

(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
2025年2月27日(27.02.2025)

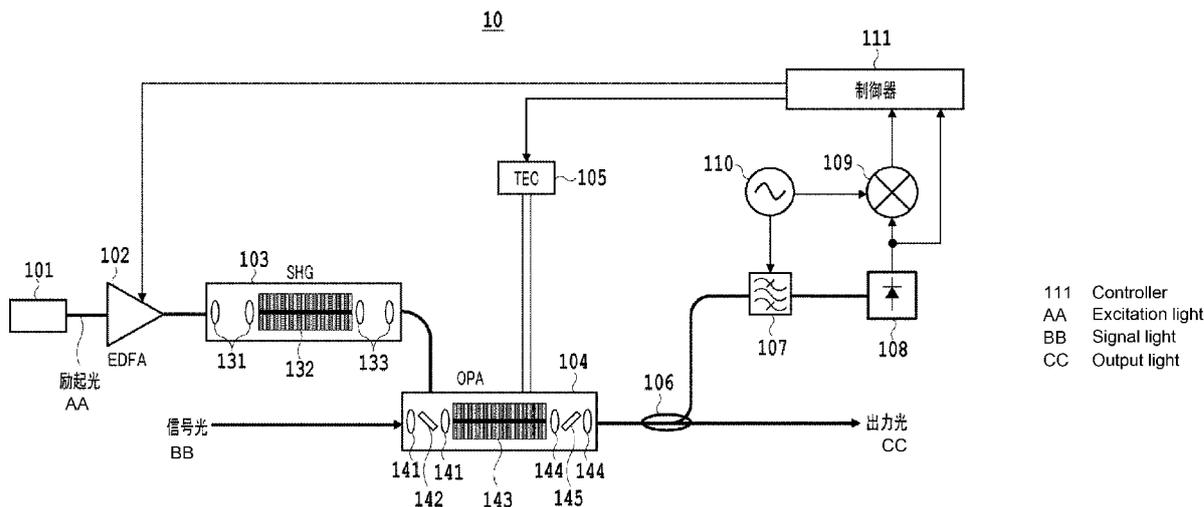


(10) 国際公開番号
WO 2025/041234 A1

- (51) 国際特許分類:
G02F 1/37 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2023/030046
- (22) 国際出願日: 2023年8月21日(21.08.2023)
- (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: 日本電信電話株式会社 (**NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION**) [JP/JP]; 〒1008116 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 阿部 真志(**ABE Masashi**); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-1 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 風間 拓志(**KAZAMA Takushi**); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-1 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 藤原 裕士(**FUJIWARA Yuji**); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-1 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP). 梅木 毅伺(**UMEKI Takeshi**); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-1 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 弁理士法人谷・阿部特許事務所 (**TANI & ABE, P.C.**); 〒1070052 東京都港区赤坂2丁目6番20号 Tokyo (JP).
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS,

(54) Title: WAVELENGTH CONVERSION DEVICE AND CONTROL METHOD

(54) 発明の名称: 波長変換装置および制御方法



(57) Abstract: A wavelength conversion device (10) according to the present disclosure comprises: a wavelength converter (104) that uses a nonlinear optical medium (143); a wavelength separation filter (107) that separates a part of output light generated in the wavelength converter (104) by parametric fluorescence in response to input of excitation light to the nonlinear optical medium (143); a detection circuit (108, 109, 110) that detects the intensity of the light separated by the wavelength separation filter (107) and the gradient of the change in the intensity; and a control circuit (111) that individually controls the intensity of the excitation light and the temperature of the wavelength converter (104) on the basis of the detected intensity and gradient.



