

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2024年3月21日(21.03.2024)



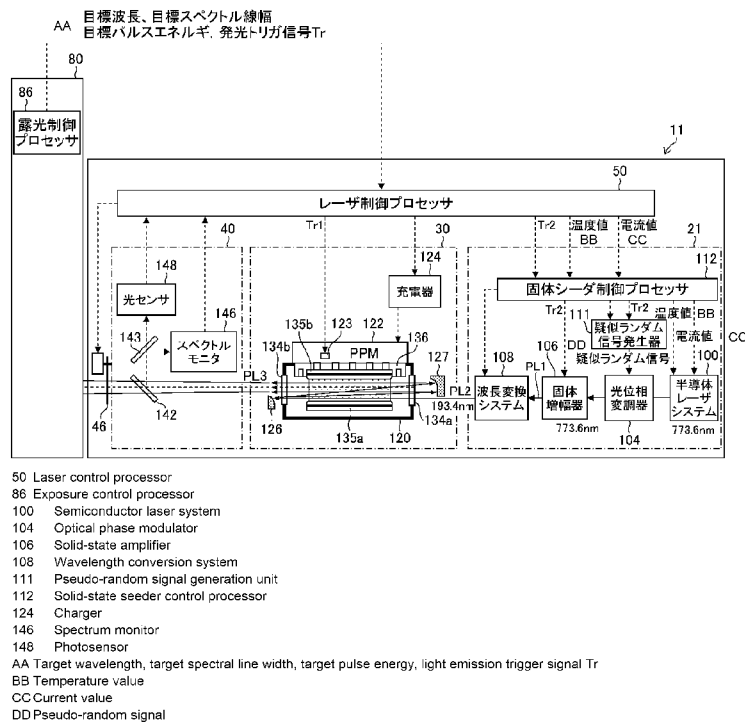
(10) 国際公開番号

WO 2024/057458 A1

- (51) 国際特許分類:
H01S 5/0683 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2022/034458
- (22) 国際出願日: 2022年9月14日(14.09.2022)
- (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: 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: 野極 誠二(NOGIWA, Seiji); 〒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: 松浦 憲三(MATSUURA, Kenzo); 〒1600023 東京都新宿区西新宿一丁目8番1号 新宿ビルディング5階 新都心国際特許事務所 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, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, 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,

(54) Title: LASER DEVICE AND METHOD FOR MANUFACTURING ELECTRONIC DEVICE

(54) 発明の名称: レーザ装置及び電子デバイスの製造方法



(57) Abstract: A laser device comprising a semiconductor laser that emits continuous light, a first amplifier that amplifies the continuous light and converts the continuous light into pulsed light in synchronization with a light emission trigger signal received from an external device, an optical phase modulator disposed on the optical path of the continuous light between the semiconductor laser and the first amplifier, a modulation signal generator that outputs a modulation signal to be supplied to the optical phase modulator, and a processor that controls the modulation signal generator, wherein the

[続葉有]

SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, 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:

一 国際調査報告 (条約第21条(3))

processor causes the modulation signal generator to generate modulation signals with a uniform pattern synchronized with the light emission trigger signal and supplies the modulation signals with the uniform pattern to the optical phase modulator to thereby modulate the wavelength of the continuous light within a time corresponding to one pulse of the pulsed light and adjust the spectral line width of the pulsed light.

(57) 要約: レーザ装置は、連続光を出射する半導体レーザと、連続光を増幅し、外部装置から受信する発光トリガ信号に同期して連続光をパルス光に変換する第1の増幅器と、半導体レーザと第1の増幅器との間の連続光の光路に配置された光位相変調器と、光位相変調器に与える変調信号を出力する変調信号生成器と、変調信号生成器を制御するプロセッサと、を備え、プロセッサは、発光トリガ信号と同期した同一パターンの変調信号を変調信号生成器に生成させ、同一パターンの変調信号を光位相変調器に与えることにより、パルス光の1パルスに相当する時間内に連続光の波長を変調し、パルス光のスペクトル線幅を調整する。

明 細 書

発明の名称： レーザ装置及び電子デバイスの製造方法

技術分野

[0001] 本開示は、レーザ装置及び電子デバイスの製造方法に関する。

背景技術

[0002] 近年、半導体露光装置においては、半導体集積回路の微細化及び高集積化につれて、解像力の向上が要請されている。このため、露光用光源から放出される光の短波長化が進められている。例えば、露光用のガスレーザ装置としては、波長約248nmのレーザ光を出力するKrFエキシマレーザ装置、並びに波長約193nmのレーザ光を出力するArFエキシマレーザ装置が用いられる。

[0003] KrFエキシマレーザ装置及びArFエキシマレーザ装置の自然発振光のスペクトル線幅は、350～400pmと広い。そのため、KrF及びArFレーザ光のような紫外線を透過する材料で投影レンズを構成すると、色収差が発生してしまう場合がある。その結果、解像力が低下し得る。そこで、ガスレーザ装置から出力されるレーザ光のスペクトル線幅を、色収差が無視できる程度となるまで狭帯域化する必要がある。そのため、ガスレーザ装置のレーザ共振器内には、スペクトル線幅を狭帯域化するために、狭帯域化素子（エタロンやグレーティング等）を含む狭帯域化モジュール（Line Narrowing Module：LNM）が備えられる場合がある。以下では、スペクトル線幅が狭帯域化されるガスレーザ装置を狭帯域化ガスレーザ装置という。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：米国特許第5760408号

特許文献2：米国特許出願公開第2021／0226411号

概要

[0005] 本開示の1つの観点に係るレーザ装置は、連続光を出射する半導体レーザ

と、連続光を増幅し、外部装置から受信する発光トリガ信号に同期して前記連続光をパルス光に変換する第1の増幅器と、半導体レーザと第1の増幅器との間の連続光の光路上に配置された光位相変調器と、光位相変調器に与える変調信号を出力する変調信号生成器と、変調信号生成器を制御するプロセッサと、を備え、プロセッサは、発光トリガ信号と同期した同一パターンの変調信号を変調信号生成器に生成させ、同一パターンの変調信号を光位相変調器に与えることにより、パルス光の1パルスに相当する時間内に連続光の波長を変調し、パルス光のスペクトル線幅を調整する。

[0006] 本開示の他の1つの観点に係る電子デバイスの製造方法は、連続光を射出する半導体レーザと、連続光を増幅し、外部装置から受信する発光トリガ信号に同期して前記連続光をパルス光に変換する第1の増幅器と、半導体レーザと第1の増幅器との間の連続光の光路上に配置された光位相変調器と、光位相変調器に与える変調信号を出力する変調信号生成器と、変調信号生成器を制御するプロセッサと、第1の増幅器から出力された第1のパルスレーザ光の波長を変換して第2のパルスレーザ光を出力する波長変換システムと、を備え、プロセッサは、発光トリガ信号と同期した同一パターンの変調信号を変調信号生成器に生成させ、同一パターンの変調信号を光位相変調器に与えることにより、パルス光の1パルスに相当する時間内に連続光の波長を変調し、パルス光のスペクトル線幅を調整するレーザ装置によって紫外線波長のレーザ光を生成し、レーザ光を露光装置に出力し、電子デバイスを製造するために、露光装置内で感光基板にレーザ光を露光することを含む。

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、比較例に係るレーザ装置の構成を概略的に示す。

[図2]図2は、複数パルスのうちの第11番目のパルスと第14番目のパルスのそれぞれのタイミングで重畳される白色雑音スペクトル波形と、20パルス平均の白色雑音スペクトル波形との例を示すグラフである。

[図3]図3は、第1番目のパルスから第5番目のパルスのそれぞれのパルスの光スペクトル波形と、26パルス平均の光スペクトル波形との例を示すグラフである。

[図4]図4は、実施形態1に係るレーザ装置の構成を概略的に示す。

[図5]図5は、スペクトル線幅の制御例1を示すフローチャートである。

[図6]図6は、シフトレジスタを用いた疑似ランダム信号発生器の例を示す。

[図7]図7は、図6に示す疑似ランダム信号発生器の真理値表である。

[図8]図8は、実施形態1の固体シードにおけるタイムチャートの例である。

[図9]図9は、実施形態2に係るレーザ装置の構成を概略的に示す。

[図10]図10は、実施形態2の固体シードにおけるタイムチャートの例である。

[図11]図11は、光位相変調器に周波数 f_m の正弦波を印加して変調した際のスペクトル形状の例を示すグラフである。

[図12]図12は、周波数掃引幅とスペクトル線幅との関係を示すグラフである。

[図13]図13は、スペクトル線幅の制御例2を示すフローチャートである。

[図14]図14は、変形例1に係る固体シードの構成を概略的に示す。

[図15]図15は、変形例2に係る固体シードの構成を概略的に示す。

[図16]図16は、露光装置の構成を概略的に示す。

実施形態

[0008] ー目次ー

1. 比較例に係るレーザ装置の概要

1. 1 構成

1. 2 動作

1. 3 課題

2. 実施形態1

2. 1 構成

2. 2 動作

- 2. 3 疑似ランダム信号発生器の具体例
- 2. 4 タイムチャートの例
- 2. 5 作用・効果
- 2. 6 その他
- 3. 実施形態 2
 - 3. 1 構成
 - 3. 2 動作
 - 3. 3 光スペクトルの形状変化の説明
 - 3. 4 作用・効果
- 4. 固体シーダの変形例 1
 - 4. 1 構成
 - 4. 2 動作
 - 4. 3 その他
- 5. 固体シーダの変形例 2
 - 5. 1 構成
 - 5. 2 動作
- 6. 他の変形例
- 7. 電子デバイスの製造方法について
- 8. その他

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。

[0009] 1. 比較例に係るレーザ装置の概要

1. 1 構成

図 1 は、比較例に係るレーザ装置 10 の構成を概略的に示す。本開示の比

較例とは、出願人のみによって知られていると出願人が認識している形態であって、出願人が自認している公知例ではない。

- [0010] レーザ装置 10 は、マスターオシレータ (Master Oscillator : MO) としての固体シード 20 と、パワーアンプ (Power Amplifier : PA) としてのエキシマ増幅器 30 と、モニタモジュール 40 と、出射口シャッタ 46 と、レーザ制御プロセッサ 50 と、を備える。
- [0011] 固体シード 20 は、連続 (Continuous Wave : CW) 光を出力する半導体レーザシステム 100 と、光位相変調器 104 と、固体増幅器 106 と、波長変換システム 108 と、白色雑音発生器 110 と、固体シード制御プロセッサ 112 と、を含む。
- [0012] 半導体レーザシステム 100 は、波長約 773.6 nm の CW レーザ光を出力する分布帰還型 (Distributed Feedback : DFB) の半導体レーザを含む。半導体レーザシステム 100 は、半導体レーザの温度値及び／又は半導体レーザの素子を流れる電流値を制御することによって、発振波長が変更可能な構成である。
- [0013] 光位相変調器 104 は、半導体レーザシステム 100 から出力された CW 光の位相を変調する。白色雑音発生器 110 は、光位相変調器 104 に変調信号を重畳する。
- [0014] 固体増幅器 106 は、光位相変調器 104 の出力光をパルス光化して増幅する。固体増幅器 106 は、半導体光増幅器 (Semiconductor Optical Amplifier : SOA) と、チタンサファイヤ結晶と、ポンピング用パルスレーザと、を含む。SOA にパルス電流を流すことによって、SOA は光位相変調器 104 から出力された CW 光をパルス増幅し、パルス増幅されたパルスレーザ光を出力する。チタンサファイヤ結晶は、SOA でパルス増幅されたパルスレーザ光の光路上に配置される。ポンピング用パルスレーザは、YLF レーザの第 2 高調波光を出力するレーザ装置である。YLF (イットリウムリチウムフルオライド) は、化学式 LiYF_4 で表される固体レーザ結晶である。なお、固体増幅器 106 は、チタンサファイヤ結晶を用いる増幅器の代わ

りに、又はこれと組み合わせてファイバ増幅器を含む構成であってもよい。

[0015] 波長変換システム108は、非線形結晶を含み、入射したパルスレーザ光を波長変換して第2高調波発生を2回行い、入射したパルスレーザ光の4倍の光周波数を有するパルス光を発生させる波長変換システムである。波長変換システム108は、例えば、LBO結晶と、KBBF結晶と、を含む。「LBO」は化学式 LiB_3O_5 で表される。「KBBF」は化学式 $\text{KB e}_2\text{B O}_3\text{F}_2$ で表される。波長変換システム108は、固体増幅器106から出力されたパルスレーザ光PL1を波長変換し、波長約193.4nmのパルスレーザ光PL2を出力する。

