

(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
2016年9月29日(29.09.2016)



(10) 国際公開番号

WO 2016/151723 A1

- (51) 国際特許分類:
H01L 21/265 (2006.01) H01L 21/22 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2015/058709
- (22) 国際出願日: 2015年3月23日(23.03.2015)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (71) 出願人: 国立大学法人九州大学(KYUSHU UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒8128581 福岡県福岡市東区箱崎六丁目10番1号 Fukuoka (JP). 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: 大久保 智幸(OHKUBO Tomoyuki); 〒8128581 福岡県福岡市東区箱崎六丁目10番1号 国立大学法人九州大学内 Fukuoka (JP). 池上 浩(IKENOUE Hiroshi); 〒8128581 福岡県福岡市東区箱崎六丁目10番1号 国立大学法人九州大学内 Fukuoka (JP). 池田 晃裕(IKEDA Akihiro); 〒8128581 福岡県福岡市東区箱崎六丁目10番1号 国立大学法人九州大学内 Fukuoka (JP). 浅野 種正(ASANO Tanemasa); 〒8128581 福岡県福岡市東区箱崎六丁目10番1号 国立大学法人九州大学内 Fukuoka (JP). 若林 理(WAKABAYASHI Osamu); 〒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).

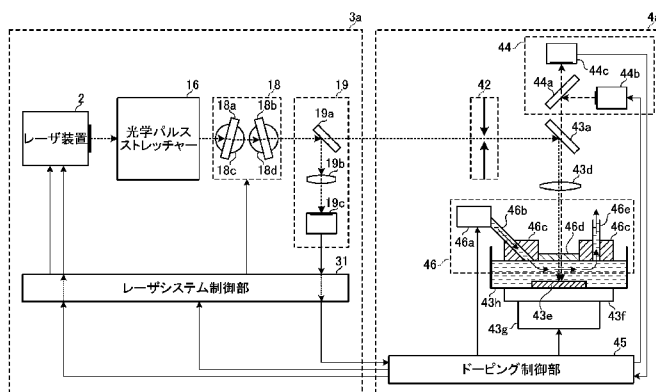
- (74) 代理人: 保坂 延寿(HOSAKA Nobuhisa); 〒1010025 東京都千代田区神田佐久間町3-22 神田SKビル4階 新井・橋本・保坂国際特許事務所 Tokyo (JP).
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, 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, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, 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, 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))

(54) Title: LASER DOPING DEVICE AND LASER DOPING METHOD

(54) 発明の名称: レーザドーピング装置及びレーザドーピング方法



- 2 Laser device
16 Optical pulse stretcher
31 Laser system control unit
45 Doping control unit

(57) Abstract: This laser doping device, which performs doping by irradiating a predetermined region of a semiconductor material with a pulsed laser beam, may be provided with: a solution supply system that supplies the predetermined region with a dopant-containing solution; and a laser system that includes at least one laser device that outputs a pulsed laser beam that passes through the dopant-containing solution, and a pulse time waveform adjustment device that adjusts the pulse time waveform of the pulsed laser beam.

(57) 要約: このレーザドーピング装置は、半導体材料の所定領域にパルスレーザー光を照射してドーピングを行うレーザドーピング装置において、所定領域に、ドーパントを含む溶液を供給する溶液供給システムと、ドーパントを含む溶液を透過するパルスレーザー光を出力する少なくとも1つのレーザー装置と、パルスレーザー光のパルス時間波形を調節するパルス時間波形調節装置と、を含むレーザシステムと、を備えてもよい。

明 細 書

発明の名称：レーザドーピング装置及びレーザドーピング方法 技術分野

[0001] 本開示は、レーザドーピング装置及びレーザドーピング方法に関する。

背景技術

[0002] シリコンカーバイド（S i C）は次世代パワーデバイス材料として、開発が進められている。S i Cは、半導体材料として従来使用されているシリコン（S i）と比較して、大きいバンドギャップ、高い絶縁破壊電界（S iのおよそ10倍）、優れた熱伝導率などを有し、また熱化学的に安定していることが特徴となっている。

[0003] S i Cを用いてトランジスタを構成するためには、S i Cに不純物をドーピングすることが必要であり得る。S iに不純物をドーピングする場合には、不純物のイオンビームをS iに照射し、高温により活性化することが従来行われている。しかし、このような従来の方でS i Cに不純物をドーピングしようとする、S i Cに熱ダメージが加わり、欠陥が形成され、電気特性が低下する場合があった。

[0004] 下記の非特許文献1～5においては、ドーパントを含む溶液中でS i Cにパルスレーザ光を照射することによる不純物のドーピングが検討されている。しかし、これらの非特許文献1～5においては、以下のように、十分なドーピング深さが得られない場合があった。

（1）n型ドーパントについては、窒素（N）のドーピング深さが100～200nmを達成できた例が報告されているが、リン（P）のドーピング深さは、約30nmしか達成できていない。

（2）p型ドーパントについては、アルミニウム（A l）のドーピング深さが約40nmを達成した例が報告されているが、それ以上のドーピング深さを達成できた例は報告されていない。

先行技術文献

非特許文献

[0005] 非特許文献1: Akihiro Ikeda, Koji Nishi, Hiroshi Ikenoue, Tanemasa Asano, Phosphorus doping of 4H SiC by liquid immersion excimer laser irradiation, APPLIED PHYSICS LETTERS 102, 052104 (2013)

非特許文献2: Koji Nishi, Akihiro Ikeda, Hiroshi Ikenoue, and Tanemasa Asano, Phosphorus doping into 4H-SiC by Irradiation of Excimer Laser in Phosphoric Solution, Japanese Journal of Applied Physics 52 (2013)

非特許文献3: Daichi Marui, Akihiro Ikeda, Koji Nishi, Hiroshi Ikenoue, Tanemasa Asano, Aluminum doping of 4H-SiC by irradiation of excimer laser in aluminum chloride solution, Japanese Journal of Applied Physics 53(2014)

非特許文献4: Akihiro Ikeda, Daichi Marui, Hiroshi Ikenoue, Tanemasa Asano, Nitrogen doping of 4H-SiC by KrF excimer laser irradiation in liquid nitrogen, Japanese Journal of Applied Physics 54(2015)

非特許文献5: 井上祐樹, 池上浩, 池田晃裕, 中村大輔, 岡田龍雄, 浅野種正, 薬液中レーザー照射による4H-SiCのn形化と不純物の拡散特性, 第61回応用物理学会春季学術講演会(2014)

特許文献

[0006] 特許文献1: 特許第4387091号公報

特許文献2: 特許第4409231号公報

特許文献3: 特表2010-525554号公報

特許文献4: 国際公開第2014/156818号

概要

[0007] 本開示の1つの観点に係るレーザドーピング装置は、半導体材料の所定領域にパルスレーザ光を照射してドーピングを行うレーザドーピング装置において、所定領域に、ドーパントを含む溶液を供給する溶液供給システムと、ドーパントを含む溶液を透過するパルスレーザ光を出力する少なくとも1つ

のレーザ装置と、パルスレーザ光のパルス時間波形を調節するパルス時間波形調節装置と、を含むレーザシステムと、を備えてもよい。

[0008] 本開示の他の1つの観点に係るレーザドーピング装置は、半導体材料の所定領域にパルスレーザ光を照射してドーピングを行うレーザドーピング装置において、所定領域に、ホウ素を含む溶液を供給する溶液供給システムと、ホウ素を含む溶液を透過するパルスレーザ光を出力する少なくとも1つのレーザ装置と、を備えてもよい。

[0009] 本開示の他の1つの観点に係るレーザドーピング方法は、半導体材料の所定領域にパルスレーザ光を照射してドーピングを行うレーザドーピング方法において、所定領域に、ドーパントを含む溶液を供給することと、ドーパントを含む溶液を透過するパルスレーザ光を出力することと、パルスレーザ光のパルス時間波形を調節することと、を備えてもよい。

図面の簡単な説明

[0010] 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、比較例に係るレーザドーピング装置の構成を概略的に示す。

[図2]図2は、本開示の第1の実施形態に係るレーザドーピング装置の構成を概略的に示す。

[図3A]図3Aは、図2に示される光学パルスストレッチャーの構成を示す。

[図3B]図3Bは、光学パルスストレッチャーを用いない場合と、光学パルスストレッチャーを用いた場合のパルスレーザ光のパルス時間波形を示すグラフである。

[図4A]図4Aは、4H-SiCにドーピングされたアルミニウムの濃度とドーピング深さの関係を示すグラフである。

[図4B]図4Bは、n型4H-SiC基板の一部に、アルミニウムをドーピングしてp型層を形成した場合のダイオード特性を示すグラフである。

[図5]図5は、本開示の第2の実施形態に係るレーザドーピング装置の構成を概略的に示す。

[図6A]図6 Aは、図5に示される光学パルスストレッチャーの構成を示す。

[図6B]図6 Bは、ビームスプリッタを図6 Aと異なる位置に移動させ、且つ、凹面ミラーの姿勢が図6 Aと異なる状態を示す。

[図6C]図6 Cは、凹面ミラーの姿勢が図6 Bと異なる状態を示す。

[図6D]図6 Dは、ビームスプリッタ、ホルダ、アーム、移動テーブル及び1軸ステージを、ビームスプリッタの反射面に垂直な方向から見た図である。

[図6E]図6 Eは、ビームスプリッタを図6 Dと異なる位置に移動させた状態を示す。

[図7]図7は、図5に示されるドーピング制御部によるドーピング制御の処理を示すフローチャートである。

[図8A]図8 Aは、図7に示されるパルス時間波形生成パラメータを読み込む処理の詳細を示すフローチャートである。

[図8B]図8 Bは、図7に示されるパルス時間波形生成パラメータに設定する処理の詳細を示すフローチャートである。

[図8C]図8 Cは、図7に示される目標パルスエネルギーを設定する処理の詳細を示すフローチャートである。

[図9]図9は、図5に示されるドーピング制御部によるドーピング制御の処理の変形例を示すフローチャートである。

[図10A]図10 Aは、図9に示される照射条件パラメータを読み込む処理の詳細を示すフローチャートである。

[図10B]図10 Bは、図9に示されるパルス時間波形生成パラメータに設定する処理の詳細を示すフローチャートである。

[図10C]図10 Cは、図9に示される目標パルスエネルギーを設定する処理の詳細を示すフローチャートである。

[図11]図11は、図9及び図10 A～図10 Cに示される変形例において作製可能な半導体の深さ方向に対するドーパント濃度分布の例を示す。

[図12]図12は、本開示の第3の実施形態に係るレーザドーピング装置の構成を概略的に示す

[図13]図13は、図12に示されるドーピング制御部によるドーピング制御の処理を示すフローチャートである。

[図14A]図14Aは、図13に示される照射条件パラメータを読み込む処理の詳細を示すフローチャートである。

[図14B]図14Bは、図13に示される可変スリット42aを制御する処理の詳細を示すフローチャートである。

[図15A]図15Aは、第3の実施形態において作製可能な半導体素子を模式的に示す。

[図15B]図15Bは、図15Aに示されるXVB-XVB線における断面図である。

[図16A]図16Aは、本開示の第4の実施形態に係るレーザドーピング装置において用いられる光学パルスストレッチャーの構成を示す。

[図16B]図16Bは、図16Aに示される光学パルスストレッチャーにおいて用いられる複数のビームスプリッタを、これらのビームスプリッタの反射面に垂直な方向から見た図である。

[図17]図17は、本開示の第5の実施形態に係るレーザドーピング装置の構成を概略的に示す。

[図18]図18は、図17に示されるレーザドーピング装置におけるトリガ信号とパルスレーザ光のタイミングチャートを示す。

[図19]図19は、図17に示されるドーピング制御部によるドーピング制御の処理を示すフローチャートである。

[図20A]図20Aは、図19に示される照射条件パラメータを読み込む処理の詳細を示すフローチャートである。

[図20B]図20Bは、図19に示されるパルス時間波形生成パラメータに設定する処理の詳細を示すフローチャートである。

[図21]図21は、本開示の第6の実施形態に係るレーザドーピング装置において、ドーパントを含む溶液としてホウ素を含む溶液を用いた場合に、4H-SiCにドーピングされたホウ素の濃度とドーピング深さとの関係を示す

グラフである。

[図22]図 2 2 は、上述のレーザ装置の具体的構成を示す。

[図23]図 2 3 は、図 2 2 に示されるレーザチャンバの内部構成と、パルスパワーモジュールの構成とを示す。

[図24]図 2 4 は、上述のビームホモジナイザ 4 1 に含まれるフライアイレンズ 4 1 a の例を示す斜視図である。

[図25]図 2 5 は、上述のビームホモジナイザ 4 1 に含まれるフライアイレンズの変形例を示す斜視図である。

[図26]図 2 6 は、制御部の概略構成を示すブロック図である。

実施形態

[0011] <内容>

1. 概要

2. 比較例に係るレーザドーピング装置

2. 1 レーザドーピング装置の構成

2. 2 レーザドーピング装置の動作

2. 3 課題

3. 光学パルスストレッチャーを含むレーザドーピング装置（第 1 の実施形態）

3. 1 構成

3. 2 動作

3. 3 光学パルスストレッチャーの詳細

3. 4 第 1 の実施形態の作用

4. パルス時間波形を変変するレーザドーピング装置（第 2 の実施形態）

4. 1 構成

4. 2 光学パルスストレッチャーの詳細

4. 3 ドーピング制御部の処理

4. 3. 1 メインフロー

4. 3. 2 S 1 1 0 の詳細

- 4. 3. 3 S 1 4 0 の詳細
- 4. 3. 4 S 1 7 0 の詳細
- 4. 4 ドーピング制御部の処理の変形例
 - 4. 4. 1 メインフロー
 - 4. 4. 2 S 1 1 0 a の詳細
 - 4. 4. 3 S 1 4 0 a の詳細
 - 4. 4. 4 S 1 7 0 a の詳細
- 5. 照射領域の形状及び大きさを可変するレーザドーピング装置（第3の実施形態）
 - 5. 1 構成
 - 5. 2 ドーピング制御部の処理
 - 5. 2. 1 メインフロー
 - 5. 2. 2 S 1 1 0 b の詳細
 - 5. 2. 3 S 1 8 0 の詳細
- 6. ビームスプリッタのバリエーション（第4の実施形態）
- 7. 複数のレーザ部を含むレーザドーピング装置（第5の実施形態）
 - 7. 1 構成及び動作
 - 7. 2 ドーピング制御部の処理
 - 7. 2. 1 メインフロー
 - 7. 2. 2 S 1 1 0 c の詳細
 - 7. 2. 3 S 1 4 0 c の詳細
 - 7. 3 作用
- 8. ホウ素を含む溶液を用いたレーザドーピング装置（第6の実施形態）
- 9. その他
 - 9. 1 レーザ装置の詳細
 - 9. 2 フライアイレンズの構成
 - 9. 3 制御部の構成

[0012] 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。

[0013] 1. 概要

本開示は、ドーパントを含む溶液中で紫外領域のパルスレーザ光を半導体材料に照射することによって、半導体材料へのドーピングを行うレーザドーピング装置又はレーザドーピング方法に関する。

[0014] 2. 比較例に係るレーザドーピング装置

2. 1 レーザドーピング装置の構成

図1は、比較例に係るレーザドーピング装置の構成を概略的に示す。レーザドーピング装置は、レーザシステム3と、ドーピング装置4とを備えていてもよい。

[0015] レーザシステム3は、レーザ装置2と、アッテネータ18とを含んでもよい。レーザ装置2は、紫外領域のパルスレーザ光を出力するエキシマレーザ装置であってもよい。パルスレーザ光の波長は、ドーピング装置4において用いられるドーパントを含む溶液を高い透過率で透過する波長であって、被照射物となる半導体材料の損傷が少ない波長であることが望ましい。例えば、レーザ装置2は、KrFまたはXeClをレーザ媒質とするレーザ装置であってもよい。出力されるパルスレーザ光のパルス幅は約50 nsであってもよい。KrFエキシマレーザ装置の場合、パルスレーザ光の波長は約248.4 nmでもよい。XeClエキシマレーザ装置の場合、パルスレーザ光の波長は約308 nmでもよい。

[0016] アッテネータ18は、レーザ装置2から出力されるパルスレーザ光の光路に配置され、2枚の部分反射ミラー18a及び18bと、これらの部分反射ミラーの回転ステージ18c及び18dと、を含んでもよい。2枚の部分反射ミラー18a及び18bは、パルスレーザ光の入射角度によって、透

過率が変化する光学素子であってもよい。

[0017] ドーピング装置4は、スリット42と、高反射ミラー43aと、転写光学系43dと、テーブル43fと、XYZステージ43gと、容器43hと、溶液供給システム46と、モニタ装置44と、を含んでいてもよい。スリット42は、アッテネータ18を通過したパルスレーザ光の光路に配置されていてもよい。スリット42は、互いに略直交する2軸を有するスリットであってもよい。スリット42は、パルスレーザ光のビーム断面のうちの光強度分布が均一な領域が通過するように配置されていてもよい。

[0018] 高反射ミラー43aは、レーザ装置2から出力された紫外領域のパルスレーザ光を高い反射率で反射し、可視光を透過させるダイクロイックミラーであってもよい。高反射ミラー43aは、スリット42を通過したパルスレーザ光を反射して転写光学系43dに入射させるように配置されていてもよい。転写光学系43dは、1つ又は複数の凸レンズを含む光学系でもよいし、1つ又は複数の凸レンズと1つ又は複数の凹レンズとを含む光学系であってもよい。また、転写光学系43dは、可視光と紫外領域の光の波長に対して、色収差補正をしたレンズであってもよい。たとえば、転写光学系43dは合成石英とフッ化カルシウムの材料で構成された複数のレンズを含んでいてもよい。

[0019] テーブル43fは、容器43hを支持していてもよい。容器43hは、ドーパントを含む溶液を内部に溜めることができるように構成されてもよい。この溶液は、例えば、ドーパントとしてアルミニウムを含む塩化アルミニウム水溶液、ドーパントとして窒素を含むアンモニア水溶液、ドーパントとしてリンを含むリン酸水溶液、あるいはその他のドーパントを含む溶液であってもよい。

[0020] 被照射物43eは、SiC、ダイヤモンド、GaN等のようなパワーデバイスに使用される半導体材料であってもよい。SiCの結晶構造は特に限定されないが、例えば、被照射物43eは4H-SiCであってもよい。4H-SiCは、4層で1周期となる六方晶構造を有するSiCであってもよい。

。被照射物 4 3 e は、容器 4 3 h に溜められた溶液に浸るように、容器 4 3 h の底に收容されてもよい。被照射物 4 3 e に対するパルスレーザ光の照射領域の表面は、容器 4 3 h に溜められた溶液の液面と略平行でもよい。少なくとも、被照射物 4 3 e のパルスレーザ光が照射される領域が、容器 4 3 h に溜められた溶液の液面より下方に位置してもよい。

[0021] 溶液供給システム 4 6 は、ポンプ 4 6 a と、溶液供給配管 4 6 b と、プレート 4 6 c と、ウインドウ 4 6 d と、溶液排出配管 4 6 e と、を含んでもよい。ポンプ 4 6 a の出力は、プレート 4 6 c に固定された溶液供給配管 4 6 b に接続されてもよい。溶液供給配管 4 6 b は、被照射物 4 3 e のパルスレーザ光が照射される領域に沿って溶液が流れるように、液面に対して傾斜した状態でプレート 4 6 c に固定されていてもよい。溶液供給配管 4 6 b は、溶液供給配管 4 6 b の出口が被照射物 4 3 e のパルスレーザ光が照射される領域に向けられていてもよい。プレート 4 6 c には、さらに、溶液の一部を排出する溶液排出配管 4 6 e が固定されていてもよい。溶液排出配管 4 6 e を介して排出された溶液は、必要に応じて精製された後、図示しないタンクに貯蔵されてもよい。このタンクは、ポンプ 4 6 a の入力に接続されてもよい。

X Y Z ステージ 4 3 g は、テーブル 4 3 f を支持していてもよい。X Y Z ステージ 4 3 g は、テーブル 4 3 f の位置を調整することにより、容器 4 3 h に收容された被照射物 4 3 e の位置を調整可能であってもよい。

[0022] ウインドウ 4 6 d は、プレート 4 6 c に固定され、被照射物 4 3 e を照射するパルスレーザ光の光路に配置されていてもよい。ウインドウ 4 6 d の材料は、エキシマレーザ光を透過する合成石英であってもよい。ウインドウ 4 6 d の下面は溶液に接してもよい。ウインドウ 4 6 d の上面は溶液の液面より上に位置してもよい。あるいは、ウインドウ 4 6 d の周囲をプレート 4 6 c が囲って、このプレート 4 6 c の上面が溶液の液面より上に位置することにより、ウインドウ 4 6 d の上面に溶液が流れ込まないようにしてもよい。

[0023] モニタ装置 4 4 は、ビームスプリッタ 4 4 a と、照明装置 4 4 b と、2 次元センサ 4 4 c と、を含んでいてもよい。ビームスプリッタ 4 4 a は、可視光を約 5 0 % 透過させ、約 5 0 % 反射させるハーフミラーであってもよい。照明装置 4 4 b は、可視光を発光するランプでもよい。

[0024] 転写光学系 4 3 d は、紫外領域の光によるスリット 4 2 の転写像が、ウィンドウ 4 6 d とドーパントを含む溶液とを介して、第 1 の所定位置に結像されるように構成されていてもよい。転写光学系 4 3 d は、第 1 の所定位置に被照射物 4 3 e の表面の位置が略一致する場合に、可視光による被照射物 4 3 e の表面の転写像が、高反射ミラー 4 3 a 及びビームスプリッタ 4 4 a を介して、第 2 の所定位置に結像されるように構成されていてもよい。第 2 の所定位置に 2 次元センサ 4 4 c の受光面の位置が略一致するように、2 次元センサ 4 4 c が配置されていてもよい。

[0025] 2. 2 レーザドーピング装置の動作

アッテネータ 1 8 に含まれる 2 枚の部分反射ミラー 1 8 a 及び 1 8 b は、パルスレーザ光の入射角度が互いに略等しくなるように、且つパルスレーザ光の透過率が所望の透過率となるように、回転ステージ 1 8 c 及び 1 8 d によって姿勢を制御されてもよい。これにより、レーザ装置 2 から出力されたパルスレーザ光は、所望のパルスエネルギーに減光されてアッテネータ 1 8 を通過し得る。

[0026] アッテネータ 1 8 を通過したパルスレーザ光は、直交する 2 軸のスリット 4 2 を通過し、高反射ミラー 4 3 a を経由して、転写光学系 4 3 d に入射してもよい。

一方、照明装置 4 4 b から出力された可視光の少なくとも一部は、ビームスプリッタ 4 4 a によって反射され、高反射ミラー 4 3 a を透過して、転写光学系 4 3 d、ウィンドウ 4 6 d 及びドーパントを含む溶液を介して、被照射物 4 3 e の表面を照明してもよい。

[0027] 転写光学系 4 3 d が、可視光による被照射物 4 3 e の表面の転写像を、2 次元センサ 4 4 c の受光面の位置に結像するように、X Y Z ステージ 4 3 g

が、テーブル 4 3 f の位置を調整してもよい。このような調整がなされた場合には、転写光学系 4 3 d は、紫外領域の光によるスリット 4 2 の転写像を、被照射物 4 3 e の表面に結像し得る。すなわち、パルスレーザ光がウインドウ 4 6 d とドーパントを含む溶液とを透過し、被照射物 4 3 e の表面に照射され得る。その結果、スリット 4 2 の像が転写された領域で、ドーパントが、被照射物 4 3 e の表面から深さ方向に拡散し得る。

[0028] 上述のように、ウインドウ 4 6 d の下面は溶液に接しており、ウインドウ 4 6 d の上面は溶液に接していなくてもよい。これにより、溶液供給システム 4 6 が生じさせる溶液の流れによって液面が揺れて、転写光学系 4 3 d による転写像がゆがんだり転写位置が変化したりすることが、抑制され得る。

また、ポンプ 4 6 a は、容器 4 3 h の内部で溶液の流れが形成されるように、流量を制御されてもよい。パルスレーザ光のエネルギーによって溶液中に気泡が生じた場合でも、溶液の流れにより、パルスレーザ光の照射領域から気泡を除去し得る。これにより、転写光学系 4 3 d の結像性能が気泡により低下することが抑制され得る。

[0029] 2. 3 課題

S i C を用いてパワーデバイスを構成する場合、不純物のドーピング深さは 1 0 0 n m 以上が望ましい。しかしながら、S i C に p 型ドーパントを 1 0 0 n m 以上の深さにまで拡散させることは困難であり得た。

[0030] 以下に説明される実施形態においては、この課題を解決するために、レーザ装置から出力されるパルスレーザ光の光路に、光学パルスストレッチャーなどのパルス時間波形調節装置を配置してもよい。パルス時間波形調節装置により、例えばパルス時間幅の長いパルスレーザ光を生成し、溶液中の被照射物 4 3 e の表面に照射してもよい。