WO 2025/041234 A1

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, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類：

一 国際調査報告 (条約第21条(3))

(57) 要約：本開示の波長変換装置 (10) は、非線形光学媒質 (143) を用いた波長変換器 (104) と、非線形光学媒質 (143) への励起光の入力に応じてパラメトリック蛍光により波長変換器 (104) において発生した出力光の一部を分離する波長分離フィルタ (107) と、波長分離フィルタ (107) によって分離された光の強度と強度の変化の傾きとを検出する検出回路 (108、109、110) と、検出された強度と傾きとに基づいて、励起光の強度および波長変換器 (104) の温度を個別に制御する制御回路 (111) と、を備える。

明 細 書

発明の名称：波長変換装置および制御方法

技術分野

[0001] 本開示は、波長変換装置および制御方法に関する。

背景技術

[0002] 非線形光学媒質による差周波発生（DFG）を利用した波長変換技術が知られる。DFGを利用した波長変換技術によれば、例えば、光ファイバ通信において使用される波長帯の光を一括で別の波長帯の光に変換できる。

[0003] そのため、このような波長変換技術は、例えば、波長分割多重（WDM）方式における光のルーティング、または光ルーティングにおける波長の衝突回避といった光ルーティングに関する技術に適用可能である。したがって、波長変換技術は、大容量通信光ネットワークを構築する上で鍵となる技術の1つに位置づけられる。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：特開2020-76834号公報

非特許文献

[0005] 非特許文献1：T. Umeki, O. Tadanaga, and M. Asobe, 'Highly Efficient Wavelength Converter Using Direct-Bonded PPZnLN Ridge Waveguide,' 2010年 IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 46, No. 8, pp. 1206-1213

発明の概要

[0006] 従来の波長変換技術においては、非線形光学媒質を用いた波長変換装置を安定的に動作させるための制御に関して改善の余地がある。

[0007] 本開示の非限定的な目的の1つは、非線形光学媒質を用いた波長変換装置を安定的に動作させるための制御を簡易化できるようにすることにある。

[0008] そのため、本開示の一態様に係る波長変換装置は、非線形光学媒質を用いた波長変換器と、前記非線形光学媒質への励起光の入力に応じてパラメトリ

ック蛍光により前記波長変換器において発生した出力光の一部を分離する波長分離フィルタと、前記波長分離フィルタによって分離された光の強度と前記強度の変化の傾きとを検出する検出回路と、前記強度と前記傾きとに基づいて、前記励起光の強度および前記波長変換器の温度を個別に制御する制御回路と、を備える。

[0009] また、本開示の一態様に係る制御方法は、非線形光学媒質を用いた波長変換器への励起光の入力に応じてパラメトリック蛍光により前記波長変換器において発生した出力光の一部を波長分離フィルタによって分離すること、前記波長分離フィルタによって分離された光の強度と前記強度の変化の傾きとを検出回路によって検出すること、および、検出した前記強度と前記傾きとに基づいて、前記励起光の強度および前記波長変換器の温度を制御回路によって個別に制御すること、を含む。

図面の簡単な説明

- [0010] [図1]第1の実施形態に係る波長変換装置の構成例を示すブロック図である。
- [図2]励起光、WDM信号光、および、WDM信号光の変換光の波長（または周波数）の関係の一例を示す図である。
- [図3]光パラメトリック増幅器（OPA）モジュールの動作温度の変化に対する波長変換帯域の変化の一例を示すグラフである。
- [図4]励起光パワーが一定の状態において波長変換装置の温度が変化した場合の特定波長の光について温度変化に対する強度（左縦軸）および傾き（右縦軸）の変化の一例を示すグラフである。
- [図5]第2の実施形態に係る波長変換装置の構成例を示すブロック図である。

発明を実施するための形態

[0011] 以下、図面を参照しながら実施形態について詳細に説明する。なお、冗長な説明を避けて説明の簡易化および明瞭化を図る目的で、図面において、同一の番号を付した要素または部分は、特に断らない限り、同一または同様の要素または部分を指す。

[0012] [概要]

光通信における光信号波長変換、光変調、光計測、または光加工、医療、生物学などの分野に適用可能であり、紫外域－可視域－赤外域－テラヘルツ域にわたるコヒーレント光の発生および変調のために、非線形光学デバイスおよび電気光学デバイスの開発が進められている。

