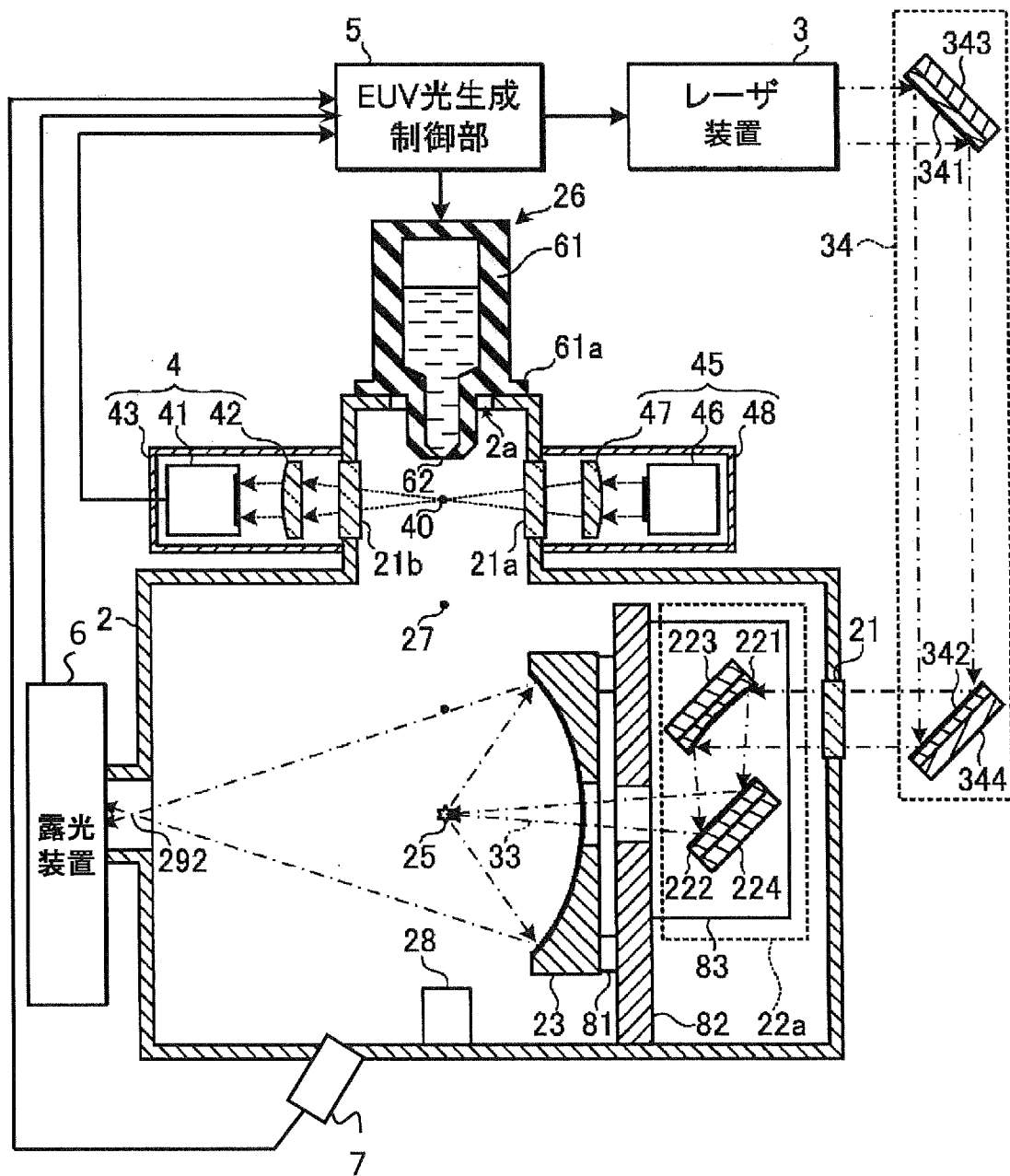
前記光路上に配置され、光の透過率を設定可能な、光アッテネータと、を含むレーザ装置の制御方法であって、

前記マスタオシレータから繰り返し出力されるレーザ光パルスのそれぞれに対して、前記光アイソレータが前記開状態から前記閉状態へ切り替わった後に前記開状態へ戻るように、前記光アイソレータを制御し、

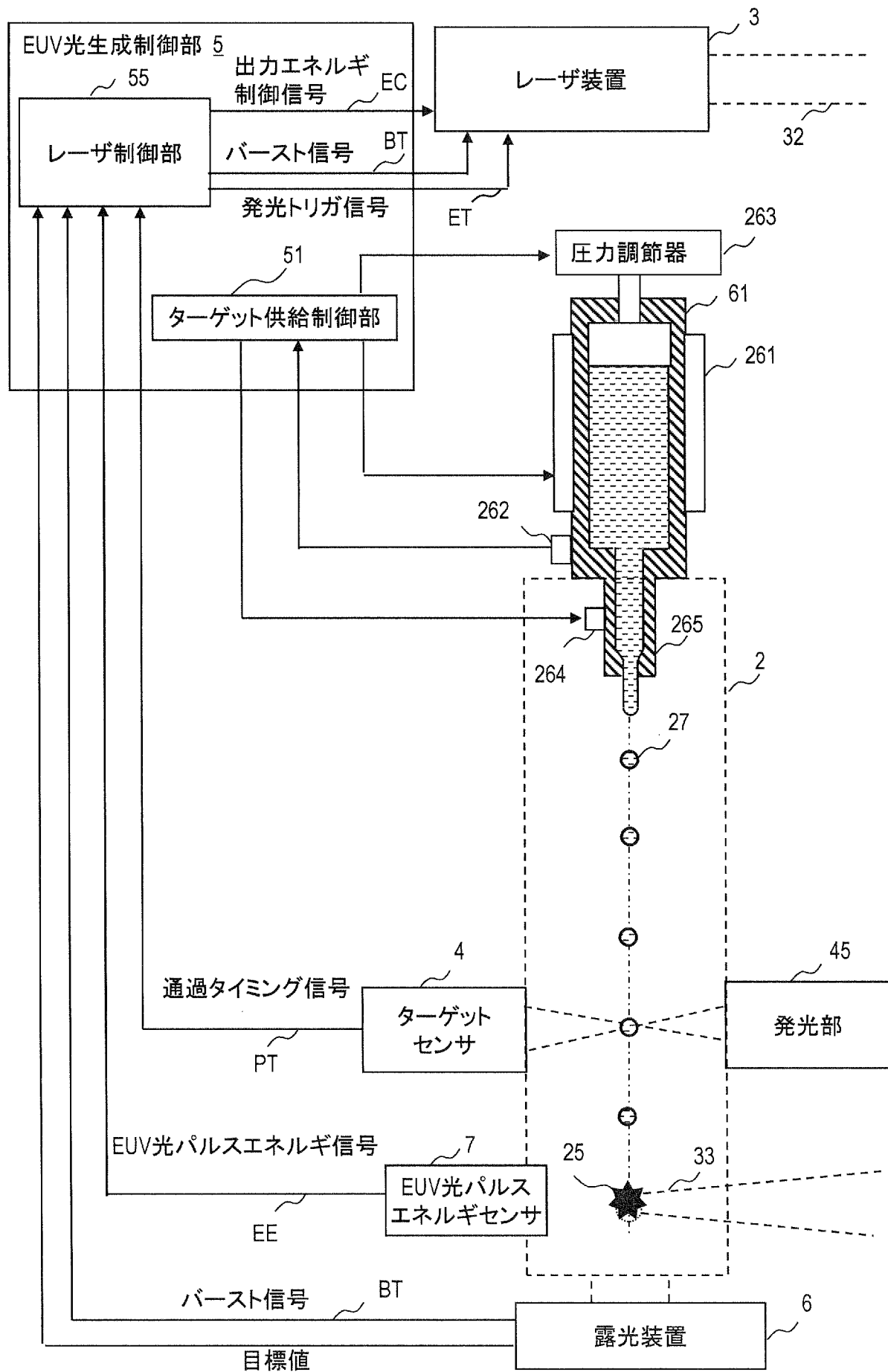
前記マスタオシレータから繰り返し出力されるレーザ光パルスのそれぞれに対して、前記光アッテネータの前記透過率を設定するように、前記光アッテネータを制御する、レーザ装置の制御方法。

[図1]