[0016] 固体シーダ制御プロセッサ112は、固体シーダ20が出力するレーザ光の波長、パワー、パルス波形、スペクトル線幅等を制御する。固体シーダ制御プロセッサ112は、レーザ制御プロセッサ50からの入力に基づいて、半導体レーザシステム100と、固体増幅器106と、波長変換システム108と、白色雑音発生器110と、を制御する。本明細書においてプロセッサとは、制御プログラムが記憶された記憶装置と、制御プログラムを実行するCPU (Central Processing Unit) と、を含む処理装置である。プロセッサは本開示に含まれる各種処理を実行するために特別に構成又はプログラムされている。

[0017] エキシマ増幅器30は、チャンバ120と、パルスパワーモジュール (PPM) 122と、充電器124と、凸面ミラー126と、凹面ミラー127と、を含む。チャンバ120は、ウインドウ134a、134bと、1対の電極135a、135bと、電気絶縁部材136と、を含む。チャンバ120の中には、図示しないガス供給装置からArFレーザガスが供給される。ArFレーザガスは、Arガスと、 F_2 ガスと、Neガス、とを含む。

[0018] PPM122は、スイッチ123と、図示しない充電コンデンサと、を含む。充電器124は、PPM122に供給するための電気エネルギーを保持する。充電器124は図示しない充電コンデンサに接続される。充電器124は、レーザ制御プロセッサ50からの指令に従い、PPM122の充電コン

デンサを充電する。

- [0019] PPM122は、電気絶縁部材136中のフィードスルーを介してチャンバ120内の電極135bと接続される。電極135aは接地電位に接続される。
- [0020] ウィンドウ134a、134bは、電極135a、135b間での放電励起により、増幅されたパルスレーザ光が通過するように配置される。
- [0021] 凸面ミラー126と凹面ミラー127とは、波長変換システム108から出力されたパルスレーザ光PL2が電極135a、135b間の放電空間を3回通過してビームが拡大するように配置される。
- [0022] モニタモジュール40は、ビームスプリッタ142、143と、スペクトルモニタ146と、光センサ148と、を含む。ビームスプリッタ142は、エキシマ増幅器30から出力されたパルスレーザ光PL3の光路上において、ビームスプリッタ142で反射したパルスレーザ光PL3がビームスプリッタ143に入射するように配置される。なお、ビームスプリッタ142は、モニタモジュール40の外側に配置されてもよい。
- [0023] ビームスプリッタ143は、ビームスプリッタ143で反射したパルスレーザ光PL3がスペクトルモニタ146に入射するように、かつビームスプリッタ143を透過したパルスレーザ光PL3が光センサ148に入射するように配置される。
- [0024] スペクトルモニタ146は、入射したパルスレーザ光PL3のスペクトルをモニタし、入射したパルスレーザ光PL3の発振波長を検出する。スペクトルモニタ146は、例えばエタロン分光器等であってよい。エタロン分光器は、サンプル光を拡散させる拡散板と、エタロンと、エタロンの出射側に配置された集光レンズと、干渉縞のパターンを検出するために集光レンズの焦点面に配置されたフォトダイオードアレイと、を含み、干渉縞の径を計測することによって波長を検出できる。
- [0025] 光センサ148は、入射したパルスレーザ光PL3のパルスエネルギーを検出する。光センサ148は、例えばフォトダイオード等であってよい。

[0026] 出射口シャッタ 46 は、レーザ装置 10 から外部に出力されるパルスレーザ光 PL3 の光路上に配置され、外部へのパルスレーザ光 PL3 の出力と遮光とを切り替え可能な構成となっている。ビームスプリッタ 142 を透過したパルスレーザ光 PL3 は、出射口シャッタ 46 を介してレーザ装置 10 から出射される。

[0027] レーザ装置 10 は図示しないビームデリバリユニット (BDU) を介して露光装置 80 と接続される。BDU は、レーザ装置 10 から露光装置 80 へパルスレーザ光 PL3 を伝送する光学系である。レーザ装置 10 から出射されたパルスレーザ光 PL3 は、露光装置 80 に入射する。

[0028] 露光装置 80 は、露光制御プロセッサ 86 を含む。露光制御プロセッサ 86 は、露光装置 80 を制御する。また、露光制御プロセッサ 86 は、レーザ制御プロセッサ 50 と接続される。露光装置 80 は、本開示における「外部装置」の一例である。

[0029] 1. 2 動作

露光制御プロセッサ 86 は、目標波長と、目標スペクトル線幅と、目標パルスエネルギーと、を含む各種パラメータをレーザ制御プロセッサ 50 に送信する。また、露光制御プロセッサ 86 は、発光トリガ信号 Tr をレーザ制御プロセッサ 50 に送信する。レーザ制御プロセッサ 50 は、露光制御プロセッサ 86 から受信した各種パラメータ及び発光トリガ信号 Tr に基づき、レーザ装置 10 を制御する。レーザ制御プロセッサ 50 は、発光トリガ信号 Tr に同期したトリガ信号 Tr1、Tr2 を出力する。トリガ信号 Tr1 は PPM122 のスイッチ 123 に入力され、トリガ信号 Tr2 は固体増幅器 106 に入力される。

[0030] 固体シーダ 20 の動作は、次のとおりである。半導体レーザシステム 100 から波長約 773.6 nm の CW レーザ光が出力される。この CW レーザ光は、光位相変調器 104 により位相変調され、光スペクトルの形状が変化する。光スペクトルの形状が変化した CW レーザ光は、トリガ信号 Tr2 のタイミングで固体増幅器 106 内の SOA にパルス電流を流すと、パルス増

幅され、S O Aの下流に接続されたファイバ増幅器を含めた固体増幅器 1 0 6 にてさらに増幅され、光スペクトルの形状が変化したパルスレーザ光 P L 1 が出力される。

[0031] この増幅されたパルスレーザ光 P L 1 は波長変換システム 1 0 8 に入射して、波長約 1 9 3 . 4 n m の第 4 高調波光に波長変換される。

[0032] 固体シーダ 2 0 から出力されるパルスレーザ光 P L 2 の波長の可変範囲は、エキシマ増幅器 3 0 の増幅波長帯域である約 1 9 3 . 2 n m ~ 1 9 3 . 5 n m である。

[0033] 固体シーダ 2 0 から出力されたパルスレーザ光 P L 2 がエキシマ増幅器 3 0 のチャンバ 1 2 0 の放電空間に入射するのと同期して放電が発生するように、P P M 1 2 2 のスイッチ 1 2 3 にトリガ信号 T r 1 が入力される。その結果、固体シーダ 2 0 から出力されたパルスレーザ光 P L 2 はエキシマ増幅器 3 0 で 3 パス増幅される。

[0034] エキシマ増幅器 3 0 によって増幅されたパルスレーザ光 P L 3 は、モニタモジュール 4 0 のビームスプリッタ 1 4 2 とビームスプリッタ 1 4 3 とによってサンプルされ、スペクトルモニタ 1 4 6 及び光センサ 1 4 8 により光スペクトルとパルスエネルギーとが計測される。

[0035] エキシマ増幅器 3 0 から出力されたパルスレーザ光 P L 3 の計測された光スペクトルから、中心波長が目標値である目標波長に近づくように、レーザ制御プロセッサ 5 0 は固体シーダ制御プロセッサ 1 1 2 に中心波長の制御信号を送る。固体シーダ制御プロセッサ 1 1 2 は、レーザ制御プロセッサ 5 0 から取得した制御信号に基づき、半導体レーザシステム 1 0 0 に温度値及び電流値の指令値を送る。半導体レーザシステム 1 0 0 は固体シーダ制御プロセッサ 1 1 2 から取得する温度値及び電流値の指令値に基づき半導体レーザシステム 1 0 0 の半導体レーザの温度や電流を変更して発振波長を変更する。

[0036] また、エキシマ増幅器 3 0 から出力されたパルスレーザ光 P L 3 の計測された光スペクトルから、スペクトル線幅が目標値である目標スペクトル線幅

に近づくように、レーザ制御プロセッサ50は固体シード制御プロセッサ112にスペクトル線幅の制御信号を送る。固体シード制御プロセッサ112は、レーザ制御プロセッサ50から取得した制御信号に基づき、白色雑音発生器110から出力する変調信号の信号帯域幅やパワーを変更する。

[0037] 光位相変調器104は、白色雑音発生器110からの出力の信号帯域幅とパワーとにより光位相変調器104から出力されるレーザ光の光スペクトルを変化させる。

[0038] さらに、レーザ制御プロセッサ50は、エキシマ増幅器30から出力されたパルスレーザ光PL3の計測されたパルスエネルギーが目標値である目標パルスエネルギーに近づくように、充電器124の充電電圧を変更する。

[0039] 1. 3 課題

半導体レーザの光スペクトルは非常に狭く、そのまま深紫外（DUV）光に波長変換しても露光装置80が要求するスペクトル線幅は得られない。半導体レーザの出力光を位相変調すると、元のスペクトルの周りに変調に起因したバンド（スペクトルの盛り上がり）が生ずる。変調信号に白色性の雑音を選べば位相変調された光スペクトルは白色性雑音の信号帯域幅や信号強度に応じたガウシアン形状のスペクトルになり得る。白色性雑音の信号帯域幅や信号強度を適切に選択することで光スペクトル線幅を目標の幅にすることが可能である。

[0040] しかし、パルス光である場合、白色雑音発生器110においては、パルス幅（例えば、約30nsec）に相当する様な極めて短い時間内では光位相変調器104へ重畳する信号のスペクトル分布は、理想のガウシアン分布ではなく、多峰性の複雑な形を持つことやパルス毎に形状が異なることがわかった（図2参照）。そのために、位相変調後にパルス化された光スペクトルも複雑な形状となり、パルス毎にも光スペクトル形状は変化した（図3参照）。したがって、パルス毎のスペクトル線幅は安定しないという問題があった。

[0041] 図2は、複数パルスのうちの第11番目のパルスと第14番目のパルスの

それぞれのタイミングで重畳される白色雑音スペクトル波形と、20パルス平均の白色雑音スペクトル波形との例を示すグラフである。図2に示すように、白色雑音スペクトル波形は、平均化するとガウシアン形状に近いが、個別には複雑な形状を有し、パルス毎に大きく変化している。

[0042] 図3は、第1番目のパルスから第5番目のパルスのそれぞれのパルスの光スペクトル波形と、26パルス平均の光スペクトル波形との例を示すグラフである。図3に示すように、位相変調後の光スペクトル波形は複雑な形状を有し、パルス毎に光スペクトル形状は変化している。

[0043] 2. 実施形態1

2. 1 構成

図4は、実施形態1に係るレーザ装置11の構成を概略的に示す。図4に示す構成について、図1と異なる点を説明する。

[0044] レーザ装置11は、図1の固体シダ20の代わりに固体シダ21を含む。固体シダ21は、白色雑音発生器110の代わりに疑似ランダム信号発生器111を含む。疑似ランダム信号発生器111は、光位相変調器104に変調信号を重畳する。疑似ランダム信号発生器111は、例えば多段のシフトレジスタとデジタルフィルタとで構成されている。その他の構成は、図1と同様であってよい。

[0045] 疑似ランダム信号発生器111は本開示における「変調信号生成器」の一例である。固体増幅器106は本開示における「第1の増幅器」の一例であり、固体増幅器106から出力されるパルスレーザ光PL1は本開示における「第1のパルスレーザ光」の一例である。波長変換システム108から出力されるパルスレーザ光PL2は本開示における「第2のパルスレーザ光」の一例である。波長約193.2nm~193.5nmの範囲の波長は本開示における「紫外線波長」の一例である。エキシマ増幅器30は本開示における「第2の増幅器」の一例である。

[0046] 2. 2 動作

固体シダ21の半導体レーザから波長約773.6nmのCWレーザ光

が出力される。固体シーダ制御プロセッサ 112 は、疑似ランダム信号発生器 111 内のシフトレジスタへのリセット信号と、トリガ信号 $Tr2$ と同じタイミング信号とを疑似ランダム信号発生器 111 に送信する。

[0047] 疑似ランダム信号発生器 111 は、固体シーダ制御プロセッサ 112 からシフトレジスタへのリセット信号を受け取り、トリガ信号 $Tr2$ のタイミング信号により、トリガ信号 2 に同期して同一パターンの疑似ランダム信号を発生させる。疑似ランダム信号は、後段の可変帯域フィルタにより高い周波数成分の不要なスペクトル成分が除去される。