- [0013] このような光デバイスに用いられる非線形光学媒質および電気光学媒質の例としては種々の材料が研究開発されている。例えば、ニオブ酸リチウム（ $\text{LN} : \text{LiNbO}_3$ ）のような酸化物系化合物は、2次非線形光学定数および電気光学定数が他の材料よりも高いため有望な材料である。
- [0014] LNの高非線形性を利用した光デバイスの一例として、周期的に分極反転されたニオブ酸リチウム（PPLN）による第二高調波発生（SHG）、差周波発生（DFG）、および／または、和周波発生（SFG）を利用した波長変換素子が挙げられる。
- [0015] DFGを利用した波長変換では、波長変換後の変換光が信号光に対して位相共役光の関係になることを用いて、信号歪みの補償を行うことができる。例えば、位相共役光への変換前の信号光には、光伝送路（例えば、光ファイバ）において分散と、光ファイバ中の非線形光学効果による非線形信号歪みとが生じ得る。分散および信号歪みの生じた信号光を位相共役光へ変換した場合、変換後の信号光には、変換後に伝搬する光伝送路において変換前とは逆の分散および非線形信号歪みが生じ得る。
- [0016] したがって、例えば、光伝送路のおよそ中間地点において信号光を位相共役光に変換することで、変換前の信号光に生じた分散および非線形信号歪みは、それぞれ、変換後において生じる逆の分散および非線形信号歪みによって相殺され低減され得る。このように、波長変換技術は、分散および非線形信号歪みを低減可能な技術の1つに位置づけられる。
- [0017] ところで、波長変換効率の優れた波長変換素子を位相共役光への波長変換に用いた場合、励起光パワーから信号光へのエネルギーの移行により、光パラメトリック増幅と呼ばれる、信号光の増幅器を構成できる。例えば、励起光と信号光との間の位相関係に応じた増幅特性を有する位相感応増幅器は、

低雑音での光増幅が可能な技術として期待される。

[0018] PPLNにおいて波長変換効率の向上を図るには、光導波路型のデバイスが有効である。その理由の1つは、非線形光学媒質を伝搬する光のパワー密度に波長変換効率が比例し、導波路構造を形成することで、限られた範囲に光を閉じ込めることが可能なためである。

[0019] したがって、非線形光学媒質を用いた種々の光導波路が検討される。例えば、結晶のバルクの特性をそのまま利用できるという理由から、高光損傷耐性、長期信頼性、またはデバイス設計が容易といった特徴を有するリッジ型の光導波路が検討される。

[0020] リッジ型光導波路は、例示的に、ベース基板上に導波路パターンに応じて形成されたコアを有し、かつ、ステップ型の屈折率分布を有する（例えば、非特許文献1を参照）。なお、リッジ型光導波路は、コアの上部および側部が空気層（すなわち、屈折率が1）であっても動作可能である。

[0021] また、非線形光学媒質には、擬似位相整合のために周期的に分極反転された構造（以下「周期分極反転構造」と略称する）が設けられてよい。周期分極反転構造では、例えば、基本波と基本波を波長変換した波とのコヒーレンス長ごとに結晶方位を反転し、非線形定数の符号を逆転することにより、位相不整合量を漸次的または段階的に補償することが可能である。周期分極反転構造を有する非線形光学媒質は、例えば、特殊な非線形光学結晶を用いずに中赤外域から可視域まで幅広い波長変換が行えるという点において実用的な価値が高い。

[0022] 一方、非線形光学材料は温度依存性の屈折率を有するため、2次非線形光学素子において擬似位相整合条件が、非線形光学材料の温度変化によって満たされなくなることがある。そのため、2次非線形光学素子は、温度が一定に保たれるように制御され得る。