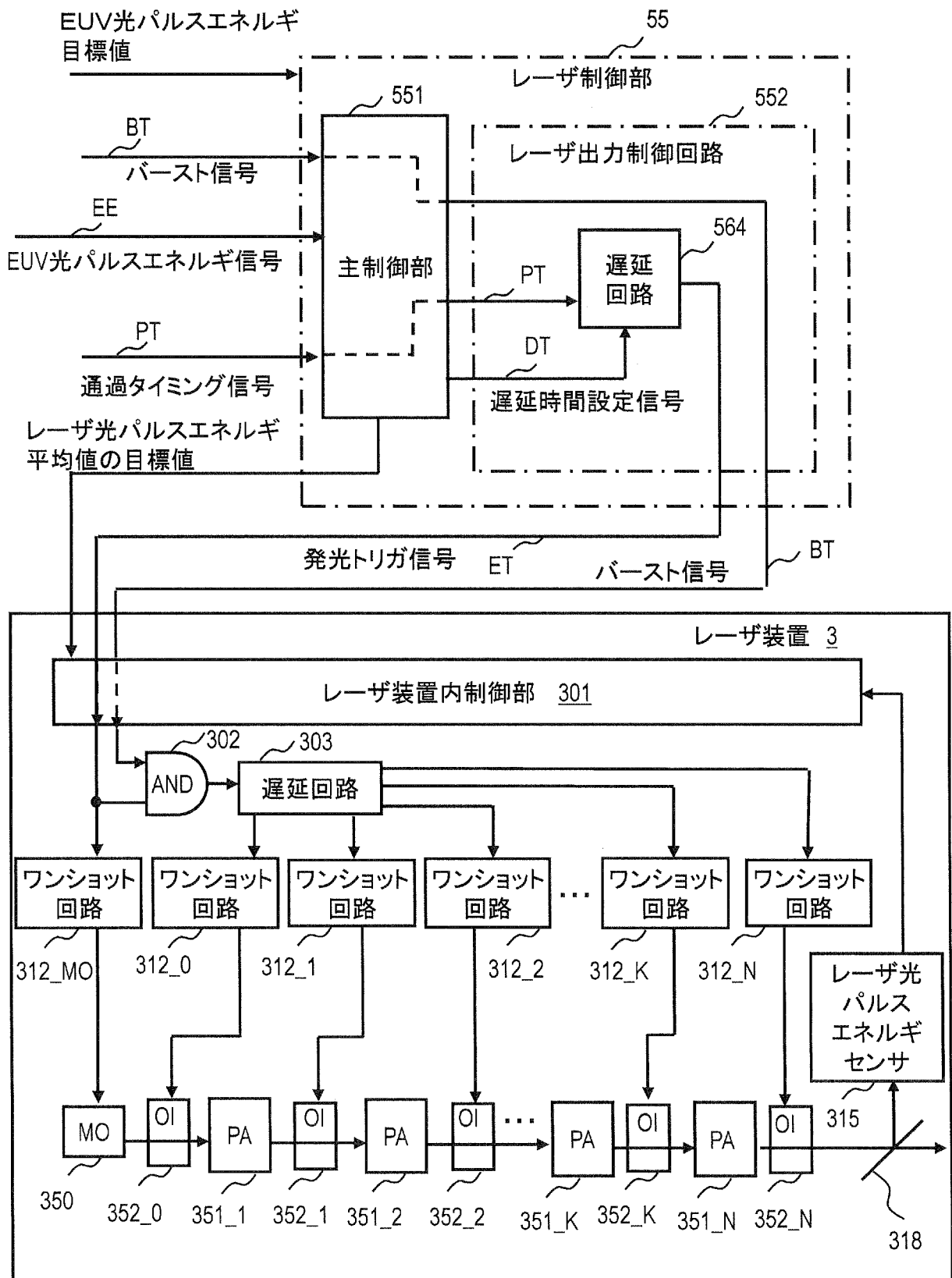




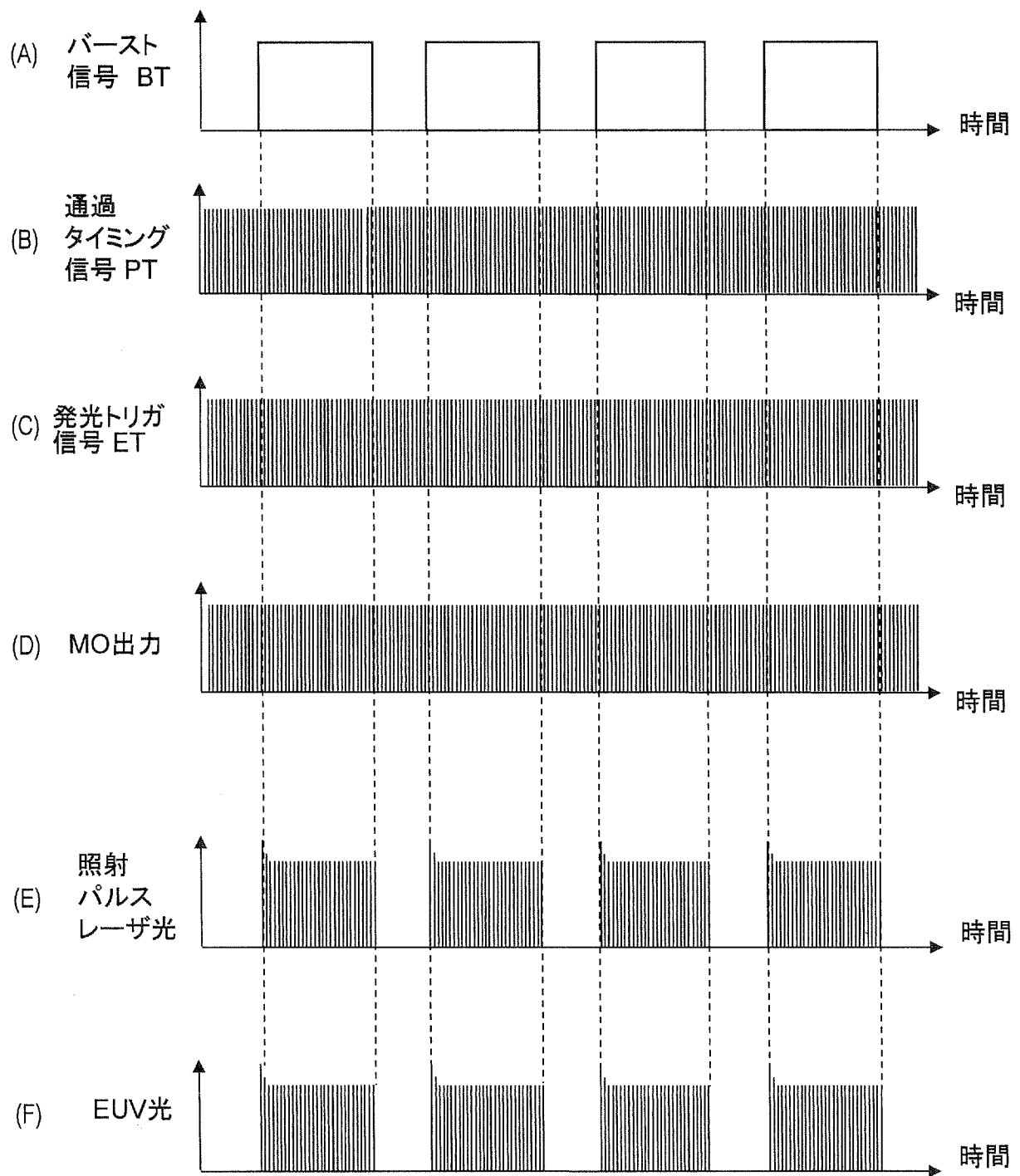
[図3]