[0031] 3. 光学パルスストレッチャーを含むレーザドーピング装置（第 1 の実施形態）

3. 1 構成

図 2 は、本開示の第 1 の実施形態に係るレーザドーピング装置の構成を概

略的に示す。第1の実施形態に係るレーザドーピング装置において、レーザシステム3aは、図1を参照しながら説明したレーザシステムの構成に加えて、光学パルスストレッチャー16と、パルス時間波形計測部19と、レーザシステム制御部31と、を備えていてもよい。また、第1の実施形態に係るレーザドーピング装置において、ドーピング装置4aは、図1を参照しながら説明したドーピング装置の構成に加えて、ドーピング制御部45を備えていてもよい。

[0032] 光学パルスストレッチャー16は、レーザ装置2とアッテネータ18との間のパルスレーザ光の光路に配置されてもよい。光学パルスストレッチャー16は、ビームスプリッタと、遅延光学系と、を含んでもよい。光学パルスストレッチャー16は、本開示におけるパルス時間波形調節装置に相当し得る。

[0033] パルス時間波形計測部19は、アッテネータ18とドーピング装置4aとの間のパルスレーザ光の光路に配置されてもよい。パルス時間波形計測部19は、ビームスプリッタ19aと、集光光学系19bと、光センサ19cとを含んでもよい。ビームスプリッタ19aは、アッテネータ18を通過したパルスレーザ光を高い透過率で透過させるとともに、パルスレーザ光の一部を集光光学系19bに向けて反射してもよい。集光光学系19bは、ビームスプリッタ19aによって反射された光を光センサ19cの感光面に集光してもよい。光センサ19cは、高速のフォトダイオード又はバイプラナ管であってもよい。

[0034] 3. 2 動作

ドーピング制御部45は、モニタ装置44の2次元センサ44cから画像データを受信し、この画像データのコントラストが大きくなるように、XYZステージ43gを制御してもよい。画像データのコントラストが最大となるようにXYZステージ43gが制御されたとき、被照射物43eの表面の像が転写光学系43dによって2次元センサ44cの受光面に転写されていてもよい。このようにXYZステージ43gが制御されたとき、スリット4

2の像が転写光学系43dによって被照射物43eの表面に転写され得る。

ドーピング制御部45は、被照射物43eにおけるパルスレーザ光のフルエンスが所定の値となるように、アッテネータ18を通過したパルスレーザ光の目標パルスエネルギー E_t のデータをレーザシステム制御部31に送信してもよい。

[0035] レーザシステム制御部31は、レーザ装置2に、レーザ装置2から出力されるパルスレーザ光の目標パルスエネルギー E_L1 を送信してもよい。次に、レーザシステム制御部31は、アッテネータ18を通過したパルスレーザ光の目標パルスエネルギー E_t が以下の式で得られる値となるように、アッテネータ18の透過率 T_2 を制御する信号を送信してもよい。

$$E_t = T_1 \cdot T_2 \cdot E_L1$$

ここで、 T_1 は光学パルスストレッチャー16の透過率であってもよい。

[0036] ドーピング制御部45は、被照射物43eに対するパルスレーザ光の照射領域とウインドウ46dとの間を溶液が流れるように、ポンプ46aを駆動してもよい。

ドーピング制御部45は、レーザシステム制御部31を介して、レーザ装置2に発光トリガ信号を送信してもよい。レーザ装置2に発光トリガ信号が入力されると、レーザ装置2から目標パルスエネルギー E_L1 付近のパルスエネルギーを有するパルスレーザ光が出力され得る。この出力されたパルスレーザ光は、光学パルスストレッチャー16に入射し、パルスストレッチされ得る。

[0037] パルスストレッチされたパルスレーザ光は、アッテネータ18によって目標パルスエネルギー E_t 付近のパルスエネルギーとなるように減光されてもよい。その後、パルスレーザ光は、パルス時間波形計測部19のビームスプリッタ19aによって、一部反射され、集光光学系19bを介して、光センサ19cに入射し得る。

[0038] レーザシステム制御部31は、光センサ19cからの信号を受信して、パルスレーザ光のパルス時間波形を計測してもよい。また、このパルス時間波

形を積分して、パルスエネルギーを計算して、目標パルスエネルギー E_t 付近のパルスエネルギーとなっているか確認してもよい。また、計測されたパルス時間波形のデータは、ドーピング制御部 45 に送信されてもよい。

[0039] パルス時間波形計測部 19 を通過したパルスレーザ光は、ドーピング装置 4a のスリット 42 に入射し得る。スリット 42 を通過したパルスレーザ光は、高反射ミラー 43a によって反射され、転写光学系 43d と、ウインドウ 46d と、溶液とを介して被照射物 43e に入射してもよい。これにより、溶液中のドーパントが、被照射物 43e の照射領域にドーピングされ得る。

[0040] 3. 3 光学パルスストレッチャーの詳細

図 3A は、図 2 に示される光学パルスストレッチャーの構成を示す。光学パルスストレッチャー 16 は、ビームスプリッタ 16y と、凹面ミラー 16a ~ 16h とを含んでもよい。

[0041] ビームスプリッタ 16y は、パルスレーザ光を高い透過率で透過させる基板を含んでもよい。この基板の第 1 の面 161 には減反射膜がコートされ、この基板の第 2 の面 162 には、部分反射膜がコートされていてもよい。ビームスプリッタ 16y は、ホルダ 16o に支持されてもよい。

凹面ミラー 16a ~ 16h は、遅延光学系を構成し得る。凹面ミラー 16a ~ 16h の各々は、互いに略等しい焦点距離 F を有する凹面ミラーであってもよい。焦点距離 F は、例えば、ビームスプリッタ 16y から凹面ミラー 16a までの距離に相当してもよい。

[0042] 図中の左側からビームスプリッタ 16y に入射するパルスレーザ光は、第 1 の面 161 を高い透過率で透過し、第 2 の面 162 の部分反射膜に入射し得る。第 2 の面 162 に入射したパルスレーザ光は、第 1 の光路と第 2 の光路に分岐され得る。すなわち、図中の左側からビームスプリッタ 16y に入射したパルスレーザ光の一部は透過し、第 1 の光路に進んで、第 1 の出力パルス P_1 となり得る。図中の左側からビームスプリッタ 16y に入射したパルスレーザ光の他の一部は反射され、第 2 の光路に進んで、凹面ミラー 16

aによって反射され得る。

[0043] 凹面ミラー16aによって反射されたパルスレーザ光は、凹面ミラー16d、16e、16h、16g、16f、16c、16bの順で反射されて、ビームスプリッタ16yに図中の上側から入射してもよい。図中の上側からビームスプリッタ16yに入射したパルスレーザ光の一部は反射され、上記第1の光路に進んで第2の出力パルスP2となり得る。図中の上側からビームスプリッタ16yに入射したパルスレーザ光の他の一部はビームスプリッタ16yを透過して再び上記第2の光路に進み得る。

[0044] 図中の左側からビームスプリッタ16yに入射して透過した第1の出力パルスP1と、図中の上側からビームスプリッタ16yに入射して反射された第2の出力パルスP2とが略同一の光路軸で、光学パルスストレッチャー16から図中の右側に向けて出力され得る。凹面ミラー16a～16hを経由した遅延光路の光路長は、凹面ミラー16a～16hの各々の焦点距離Fの16倍に相当し得る。この場合、第1の出力パルスP1に対する第2の出力パルスP2の遅延時間は、光速をcとしたとき、 $16F/c$ となり得る。また、ビームスプリッタ16yの第2の面162におけるパルスレーザ光のビーム断面の像が、遅延光路を通して再び第2の面162に入射するときに、第2の面に正転して結像し得る。

[0045] 図中の上側からビームスプリッタ16yに入射して透過したパルスレーザ光は、再び凹面ミラー16aによって反射され、上述と同じ遅延光路を通して、再びビームスプリッタ16yに図中の上側から入射してもよい。再びビームスプリッタ16yに図中の上側から入射したパルスレーザ光の一部は反射されて、光学パルスストレッチャー16から図中の右側に向けて出力され得る。これを繰り返すことにより、第1及び第2の出力パルスP1及びP2と略同一の光路軸で、図示しない第3及び第4の出力パルスが出力され、パルスレーザ光がパルスストレッチされてもよい。

[0046] なお、図3Aにおいては、8枚の凹面ミラーを用いる例を示したが、本開示はこの例に限定されることなく、さらに多い数の凹面ミラーが同様に配置

されてもよい。あるいは、8枚より少ない数たとえば4枚の凹面ミラーが配置されてもよい。

[0047] 図3Bは、光学パルスストレッチャーを用いない場合と、光学パルスストレッチャーを用いた場合のパルスレーザ光のパルス時間波形を示すグラフである。光学パルスストレッチャーの遅延光路の光路長は7mとし、ビームスプリッタ16yの反射率は62%とした。光学パルスストレッチャーを用いない場合、パルスレーザ光のパルス時間幅 ΔT_{TIS} は約50nsであった。光学パルスストレッチャーを用いた場合、パルスレーザ光のパルス時間幅 ΔT_{TIS} は約80nsとなった。ここで、パルスレーザ光のパルス時間幅 ΔT_{TIS} は以下の式で算出されるものでもよい。

$$\Delta T_{TIS} = [\int I(t) dt]^2 / \int I(t)^2 dt$$

[0048] 3.4 第1の実施形態の作用

以上のように、パルスストレッチされたパルスレーザ光を、ドーパントを含む溶液中で半導体材料の被照射物43eに照射することにより、パルスストレッチしない場合よりもドーピング深さを大きくし得る。

[0049] 図4Aは、4H-SiCにドーピングされたアルミニウムの濃度とドーピング深さの関係を示すグラフである。ドーパントを含む溶液としては、飽和濃度の塩化アルミニウム水溶液を用いた。パルスレーザ光としては、KrFエキシマレーザ光を用い、1パルスあたりのフルエンスは4.5 J/cm²であり、繰り返し周波数は100Hzであり、1箇所への照射ショット数は10パルスであった。パルス時間波形及びパルス時間幅は、光学パルスストレッチャーを用いない場合と、光学パルスストレッチャーを用いた場合のいずれも、図3Bを参照しながら説明した通りである。

[0050] 4H-SiCにドーピングされたアルミニウムの濃度の測定は、二次イオン質量分析法(SIMS)で実施した。

図4Aに示されるように、光学パルスストレッチャーを用いて、パルスレーザ光のパルス時間幅を50nsから80nsに伸長したことにより、アルミニウムのドーピング深さが40nmから120nmに改善した。

図4 Aにおいては、4 H - S i Cにアルミニウムをドーピングした場合について説明したが、本開示はこれに限定されない。ダイヤモンドやG a Nへのドーピングであっても、塩化アルミニウム水溶液中で照射するパルスレーザー光のパルス時間幅を伸長することによって、ドーピング深さが大きくなることが期待できる。

[0051] 図4 Bは、4 H - S i Cのn型基板の一部に、アルミニウムをドーピングしてp型層を形成した場合のダイオード特性を示すグラフである。横軸は、p型層に印加した電圧からn型基板に印加した電圧を減算した値を示す。縦軸は電流を示す。横軸の値が0以上であるので、図4 Bは、順方向バイアスの特性を示す。

[0052] 図4 Bに示されるように、光学パルスストレッチャーを用いないでドーピングした場合、順方向の電流が流れ始める電圧であるオン電圧は、約1 Vであった。これに対し、光学パルスストレッチャーを用いてドーピングした場合、オン電圧は約2 Vとなった。一般にS i Cを用いてp n接合を形成した場合、オン電圧が2 V～3 Vとなることが知られている。従って、図4 Bに示される結果は、光学パルスストレッチャーを用いてp型層を形成することにより、p n接合が形成され、半導体素子として使用可能であることを証明し得る。

[0053] 4. パルス時間波形を可変するレーザドーピング装置（第2の実施形態）

4. 1 構成

図5は、本開示の第2の実施形態に係るレーザドーピング装置の構成を概略的に示す。第2の実施形態に係るレーザドーピング装置において、レーザシステム3 bは、図2を参照しながら説明した光学パルスストレッチャー16の代わりに、光学パルスストレッチャー16 αを備えていてもよい。また、第2の実施形態に係るレーザドーピング装置において、ドーピング装置4 bは、図2を参照しながら説明したドーピング装置の構成に加えて、ビームホモジナイザ4 1を備えていてもよい。

[0054] ビームホモジナイザ4 1は、パルス時間波形計測部19とスリット4 2と

の間のパルスレーザ光の光路に配置されてもよい。ビームホモジナイザ4 1は、フライアイレンズ4 1 aと、コンデンサ光学系4 1 bと、を含んでもよい。コンデンサ光学系4 1 bは、その後側焦点の位置がスリット4 2の位置と略一致するように配置されてもよい。フライアイレンズ4 1 aは、フライアイレンズ4 1 aに含まれる複数のレンズの前側焦点を含む焦点面の位置とコンデンサ光学系4 1 bの前側焦点面の位置とが略一致するように配置されてもよい。

[0055] ドーピング装置4 bに入射したパルスレーザ光は、ビームホモジナイザ4 1によって、スリット4 2をケーラー照明し得る。その結果、パルスレーザ光の光強度分布が均一化され得る。

[0056] 4. 2 光学パルスストレッチャーの詳細

図6 Aは、図5に示される光学パルスストレッチャーの構成を示す。この光学パルスストレッチャー1 6 αは、図3 Aを参照しながら説明したビームスプリッタ1 6 yの代わりに、ビームスプリッタ1 6 nを含んでもよい。また、凹面ミラー1 6 a～1 6 hのうち、凹面ミラー1 6 c、1 6 d、1 6 e、1 6 fは、それぞれ、回転ステージ1 6 i、1 6 j、1 6 k、1 6 mに支持されてもよい。

[0057] ビームスプリッタ1 6 nの第1の面1 6 1には減反射膜がコートされ、第2の面1 6 2には、矢印B方向に反射率分布を有する部分反射膜がコートされていてもよい。ビームスプリッタ1 6 nは、ホルダ1 6 oを介してアーム1 6 pに支持されてもよい。アーム1 6 pは、移動テーブル1 6 qに支持され、移動テーブル1 6 qは、1軸ステージ1 6 rに支持されてもよい。

[0058] 図6 D及び図6 Eは、ビームスプリッタ1 6 n、ホルダ1 6 o、アーム1 6 p、移動テーブル1 6 q及び1軸ステージ1 6 rを、ビームスプリッタ1 6 nの反射面に垂直な方向から見た図である。図6 B、図6 C及び図6 Eは、ビームスプリッタ1 6 n等を図6 A及び図6 Dと異なる位置に移動させた状態を示す。1軸ステージ1 6 rは、ビームスプリッタ1 6 n、ホルダ1 6 o、アーム1 6 p及び移動テーブル1 6 qを、矢印B方向に往復移動できる

ように構成されてもよい。1軸ステージ16rは、レーザシステム制御部31（図5）によって制御されてもよい。これにより、ビームスプリッタ16nは、パルスレーザ光の入射角度を維持した状態で、矢印B方向に往復移動できるように構成されてもよい。

[0059] 図6Aを再び参照し、回転ステージ16i、16j、16k、16mは、それぞれ凹面ミラー16c、16d、16e、16fを紙面の面内で回転させ、それぞれの姿勢を制御できるように構成されてもよい。回転ステージ16i、16j、16k、16mは、レーザシステム制御部31（図5）によって制御されてもよい。

[0060] 凹面ミラー16c、16d、16e、16fの姿勢が図6Aに示される状態のとき、光学パルスストレッチャー16αにパルスレーザ光が入射したときのパルスレーザ光の光路は、図3Aを参照しながら説明したものと同様でよい。

[0061] 図6Bは、凹面ミラー16c、16d、16e、16fの姿勢が図6Aと異なる状態を示す。凹面ミラー16c、16d、16e、16fの姿勢が図6Bに示される状態のとき、凹面ミラー16aによって反射されたパルスレーザ光は、凹面ミラー16d、16e、16f、16c、16bの順で反射されてもよい。すなわち、凹面ミラー16h及び16gをスキップしてもよい。この場合の遅延光路の光路長は、凹面ミラー16a～16hの各々の焦点距離Fの約12倍に相当し得る。

[0062] 図6Cは、凹面ミラー16c、16d、16e、16fの姿勢が図6A及び図6Bと異なる状態を示す。凹面ミラー16c、16d、16e、16fの姿勢が図6Cに示される状態のとき、凹面ミラー16aによって反射されたパルスレーザ光は、凹面ミラー16d、16c、16bの順で反射されてもよい。すなわち、凹面ミラー16e、16h、16g及び16fをスキップしてもよい。この場合の遅延光路の光路長は、凹面ミラー16a～16hの各々の焦点距離Fの約8倍に相当し得る。

[0063] このように、凹面ミラー16c、16d、16e、16fの姿勢によって

、遅延光路の光路長を、 $8F$ 、 $12F$ 及び $16F$ と可変することができる。これらの場合のいずれにおいても、ビームスプリッタ $16n$ の第2の面 162 に入射するパルスレーザ光のビーム断面の転写像が、ビームスプリッタ $16n$ の第2の面 162 に結像し得る。遅延光路の光路長を変更することにより、第1の出力パルス $P1$ に対する第2の出力パルス $P2$ や上述の第3、第4の出力パルスの遅延時間を変更できるので、光学パルスストレッチャー 16α から出力されるパルスレーザ光の時間波形を変更し得る。

[0064] ビームスプリッタ $16n$ の位置を1軸ステージ $16r$ が矢印B方向に往復移動させることによって、ビームスプリッタ $16n$ におけるパルスレーザ光の反射率を変更することができる。ビームスプリッタ $16n$ におけるパルスレーザ光の反射率を変更することにより、第1の出力パルス $P1$ に対する第2の出力パルス $P2$ や第3、第4の出力パルスの強度比を変更できるので、光学パルスストレッチャー 16α から出力されるパルスレーザ光のパルス時間波形を変更し得る。

[0065] 以上のように、光学パルスストレッチャー 16α に含まれるビームスプリッタの反射率と遅延光路の光路長とを変化させることによって、第1～第4の出力パルスのパルス時間間隔や、第1～第4の出力パルスの光強度比を変更し得る。

他の点については、図2及び図3Aを参照しながら説明したレーザドーピング装置と同様でよい。

[0066] 4. 3 ドーピング制御部の処理

4. 3. 1 メインフロー

図7は、図5に示されるドーピング制御部によるドーピング制御の処理を示すフローチャートである。ドーピング制御部45は、以下の処理により、所望のパルス時間波形を有するパルスレーザ光を用いてドーピングを行ってもよい。

[0067] まず、S100において、ドーピング制御部45は、パルス時間波形生成パラメータのデータを受信したか否かを判定してもよい。パルス時間波形生

成パラメータのデータは、例えば、オペレータが入力したものを受信してもよいし、図示しないコンピュータシステムからネットワークを通じて受信してもよい。パルス時間波形生成パラメータは、パルス時間波形を生成するために必要なパラメータであって、この場合は、ビームスプリッタ 16 n の反射率の目標値と、光学パルスストレッチャー 16 α の遅延光路の光路長の目標値と、を含んでもよい。

[0068] パルス時間波形生成パラメータのデータを受信した場合は、ドーピング制御部 45 は、処理を S 110 に進めてもよい。パルス時間波形生成パラメータのデータを受信していない場合は、ドーピング制御部 45 は、パルス時間波形生成パラメータのデータを受信するまで待機してもよい。

[0069] パルス時間波形生成パラメータのデータを受信した場合 (S 100 ; YES)、S 110 において、ドーピング制御部 45 は、受信したパルス時間波形生成パラメータを読み込んでもよい。この処理の詳細については、図 8 A を参照しながら後述する。

[0070] 次に、S 120 において、ドーピング制御部 45 は、ドーパントを含む溶液を被照射物の表面に供給開始するように、ポンプ 46 a (図 5) を制御してもよい。

[0071] 次に、S 130 において、ドーピング制御部 45 は、2次元センサ 44 c (図 5) の画像を参照し、所望の照射領域に位置決めするように XYZ ステージ 43 g を制御してもよい。

次に、S 140 において、ドーピング制御部 45 は、受信したパルス時間波形生成パラメータにレーザシステム 3 b を設定してもよい。すなわち、ドーピング制御部 45 は、光学パルスストレッチャー 16 α の遅延光路の光路長の目標値と、ビームスプリッタ 16 n の反射率の目標値とを、レーザシステム制御部 31 に送信してもよい。この処理の詳細については、図 8 B を参照しながら後述する。

[0072] 次に、S 150 において、ドーピング制御部 45 は、フルーエンスの目標値 F とショット数 S のデータを受信したか否かを判定してもよい。フルーエ

ンスの目標値Fとショット数Sのデータは、例えば、オペレータが入力したものを受信してもよいし、図示しないコンピュータシステムからネットワークを通じて受信してもよい。

[0073] フルーエンスの目標値Fとショット数Sのデータを受信した場合は、ドーピング制御部45は、処理をS160に進めてもよい。フルーエンスの目標値Fとショット数Sのデータを受信していない場合は、ドーピング制御部45は、フルーエンスの目標値Fとショット数Sのデータを受信するまで待機してもよい。

[0074] フルーエンスの目標値Fとショット数Sのデータを受信した場合（S150；YES）、S160において、ドーピング制御部45は、受信したフルーエンスの目標値Fとショット数Sのデータを読み込んでもよい。

[0075] 次に、S170において、ドーピング制御部45は、フルーエンスが目標値Fに近づくように、目標パルスエネルギーを設定してもよい。ドーピング制御部45は、この目標パルスエネルギーのデータを、レーザシステム制御部31に送信してもよい。この処理の詳細については、図8Cを参照しながら後述する。

[0076] 次に、S190において、ドーピング制御部45は、S個の発光トリガ信号をレーザシステム制御部31に出力してもよい。これにより、レーザシステム3bから、S個のパルスを含むパルスレーザ光が生成されてもよい。これらのパルスレーザ光は、被照射物43eに照射されてもよい。

[0077] 次に、S200において、ドーピング制御部45は、パルス時間波形生成パラメータのデータが変更されたか否かを判定してもよい。パルス時間波形生成パラメータのデータが変更された場合（S200；YES）、ドーピング制御部45は、処理を上述のS100に戻して、パルス時間波形生成パラメータのデータを再度受信してもよい。

[0078] パルス時間波形生成パラメータのデータが変更されない場合（S200；NO）、ドーピング制御部45は、処理をS210に進めてもよい。S210において、ドーピング制御部45は、レーザ照射を中止するか否かを判定

してもよい。レーザ照射を中止しない場合（S 2 1 0 ; N O）、ドーピング制御部 4 5 は、処理を上述の S 1 3 0 に戻して X Y Z ステージ 4 3 g の制御や発光トリガ信号の出力等を行ってもよい。レーザ照射を中止する場合（S 2 1 0 ; Y E S）、ドーピング制御部 4 5 は、本フローチャートの処理を終了してもよい。

[0079] 4. 3. 2 S 1 1 0 の詳細

図 8 A は、図 7 に示されるパルス時間波形生成パラメータを読み込む処理の詳細を示すフローチャートである。図 8 A に示される処理は、図 7 に示される S 1 1 0 のサブルーチンとして、ドーピング制御部 4 5 によって行われてもよい。

[0080] S 1 1 2 において、ドーピング制御部 4 5 は、ビームスプリッタ 1 6 n の反射率の目標値 R と、遅延光路の光路長の目標値 L とを読み込んでもよい。

S 1 1 2 の後、ドーピング制御部 4 5 は、本フローチャートの処理を終了して、メインフローに戻ってもよい。

[0081] 4. 3. 3 S 1 4 0 の詳細

図 8 B は、図 7 に示されるパルス時間波形生成パラメータに設定する処理の詳細を示すフローチャートである。図 8 B に示される処理は、図 7 に示される S 1 4 0 のサブルーチンとして、ドーピング制御部 4 5 によって行われてもよい。

[0082] まず、S 1 4 1 において、ドーピング制御部 4 5 は、ビームスプリッタ 1 6 n の反射率の目標値 R をレーザシステム制御部 3 1 に送信してもよい。これにより、レーザシステム制御部 3 1 は、ビームスプリッタ 1 6 n の反射率が目標値に近づくように、ビームスプリッタ 1 6 n を移動させる 1 軸ステージ 1 6 r を制御してもよい。

[0083] 次に、S 1 4 2 において、ドーピング制御部 4 5 は、遅延光路の光路長の目標値 L をレーザシステム制御部 3 1 に送信してもよい。これにより、レーザシステム制御部 3 1 は、光学パルスストレッチャー 1 6 α の遅延光路の光路長が目標値に近づくように、光学パルスストレッチャー 1 6 α の凹面ミラ

ー 1 6 c、1 6 d、1 6 e、1 6 f をそれぞれ回転させる回転ステージ 1 6 i、1 6 j、1 6 k、1 6 m を制御してもよい。

S 1 4 2 の後、ドーピング制御部 4 5 は、本フローチャートの処理を終了して、メインフローに戻ってもよい。

[0084] 4. 3. 4 S 1 7 0 の詳細

図 8 C は、図 7 に示される目標パルスエネルギーを設定する処理の詳細を示すフローチャートである。図 8 C に示される処理は、図 7 に示される S 1 7 0 のサブルーチンとして、ドーピング制御部 4 5 によって行われてもよい。