[0023] 例えば、2次非線形光学素子またはその近傍にサーミスタ、熱電対といった測温体を設け、その抵抗値等をモニタする。このモニタ結果と目標値との差分が最小となるように、ヒータ、ペルチェ素子といった温度調節器をフィ

ードバック制御することにより、2次非線形光学素子の温度を一定に保つことができる。

[0024] しかしながら、測温体によるモニタ値を一定にするように温度調節器を制御する機構では、2次非線形光学素子の動作を精密に安定化するためには不十分な場合がある。例えば、サーミスタ、熱電対といった測温体によってモニタすることが可能な温度は、2次非線形光学素子の全体の平均的な温度であり、非線形光学効果をもたらす局所的な部分（例えば、光導波路）の温度ではない。

[0025] そのため、測温体による温度モニタでは、2次非線形光学素子を動作させる温度を安定動作が可能な所期の温度に制御することが難しい場合がある。例えば、リッジ型光導波路を有する2次非線形光学素子では、既述のとおり、コアの上部および側部が空気層である場合においても動作可能であるため、空気層に接する部分の面積に応じて環境温度（例えば、外気温度）の変化の影響を受け得る。

[0026] よって、2次非線形光学素子またはその近傍に設置した測温体によるモニタ温度が一定となるように当該素子の温度を制御した場合、環境温度の変化に応じて2次非線形光学素子の動作点が所期の動作点からシフトし得る。

[0027] また、光パラメトリック増幅による変換効率または利得を向上するために、光導波路に入射する励起光のパワーを増加した場合、光導波路内に入射した励起光の光吸収によって光導波路が発熱し得る。

[0028] この発熱は、光導波路という局所的な部分であるため、非線形光学素子またはその近傍に設置した測温体を用いたモニタではモニタ精度が低下し得る。モニタ精度の低下によって、非線形光学素子を安定的に動作させることが可能な所期の動作条件を満たすことが妨げられ得る。

[0029] 測温体を用いた温度制御の代替例として、特許文献1に記載された技術の適用が検討される。特許文献1には、波長変換器においてパラメトリック蛍光により発生した2つ波長の光を分離し、分離した2つ波長の光強度の差分に基づいて波長変換器の温度を制御することが記載される。

[0030] しかしながら、この技術では、波長変換器の温度制御のために複数波長の光をそれぞれ光分岐カップラおよび光帯域通過フィルタを用いて分離するため、温度制御のために使用する光学部品点数が増加し、制御系の構成および動作が複雑化し得る。

[0031] そこで、以下に説明する幾つかの非限定的な実施形態では、非線形光学媒質を用いた波長変換器の安定的な動作のための制御を簡易化することが可能な技術について説明する。

[0032] 例えば、非線形光学媒質を用いた波長変換器を含み、非線形光学媒質によるパラメトリック蛍光を利用して、波長変換および位相共役と変換光のパラメトリック増幅とを行うことが可能な波長変換装置の非限定的な例が以下に示される。

[0033] [第1の実施形態]

図1は、第1の実施形態に係る波長変換装置10の構成例を示すブロック図である。図1に示す波長変換装置10は、例示的に、励起光源101、エルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA)102、第1の波長変換器103、および、第2の波長変換器104を備える。

[0034] EDFA102は、励起光源101の出力に光学的に接続され、第1の波長変換器103は、EDFA102の出力に光学的に接続される。第2の波長変換器104は、例示的に、2つの入力ポートの1つが第1の波長変換器103の出力と光学的に接続される。

[0035] また、波長変換装置10は、例えば、温度調節器の一例である熱電クーラ(TEC)105と、第2の波長変換器104の出力に光学的に接続された光分岐カップラ106とを備える。光分岐カップラ106は、「タップ」と称されてもよい。さらに、波長変換装置10は、例えば、光分岐カップラ106の分岐出力の一方に光学的に接続された波長分離フィルタ107と、波長分離フィルタ107の出力に光学的に接続された光強度検出器108とを備える。