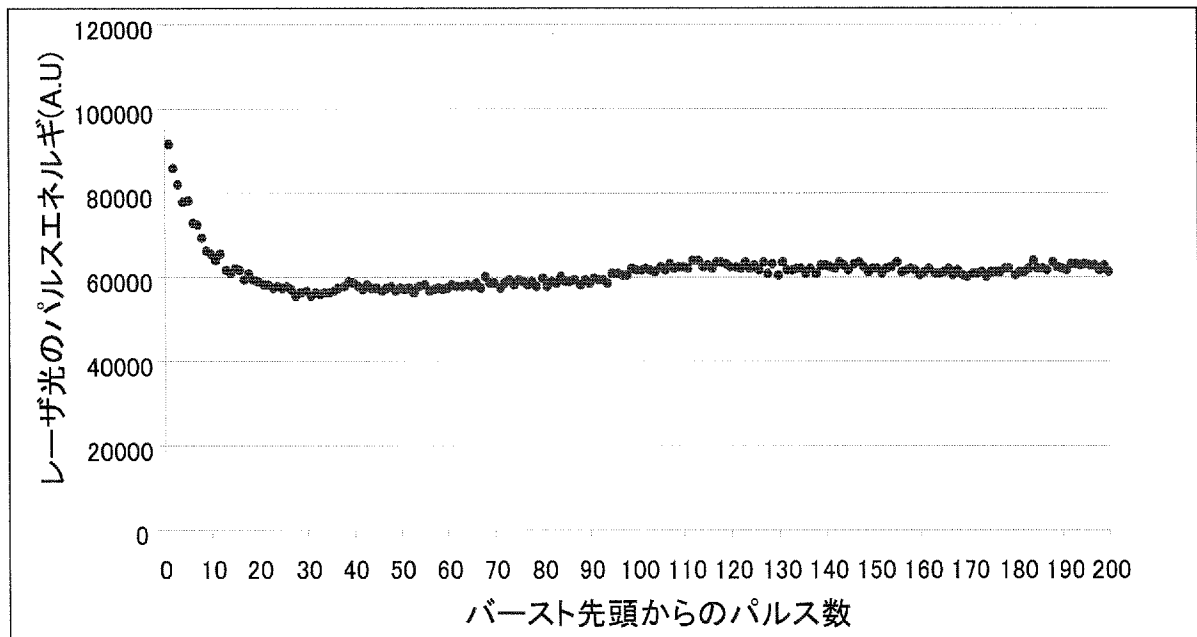
[図4]



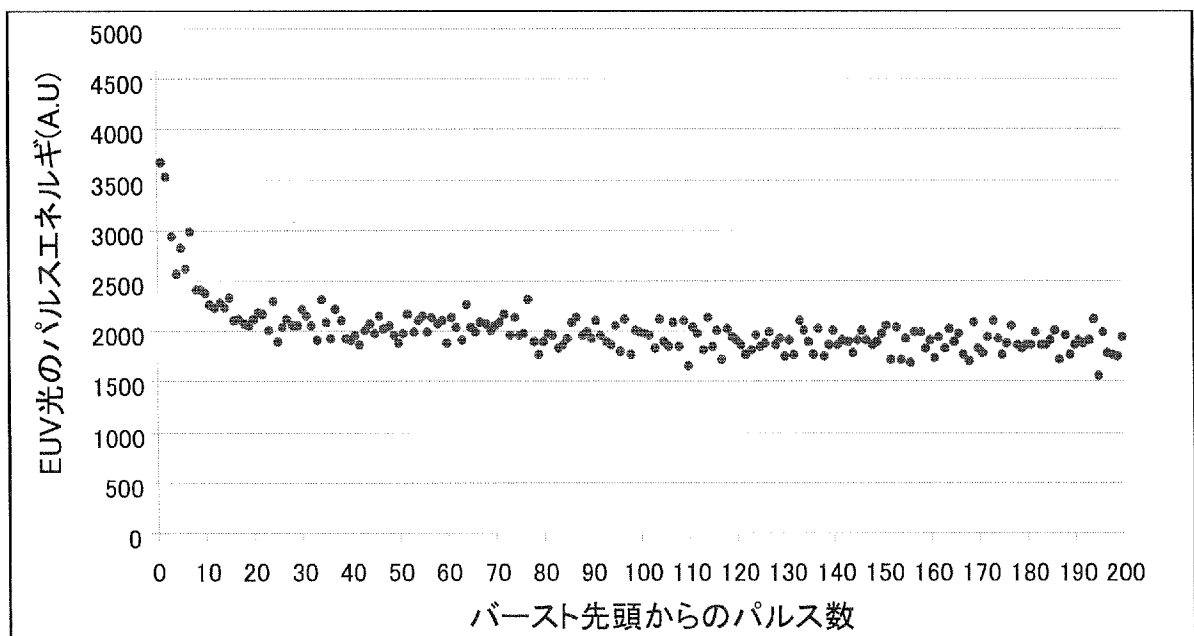
[図5]



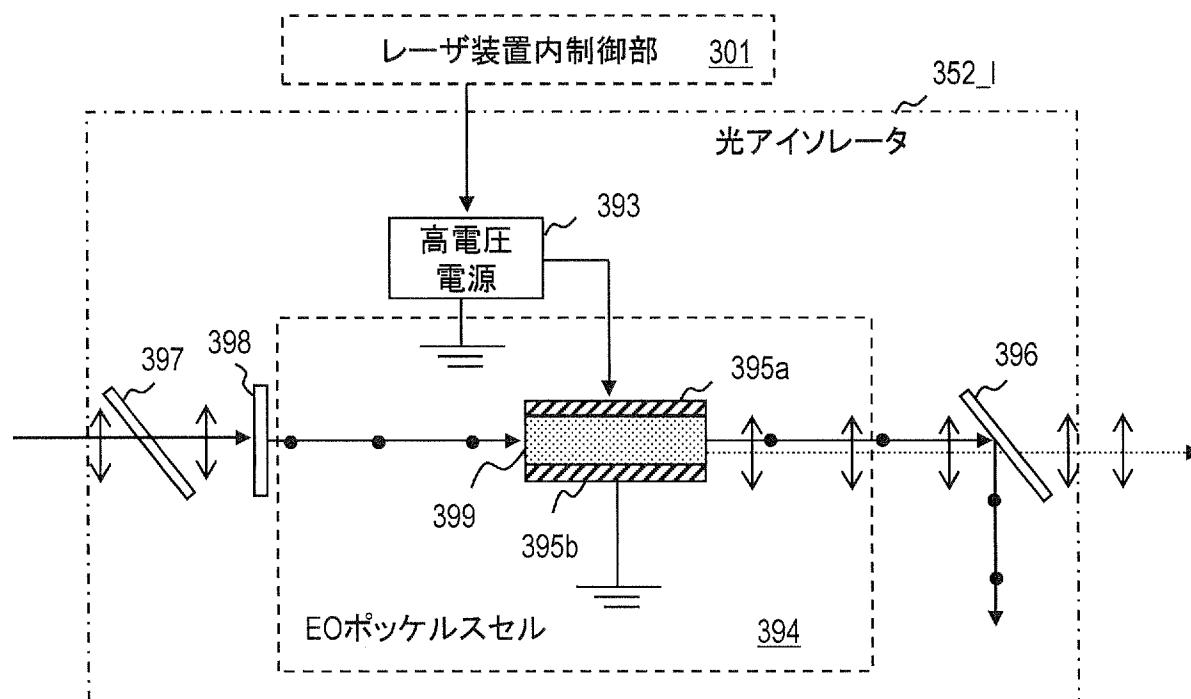
[図6A]



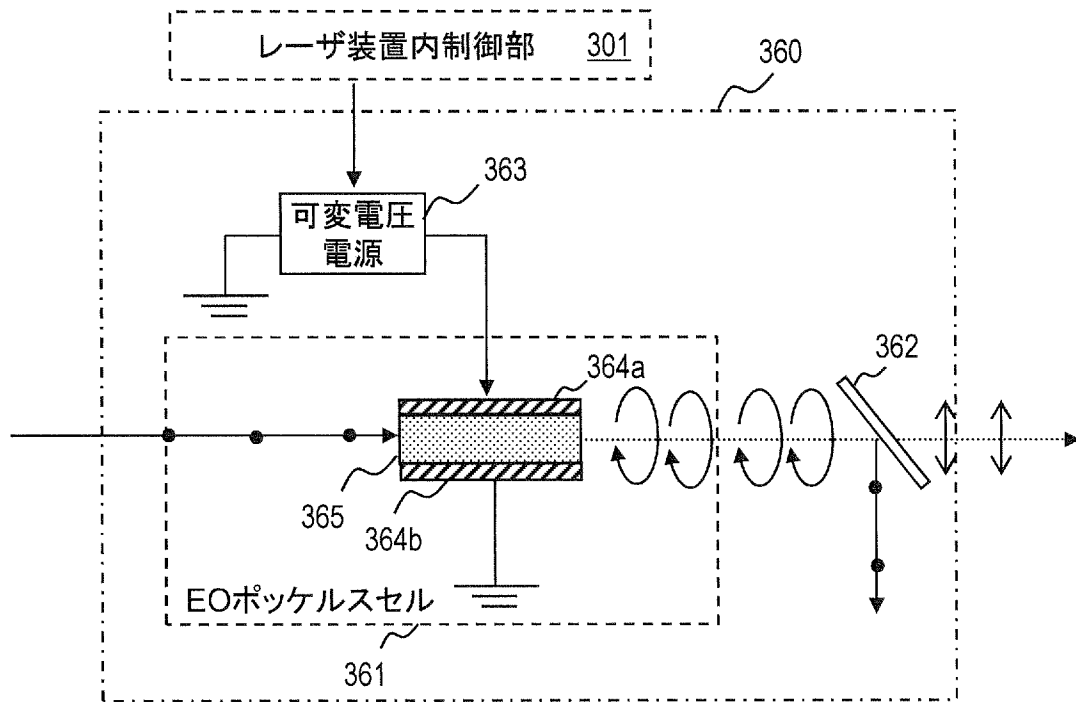
[図6B]