[0085] まず、S 1 7 1 において、ドーピング制御部 4 5 は、受信したフルーエンスの目標値 F に基づいて、目標パルスエネルギー E_t を計算してもよい。目標パルスエネルギー E_t は、以下のように計算されてもよい。

$$E_t = F \cdot A / T_t$$

ここで、 A は、被照射物 4 3 e に結像されるスリット 4 2 の像の面積でもよい。 T_t は、パルス時間波形計測部 1 9 を介してレーザシステム 3 b から出力されるパルスレーザ光の、被照射物 4 3 e に照射されるまでの光路における透過率でもよい。

[0086] 次に、S 1 7 2 において、ドーピング制御部 4 5 は、レーザシステム制御部 3 1 に目標パルスエネルギー E_t を送信してもよい。これにより、レーザシステム制御部 3 1 は、レーザ装置 2 が出力すべきパルスレーザ光の目標パルスエネルギー $E_L 1$ を計算し、この計算結果に基づいてレーザ装置 2 を制御してもよい。さらに、レーザシステム制御部 3 1 は、目標パルスエネルギー E_t に基づいて、アッテネータ 1 8 の透過率 T_2 の目標値を計算してもよい。この目標値は、アッテネータ 1 8 の透過率 T_2 に関して以下の式が成り立つように、計算されてもよい。

$$T_2 = E_t / (T_1 \cdot E_L 1)$$

ここで、 T_1 は光学パルスストレッチャー 1 6 α の透過率でもよい。レーザシステム制御部 3 1 は、アッテネータ 1 8 の透過率 T_2 の目標値の計算結果

に基づいて、アッテネータ 18 を制御してもよい。これにより、レーザシステム 3 b から出力されるパルスレーザ光のパルスエネルギーは、目標パルスエネルギー E_t に近づき得る。

[0087] S 1 7 2 の後、ドーピング制御部 4 5 は、本フローチャートの処理を終了して、メインフローに戻ってもよい。

[0088] 4. 4 ドーピング制御部の処理の変形例

4. 4. 1 メインフロー

図 9 は、図 5 に示されるドーピング制御部によるドーピング制御の処理の変形例を示すフローチャートである。ドーピング制御部 4 5 は、以下の処理により、複数の照射条件によるドーピングを行ってもよい。

[0089] ドーピング制御部 4 5 は、S 1 0 0 a 及び S 1 1 0 a において、複数の組み合わせの照射条件パラメータを受信し、読み込んでもよい。ドーピング制御部 4 5 は、N m a x 通りの組み合わせの照射条件パラメータを受信し、読み込んでもよい。照射条件パラメータは、上述のパルス時間波形生成パラメータの他に、フルエンスの目標値と、ショット数とを含んでもよい。

S 1 1 0 a の処理の詳細については図 1 0 A を参照しながら後述するが、その他の点は図 7 を参照しながら説明した S 1 0 0 及び S 1 1 0 と同様でよい。次の S 1 2 0 及び S 1 3 0 の処理は、図 7 を参照しながら説明したものと同様でよい。

[0090] 次に、S 1 3 5 において、ドーピング制御部 4 5 は、番号 N の値を 1 にセットしてもよい。

次に、S 1 4 0 a において、ドーピング制御部 4 5 は、N 番目のパルス時間波形生成パラメータにレーザシステム 3 b を設定してもよい。すなわち、ドーピング制御部 4 5 は、光学パルスストレッチャー 1 6 a の遅延光路の光路長の N 番目の目標値 L_N と、ビームスプリッタ 1 6 n の反射率の N 番目の目標値 R_N とを、レーザシステム制御部 3 1 に送信してもよい。この処理の詳細については、図 1 0 B を参照しながら後述する。

[0091] 次に、S 1 7 0 a において、ドーピング制御部 4 5 は、フルエンスが N

番目の目標値 F_N に近づくように、目標パルスエネルギーを設定してもよい。ドーピング制御部 45 は、この目標パルスエネルギーのデータを、レーザシステム制御部 31 に送信してもよい。この処理の詳細については、図 10C を参照しながら後述する。

次に、S 190 a において、ドーピング制御部 45 は、 S_N 個の発光トリガ信号をレーザシステム制御部 31 に出力してもよい。これにより、レーザシステム 3 b から、 S_N 個のパルスを含むパルスレーザ光が生成されてもよい。これらのパルスレーザ光は、被照射物 43 e の表面に照射されてもよい。

[0092] 次に、S 195 において、ドーピング制御部 45 は、番号 N の値が N_{max} 以上であるか否かを判定してもよい。

番号 N の値が N_{max} 以上ではない場合 (S 195 ; NO) ドーピング制御部 45 は、S 196 において、番号 N の値に 1 を加えて、番号 N の値を更新してもよい。S 196 の後、ドーピング制御部 45 は、処理を上述の S 140 a に戻してもよい。

番号 N の値が N_{max} 以上である場合 (S 195 ; YES) ドーピング制御部 45 は、番号 $N = 1$ から番号 $N = N_{max}$ までのすべての照射条件パラメータについて発光トリガ信号を出力したことになるので、処理を S 200 a に進めてもよい。

[0093] 次に、S 200 a において、ドーピング制御部 45 は、複数通りの照射条件パラメータのデータが変更されたか否かを判定してもよい。複数通りの照射条件パラメータのデータが変更された場合 (S 200 a ; YES)、ドーピング制御部 45 は、処理を上述の S 100 a に戻して、複数通りの照射条件パラメータのデータを再度受信してもよい。

複数通りの照射条件パラメータのデータが変更されない場合 (S 200 a ; NO)、ドーピング制御部 45 は、処理を S 210 に進めてもよい。

S 210 及びその後の処理は、図 7 を参照しながら説明したものと同様でよい。

[0094] 4. 4. 2 S 110 a の詳細

図10Aは、図9に示される照射条件パラメータを読み込む処理の詳細を示すフローチャートである。図10Aに示される処理は、図9に示されるS110aのサブルーチンとして、ドーピング制御部45によって行われてもよい。

[0095] まず、S111aにおいて、ドーピング制御部45は、番号Nの値を1にセットしてもよい。

次に、S112aにおいて、ドーピング制御部45は、ビームスプリッタ16nの反射率のN番目の目標値 R_N と、光学パルスストレッチャー16αの遅延光路の光路長のN番目の目標値 L_N とを読み込んでもよい。

次に、S113aにおいて、ドーピング制御部45は、フルエンスのN番目の目標値 F_N と、N番目のショット数 S_N と、を読み込んでもよい。

[0096] 次に、S115aにおいて、ドーピング制御部45は、番号Nの値が N_{max} 以上であるか否かを判定してもよい。

番号Nの値が N_{max} 以上ではない場合（S115a；NO）、ドーピング制御部45は、S116aにおいて、番号Nの値に1を加えて、番号Nの値を更新してもよい。S116aの後、ドーピング制御部45は、処理を上記のS112aに戻してもよい。

番号Nの値が N_{max} 以上である場合（S115a；YES）、ドーピング制御部45は、番号N=1から番号N= N_{max} までのすべての照射条件パラメータを受信したことになるので、本フローチャートの処理を終了して、メインフローに戻ってもよい。

図10Aに示される処理に限らず、ドーピング制御部45は、 N_{max} 通りの照射条件パラメータをテーブルデータとして一度に読み込んでもよい。

[0097] 4. 4. 3 S140aの詳細

図10Bは、図9に示されるパルス時間波形生成パラメータに設定する処理の詳細を示すフローチャートである。図10Bに示される処理は、図9に示されるS140aのサブルーチンとして、ドーピング制御部45によって行われてもよい。

[0098] まず、S 1 4 1 aにおいて、ドーピング制御部4 5は、ビームスプリッタ1 6 nの反射率のN番目の目標値 R_N をレーザシステム制御部3 1に送信してもよい。これにより、レーザシステム制御部3 1は、ビームスプリッタ1 6 nの反射率がN番目の目標値 R_N に近づくように、ビームスプリッタ1 6 nを移動させる1軸ステージ1 6 rを制御してもよい。

[0099] 次に、S 1 4 2 aにおいて、ドーピング制御部4 5は、遅延光路の光路長のN番目の目標値 L_N をレーザシステム制御部3 1に送信してもよい。これにより、レーザシステム制御部3 1は、光学パルスストレッチャー1 6 α の遅延光路の光路長がN番目の目標値 L_N に近づくように、光学パルスストレッチャー1 6 α の凹面ミラー1 6 c、1 6 d、1 6 e、1 6 fをそれぞれ回転させる回転ステージ1 6 i、1 6 j、1 6 k、1 6 mを制御してもよい。

S 1 4 2 aの後、ドーピング制御部4 5は、本フローチャートの処理を終了して、メインフローに戻ってもよい。

[0100] 4. 4. 4 S 1 7 0 aの詳細

図1 0 Cは、図9に示される目標パルスエネルギーを設定する処理の詳細を示すフローチャートである。図1 0 Cに示される処理は、図9に示されるS 1 7 0 aのサブルーチンとして、ドーピング制御部4 5によって行われてもよい。

[0101] まず、S 1 7 1 aにおいて、ドーピング制御部4 5は、受信したフルエンスのN番目の目標値 F_N に基づいて、N番目の目標パルスエネルギー E_t を計算してもよい。N番目の目標パルスエネルギー E_t の計算は、図8 Cを参照しながら説明したものと同様でよい。

[0102] 次に、S 1 7 2 aにおいて、ドーピング制御部4 5は、レーザシステム制御部3 1にN番目の目標パルスエネルギー E_t を送信してもよい。N番目の目標パルスエネルギー E_t を受信したレーザシステム制御部3 1の動作は、図8 Cを参照しながら説明したものと同様でよい。

[0103] S 1 7 2 aの後、ドーピング制御部4 5は、本フローチャートの処理を終了して、メインフローに戻ってもよい。

[0104] 図11は、図9及び図10A～図10Cに示される変形例において作製可能な半導体の深さ方向に対するドーパント濃度分布の例を示す。この変形例においては、同じ照射領域に、異なるパルス波形で異なるフルエンス及びショット数の照射を行うことにより、深さ方向に異なるドーパント濃度分布を有する半導体を作製し得る。例えば、番号N=1の照射条件パラメータは、ドーピング深さが浅く、ドーパント濃度が高くなるような条件であってもよい。反対に、番号N=3の照射条件パラメータは、ドーピング深さが深く、ドーパント濃度が低くなるような条件であってもよい。番号N=2の照射条件パラメータは、ドーピング深さとドーパント濃度がそれぞれ番号N=1及び番号N=3の照射条件パラメータの間であってもよい。ドーピング深さは、パルス時間幅によって主に制御されてもよい。ドーパント濃度は、フルエンスやショット数によって主に制御されてもよい。

[0105] 5. 照射領域の形状及び大きさを可変するレーザドーピング装置（第3の実施形態）

5. 1 構成

図12は、本開示の第3の実施形態に係るレーザドーピング装置の構成を概略的に示す。第3の実施形態に係るレーザドーピング装置において、ドーピング装置4cは、図5を参照しながら説明したスリット42の代わりに、可変スリット42aを備えていてもよい。レーザシステム3b及びその他の構成は、図5を参照しながら説明したものと同様でよい。

[0106] 可変スリット42aは、互いに略直交する2軸を有するスリットであり、この2軸のスリット幅をそれぞれ変更可能に構成されていてもよい。スリット幅は、ドーピング制御部45から出力される制御信号によって制御されてもよい。ビームホモジナイザ41による均一照明の範囲は、可変スリット42aの2軸の最大幅で規定される領域よりも大きいことが望ましい。

[0107] 5. 2 ドーピング制御部の処理

5. 2. 1 メインフロー

図13は、図12に示されるドーピング制御部によるドーピング制御の処

理を示すフローチャートである。図 13 に示される処理は、照射条件パラメータとして、パルス時間波形生成パラメータと、フルエンスと、ショット数だけでなく、可変スリット 42a のスリット幅を含む点で、図 9 を参照しながら説明した処理と異なってもよい。

[0108] ドーピング制御部 45 は、図 9 を参照しながら説明した S 110a の代わりに、S 110b に従って、複数の組み合わせの照射条件パラメータを読み込んでもよい。この処理の詳細については、図 14A を参照しながら後述するが、S 110b において、照射条件パラメータは、可変スリット 42a のスリット幅の目標値を含んでもよい。可変スリット 42a のスリット幅は、互いに略直交する 2 軸のそれぞれのスリット幅であってもよい。

[0109] また、ドーピング制御部 45 は、図 9 を参照しながら説明した S 170a と S 190a との間において、可変スリット 42a のスリット幅が N 番目の目標値 D_N に近づくように、可変スリット 42a を制御してもよい (S 180) 。この処理の詳細については、図 14B を参照しながら後述する。

その他の処理は、図 9 を参照しながら説明したものと同様でよい。

[0110] 5. 2. 2 S 110b の詳細

図 14A は、図 13 に示される照射条件パラメータを読み込む処理の詳細を示すフローチャートである。図 14A に示される処理は、図 13 に示される S 110b のサブルーチンとして、ドーピング制御部 45 によって行われてもよい。

[0111] まず、S 111a から S 113a までの処理は、図 10A を参照しながら説明したものと同様でよい。

次に、S 114b において、ドーピング制御部 45 は、可変スリット 42a のスリット幅の N 番目の目標値 D_N を読み込んでもよい。

その後の処理は、図 10A を参照しながら説明したものと同様でよい。

[0112] 5. 2. 3 S 180 の詳細

図 14B は、図 13 に示される可変スリット 42a を制御する処理の詳細を示すフローチャートである。図 14B に示される処理は、図 13 に示され

るS180のサブルーチンとして、ドーピング制御部45によって行われてもよい。

S181において、ドーピング制御部45は、可変スリット42aのスリット幅がN番目の目標値 D_N に近づくように、可変スリット42aを制御してもよい。

S181の後、ドーピング制御部45は、本フローチャートの処理を終了して、メインフローに戻ってもよい。

[0113] 図15Aは、第3の実施形態において作製可能な半導体素子を模式的に示す。図15Bは、図15Aに示されるXVB-XVB線における断面図である。これらの図において、各種コンタクト電極、絶縁膜、配線等の図示は省略されている。これらの図に示される被照射物43eは、4H-SiCのn型基板の一部に、アルミニウムをドーピングして複数のp型層431及び432を形成したものであってもよい。p型層431は比較的濃度が低く、ドーピング深さが深く、ドーピング領域が狭いp型層であってもよい。p型層432は比較的濃度が高く、ドーピング深さが浅く、ドーピング領域が広いp型層であってもよい。

[0114] このように、第3の実施形態によれば、パルス時間波形生成パラメータと、フルエンスの目標値と、ショット数と、スリット幅の目標値とを別々に制御することにより、ドーパント濃度と、ドーピング深さと、ドーピング領域とを別々に制御し得る。

[0115] 第3の実施形態においては、可変スリット42aを制御することによってドーピング領域を可変したが、本開示はこれに限定されない。可変スリット42aの代わりに、所望のパターンが形成されたマスクを配置し、このマスクを交換可能としてもよい。そして、マスクの交換と照射条件パラメータの制御とをそれぞれ行うことにより、被照射物の深さ方向と面方向の両方で所望の濃度分布を有する半導体素子を作製することができる。

[0116] 6. ビームスプリッタのバリエーション（第4の実施形態）

図16Aは、本開示の第4の実施形態に係るレーザドーピング装置におい

て用いられる光学パルスストレッチャーの構成を示す。図 1 6 B は、図 1 6 A に示される光学パルスストレッチャーにおいて用いられる複数のビームスプリッタを、これらのビームスプリッタの反射面に垂直な方向から見た図である。

[0117] 第 4 の実施形態において用いられる光学パルスストレッチャー 1 6 z は、複数のビームスプリッタ 1 6 s、1 6 t、1 6 u、1 6 v を含んでもよい。複数のビームスプリッタ 1 6 s、1 6 t、1 6 u、1 6 v は、互いに異なる反射率を有していてもよい。複数のビームスプリッタ 1 6 s、1 6 t、1 6 u、1 6 v は、ホルダ 1 6 w に支持され、ホルダ 1 6 w は、ステップモータ 1 6 x によって回転可能に支持されていてもよい。

[0118] レーザシステム制御部 3 1（図 2）は、ステップモータ 1 6 x を制御することにより、パルスレーザ光の光路にビームスプリッタ 1 6 s、1 6 t、1 6 u、1 6 v を選択的に配置することができてもよい。パルスレーザ光の光路にビームスプリッタ 1 6 s、1 6 t、1 6 u、1 6 v のいずれが位置する場合でも、パルスレーザ光の入射角度は一定であって、反射率だけが互いに異なってもよい。これにより、光学パルスストレッチャー 1 6 z から出力されるパルスレーザ光の時間波形を変更し得る。

他の点については、第 1 の実施形態と同様でよい。また、第 2 または第 3 の実施形態において、図 1 6 A 及び図 1 6 B に示される光学パルスストレッチャー 1 6 z が用いられてもよい。

[0119] 7. 複数のレーザ部を含むレーザドーピング装置（第 5 の実施形態）

7. 1 構成及び動作

図 1 7 は、本開示の第 5 の実施形態に係るレーザドーピング装置の構成を概略的に示す。第 5 の実施形態に係るレーザドーピング装置において、レーザシステム 3 c は、第 1、第 2、第 3 のレーザ部 2 a、2 b、2 c と、遅延回路 5 と、高反射ミラー 6 a、6 b と、ナイフエッジミラー 6 c、6 d と、を備えていてもよい。また、第 5 の実施形態に係るレーザドーピング装置において、レーザシステム 3 c は、光学パルスストレッチャーを備えていなく

てもよい。

他の点については、第1～第3の実施形態の構成と同様でよい。

[0120] 第1、第2、第3のレーザ部2 a、2 b、2 cの各々は、上述のレーザ装置2と同様の構成を備えていてもよい。それぞれのレーザ部は、レーザシステム制御部3 1から目標パルスエネルギーのデータを受信してもよい。目標パルスエネルギーのデータは、第1、第2、第3のレーザ部2 a、2 b、2 cで互いに異なってもよい。それぞれのレーザ部において、受信した目標パルスエネルギーのデータに基づいて、充電コンデンサ（後述）の充電電圧が設定されてもよい。

[0121] 遅延回路5は、レーザシステム制御部3 1から遅延時間の設定データを受信してもよい。遅延回路5は、ドーピング制御部4 5から出力された発光トリガ信号を、レーザシステム制御部3 1を介して受信してもよい。遅延回路5は、この発光トリガ信号を受信したときから、設定された遅延時間が経過したタイミングで、第1、第2、第3のレーザ部2 a、2 b、2 cのそれぞれに、この順で第1、第2、第3のトリガ信号を出力してもよい。

[0122] 高反射ミラー6 a及びナイフエッジミラー6 cは、第1のレーザ部2 aから出力されたパルスレーザ光を高い反射率で反射することにより光路を変更してもよい。第1のレーザ部2 aから出力されて光路を変更されたパルスレーザ光は、第2のレーザ部2 bから出力されたパルスレーザ光と略平行に且つ近接してアッテネータ1 8に向けて出力されてもよい。

[0123] 高反射ミラー6 b及びナイフエッジミラー6 dは、第3のレーザ部2 cから出力されたパルスレーザ光を高い反射率で反射することにより光路を変更してもよい。第3のレーザ部2 cから出力されて光路を変更されたパルスレーザ光は、第2のレーザ部2 bから出力されたパルスレーザ光と略平行に且つ近接してアッテネータ1 8に向けて出力されてもよい。

[0124] 第1、第2、第3のレーザ部2 a、2 b、2 cからそれぞれ出力されたパルスレーザ光は、アッテネータ1 8及びパルス時間波形計測部1 9を介してビームホモジナイザ4 1に入射してもよい。ビームホモジナイザ4 1により

、スリット42がケーラー照明されることにより、これらのパルスレーザ光の光路がスリット42において重なり合って、スリット42の開口部におけるビームの光強度プロファイルが均一化され得る。

[0125] 図18は、図17に示されるレーザドーピング装置におけるトリガ信号とパルスレーザ光のタイミングチャートを示す。第5の実施形態においては、第1、第2、第3のレーザ部2a、2b、2cから出力されるパルスレーザ光を重ね合わせることで、所望のパルス時間波形を有するパルスレーザ光を被照射物に照射してもよい。

[0126] 遅延回路5から第1のレーザ部2aに出力される第1のトリガ信号は、レーザシステム制御部31から遅延回路5に出力される発光トリガ信号に対して遅延時間 T_{r1} を有していてもよい。

遅延回路5から第2のレーザ部2bに出力される第2のトリガ信号は、レーザシステム制御部31から遅延回路5に出力される発光トリガ信号に対して遅延時間 T_{r2} を有していてもよい。

遅延回路5から第3のレーザ部2cに出力される第3のトリガ信号は、レーザシステム制御部31から遅延回路5に出力される発光トリガ信号に対して遅延時間 T_{r3} を有していてもよい。

[0127] 第1のレーザ部2aは、第1のトリガ信号を受信すると、パルスレーザ光である第1パルスを出力してもよい。第1のトリガ信号の受信タイミングと、第1パルスの立ち上がりのタイミングとは、ほぼ一致していてもよい。

[0128] 第2のレーザ部2bは、第2のトリガ信号を受信すると、パルスレーザ光である第2パルスを出力してもよい。第2のトリガ信号の受信タイミングと、第2パルスの立ち上がりのタイミングとは、ほぼ一致していてもよい。従って、第1パルスに対する第2パルスのパルス時間間隔 T_{d2} は、第1のトリガ信号の遅延時間 T_{r1} と第2のトリガ信号の遅延時間 T_{r2} との差にほぼ相当し得る。

[0129] 第3のレーザ部2cは、第3のトリガ信号を受信すると、パルスレーザ光である第3パルスを出力してもよい。第3のトリガ信号の受信タイミングと

、第3パルスの立ち上がりのタイミングとは、ほぼ一致していてもよい。従って、第1パルスに対する第3パルスのパルス時間間隔 T_{d3} は、第1のトリガ信号の遅延時間 T_{r1} と第3のトリガ信号の遅延時間 T_{r3} との差にほぼ相当し得る。

[0130] 第1～第3のレーザ部2a～2cからそれぞれ出力される第1～第3パルスは、互いに異なるパルス時間波形を有してもよい。特に、第1～第3のレーザ部2a～2cは、それぞれ設定された目標パルスエネルギーに応じて、充電コンデンサの充電電圧を設定されていてもよい。例えば、第1のレーザ部2aから出力される第1パルスの光強度 I_1 のピーク値に対して、第2のレーザ部2bから出力される第2パルスの光強度 I_2 のピーク値が、1未満である光強度比 E_{r2} を有するように設定されてもよい。また、第1のレーザ部2aから出力される第1パルスの光強度 I_1 のピーク値に対して、第3のレーザ部2cから出力される第3パルスの光強度 I_3 のピーク値が、上記 E_{r2} より小さい光強度比 E_{r3} を有するように設定されてもよい。

[0131] これらの第1～第3パルスを、高反射ミラー6a、6bとナイフエッジミラー6c、6dとで近接させ、さらに、ビームホモジナイザ41によって重ね合わせてもよい。これにより、被照射物43eには、互いに異なる遅延時間を有する第1～第3パルスの波形を重ね合わせるによりパルス時間幅が伸長したパルスレーザ光が照射されてもよい。遅延回路5は、本開示におけるパルス時間波形調節装置に相当し得る。

[0132] 7. 2 ドーピング制御部の処理

7. 2. 1 メインフロー

図19は、図17に示されるドーピング制御部によるドーピング制御の処理を示すフローチャートである。ドーピング制御部45は、以下の処理により、所望のパルス時間波形を有するパルスレーザ光によるドーピングを行ってもよい。

[0133] ドーピング制御部45は、S100c及びS110cにおいて、パルス時間波形生成パラメータを受信し、読み込んでもよい。ここで、パルス時間波

形生成パラメータは、第1、第2、第3のレーザ部2 a、2 b、2 cから出力されるパルスレーザ光のパルス時間間隔の目標値と、第1、第2、第3のレーザ部2 a、2 b、2 cから出力されるパルスレーザ光の光強度比の目標値と、を含んでもよい。

S 1 1 0 c の処理の詳細については図 2 0 A を参照しながら後述するが、その他の点は図 7 を参照しながら説明した S 1 0 0 及び S 1 1 0 と同様でよい。次の S 1 2 0 及び S 1 3 0 の処理は、図 7 を参照しながら説明したものと同様でよい。

