

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局

(43) 国際公開日  
2015年9月24日(24.09.2015)



(10) 国際公開番号

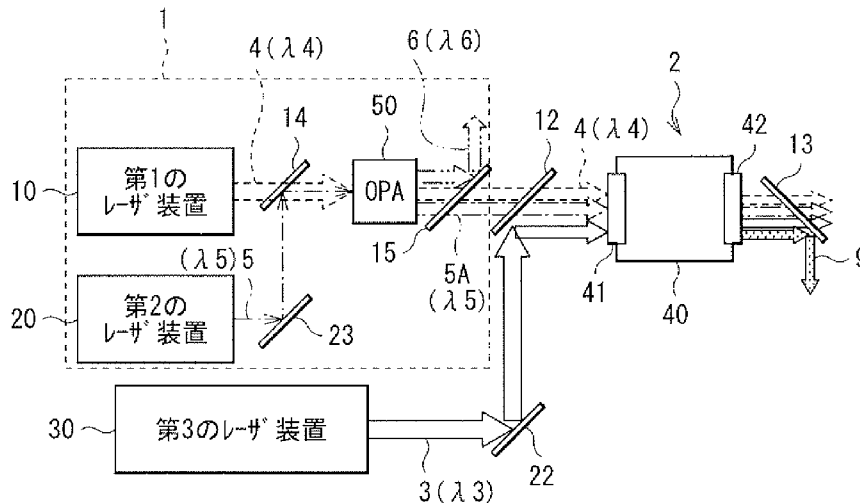
WO 2015/140901 A1

- (51) 国際特許分類:  
H01S 3/30 (2006.01) G02F 1/39 (2006.01)  
G02F 1/35 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2014/057131
- (22) 国際出願日: 2014年3月17日(17.03.2014)
- (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: 小野瀬 貴士(ONOSE, Takashi); 〒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). 柿崎 弘司(KAKIZAKI, Kouji); 〒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). 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: 特許業務法人つばさ国際特許事務所(TSUBASA PATENT PROFESSIONAL CORPORATION); 〒1600022 東京都新宿区新宿1丁目15番9号さわだビル3階 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, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (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,

[続葉有]

(54) Title: LASER SYSTEM

(54) 発明の名称: レーザシステム



- 10 First laser apparatus  
20 Second laser apparatus  
30 Third laser apparatus

(57) Abstract: This laser system may be provided with: a Raman cell; a pump light generating apparatus, which includes an OPA, and which outputs first Raman cell pump light and second Raman cell pump light toward the Raman cell; and a Raman cell laser apparatus that outputs, toward the Raman cell, probe light that is to be subjected to wavelength conversion.

(57) 要約: 本開示によるレーザシステムは、ラマンセルと、OPAを含み、ラマンセルに向けて、第1のラマンセル用ポンプ光及び第2のラマンセル用ポンプ光を出力するポンプ光生成装置と、ラマンセルに向けて波長変換の対象であるプローブ光を出力するラマンセル用レーザ装置とを備えてもよい。

WO 2015/140901 A1



MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラ  
シア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッ  
パ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI,  
FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK,  
MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR),

OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM,  
ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

## 明 細 書

発明の名称： レーザシステム

### 技術分野

[0001] 本開示は、ラマン散乱を利用したレーザシステムに関する。

### 背景技術

[0002] 半導体集積回路の微細化、高集積化につれて、半導体露光装置（以下、「露光装置」という）においては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。露光用光源には、従来の水銀ランプに代わってガスレーザ装置が用いられている。現在、露光用のガスレーザ装置としては、波長248nmの紫外線を放出するKrFエキシマレーザ装置ならびに、波長193nmの紫外線を放出するArFエキシマレーザ装置が用いられている。

[0003] 次世代の露光技術としては、露光装置側の露光用レンズとウエハ間を液体で満たして、屈折率を変えることによって、露光用光源の見かけの波長を短波長化する液浸露光が研究されている。ArFエキシマレーザ装置を露光用光源として液浸露光が行われた場合は、ウエハには水中における波長134nmの紫外光が照射される。この技術をArF液浸露光（又はArF液浸リソグラフィ）という。

[0004] KrF、ArFエキシマレーザ装置の自然発振幅は約350～400pmと広いため、これらの投影レンズが使用されると色収差が発生して解像力が低下する。そこで色収差が無視できる程度となるまでガスレーザ装置から放出されるレーザビームのスペクトル線幅（スペクトル幅）を狭帯域化する必要がある。このためガスレーザ装置のレーザ共振器内には狭帯域化素子（エタロンやグレーティング等）を有する狭帯域化モジュール（Line Narrow Module）が設けられ、スペクトル幅の狭帯域化が実現されている。このようにスペクトル幅が狭帯域化されるレーザ装置を狭帯域化レーザ装置という。

[0005] さらに、A r F エキシマレーザの波長以下の波長のV U V（真空紫外：Vacuum Ultraviolet）光を生成する装置の開発がなされている。V U V 光は発生させるレーザ媒質が殆ど無いため、波長変換を使って発生させる必要がある。波長変換を行う代表的な方法として、非線形結晶を使った波長変換と、ラマン散乱を使った波長変換とがある。

## 先行技術文献

## 特許文献

[0006] 特許文献1：米国特許第5 7 7 1 1 1 7 号明細書

## 非特許文献

[0007] 非特許文献1：Andrew J. Merriam, S. J. Sharpe, H. Xia, D. Manuszak, G. Y. Yin, and S. E. Harris, “Efficient gas-phase generation of coherent vacuum ultraviolet radiation”, OPTICS LETTERS, Vol. 24, No. 9 (1999)625-627

## 概要

[0008] 本開示によるレーザシステムは、ラマンセルと、O P Aを含み、ラマンセルに向けて、第1のラマンセル用ポンプ光及び第2のラマンセル用ポンプ光を出力するポンプ光生成装置と、ラマンセルに向けて波長変換の対象であるプローブ光を出力するラマンセル用レーザ装置とを備えてもよい。

## 図面の簡単な説明

[0009] 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、V U V 光生成装置の一構成例を概略的に示す。

[図2]図2は、ポンプ光生成装置を含むレーザシステムとしてのV U V 光生成装置の一構成例を概略的に示す。

[図3]図3は、図2に示したV U V 光生成装置に適用されるレーザ波長の具体例を示す。

[図4]図4は、A r F エキシマレーザを用いた場合の被波長変換光と、被波長

変換光から生成されるストークス光及びアンチストークス光との波長の一例を示す。

[図5]図5は、F2レーザを用いた場合の被波長変換光と、被波長変換光から生成されるストークス光及びアンチストークス光との波長の一例を示す。

[図6]図6は、KrFエキシマレーザを用いた場合の被波長変換光と、被波長変換光から生成されるストークス光及びアンチストークス光との波長の一例を示す。

[図7]図7は、ポンプ光生成装置を含むVUV光生成装置の制御システムの一構成例を概略的に示す。

[図8]図8は、VUV光生成装置の制御の流れの一例を示す。

[図9]図9は、図8に続く制御の流れの一例を示す。

[図10]図10は、ポンプ光生成装置の第1の構成例を概略的に示す。

[図11]図11は、ポンプ光生成装置の第2の構成例を概略的に示す。

[図12]図12は、ポンプ光生成装置の第3の構成例を概略的に示す。

[図13]図13は、ポンプ光生成装置の第4の構成例を概略的に示す。

[図14]図14は、ポンプ光生成装置の第5の構成例を概略的に示す。

[図15]図15は、ラマンセルへのポンプ光の偏光方向が最適化されたVUV光生成装置の第1の構成例を概略的に示す。

[図16]図16は、ラマンセルへのポンプ光の偏光方向が最適化されたVUV光生成装置の第2の構成例を概略的に示す。

[図17]図17は、制御部のハードウェア環境の一例を示す。

## 実施形態

### [0010] <内容>

[1. 概要]

[2. 用語の説明]

[3. 高コヒーレンスラマンによるVUV光生成装置] (図1)

3. 1 構成

3. 2 動作

### 3. 3 課題

[4. 第1の実施形態] (OPAを備えたポンプ光生成装置を含むVUV光生成装置) (図2、図3～図6)

#### 4. 1 構成 (図2)

#### 4. 2 動作

#### 4. 3 作用

#### 4. 4 変形例

#### 4. 5 波長の具体例 (図3～図6)

##### 4. 5. 1 具体例の構成

##### 4. 5. 2 具体例の動作及び作用

##### 4. 5. 3 具体例の変形例

[5. 第2の実施形態] (ポンプ光生成装置を含むVUV光生成装置の制御システム) (図7～図9)

#### 5. 1 構成

#### 5. 2 動作

#### 5. 3 作用

#### 5. 4 変形例

[6. 第3の実施形態] (OPAを備えたポンプ光生成装置のバリエーション) (図10～図14)

#### 6. 1 第1の構成例 (図10)

##### 6. 1. 1 構成

##### 6. 1. 2 動作

##### 6. 1. 3 作用

##### 6. 1. 4 変形例

#### 6. 2 第2の構成例 (図11)

#### 6. 3 第3の構成例 (図12)

##### 6. 3. 1 構成

##### 6. 3. 2 動作及び作用

#### 6. 4 第4の構成例（図13）

##### 6. 4. 1 構成

##### 6. 4. 2 動作

##### 6. 4. 3 作用

##### 6. 4. 4 変形例

#### 6. 5 第5の構成例（図14）

##### 6. 5. 1 構成

##### 6. 5. 2 動作及び作用

[7. 第4の実施形態]（偏光方向が最適化されたVUV光生成装置）（図15、図16）

#### 7. 1 第1の構成例（図15）

#### 7. 2 第2の構成例（図16）

[8. 第5の実施形態]（ラマンセル用ポンプ光の最適化）

##### 8. 1 ラマンセル用ポンプ光の波長最適化

##### 8. 2 ラマンセル用ポンプ光のスペクトル線幅の最適化

[9. 制御部のハードウェア環境]（図17）

[10. その他]

[0011] 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。

[0012] [1. 概要]

本開示は、例えば、ArFエキシマレーザの波長以下の波長のVUV光を生成するためのレーザシステムに関する。

[0013] [2. 用語の説明]

2つの励起光のそれぞれの波長をラマンの共鳴から近共鳴の範囲となるよ

うに調整することで、ラマン媒質の分子の運動がコヒーレントに動作する状態を作り得る。その結果、生成されるストークス光、及びアンチストークス光は、通常の誘導ラマン散乱とは異なり、位相整合を無視して同軸に生成され得る。本開示では、この現象を「高コヒーレンスラマン」と呼ぶ。

[0014] [3. 高コヒーレンスラマンによるVUV光生成装置]

3. 1 構成

図1は、高コヒーレンスラマンによるVUV光生成装置の一構成例を概略的に示している。VUV光生成装置は、ポンプ光生成装置101と、第3のレーザ装置30と、高反射ミラー22と、ダイクロイックミラー12と、ラマンセル2と、ダイクロイックミラー13とを含んでいてもよい。

[0015] ラマンセル2は、チャンバ40と、レーザ光を入力するためのウインドウ41と、レーザ光を出力するためのウインドウ42とを含んでいてもよい。ここで、ラマンセル2中に封入されるガスは、例えば、水素ガスであってもよい。好ましくは、電子スピンの方向が同じ方向であるパラ水素ガスであってもよい。ウインドウ42はVUV光9を透過するフッ化物（例えば、 $\text{CaF}_2$ 、 $\text{MgF}_2$ ）結晶であってもよい。

[0016] ポンプ光生成装置101は、第1のレーザ装置101Aと、第2のレーザ装置101Bと、高反射ミラー21と、ダイクロイックミラー11とを含んでいてもよい。

[0017] 第1のレーザ装置101Aは、第1のラマンセル用ポンプ光4Aとなる波長 $\lambda_1$ のパルスレーザ光を出力する狭帯域化レーザ装置であってもよい。第1のレーザ装置101Aは例えば、シングル縦モードで発振する半導体レーザと、シード光を増幅する増幅器とを含むレーザ装置であってもよい。この場合、増幅器は、例えばチタンサファイア結晶を含んでいてもよい。

[0018] 第2のレーザ装置101Bは、第2のラマンセル用ポンプ光4Bとなる波長 $\lambda_2$ のパルスレーザ光を出力する狭帯域化レーザ装置であってもよい。第2のレーザ装置101Bは例えば、シングル縦モードで発振する半導体レーザと、シード光を増幅する増幅器とを含むレーザ装置であってもよい。この

場合、増幅器は、例えばチタンサファイア結晶を含んでいてもよい。

[0019] ここで、第1のラマンセル用ポンプ光4 Aの光エネルギーと第2のラマンセル用ポンプ光4 Bの光エネルギーとの差が、ラマンセル2に封入されているガス分子を共鳴又は近共鳴させることとなるように、波長 $\lambda_1$ と波長 $\lambda_2$ とが調節されていてもよい。

[0020] 高反射ミラー2 1とダイクロイックミラー1 1は、第1のラマンセル用ポンプ光4 Aと第2のラマンセル用ポンプ光4 Bとが互いに略同軸でポンプ光生成装置1 0 1から出力されるように配置されていてもよい。高反射ミラー2 1には、波長 $\lambda_2$ の光を高反射する膜がコートされていてもよい。ダイクロイックミラー1 1には、波長 $\lambda_1$ の光を高透過し、波長 $\lambda_2$ の光を高反射する膜がコートされていてもよい。

[0021] 第3のレーザ装置3 0は、被波長変換光3となるパルスレーザ光を出力するレーザ装置であってもよい。被波長変換光3は、波長変換の対象であるプローブ光であってもよい。被波長変換光3は、波長 $\lambda_3$ の紫外光であってもよい。第3のレーザ装置3 0は、例えば、KrFエキシマレーザ、ArFエキシマレーザ、F2レーザであってもよい。第3のレーザ装置3 0はまた、紫外線レーザ光を出力する非線形結晶を含む固体レーザ装置であってもよい。

[0022] 高反射ミラー2 2とダイクロイックミラー1 2は、第1のラマンセル用ポンプ光4 Aと第2のラマンセル用ポンプ光4 Bと被波長変換光3とが略同軸でラマンセル2のウィンドウ4 1に入射するように配置されていてもよい。

[0023] 高反射ミラー2 2には、波長 $\lambda_3$ の光を高反射する膜がコートされていてもよい。ダイクロイックミラー1 2には、波長 $\lambda_1$ 及び波長 $\lambda_2$ の光を高透過し、波長 $\lambda_3$ の光を高反射する膜がコートされていてもよい。

[0024] ダイクロイックミラー1 3は、ラマンセル2のウィンドウ4 2から出力されたレーザ光の光路上に配置されていてもよい。ダイクロイックミラー1 3には、ラマンセル2で生成された所望のVUV光9の波長の光を高反射し、波長 $\lambda_1$ 、波長 $\lambda_2$ 、波長 $\lambda_3$ の光は高透過する膜がコートされていてもよい。

い。

[0025] 3. 2 動作

図1に示したVUV光生成装置において、第1のレーザ装置101Aと第2のレーザ装置101Bとから、それぞれ波長 $\lambda_1$ と波長 $\lambda_2$ のパルスレーザ光が出力され得る。第1のラマンセル用ポンプ光4Aとなる波長 $\lambda_1$ のパルスレーザ光は、ダイクロイックミラー11とダイクロイックミラー12とを高透過して、ラマンセル2に入射し得る。第2のラマンセル用ポンプ光4Bとなる波長 $\lambda_2$ のパルスレーザ光は、高反射ミラー21とダイクロイックミラー11とを高反射して、波長 $\lambda_1$ のパルスレーザ光と略同軸となり得る。そして、波長 $\lambda_2$ のパルスレーザ光は、ダイクロイックミラー12を高透過して、ラマンセル2に入射し得る。

[0026] 被波長変換光3となる波長 $\lambda_3$ のパルスレーザ光は、高反射ミラー22とダイクロイックミラー12とを高反射して、波長 $\lambda_1$ 及び波長 $\lambda_2$ のパルスレーザ光と略同軸となり得る。そして、波長 $\lambda_3$ のパルスレーザ光は、ラマンセル2に入射し得る。

[0027] 波長 $\lambda_1$ 、波長 $\lambda_2$ 、及び波長 $\lambda_3$ のパルスレーザ光が互いに略同軸で、ラマンセル2のガス中を通過する際に、高コヒーレンスラマンの現象が起こり得る。その結果、ラマンセル2において、波長 $\lambda_3$ の被波長変換光3に対してストークス光とアンチストークス光とが生成され得る。このアンチストークス光としては、波長 $\lambda_3$ の被波長変換光3よりも短波長のVUV波長域の複数の次数のパルスレーザ光が生成され得る。

[0028] ウィンドウ42からは、波長 $\lambda_1$ 、波長 $\lambda_2$ 、及び波長 $\lambda_3$ のパルスレーザ光と、複数のストークス光と複数のアンチストークス光とが出力され得る。そして、これらの光のうち、所望のVUV光9はダイクロイックミラー13によって高反射され、その他の光、すなわち波長 $\lambda_1$ 、波長 $\lambda_2$ 、及び波長 $\lambda_3$ のパルスレーザ光やストークス光等はダイクロイックミラー13を高透過し得る。

[0029] 3. 3 課題

図 1 に示した VUV 光生成装置では、2つのラマンセル用ポンプ光を出力するために、独立した2台の狭帯域、高出力のパルスレーザ装置（第1及び第2のレーザ装置101A, 101B）を用い得る。このため、2つのラマンセル用ポンプ光となるレーザパルスの立ち上がり時間のオーバーラップを長期間維持するのが困難であり得た。

[0030] また、波長可変させるために第1及び第2のレーザ装置101A, 101Bにチタンサファイアレーザを使用する場合、以下の課題があった。まず、結晶を励起するために500nm付近のレーザ光が別に必要になり得る。そのため、発振効率が悪く、システムも巨大になり得る。また、チタンサファイア結晶は熱レンズ効果を強く受けるため、高繰返し化、高出力化をすると波面が歪み得る。その結果、安定した高コヒーレンスラマン現象を得るのが困難となり得た。