[0048] 光位相変調器 104 は、疑似ランダム信号発生器 111 からの適切な周波数帯域に制限された疑似ランダム信号により CW レーザ光を位相変調して光スペクトルの形状を変化させる。

[0049] 可変帯域フィルタの遮断周波数を高周波数側に変更すると光のスペクトル線幅は広くなり、低周波数側に変更すると狭くなる。また、疑似ランダム信号発生器 111 内のシフトレジスタへのリセット信号を入れるタイミング等を変えることでも疑似ランダム信号の波形やスペクトル形状が変わり、光位相変調器 104 から出力されるレーザ光の光スペクトルも変わる。

[0050] スペクトル線幅を制御する場合は、計測したスペクトル線幅に基づいて疑似ランダム信号の周波数を調整する。具体的には、可変帯域フィルタの遮断周波数を調整する。

[0051] 図 5 は、スペクトル線幅の制御例を示すフローチャートである。ステップ S11 において、レーザ制御プロセッサ 50 は、モニタモジュール 40 のスペクトルモニタ 146 を用いてパルスレーザ光 PL3 のスペクトル線幅を計測する。スペクトルモニタ 146 は本開示における「計測器」の一例である。

[0052] ステップ S12 において、レーザ制御プロセッサ 50 は、計測されたスペクトル線幅が目標の範囲内か否かを判定する。

[0053] ステップ S12 の判定結果が YES 判定である場合、レーザ制御プロセッサ 50 はステップ S11 に戻る。ステップ S12 の判定結果が NO 判定であ

る場合、レーザ制御プロセッサ50は、ステップS13に移行する。

[0054] ステップS13において、レーザ制御プロセッサ50は、固体シード制御プロセッサ112に指令を送り、固体シード制御プロセッサ112を介して光位相変調器104を制御する疑似ランダム信号の周波数を調整する。ステップS13の後、レーザ制御プロセッサ50はステップS11に戻る。

[0055] その他の動作は、図1で説明した比較例に係るレーザ装置10の動作と同様であってよい。レーザ制御プロセッサ50及び固体シード制御プロセッサ112は本開示における「プロセッサ」の一例である。

[0056] 2. 3 疑似ランダム信号発生器の具体例

図6は、シフトレジスタ160を用いた疑似ランダム信号発生器111の例を示す。ここでは、シフトレジスタ160の例として4個のDフリップフロップFF1～FF4を用いた簡単な疑似ランダム信号発生器111を示す。

[0057] 疑似ランダム信号発生器111は、DフリップフロップFF1～FF4と、排他的論理和（XOR）回路162と、可変帯域フィルタ164と、増幅器166と、を含む。図6に示すように、4個のDフリップフロップFF1～FF4が直列に接続され、3段目のDフリップフロップFF3のQ2出力と、4段目のDフリップフロップFF4のQ3出力とがXOR回路162への入力となり、XOR回路162の出力が1段目のDフリップフロップFF1に帰還される構成となっている。4段目のDフリップフロップFF4のQ3出力は可変帯域フィルタ164に入力され、可変帯域フィルタ164からの出力が増幅器166によって増幅されて出力される。可変帯域フィルタ164の通過帯域は、固体シード制御プロセッサ112からの制御信号によって制御される。

[0058] 図7は、図6に示す疑似ランダム信号発生器111の真理値表である。図示のように、疑似ランダム信号発生器111は、クロックを16回カウントするごとに（周期15）、同じランダムパターン（疑似ランダムパターン）を繰り返す。Q3のデジタル出力をフィルタで帯域制限している。Q3の「

0」又は「1」の配列が2進符号のランダムパターンとなる。

[0059] 図6及び図7に示す例は、周期が15の疑似ランダムパターンであるが、Dフリップフロップの個数やXOR回路を増やし、適切な位置から帰還することで、パターンの長さを $2^n - 1$ に増やすことができる。ここでnはDフリップフロップの個数と等しい。

[0060] クロックの周波数を上げることで、より高い周波数の帯域を持つ疑似ランダム信号を作成可能である。

[0061] 2. 4 タイムチャートの例

図8は、実施形態1の固体シダ21におけるタイムチャートの例である。図8の最上段F8Aはトリガ信号Tr2の状態を示す。図8の上から2段目F8Bは、可変帯域フィルタ164通過後の疑似ランダム信号の波形を示す。図8の上から3段目F8Cは、SOA注入電流のタイミングを示す。図8の最下段F8Dは、SOAの出力波形を示す。

[0062] 図8における時間Taは、SOAの電流注入増加によりパルス増幅される時間である。この時間Taは、1パルスに相当する時間となり得る。目的の時間波形となる様な疑似ランダム信号の変調を受けた光がSOAの注入電流の増加による増幅のタイミングに合う様に、トリガ信号Tr2に対する第1の遅延時間(delay1)を調整する。

[0063] トリガ信号Tr2のタイミングから第2の遅延時間(delay2)後にSOAにパルス電流(注入電流)を流す。delay2は、位相変調されたレーザ光がSOAに達し、SOAが増幅を開始するまでの時間とdelay1の時間との和である。

[0064] SOAの注入電流増加開始のタイミングから第3の遅延時間(delay3)後にSOAからパルス光が出力される。delay3は、SOAに入射した連続光がSOAでパルス化された後、SOA内を伝搬して遅延した時間である。

[0065] 図8に示すように、トリガ信号Tr2のタイミングからdelay1後の所定期間(概ね時間Taの期間)において生成される疑似ランダム信号は、毎回同じパターンの波形となる。

[0066] 2. 5 作用・効果

実施形態 1 によれば、パルス光の発生のタイミングと同期しているトリガ信号 $T_r 2$ に同期して同じパターンの疑似ランダム信号が生成され、光位相変調器 104 へ重畳されるため、毎パルス同一波形の変調信号が光位相変調器 104 へ重畳されることになり、重畳される信号のスペクトル形状も毎パルス同一となる。したがって、光位相変調器 104 から出力されるレーザ光の光スペクトルは毎パルス同一に変調されるため、光スペクトル形状は毎パルス同一となり、スペクトル線幅も毎パルス同一となり安定する。

[0067] 2. 6 その他

図 4 では、エキシマ増幅器 30 から出力されたパルスレーザ光 PL 3 の一部をサンプリングしてスペクトルモニタ 146 によってスペクトル線幅を計測する例を示したが、スペクトル線幅の計測は、固体増幅器 106 によってパルス増幅された後のパルスレーザ光について行われればよい。例えば、固体増幅器 106 と波長変換システム 108 との間の光路上にビームスプリッタを配置し、固体増幅器 106 から出力されたパルスレーザ光 PL 1 の一部をサンプリングしてスペクトルモニタ等の計測器に導く構成により、パルスレーザ光 PL 1 のスペクトル線幅を計測してもよい。

[0068] また、例えば、波長変換システム 108 とエキシマ増幅器 30 との間の光路上にビームスプリッタを配置して、波長変換システム 108 から出力されたパルスレーザ光 PL 2 の一部をサンプリングしてスペクトルモニタ等の計測器に導き、パルスレーザ光 PL 2 のスペクトル線幅を計測してもよい。

[0069] つまり、固体増幅器 106 よりも下流側を伝搬するパルスレーザ光 PL 1、PL 2、PL 3 のそれぞれは本開示における「第 1 の増幅器によりパルス増幅されたパルスレーザ光」の一例である。

[0070] また、実施形態 1 では、半導体レーザの CW 光を、SOA にパルス電流を流すことによってパルスレーザ光化しているが、パルスレーザ光を生成する方法はこの例に限定されない。例えば、半導体レーザの CW 光を、固体増幅器 106 のチタンサファイヤ結晶の励起光をパルス光で励起することによっ

てパルスレーザ光に増幅してもよい。

[0071] また、SOAの代わりに光シャッタによって光パルス化する構成であってもよい。光シャッタの例としては、EO (Electro Optical) ポケルスセルと、偏光子と、を組合せた光シャッタでもよいし、あるいはEO効果を用いたマッハツェンダー方式の光変調器でもよい。

[0072] 3. 実施形態2

3. 1 構成

図9は、実施形態2に係るレーザ装置12の構成を概略的に示す。図9に示す構成について、図1と異なる点を説明する。図2に示すレーザ装置12は、図1の固体シダ20の代わりに固体シダ22を含む。固体シダ22は、白色雑音発生器110の代わりに掃引周波数発生器180を含む。掃引周波数発生器180は、光位相変調器104に変調信号を重畳する。掃引周波数発生器180は、例えば、加える電圧によって発振周波数が変わる電圧制御発振器(VCO)で構成されている。掃引周波数発生器180は本開示における「変調信号生成器」の一例である。

[0073] また、固体シダ22は、光位相変調器104と固体増幅器106との間の光路上に光バンドパスフィルタ(BPF)182が配置される。その他の構成は、図1と同様であってよい。

[0074] 3. 2 動作

固体シダ22の半導体レーザから波長約773.6nmのCWレーザ光が出力される。固体シダ制御プロセッサ112は、トリガ信号Tr2を掃引周波数発生器180に送信する。掃引周波数発生器180は、トリガ信号Tr2のタイミングにdelay1の遅延時間を設けた後、所望の時間に亘って周波数をほぼ一定の掃引速度(単位時間当たりの周波数の変化量)で変化させて周波数を掃引し、周波数掃引信号を出力する。

[0075] 光位相変調器104は掃引周波数発生器180から与えられる周波数掃引信号によりCWレーザ光を位相変調して光スペクトルの形状を変化させる。

[0076] 図10は、実施形態2の固体シダ22におけるタイムチャートの例であ

る。図10には、上から順に、トリガ信号 T_r2 、周波数掃引信号の周波数変移、周波数掃引信号、SOAによる増幅前の光波形（CW光）、SOA注入電流、及びSOAの出力波形のそれぞれのチャートが示されている。

[0077] なお、上から2段目に示す周波数掃引信号の周波数変移のグラフは、縦軸が周波数であり、ベースの周波数が f_m 、掃引幅が Δf の例を示す。すなわち、周波数掃引信号の周波数は、 f_m から $f_m + \Delta f$ まで変化し得る。なお、掃引幅 Δf は $\Delta f < f_m$ を満たす。図10では、周波数を正の方向に掃引する例を示すが、周波数の掃引は負の方向であってもよい。

[0078] トリガ信号 T_r2 のタイミングに対して $delay1$ の遅延時間後に周波数掃引信号の周波数変移が開始され、時間 T_b の期間、周波数が一定の割合で変化する。この時間 T_b の周波数掃引信号によって変調された光が固体増幅器106内のSOAでパルス化されるように $delay1$ が調整される。時間 T_b は、図8で説明した時間 T_a と同等以上であり、概ね時間 T_a と同程度であることが望ましい。また、図10に示す $delay2$ 及び $delay3$ は、図8と同様である。

[0079] 3. 3 光スペクトルの形状変化の説明

図11を参照して、光スペクトルの形状変化を説明する。光位相変調器104に周波数 f_m の正弦波を印加して変調した際のスペクトル形状を図11に示す。この時、キャリア周波数 f_c を中心として距離 f_m のサイドバンドが生じる（グラフF11A参照）。図11の上段に示すグラフF11Aにおいて、一点鎖線で示す光スペクトルSP0は、変調無し（変調前）のスペクトルを示している。また、実線で示す光スペクトルSP1は、周波数 f_m の正弦波を印加して変調した際のスペクトルを示している。

[0080] 固体シーダ制御プロセッサ112は、この変調周波数 f_m を掃引することでスペクトル幅を変化させる（グラフF11B参照）。図11の下段に示すグラフF11Bでは、破線で示す光スペクトルSP2から高周波側に実線で示す光スペクトルSP3の方向へ掃引される様子を示すが、低周波側に掃引する事も可能である。

[0081] 固体シダ22は、グラフF11Bに示す周波数 $f_c + f_m$ の+1次のサイドバンドだけを使い、他のスペクトル成分（図11の例では、 $f_c - 3f_m$ 、 $f_c - 2f_m$ 、 $f_c - f_m$ 、 f_c 、 $f_c + 2f_m$ 、及び $f_c + 3f_m$ などの成分）はカットする。このように、不要なスペクトル成分をカットするために、固体シダ22には光位相変調器104の出力の後段に光バンドパスフィルタ182が配置される。グラフF11Bにおいて光バンドパスフィルタ182の透過特性の例を二点鎖線で示す。こうして、光バンドパスフィルタ182によって選択された光のスペクトル成分、例えば、 $f_c + f_m$ （+1次のサイドバンド）の成分だけが固体増幅器106に入力される。