[0036] また、波長変換装置10は、例えば、光強度検出器108の出力に電氣的

に接続された乗算器109、乗算器109と波長分離フィルタ107とのそれぞれに電氣的に接続された交流信号源110、および、制御器111を備える。制御器111は、例示的に、EDFA102、TEC105、光強度検出器108および乗算器109のそれぞれと電氣的に接続される。

[0037] 励起光源101は、例えば、半導体レーザによって励起光を生成し、生成した励起光をEDFA102へ出力する。EDFA102は、励起光源101から入射した励起光を増幅し、増幅した励起光を第1の波長変換器103へ出力する。EDFA102の増幅利得（別言すると、励起光のパワー）は、例えば、制御器111からの制御によって可変され得る。

[0038] 第1の波長変換器103は、例えば、非線形光学効果の1つであるSHGによって、EDFA102から入射した励起光の第2高調波、すなわち、励起光の周波数を2倍にした周波数（別言すると、励起光の1/2波長）の光を発生する。なお、第2高調波に相当する光を便宜的に「SH光」と称することがある。

[0039] SH光を発生する第1の波長変換器103は、SHGモジュール103と称されてもよく、例示的に、第1の空間光学系131と、第1のPPLN導波路132と、第2の空間光学系133と、を備える。

[0040] 第1の空間光学系131は、例えば、第1の波長変換器103の入力ポートにEDFA102から入射した励起光を第1のPPLN導波路132へ空間的に導く。第1のPPLN導波路132は、周期分極反転構造の非線形光学媒質を用いた2次非線形光学素子の一例であり、上述したようにSHGによって励起光に対するSH光を発生する。

[0041] 第2の空間光学系133は、第1のPPLN導波路132において発生したSH光を第1の波長変換器103の出力ポートへ空間的に導く。SHGモジュール103の出力ポートは、例示的に、第2の波長変換器104の第1の入力ポートに接続されており、SHGモジュール103から出力されたSH光が第2の波長変換器104に入力される。

[0042] 第2の波長変換器104は、例えば、非線形光学効果の1つであるパラメ

トリック蛍光を利用したOPAとして動作可能であり、第2の入力ポートを通じて入力された信号光（例えばWDM信号光）を、第1の入力ポートを通じて入力されたSH光によって増幅する。

[0043] OPAとして機能する第2の波長変換器104は、OPAモジュール104と称されてもよい。OPAモジュール104は、例示的に、第3の空間光学系141と、第1のダイクロイックミラー142と、第2のPPLN導波路143と、第4の空間光学系144と、第2のダイクロイックミラー145と、を備える。

[0044] 第3の空間光学系141は、例えば、第1の入力ポートにSHGモジュール103から入力されたSH光と、第2の入力ポートに入力された信号光と、を合波して第2のPPLN導波路143へ空間的に導く。

[0045] 例示的に、信号光は、第1のダイクロイックミラー142を透過して第2のPPLN導波路143に結合し、SH光は、第1のダイクロイックミラー142において反射されて第2のPPLN導波路143に結合する。そのため、空間光学系141およびダイクロイックミラー142は、例えば、「ダイクロイックミラー型合波器」を構成すると理解されてもよい。

[0046] 第2のPPLN導波路143は、周期分極反転構造の非線形光学媒質を用いた2次非線形光学素子の一例である。第2のPPLN導波路143における周期分極反転構造は、例示的に、入力される信号光およびSH光と出力する変換光との間において擬似位相整合条件を満たす。したがって、第2のPPLN導波路143は、例えば、信号光を励起光としてのSH光によりパラメトリック増幅することが可能である。

[0047] 第4の空間光学系144は、第2のPPLN導波路143の出力光のうち、増幅された信号光を光分岐カプラ106へ出力する。例示的に、増幅された信号光は、第2のダイクロイックミラー145を透過して光分岐カプラ106へ出力され、SH光は、第2のダイクロイックミラー145によって反射されてOPAモジュール104の外部へ放射される。そのため、空間光学系144およびダイクロイックミラー145は、例えば、「ダイクロイック