[0031] [4. 第1の実施形態]（OPA50を備えたポンプ光生成装置1を含むVUV光生成装置）

#### 4. 1 構成

図2は、本開示の第1の実施形態として、ポンプ光生成装置1を含むレーザシステムとしてのVUV光生成装置の一構成例を概略的に示している。なお、以下では図1に示したVUV光生成装置における構成要素と略同じ部分については、同一符号を付し、適宜説明を省略する。

[0032] 図2に示したVUV光生成装置は、図1におけるポンプ光生成装置101に代えてポンプ光生成装置1を含んでいてもよい。ポンプ光生成装置1は、第1のレーザ装置10と、第2のレーザ装置20とを含んでいてもよい。ポンプ光生成装置1はまた、高反射ミラー23と、ダイクロイックミラー14と、OPA（光パラメトリック増幅器：Optical Parametric Amplifier）50と、ダイクロイックミラー15とを含んでいてもよい。

[0033] 第1のレーザ装置10は、第1のOPA用レーザ装置であってもよい。第2のレーザ装置20は、第2のOPA用レーザ装置であってもよい。第3のレーザ装置30は、プローブ光としての被波長変換光3を出力するラマンセ

ル用レーザ装置であってもよい。ポンプ光生成装置 1 は、ラマンセル 2 に向けて、少なくとも、第 1 のラマンセル用ポンプ光及び第 2 のラマンセル用ポンプ光を出力するものであってもよい。OPA50 は、OPA 用ポンプ光 4 及び OPA 用シグナル光 5 を入力としてもよい。OPA50 は、OPA 用ポンプ光 4、OPA 用シグナル光 5 の増幅光 5A、及びアイドラ光 6 の 3 つの光のうち 2 つの光を、第 1 のラマンセル用ポンプ光及び第 2 のラマンセル用ポンプ光としてラマンセル 2 に向けて出力する OPA であってもよい。

[0034] 第 1 のレーザ装置 10 は、OPA 用ポンプ光 4 となる波長  $\lambda_4$  のパルスレーザ光を出力する狭帯域化レーザ装置であってもよい。第 1 のレーザ装置 10 は例えば、CW のシングル縦モードで発振する半導体レーザと、光シャッタと、シード光を増幅する増幅器と、第 2 高調波を生成する LBO 結晶とを含むレーザ装置であってもよい。この場合、光シャッタは例えば EO ポッケルスセルと偏光子との組み合わせでもよい。増幅器は例えば、Yb ファイバ増幅器を含んでもよい。

[0035] 第 2 のレーザ装置 20 は、OPA 用シグナル光 5 となる波長  $\lambda_5$  のパルスレーザ光を出力する狭帯域化レーザ装置であってもよい。第 2 のレーザ装置 20 は例えば、CW で発振するシングル縦モードの半導体レーザ装置と光シャッタと増幅器との組み合わせであってもよい。この場合、光シャッタは例えば、EO ポッケルスセルと偏光子との組み合わせであってもよい。

[0036] 高反射ミラー 23 とダイクロイックミラー 14 は、波長  $\lambda_4$  のパルスレーザ光と波長  $\lambda_5$  のパルスレーザ光とが互いに略同軸となるように配置されていてもよい。高反射ミラー 23 には、波長  $\lambda_5$  の光を高反射する膜がコートされていてもよい。ダイクロイックミラー 14 には、波長  $\lambda_4$  の光を高透過し、波長  $\lambda_5$  の光を高反射する膜がコートされていてもよい。

[0037] OPA50 は、OPA 用ポンプ光 4 となる波長  $\lambda_4$  のパルスレーザ光と OPA 用シグナル光 5 となる波長  $\lambda_5$  のパルスレーザ光とが入力されるように配置してもよい。OPA50 は、例えば、周期分極反転ニオブ酸リチウム (PPLN) や、BBO 結晶であってもよい。

[0038] ダイクロイックミラー15は、OPA50の出力側の光路上に配置されていてもよい。ダイクロイックミラー15には、波長 $\lambda_4$ の光と波長 $\lambda_5$ の光を高透過し、OPA50によって生成されたアイドラ光6の波長 $\lambda_6$ の光を高反射する膜がコートされていてもよい。

[0039] 4. 2 動作

図2に示したVUV光生成装置において、第1のレーザ装置10から、波長 $\lambda_4$ のOPA用ポンプ光4となるパルスレーザ光が出力され得る。また、第2のレーザ装置20から、波長 $\lambda_5$ のOPA用シグナル光5となるパルスレーザ光が出力され得る。波長 $\lambda_4$ のOPA用ポンプ光4はダイクロイックミラー14を高透過して、OPA50に入射し得る。波長 $\lambda_5$ のOPA用シグナル光5は、高反射ミラー23とダイクロイックミラー14とを高反射して、波長 $\lambda_4$ のOPA用ポンプ光4と略同軸となって、波長 $\lambda_4$ のOPA用ポンプ光4と共にOPA50に入射し得る。

[0040] OPA50の結晶中を、波長 $\lambda_4$ のOPA用ポンプ光4と波長 $\lambda_5$ のOPA用シグナル光5とが通過すると、波長 $\lambda_5$ のOPA用シグナル光5が増幅され、波長 $\lambda_6$ のアイドラ光6が生成され得る。そして、OPA50から、波長 $\lambda_4$ のOPA用ポンプ光4と、波長 $\lambda_5$ のOPA用シグナル光5の増幅光5Aと、波長 $\lambda_6$ のアイドラ光6との3つの光が出力され得る。ここで、アイドラ光6の波長 $\lambda_6$ に関して、以下の関係式(1)が成立し得る。

$$c/\lambda_4 - c/\lambda_5 = c/\lambda_6 \quad \cdots \cdots (1)$$

ただし、 $c$ は光速を示す。

[0041] 上記3つの光のうち、アイドラ光6はダイクロイックミラー15によって高反射され、OPA用ポンプ光4とOPA用シグナル光5の増幅光5Aとがダイクロイックミラー15を高透過し得る。そして、波長 $\lambda_4$ のOPA用ポンプ光4と波長 $\lambda_5$ のOPA用シグナル光5の増幅光5Aとがダイクロイックミラー12を高透過して、第1のラマンセル用ポンプ光及び第2のラマンセル用ポンプ光としてラマンセル2に入射し得る。

[0042] ここで、波長 $\lambda_4$ の光エネルギーと波長 $\lambda_5$ の光エネルギーとの差が、ラマン

セル 2 に封入されているガス分子を共鳴又は近共鳴させることとなるように、第 1 のレーザ装置 10 と第 2 のレーザ装置 20 との発振波長をそれぞれ波長制御してもよい。

[0043] 被波長変換光 3（プローブ光）となる波長  $\lambda_3$  のパルスレーザ光は、高反射ミラー 22 とダイクロイックミラー 12 とを高反射して、波長  $\lambda_4$  及び波長  $\lambda_5$  のパルスレーザ光と互いに略同軸となり得る。そして、被波長変換光 3 はラマンセル 2 に入射し得る。

[0044] 波長  $\lambda_4$ 、波長  $\lambda_5$ 、及び波長  $\lambda_3$  のパルスレーザ光が互いに略同軸で、ラマンセル 2 のガス中を通過する際に、高コヒーレンスラマンの現象が起こり得る。その結果、ラマンセル 2 において、波長  $\lambda_3$  の被波長変換光 3 に対して、ストークス光とアンチストークス光とが生成され得る。このアンチストークス光としては、波長  $\lambda_3$  の被波長変換光 3 よりも短波長の複数の次数のパルスレーザ光が生成され得る。

[0045] ウィンドウ 42 からは、波長  $\lambda_4$ 、波長  $\lambda_5$ 、及び波長  $\lambda_3$  のパルスレーザ光と、複数のストークス光と複数のアンチストークス光とが出力され得る。そして、これらの光のうち、所望の VUV 光 9 はダイクロイックミラー 13 によって高反射され、その他の光、すなわち波長  $\lambda_4$ 、波長  $\lambda_5$ 、及び波長  $\lambda_3$  のパルスレーザ光やストークス光等はダイクロイックミラー 13 を高透過し得る。

[0046] 4. 3 作用

この第 1 の実施形態によれば、OPA50 を利用することで、高出力の OPA 用ポンプ光 4 で低出力の OPA 用シグナル光 5 を増幅し、アイドラ光 6 に変換させ得る。OPA50 を通過してきた OPA 用ポンプ光 4 と OPA 用シグナル光 5 の増幅光 5A とをラマンセル用ポンプ光として利用できるもので、図 1 に示した VUV 光生成装置に比べてポンプ光生成装置 1 を小型化し得る。

[0047] 第 1 のレーザ装置 10 と第 2 のレーザ装置 20 は、それぞれ、CW 発振のシングル縦モードの半導体レーザと、光シャッタと、増幅器との組み合わせ

であってもよい。この場合、第1のレーザ装置10と第2のレーザ装置20とにおけるそれぞれの光シャッタの開閉タイミングを制御することによって、第1のレーザ装置10と第2のレーザ装置20とから出力される各パルスレーザ光の出力タイミングとパルス波形とが安定化し得る。

[0048] 4. 4 変形例

上記説明では、ラマンセル用ポンプ光として、OPA用ポンプ光4とOPA用シグナル光5の増幅光5Aとを利用する例を挙げたが、これに限定されることなく、ラマンセル用ポンプ光として以下の光の組み合わせ(a)又は(b)を利用してもよい。

[0049] (a) 波長 $\lambda_4$ のOPA用ポンプ光4と波長 $\lambda_6$ のアイドラ光6

この(a)の場合は、ダイクロイックミラー14には、波長 $\lambda_5$ の光を高反射、波長 $\lambda_4$ の光と波長 $\lambda_6$ の光を高透過する膜がコートされていてもよい。

[0050] (b) 波長 $\lambda_5$ のOPA用シグナル光5の増幅光5Aと波長 $\lambda_6$ のアイドラ光6

この(b)の場合は、ダイクロイックミラー14には、波長 $\lambda_4$ の光を高反射、波長 $\lambda_5$ の光と波長 $\lambda_6$ の光を高透過する膜がコートされていてもよい。

[0051] 上記説明では、第1のレーザ装置10及び第2のレーザ装置20としてシングル縦モードで発振する半導体レーザの例を挙げたが、これに限定されない。例えば、第1のレーザ装置10及び第2のレーザ装置20から出力されるパルスレーザ光がマルチ縦モードであってもよい。ただし、このときのそれぞれのスペクトル線幅は、高コヒーレンスラマンの現象が起こり得る線幅であってもよい。

[0052] 4. 5 波長の具体例

4. 5. 1 具体例の構成

図3に、図2に示したVUV光生成装置に適用されるレーザ波長の具体例を示す。図4～図6には、被波長変換光3と、被波長変換光3から生成され

るストークス光及びアンチストークス光との波長の一例を示す。

[0053] 第1のレーザ装置10は例えば、波長 $1030\text{ nm}$ でCW発振する半導体レーザと、光シャッタと、増幅器と、第2高調波を生成する非線形結晶とを含んでいてもよい。そして、第1のレーザ装置10は例えば、図3に示したように、波長 $\lambda_4 = 515\text{ nm}$ のパルスレーザ光を出力するレーザ装置であってもよい。

[0054] 第2のレーザ装置20は、例えば、波長 $655.26\text{ nm}$ でCW発振する半導体レーザと、光シャッタと、増幅器とを含んでいてもよい。そして、第2のレーザ装置20は例えば、図3に示したように、波長 $\lambda_5 = 655.26\text{ nm}$ のパルスレーザ光を出力するレーザ装置であってもよい。

[0055] 第3のレーザ装置30は例えば、図3に示したように、波長 $\lambda_3 = 193.4\text{ nm}$ で発振するArFエキシマレーザ装置であってもよい。

[0056] 4. 5. 2 具体例の動作及び作用

図4は、第3のレーザ装置30がArFエキシマレーザである場合に、高コヒーレンスラマンの現象によって、生成され得るストークス光とアンチストークス光との波長を示す。ArFエキシマレーザの場合、+1次光として $179.0\text{ nm}$ 、+2次光として $166.59\text{ nm}$ 、+3次光として $155.79\text{ nm}$ 、+4次光として $146.30\text{ nm}$ 、・・・のアンチストークス光が生成され得る。この場合、+1次、+2次、+3次、+4次、・・・のアンチストークス光の光強度は、波長 $\lambda_3 = 193.4\text{ nm}$ の光強度に対して、それぞれ15%、6%、3%、1%、・・・となり得る。

[0057] 図5は、第3のレーザ装置30がF2レーザである場合に生成され得るストークス光とアンチストークス光との波長を示す。図5に示すように、F2レーザの場合、+1次光として $147.93\text{ nm}$ 、+2次光として $139.35\text{ nm}$ 、+3次光として $131.71\text{ nm}$ 、+4次として $124.87\text{ nm}$ 、・・・のアンチストークス光が生成され得る。この場合、+1次、+2次、+3次、+4次、・・・のアンチストークス光の光強度は、波長 $\lambda_3 = 157.63\text{ nm}$ の光強度に対して、それぞれ15%、6%、3%、1

%、・・・となり得る。このようにして、124.87nmのVUV光9が生成され得る。

[0058] 図6は、第3のレーザ装置30がKrFエキシマレーザである場合に生成され得るストークス光とアンチストークス光との波長を示す。図6に示すように、KrFエキシマレーザの場合、+1次光として225.20nm、+2次光として205.90nm、+3次光として189.65nm、+4次光として175.78nm、・・・のアンチストークス光が生成され得る。

[0059] 4.5.3 具体例の変形例

上記した具体例に限らず、第3のレーザ装置30として、波長126nmで発振するAr<sub>2</sub>（アルゴンダイマー）レーザを用いてもよい。

[0060] また、複数の次数のストークス光を生成するため、ダイクロイックミラー13で所望のVUV光9を分離するのが困難な場合には、フッ化カルシウム結晶のプリズム、又は、反射型のグレーティングで分光して所望のVUV光9を取り出してもよい。

[0061] [5. 第2の実施形態]（ポンプ光生成装置1を含むVUV光生成装置の制御システム）

#### 5.1 構成

図7は、本開示の第2の実施形態として、VUV光生成装置の制御システムの一構成例を概略的に示している。なお、以下では図2に示したVUV光生成装置における構成要素と略同じ部分については、同一符号を付し、適宜説明を省略する。

[0062] 図7に示したVUV光生成装置は、図2に示したVUV光生成装置に対してさらに、第1のモニタ部51と、第2のモニタ部52と、第3のモニタ部53と、第4のモニタ部54と、制御部56と、トリガ遅延回路55とを含んでいてもよい。なお、図7において、Trはトリガ信号ライン、Dsは制御信号又はデータ信号の送受信ラインを示す。

[0063] 第1のモニタ部51は、OPA用ポンプ光4の状態を計測するポンプ光モ

ニタ部であってもよい。第2のモニタ部52は、OPA用シグナル光5の状態を計測するシグナル光モニタ部であってもよい。第3のモニタ部53は、被波長変換光3の状態を計測するプローブ光モニタ部であってもよい。第4のモニタ部54は、OPA50とラマンセル2との間の光路上に配置され、OPA用ポンプ光4、OPA用シグナル光5の増幅光5A、及びアイドラ光6の3つの光の状態を計測するOPAモニタ部であってもよい。

[0064] 第1のモニタ部51は、第1のレーザ装置10とダイクロイックミラー14との間の光路上に配置してもよい。第2のモニタ部52は、高反射ミラー23とダイクロイックミラー14との間の光路上に配置してもよい。第3のモニタ部53は、高反射ミラー22とダイクロイックミラー12との間の光路上に配置してもよい。第4のモニタ部54は、OPA50とダイクロイックミラー15との間の光路上に配置してもよい。

[0065] 第1のモニタ部51は、ビームスプリッタ71と、第1の光センサ61とを含んでもよい。ビームスプリッタ71は、第1のレーザ装置10とダイクロイックミラーとの間の光路上に配置してもよい。ビームスプリッタ71には、波長 $\lambda_4$ のOPA用ポンプ光4の一部の光を反射する膜がコートされていてもよい。

[0066] 第2のモニタ部52は、ビームスプリッタ72と、第2の光センサ62とを含んでもよい。ビームスプリッタ72は、高反射ミラー23とダイクロイックミラー14との間の光路上に配置してもよい。ビームスプリッタ72には、波長 $\lambda_5$ のOPA用シグナル光5の一部の光を反射する膜がコートされていてもよい。

[0067] 第3のモニタ部53は、ビームスプリッタ73と、第3の光センサ63とを含んでもよい。ビームスプリッタ73には、波長 $\lambda_3$ の被波長変換光3の一部の光を反射する膜がコートされていてもよい。ビームスプリッタ73は、被波長変換光3の一部の光を第3の光センサ63に入射するように配置されていてもよい。

[0068] 第4のモニタ部54は、ビームスプリッタ74と、分光器64とを含んで

いてもよい。分光器 64 は、ビームスプリッタ 74 の反射光が入射するように配置されていてもよい。ビームスプリッタ 74 には、波長  $\lambda_4$  の OPA 用ポンプ光 4 と、波長  $\lambda_5$  の OPA 用シグナル光 5 の増幅光 5A と、波長  $\lambda_6$  のアイドラ光 6 の一部の光を反射する膜がコートされていてもよい。分光器 64 は、例えば、マイケルソン干渉計、グレーティング又はエタロン等を含む分光器であってもよい。分光器 64 は、OPA 用ポンプ光 4 と、OPA 用シグナル光 5 の増幅光 5A と、アイドラ光 6 との波長をそれぞれ計測可能な装置であってもよい。