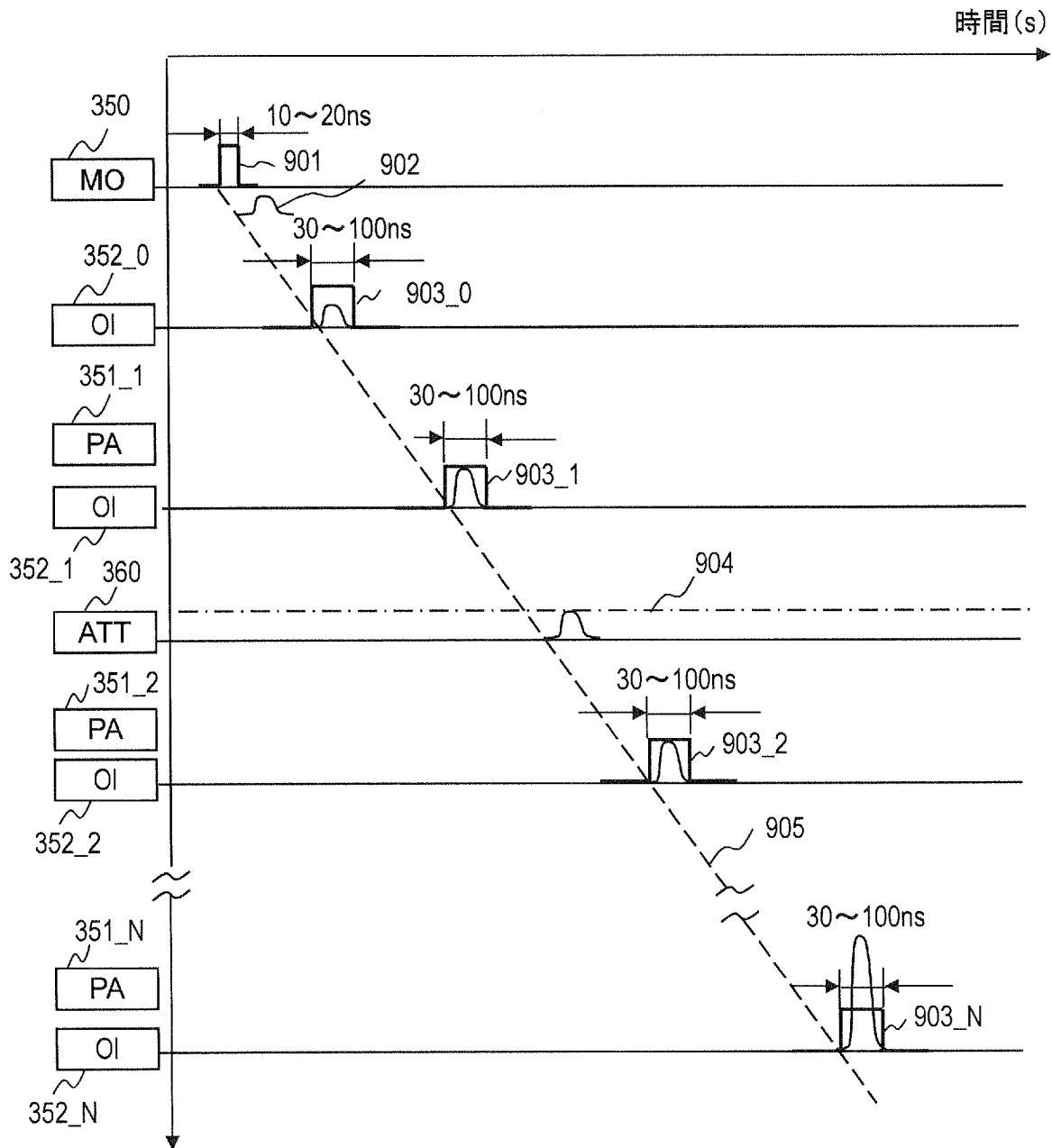
[図7]



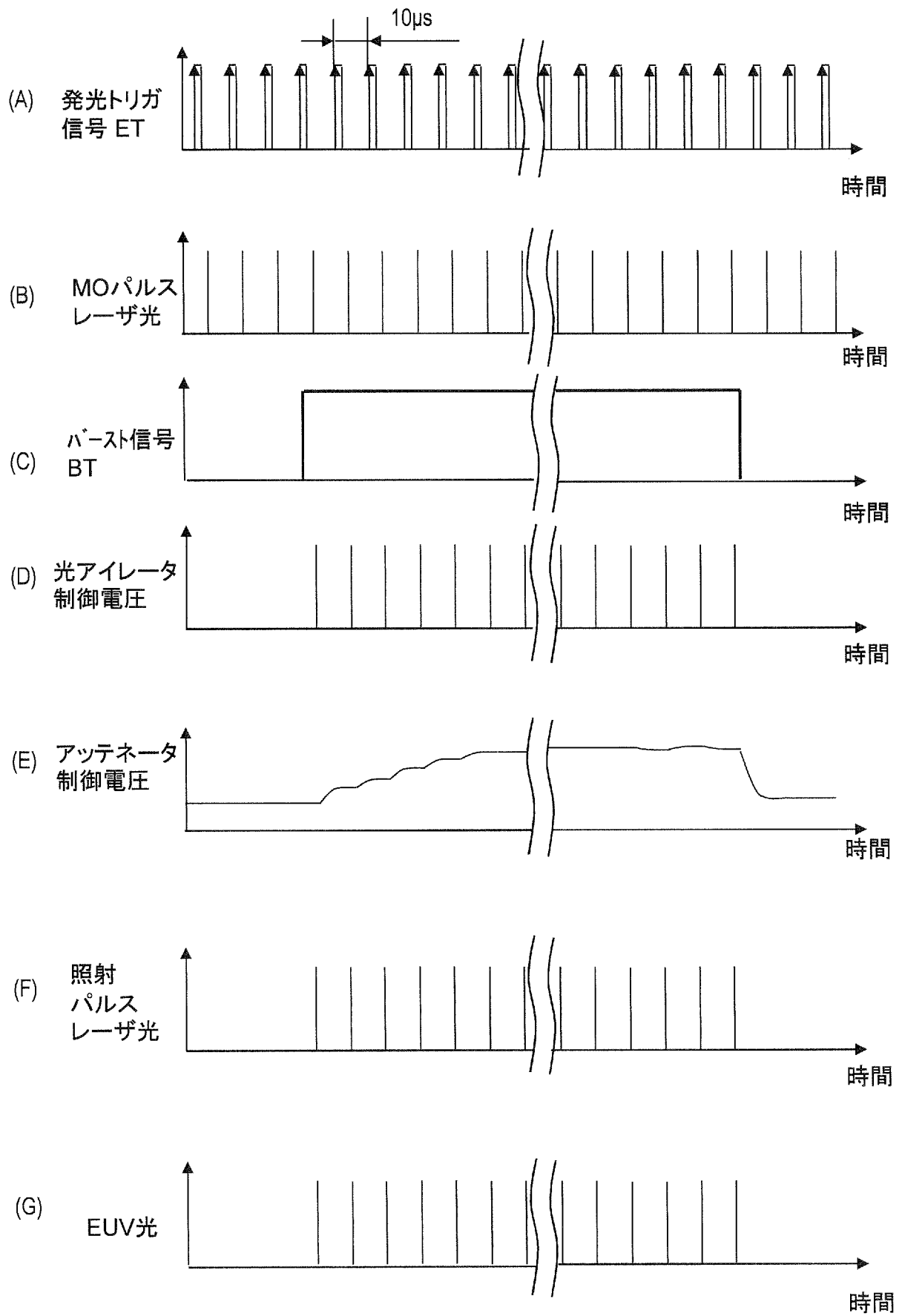
[図9]