[0082] 図12は、周波数掃引幅とスペクトル線幅との関係を示すグラフである。光のスペクトル線幅は変調周波数 f_m の掃引幅を増加すれば広がり、掃引幅を狭くすれば狭まるように変化する。図12に示すように、変調周波数 f_m の掃引幅とスペクトル線幅とは概ね線形の関係にある。

[0083] スペクトル線幅を制御する場合は、モニタモジュールによって計測したスペクトル線幅に基づいて、目標スペクトル線幅が得られるように、変調周波数 f_m の掃引幅を調整する。

[0084] 図13は、スペクトル線幅の制御例2を示すフローチャートである。図13に示すフローチャートについて、図5と異なる点を説明する。図13に示すフローチャートは、図5のステップS13の代わりに、ステップS14を含む。すなわち、ステップS12の判定結果がNO判定である場合、レーザ制御プロセッサ50は、ステップS14に移行する。

[0085] ステップS14において、レーザ制御プロセッサ50は、固体シダ制御プロセッサ112に指令を送り、固体シダ制御プロセッサ112を介して光位相変調器104を制御する周波数掃引信号の掃引幅を調整する。ステップS14の後、レーザ制御プロセッサ50はステップS11に戻る。その他のステップは図5と同様であってよい。

[0086] 3. 4 作用・効果

実施形態2によれば、光位相変調器104に入力される変調信号の波形が

トリガ信号 $T_r 2$ と同期しているため、パルス化されるレーザ光は同一の波形で変調される。これにより、パルス毎に同一の光スペクトル形状となり、スペクトル線幅も同一となる。

[0087] スペクトル線幅の制御を容易にするため、図 1 2 に示したように、変調周波数 f_m の掃引幅とスペクトル線幅との関係は線形性がよい。一定の掃引速度で周波数を掃引することで、矩形に近い光スペクトル波形が得られる。また、掃引速度を可変することで、多彩な形状の光スペクトルが得られる。

[0088] 4. 固体シーダの変形例 1

4. 1 構成

図 4 で説明した固体シーダ 2 1 の変形例を説明する。図 1 4 は、変形例 1 に係る固体シーダ 2 3 の構成を概略的に示す。図 1 4 に示す固体シーダ 2 3 は、図 4 の固体シーダ 2 1 の代わりに適用することができる。固体シーダ 2 3 は、波長変換システム 2 4 0 に入力されるシード光が 2 つある構成であってもよい。

[0089] 固体シーダ 2 3 は、第 1 の固体レーザ装置 2 0 0 と、第 2 の固体レーザ装置 2 1 0 と、ダイクロイックミラー 2 3 0 と、波長変換システム 2 4 0 と、固体シーダ制御プロセッサ 1 1 2 と、疑似ランダム信号発生器 1 1 1 と、を含む。

[0090] 固体シーダ 2 3 は、第 1 の固体レーザ装置 2 0 0 から出力される波長約 1 5 5 4 nm のパルスレーザ光 $PL 4$ と第 2 の固体レーザ装置 2 1 0 から出力される波長約 2 5 7. 6 nm のパルスレーザ光 $PL 5$ とを波長変換システム 2 4 0 において 2 回和周波により波長約 1 9 3. 4 nm のパルスレーザ光 $PL 2$ に変換するシステム構成である。

[0091] 第 1 の固体レーザ装置 2 0 0 は、半導体レーザシステム 2 0 4 と、固体増幅器 2 0 6 と、を含む。半導体レーザシステム 2 0 4 は、図 4 に示した半導体レーザシステム 1 0 0 と同様の構成を適用することができ、発振波長が半導体レーザシステム 1 0 0 とは異なる。半導体レーザシステム 2 0 4 は、波長約 1 5 5 4 nm においてシングル縦モードで CW 発振する半導体レーザを

含む。

- [0092] 固体増幅器 206 は、光パラメトリック増幅器 (Optical Parametric Amplifier : OPA) であってよい。OPA は、例えば、PPLN (periodically poled lithium niobate : 周期的分極反転ニオブ酸リチウム結晶) や PPKTP (periodically poled KTP : 周期的分極反転リン酸チタニルカリウム結晶) である。
- [0093] 固体増幅器 206 は、ポンプ光として後述する 1030 nm のパルスレーザー光と、シード光として半導体レーザーシステム 204 から出力されるレーザー光と、を入力されることによって、シード光をパルス増幅する構成である。
- [0094] 第 2 の固体レーザー装置 210 は、半導体レーザーシステム 212 と、光位相変調器 104 と、固体増幅器 216 と、2 回の第 2 高調波発生を行い、光周波数が 4 倍になる様に波長変換する 2 つの非線形結晶である LBO 結晶 220 及び CLBO 結晶 222 と、ダイクロイックミラー 224 と、を含む。「CLBO」は化学式 $\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$ で表される。
- [0095] 半導体レーザーシステム 212 は、図 2 に示した半導体レーザーシステム 100 と同様の構成を適用することができ、発振波長が半導体レーザーシステム 100 とは異なる。半導体レーザーシステム 212 は、波長約 1030 nm においてシングル縦モードで CW 発振する半導体レーザーを含む。
- [0096] 固体増幅器 216 は、例えば、Yb ファイバ増幅器や Yb : YAG 結晶を含む構成であってよい。固体増幅器 216 は、固体増幅器 106 と同様の構成であってもよい。光位相変調器 104 は、半導体レーザーシステム 212 と固体増幅器 216 との間の光路上に配置される。固体増幅器 216 は本開示における「第 1 の増幅器」の一例である。
- [0097] ダイクロイックミラー 224 は、LBO 結晶 220 と CLBO 結晶 222 との間の光路上に配置され、波長約 515 nm のパルスレーザー光を高透過し、波長約 1030 nm のパルスレーザー光を高反射する。ダイクロイックミラー 224 は、高反射された波長約 1030 nm のパルスレーザー光が固体増幅器 206 のポンプ光として入射するように配置される。ダイクロイックミラ

ー 2 2 4 の代わりに、L B O 結晶 2 2 0 と固体増幅器 2 1 6 の間に図示しないビームスプリッタを配置し、固体増幅器 2 1 6 から出射されパルスレーザー光を L B O 結晶 2 2 0 と固体増幅器 2 0 6 とにそれぞれ入射するように分岐させてもよい。

[0098] 波長変換システム 2 4 0 は、C L B O 結晶 2 4 2 及び C L B O 結晶 2 4 3 と、回転ステージ 2 5 2 及び回転ステージ 2 5 3 と、を含む。C L B O 結晶 2 4 2 及び C L B O 結晶 2 4 3 は、それぞれ piezo 素子を含む回転ステージ 2 5 2 及び回転ステージ 2 5 3 の上に配置され、それぞれの結晶の入射角度が高速で変更できるように構成される。

[0099] ダイクロイックミラー 2 3 0 は、第 1 の固体レーザー装置 2 0 0 から出力された波長約 1 5 5 4 n m のパルスレーザー光 P L 4 を高反射し、第 2 の固体レーザー装置 2 1 0 から出力された波長約 2 5 7 . 6 n m のパルスレーザー光 P L 5 が高透過する構成であり、両パルスレーザー光が波長変換システム 2 4 0 に同軸で入射するように配置される。

[0100] 4. 2 動作

固体シード 2 3 では、第 2 の固体レーザー装置 2 1 0 から出力するパルスレーザー光 P L 5 の波長を固定とし、第 1 の固体レーザー装置 2 0 0 から出力するパルスレーザー光 P L 4 の波長をパルス毎に変えることにより、波長変換システム 2 4 0 から出力されるパルスレーザー光 P L 2 の波長を変化させることができる。

[0101] 第 2 の固体レーザー装置 2 1 0 の動作は次のとおりである。固体シード制御プロセッサ 1 1 2 は、第 2 の固体レーザー装置 2 1 0 の発振波長を 1 0 3 0 n m に固定する。すなわち、固体シード制御プロセッサ 1 1 2 は、半導体レーザーシステム 2 1 2 における半導体レーザーの電流値を一定として、半導体レーザーを連続発振させ、半導体レーザーから C W レーザ光を出力させる。

[0102] 半導体レーザーシステム 2 1 2 から出力された C W レーザ光は光位相変調器 1 0 4 によって位相変調されて固体増幅器 2 1 6 に入射する。疑似ランダム信号発生器 1 1 1 及び光位相変調器 1 0 4 の動作は、図 4 で説明した実施形

態 1 と同様である。

[0103] 固体シーダ制御プロセッサ 112 は、トリガ信号 T_r2 に同期して、CW レーザ光を固体増幅器 216 によってパルス増幅させる。固体増幅器 216 は、波長 1030 nm のパルスレーザ光 $PL6$ を出力する。

[0104] 固体増幅器 216 から出力された波長 1030 nm のパルスレーザ光 $PL6$ は、LBO 結晶 220 で波長 515 nm の第 2 高調波光に変換される。波長 515 nm の第 2 高調波光は、ダイクロイックミラー 224 を高透過して、CLBO 結晶 222 によって波長 257.6 nm のパルスレーザ光 $PL5$ に変換される。

[0105] ここで、ダイクロイックミラー 224 は、LBO 結晶 220 で波長変換できなかった 1030 nm のパルスレーザ光を高反射し、第 1 の固体レーザ装置 200 の固体増幅器 206 のポンプ光として入射させる。

[0106] 一方、レーザ制御プロセッサ 50 及び固体シーダ制御プロセッサ 112 は、第 1 の固体レーザ装置 200 の半導体レーザシステム 204 における半導体レーザの温度値及び／又は電流値を制御することにより、第 1 の固体レーザ装置 200 から出力されるパルスレーザ光 $PL4$ の波長を 1554 nm 付近で変化させることができる。固体シーダ制御プロセッサ 112 は、パルス毎に半導体レーザシステム 204 の発振波長を変化させてもよい。

[0107] 第 1 の固体レーザ装置 200 から出力された波長約 1554 nm のパルスレーザ光 $PL4$ と CLBO 結晶 222 から出力された波長 257.6 nm のパルスレーザ光 $PL5$ とは、波長変換システム 240 の CLBO 結晶 242 によって和周波混合され、波長約 220.9 nm のパルスレーザ光に波長変換される。さらに、CLBO 結晶 243 によって、波長約 220.9 nm のパルスレーザ光と波長 1554 nm のパルスレーザ光とは和周波混合され、波長約 193.4 nm のパルスレーザ光 $PL2$ に波長変換される。そして、波長変換システム 240 からパルスレーザ光 $PL2$ が出力される。

[0108] 4. 3 その他

図 14 では、光位相変調器 104 を第 2 の固体レーザ装置 210 に配置す

る例を説明したが、光位相変調器 104 は、第 1 の固体レーザ装置 200 における半導体レーザシステム 204 の CW レーザ光の光路上に配置されてもよい。すなわち、光位相変調器 104 は、半導体レーザシステム 204 と固体増幅器 206 との間の光路上に配置されてもよい。

[0109] 5. 固体シーダの変形例 2

5. 1 構成

図 9 で説明した固体シーダ 22 の変形例を説明する。図 15 は、変形例 2 に係る固体シーダ 24 の構成を概略的に示す。図 15 に示す固体シーダ 24 は、図 9 の固体シーダ 22 の代わりに適用することができる。図 15 に示す構成について、図 14 と異なる点を説明する。固体シーダ 24 は、図 14 における疑似ランダム信号発生器 111 の代わりに、掃引周波数発生器 180 を備え、光位相変調器 104 と固体増幅器 216 との間の光路上に光バンドパスフィルタ 182 を備える。その他の構成は、図 14 と同様であってよい。

[0110] 5. 2 動作

図 15 に示す掃引周波数発生器 180、光位相変調器 104、及び光バンドパスフィルタ 182 の動作は、図 9 で説明した実施形態 2 と同様である。

[0111] 半導体レーザシステム 212 から出力された CW レーザ光は、掃引周波数発生器 180 から出力される周波数掃引信号が印加される光位相変調器 104 及び光バンドパスフィルタ 182 によって、所望の光スペクトル形状となり、毎パルス同一の光スペクトル形状となる。その他の動作は、図 4 で説明した実施形態 1 と同様である。図 15 に示す固体シーダ 24 についても、光位相変調器 104 は、第 1 の固体レーザ装置 200 における半導体レーザシステム 204 の CW レーザ光の光路上に配置されてもよい。