[0134] 次に、S 1 4 0 c において、ドーピング制御部 4 5 は、読み込んだパルス時間波形生成パラメータにレーザシステム 3 c を設定してもよい。すなわち、ドーピング制御部 4 5 は、第1、第2、第3のレーザ部 2 a、2 b、2 c から出力されるパルスレーザ光のパルス時間間隔の目標値と、第1、第2、第3のレーザ部 2 a、2 b、2 c から出力されるパルスレーザ光の光強度比の目標値とを、レーザシステム制御部 3 1 に送信してもよい。この処理の詳細については、図 2 0 B を参照しながら後述する。

その後の処理は、図 7 を参照しながら説明したものと同様でよい。

[0135] 7. 2. 2 S 1 1 0 c の詳細

図 2 0 A は、図 1 9 に示される照射条件パラメータを読み込む処理の詳細を示すフローチャートである。図 2 0 A に示される処理は、図 1 9 に示される S 1 1 0 c のサブルーチンとして、ドーピング制御部 4 5 によって行われてもよい。

[0136] まず、S 1 1 1 c において、ドーピング制御部 4 5 は、第1のレーザ部 2 a から出力される第1パルスに対する第2のレーザ部 2 b から出力される第2パルスの光強度比 $E_r 2$ の目標値を読み込んでもよい。

次に、S 1 1 2 c において、ドーピング制御部 4 5 は、第1のレーザ部 2 a から出力される第1パルスに対する第3のレーザ部 2 c から出力される第3パルスの光強度比 $E_r 3$ の目標値を読み込んでもよい。

[0137] 次に、S 1 1 3 c において、ドーピング制御部 4 5 は、第1のレーザ部 2

aから出力される第1パルスに対する第2のレーザ部2bから出力される第2パルスのパルス時間間隔Td2の目標値を読み込んでもよい。

次に、S114cにおいて、ドーピング制御部45は、第1のレーザ部2aから出力される第1パルスに対する第3のレーザ部2cから出力される第3パルスのパルス時間間隔Td3の目標値を読み込んでもよい。

S114cの後、ドーピング制御部45は、本フローチャートの処理を終了して、メインフローに戻ってもよい。

[0138] 7. 2. 3 S140cの詳細

図20Bは、図19に示されるパルス時間波形生成パラメータに設定する処理の詳細を示すフローチャートである。図20Bに示される処理は、図19に示されるS140cのサブルーチンとして、ドーピング制御部45によって行われてもよい。

[0139] まず、S141cにおいて、ドーピング制御部45は、第1のレーザ部2aの目標パルスエネルギーEL1をレーザシステム制御部31に送信してもよい。これにより、レーザシステム制御部31は、第1パルスのパルスエネルギーが目標パルスエネルギーEL1に近づくように、第1のレーザ部2aを制御してもよい。

[0140] 次に、S142cにおいて、ドーピング制御部45は、第2のレーザ部2bの目標パルスエネルギーEL2をレーザシステム制御部31に送信してもよい。第2のレーザ部2bの目標パルスエネルギーEL2は、以下のように算出されてもよい。

$$EL2 = EL1 \times Er2$$

これにより、レーザシステム制御部31は、第2パルスのパルスエネルギーが目標パルスエネルギーEL2に近づくように、第2のレーザ部2bを制御してもよい。

[0141] 次に、S143cにおいて、ドーピング制御部45は、第3のレーザ部2cの目標パルスエネルギーEL3をレーザシステム制御部31に送信してもよい。第3のレーザ部2cの目標パルスエネルギーEL3は、以下のように

算出されてもよい。

$$E L 3 = E L 1 \times E r 3$$

これにより、レーザシステム制御部 31 は、第 3 パルスのパルスエネルギーが目標パルスエネルギー $E L 3$ に近づくように、第 3 のレーザ部 2 c を制御してもよい。

[0142] それぞれのレーザ部において、それぞれのレーザ部から出力されるパルスレーザ光のパルスエネルギーがそれぞれの目標パルスエネルギーに近づくように、それぞれの充電コンデンサの充電電圧が設定されてもよい。このようにして充電電圧が設定される結果、それぞれのレーザ部から出力されるパルスレーザ光の光強度比が、上記光強度比の目標値に近づいてもよい。もし、ここで、充電電圧の設定範囲内で、パルスレーザ光のパルスエネルギーを目標パルスエネルギーに近づけることができない場合は、レーザチャンバ内のレーザガスの圧力を制御することによって、目標パルスエネルギーに近づけてもよい。

[0143] 次に、S 144 c において、ドーピング制御部 45 は、第 1 のレーザ部 2 a から出力される第 1 パルスの遅延時間 $T r 1$ の目標値を、レーザシステム制御部 31 に送信してもよい。これにより、レーザシステム制御部 31 は、第 1 パルスの遅延時間 $T r 1$ が設定された目標値となるように、遅延回路 5 を制御してもよい。

[0144] 次に、S 145 c において、ドーピング制御部 45 は、第 2 のレーザ部 2 b から出力される第 2 パルスの遅延時間 $T r 2$ の目標値を、レーザシステム制御部 31 に送信してもよい。第 2 パルスの遅延時間 $T r 2$ の目標値は、以下のように算出されてもよい。

$$T r 2 = T r 1 + T d 2$$

これにより、レーザシステム制御部 31 は、第 2 パルスの遅延時間 $T r 2$ が設定された目標値となるように、遅延回路 5 を制御してもよい。

[0145] 次に、S 146 c において、ドーピング制御部 45 は、第 3 のレーザ部 2 c から出力される第 3 パルスの遅延時間 $T r 3$ の目標値を、レーザシステム

制御部 31 に送信してもよい。第 3 パルスの遅延時間 T_{r3} の目標値は、以下のように算出されてもよい。

$$T_{r3} = T_{r1} + T_{d3}$$

これにより、レーザシステム制御部 31 は、第 3 パルスの遅延時間 T_{r3} が設定された目標値となるように、遅延回路 5 を制御してもよい。

S146c の後、ドーピング制御部 45 は、本フローチャートの処理を終了して、メインフローに戻ってもよい。

[0146] 7. 3 作用

以上のように、第 5 の実施形態においては、複数のレーザ部によるパルスレーザ光の出力タイミングは、遅延回路 5 によって設定され得る。また、複数のレーザ部によるパルスレーザ光の光強度比は、それぞれのレーザ部の充電コンデンサの充電電圧によって設定され得る。

[0147] 第 5 の実施形態においては、第 1 ～第 3 パルスの光強度比を制御するために、第 1 ～第 3 のレーザ部 2a ～2c に対する目標パルスエネルギーを設定している。これとは別に、被照射物に対して照射されるパルスレーザ光のフルエンスを制御するために、アッテネータ 18 が別途制御されてもよい。

[0148] 第 5 の実施形態によれば、複数のレーザ部によるパルスレーザ光の出力タイミングと光強度比を個別に設定することができる。従って、これらのパルスレーザ光を重ね合わせたパルスレーザ光の時間波形の自由度が、第 1 ～第 4 の実施形態と比べて向上し得る。

[0149] 8. ホウ素を含む溶液を用いたレーザドーピング装置（第 6 の実施形態）

図 21 は、本開示の第 6 の実施形態に係るレーザドーピング装置において、ドーパントを含む溶液としてホウ素を含む溶液を用いた場合に、4H-SiC にドーピングされたホウ素の濃度とドーピング深さとの関係を示すグラフである。第 6 の実施形態に係るレーザドーピング装置の図示は省略するが、ホウ素を含む溶液を用いる他は、図 1 を参照しながら説明したレーザドーピング装置と同様の装置であってもよい。すなわち、第 6 の実施形態においては、パルスレーザ光のパルスストレッチをしなくてもよい。

[0150] ドーパントを含む溶液としては、飽和濃度のホウ酸水溶液を用いた。パルスレーザ光としては、K r Fエキシマレーザ光を用い、1パルスあたりのフルエンスは 4.5 J/cm^2 であり、1箇所への照射ショット数は1パルスであった。パルス時間幅 ΔT_{PIS} は、 50 ns であった。

[0151] p型ドーパントを含む溶液中でS i Cにレーザ光を照射することによる不純物のドーピングにおいては、p型ドーパントとしてアルミニウムが用いられていたが、 40 nm 以上のドーピング深さを達成することができなかった。第6の実施形態によれば、p型ドーパントとしてホウ素を用いたことにより、パルスストレッチしなくても約 400 nm の深さまでドーピングできることがわかった。

[0152] 図21においては、4H-S i Cにホウ素をドーピングした場合について説明したが、本開示はこれに限定されない。ダイヤモンドやG a Nへのドーピングであっても、ホウ素を含む溶液中でパルスレーザ光を照射することによって、パルスレーザ光のパルス時間幅を伸長しなくても、ドーピング深さが大きくなることが期待できる。

[0153] 9. その他

9. 1 レーザ装置の詳細

図22は、上述のレーザ装置の具体的構成を示す。図22に示されるレーザ装置2は、レーザチャンバ10と、一对の電極11a及び11bと、充電器12と、パルスパワーモジュール(PPM)13と、を含んでもよい。図22においては、レーザ光の進行方向に略垂直な方向から見たレーザチャンバ10の内部構成が示されている。

[0154] レーザ装置2は、さらに、クロスフローファン21と、モータ22と、を含んでもよい。レーザ装置2は、さらに、高反射ミラー14と、出力結合ミラー15と、パルスエネルギー計測部17と、レーザ制御部30と、レーザガス供給排気装置23と、を含んでもよい。

[0155] レーザチャンバ10は、上述のレーザ媒質が封入されるチャンバでもよい。圧力センサ24は、レーザチャンバ10内のレーザガスの圧力を計測する

ように配管を介してレーザチャンバ１０に接続されていてもよい。一对の電極１１ａ及び１１ｂは、レーザ媒質を放電により励起するための電極として、レーザチャンバ１０内に配置され得る。レーザチャンバ１０には開口が形成され、この開口を電気絶縁部２０が塞いでいてもよい。電極１１ａは電気絶縁部２０に支持され、電極１１ｂはレーザチャンバ１０の内部仕切板１０ｃに支持されていてもよい。電気絶縁部２０には、導電部２０ａが埋め込まれていてもよい。導電部２０ａは、パルスパワーモジュール１３から供給される高電圧を電極１１ａに印加するように、パルスパワーモジュール１３の高電圧端子と電極１１ａとを電氣的に接続してもよい。レーザチャンバ１０は、ガス配管によってレーザガス供給排気装置２３に接続されてもよい。

[0156] クロスフローファン２１の回転軸は、レーザチャンバ１０の外部に配置されたモータ２２に接続されていてもよい。モータ２２がクロスフローファン２１を回転させることにより、レーザガスがレーザチャンバ１０の内部で循環してもよい。

[0157] 電源装置は、充電器１２と、パルスパワーモジュール１３と、を含んでもよい。パルスパワーモジュール１３は、充電コンデンサと、スイッチ１３ａと、を含んでもよい。充電器１２の出力は、充電コンデンサと接続され、充電器１２は、一对の電極１１ａ及び１１ｂ間に高電圧を印加するための電気エネルギーを保持し得る。レーザ制御部３０によって制御されるスイッチ１３ａがＯＦＦからＯＮになると、パルスパワーモジュール１３は、充電コンデンサに保持されていた電気エネルギーからパルス状の高電圧を生成し、この高電圧を一对の電極１１ａ及び１１ｂ間に印加してもよい。

[0158] 一对の電極１１ａ及び１１ｂ間に高電圧が印加されると、一对の電極１１ａ及び１１ｂ間に放電が起こり得る。この放電のエネルギーにより、レーザチャンバ１０内のレーザ媒質が励起されて高エネルギー準位に移行し得る。励起されたレーザ媒質が、その後低エネルギー準位に移行するとき、そのエネルギー準位差に応じた波長の光を放出し得る。

[0159] レーザチャンバ１０の両端にはウインドウ１０ａ及び１０ｂが設けられて

もよい。レーザチャンバ１０内で発生した光は、ウインドウ１０a及び１０bを介してレーザチャンバ１０の外部に出射し得る。

[0160] 高反射ミラー１４は、レーザチャンバ１０のウインドウ１０aから出射された光を高い反射率で反射し、レーザチャンバ１０内に戻してもよい。

出力結合ミラー１５の表面には、部分反射膜がコーティングされていてもよい。従って、出力結合ミラー１５は、レーザチャンバ１０のウインドウ１０bから出力される光のうちの一部を透過させて出力し、他の一部を反射させてレーザチャンバ１０内に戻してもよい。

[0161] 高反射ミラー１４と出力結合ミラー１５とで、光共振器が構成され得る。レーザチャンバ１０から出射した光は、高反射ミラー１４と出力結合ミラー１５との間で往復し、電極１１aと電極１１bとの間のレーザゲイン空間を通過する度に増幅され得る。増幅された光の一部が、出力結合ミラー１５を介して、パルスレーザ光として出力され得る。

[0162] パルスエネルギー計測部１７は、ビームスプリッタ１７aと、集光光学系１７bと、光センサ１７cとを含んでもよい。ビームスプリッタ１７aは、出力結合ミラー１５を透過したパルスレーザ光を高い透過率で透過させるとともに、パルスレーザ光の一部を集光光学系１７bに向けて反射してもよい。集光光学系１７bは、ビームスプリッタ１７aによって反射された光を光センサ１７cの感光面に集光してもよい。光センサ１７cは、感光面に集光されたレーザ光のパルスエネルギーを検出し、パルスエネルギーの検出データをレーザ制御部３０に出力してもよい。

[0163] レーザ制御部３０は、例えば、充電器１２に対して充電電圧の設定信号を送信したり、パルスパワーモジュール１３に対してスイッチON又はOFFの発光トリガ信号を送信したりしてもよい。さらに、レーザ制御部３０は、レーザチャンバ１０内のレーザガスの圧力を制御するために、圧力センサ２４の検出値に基づいて、レーザガス供給排気装置２３を制御してもよい。

[0164] レーザ制御部３０は、パルスエネルギー計測部１７からパルスエネルギーの検出データを受信してもよく、このパルスエネルギーの検出データを参照

して充電器 12 の充電電圧やレーザチャンバ 10 内のレーザガスの圧力を制御してもよい。充電器 12 の充電電圧やレーザガスの圧力を制御することにより、パルスレーザ光のパルスエネルギーが制御されてもよい。また、レーザ制御部 30 は、パルスエネルギー計測部 17 から受信したデータに基づいて、エキシマレーザ装置の発振パルス数を計数してもよい。

[0165] 図 23 は、図 22 に示されるレーザチャンバの内部構成と、パルスパワーモジュールの構成とを示す。図 23 においては、レーザ光の進行方向に略平行な方向から見たレーザチャンバ 10 の内部構成が示されている。レーザチャンバ 10 の内部仕切板 10c を含む導電性部材は、接地電位に接続されてもよい。電極 11b は内部仕切板 10c を介して接地電位に接続されていてよい。

[0166] レーザチャンバ 10 の内部には、一对の電極 11a 及び 11b と、クロスフローファン 21 との他に、熱交換器 26 が配置されてもよい。クロスフローファン 21 が回転することにより、レーザガスは、矢印 A で示されるようにレーザチャンバ 10 の内部で循環してもよい。熱交換器 26 は、放電によって高温となったレーザガスの熱エネルギーをレーザチャンバ 10 の外部に排出してもよい。

[0167] パルスパワーモジュール 13 は、充電コンデンサ C0 と、スイッチ 13a と、昇圧トランス TC1 と、複数の磁気スイッチ S_{r1} ~ S_{r3} と、複数のコンデンサ C1、C2、C3 と、を含んで構成されてもよい。

[0168] 磁気スイッチ S_{r1} ~ S_{r3} は、いずれも、可飽和リアクトルを含んでもよい。磁気スイッチ S_{r1} ~ S_{r3} の各々は、その両端に印加された電圧の時間積分値が、各磁気スイッチの特性で決まる所定の値になったときに、低インピーダンスになるようにしてもよい。

[0169] 充電器 12 には、レーザ制御部 30 により充電電圧が設定されてもよい。充電器 12 は、設定された充電電圧に基づいて、充電コンデンサ C0 を充電してもよい。

パルスパワーモジュール 13 のスイッチ 13a には、レーザ制御部 30 に

より発光トリガ信号が入力されてもよい。発光トリガ信号がスイッチ13aに入力されると、スイッチ13aがONになってもよい。スイッチ13aがONになると、充電コンデンサC0から昇圧トランスTC1の1次側に電流が流れ得る。

[0170] 昇圧トランスTC1の1次側に電流が流れると、電磁誘導によって昇圧トランスTC1の2次側に逆方向の電流が流れ得る。昇圧トランスTC1の2次側に電流が流れると、やがて磁気スイッチSr1に印加される電圧の時間積分値が閾値に達し得る。

[0171] 磁気スイッチSr1に印加される電圧の時間積分値が閾値に達すると、磁気スイッチSr1は磁気飽和した状態となり、磁気スイッチSr1は閉じ得る。

磁気スイッチSr1が閉じると、昇圧トランスTC1の2次側からコンデンサC1に電流が流れ、コンデンサC1が充電され得る。

[0172] コンデンサC1が充電されることにより、やがて磁気スイッチSr2は磁気飽和した状態となり、磁気スイッチSr2は閉じ得る。

磁気スイッチSr2が閉じると、コンデンサC1からコンデンサC2に電流が流れ、コンデンサC2が充電され得る。このとき、コンデンサC1を充電する際の電流のパルス幅よりも短いパルス幅で、コンデンサC2が充電されてもよい。

[0173] コンデンサC2が充電されることにより、やがて磁気スイッチSr3は磁気飽和した状態となり、磁気スイッチSr3は閉じ得る。

磁気スイッチSr3が閉じると、コンデンサC2からコンデンサC3に電流が流れ、コンデンサC3が充電され得る。このとき、コンデンサC2を充電する際の電流のパルス幅よりも短いパルス幅で、コンデンサC3が充電されてもよい。

[0174] このように、コンデンサC1からコンデンサC2、コンデンサC2からコンデンサC3へと電流が順次流れることにより、当該電流のパルス幅は圧縮され、高電圧化され得る。

[0175] コンデンサC 3の電圧がレーザガスのブレイクダウン電圧に達したときに、一対の電極1 1 a及び1 1 b間のレーザガスに絶縁破壊が生じ得る。これにより、レーザガスが励起され、レーザ発振して、パルスレーザ光が出力され得る。このような放電動作が、スイッチ1 3 aのスイッチング動作によって繰り返されることにより、所定の発振周波数で、パルスレーザ光が出力されてもよい。

[0176] 9. 2 フライアイレンズの構成

図2 4は、上述のビームホモジナイザ4 1に含まれるフライアイレンズ4 1 aの例を示す斜視図である。フライアイレンズ4 1 aにおいては、紫外領域の光を高い透過率で透過させる基板の第1の面に、複数の凹面のシリンドリカル面4 1 1がY方向に配列されていてもよい。当該基板の第1の面と反対側の第2の面に、複数の凹面のシリンドリカル面4 1 2がX方向に配列されていてもよい。シリンドリカル面4 1 1の前側焦点面の位置と、シリンドリカル面4 1 2の前側焦点面の位置とは略一致していてもよい。

[0177] 図2 5は、上述のビームホモジナイザ4 1に含まれるフライアイレンズの変形例を示す斜視図である。フライアイレンズは、1枚の基板の2つの面にそれぞれシリンドリカル面が形成されたものに限定されず、2枚の基板4 1 c及び4 1 dにそれぞれシリンドリカル面4 1 3及び4 1 4が形成されたものでもよい。シリンドリカル面4 1 3及び4 1 4は凹面である場合に限定されず、凸面であってもよい。その他の点については、図2 4を参照しながら説明したものと同様でよい。

[0178] 9. 3 制御部の構成

図2 6は、制御部の概略構成を示すブロック図である。

上述した実施の形態におけるドーピング制御部4 5、レーザシステム制御部3 1等の制御部は、コンピュータやプログラマブルコントローラ等汎用の制御機器によって構成されてもよい。例えば、以下のように構成されてもよい。

[0179] (構成)

制御部は、処理部１０００と、処理部１０００に接続される、ストレージメモリ１００５と、ユーザインターフェイス１０１０と、パラレルＩ／Ｏコントローラ１０２０と、シリアルＩ／Ｏコントローラ１０３０と、Ａ／Ｄ、Ｄ／Ａコンバータ１０４０とによって構成されてもよい。また、処理部１０００は、ＣＰＵ１００１と、ＣＰＵ１００１に接続された、メモリ１００２と、タイマー１００３と、ＧＰＵ１００４とから構成されてもよい。

[0180] (動作)

処理部１０００は、ストレージメモリ１００５に記憶されたプログラムを読み出してもよい。また、処理部１０００は、読み出したプログラムを実行したり、プログラムの実行に従ってストレージメモリ１００５からデータを読み出したり、ストレージメモリ１００５にデータを記憶させたりしてもよい。

[0181] パラレルＩ／Ｏコントローラ１０２０は、パラレルＩ／Ｏポートを介して通信可能な機器１０２１～１０２ｘに接続されてもよい。パラレルＩ／Ｏコントローラ１０２０は、処理部１０００がプログラムを実行する過程で行うパラレルＩ／Ｏポートを介した、デジタル信号による通信を制御してもよい。

[0182] シリアルＩ／Ｏコントローラ１０３０は、シリアルＩ／Ｏポートを介して通信可能な機器１０３１～１０３ｘに接続されてもよい。シリアルＩ／Ｏコントローラ１０３０は、処理部１０００がプログラムを実行する過程で行うシリアルＩ／Ｏポートを介した、デジタル信号による通信を制御してもよい。

[0183] Ａ／Ｄ、Ｄ／Ａコンバータ１０４０は、アナログポートを介して通信可能な機器１０４１～１０４ｘに接続されてもよい。Ａ／Ｄ、Ｄ／Ａコンバータ１０４０は、処理部１０００がプログラムを実行する過程で行うアナログポートを介した、アナログ信号による通信を制御してもよい。

[0184] ユーザインターフェイス１０１０は、オペレータが処理部１０００によるプログラムの実行過程を表示したり、オペレータによるプログラム実行の中止や割り込み処理を処理部１０００に行わせたりするよう構成されてもよい。

。

[0185] 処理部1000のCPU1001はプログラムの演算処理を行ってもよい。メモリ1002は、CPU1001がプログラムを実行する過程で、プログラムの一時記憶や、演算過程でのデータの一時記憶を行ってもよい。タイマー1003は、時刻や経過時間を計測し、プログラムの実行に従ってCPU1001に時刻や経過時間を出力してもよい。GPU1004は、処理部1000に画像データが入力された際、プログラムの実行に従って画像データを処理し、その結果をCPU1001に出力してもよい。

[0186] パラレルI/Oコントローラ1020に接続される、パラレルI/Oポートを介して通信可能な機器1021～102xは、レーザ装置2、他の制御部等の発光トリガ信号やタイミングを示す信号の受送信に使用してもよい。

シリアルI/Oコントローラ1030に接続される、シリアルI/Oポートを介して通信可能な機器1031～103xは、レーザ装置2、光学パルスストレッチャー16α、アッテネータ18、XYZステージ43g、他の制御部等のデータの受送信に使用してもよい。A/D、D/Aコンバータ1040に接続される、アナログポートを介して通信可能な機器1041～104xは、パルス時間波形計測部19、モニタ装置44等の各種センサであってもよい。

以上のように構成されることで、制御部は各実施形態に示された動作を実現可能であってよい。

[0187] 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、添付の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。