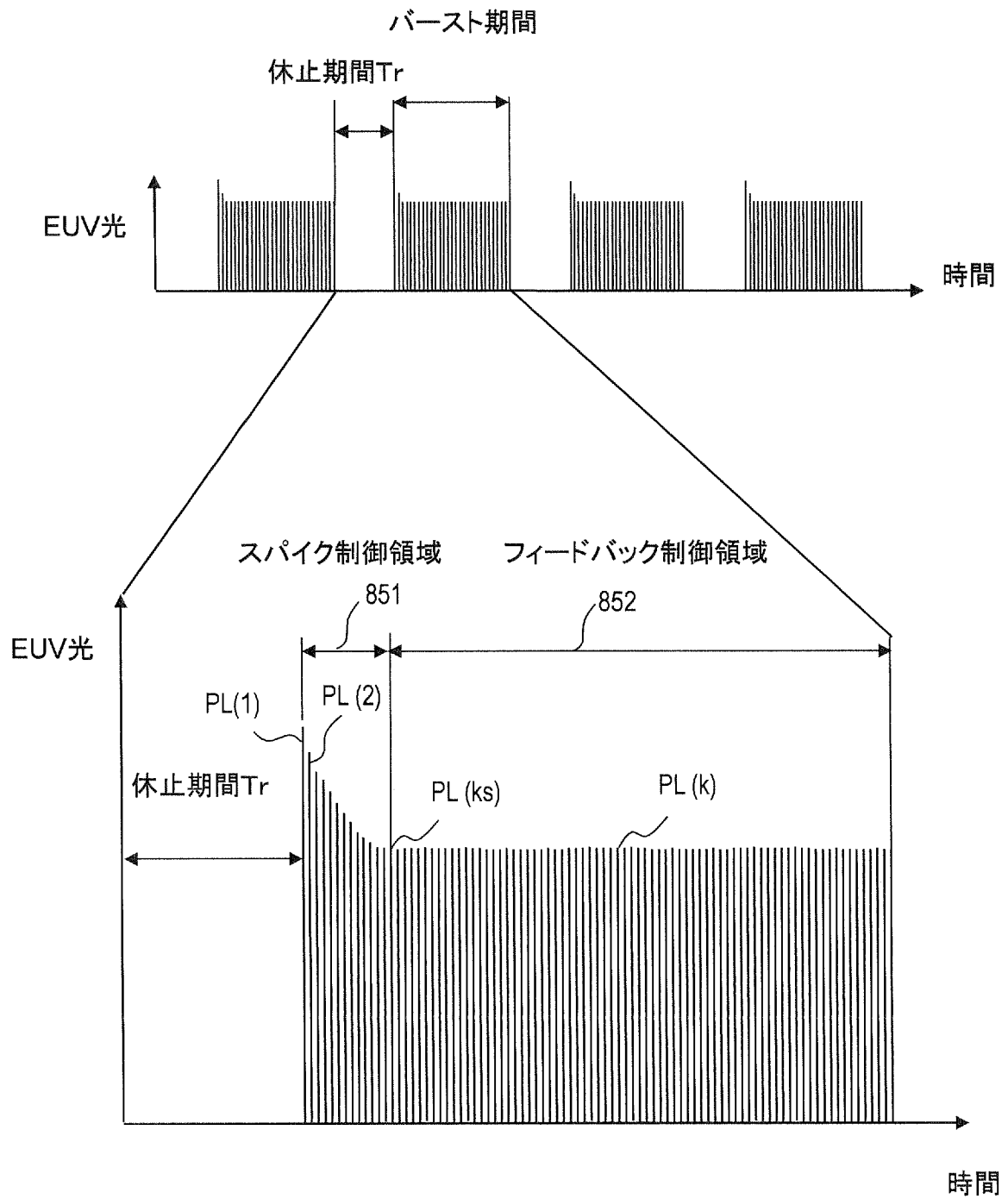
[図10]



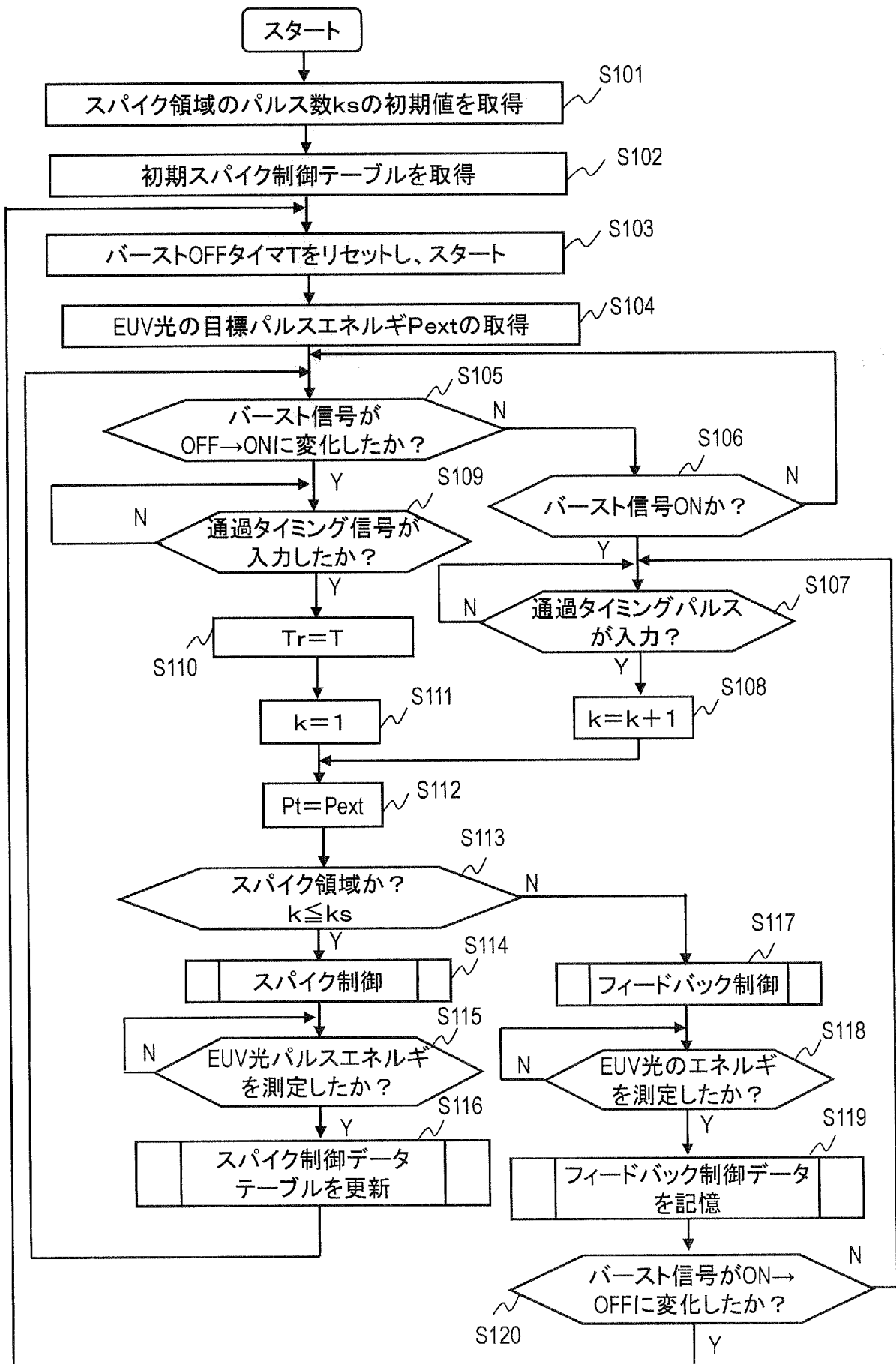
[図11]



[図12]