[0112] 6. 他の変形例

半導体レーザシステムに用いられる半導体レーザは、DFB レーザに限らず、分布反射型 (Distributed Bragg Reflector : DBR) の半導体レーザであってもよいし、サンプルドグレーティング分布反射型 (Sampled Grating D

istributed Bragg Reflector : S G - D B R) の半導体レーザであってもよい。

[0113] 実施形態 1 及び実施形態 2 では、エキシマ増幅器として 3 マルチパス増幅器の例を示したが、マルチパス増幅器に限定されることなく、例えば、ファブリペロ共振器又はリング共振器等の光共振器を備えた増幅器であってもよい。

[0114] 実施形態 1 及び実施形態 2 では、固体シーダと A r F エキシマ増幅器とを組み合わせた構成の例を示したが、この実施形態に限定されることなく、K r F レーザガスを含むエキシマ増幅器と K r F エキシマの増幅波長帯域で発振する固体シーダとの組み合わせであってもよい。具体例としては、固体シーダは、波長約 7 4 5 . 2 n m のパルスレーザ光を出力する半導体レーザシステムと、固体増幅器と、波長約 2 4 8 . 4 n m の第 3 高調波光に波長変換する波長変換システムであってもよい。この場合の波長変換素子は、第 2 高調波光に波長変換する L B O 結晶と、第 2 高調波光及び基本波を和周波混合する C L B O 結晶と、であってもよい。

[0115] 7. 電子デバイスの製造方法について

図 1 6 は、露光装置 8 0 の構成例を概略的に示す。露光装置 8 0 は、照明光学系 8 0 6 と投影光学系 8 0 8 とを含む。レーザ装置 1 1 はレーザ光を生成し、レーザ光を露光装置 8 0 に出力する。照明光学系 8 0 6 は、レーザ装置 1 1 から入射したレーザ光によって、レチクルステージ R T 上に配置された不図示のレチクルのレチクルパターンを照明する。投影光学系 8 0 8 は、レチクルを透過したレーザ光を、縮小投影してワークピーステーブル W T 上に配置された不図示のワークピースに結像させる。ワークピースはフォトリジストが塗布された半導体ウエハ等の感光基板である。

[0116] 露光装置 8 0 は、レチクルステージ R T とワークピーステーブル W T とを同期して平行移動させることにより、レチクルパターンを反映したレーザ光をワークピースに露光する。以上のような露光工程によって半導体ウエハにレチクルパターンを転写後、複数の工程を経ることで半導体デバイスを製造

できる。半導体デバイスは本開示における「電子デバイス」の一例である。
レーザ装置 1 1 の代わりに、レーザ装置 1 2 を適用してもよい。

[0117] 8. その他

上記の説明は、制限ではなく単なる例示を意図している。したがって、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る。また、本開示の実施形態を組み合わせ使用することも当業者には明らかである。

[0118] 本明細書及び特許請求の範囲全体で使用される用語は、明記が無い限り「限定的でない」用語と解釈されるべきである。例えば、「含む」、「有する」、「備える」、「具備する」などの用語は、「記載されたもの以外の構成要素の存在を除外しない」と解釈されるべきである。また、修飾語「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。また、「A、B及びCの少なくとも1つ」という用語は、「A」「B」「C」「A+B」「A+C」「B+C」又は「A+B+C」と解釈されるべきである。さらに、それらと「A」「B」「C」以外のものとの組み合わせも含むと解釈されるべきである。

請求の範囲

- [請求項1] 連続光を出射する半導体レーザと、
前記連続光を増幅し、外部装置から受信する発光トリガ信号に同期して前記連続光をパルス光に変換する第1の増幅器と、
前記半導体レーザと前記第1の増幅器との間の前記連続光の光路に配置された光位相変調器と、
前記光位相変調器に与える変調信号を出力する変調信号生成器と、
前記変調信号生成器を制御するプロセッサと、を備え、
前記プロセッサは、前記発光トリガ信号と同期した同一パターンの前記変調信号を前記変調信号生成器に生成させ、前記同一パターンの前記変調信号を前記光位相変調器に与えることにより、前記パルス光の1パルスに相当する時間内に前記連続光の波長を変調し、前記パルス光のスペクトル線幅を調整する、
レーザ装置。
- [請求項2] 請求項1に記載のレーザ装置であって、
前記変調信号は、疑似ランダム信号である、
レーザ装置。
- [請求項3] 請求項2に記載のレーザ装置であって、
前記変調信号生成器は、シフトレジスタを含む、
レーザ装置。
- [請求項4] 請求項3に記載のレーザ装置であって、
前記変調信号生成器は、可変帯域フィルタを含む、
レーザ装置。
- [請求項5] 請求項4に記載のレーザ装置であって、
前記プロセッサは、前記可変帯域フィルタの通過帯域を制御して前記スペクトル線幅を調整する、
レーザ装置。
- [請求項6] 請求項5に記載のレーザ装置であって、

前記プロセッサは、前記スペクトル線幅が目標スペクトル線幅よりも小さい場合に、前記可変帯域フィルタの遮断周波数を高周波側に変更し、前記スペクトル線幅が前記目標スペクトル線幅よりも大きい場合に、前記可変帯域フィルタの遮断周波数を低周波側に変更する、
レーザ装置。

[請求項7] 請求項1に記載のレーザ装置であって、
前記変調信号は、周波数掃引信号である、
レーザ装置。

[請求項8] 請求項7に記載のレーザ装置であって、
前記変調信号生成器は、掃引周波数発生器を含む、
レーザ装置。

[請求項9] 請求項8に記載のレーザ装置であって、
前記変調信号生成器は、加える電圧によって発振周波数が変わる電圧制御発振器を含む、
レーザ装置。

[請求項10] 請求項8に記載のレーザ装置であって、
前記変調信号生成器は、前記1パルスに相当する前記時間内に一定の掃引速度で周波数を掃引する、
レーザ装置。

[請求項11] 請求項8に記載のレーザ装置であって、さらに、
前記光位相変調器と前記第1の増幅器との間の前記光路に光バンドパスフィルタを備える、
レーザ装置。

[請求項12] 請求項8に記載のレーザ装置であって、
前記プロセッサは、前記周波数掃引信号の掃引幅を制御して前記スペクトル線幅を調整する、
レーザ装置。

[請求項13] 請求項12に記載のレーザ装置であって、

前記プロセッサは、前記スペクトル線幅が目標スペクトル線幅よりも小さい場合に、前記掃引幅を増加させ、前記スペクトル線幅が前記目標スペクトル線幅よりも大きい場合に、前記掃引幅を減少させる、
レーザ装置。

[請求項14] 請求項1に記載のレーザ装置であって、さらに、
前記第1の増幅器から出力された第1のパルスレーザ光の波長を変換して第2のパルスレーザ光を出力する波長変換システムを備える、
レーザ装置。

[請求項15] 請求項14に記載のレーザ装置であって、
前記波長変換システムは、複数の非線形結晶を含み、
前記波長変換システムから紫外線波長の前記第2のパルスレーザ光が出力される、
レーザ装置。

[請求項16] 請求項14に記載のレーザ装置であって、さらに、
前記第2のパルスレーザ光を増幅する第2の増幅器を備える、
レーザ装置。

[請求項17] 請求項1に記載のレーザ装置であって、さらに、
前記第1の増幅器によりパルス増幅されたパルスレーザ光のスペクトル線幅を計測する計測器を備え、
前記プロセッサは、前記計測器によって計測されるスペクトル線幅が目標スペクトル線幅になるように前記変調信号生成器を制御する、
レーザ装置。

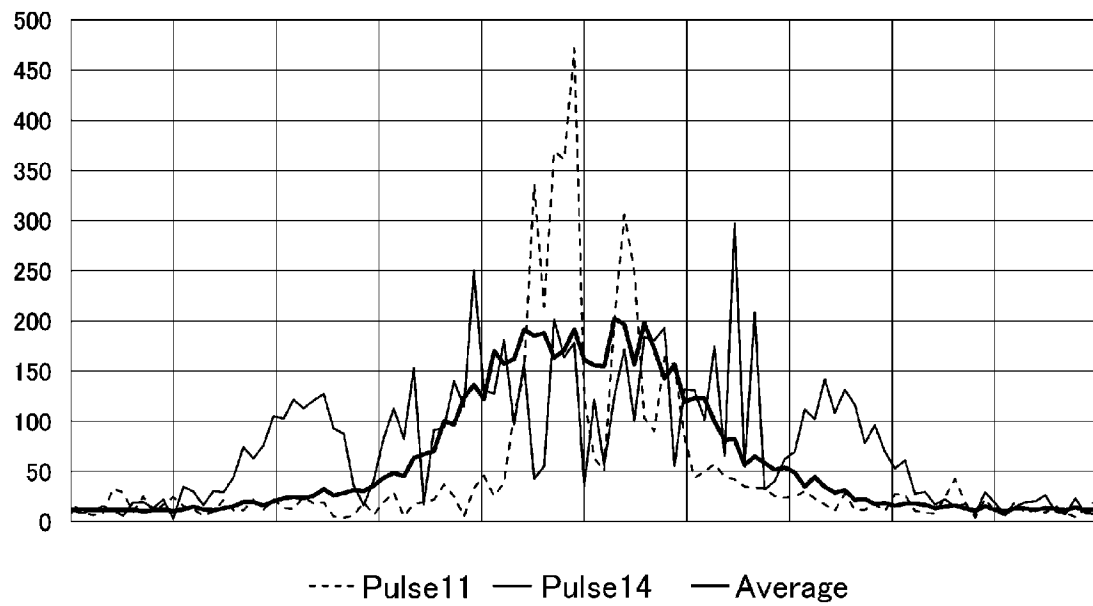
[請求項18] 請求項1に記載のレーザ装置であって、
前記第1の増幅器は、半導体光増幅器を含む、
レーザ装置。

[請求項19] 請求項16に記載のレーザ装置であって、
前記第2の増幅器は、エキシマ増幅器を含む、
レーザ装置。

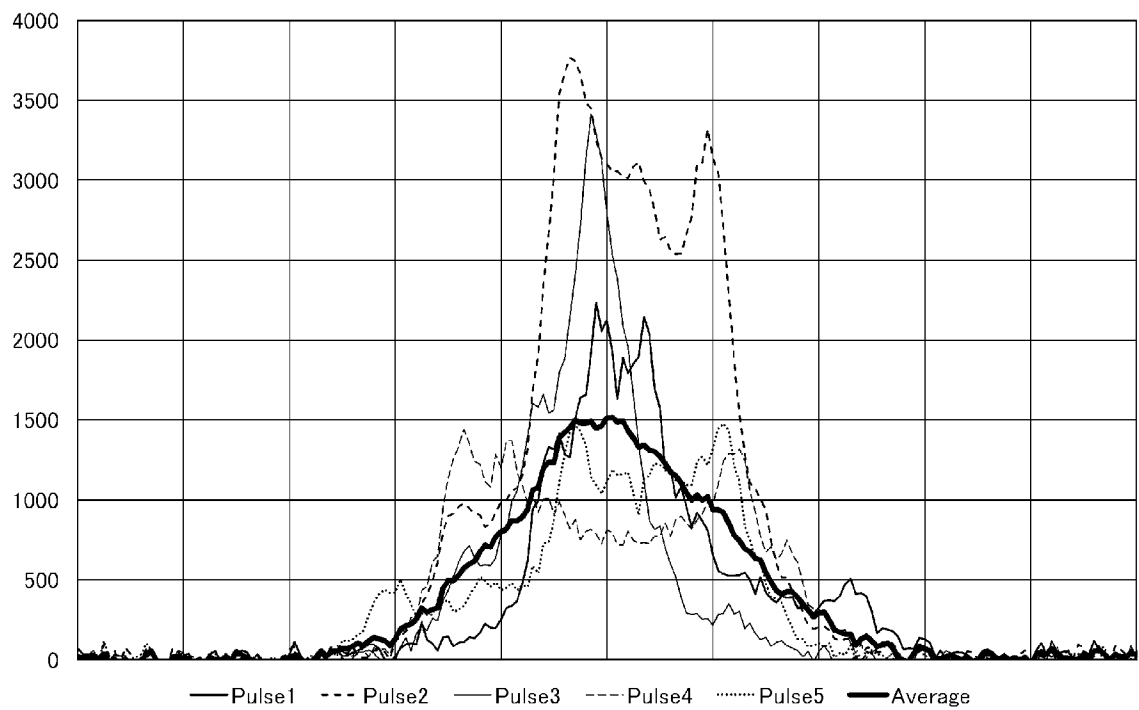
[請求項20]