ミラー型分波器」を構成すると理解されてもよい。

[0048] OPAモジュール104には、TEC105が熱的に結合されており、例えば、制御器111がTEC105を制御することにより、OPAモジュール104の温度を制御することが可能である。

[0049] なお、SHGモジュール103およびOPAモジュール104のそれぞれには、非限定的な一例として、 LiNbO_3 、 LiTaO_3 、 $\text{LiNb}_{(x)}\text{Ta}_{(1-x)}\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$)、または、それらにMg、Zn、Sc、Inからなる群から選ばれた少なくとも一種を添加物として含有する非線形光学媒質が用いられよい。

[0050] 光分岐カプラ106は、例示的に、1/100~1/10程度の分岐比を有するタップであり、OPAモジュール104の出力光の一部（例えば、1%~10%程度の光強度）を分岐して波長分離フィルタ107へ出力する。

[0051] 残りの光強度の光は、OPAモジュール104の出力光として出力される。なお、OPAモジュール104の出力光には、例えば、増幅された信号光、当該信号光の変換光、および、後述の自然放射増幅光（ASE光）が含まれ得る。

[0052] 波長分離フィルタ107は、例えば、光分岐カプラ106からの分岐光の波長帯域における特定波長の光をモニタ光の一例として光強度検出器108へ透過し、その他の波長の光は遮断するバンドパスフィルタ（BPF）タイプの光学フィルタである。

[0053] 波長分離フィルタ107の透過帯域幅は、例示的に、1nm程度である。ただし、これに限られず、後述する中心透過波長の振動に応じて出力に光量変化が現れる特性を有するフィルタであれば波長分離フィルタ107の透過帯域幅は制限されない。

[0054] 本例において、波長分離フィルタ107は、非限定的な一例として、ファイバブラッググレーティング（FBG）タイプの光学フィルタであり、その中心透過波長を電氣的に可変できる。例えば、波長分離フィルタ107は、交流信号源110から供給される交流信号によって中心透過波長を周期的に

変化（別言すると、交流信号の周波数に応じて振動）させることが可能である。

[0055] 光強度検出器 108 は、例えば、波長分離フィルタ 107 を透過した光の強度を検出する。ここで、上述したように波長分離フィルタ 107 の中心透過波長を交流信号によって振動させた場合、その振動に応じて波長分離フィルタ 107 を透過する光量が周期的に変動する。

[0056] 別言すると、波長分離フィルタ 107 から出力されるモニタ光が、交流信号によって周波数変調される。したがって、光強度検出器 108 の出力（例えば、直流電圧信号）には、交流信号の周波数に応じた変調信号成分が現れる。

[0057] 乗算器 109 は、光強度検出器 108 の出力に、交流信号源 110 の交流信号に同期した信号を乗じることにより、光強度検出器 108 の出力における変調信号成分を同期検波する。別言すると、乗算器 109 は、波長分離フィルタ 107 に供給される交流信号の周波数の 1 倍の参照信号によって光強度検出器 108 の出力をロックイン検波（または 1 階微分検波）する。

[0058] このロックイン検波によって変調信号成分が復調されて、強度変化の 1 階微分に相当する微分信号、別言すると、強度変化の傾きを示す信号が得られる。そのため、乗算器 109 は、例示的に、強度変化の 1 階微分に相当する微分信号を生成する「微分信号生成器」、または、強度変化の傾きを検出する「傾き検出器」に相当すると理解されてもよい。

[0059] 交流信号源 110 は、例示的に、上述したように波長分離フィルタ 107 の中心透過波長を周期的に変化させる周期信号の一例である交流信号を波長分離フィルタ 107 に供給する。交流信号の周波数は、例えば、後述するロックイン検波での応答特性に基づいて選択されてよく、例示的に、10 kHz オーダの周波数である。