[0188] 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。

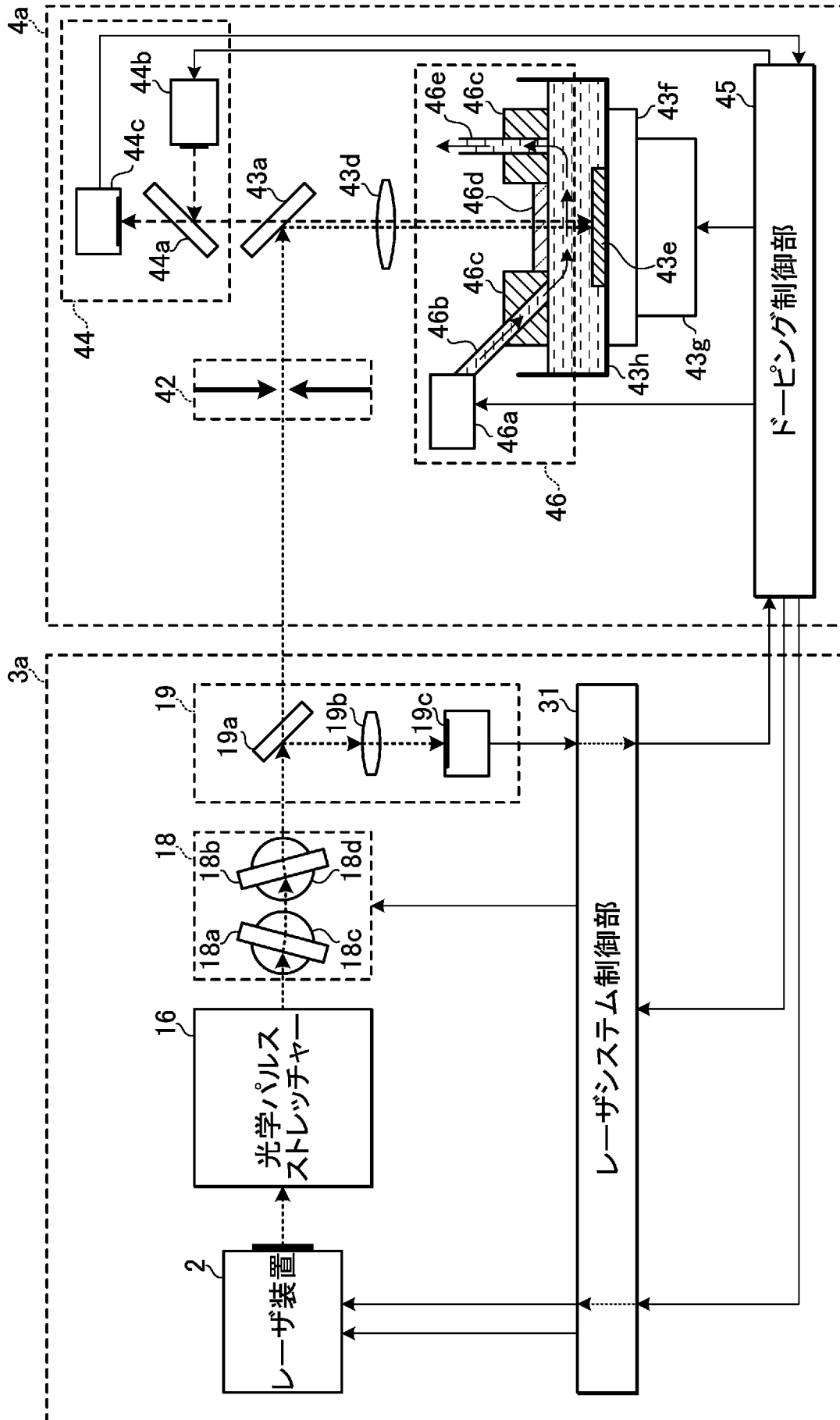
請求の範囲

- [請求項1] 半導体材料の所定領域にパルスレーザ光を照射してドーピングを行うレーザドーピング装置において、
- 前記所定領域に、ドーパントを含む溶液を供給する溶液供給システムと、
- 前記ドーパントを含む溶液を透過するパルスレーザ光を出力する少なくとも1つのレーザ装置と、前記パルスレーザ光のパルス時間波形を調節するパルス時間波形調節装置と、を含むレーザシステムと、
- を備えるレーザドーピング装置。
- [請求項2] 前記溶液供給システムは、前記所定領域に沿って前記ドーパントを含む溶液の流れを形成するためのポンプを含む、請求項1記載のレーザドーピング装置。
- [請求項3] 前記パルス時間波形調節装置は、光学パルスストレッチャーを含む、請求項1記載のレーザドーピング装置。
- [請求項4] 前記レーザシステムは、複数のレーザ装置を含み、
- 前記パルス時間波形調節装置は、前記複数のレーザ装置から出力されるそれぞれのパルスレーザ光のタイミングを調節する遅延回路を含み、
- 前記複数のレーザ装置から出力されたそれぞれのパルスレーザ光を重ね合わせて、前記半導体材料の所定領域に照射する光学系をさらに備える、
- 請求項1記載のレーザドーピング装置。
- [請求項5] 前記複数のレーザ装置が互いに異なるパルス時間波形を有する前記パルスレーザ光をそれぞれ出力するように、前記複数のレーザ装置を制御する制御部
- をさらに備える、請求項4記載のレーザドーピング装置。
- [請求項6] 前記半導体材料は、SiC、ダイヤモンド、GaNのいずれかである、請求項1記載のレーザドーピング装置。

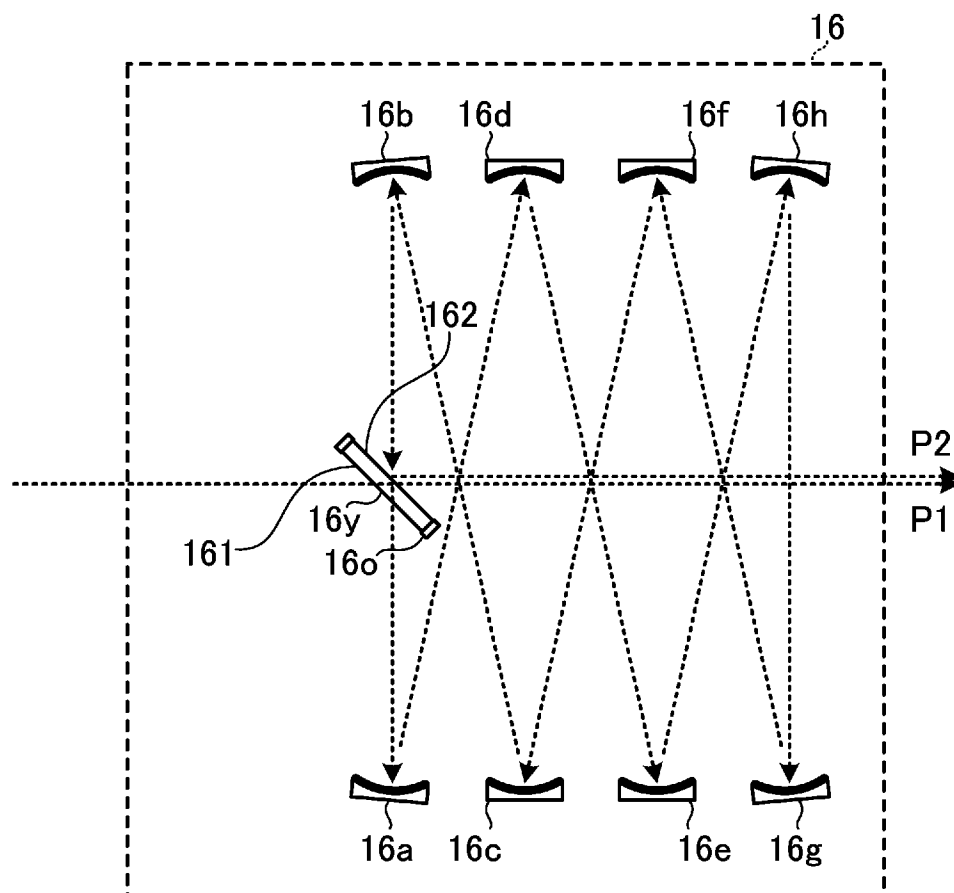
- [請求項7] 前記レーザシステムから出力されるパルスレーザ光の時間波形の時刻 t における光強度を $I(t)$ としたとき、 $\Delta T_{TIS} = [\int I(t) dt]^2 / \int I(t)^2 dt$ で定義されるパルス幅は、80 ns 以上である、請求項1記載のレーザドーピング装置。
- [請求項8] 前記ドーパントを含む溶液は、塩化アルミニウム水溶液である、請求項1記載のレーザドーピング装置。
- [請求項9] 前記ドーパントを含む溶液は、ホウ酸水溶液である、請求項1記載のレーザドーピング装置。
- [請求項10] 前記パルスレーザ光の波長は、248 nm 以上、308 nm 以下である、請求項1記載のレーザドーピング装置。
- [請求項11] 半導体材料の所定領域にパルスレーザ光を照射してドーピングを行うレーザドーピング装置において、
前記所定領域に、ホウ素を含む溶液を供給する溶液供給システムと、
前記ホウ素を含む溶液を透過するパルスレーザ光を出力する少なくとも1つのレーザ装置と、
を備えるレーザドーピング装置。
- [請求項12] 前記ホウ素を含む溶液は、ホウ酸水溶液であり、
前記パルスレーザ光の波長は、248 nm 以上、308 nm 以下である、請求項11記載のレーザドーピング装置。
- [請求項13] 半導体材料の所定領域にパルスレーザ光を照射してドーピングを行うレーザドーピング方法において、
前記所定領域に、ドーパントを含む溶液を供給することと、
前記ドーパントを含む溶液を透過する前記パルスレーザ光を出力することと、
前記パルスレーザ光のパルス時間波形を調節することと、
を備えるレーザドーピング方法。

【図2】

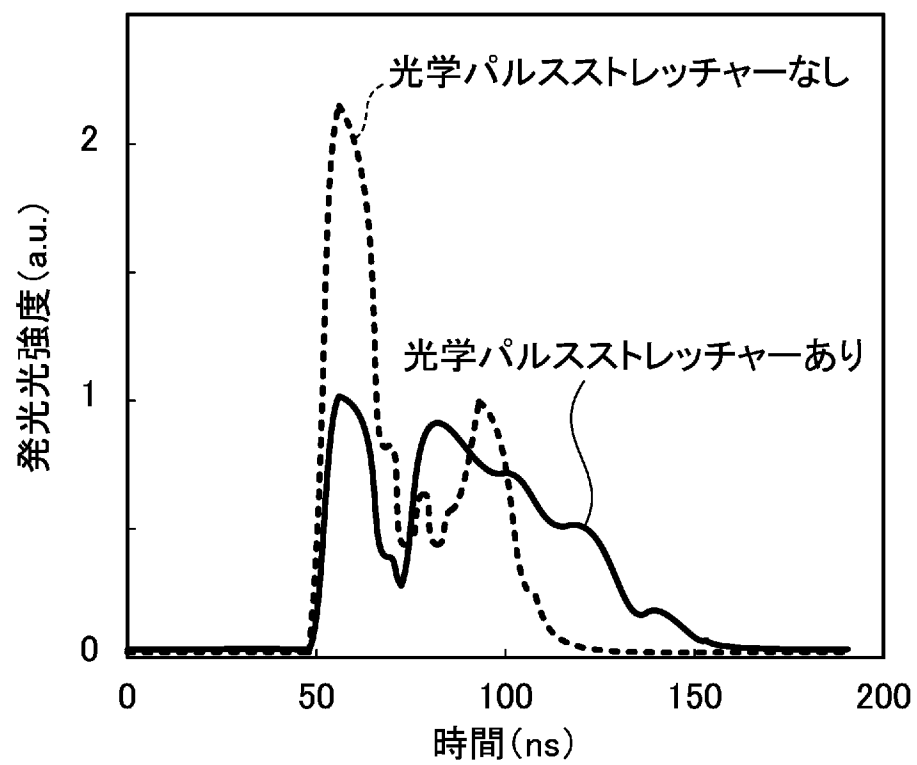
Figure 2 is a block diagram of a laser system. The system is divided into three main sections: 3a (Laser System Control), 4a (Doping Control), and 46 (Laser Head). Section 3a includes a laser device (2), an optical pulse stretcher (16), a beam splitter (18), a lens (19b), a detector (19c), and a control unit (31). Section 4a includes a beam splitter (43a), a lens (43d), a detector (44), and a control unit (45). Section 46 includes a laser head assembly with various components (46a, 46b, 46c, 46d, 46e, 46f, 46g, 46h) and a control unit (45). Arrows indicate the flow of light and control signals between these components.



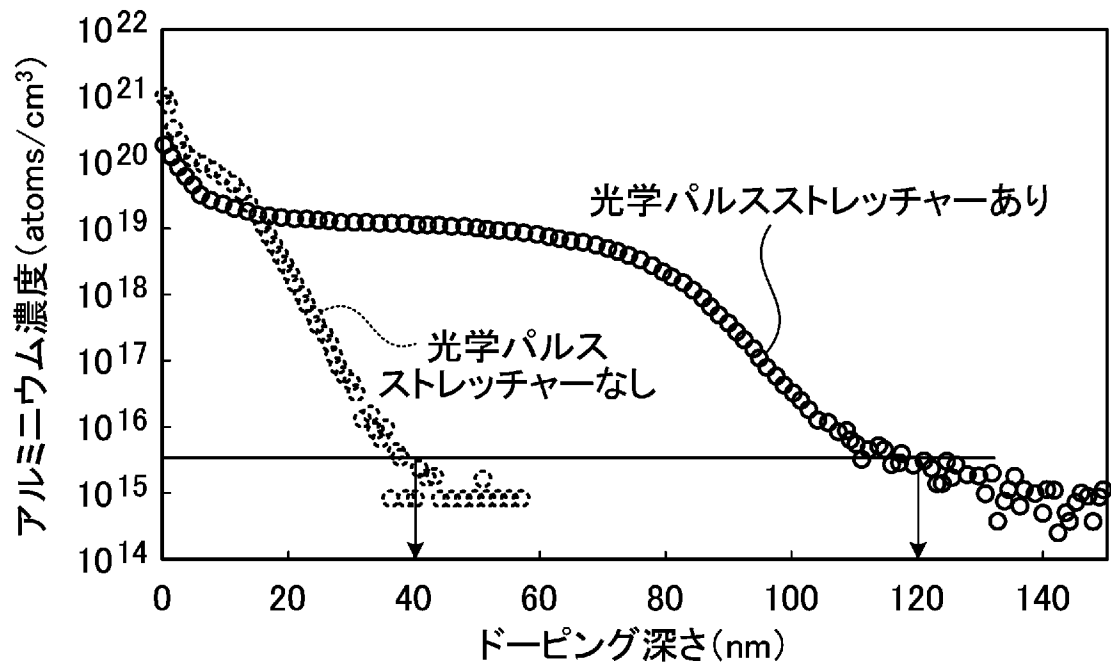
[図3A]



[図3B]

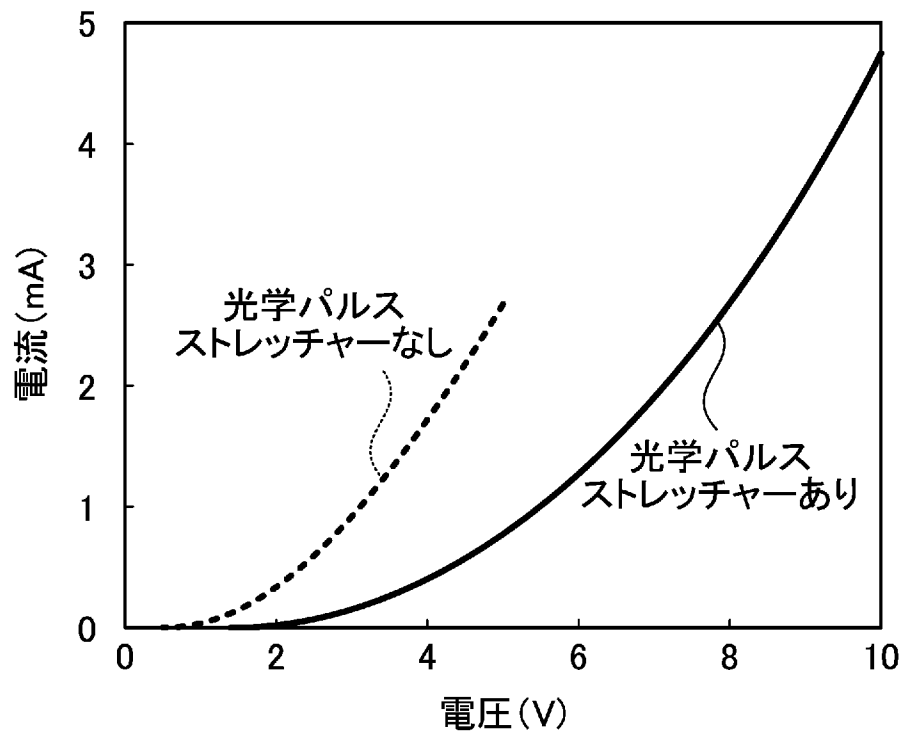


[図4A]

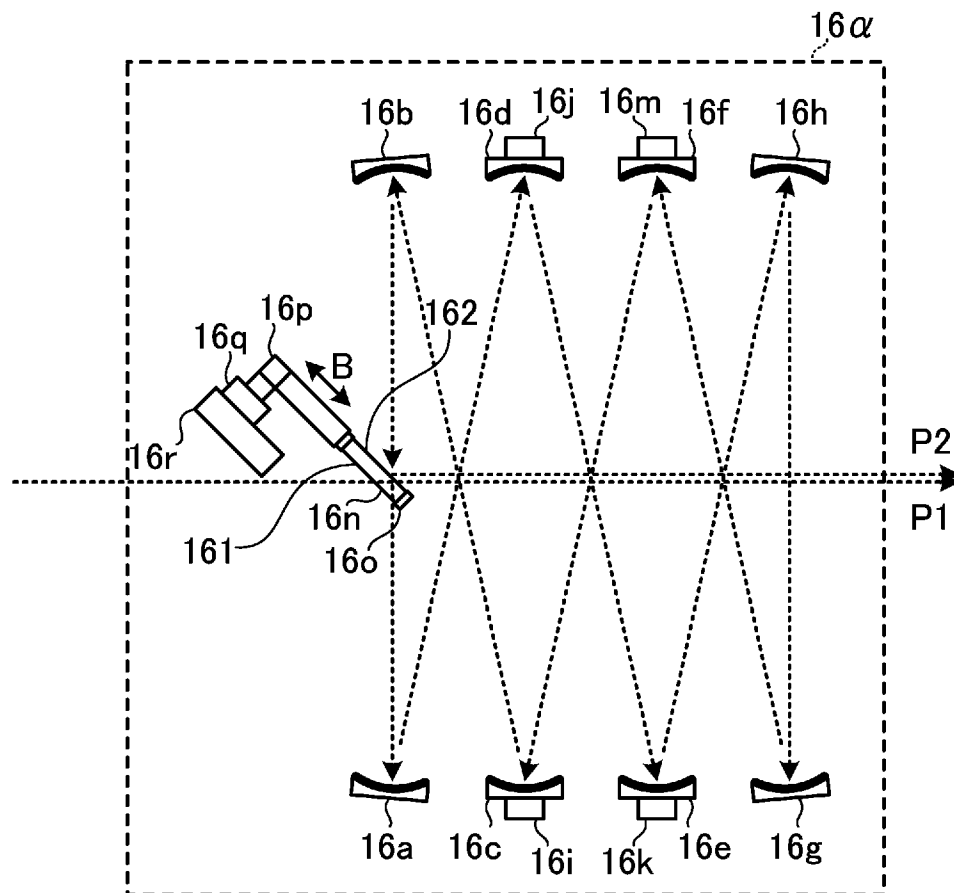


[図4B]

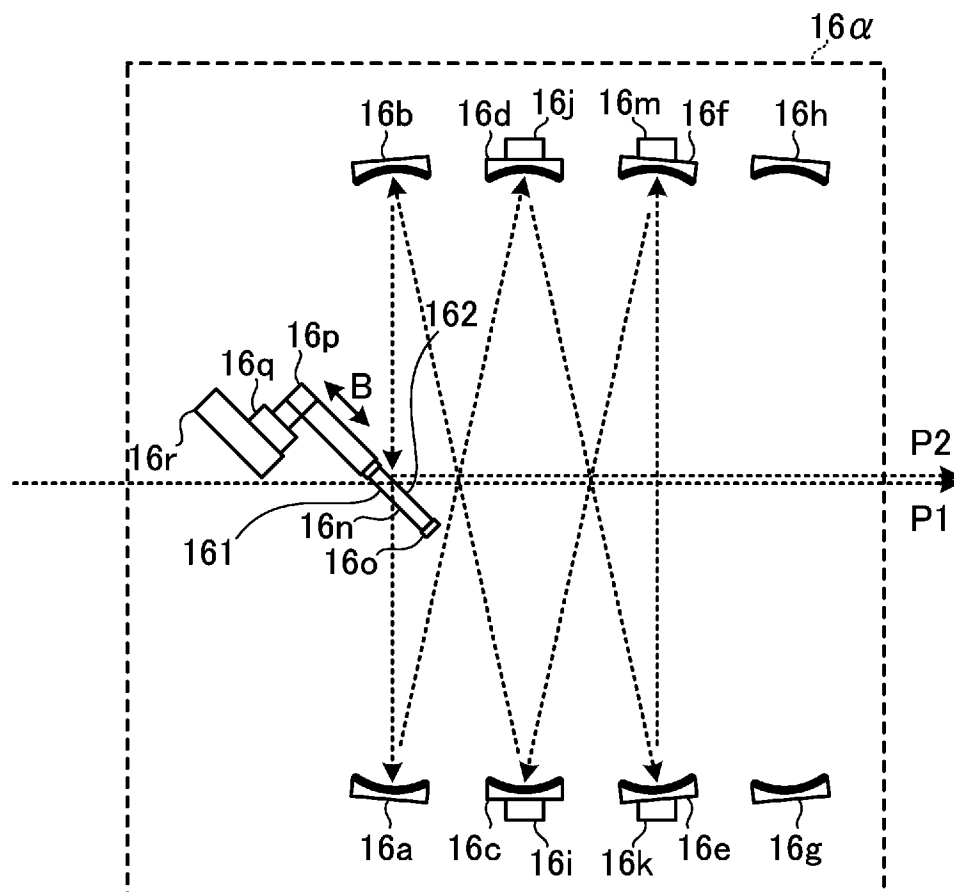
ダイオード特性(順方向バイアス)



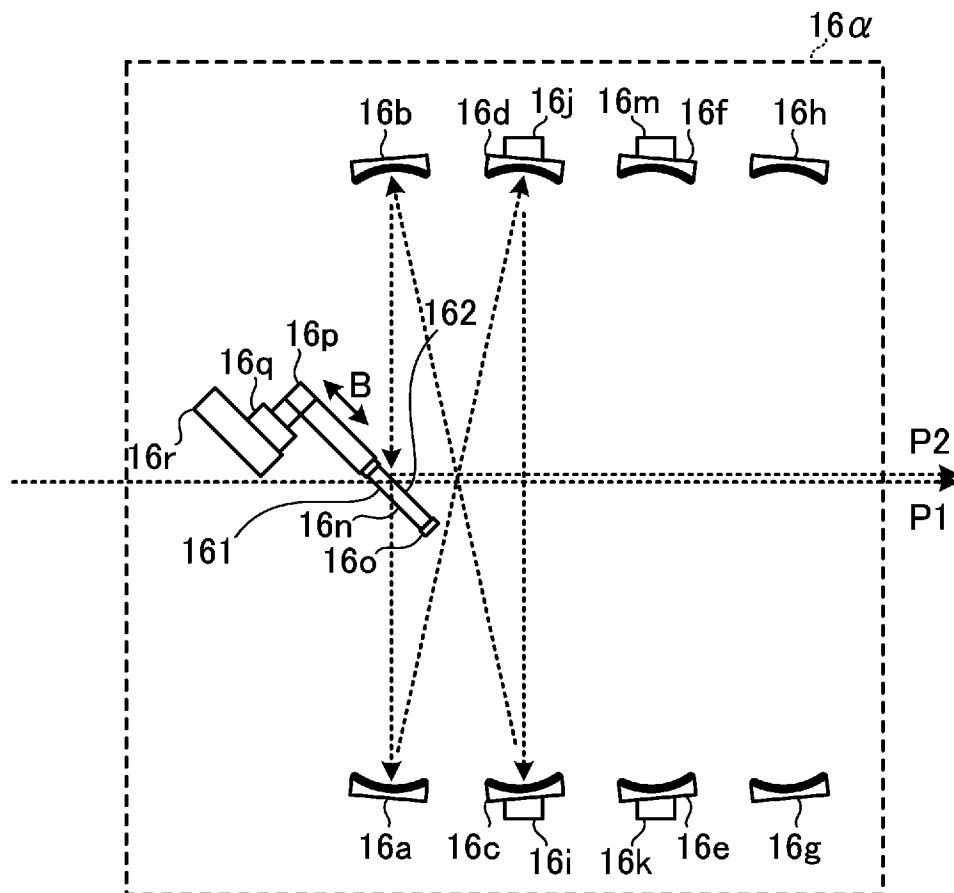
[図6A]



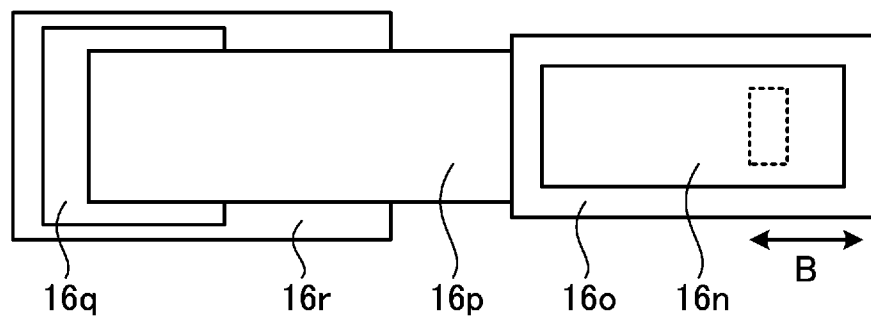
[図6B]