電子デバイスの製造方法であって、
連続光を出射する半導体レーザと、
前記連続光を増幅し、外部装置から受信する発光トリガ信号に同期して前記連続光をパルス光に変換する第1の増幅器と、
前記半導体レーザと前記第1の増幅器との間の前記連続光の光路に配置された光位相変調器と、
前記光位相変調器に与える変調信号を出力する変調信号生成器と、
前記変調信号生成器を制御するプロセッサと、
前記第1の増幅器から出力された第1のパルスレーザ光の波長を変換して第2のパルスレーザ光を出力する波長変換システムと、を備え、
前記プロセッサは、前記発光トリガ信号と同期した同一パターンの前記変調信号を前記変調信号生成器に生成させ、前記同一パターンの前記変調信号を前記光位相変調器に与えることにより、前記パルス光の1パルスに相当する時間内に前記連続光の波長を変調し、前記パルス光のスペクトル線幅を調整するレーザ装置によって紫外線波長のレーザ光を生成し、
前記レーザ光を露光装置に出力し、
電子デバイスを製造するために、前記露光装置内で感光基板に前記レーザ光を露光することを含む電子デバイスの製造方法。

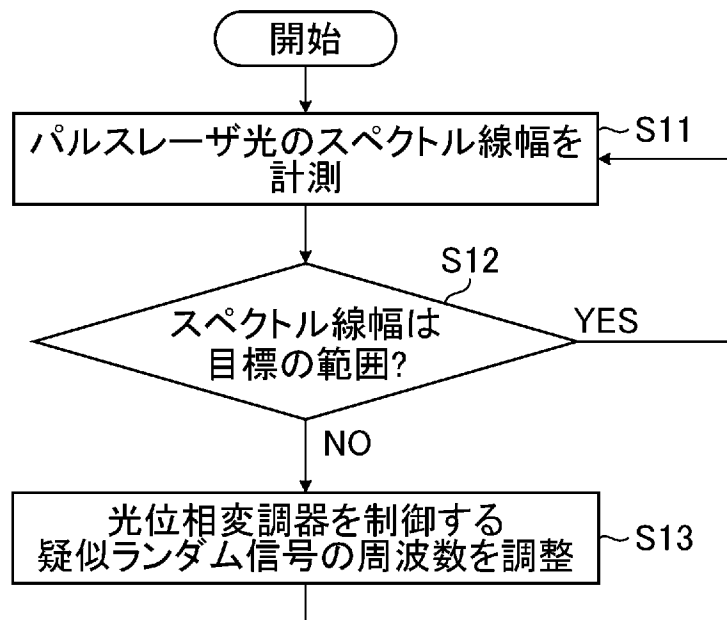
[図2]



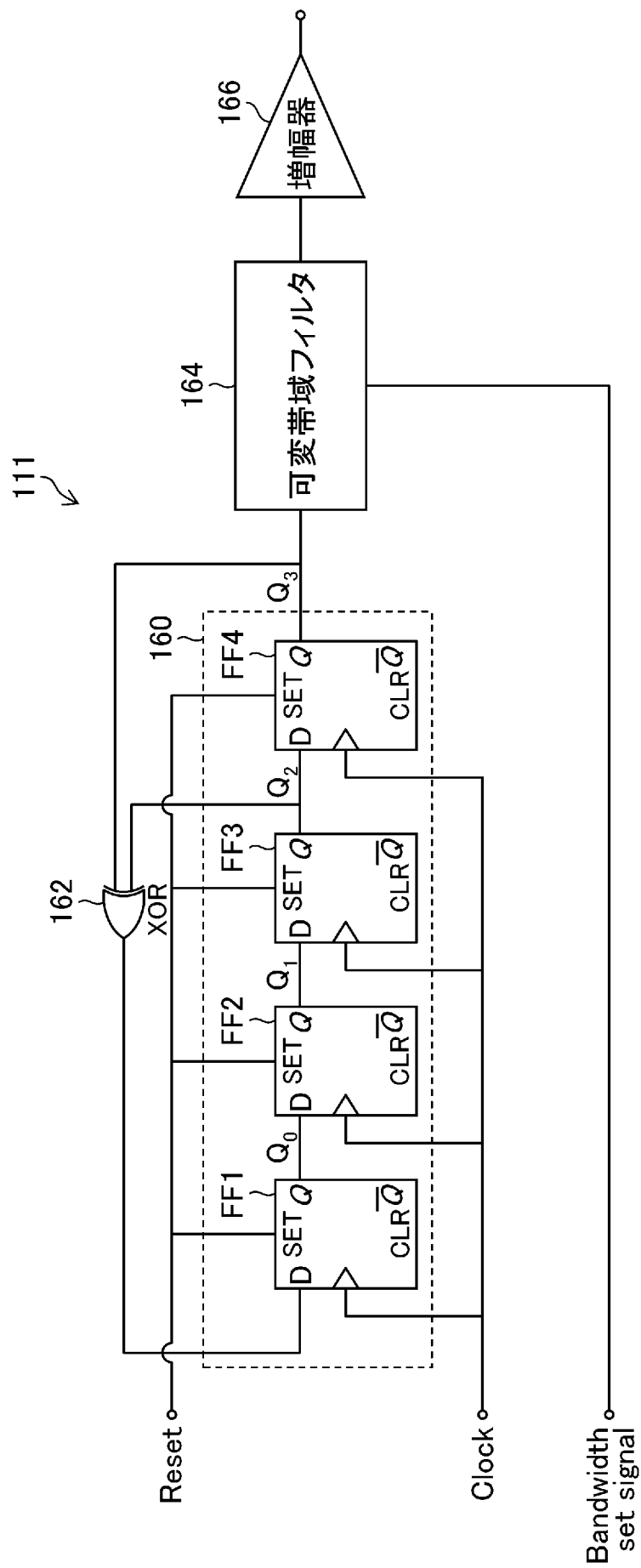
[図3]



[図5]



[図6]

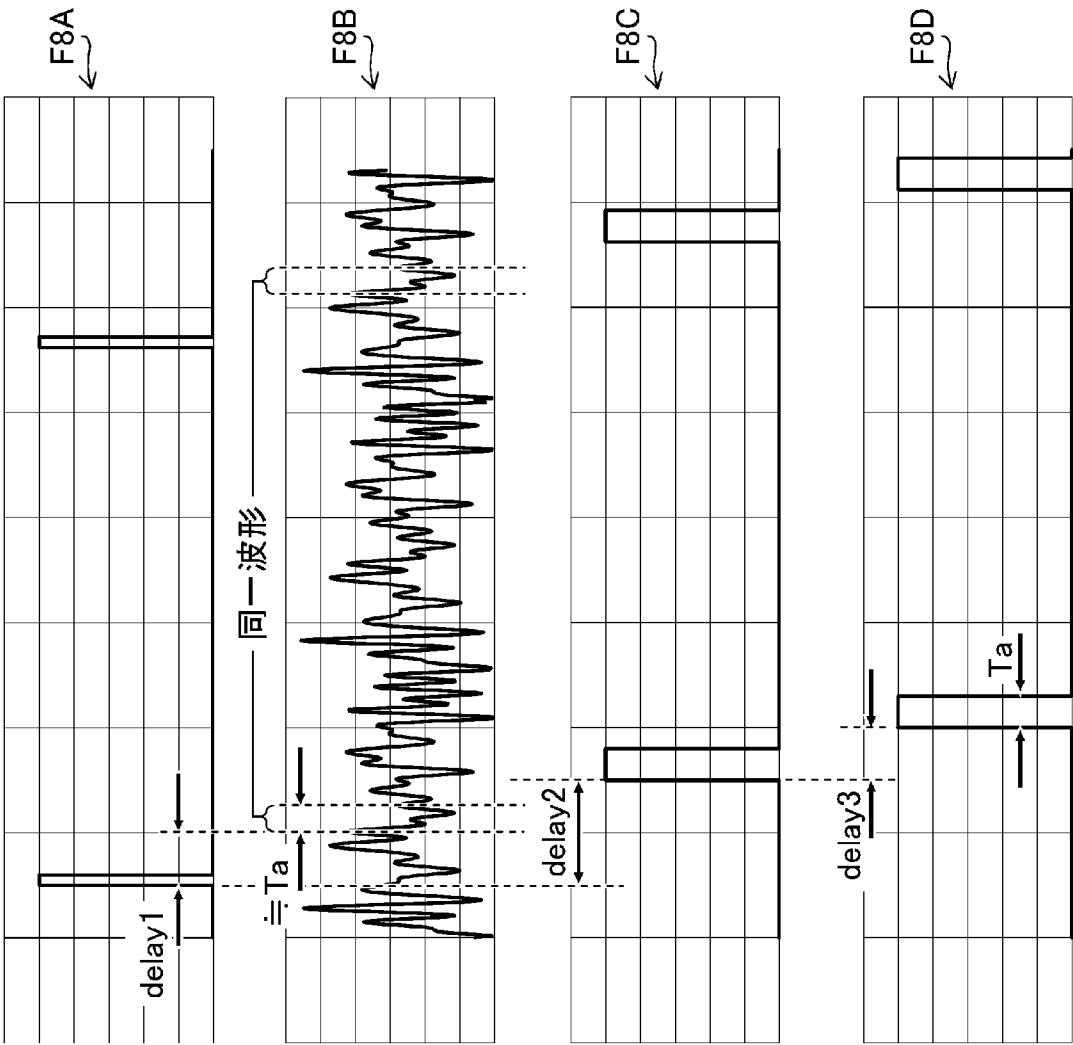


[図7]

Clock	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Q_0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0
Q_1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0
Q_2	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0
Q_3	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0
$Q_3 \oplus Q_2 \oplus 1$	1	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1

$\oplus$: Xor

[図8]