[0069] 第 1 のモニタ部 51 の第 1 の光センサ 61 と OPA 50 との間の光路長  $L_1$  と、第 2 のモニタ部 52 の第 2 の光センサ 62 と OPA 50 との間の光路長  $L_2$  とが、略一致するように各モニタ部を配置してもよい。さらに、第 3 のモニタ部 53 とラマンセル 2 との間の光路長  $L_3$  と、第 1 のモニタ部 51 又は第 2 のモニタ部 52 とラマンセル 2 までの光路長  $L_4$  とが略一致するように各モニタ部を配置してもよい。

[0070] 第 1、第 2 及び第 3 の光センサ 61, 62, 63 は、パルスレーザ光の時間波形を計測可能な高速のフォトダイオード又は光電管を含む光センサであってもよい。

[0071] 制御部 56 及びトリガ遅延回路 55 は、第 1 のレーザ装置 10 及び第 2 のレーザ装置 20 を制御する第 1 のタイミング制御部であってもよい。第 1 のタイミング制御部は、第 1 のモニタ部 51 及び第 2 のモニタ部 52 の計測結果に基づいて、OPA 50 に OPA 用ポンプ光 4 と OPA 用シグナル光 5 とが略同時に入力されるようにタイミング制御を行ってもよい。

[0072] 制御部 56 及びトリガ遅延回路 55 はまた、第 2 のレーザ装置 20 及び第 3 のレーザ装置 30 を制御する第 2 のタイミング制御部であってもよい。第 2 のタイミング制御部は、第 2 のモニタ部 52 及び第 3 のモニタ部 53 の計測結果に基づいて、ラマンセル 2 に OPA 用シグナル光 5 の増幅光 5A と被波長変換光 3 とが略同時に入力されるようにタイミング制御を行ってもよい。

[0073] 制御部56はまた、第1のレーザ装置10及び第2のレーザ装置20のうち少なくとも1つを制御する波長制御部であってもよい。波長制御部は、第4のモニタ部54の計測結果に基づいて、OPA用ポンプ光4、OPA用シグナル光5の増幅光5A、及びアイドラ光6のうち、第1のラマンセル用ポンプ光、及び第2のラマンセル用ポンプ光となる2つのレーザ光の波長が所望の波長となるように波長制御を行ってもよい。

[0074] 5. 2 動作

図7に示したVUV光生成装置において、制御部56は、第1及び第2のモニタ部51、52によって、OPA50に入射するOPA用ポンプ光4及びOPA用シグナル光5に対応する2つのパルスレーザ光の時間パルス波形と両パルスのタイミングの差 $\Delta T_{4-5}$ とを計測し得る。ここで、制御部56は、トリガ遅延回路55に、 $\Delta T_{4-5}$ が0に近づくように、トリガ遅延回路55に遅延データを送信してもよい。

$|\Delta T_{4-5}| \leq \Delta T_{4-5} \text{max}$ （許容値以下）となると、その結果、OPA50から、波長 $\lambda_4$ のOPA用ポンプ光4、波長 $\lambda_5$ のOPA用シグナル光5の増幅光5A、及び波長 $\lambda_6$ のアイドラ光6が出力され得る。

[0075] 制御部56はまた、第2のモニタ部52と第3のモニタ部53とによって、OPA用シグナル光5及び被波長変換光3に対応する2つのパルスレーザ光が通過時の時間パルス波形を計測し得る。第2のモニタ部52及び第3のモニタ部53からラマンセル2までの光路長 $L_3 = L_4$ で配置しているので、制御部56は、ラマンセル2に入射するときのそれぞれのパルスレーザ光のパルス波形のタイミングの差 $\Delta T_{3-5}$ を計測し得る。ここで、制御部56は、トリガ遅延回路55に、 $\Delta T_{3-5}$ が0に近づくように、遅延データを送信してもよい。

$|\Delta T_{3-5}| \leq \Delta T_{3-5} \text{max}$ （許容値以下）となると、その結果、OPA用ポンプ光4とOPA用シグナル光5の増幅光5Aと被波長変換光3とが略同時にラマンセル2に入射し得る。

[0076] 制御部56は、第4のモニタ部54で計測された、OPA用ポンプ光4、

OPA用シグナル光5の増幅光5A、及びアイドラ光6のそれぞれの波長データを受信してもよい。ここで、高コヒーレンスラマンの現像が発生するためには、以下の式を満たす必要があり得る。

$$h \cdot c / \lambda_4 - h \cdot c / \lambda_5 = \Delta E \quad \cdots \cdots (2)$$

ここで、 $h$  : プランク定数、 $c$  : 光速、 $\Delta E$  : ラマンの共鳴又は近共鳴のバンドギャップ

[0077] (2) 式から第2のレーザ装置20の目標波長 $\lambda_{5t}$ を以下の式により求めてもよい。

$$\lambda_{5t} = \lambda_4 \cdot h \cdot c / (h \cdot c - \lambda_4 \cdot \Delta E) \quad \cdots \cdots (3)$$

[0078] 制御部56は、計測されたOPA用シグナル光5の波長 $\lambda_5$ と目標波長 $\lambda_{5t}$ との差 $\delta\lambda_5$ を計算し、 $\delta\lambda_5$ が0に近づくように第2のレーザ装置20に制御信号を送信し発振波長を制御してもよい。

[0079] これにより、 $|\delta\lambda_5| \leq \delta\lambda_{5max}$  (許容範囲以下) となり得る。その結果、ラマンセル2において、波長 $\lambda_4$ 、波長 $\lambda_5$ 、及び波長 $\lambda_3$ のパルスレーザ光が互いに略同軸で、ガス中を通過する際に、高コヒーレンスラマンの現象が起こり得る。その結果、ラマンセル2のウインドウ42からは、波長 $\lambda_5$ 、波長 $\lambda_6$ 、及び波長 $\lambda_3$ のパルスレーザ光と、複数のストークス光と複数のアンチストークス光とが出力され得る。そして、これらの光のうち、所望のVUV光9はダイクロイックミラー13によって高反射され、その他の光、すなわち波長 $\lambda_5$ 、波長 $\lambda_6$ 、及び波長 $\lambda_3$ のパルスレーザ光やストークス光等はダイクロイックミラー13を高透過し得る。

[0080] 次に、図8及び図9を参照して、上記した制御の流れをより具体的に説明する。図9は図8に続く制御の流れの一例を示している。

[0081] 制御部56は、以下の初期データの設定処理を開始してもよい(ステップS101)。

第1のレーザ装置10の設定波長 $\lambda_{4s} = \lambda_{40}$

第2のレーザ装置20の設定波長 $\lambda_{5s} = \lambda_{50}$

第1のレーザ装置10の設定遅延時間 $Td_{4s} = Td_{40}$

第2のレーザ装置20の設定遅延時間  $Td5s = Td50$

第3のレーザ装置30の設定遅延時間  $Td3s = Td30$

[0082] 制御部56はまず、第1及び第2のレーザ装置10、20にそれぞれの設定波長データ $\lambda4s$ と $\lambda5s$ を送信してもよい（ステップS102）。次に、制御部56は、第1、第2及び第3のレーザ装置10、20、30のそれぞれのトリガの遅延データ $T4ds$ 、 $T5ds$ 、 $T3ds$ をトリガ遅延回路55に送信してもよい（ステップS103）。このとき、制御部56は、トリガ遅延回路55に所定の繰り返し周波数 $f$ でトリガを送信してもよい（ステップS104）。

[0083] 制御部56は、第1及び第2のモニタ部52、53によって、OPA用ポンプ光4及びOPA用シグナル光5に対応する2つのパルスレーザ光のパルス波形のタイミングの差 $\Delta T_{4-5}$ を計測してもよい（ステップS105）。

[0084] 次に、制御部56は、OPA用ポンプ光4とOPA用シグナル光5とのパルスがOPA50に略同時に入射するように、ステップS106～S109の処理によって、トリガのタイミングを調整してもよい。このために、まず、制御部56は、第2のレーザ装置20に対する以下の遅延データ補正値を計算してもよい（ステップS106）。

$$T5ds = T5ds + \Delta T_{4-5}$$

[0085] 次に、制御部56は、第1、第2及び第3のレーザ装置10、20、30のそれぞれのトリガの遅延データ $T4ds$ 、 $T5ds$ 、 $T3ds$ をトリガ遅延回路55に送信してもよい（ステップS107）。次に、制御部56は、第1及び第2のモニタ部51、52によって、OPA用ポンプ光4とOPA用シグナル光5とのパルス波形のタイミングの差 $\Delta T_{4-5}$ を計測してもよい（ステップS108）。

[0086] 次に、制御部56は、以下の式のように $\Delta T_{4-5}$ が所定の許容値 $\Delta T_{4-5}max$ 以下となっているか否かを判断してもよい（ステップS109）。

$$|\Delta T_{4-5}| \leq \Delta T_{4-5}max$$

[0087] 所定の許容値 $\Delta T_{4-5}max$ 以下になっていない場合（ステップS109：N

）、制御部56は、ステップS106の処理に戻ってもよい。所定の許容値 $\Delta T_{4-5} \text{max}$ 以下になっている場合（ステップS109：Y）、制御部56は次に、第2及び第3のモニタ部52、53によって、OPA用シグナル光5及び被波長変換光3に対応する2つのパルスレーザ光のパルス波形のタイミングの差 $\Delta T_{5-3}$ を計測してもよい（ステップS110）。

[0088] 次に、制御部56は、OPA用シグナル光5の増幅光5Aと被波長変換光3とがラマンセル2に略同時に入射するように、ステップS111～S114の処理によって、トリガのタイミングを調整してもよい。このために、まず、制御部56は、第3のレーザ装置30に対する以下の遅延データ補正値を計算してもよい（ステップS111）。

$$T3ds = T3ds + \Delta T_{5-3}$$

[0089] 次に、制御部56は、第1、第2及び第3のレーザ装置10、20、30のそれぞれのトリガの遅延データ $T4ds$ 、 $T5ds$ 、 $T3ds$ をトリガ遅延回路55に送信してもよい（ステップS112）。次に、制御部56は、第2及び第3のモニタ部52、53によって、OPA用シグナル光5と被波長変換光3とのパルス波形のタイミングの差 $\Delta T_{5-3}$ を計測してもよい（ステップS113）。

[0090] 次に、制御部56は、以下の式のように $\Delta T_{5-3}$ が所定の許容値 $\Delta T_{5-3} \text{max}$ 以下となっているか否かを判断してもよい（ステップS114）。

$$|\Delta T_{5-3}| \leq \Delta T_{5-3} \text{max}$$

[0091] 所定の許容値 $\Delta T_{5-3} \text{max}$ 以下になっていない場合（ステップS114：N）、制御部56は、ステップS111の処理に戻ってもよい。所定の許容値 $\Delta T_{5-3} \text{max}$ 以下になっている場合（ステップS114：Y）、制御部56は次に、第4のモニタ部54によって、OPA50の出力光の波長（波長 $\lambda_4$ 、波長 $\lambda_5$ 、波長 $\lambda_6$ ）を計測してもよい（ステップS115）。

[0092] 次に、制御部56は、上記式（3）によって、高コヒーレンスラマンの現象が発生するためのOPA用シグナル光5の目標波長 $\lambda_{5t}$ を計算してもよい（ステップS116）。次に、制御部56は、第2のレーザ装置20の設

定波長 $\lambda_{5s}$ を目標波長 $\lambda_{5t}$ に設定してもよい（ステップS117）。

[0093] 次に、制御部56は、高コヒーレンスラマンの現象が発生するように、ステップS118～S121の処理によって、第2のレーザ装置20の波長を調整してもよい。このために、まず、制御部56は、第1及び第2のレーザ装置10、20にそれぞれの設定波長データ $\lambda_{4s}$ と $\lambda_{5s}$ を送信してもよい（ステップS118）。次に、制御部56は、制御部56は、第4のモニタ部54によって、OPA50の出力光の波長（波長 $\lambda_4$ 、波長 $\lambda_5$ 、波長 $\lambda_6$ ）を計測してもよい（ステップS119）。

[0094] 次に、制御部56は、計測されたOPA用シグナル光5の波長 $\lambda_5$ と目標波長 $\lambda_{5t}$ との差 $\Delta\lambda_5 (= \lambda_5 - \lambda_{5t})$ を計算してもよい（ステップS120）。次に、制御部56は、 $\Delta\lambda_5 = \delta\lambda_5$ が、以下の式のように所定の許容値 $\delta\lambda_{5max}$ 以下となっているか否かを判断してもよい（ステップS121）。

$$|\delta\lambda_5| \leq \delta\lambda_{5max}$$

[0095] 所定の許容値 $\delta\lambda_{5max}$ 以下になっていない場合（ステップS121：N）、制御部56は、ステップS118の処理に戻ってもよい。所定の許容値 $\delta\lambda_{5max}$ 以下になっている場合（ステップS121：Y）、制御部56は次に、VUV光9の生成を中止するか否かを判断してもよい（ステップS122）。VUV光9の生成を中止する場合（ステップS122：Y）、制御のローを終了してもよい。VUV光9の生成を中止しない場合（ステップS122：N）、ステップS105の処理に戻ってもよい。

[0096] 5. 3 作用

この第2の実施形態によれば、第1のモニタ部51及び第2のモニタ部52によって、OPA50に入射するOPA用ポンプ光4及びOPA用シグナル光5に対応する2つのパルスレーザ光の時間パルス波形とタイミングとを計測し得る。この計測結果に基づいて、第1及び第2のレーザ装置20へのトリガの入力タイミングを制御しているので、OPA50において、OPA用シグナル光5の増幅光5Aとアイドラ光6とを効率よく、安定して生成し

得る。

[0097] また、この第2の実施形態によれば、第4のモニタ部54によって、OPA用ポンプ光4とOPA用シグナル光5の増幅光5Aとアイドラ光6との波長を計測し得る。この計測結果に基づいて、第2のレーザ装置20の発振波長を制御することによって、高精度にOPA用ポンプ光4とOPA用シグナル光5の増幅光5Aとの光のエネルギー差をラマンの共鳴又は近共鳴となるように制御し得る。その結果、効率よく、安定してVUV光9を生成し得る。

[0098] また、第3のモニタ部53によって、被波長変換光3がラマンセル2へ入射するパルスのタイミングと時間パルス波形とを計測し得る。この計測結果に基づいて、第3のレーザ装置30へのトリガのタイミングを制御しているので、ラマンセル2から出力されるVUV光9を効率よく、安定して生成し得る

#### [0099] 5. 4 変形例

上記の説明では、波長 $\lambda_4$ と波長 $\lambda_5$ との波長差 $\delta\lambda_{4-5}$ と、波長差の目標値 $\Delta\lambda_{4-5}t$ とを計算し、 $\Delta\lambda_{4-5}$ が0に近づくように制御部56が第2のレーザ装置20に制御信号を送信し発振波長を制御し得る。この例に限定されことなく、第1のレーザ装置10の発振波長を制御してもよい。又は、第1及び第2のレーザ装置10、20の発振波長の両方を制御してもよい。

[0100] さらに、OPA用ポンプ光4のパルス幅 $\Delta T_4$ は、OPA用シグナル光5のパルス幅 $\Delta T_5$ 以下が好ましい。

[0101] OPA用ポンプ光4、OPA用シグナル光5、及び被波長変換光3のそれぞれのパルスレーザ光のタイミングは、時間パルス波形のピークの時間、又は、ピークの半値の2つの時間の平均値であってもよい。OPA用シグナル光5のパルス幅の半値全幅は、20～40nsであってもよい。OPA用ポンプ光4のパルス幅の半値全幅は、10～30ns+10nsであってもよい。被波長変換光3のパルス幅の半値全幅は10～30nsであってもよい。

[0102] [6. 第3の実施形態] (OPA50を備えたポンプ光生成装置1のバリエ

ーション)

本実施形態では、上記第1及び第2の実施形態のVUV光生成装置に適用可能なポンプ光生成装置1のバリエーションについて説明する。

[0103] 6. 1 第1の構成例

6. 1. 1 構成

図10は、ポンプ光生成装置1の第1の構成例を概略的に示している。なお、以下では図2又は図7に示したVUV光生成装置における構成要素と略同じ部分については、同一符号を付し、適宜説明を省略する。

[0104] 図10に示したように、第1のレーザ装置10は、分布帰還型半導体レーザ(DFB-LD)111と、光シャッタ112と、レーザダイオード(LD)114でポンプするファイバ増幅器113と、LD117でポンプする固体増幅器115とを含んでもよい。光シャッタ112と、ファイバ増幅器113と、固体増幅器115は、この順序で、DFB-LD111の出力レーザ光の光路上にそれぞれ配置されていてもよい。

[0105] DFB-LD111は、OPA用ポンプ光4のシードとしてのシード光を出力するレーザ光源であってもよい。DFB-LD111は、シングル縦モードのCW発振のレーザであって、例えば、ペルチェ素子によって、高精度に半導体の温度を制御する装置を含んでもよい。DFB-LD111の発振波長 $\lambda$ は、1030nmであってもよい。光シャッタ112は、EOポッケルスセルと偏光子とを組み合わせた光シャッタであってもよい。ファイバ増幅器113は、金属がドープされていてもよい。ファイバ増幅器113は、ポンプ用のLD114を含んでもよい。固体増幅器115は、金属をドープしたYAG結晶のロッドと、ポンプ用のLD117とを含んでもよい。

[0106] 第2のレーザ装置20は、分布帰還型半導体レーザ(DFB-LD)121と、光シャッタ122と、増幅器123とを含んでもよい。光シャッタ122と増幅器123は、この順序で、DFB-LD121の出力レーザ光の光路上にそれぞれ配置されていてもよい。DFB-LD121は、シン