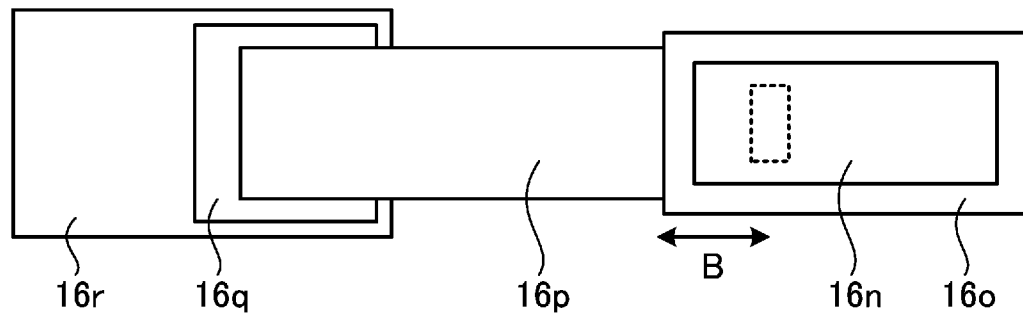
[図6C]



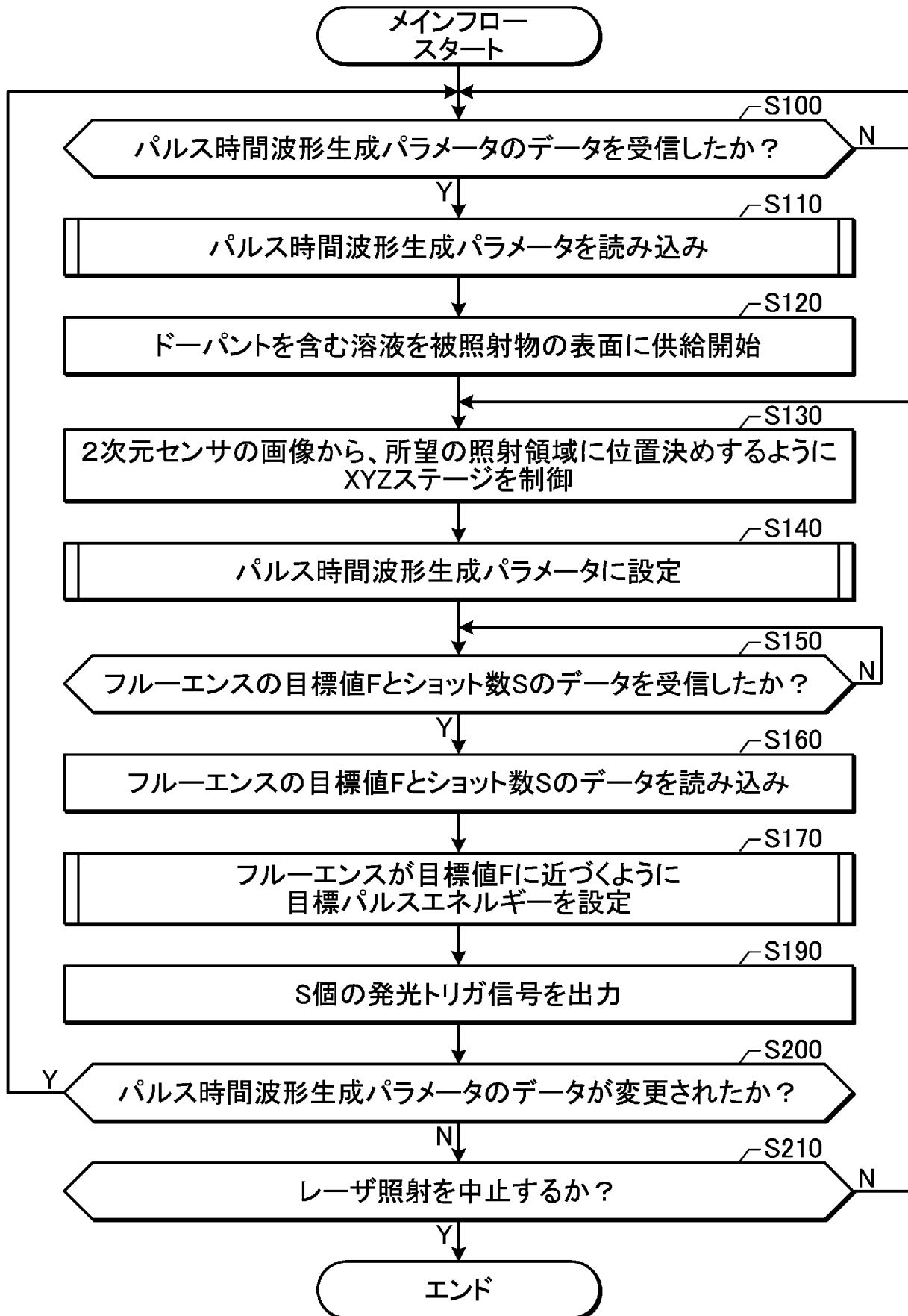
[図6D]



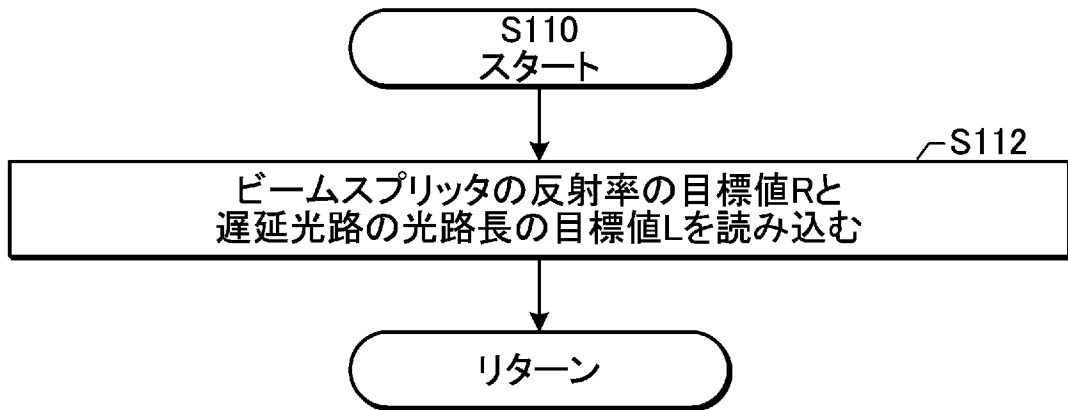
[図6E]



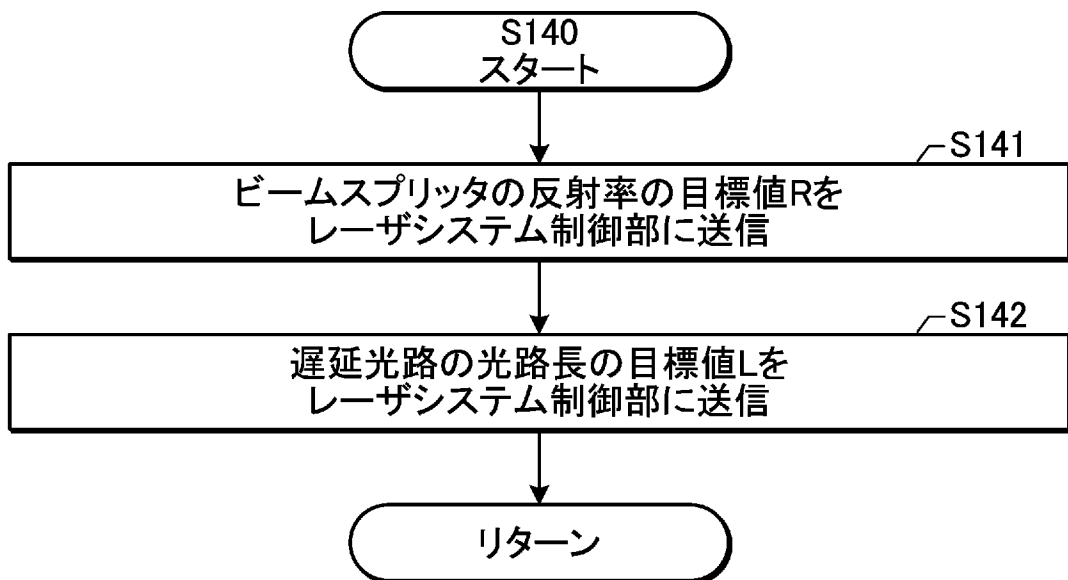
[図7]



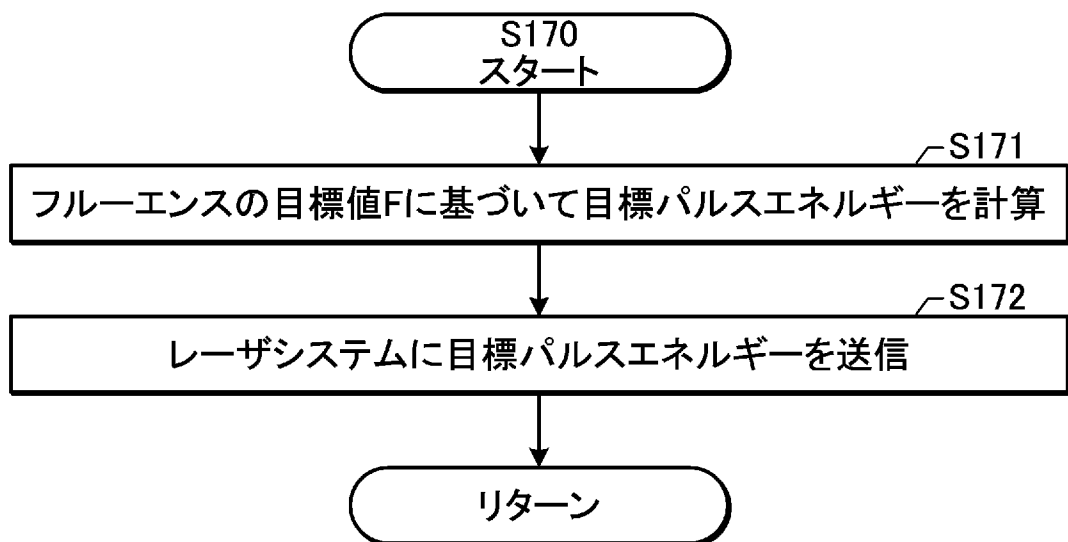
[図8A]



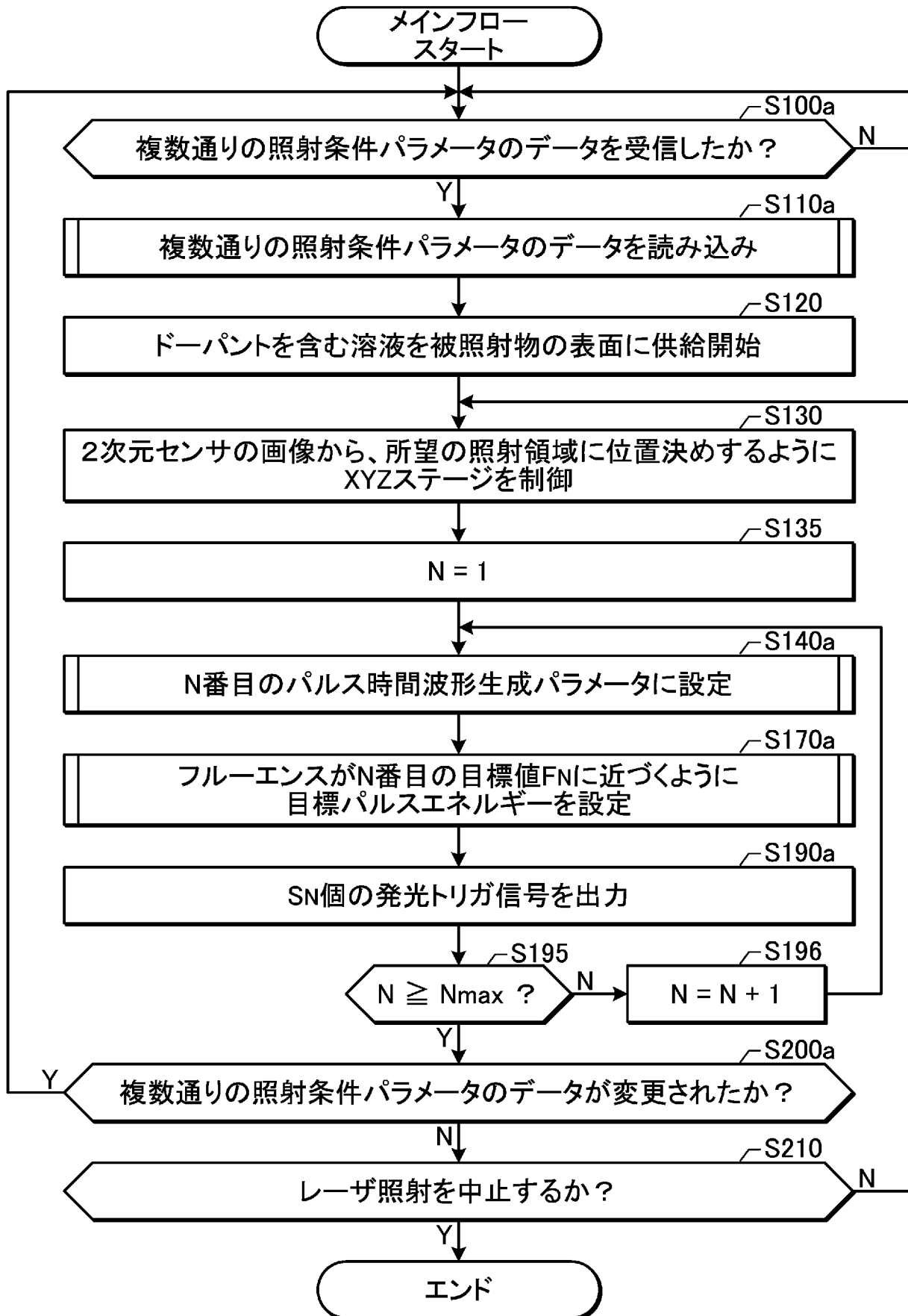
[図8B]



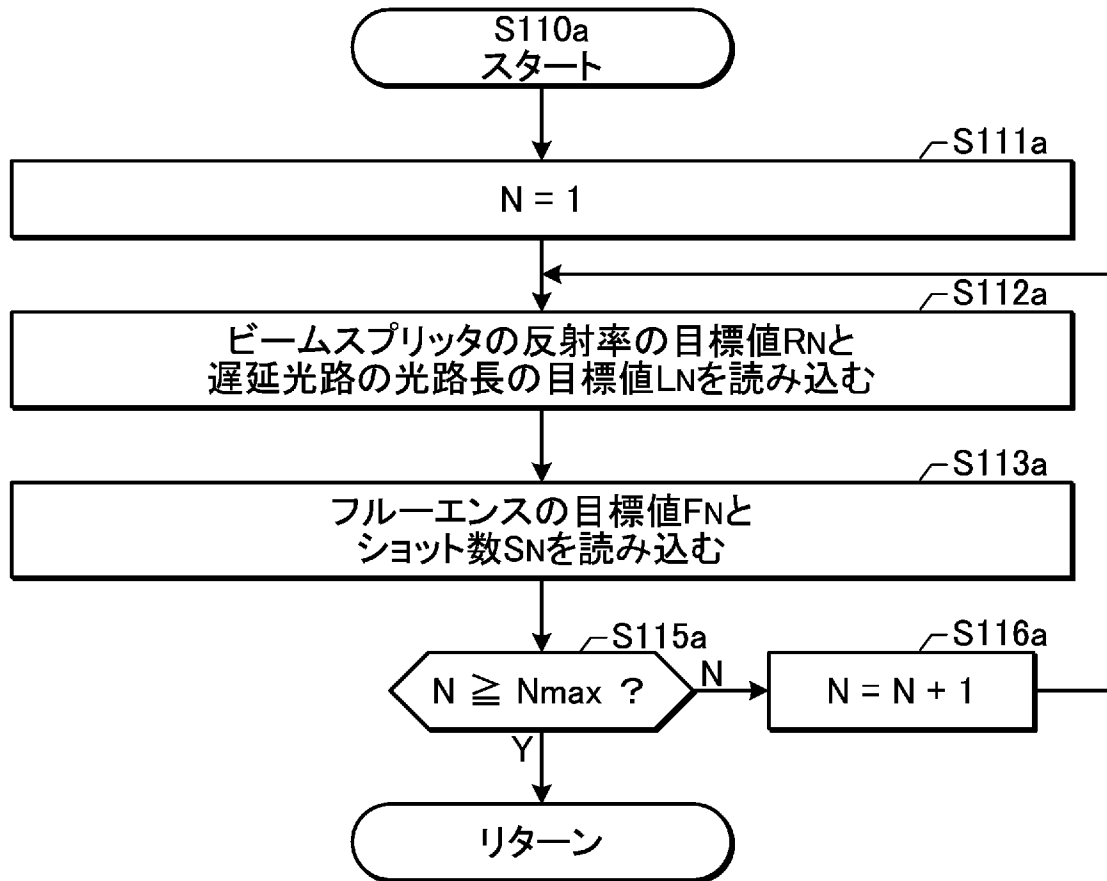
[図8C]



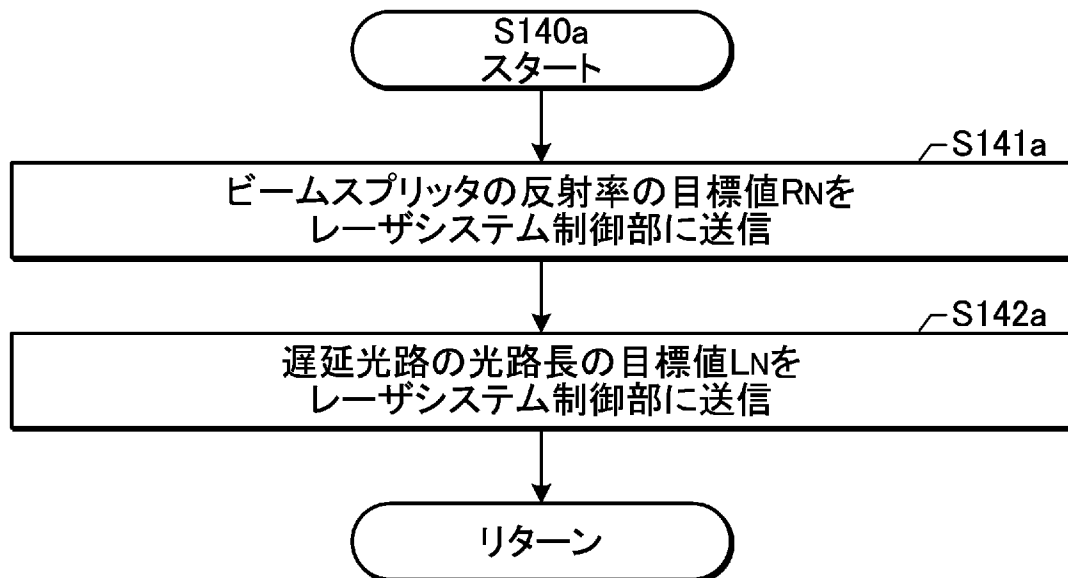
[図9]



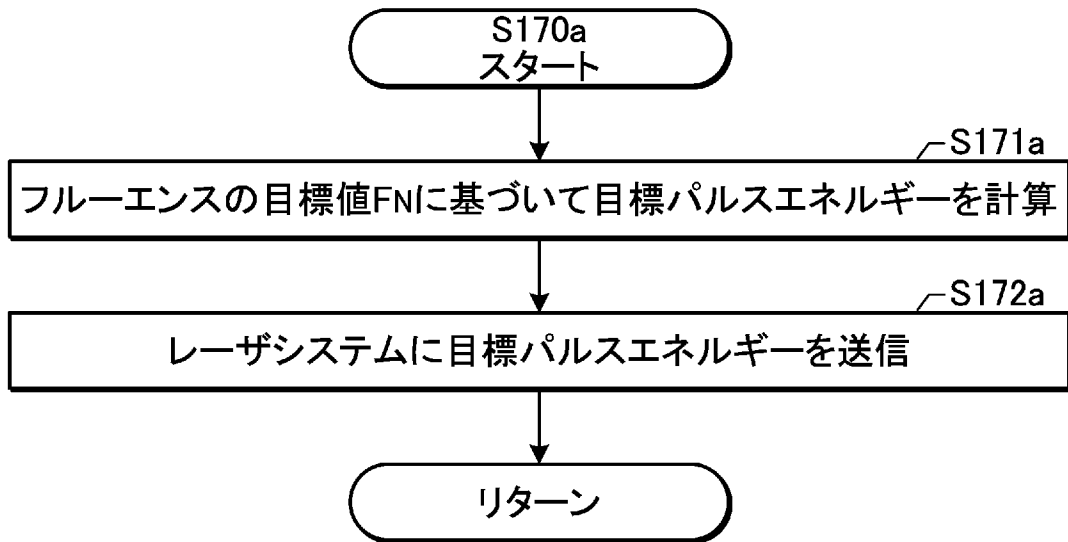
[図10A]



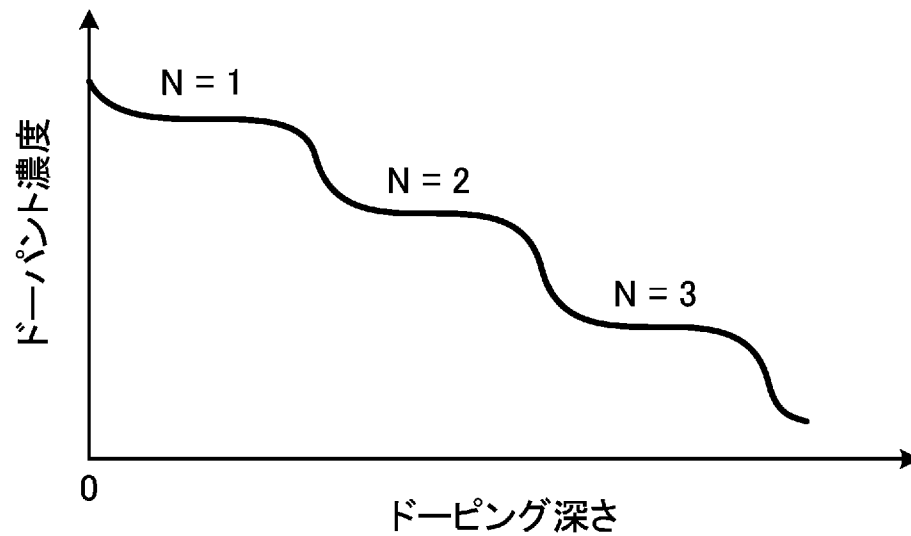
[図10B]



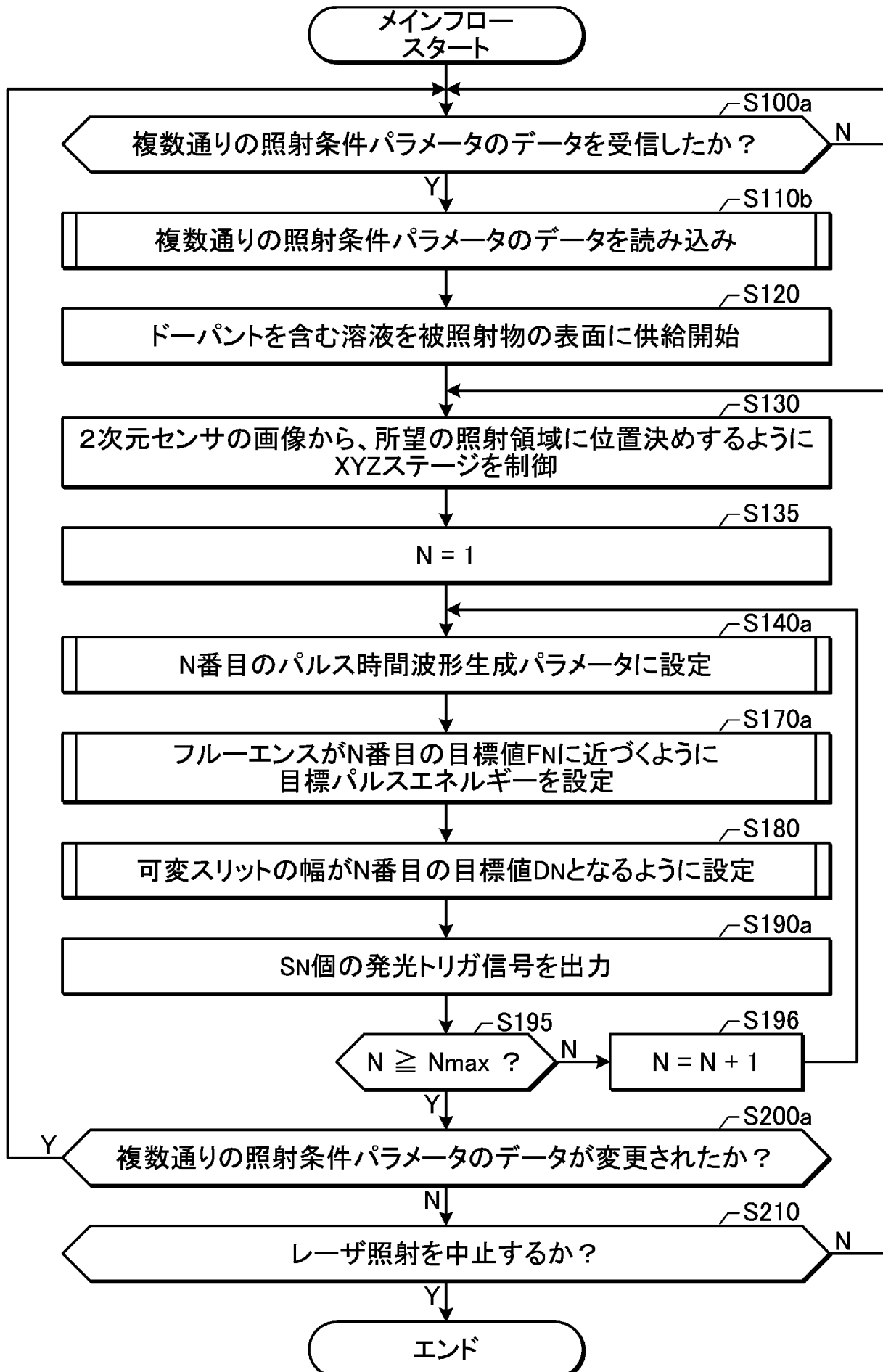
[図10C]