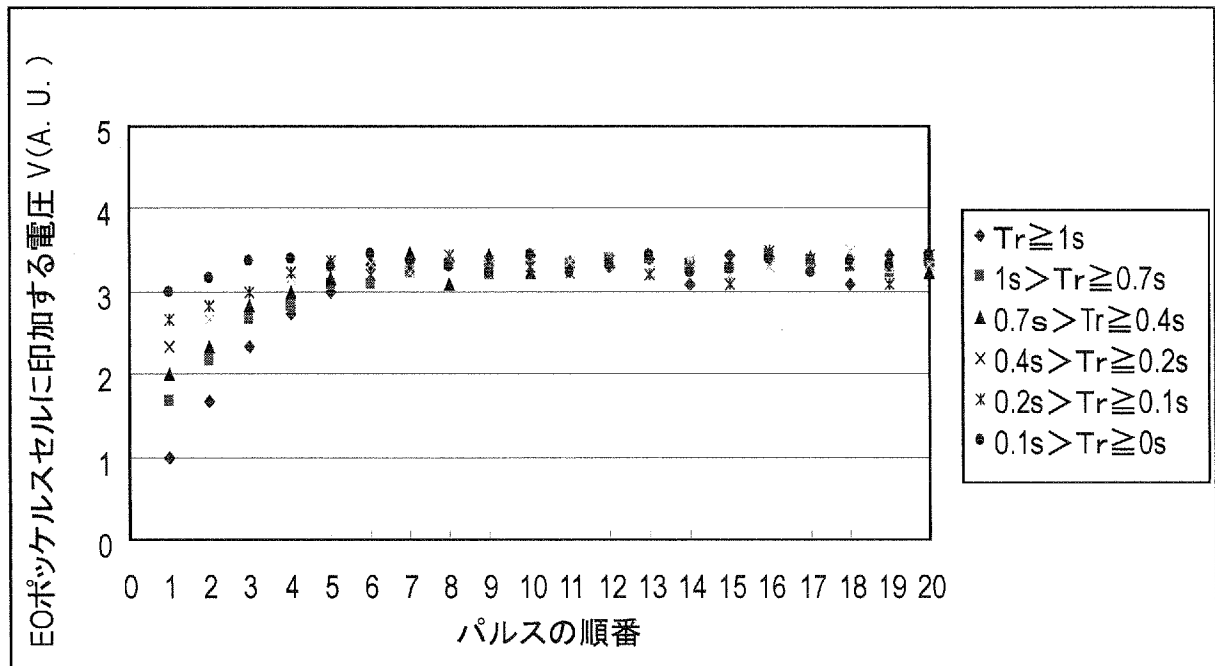
[図13]



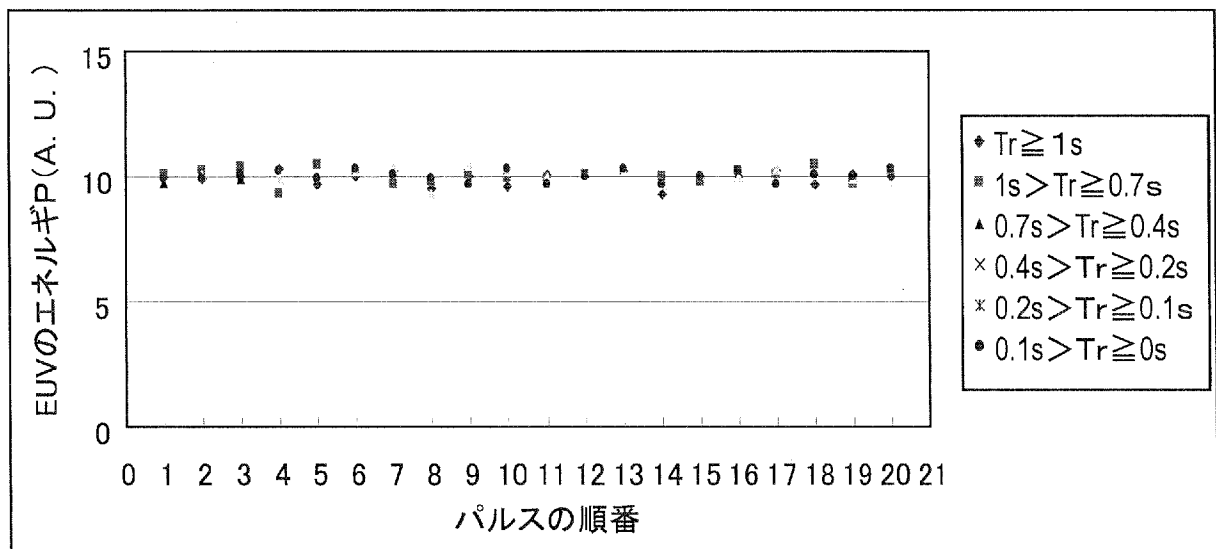
925

スパイク制御データテーブル																			
パルス の順番	休止期間 Tr	Tr≧1s			1s>Tr≧0.7s			0.7s>Tr≧0.4s			0.4s>Tr≧0.2s			0.2s>Tr≧0.1s			0.1s>Tr≧0s		
		k=1	P(1)_1	V(1)_1	P(1)_2	V(1)_2	P(1)_3	V(1)_3	P(1)_4	V(1)_4	P(1)_5	V(1)_5	P(1)_6	V(1)_6					
	k=2	P(2)_1	V(2)_1	P(2)_2	V(2)_2	P(2)_3	V(2)_3	P(2)_4	V(2)_4	P(2)_5	V(2)_5	P(2)_6	V(2)_6						
	k=3	P(3)_1	V(3)_1	P(3)_2	V(3)_2	P(3)_3	V(3)_3	P(3)_4	V(3)_4	P(3)_5	V(3)_5	P(3)_6	V(3)_6						
⋮ ⋮		⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮						
	k=18	P(18)_1	V(18)_1	P(18)_2	V(18)_2	P(18)_3	V(18)_3	P(18)_4	V(18)_4	P(18)_5	V(18)_5	P(18)_6	V(18)_6						
	k=19	P(19)_1	V(19)_1	P(19)_2	V(19)_2	P(19)_3	V(19)_3	P(19)_4	V(19)_4	P(19)_5	V(19)_5	P(19)_6	V(19)_6						
	k=20	P(20)_1	V(20)_1	P(20)_2	V(20)_2	P(20)_3	V(20)_3	P(20)_4	V(20)_4	P(20)_5	V(20)_5	P(20)_6	V(20)_6						

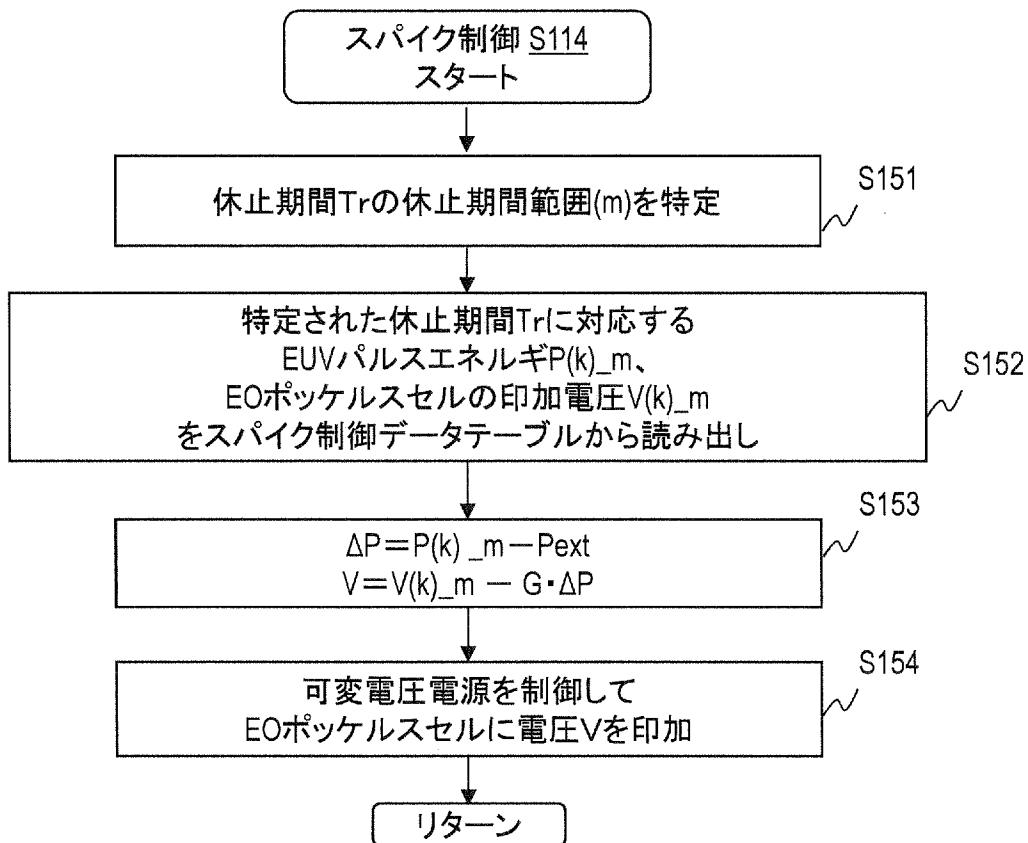
[図15A]