[0060] なお、上述した光強度検出器 108、乗算器 109、および、交流信号源 110 は、上述した光強度と光強度変化の傾きとを検出する「検出回路」の非限定的な一例を構成すると理解されてよい。

- [0061] 制御器 111 は、制御回路の一例であり、例示的に、光強度検出器 108 によって得られる光強度と乗算器 109 によって得られる光強度変化の傾きとに基づいて、TEC 105 の温度および EDFA 102 の増幅利得を個別に制御する。「個別に制御する」とは、TEC 105 の温度および EDFA 102 の増幅利得の一方が制御対象である態様と双方が制御対象である態様とを含む表現であると理解されてよい。
- [0062] 例えば、制御器 111 は、TEC 105 の温度および EDFA 102 の増幅利得を個別に制御することにより、強度および強度変化の傾きをそれぞれ一定にする、別言すると、強度および傾きそれぞれの変化を最小化する。
- [0063] なお、TEC 105 の温度制御に応じて OPA モジュール 104 の温度が制御され、EDFA 102 の増幅利得制御に応じて SHG モジュール 103 へ入力される励起光のパワーが制御される。したがって、EDFA 102 の増幅利得制御に応じて OPA モジュール 104 に入力される SH 光パワーが制御される。制御器 111 による制御には、例えば、PID 制御 (Proportional-Integral-Differential control) が適用されてよい。
- [0064] (動作例)
- 次に、上述した波長変換装置 10 の動作例を説明する。波長変換装置 10 において、励起光源 101 から出力された励起光は、EDFA 102 によるパワー制御を受けた後、SHG モジュール 103 に入力される。SHG モジュール 103 では、第 1 の PPLN 導波路 132 において SHG により励起光の SH 光が生成される。励起光の SH 光は、OPA モジュール 104 に入力される。
- [0065] OPA モジュール 104 には、例えば、SH 光と、入力信号光の一例としての WDM 信号光とが入力される。OPA モジュール 104 において、WDM 信号光と励起光とがダイクロイックミラー型合波器によって合波され、PPLN 導波路 143 に入射する。
- [0066] PPLN 導波路 143 は、例えば、DFG により WDM 信号光の変換光を生成する。ここで、励起光の周波数を $2\omega_0$ 、WDM 信号光を構成する何れか

の波長に対応する周波数を ω_s とそれぞれ表した場合、PPLN導波路143中のDFGにより、周波数 $2\omega_0 - \omega_s$ の変換光が生成される。光位相としては、励起光の位相を Φ_p 、信号光の位相を Φ_s とそれぞれ表した場合、DFGにより、励起光の位相 Φ_p を基準として、位相が $\Phi_p - \Phi_s$ である、信号光の位相共役光が生成される。

[0067] 励起光の2倍の波長（周波数： ω_0 ）を基本波波長と定義した場合、WDM信号光に含まれる複数波長の信号光は、例えば、基本波波長を中心波長軸として折り返した波長の変換光として生成される。変換光の生成と共に、励起光からWDM信号光にエネルギーが移行するため、WDM信号光が増幅される。

[0068] PPLN導波路143により生成された変換光は、励起光が合波されたWDM信号と共にダイクロイックミラー型分波器に出力される。ダイクロイックミラー型分波器において、PPLN導波路143の出力光から励起光が分波され、残りの光（例えば、増幅されたWDM信号光+WDM信号光の変換光+ASE光）がOPAモジュール104の出力光として光分岐カプラ106へ出力される。

[0069] 光分岐カプラ106は、OPAモジュール104の出力光の僅かな一部を分岐して波長分離フィルタ107へ出力し、残りの出力光を波長変換装置10の出力光として出力する。なお、光分岐カプラ106の出力から「WDM信号の変換光」が取り出される場合、波長変換装置10は、波長変換器および位相共役変換器として機能する。これに対し、光分岐カプラ106の出力から「増幅されたWDM信号光」が取り出される場合、波長変換装置10は、光パラメトリック増幅器として機能する。