グル縦モードのCW発振のレーザであって、例えば、ペルチェ素子によって、高精度に半導体の温度を制御する装置を含んでいてもよい。DFB-LD 121の発振波長 $\lambda$ は、1832.6nm又は2403nmであってもよい。光シャッタ122は、EOポッケルスセルと偏光子とを組み合わせた光シャッタであってもよい。

[0107] 図10には図示していないが、第1のモニタ部51と第2のモニタ部52とが、図7と同様な位置に設けられていてもよい。

[0108] 6. 1. 2 動作

図10において、制御部56から、DFB-LD 111に、目標の発振波長 $\lambda = 1030\text{nm}$ となるように、半導体レーザの温調の温度を設定して、半導体に図示しない直流電源を介して所定の電流を流してもよい。また、制御部56から、DFB-LD 121に、目標の発振波長 $\lambda = 1832.6\text{nm}$ 又は $2403\text{nm}$ となるように、半導体レーザの温調の温度を設定して、半導体に図示しない直流電源を介して所定の電流を流してもよい。その結果、DFB-LD 111から、波長 $\lambda = 1030\text{nm}$ のCWのレーザ光が出力され得る。また、DFB-LD 121から、波長 $\lambda = 1832.6\text{nm}$ 又は $2403\text{nm}$ のCWのレーザ光が出力され得る。

[0109] 制御部56は、ファイバ増幅器113及び固体増幅器115のそれぞれのLD 114, 117に電流を流してポンプするよう制御してもよい。次に、制御部56は、トリガをトリガ遅延回路55に送信してもよい。その結果、トリガ遅延回路55から、光シャッタ112及び光シャッタ122へそれぞれ開閉信号が出力され得る。その結果、光シャッタ112及び光シャッタ122の出力として、それぞれ、パルスレーザ光が出力され得る。

[0110] 光シャッタ112から出力されたパルスレーザ光は、ファイバ増幅器113と固体増幅器115とによって増幅され、OPA用ポンプ光4として、OPA 50に入力され得る。また、光シャッタ122から出力されたパルスレーザ光は、増幅器123によって増幅され、OPA用シグナル光5としてOPA 50に入力され得る。その結果、OPA 50から、OPA用ポンプ光4

と、OPA用シグナル光5の増幅光5Aと、アイドラ光6とのそれぞれのパルス光が同時に出力され得る。

[0111] ビームスプリッタ74によって反射された上記3つのパルスレーザ光は分光器64に入射し、それぞれ波長が計測され得る。OPA50から出力された光のうち、波長2403nmのアイドラ光6はダイクロイックミラー15によって高反射され得る。波長1832nmのOPA用シグナル光5の増幅光5Aと、波長1030nmのOPA用ポンプ光4は、偏光が揃えられた後、同軸にラマンセル2に入射し得る。

[0112] 制御部56は、OPA用ポンプ光4の波長 $\lambda_4$ とOPA用シグナル光5の増幅光5Aの波長 $\lambda_5$ との計測結果に基づいて、高コヒーレンスラマンの現象が起こり得る波長となるように、DFB-LD111とDFB-LD121との少なくとも一方の発振波長を変化させてもよい。

[0113] 6. 3 作用

この第1の構成例によれば、第1のレーザ装置10において基本波をOPA用ポンプ光4として出力し得る。第1のレーザ装置10で2倍波を取る必要がないため、高効率でOPA用ポンプ光4を出力し得る。

[0114] 6. 1. 4 変形例

第1のレーザ装置10のファイバ増幅器113は、Ybをドープした光ファイバを含む増幅器であってもよい。さらに、固体増幅器115は、Nd:YAG, Nd:YLF, Nd:YVO4等の結晶を含んでもよい。

[0115] 波長1030nmと波長1832nmの周波数差は、パラ水素ガスの振動遷移と近共鳴するような波長であってもよい。

[0116] また、OPA50を光共振器中に配置してもよい。この光共振器の両ミラーはOPA用シグナル光5の波長 $\lambda_5$ の光を部分反射、例えば約30%~70%反射するミラーであってもよい。このようにすることによって、OPA用シグナル光5への変換効率を改善し得る。

[0117] 6. 2 第2の構成例

図11は、ポンプ光生成装置1の第2の構成例を概略的に示している。な

お、以下では図10に示したポンプ光生成装置1における構成要素と略同じ部分については、同一符号を付し、適宜説明を省略する。

[0118] 図11に示したポンプ光生成装置1は、図10における第1のレーザ装置10に代えて、高調波発生用素子としての非線形結晶LBO118を含む第1のレーザ装置10Aを備えていてもよい。非線形結晶LBO118は、固体増幅器115の光出射側に配置されていてもよい。第1のレーザ装置10Aは、波長1030nmの第2高調波光（波長515nm）を非線形結晶LBO118により生成してもよい。第2のレーザ装置20のDFB-LD121の発振波長 $\lambda$ は655.26nmであってもよい。波長515nmのパルスレーザ光をOPA用ポンプ光4とし、波長655.26nmのパルスレーザ光をOPA用シグナル光5の増幅光5Aとして、ラマンセル2に入射させてもよい。

[0119] この第2の構成例によれば、波長655.26nmが一般のDFB-LDで得られる波長のため、システム化が容易になり得る。

[0120] 6.3 第3の構成例

#### 6.3.1 構成

図12は、ポンプ光生成装置1の第3の構成例を概略的に示している。なお、以下では図11に示したポンプ光生成装置1における構成要素と略同じ部分については、同一符号を付し、適宜説明を省略する。

[0121] 第2のレーザ装置20のDFB-LD121の発振波長 $\lambda$ は848.23nmであってもよい。図12に示したように、OPA50から出力されるOPA用シグナル光5の増幅光5A（波長 $\lambda_5 = 848.23\text{nm}$ ）と、OPA50から出力されるアイドラ光6（波長 $\lambda_6 = 1310.92$ ）との2つの波長 $\lambda_5$ 、 $\lambda_6$ のパルスレーザ光をラマンセル2に入射させてもよい。

[0122] 6.3.2 動作及び作用

この第3の構成例では、OPA用シグナル光5の増幅光5Aとアイドラ光6は、偏光方向とパルス波形とが略一致し得る。このため、OPA50から、OPA用シグナル光5の増幅光5Aとアイドラ光6とをそのままの状態で

、ラマンセル2に入射させ得る。これによって、高コヒーレンスラマンの現象を発生させ得る。この第3の構成例によれば、OPA50の結晶の吸収が最も少ない波長帯域で使用しているため、高出力化や長寿命化を達成し得る。

[0123] 6. 4 第4の構成例

6. 4. 1 構成

図13は、ポンプ光生成装置1の第4の構成例を概略的に示している。なお、以下では図11に示したポンプ光生成装置1における構成要素と略同じ部分については、同一符号を付し、適宜説明を省略する。

[0124] 図13に示したポンプ光生成装置1は、図11における第2のレーザ装置20に代えて、第2-1のレーザ装置20Aと、第2-2のレーザ装置20Bとを備えていてもよい。また、OPA50として、ラマンセル2に向けて第1のラマンセル用ポンプ光を出力する第1のOPA50Aと、ラマンセル2に向けて第2のラマンセル用ポンプ光を出力する第2のOPA50Bとを含んでいてもよい。図13に示したポンプ光生成装置1はさらに、高反射ミラー24及び高反射ミラー25と、光分離部としてのハーフミラー81と、ダイクロイックミラー16, 17, 18, 19と、ビームスプリッタ75とを含んでいてもよい。

[0125] 第1のレーザ装置10Aは、第1のOPA50A及び第2のOPA50Bに対するOPA用ポンプ光4を出力する第1のOPA用レーザ装置であってもよい。第2-1のレーザ装置20Aは、第1のOPA50Aに向けて、第1のOPA用シグナル光5-1を出力する第2のOPA用レーザ装置であってもよい。第2-2のレーザ装置20Bは、第2のOPA50Bに向けて、第2のOPA用シグナル光5-2を出力する第3のOPA用レーザ装置であってもよい。

[0126] 第1のレーザ装置10AにおけるDFB-LD111は、波長1030nmのレーザ光をCWで発振するレーザであってもよい。必ずしもシングル縦モードで発振するレーザでなくてもよい。

- [0127] 第2-1のレーザ装置20Aは、分布帰還型半導体レーザ（DFB-LD 121A）と、光シャッタ122Aと、増幅器123Aとを含んでもよい。光シャッタ122Aと増幅器123Aは、この順序で、DFB-LD 121Aの出力レーザ光の光路上にそれぞれ配置されていてもよい。DFB-LD 121Aは、シングル縦モードのCW発振のレーザであって、例えば、ペルチェ素子によって、高精度に半導体の温度を制御する装置を含んでもよい。DFB-LD 121Aの発振波長 $\lambda$ は、848.23nmであってよい。光シャッタ122Aは、EOポッケルスセルと偏光子とを組み合わせた光シャッタであってもよい。
- [0128] 第2-2のレーザ装置20Bは、分布帰還型半導体レーザ（DFB-LD 121B）と、光シャッタ122Bと、増幅器123Bとを含んでもよい。光シャッタ122Bと増幅器123Bは、この順序で、DFB-LD 121Bの出力レーザ光の光路上にそれぞれ配置されていてもよい。DFB-LD 121Bは、シングル縦モードのCW発振のレーザであって、例えば、ペルチェ素子によって、高精度に半導体の温度を制御する装置を含んでもよい。DFB-LD 121Bの発振波長 $\lambda$ は、1310.92nmであってよい。光シャッタ122Bは、EOポッケルスセルと偏光子とを組み合わせた光シャッタであってもよい。
- [0129] 第1のレーザ装置10Aから出力されたOPA用ポンプ光4が、第1のOPA50Aと第2のOPA50Bとにそれぞれ入射するように、高反射ミラー24と、ハーフミラー81と、ダイクロイックミラー16とを配置してもよい。
- [0130] ハーフミラー81は、第1のレーザ装置10Aから出力されたOPA用ポンプ光4を、第1のOPA50A及び第2のOPA50Bに向けて2つに分岐させる光分離部であってもよい。ハーフミラー81は、OPA用ポンプ光4である波長 $\lambda_4 = 515\text{nm}$ の光を50%反射し、第1のOPA用シグナル光5-1である波長 $\lambda_{51} = 848.23\text{nm}$ の光を高透過する膜がコートされたミラーであってもよい。

[0131] ダイクロイックミラー 17 には、第 1 の OPA 用シグナル光 5-1 の増幅光 5-1A である波長  $\lambda_{51} = 848.23 \text{ nm}$  の光は高透過し、第 1 のアイドラ光 6-1 である波長  $\lambda_{61}$  の光は高反射する膜がコートされていてもよい。ダイクロイックミラー 18 には、第 2 の OPA 用シグナル光 5-2 の増幅光 5-2A である波長  $\lambda_{52} = 1310.92 \text{ nm}$  の光は高透過し、第 2 のアイドラ光 6-2 である波長  $\lambda_{62}$  の光は高反射する膜がコートされていてもよい。

[0132] ダイクロイックミラー 19 には、第 1 の OPA 用シグナル光 5-1 の増幅光 5-1A である波長  $\lambda_{51}$  の光は高反射し、第 2 の OPA 用シグナル光 5-2 の増幅光 5-2A である波長  $\lambda_{52}$  の光は高透過する膜がコートされていてもよい。ビームスプリッタ 75 には、第 1 の OPA 用シグナル光 5-1 の増幅光 5-1A である波長  $\lambda_{51}$  の光の一部と、第 2 の OPA 用シグナル光 5-2 の増幅光 5-2A である波長  $\lambda_{52}$  の光の一部とを反射する膜がコートされていてもよい。

[0133] 6. 4. 2 動作

図 13 に示したように、第 1 のレーザ装置 10A から出力されたパルスレーザ光は、ハーフミラー 81 によって分岐され、第 1 の OPA 50A と第 2 の OPA 50B とにそれぞれ入射し得る。

[0134] 第 2-1 のレーザ装置 20A において、DFB-LD 121A から波長  $\lambda_{51} = 848.23 \text{ nm}$  の CW のレーザ光が出力され、光シャッタ 122A に入射し得る。ここで、光シャッタ 122A によって、所定のパルスのレーザ光が光シャッタ 122A から出力され、そのパルスレーザ光は増幅器 123A によって増幅され、第 1 の OPA 用シグナル光 5-1 として第 1 の OPA 50A に入射し得る。

[0135] 第 2-2 のレーザ装置 20B において、DFB-LD 121B から波長  $\lambda_{52} = 1310.92 \text{ nm}$  の CW のレーザ光が出力され、光シャッタ 122B に入射し得る。ここで、光シャッタ 122B によって、所定のパルスのレーザ光が光シャッタ 122B から出力し、そのパルスレーザ光は増幅器 12

3 Bによって増幅され、第2のOPA用シグナル光5-2として第2のOPA 50 Bに入射し得る。

[0136] 第1のOPA 50 Aからは、波長 $\lambda_{51} = 848.23 \text{ nm}$ の第1のOPA用シグナル光5-1の増幅光5-1 Aと第1のアイドラ光6-1とが出力され得る。この第1のアイドラ光6-1は、ダイクロイックミラー17によって高反射され得る。第1のOPA用シグナル光5-1の増幅光5-1 Aは、高反射ミラー25によって高反射され、ダイクロイックミラー19に入射し得る。

[0137] 第2のOPA 50 Bからは、波長 $\lambda_{52} = 1310.92 \text{ nm}$ の第2のOPA用シグナル光5-2の増幅光5-2 Aと第2のアイドラ光6-2とが出力され得る。この第2のアイドラ光6-2は、ダイクロイックミラー18によって高反射され得る。第2のOPA用シグナル光5-2の増幅光5-2 Aは、ダイクロイックミラー19に入射し得る。

[0138] 第1のOPA用シグナル光5-1の増幅光5-1 A及び第2のOPA用シグナル光5-2の増幅光5-2 Aは、ダイクロイックミラー19によって互いに略同じ光路となって、ビームスプリッタ75を介してラマンセル2へ入射し得る。

[0139] ビームスプリッタ75によって、一部反射された、両シグナル光の増幅光5-1 A, 5-2 Aは、分光器64に入射し得る。制御部56は、分光器64で計測された増幅光5-1 A, 5-2 Aの波長 $\lambda_{51}$ ,  $\lambda_{52}$ に基づいて、ラマンセル2において高コヒーレンスラマンの現象が発生するように、DFB-LD 121 AとDFB-LD 121 Bとの少なくとも1つのレーザの発振波長を制御してもよい。

[0140] 6. 4. 3 作用

ファイバ増幅器113では高出力化すると、シード光に対してスペクトル線幅が広くなり得る。スペクトル線幅が広がると、このレーザ光は、ラマンセル2のポンプ光としては使用できない場合があり得る。

[0141] そこで、この第4の構成例では、第1のレーザ装置10 Aから出力される

パルスレーザ光を2つに分離し、第1及び第2のOPA50A, 50Bの各々に入射させ、それぞれのシグナル光5-1, 5-2を増幅して、ラマンセル2のポンプ光として用い得る。これにより、それぞれのシグナル光5-1, 5-2の増幅光5-1A, 5-2Aのスペクトル線幅や波長が安定に制御され得る。その結果、ラマンセル2に最適なポンプ光を生成し得る。

[0142] 6. 4. 4 変形例

第2-1のレーザ装置20A及び第2-2のレーザ装置20Bから出力されるレーザ光は、第1及び第2のOPA50A, 50Bによる光パラメトリック増幅が可能な光強度を出力するCWのシグナル光を出力させる構成であってもよい。このような場合は、少なくとも光シャッタ122A及び光シャッタ122Bは削除してもよい。増幅器123A, 123Bが無くても第1及び第2のOPA50A, 50Bによる光パラメトリック増幅が可能な光強度を出力する分布帰還型の半導体レーザの場合は、増幅器123A, 123Bを削除してもよい。この場合、第1のレーザ装置10Aから出力されるパルスレーザ光をタイミングを制御する必要がなくなり、シグナル光のパルス波形、スペクトル線幅が安定し得る。

[0143] 6. 5 第5の構成例

6. 5. 1 構成

図14は、ポンプ光生成装置1の第5の構成例を概略的に示している。なお、以下では図13に示したポンプ光生成装置1における構成要素と略同じ部分については、同一符号を付し、適宜説明を省略する。

[0144] 図14に示したポンプ光生成装置1は、図13における第1のレーザ装置10Aに代えて、第1のレーザ装置10Bを備えていてもよい。図14に示したポンプ光生成装置1はさらに、高反射ミラー26及び高反射ミラー27と、ダイクロイックミラー14A, 14Bとを含んでいてもよい。

[0145] 第1のレーザ装置10Bは、第1のOPA50A及び第2のOPA50Bのそれぞれに向けて2つのOPA用ポンプ光4を出力する第1のOPA用レーザ装置であってもよい。

[0146] 第1のレーザ装置10Bは、固体増幅器115に加え、レーザダイオード(LD)117Aでポンプする2つ目の固体増幅器115Aをさらに含んでもよい。また、LBO118に加え、2つ目のLBO118Aをさらに含んでもよい。さらに、ハーフミラー82と、高反射ミラー28とをさらに含んでもよい。

[0147] 第1のレーザ装置10Bにおいて、ファイバ増幅器113から出力されたレーザ光は、ハーフミラー82によって、分岐され、それぞれの固体増幅器115, 115Aに入射されて増幅され得る。LBO118, 118Aは、増幅されたレーザ光の第2高調波光を生成してもよい。それぞれの第2高調波光をそれぞれ、OPA用ポンプ光4として第1及び第2のOPA50A, 50Bに入射させてもよい。

[0148] ダイクロイックミラー14Aは、LBO118と第1のOPA50Aとの間の光路上に配置されていてもよい。ダイクロイックミラー14Aには、OPA用ポンプ光4は高透過し、第1のOPA用シグナル光5-1は第1のOPA50Aに向けて高反射する膜がコートされていてもよい。ダイクロイックミラー14Bは、LBO118Aと第2のOPA50Bとの間の光路上に配置されていてもよい。ダイクロイックミラー14Bには、OPA用ポンプ光4は高透過し、第2のOPA用シグナル光5-2は第2のOPA50Bに向けて高反射する膜がコートされていてもよい。