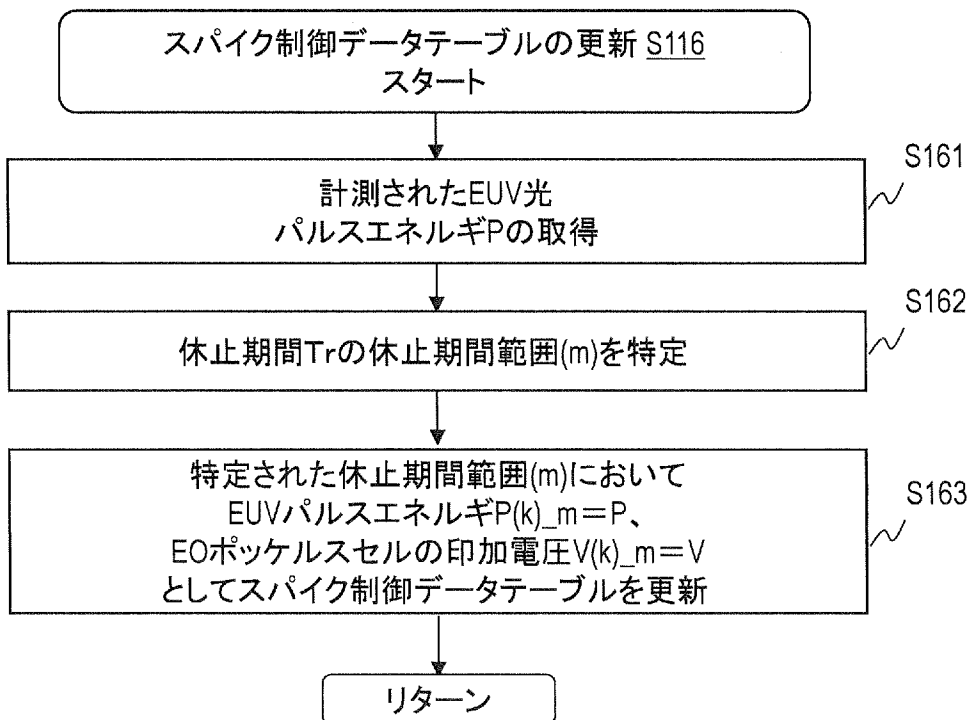
[図15B]



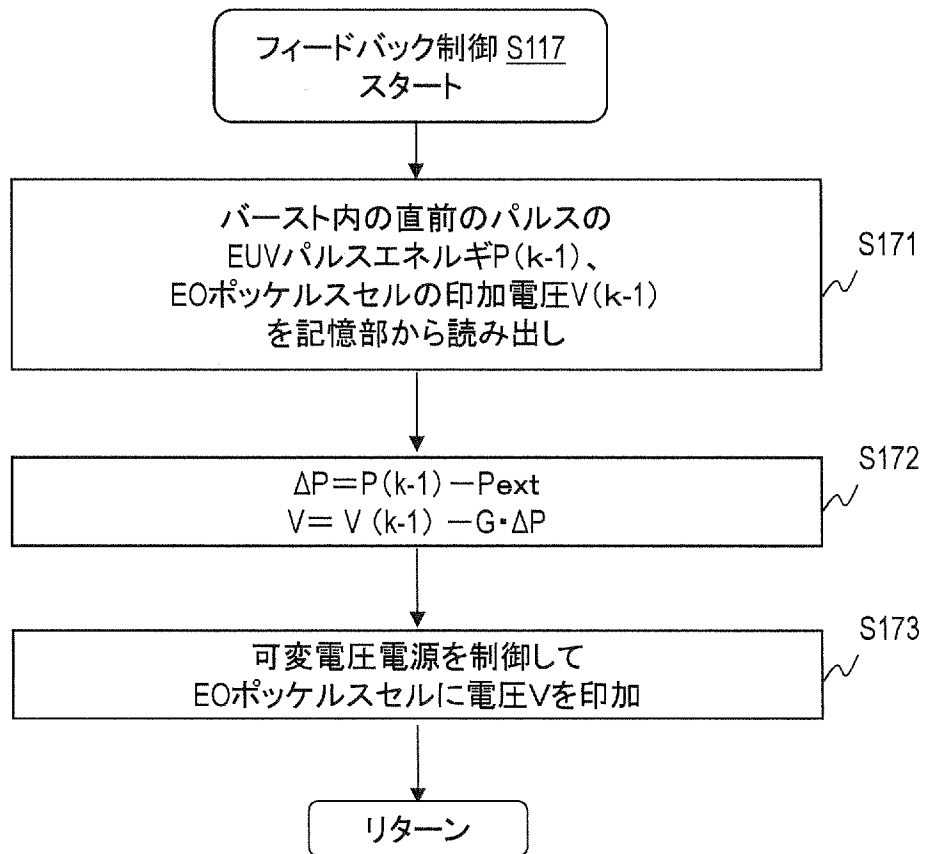
[図16]



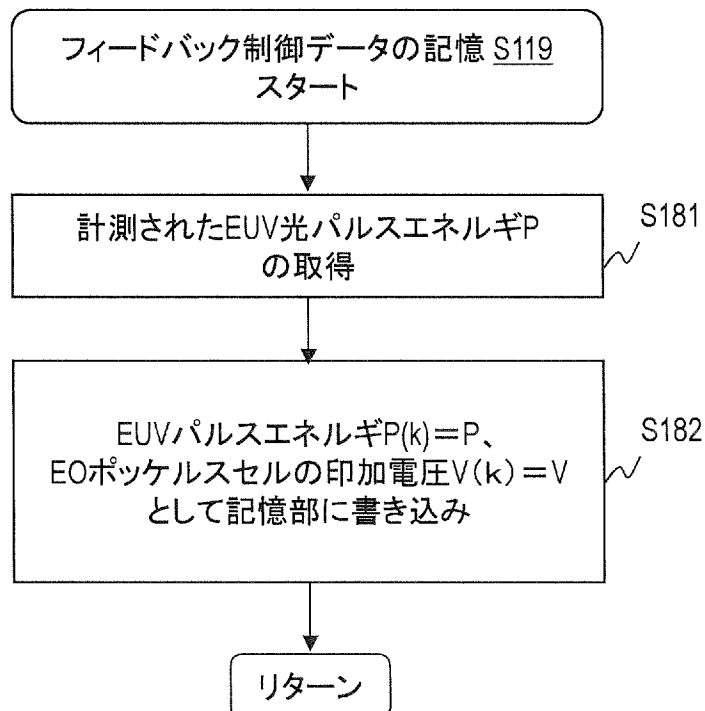
[図17]