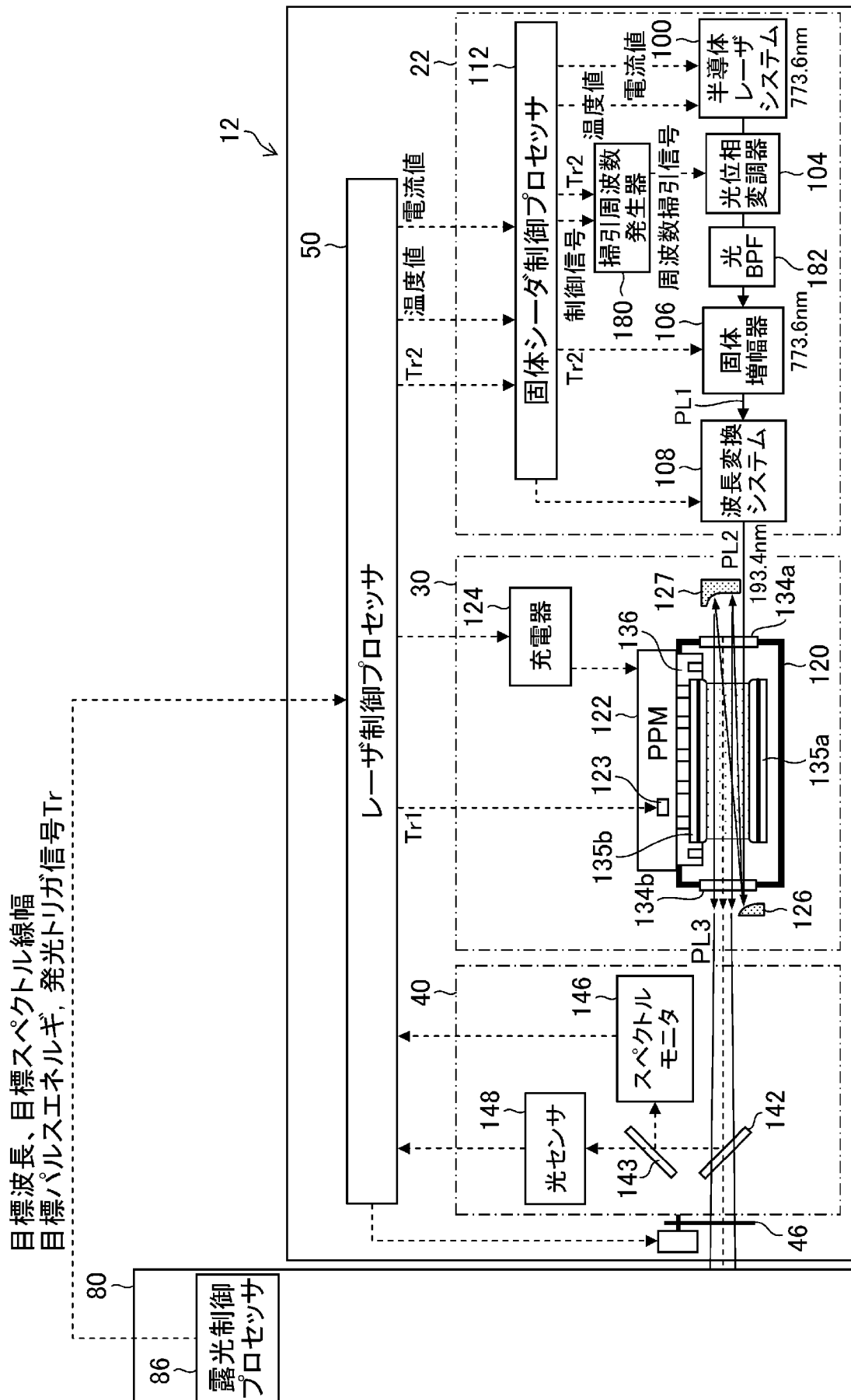
トリガ信号

可変帯域フィルタ透過後の
疑似ランダム信号

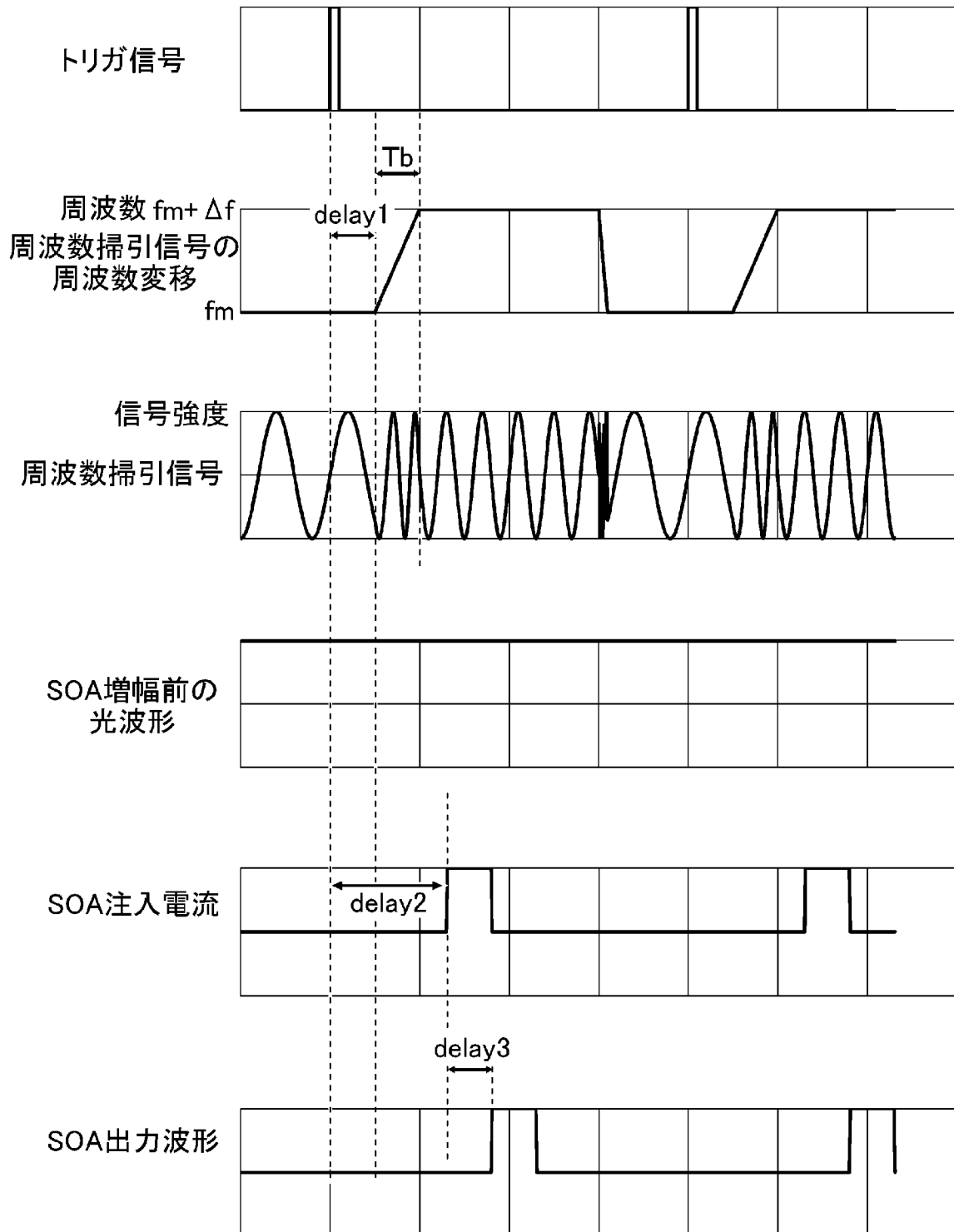
SOA注入電流

SOA出力波形

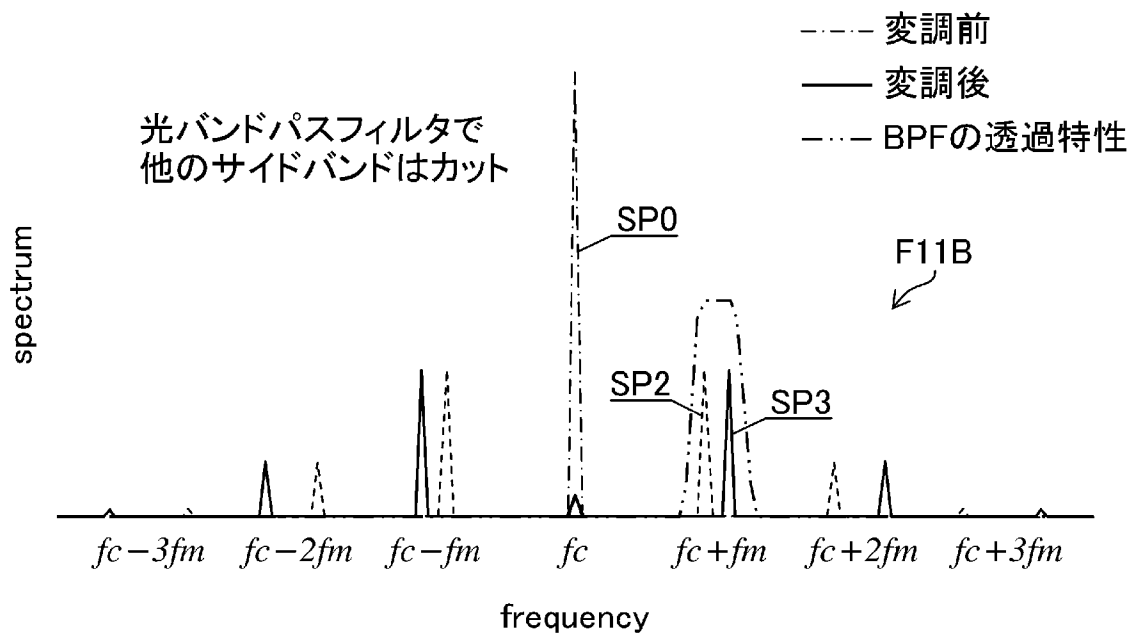
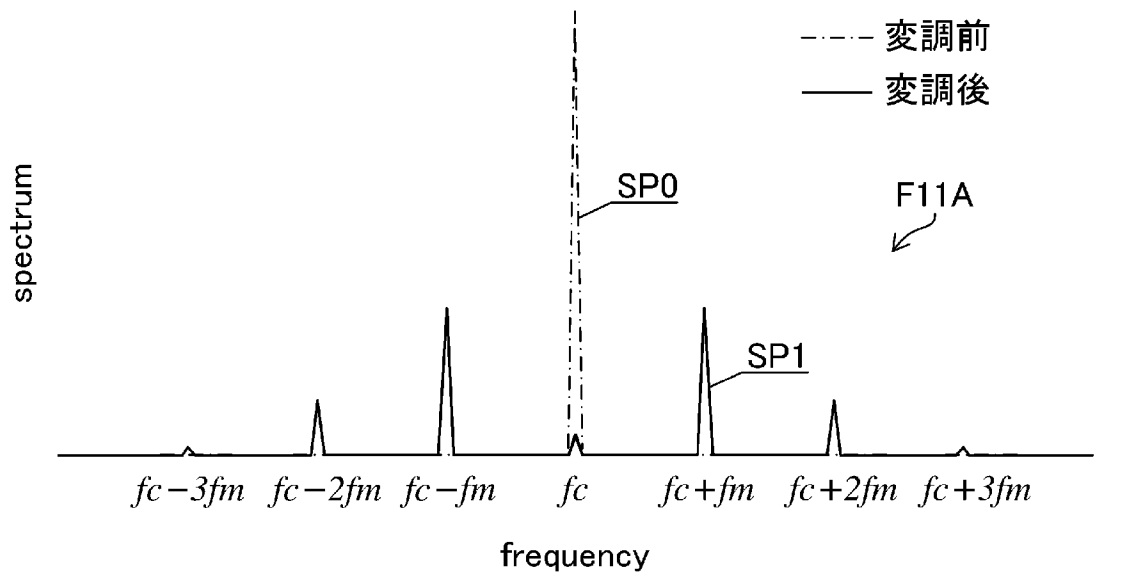
[図9]



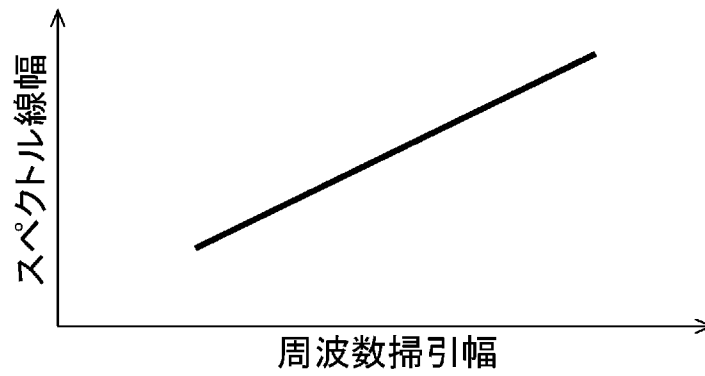
[図10]



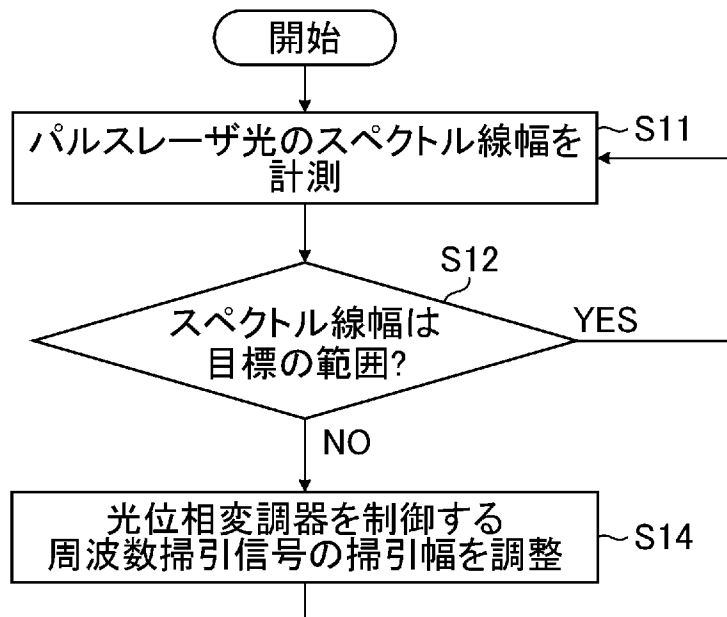
[図11]