[0149] 高反射ミラー27は、第2-1のレーザ装置20Aからの第1のOPA用シグナル光5-1をダイクロイックミラー14Aに向けて高反射してもよい。高反射ミラー27は、第2-2のレーザ装置20Bからの第2のOPA用シグナル光5-2をダイクロイックミラー14Bに向けて高反射してもよい。

[0150] 6. 5. 2 動作及び作用

この第5の構成例では、図13の第4の構成例のようにOPA用ポンプ光4を1つの固体増幅器115のみで増幅して分岐させた場合に比べて、2つのOPA用ポンプ光4を並列に固体増幅器115, 115Aで増幅し得る。

これにより、第1及び第2のOPA50A、50Bのそれぞれに入射するOPA用ポンプ光4のエネルギーは約2倍となり得る。

[0151] [7. 第4の実施形態] (偏光方向が最適化されたVUV光生成装置)

上記第1乃至第3の実施形態において、ラマンセル2への2つのポンプ光は偏光方向を合わせる必要があり得る。被波長変換光3の偏光方向はラマンセル2への2つのポンプ光の偏光方向に必ずしも合わせなくともよい。そこで、本実施形態では、図15及び図16を参照して、第1及び第2のラマンセル用ポンプ光の偏光方向が最適化されたVUV光生成装置について説明する。なお、以下では図2に示したVUV光生成装置における構成要素と略同じ部分については、同一符号を付し、適宜説明を省略する。

[0152] 7. 1 第1の構成例

図15は、第1及び第2のラマンセル用ポンプ光の偏光方向が最適化されたVUV光生成装置の第1の構成例を概略的に示している。図15において、両端が矢印の実線は紙面を含む偏光方向を示す。

[0153] 例えば、OPA50の結晶として周期的分極反転ニオブ酸リチウム (PPLN) のような擬似位相整合を使う場合、図15に示したように、OPA50に入射させるOPA用ポンプ光4とOPA用シグナル光5は、略直線偏光であってもよい。そして、OPA用ポンプ光4の偏光方向とOPA用シグナル光5の偏光方向とは略一致させてもよい。その結果、OPA50から出力されたOPA用ポンプ光4と、OPA用シグナル光5の増幅光5Aと、アイドラ光6との偏光方向は略同一になり得る。この場合は、これら3つの光のうちの少なくとも2つの光を第1及び第2のラマンセル用ポンプ光として、そのままラマンセル2に入射させてもよい。

[0154] 7. 2 第2の構成例

図16は、第1及び第2のラマンセル用ポンプ光の偏光方向が最適化されたVUV光生成装置の第2の構成例を概略的に示している。図16において、両端が矢印の実線は紙面を含む偏光方向を示し、黒塗りの丸印は紙面に対して垂直な偏光方向を示す。

[0155] 例えば、OPA50の結晶としてBBOを使う場合、OPA50から出力される光のうちで、ラマンセル2に入射させる2つの光の偏光方向が90度異なり得る。この場合は、図16に示したように、どちらかの波長、例えば波長 $\lambda_5$ に対してのみ $\lambda/2$ 位相が遅れる $\lambda/2$ 板90を位相差板として、OPA50とラマンセル2との間の光路上に配置してもよい。その結果、ラマンセル2に入射させる2つの光の偏光方向が略一致し得る。

[0156] [8. 第5の実施形態] (ラマンセル用ポンプ光の最適化)

#### 8. 1 ラマンセル用ポンプ光の波長の最適化

上記第1乃至第4の実施形態において、ラマンセル2に入射する第1のラマンセル用ポンプ光の波長、及び第2のラマンセル用ポンプ光の波長は、以下の条件を満たすことが好ましい。

$$(\Delta E_f / h) - 1 \text{ (GHz)} \leq h \cdot c / \lambda_a - h \cdot c / \lambda_b \leq (\Delta E_f / h) + 1 \text{ (GHz)}$$

ただし、

$h$  : プランク定数、

$c$  : 光速、

$\Delta E_f$  : ラマンの共鳴バンドギャップ、

$\lambda_a$  : 第1のラマンセル用ポンプ光の波長、

$\lambda_b$  : 第2のラマンセル用ポンプ光の波長

とする。

[0157] さらに好ましくは、以下の条件を満たしてもよい。

$$(\Delta E_f / h) - 5 \text{ (GHz)} \leq h \cdot c / \lambda_a - h \cdot c / \lambda_b \leq (\Delta E_f / h) + 5 \text{ (GHz)}$$

[0158] 8. 2 ラマンセル用ポンプ光のスペクトル線幅の最適化

上記第1乃至第4の実施形態において、ラマンセル2に入射する第1のラマンセル用ポンプ光、及び第2のラマンセル用ポンプ光は、以下の条件を満たすことが好ましい。

$$\Delta \lambda_a \leq (10 \text{ GHz} / c) \lambda_a^2$$

$$\Delta \lambda b \leq (10 \text{ GHz} / c) \lambda b^2$$

ただし、

$\Delta \lambda a$  : 第1のラマンセル用ポンプ光の波長 $\lambda a$ のスペクトル線幅

$\Delta \lambda b$  : 第2のラマンセル用ポンプ光の波長 $\lambda b$ のスペクトル線幅

とする。

[0159] さらに好ましくは、以下の条件を満たしてもよい。

$$\Delta \lambda a \leq (2 \text{ GHz} / c) \lambda a^2$$

$$\Delta \lambda b \leq (2 \text{ GHz} / c) \lambda b^2$$

[0160] [9. 制御部のハードウェア環境]

当業者は、汎用コンピュータ又はプログラマブルコントローラにプログラムモジュール又はソフトウェアアプリケーションを組み合わせ、ここに述べられる主題が実行されることを理解するだろう。一般的に、プログラムモジュールは、本開示に記載されるプロセスを実行できるルーチン、プログラム、コンポーネント、データストラクチャー等を含む。

[0161] 図17は、開示される主題の様々な側面が実行され得る例示的なハードウェア環境を示すブロック図である。図17の例示的なハードウェア環境100は、処理ユニット1000と、ストレージユニット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とを含んでもよいが、ハードウェア環境100の構成は、これに限定されない。

[0162] 処理ユニット1000は、中央処理ユニット(CPU)1001と、メモリ1002と、タイマ1003と、画像処理ユニット(GPU)1004とを含んでもよい。メモリ1002は、ランダムアクセスメモリ(RAM)とリードオンリーメモリ(ROM)とを含んでもよい。CPU1001は、市販のプロセッサのいずれでもよい。デュアルマイクロプロセッサや他のマルチプロセッサアーキテクチャが、CPU1001として使用されてもよい。

[0163] 図17におけるこれらの構成物は、本開示において記載されるプロセスを

実行するために、相互に接続されていてもよい。

[0164] 動作において、処理ユニット１０００は、ストレージユニット１００５に保存されたプログラムを読み込んで、実行してもよい。また、処理ユニット１０００は、ストレージユニット１００５からプログラムと一緒にデータを読み込んでもよい。また、処理ユニット１０００は、ストレージユニット１００５にデータを書き込んでもよい。ＣＰＵ１００１は、ストレージユニット１００５から読み込んだプログラムを実行してもよい。メモリ１００２は、ＣＰＵ１００１によって実行されるプログラム及びＣＰＵ１００１の動作に使用されるデータを、一時的に保管する作業領域であってもよい。タイマ１００３は、時間間隔を計測して、プログラムの実行に従ってＣＰＵ１００１に計測結果を出力してもよい。ＧＰＵ１００４は、ストレージユニット１００５から読み込まれるプログラムに従って、画像データを処理し、処理結果をＣＰＵ１００１に出力してもよい。

[0165] パラレルＩ／Ｏコントローラ１０２０は、トリガ遅延回路５５、第１のレーザ装置１０、１０Ａ、１０Ｂ、第２のレーザ装置２０、第３のレーザ装置３０、第２－１のレーザ装置２０Ａ、第２－２のレーザ装置２０Ｂ、及び分光器６４等の、処理ユニット１０００と通信可能なパラレルＩ／Ｏデバイスに接続されてもよく、処理ユニット１０００とそれらパラレルＩ／Ｏデバイスとの間の通信を制御してもよい。シリアルＩ／Ｏコントローラ１０３０は、処理ユニット１０００と通信可能な複数のシリアルＩ／Ｏデバイスに接続されてもよく、処理ユニット１０００とそれら複数のシリアルＩ／Ｏデバイスとの間の通信を制御してもよい。Ａ／Ｄ、Ｄ／Ａコンバータ１０４０は、アナログポートを介して、各種センサ、例えば第１の光センサ光６１、第２の光センサ光６２、及び第３の光センサ光６３等のアナログデバイスに接続されてもよく、処理ユニット１０００とそれらアナログデバイスとの間の通信を制御したり、通信内容のＡ／Ｄ、Ｄ／Ａ変換を行ってもよい。

[0166] ユーザインターフェイス１０１０は、操作者が処理ユニット１０００にプログラムの停止や、割込みルーチンの実行を指示できるように、処理ユニッ

ト 1 0 0 0 によって実行されるプログラムの進捗を操作者に表示してもよい。

[0167] 例示的なハードウェア環境 1 0 0 は、本開示における制御部 5 6 等の構成に適用されてもよい。当業者は、それらのコントローラが分散コンピューティング環境、すなわち、通信ネットワークを介して繋がっている処理ユニットによってタスクが実行される環境において実現されてもよいことを理解するだろう。本開示において、制御部 5 6 等は、イーサネット（登録商標）やインターネットといった通信ネットワークを介して互いに接続されてもよい。分散コンピューティング環境において、プログラムモジュールは、ローカル及びリモート両方のメモリストレージデバイスに保存されてもよい。

[0168] [ 1 0 . その他 ]

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。

[0169] 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不定冠詞「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]            ラマンセルと、  
                         O P Aを含み、前記ラマンセルに向けて、第1のラマンセル用ポンプ光及び第2のラマンセル用ポンプ光を出力するポンプ光生成装置と、  
                         前記ラマンセルに向けて波長変換の対象であるプローブ光を出力するラマンセル用レーザ装置と  
                         を備えたレーザシステム。
- [請求項2]            前記ポンプ光生成装置は、  
                         前記O P Aに向けて、O P A用ポンプ光を出力する第1のO P A用レーザ装置と、  
                         前記O P Aに向けて、O P A用シグナル光を出力する第2のO P A用レーザ装置と  
                         をさらに含む  
                         請求項1に記載のレーザシステム。
- [請求項3]            前記O P Aは、前記O P A用ポンプ光及び前記O P A用シグナル光を入力とし、前記O P A用ポンプ光、前記O P A用シグナル光の増幅光、及びアイドラ光の3つの光のうち2つの光を、前記第1のラマンセル用ポンプ光及び前記第2のラマンセル用ポンプ光として前記ラマンセルに向けて出力する  
                         請求項2に記載のレーザシステム。
- [請求項4]            前記ラマンセルは、内部にガス分子を含み、  
                         前記第1のラマンセル用ポンプ光の波長と前記第2のラマンセル用ポンプ光の波長は、前記ガス分子を共鳴させる波長、及び近共鳴させる波長のいずれかである  
                         請求項1に記載のレーザシステム。
- [請求項5]            前記ラマンセルは、V U V波長域のアンチストークス光を出力する  
                         請求項1に記載のレーザシステム。

- [請求項6] 前記O P A用ポンプ光の状態を計測するポンプ光モニタ部と、  
前記O P A用シグナル光の状態を計測するシグナル光モニタ部と、  
前記ポンプ光モニタ部及び前記シグナル光モニタ部の計測結果に基づいて、前記O P Aに前記O P A用ポンプ光と前記O P A用シグナル光とが略同時に入力されるように、前記第1のO P A用レーザ装置及び前記第2のO P A用レーザ装置を制御するタイミング制御部と  
をさらに備えた  
請求項2に記載のレーザシステム。
- [請求項7] 前記O P A用シグナル光の状態を計測するシグナル光モニタ部と、  
前記プローブ光の状態を計測するプローブ光モニタ部と、  
前記シグナル光モニタ部及び前記プローブ光モニタ部の計測結果に基づいて、前記ラマンセルに前記O P A用シグナル光の増幅光と前記プローブ光とが略同時に入力されるように、前記第2のO P A用レーザ装置及び前記ラマンセル用レーザ装置を制御するタイミング制御部と  
をさらに備えた  
請求項3に記載のレーザシステム。
- [請求項8] 前記O P Aと前記ラマンセルとの間の光路上に配置され、前記O P A用ポンプ光、前記O P A用シグナル光の増幅光、及び前記アイドラ光の状態を計測するO P Aモニタ部と、  
前記O P Aモニタ部の計測結果に基づいて、前記2つの光の波長が所望の波長となるように、前記第1のO P A用レーザ装置及び前記第2のO P A用レーザ装置のうち少なくとも1つを制御する波長制御部と  
をさらに備えた  
請求項3に記載のレーザシステム。
- [請求項9] 前記第1のO P A用レーザ装置は、前記O P A用ポンプ光のシードとしてのシード光を出力するレーザ光源と、前記シード光の光路上に

順に配置された、光シャッタと、増幅器とを含む

請求項 2 に記載のレーザシステム。

[請求項10] 前記第 1 の O P A 用レーザ装置は、前記増幅器の光出射側に配置された、高調波発生用素子をさらに含む  
請求項 9 に記載のレーザシステム。

[請求項11] 前記 O P A は、  
前記ラマンセルに向けて、前記第 1 のラマンセル用ポンプ光を出力する第 1 の O P A と、  
前記ラマンセルに向けて、前記第 2 のラマンセル用ポンプ光を出力する第 2 の O P A と  
を含み、  
前記ポンプ光生成装置は、  
1 の O P A 用ポンプ光を出力する第 1 の O P A 用レーザ装置と、  
前記第 1 の O P A 用レーザ装置から出力された前記 O P A 用ポンプ光を、前記第 1 の O P A 及び前記第 2 の O P A に向けて 2 つに分岐させる光分離部と、  
前記第 1 の O P A に向けて、第 1 の O P A 用シグナル光を出力する第 2 の O P A 用レーザ装置と  
前記第 2 の O P A に向けて、第 2 の O P A 用シグナル光を出力する第 3 の O P A 用レーザ装置と  
をさらに含む  
請求項 1 に記載のレーザシステム。

[請求項12] 前記 O P A は、  
前記ラマンセルに向けて、前記第 1 のラマンセル用ポンプ光を出力する第 1 の O P A と、  
前記ラマンセルに向けて、前記第 2 のラマンセル用ポンプ光を出力する第 2 の O P A と  
を含み、

前記ポンプ光生成装置は、

前記第1のOPA及び前記第2のOPAのそれぞれに向けて2つのOPA用ポンプ光を出力する第1のOPA用レーザ装置と、

前記第1のOPAに向けて、第1のOPA用シグナル光を出力する第2のOPA用レーザ装置と

前記第2のOPAに向けて、第2のOPA用シグナル光を出力する第3のOPA用レーザ装置と

をさらに含む

請求項1に記載のレーザシステム。

[請求項13] 前記第1のラマンセル用ポンプ光と前記第2のラマンセル用ポンプ光は、偏光方向が略同一である

請求項1に記載のレーザシステム。

[請求項14] 前記ラマンセルと前記ポンプ光生成装置との間の光路上に配置され、前記第1のラマンセル用ポンプ光と前記第2のラマンセル用ポンプ光との偏光方向を略同一に揃える位相差板をさらに備えた

請求項1に記載のレーザシステム。

[請求項15] 前記第1のラマンセル用ポンプ光の波長、及び前記第2のラマンセル用ポンプ光の波長は、以下の条件を満たす

請求項1に記載のレーザシステム。

$$(\Delta E_f / h) - 1 \text{ (GHz)} \leq h \cdot c / \lambda_a - h \cdot c / \lambda_b \leq (\Delta E_f / h) + 1 \text{ (GHz)}$$