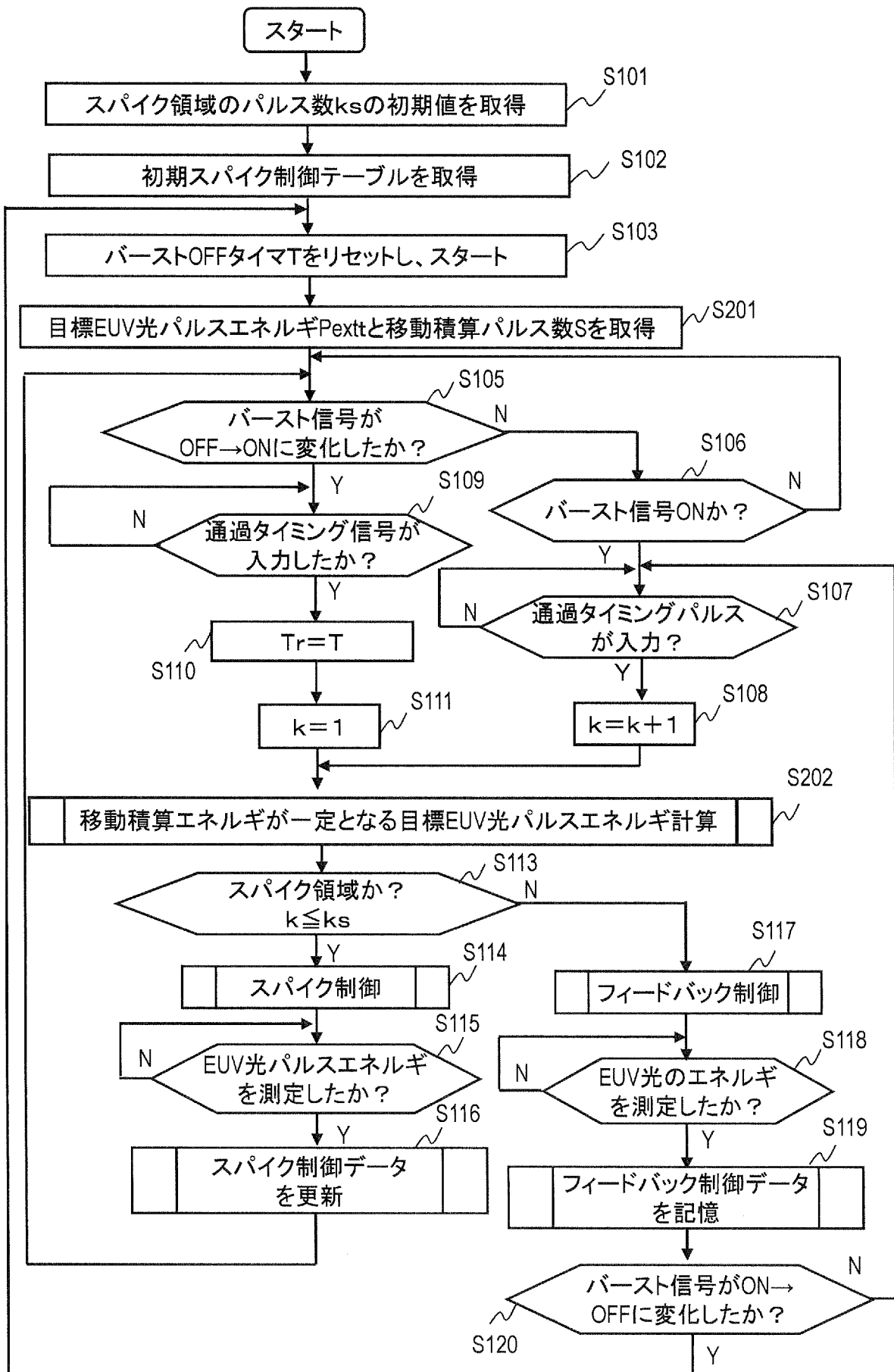
[図18]



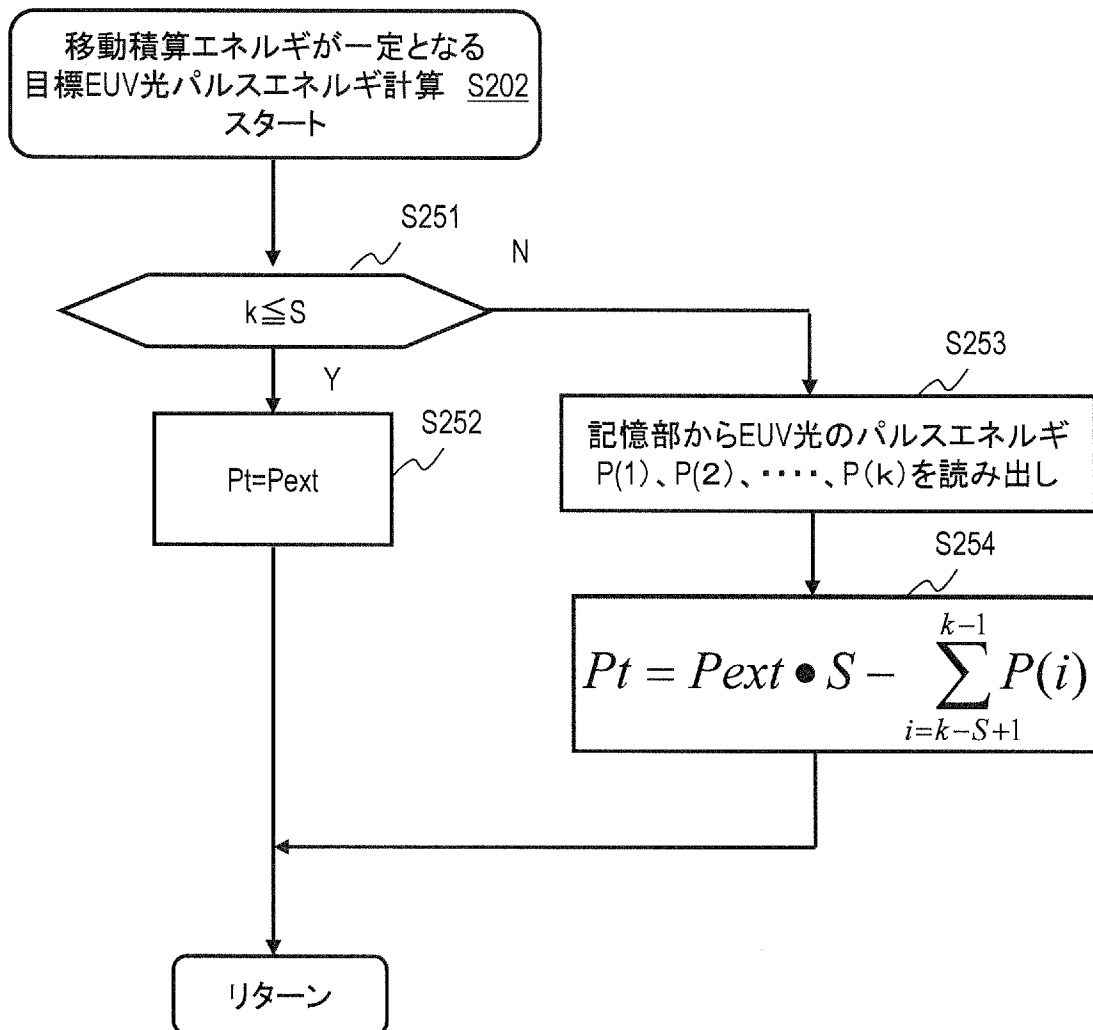
[図19]



[図20]



[図21]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/068163

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01S3/10(2006.01)i, H01S3/13(2006.01)i, H01S3/23(2006.01)i, H01L21/027(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01S3/10-3/139, H01S3/23, H01L21/027

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

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2014
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2014	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2014

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.
Y	JP 2013-65804 A (Gigaphoton Inc.), 11 April 2013 (11.04.2013), entire text; all drawings & US 2013/0032735 A1 & EP 2656456 A2 & WO 2012/085638 A2	1-3
Y	JP 2012-216768 A (Gigaphoton Inc.), 08 November 2012 (08.11.2012), paragraphs [0030] to [0068]; fig. 2 to 11 & US 2013/0099140 A1 & EP 2692030 A1 & WO 2012/131452 A1	1-3
A	JP 8-274399 A (Komatsu Ltd.), 18 October 1996 (18.10.1996), entire text; all drawings (Family: none)	1-3

☒ 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

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
10 September, 2014 (10.09.14)

Date of mailing of the international search report
22 September, 2014 (22.09.14)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/068163

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2007-59788 A (Komatsu Ltd. et al.), 08 March 2007 (08.03.2007), entire text; all drawings (Family: none)	1-3

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. H01S3/10(2006.01)i, H01S3/13(2006.01)i, H01S3/23(2006.01)i, H01L21/027(2006.01)i

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（I P C））

Int.Cl. H01S3/10-3/139, H01S3/23, H01L21/027

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	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 4 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 4 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 4 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
Y	JP 2013-65804 A（ギガフォトン株式会社）2013.04.11, 全文, 全図 & US 2013/0032735 A1 & EP 2656456 A2 & WO 2012/085638 A2	1-3
Y	JP 2012-216768 A（ギガフォトン株式会社）2012.11.08, 段落【0030】－【0068】, 図2－11 & US 2013/0099140 A1 & EP 2692030 A1 & WO 2012/131452 A1	1-3

☒ 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
「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矛盾するものではなく、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

1 0 . 0 9 . 2 0 1 4

国際調査報告の発送日

2 2 . 0 9 . 2 0 1 4

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（I S A / J P）
郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

河原 正

2 X

9 0 1 7

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 2 9 4

C (続き) . 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 8-274399 A (株式会社小松製作所) 1996. 10. 18, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-3
A	JP 2007-59788 A (株式会社小松製作所 他 1 名) 2007. 03. 08, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-3