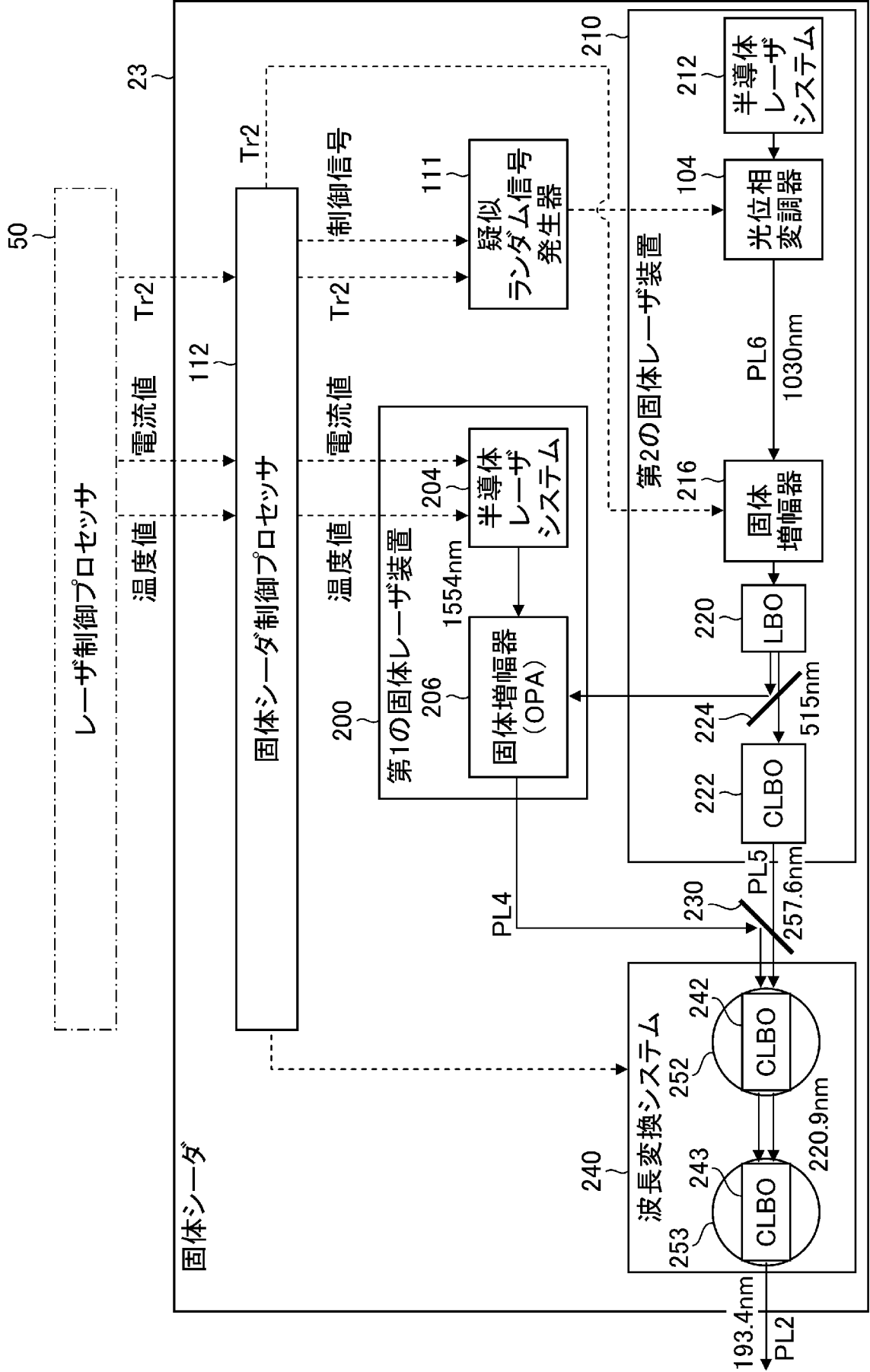
[図12]



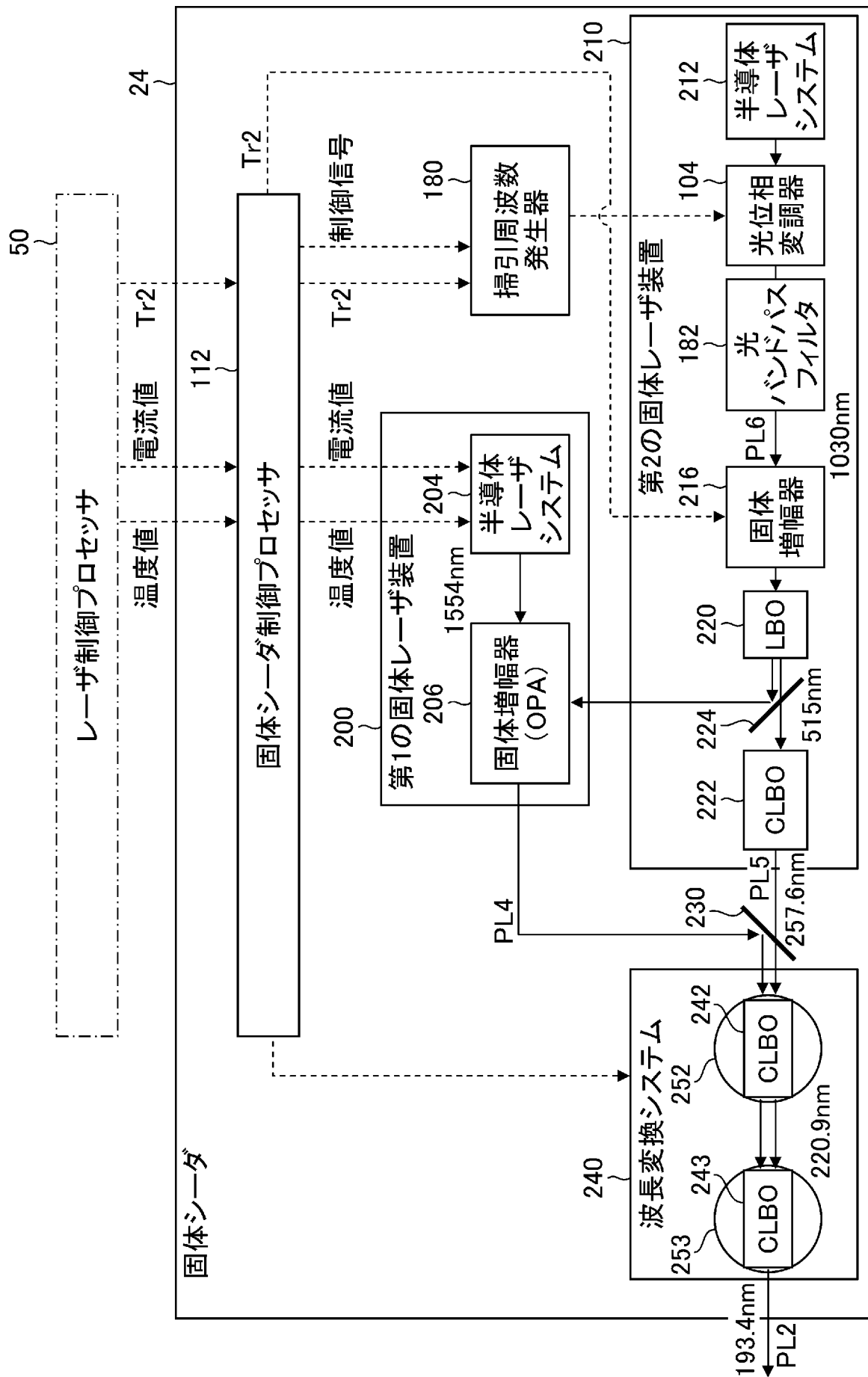
[図13]



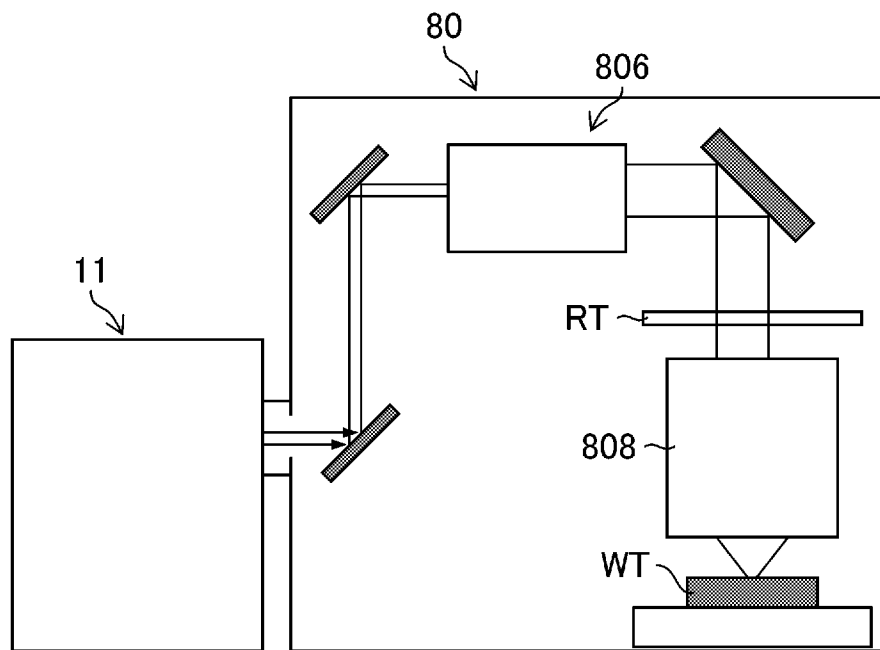
[図14]



50



[図16]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2022/034458

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**H01S 5/0683**(2006.01)i

FI: H01S5/0683

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)

H01S5/0683

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

Published examined utility model applications of Japan 1922-1996
 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2022
 Registered utility model specifications of Japan 1996-2022
 Published registered utility model applications of Japan 1994-2022

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2004-86193 A (NIKON CORP.) 18 March 2004 (2004-03-18) entire text, all drawings	1-20
A	JP 2019-529881 A (THE BRD. OF TRUSTEES OF THE LELAND STANFORD JUNIOR UNIVERSITY) 17 October 2019 (2019-10-17) entire text, all drawings	1-20
A	US 2012/0002688 A1 (MUNROE, MICHAEL J.) 05 January 2012 (2012-01-05) entire text, all drawings	1-20
A	US 2020/0335928 A1 (NUFERN) 22 October 2020 (2020-10-22) entire text, all drawings	1-20



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

01 November 2022

Date of mailing of the international search report

22 November 2022

Name and mailing address of the ISA/JP

Japan Patent Office (ISA/JP)
 3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915
 Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2022/034458

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
JP	2004-86193	A	18 March 2004	(Family: none)	
JP	2019-529881	A	17 October 2019	US 2018/0080770 A1 entire text, all drawings WO 2018/057468 A1	
US	2012/0002688	A1	05 January 2012	WO 2011/053816 A1 entire text, all drawings	
US	2020/0335928	A1	22 October 2020	WO 2020/214713 A1 entire text, all drawings	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） H01S 5/0683(2006.01)i FI: H01S5/0683		
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）） H01S5/0683		
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 - 2022年 日本国実用新案登録公報 1996 - 2022年 日本国登録実用新案公報 1994 - 2022年		
国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）		
C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2004-86193 A（株式会社ニコン） 18.03.2004（2004 - 03 - 18） 全文全図	1-20
A	JP 2019-529881 A（ザ ボード オブ トラスティーズ オブ ザ リーランド スタン フォード ジュニア ユニバーシティ） 17.10.2019（2019 - 10 - 17） 全文全図	1-20
A	US 2012/0002688 A1（MUNROE, MICHAEL J.） 05.01.2012（2012 - 01 - 05） 全文全図	1-20
A	US 2020/0335928 A1（NUFERN） 22.10.2020（2020 - 10 - 22） 全文全図	1-20
☐ 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、一般的技术水準を示すもの “E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの “L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） “O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 “P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献 “T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの “X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの “Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの “&” 同一パテントファミリー文献		
国際調査を完了した日 01.11.2022		国際調査報告の発送日 22.11.2022
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号		権限のある職員（特許庁審査官） 村井 友和 2K 3207 電話番号 03-3581-1101 内線 3255

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2022/034458

引用文献			公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP	2004-86193	A	18.03.2004	(ファミリーなし)	
JP	2019-529881	A	17.10.2019	US 2018/0080770	A1
				全文全図	
				W0 2018/057468	A1
US	2012/0002688	A1	05.01.2012	W0 2011/053816	A1
				全文全図	
US	2020/0335928	A1	22.10.2020	W0 2020/214713	A1
				全文全図	