ただし、

$h$  : プランク定数、

$c$  : 光速、

$\Delta E_f$  : ラマンの共鳴バンドギャップ、

$\lambda_a$  : 前記第1のラマンセル用ポンプ光の波長、

$\lambda_b$  : 前記第2のラマンセル用ポンプ光の波長

とする。

[請求項16] 前記第1のラマンセル用ポンプ光、及び前記第2のラマンセル用ポンプ光は、以下の条件を満たす

請求項1に記載のレーザシステム。

$$\Delta \lambda_a \leq (10 \text{ GHz} / c) \lambda_a^2$$

$$\Delta \lambda_b \leq (10 \text{ GHz} / c) \lambda_b^2$$

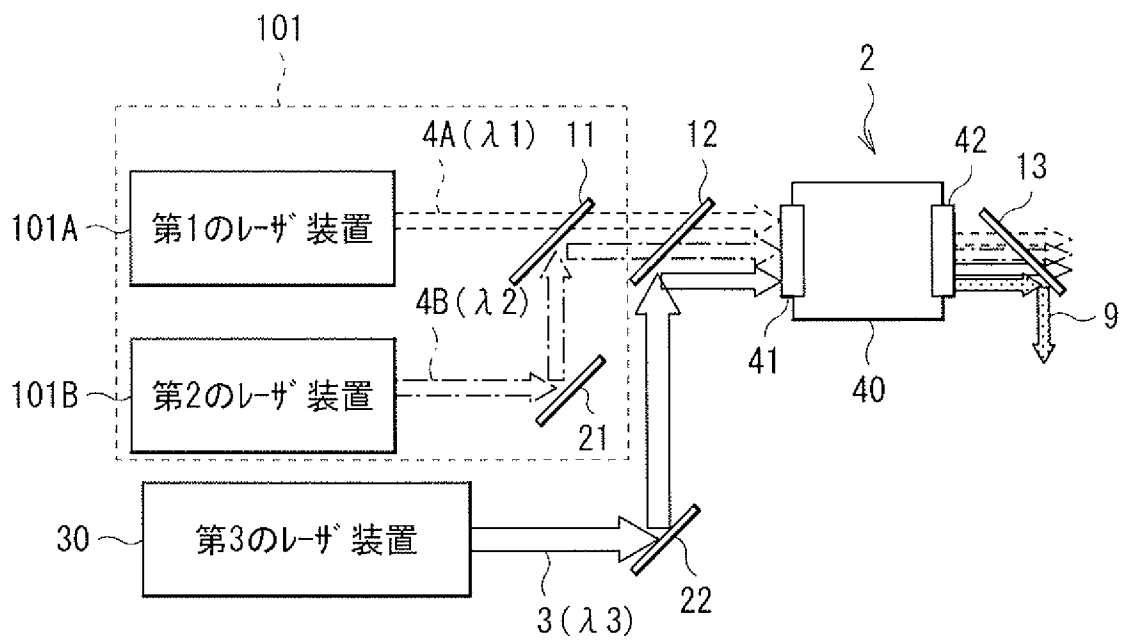
ただし、

$\Delta \lambda_a$  : 前記第1のラマンセル用ポンプ光の波長 $\lambda_a$ のスペクトル線幅

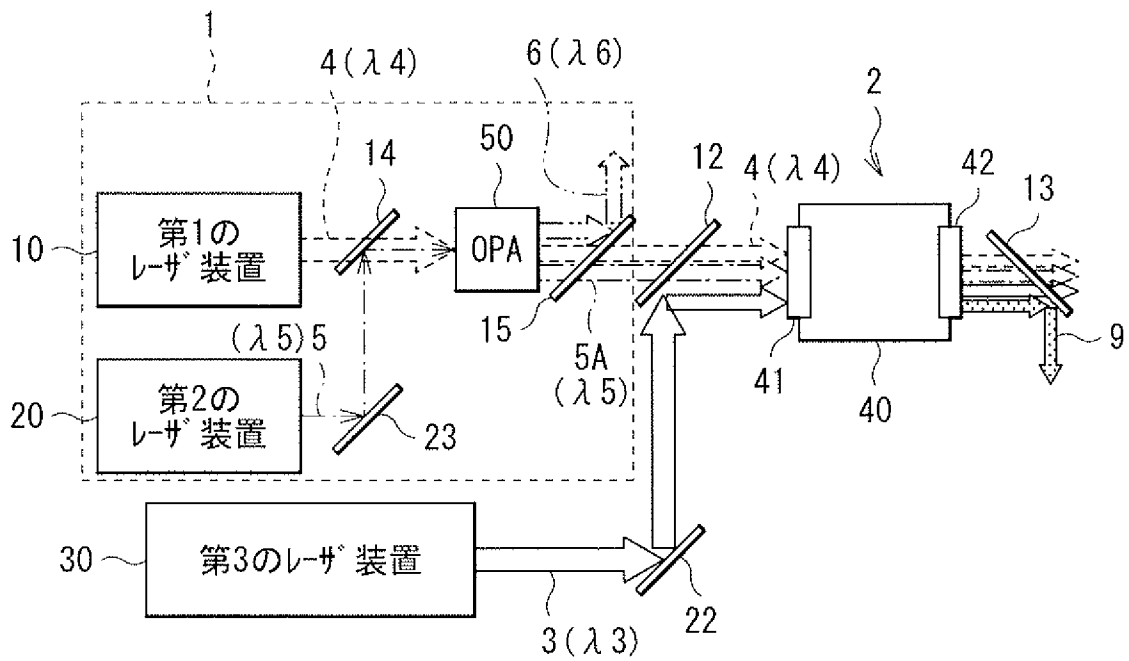
$\Delta \lambda_b$  : 前記第2のラマンセル用ポンプ光の波長 $\lambda_b$ のスペクトル線幅

とする。

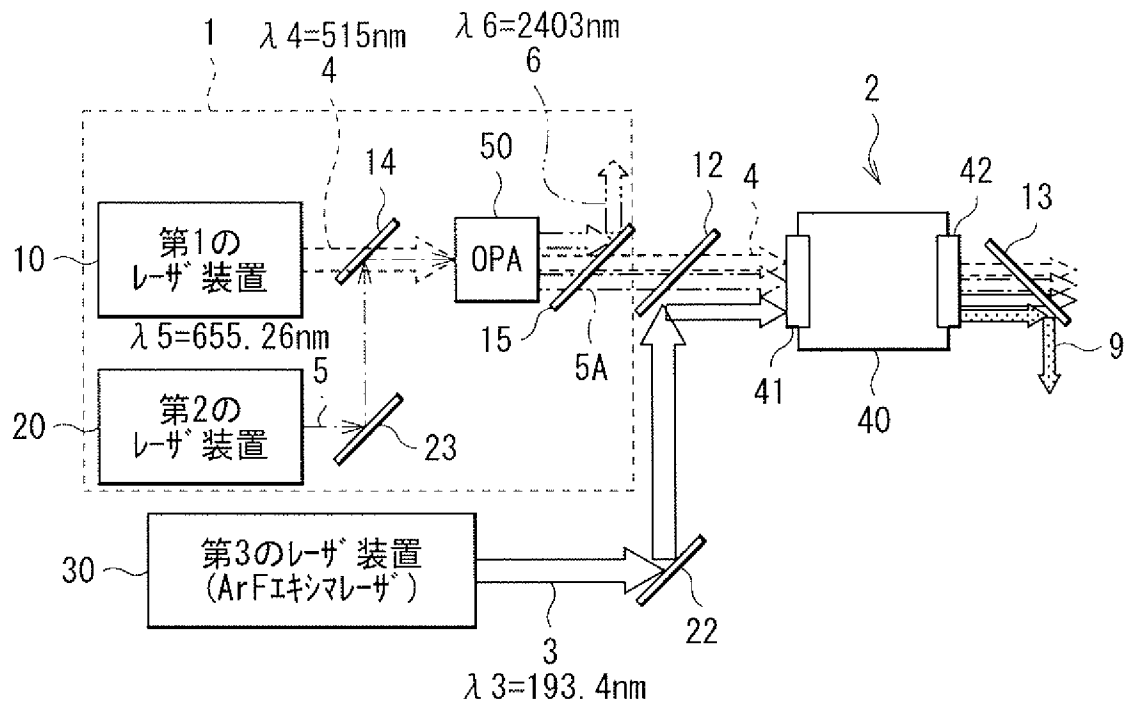
[図1]



[図2]



[図3]



[図4]

ArFエキシマレーザ

| Order | Wavelength[nm] |
|-------|----------------|
| 8     | 117.65         |
| 7     | 123.71         |
| 6     | 130.42         |
| 5     | 137.91         |
| 4     | 146.30         |
| 3     | 155.79         |
| 2     | 166.59         |
| 1     | 179.00         |
| 0     | 193.40         |
| -1    | 210.33         |
| -2    | 230.50         |
| -3    | 254.95         |
| -4    | 285.21         |
| -5    | 323.61         |
| -6    | 373.97         |
| -7    | 442.89         |
| -8    | 542.95         |
| -9    | 701.41         |
| -10   | 990.50         |
| -11   | 1684.95        |
| -12   | 5637.47        |

[図5]

F2 $\lambda$ -サ°

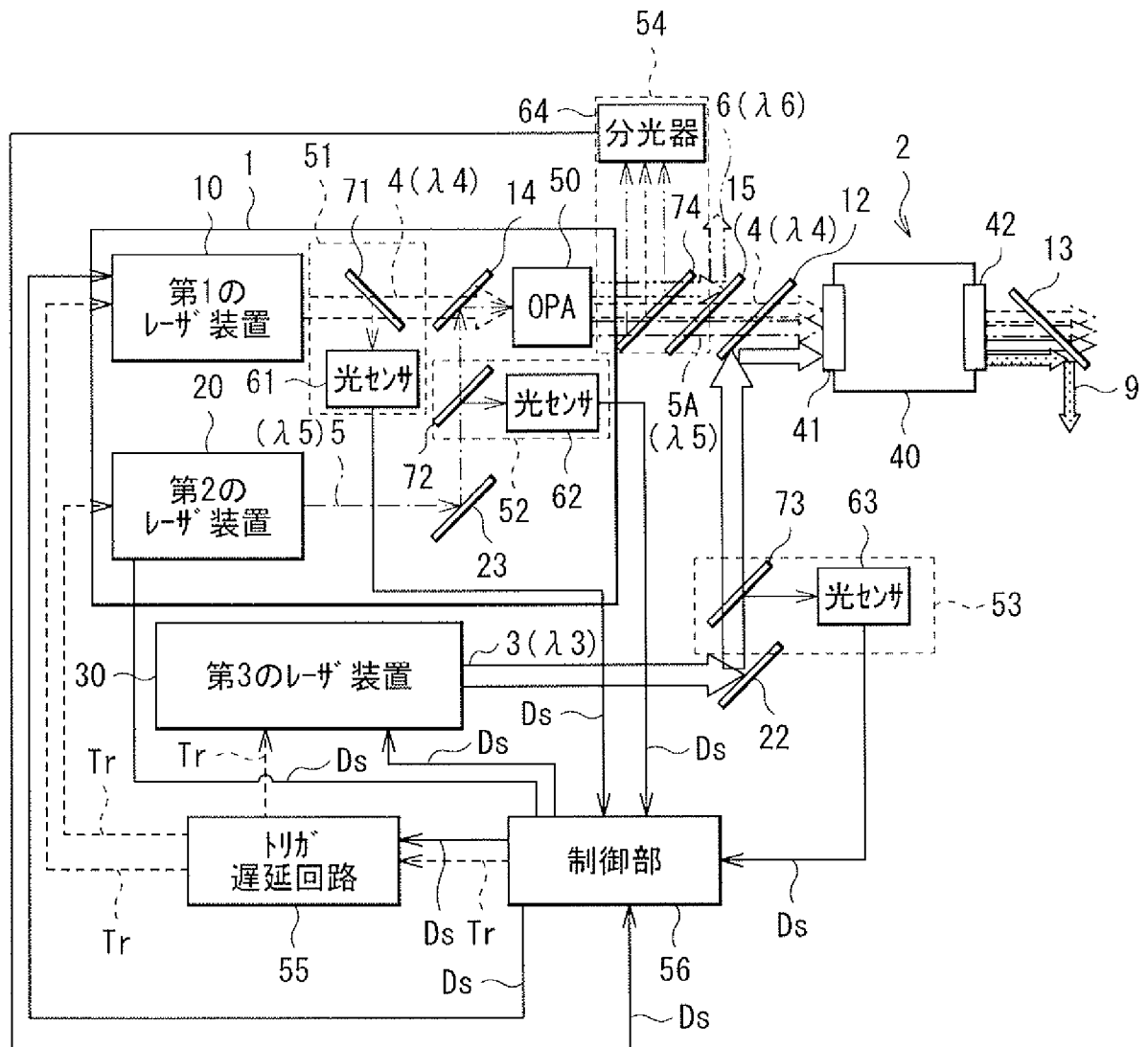
| Order | Wavelength[nm] |
|-------|----------------|
| 8     | 103.38         |
| 7     | 108.03         |
| 6     | 113.11         |
| 5     | 118.70         |
| 4     | 124.87         |
| 3     | 131.71         |
| 2     | 139.35         |
| 1     | 147.93         |
| 0     | 157.63         |
| -1    | 168.69         |
| -2    | 181.43         |
| -3    | 196.25         |
| -4    | 213.70         |
| -5    | 234.55         |
| -6    | 259.92         |
| -7    | 291.44         |
| -8    | 331.66         |
| -9    | 384.76         |
| -10   | 458.10         |
| -11   | 565.99         |
| -12   | 740.34         |

[図6]

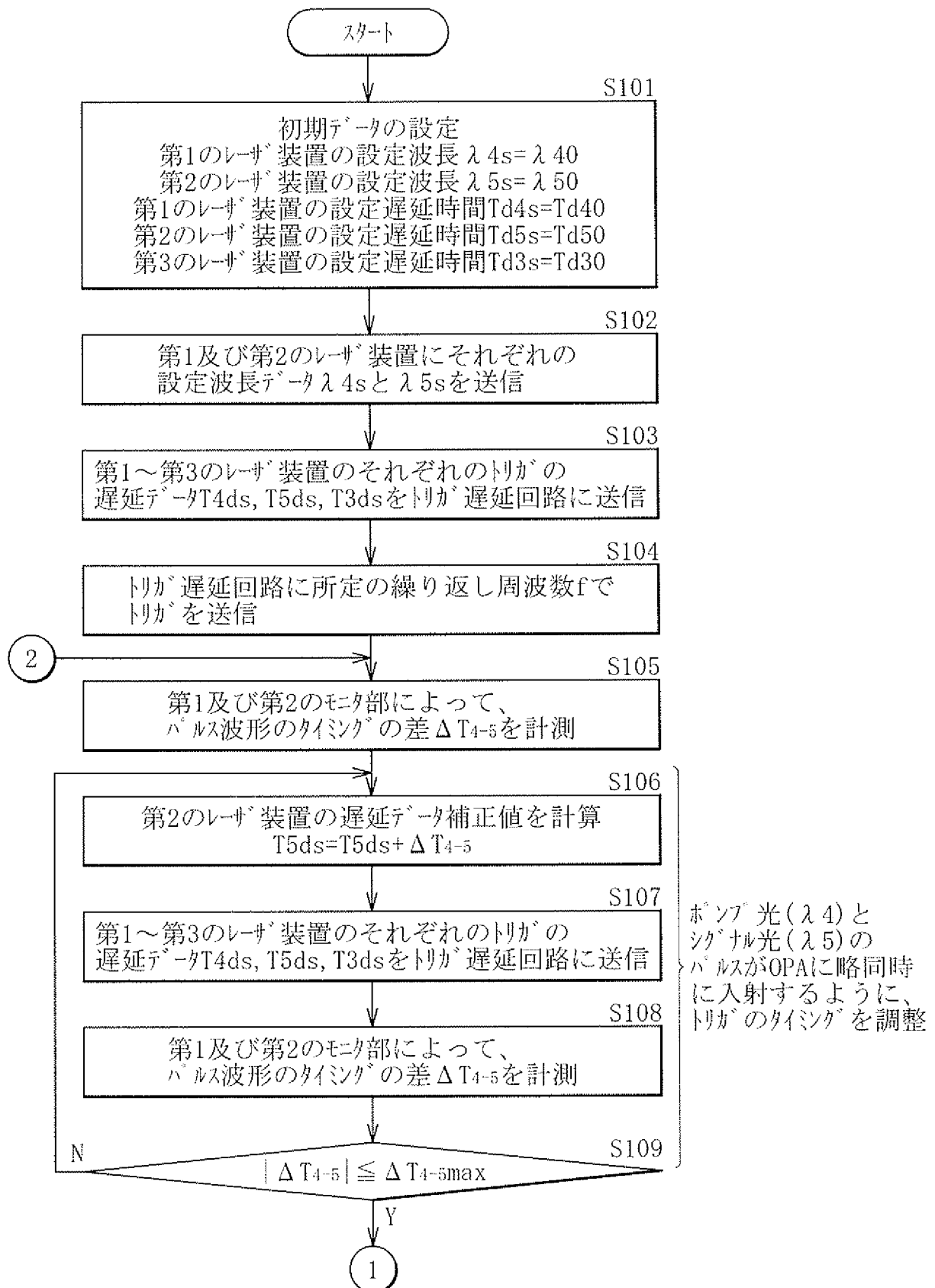
KrFエキシマレーザ

| Order | Wave length[nm] |
|-------|-----------------|
| 9     | 128.71          |
| 8     | 135.99          |
| 7     | 144.15          |
| 6     | 153.35          |
| 5     | 163.80          |
| 4     | 175.78          |
| 3     | 189.65          |
| 2     | 205.90          |
| 1     | 225.20          |
| 0     | 248.48          |
| -1    | 277.13          |
| -2    | 313.26          |
| -3    | 360.21          |
| -4    | 423.72          |
| -5    | 514.42          |
| -6    | 654.52          |
| -7    | 899.49          |
| -8    | 1437.53         |
| -9    | 3577.38         |