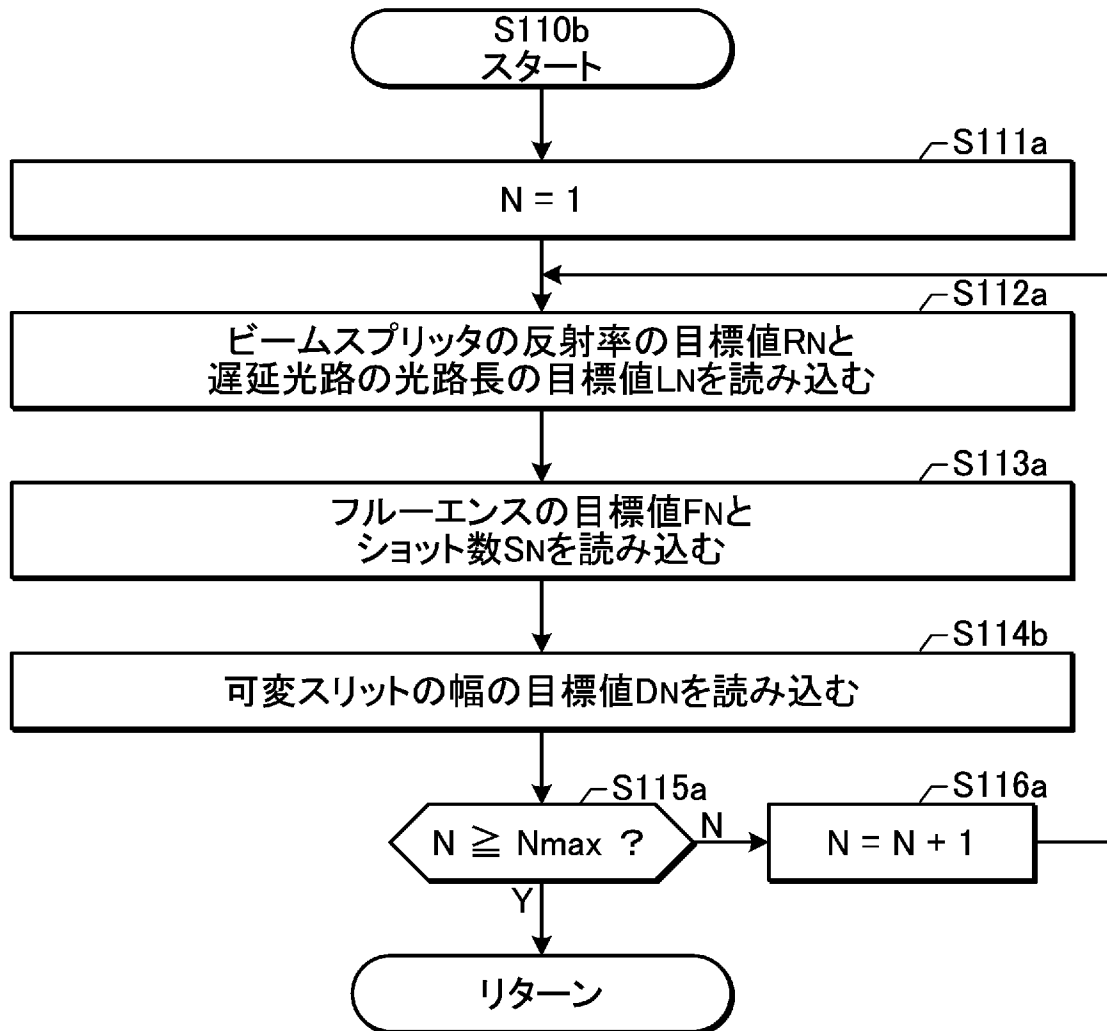
[図11]



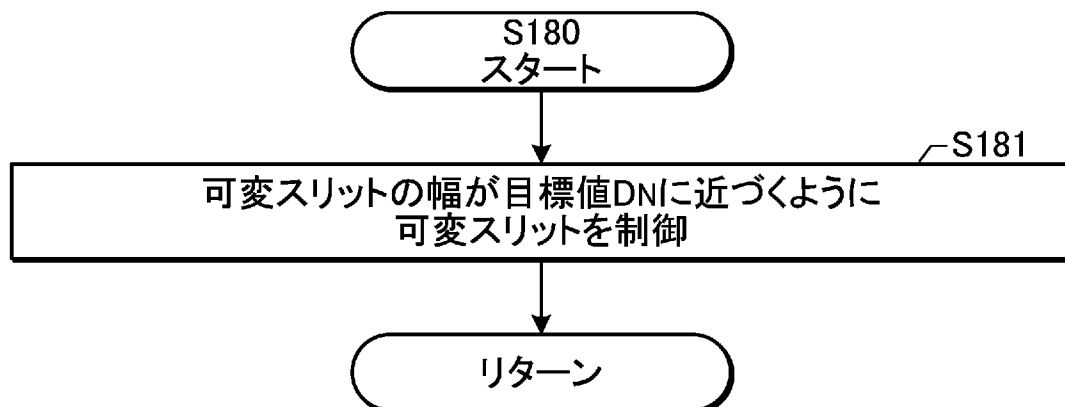
[図13]



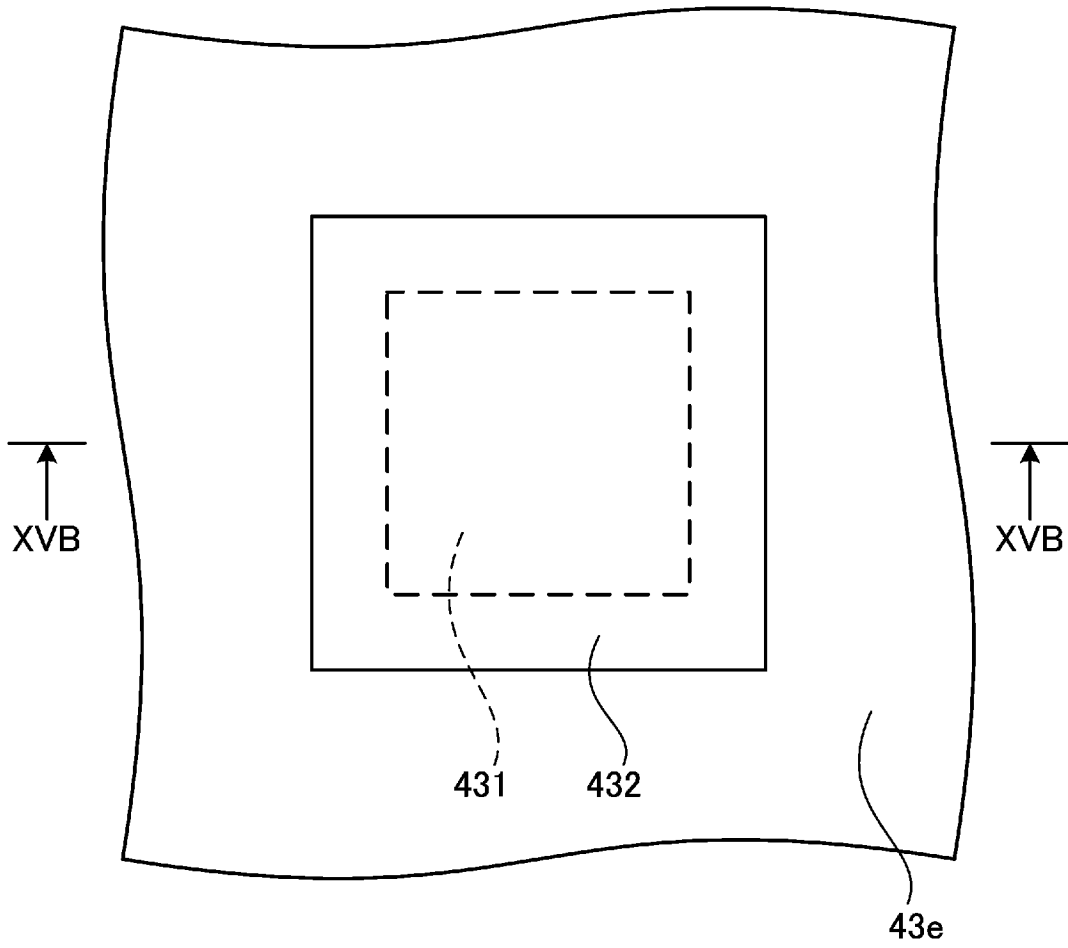
[図14A]



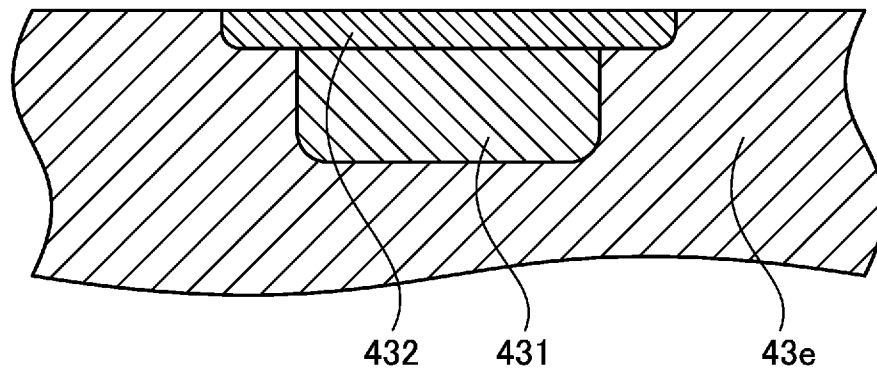
[図14B]



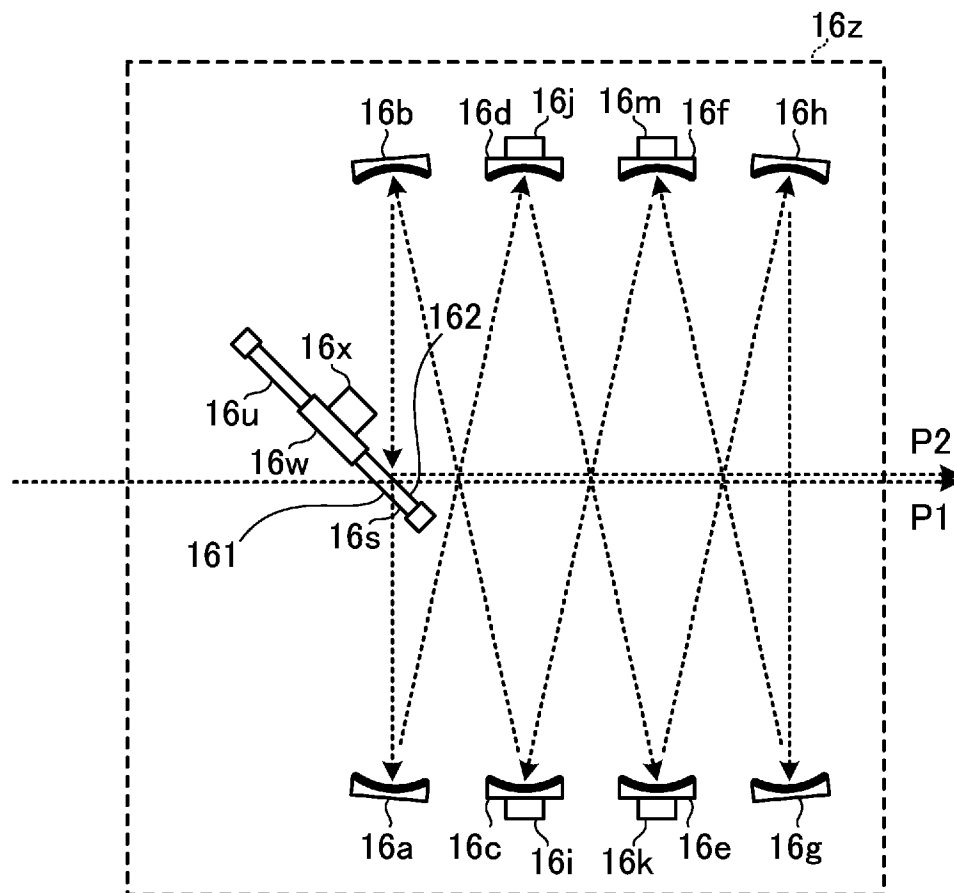
[図15A]



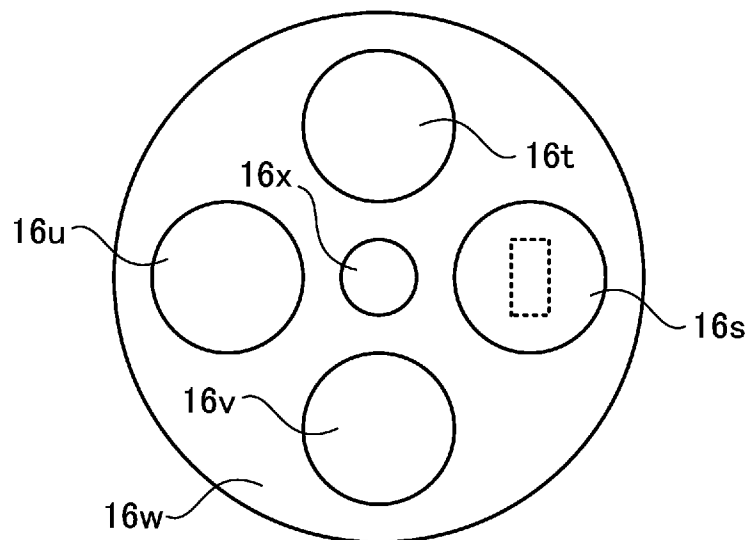
[図15B]



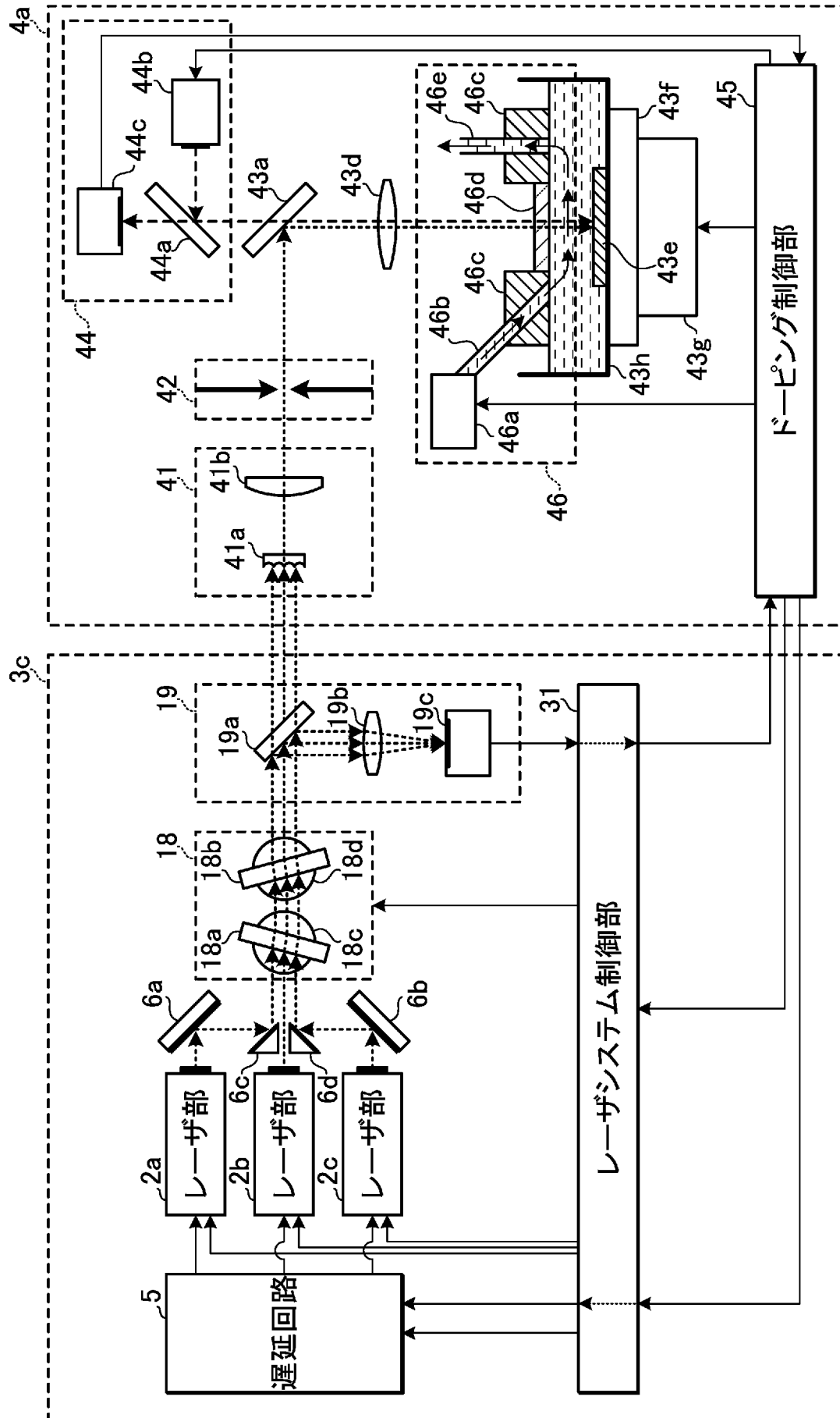
[図16A]



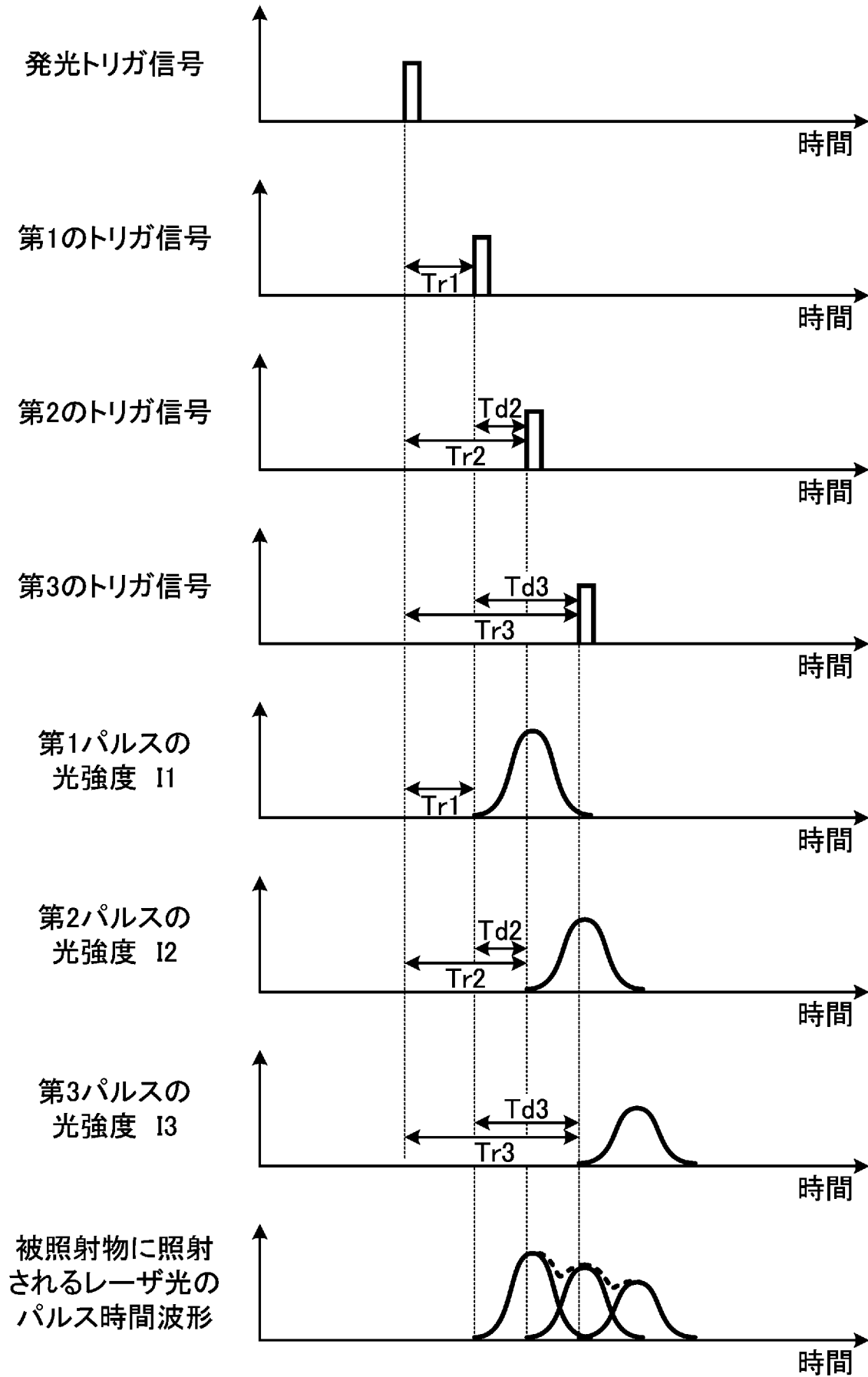
[図16B]



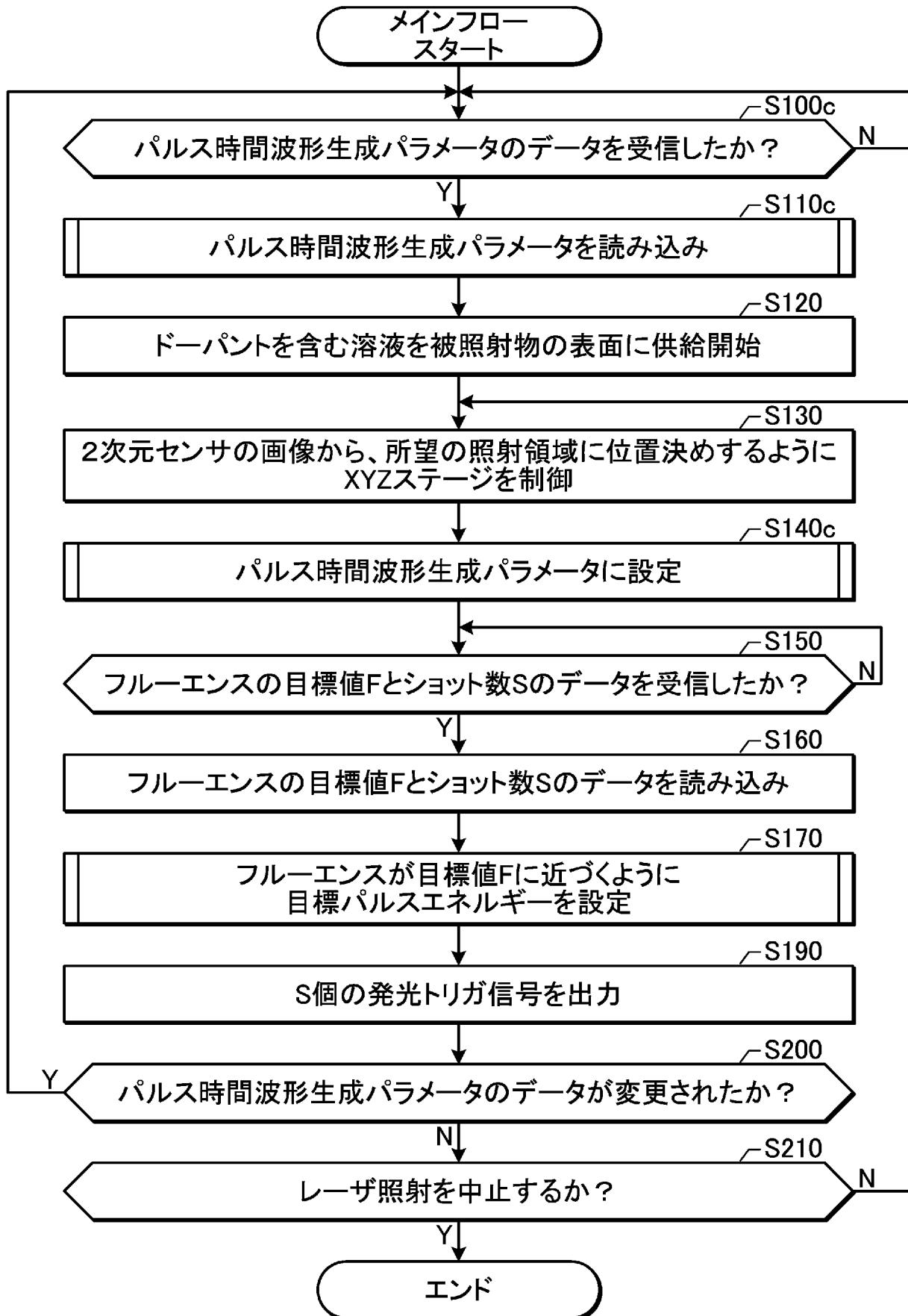
[図17]