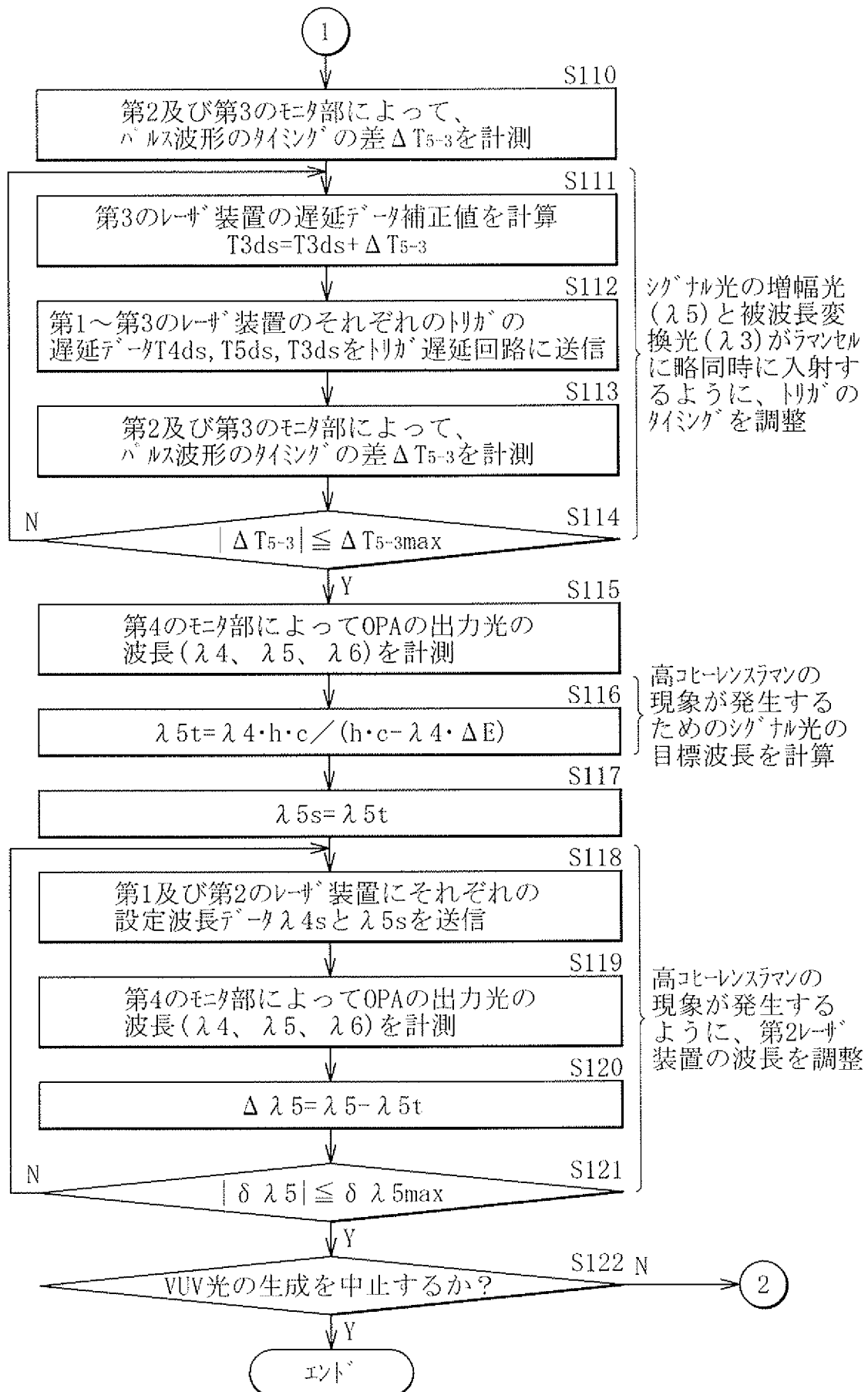
[図7]



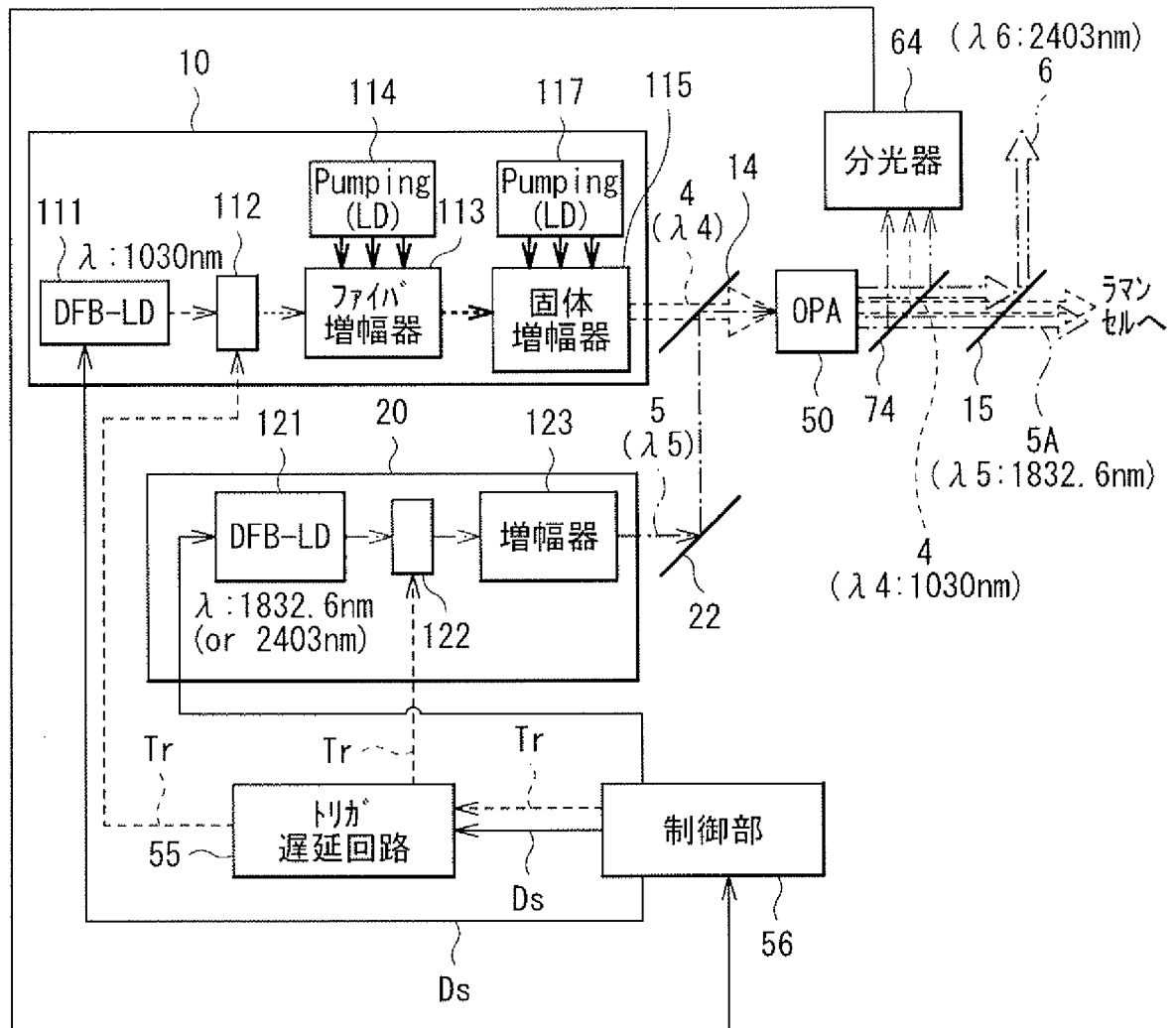
[図8]



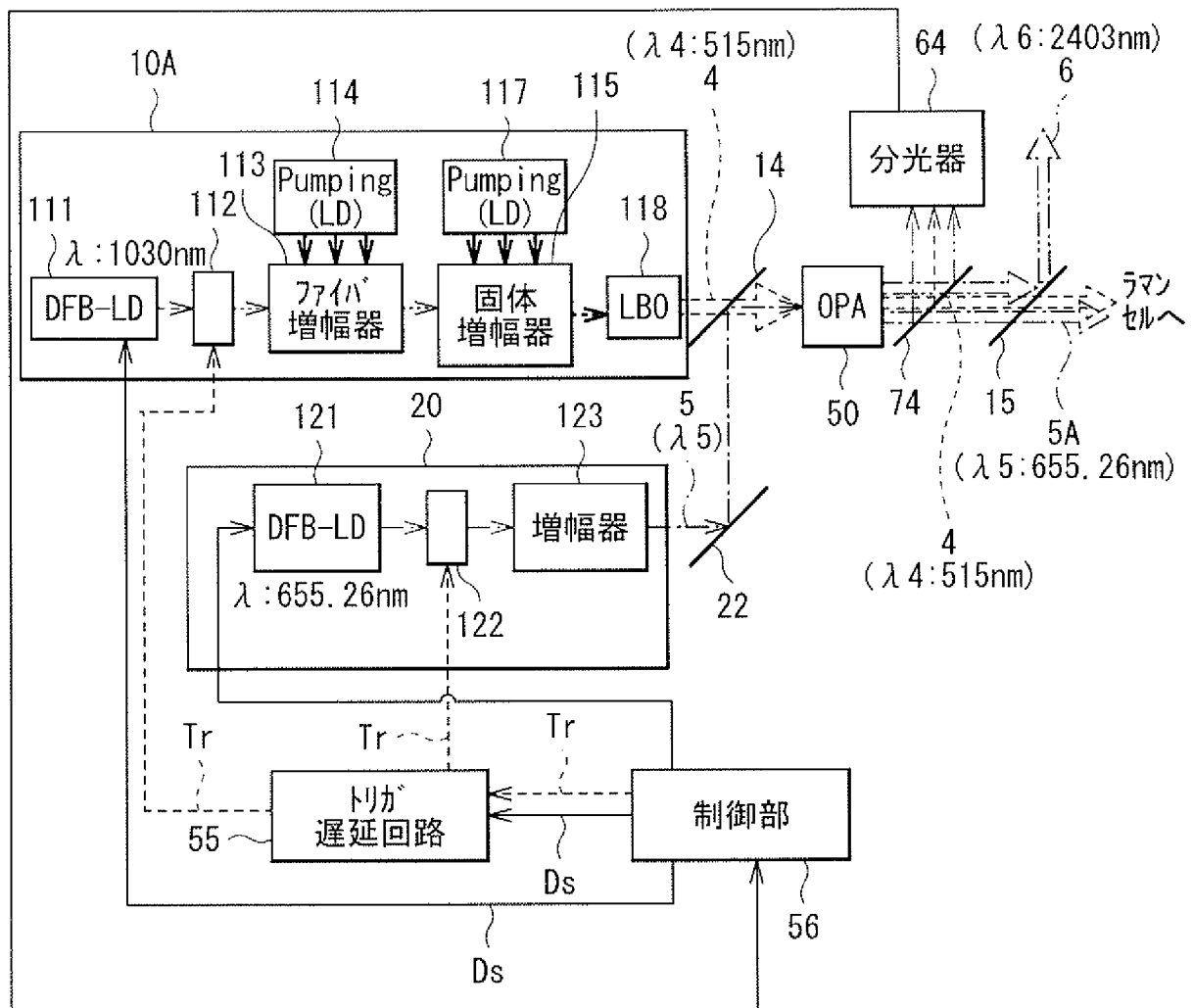
[図9]



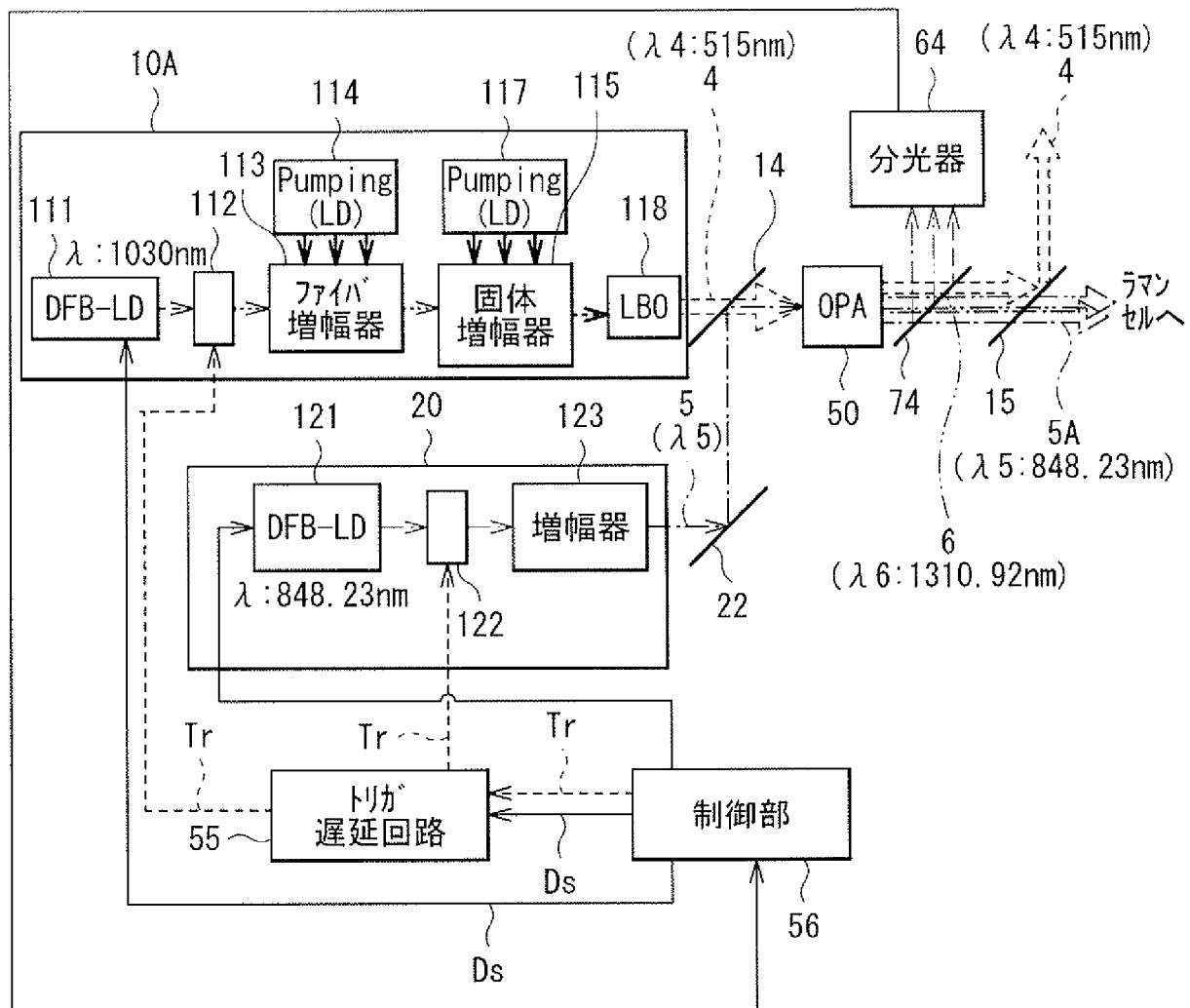
[図10]



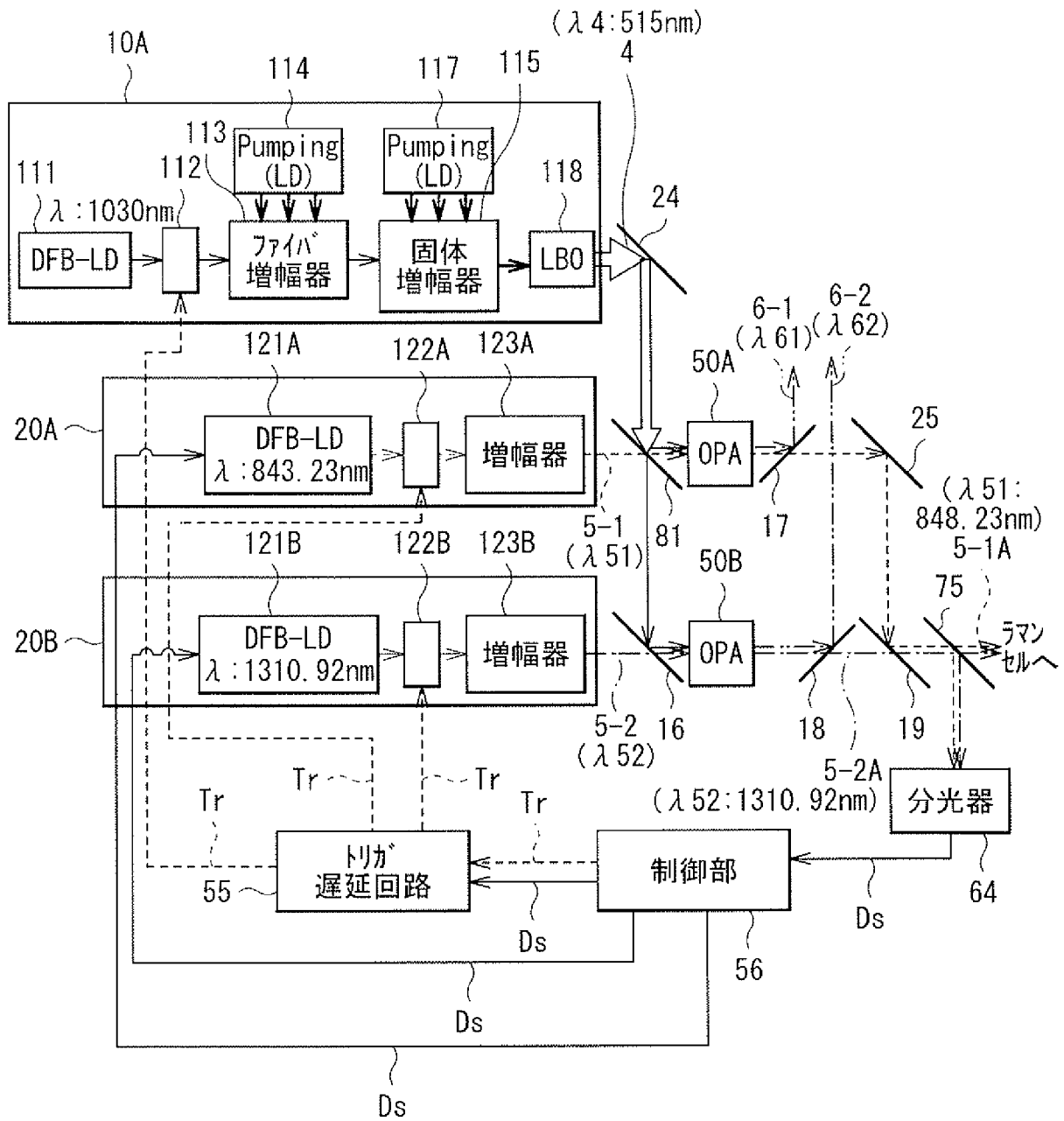
[図11]

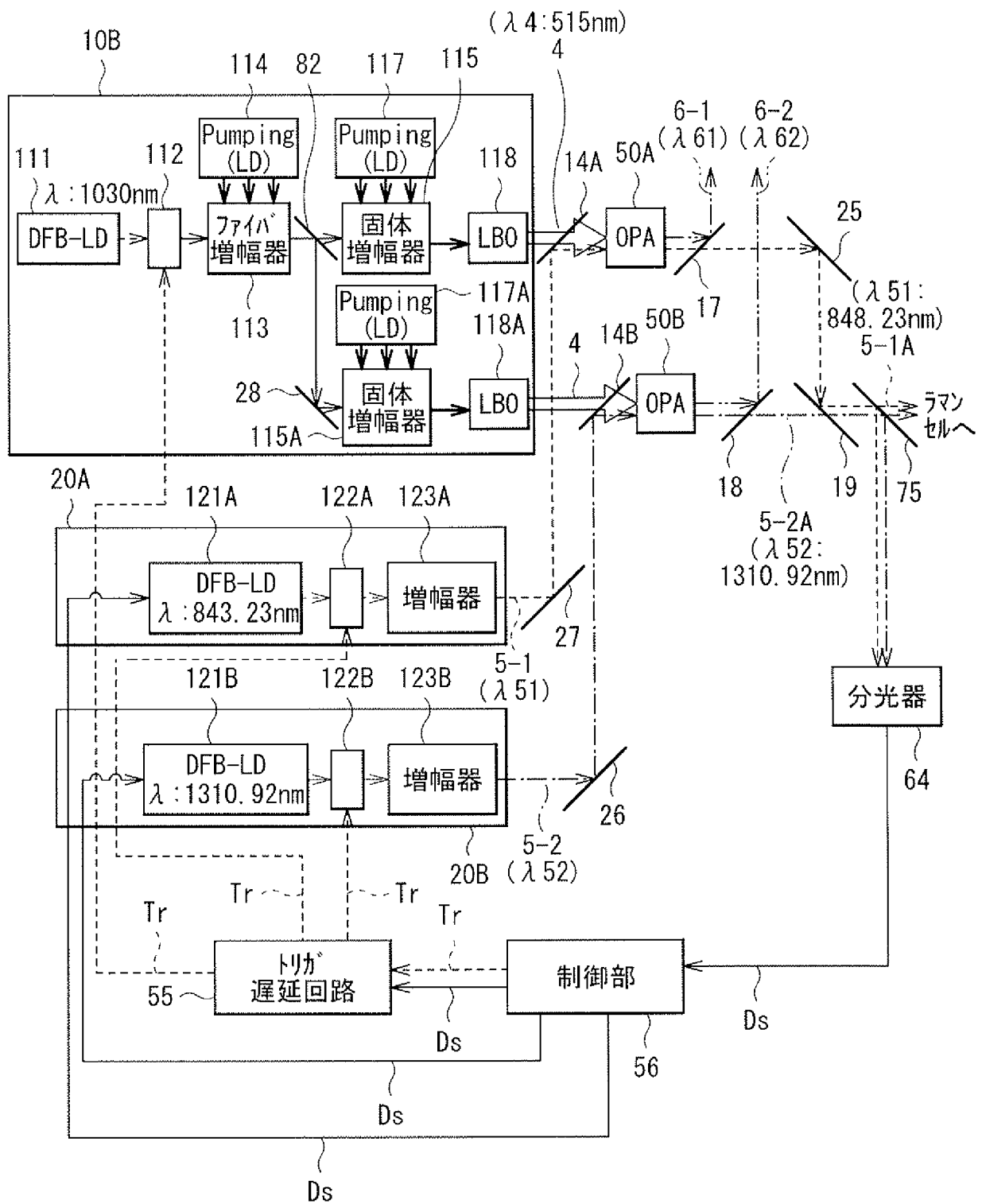


[図12]

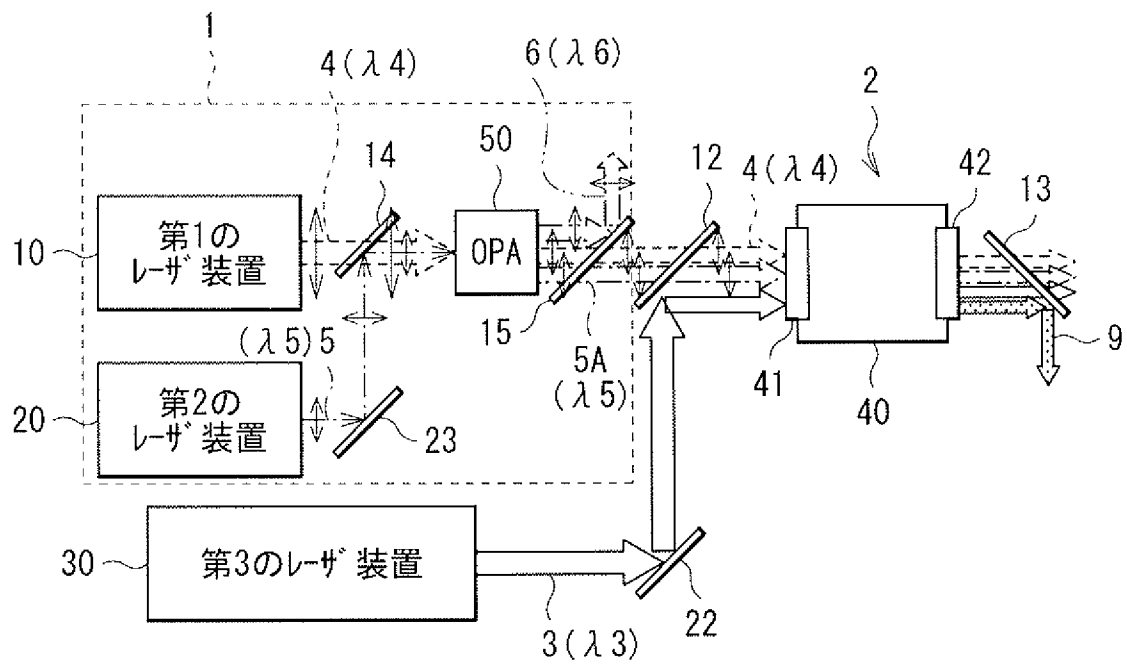


[図13]

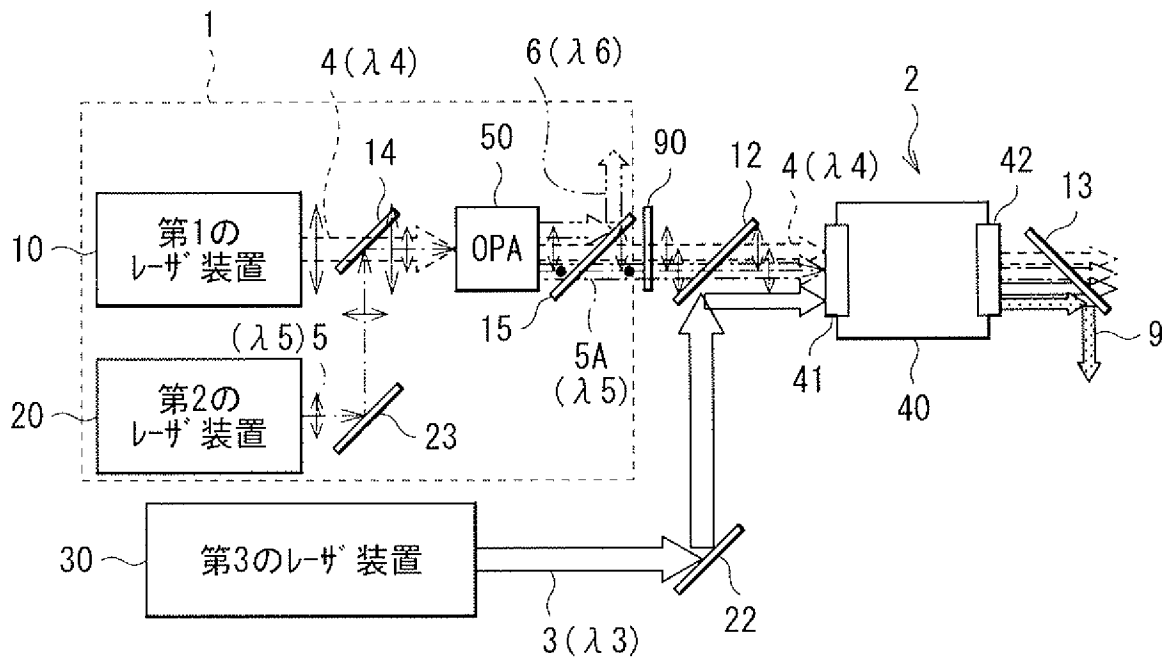




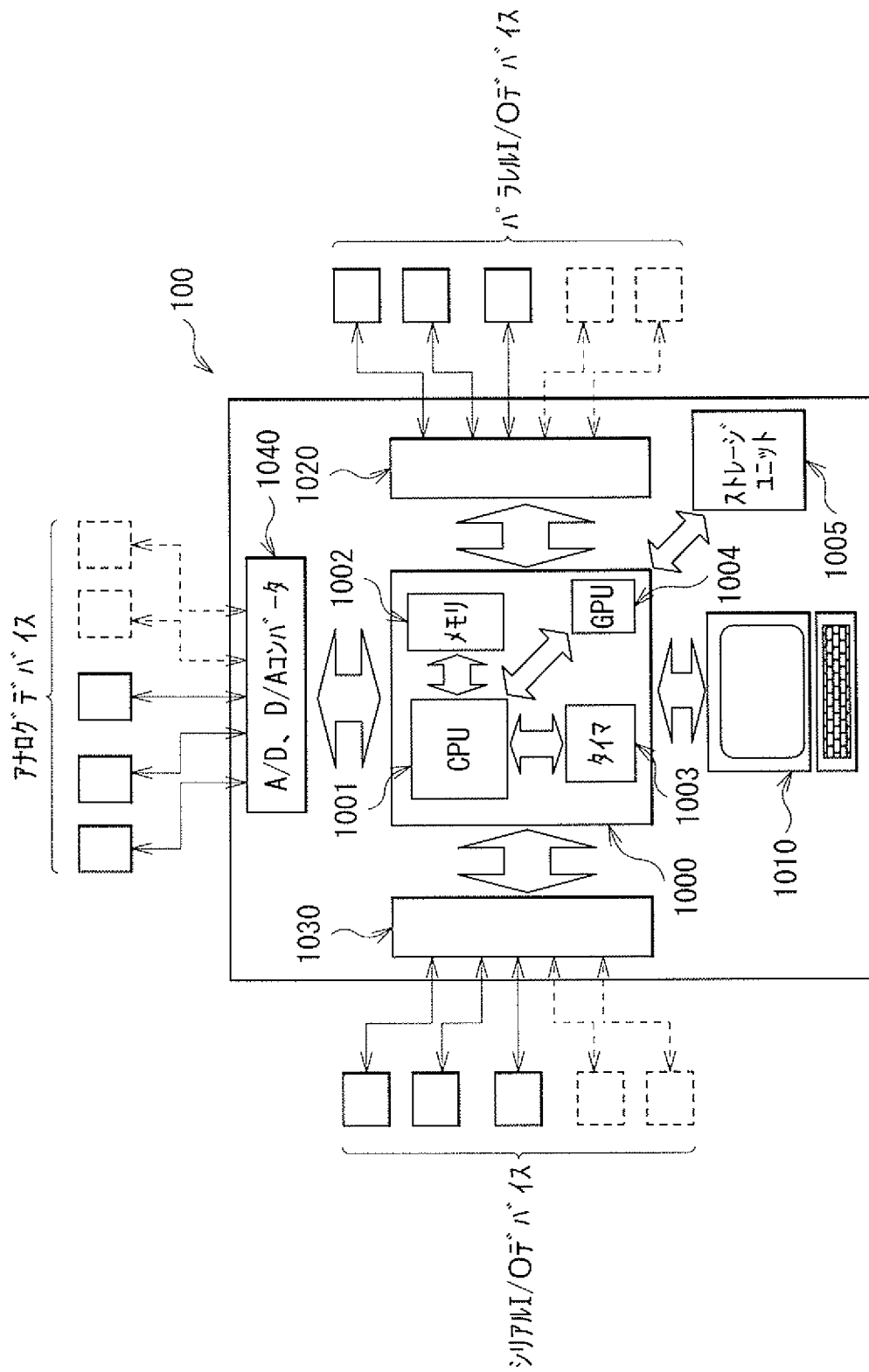
[図15]



[図16]



[図17]



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/057131

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01S3/30(2006.01)i, G02F1/35(2006.01)i, G02F1/39(2006.01)i

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

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01S3/30, G02F1/35, G02F1/39

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

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

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

IEEE Xplore, Thomson Innovation, JSTPlus(JDreamIII), Scitation

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                                                                                                                | Relevant to claim No. |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Y         | IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, 1999.11, VOL.5,NO.6, 1502-1509                                                                                                                                            | 1-16                  |
| Y         | IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, 1990.04, VOL.26,NO.4, 739-743                                                                                                                                                                | 1-16                  |
| Y         | US 2010/0027000 A1 (PESTOV Dimitry, SOKOLOV Alexei V., SCULLY Marlan O., MURAWSKI Robert, GOMBOJAV Ariunbold, WANG Xi, SAURENKOV Vladimir),<br>04 February 2010 (04.02.2010),<br>entire text; all drawings<br>& WO 2009/058805 A1 | 1-16                  |
| Y         | OPTICS EXPRESS, 2012.03.05, Vol.20, No.6, 6478-6487                                                                                                                                                                               | 1-16                  |



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

30 May, 2014 (30.05.14)

Date of mailing of the international search report

17 June, 2014 (17.06.14)

Name and mailing address of the ISA/

Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/057131

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                                                                                      | Relevant to claim No. |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Y         | REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, 2002.08,<br>VOL.73,NO.8, 2843-2848                                                                                                                                    | 6-7                   |
| A         | JP 7-281228 A (Hamamatsu Photonics Kabushiki<br>Kaisha),<br>27 October 1995 (27.10.1995),<br>fig. 1, 6<br>(Family: none)                                                                                | 8                     |
| A         | JP 2009-130356 A (ITT Mfg. Enterprises, Inc.),<br>11 June 2009 (11.06.2009),<br>fig. 7<br>& US 2009/0129413 A1 & EP 2065989 A2<br>& CA 2643955 A & AU 2008243068 A<br>& MX 2008014704 A & CA 2643955 A1 | 11-12                 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                  |                                                                     |                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------|
| A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））<br>Int.Cl. H01S3/30(2006.01)i, G02F1/35(2006.01)i, G02F1/39(2006.01)i                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                                  |                                                                     |                |
| B. 調査を行った分野<br>調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C））<br>Int.Cl. H01S3/30, G02F1/35, G02F1/39                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                  |                                                                     |                |
| 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<br><div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div>           日本国実用新案公報<br/>           日本国公開実用新案公報<br/>           日本国実用新案登録公報<br/>           日本国登録実用新案公報         </div> <div>           1 9 2 2－1 9 9 6 年<br/>           1 9 7 1－2 0 1 4 年<br/>           1 9 9 6－2 0 1 4 年<br/>           1 9 9 4－2 0 1 4 年         </div> </div> |                                                                                                                                                                                  |                                                                     |                |
| 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）<br>I E E E X p l o r e , T h o m s o n I n n o v a t i o n , J S T P l u s ( J D r e a m I I I ) , S c i t a t i o n                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                  |                                                                     |                |
| C. 関連すると認められる文献                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                  |                                                                     |                |
| 引用文献の<br>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<br>請求項の番号                                                      |                |
| Y                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | I E E E J O U R N A L O F S E L E C T E D T O P I C S I N Q U A N T U M E L E C T R O N I C S , 1 9 9 9 . 1 1 , V O L . 5 , N O . 6 , 1 5 0 2 - 1 5 0 9                          | 1-16                                                                |                |
| Y                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | I E E E J O U R N A L O F Q U A N T U M E L E C T R O N I C S , 1 9 9 0 . 0 4 , V O L . 2 6 , N O . 4 , 7 3 9 - 7 4 3                                                            | 1-16                                                                |                |
| Y                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | US 2010/0027000 A1 (PESTOV Dimitry, SOKOLOV Alexei V., SCULLY Marlan O., MURAWSKI Robert, GOMBOJAV Ariunbold, WANG Xi, SAURENKOV Vladimir) 2010.02.04, 全文、全図 & WO 2009/058805 A1 | 1-16                                                                |                |
| <input checked="" type="checkbox"/> C 欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                  |                                                                     |                |
| * 引用文献のカテゴリー<br>「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<br>「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<br>「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）<br>「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献<br>「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<br>「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<br>「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<br>「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<br>「&」 同一パテントファミリー文献                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                  |                                                                     |                |
| 国際調査を完了した日<br>3 0 . 0 5 . 2 0 1 4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                  | 国際調査報告の発送日<br>1 7 . 0 6 . 2 0 1 4                                   |                |
| 国際調査機関の名称及びあて先<br>日本国特許庁（I S A / J P）<br>郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5<br>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）<br>佐藤 宙子<br>電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 2 9 4 | 2 X<br>9 3 1 6 |

| C (続き) . 関連すると認められる文献 |                                                                                                                                                                                             |                |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 引用文献の<br>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<br>請求項の番号 |
| Y                     | OPTICS EXPRESS, 2012. 03. 05, Vol. 20, No. 6, 6478-6487                                                                                                                                     | 1-16           |
| Y                     | REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, 2002. 08, VOL. 73, NO. 8, 2843-2848                                                                                                                       | 6-7            |
| A                     | JP 7-281228 A (浜松ホトニクス株式会社) 1995. 10. 27, 【図 1】【図 6】 (ファミリーなし)                                                                                                                              | 8              |
| A                     | JP 2009-130356 A (アイティーティー マニュファクチャリング エンタープライゼス インコーポレイテッド) 2009. 06. 11, 【図 7】<br>& US 2009/0129413 A1 & EP 2065989 A2 & CA 2643955 A & AU 2008243068 A & MX 2008014704 A & CA 2643955 A1 | 11-12          |