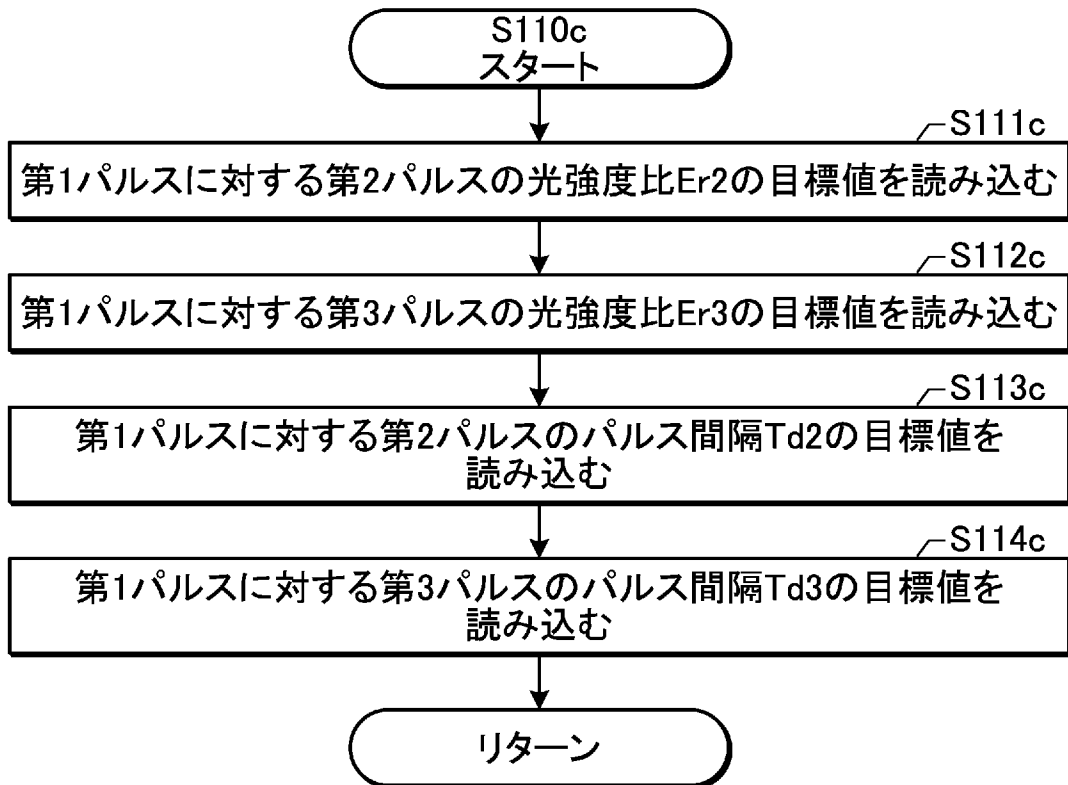
[図18]



[図19]



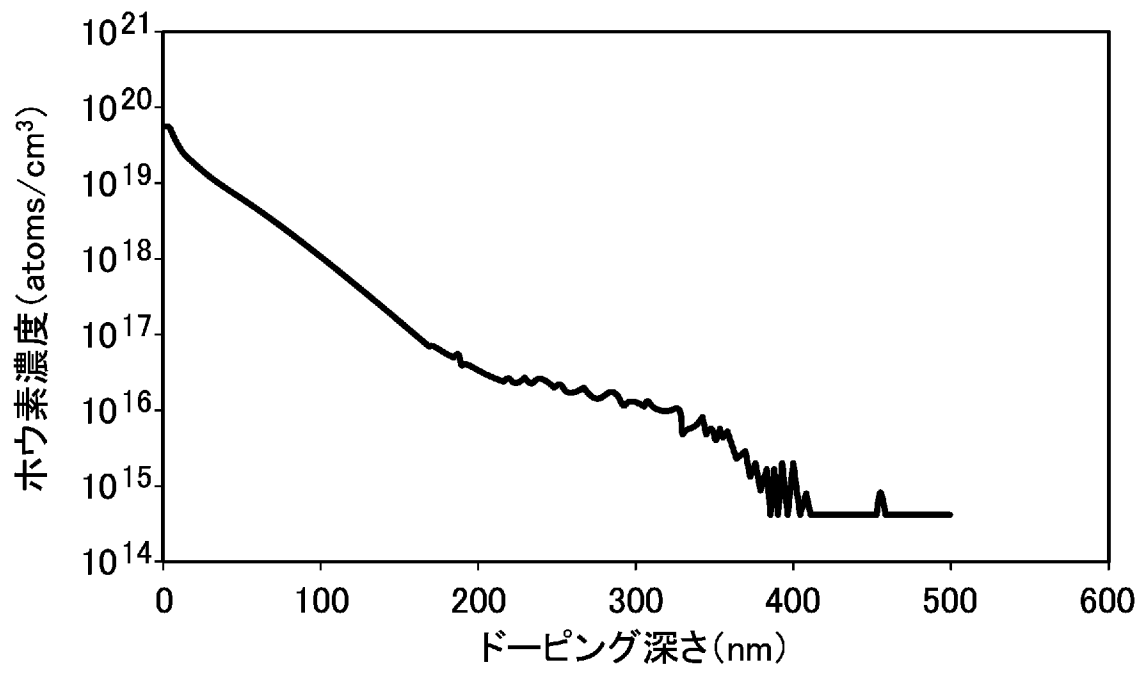
[図20A]



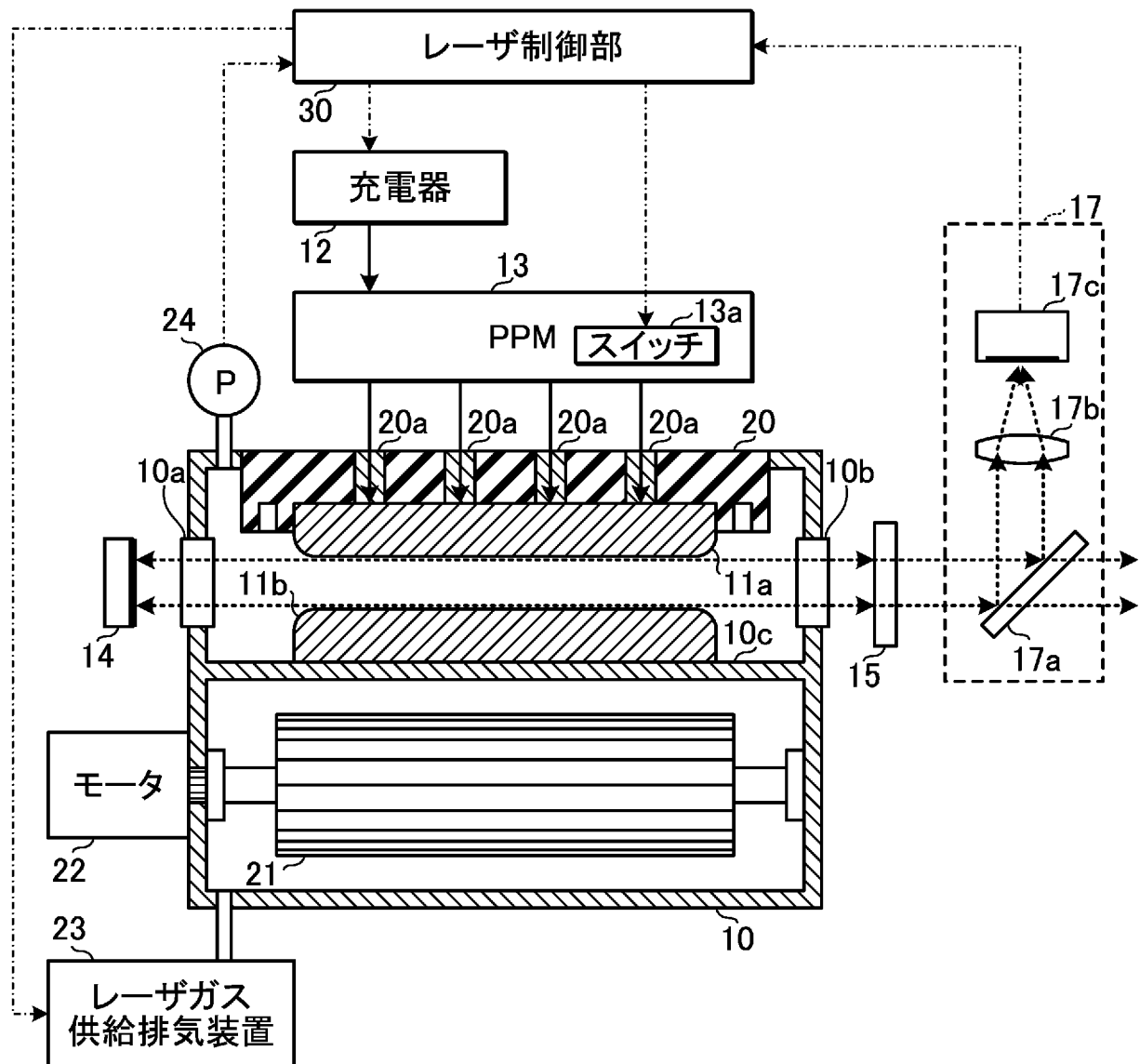
[図20B]



[図21]

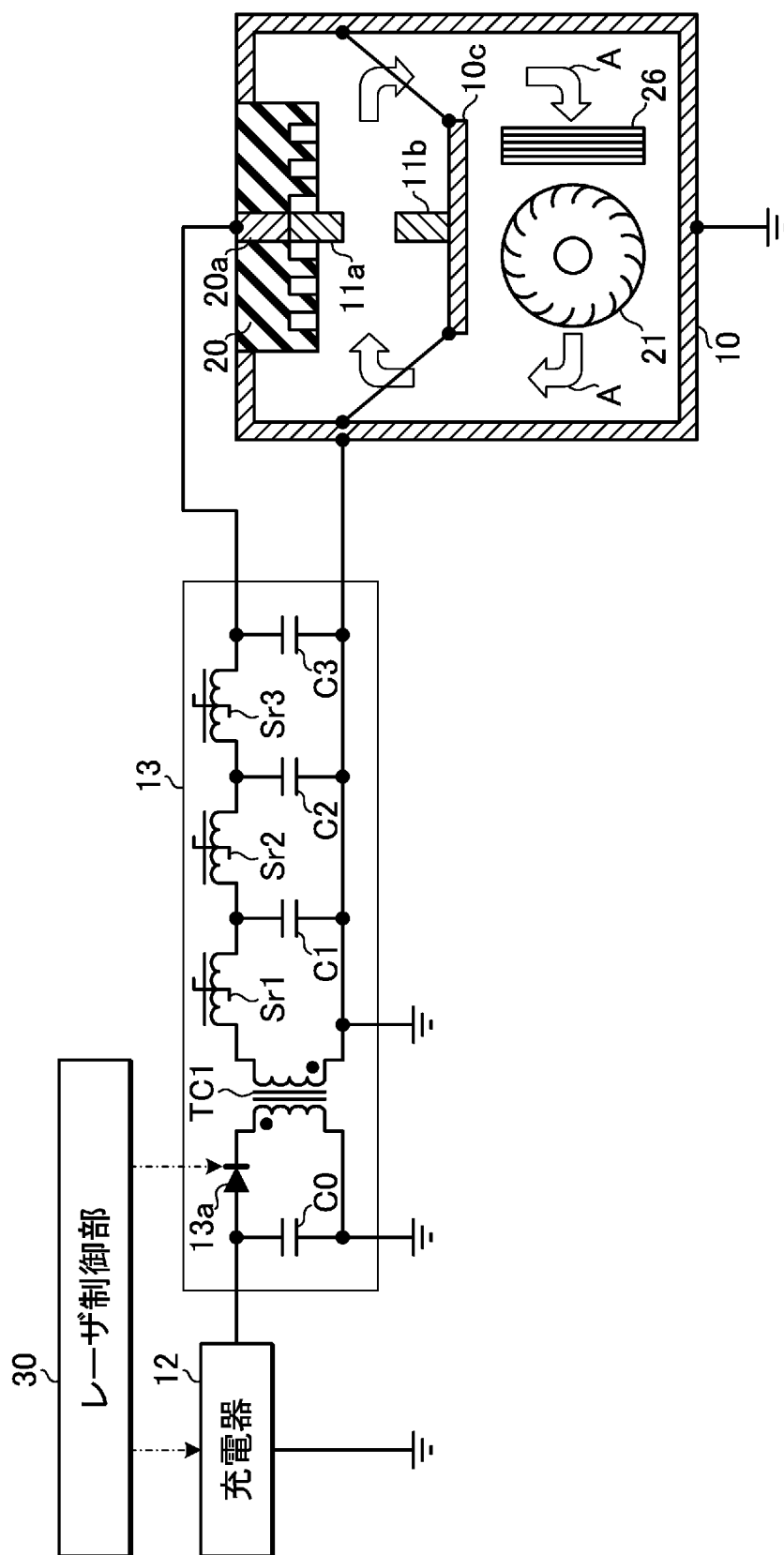


2

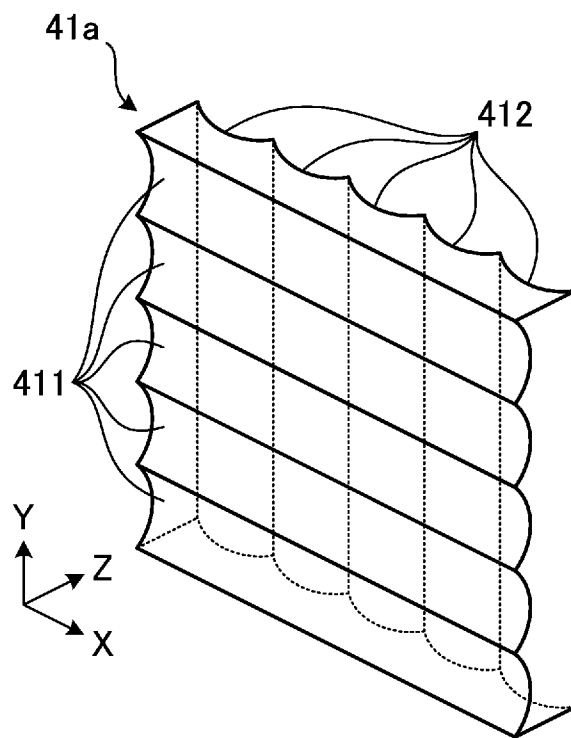


[図23]

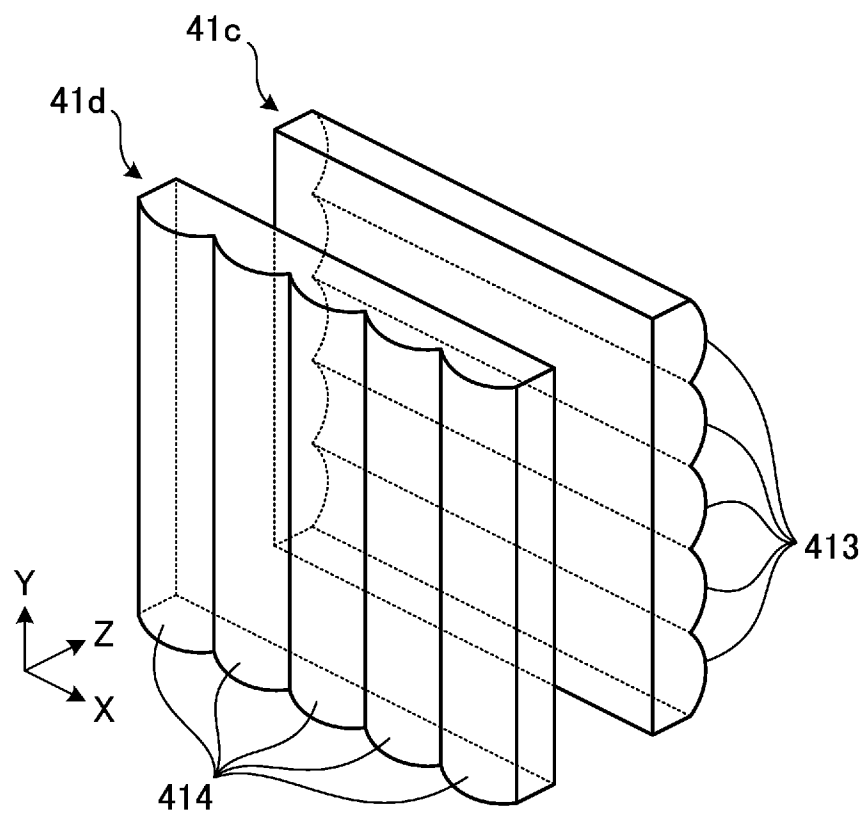
21



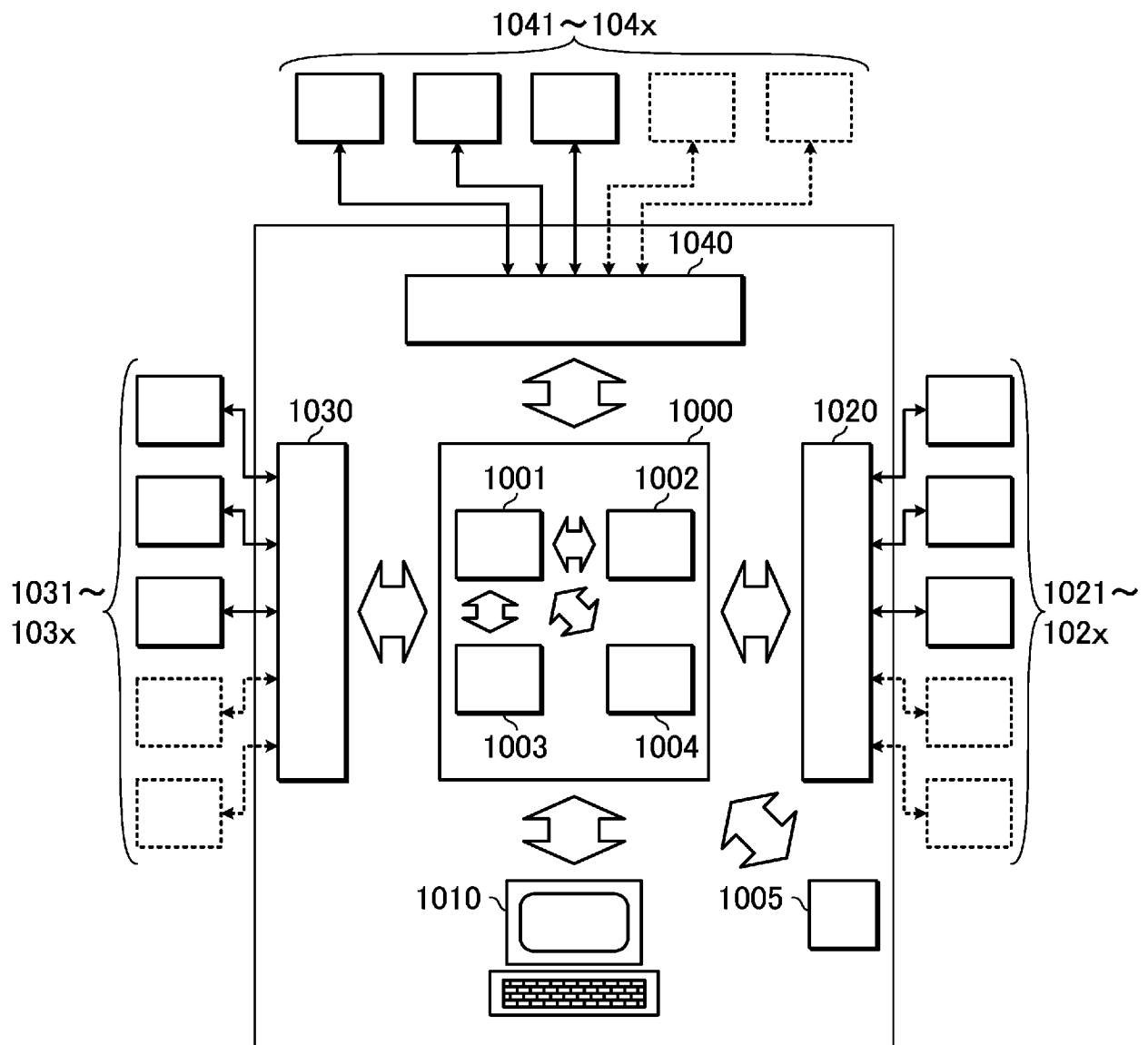
[図24]



[図25]



[図26]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2015/058709

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER H01L21/265(2006.01)i, H01L21/22(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) H01L21/265, H01L21/22		
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 1996-2015 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2015 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2015		
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.
X Y	JP 2010-525554 A (Fraunhofer-Gesellschaft zur Forderung der Angewandten Forschung e.V.), 22 July 2010 (22.07.2010), claims; paragraphs [0001], [0038] to [0049] & US 2010/0144079 A1 & WO 2008/107194 A2 & EP 2134887 A1 & DE 102007010872 A1 & AT 510044 T & ES 2364602 T	1, 13 2-12
Y	KOJI NISHI et al., Phosphorus Doping into 4H- SiC by Irradiation of Excimer Laser in Phosphoric Solution, JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 2013.06.20, vol.52, no.6, p06GF02-1-4	2-12
☒ 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 02 June 2015 (02.06.15)		Date of mailing of the international search report 09 June 2015 (09.06.15)
Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan		Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2015/058709

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	Daichi MARUI et al., Aluminum Doping of 4H-SiC by Irradiation of Excimer Laser in Aluminum Chloride Solution, JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 2014.05.21, vol.53, p.06JF03-1-4	2-12
Y	WO 2014/156818 A1 (Kyushu University), 02 October 2014 (02.10.2014), claims; paragraphs [0009] to [0010], [0068] to [0077]; fig. 5 (Family: none)	3,7
Y	JP 2007-123300 A (Toyota Motor Corp.), 17 May 2007 (17.05.2007), claims; paragraphs [0007] to [0008], [0018] to [0023]; fig. 1 to 4 (Family: none)	4-5
Y	JP 4387091 B2 (Semiconductor Energy Laboratory Co., Ltd.), 09 October 2009 (09.10.2009), paragraphs [0046], [0050] & US 2005/0003594 A1	9,11-12

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. H01L21/265(2006.01)i, H01L21/22(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 (IPC)) Int.Cl. H01L21/265, H01L21/22			
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 1971-2015年 日本国実用新案登録公報 1996-2015年 日本国登録実用新案公報 1994-2015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	
X Y	JP 2010-525554 A (フラウンホーファー・ゲゼルシャフト・ツール・フェルデルング・デア・アンゲヴァンテン・フォルシュング・エー・ファウ) 2010.07.22, 特許請求の範囲, 段落【0001】、【0038】-【0049】 & US 2010/0144079 A1 & WO 2008/107194 A2 & EP 2134887 A1 & DE 102007010872 A1 & AT 510044 T & ES 2364602 T	1, 13 2-12	
Y	KOJI NISHI et al., Phosphorus Doping into 4H-SiC by Irradiation of Excimer Laser in Phosphoric Solution, JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 2013.06.20, 第52巻, 第6号, p06GF02-1-4	2-12	
☒ 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 02.06.2015		国際調査報告の発送日 09.06.2015	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号100-8915 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) 桑原 清	50 9375
		電話番号 03-3581-1101 内線 3559	

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
Y	Daichi MARUI et al., Aluminum Doping of 4H-SiC by Irradiation of Excimer Laser in Aluminum Chloride Solution, JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 2014.05.21, 第53巻, p.06JF03-1-4	2-12
Y	WO 2014/156818 A1 (国立大学法人九州大学) 2014.10.02, 請求の範囲, 段落【0009】 - 【0010】, 【0068】 - 【0077】, 第5図 (ファミリーなし)	3, 7
Y	JP 2007-123300 A (トヨタ自動車株式会社) 2007.05.17, 特許請求の範囲, 段落【0007】 - 【0008】, 【0018】 - 【0023】, 第1-4図 (ファミリーなし)	4-5
Y	JP 4387091 B2 (株式会社半導体エネルギー研究所) 2009.10.09, 段落【0046】, 【0050】 & US 2005/0003594 A1	9, 11-12