[0070] 図2は、励起光、信号光、および、信号光の変換光の波長（または周波数）の関係の一例を示す図である。非限定的な一例として、基本波波長 λ_0 （周波数： ω_0 ）を1545ナノメートル（nm）、励起光波長 λ_p （周波数： $2\omega_0$ ）を772.5nmとした場合の、PPLN導波路143の波長変換（帯域）について、図2（a）を用いて説明する。

[0071] なお、PPLN導波路143の長手方向の長さ（素子長）は、非限定的な一例として、42ミリメートル（mm）である。また、図2（b）は、信号光がWDM信号光であるケースについての波長変換帯域の一例を示し、その説明については後述する。

[0072] 励起光および信号光がPPLN導波路143に入力された場合、PPLN導波路143のDFGにより信号光の変換光が生成される。図2（a）に示すように、信号光の波長 λ_s （周波数： ω_s ）を1540nmとした場合、信号光の変換光は、励起光と信号光との差分の周波数である $2\omega_0 - \omega_s$ 、つまりは波長 $\lambda_c = 1550$ nmの光として生成される。波長領域において考えた場合、変換光は、基本波波長 λ_0 を中心波長軸として信号光を折り返した形で生成される。

[0073] PPLN導波路143では、励起光、信号光、および、変換光の3波の光の間において擬似位相整合条件が満たされる。例えば、励起光、信号光、変換光の光導波路中の実効屈折率を、それぞれ、 n_p 、 n_s 、 n_c と表した場合、PPLN導波路143は、以下の式1を満たす反転周期 Λ の分極反転構造を有する。

$$n_p / \lambda_p - n_s / \lambda_s - n_c / \lambda_c = 1 / \Lambda \quad (1)$$

[0074] 式1が満たされる場合、信号光の波長 λ_s が変化しても、励起光と周波数 $2\omega_0 - \omega_s$ の変換光との間では同じ変換効率が得られる。例えば、信号光波長 λ_s （周波数： ω_s ）を1539nmとした場合、 $2\omega_0 - \omega_s$ により、波長1551nmの変換光が生成される。

[0075] このとき、信号光の実効屈折率 n_s および変換光の実効屈折率 n_c も変化するが、材料の分散により信号光の実効屈折率 n_s の増加分に応じて変換光の実効屈折率 n_c が減少する。そのため、信号光波長 λ_s を変更した場合でも、式1を満たすことができ、波長変換帯域の広帯域化を図ることができる。

[0076] ここで、このような波長変換前後の帯域形状（別言すると、スペクトル形状）は、OPAモジュール104の動作温度が適正である場合に満たされ、動作温度が適正温度からずれた場合、帯域形状が変化し得る。温度変化の場

合は、実効屈折率 n_p 、 n_s 、 n_o のそれぞれが変化するため、その変化に応じて得られる波長変換帯域が変化し得る。

[0077] 図3は、OPAモジュール104の動作温度の変化に対する波長変換帯域の変化の一例を示すグラフである。図3には、非限定的な一例として、波長帯の変換において使用する基準温度を $\Delta T = 0.0^\circ\text{C}$ とし、基準温度から $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 、および、 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ の温度幅においてそれぞれ変化させた場合のグラフが示される。なお、図3では、上述した条件における波長変換帯域の光強度が正規化して示される。

[0078] WDM信号光における1波長の信号光の変換光をモニタして、OPAモジュール104の動作温度を制御する方法が検討され得るが、変換光の波長によって光強度の温度依存性が異なる。そのため、単純には温度制御における温度の上下関係（別言すると、温度の増減方向）を特定することが難しい。

[0079] 変換光の全帯域をモニタして、OPAモジュール104の動作温度を制御する方法も検討され得るが、部品点数が増加して制御が複雑になり得る。また、OPAモジュール104に入力される信号光のパワーが変動した場合、その変動に応じて変換光の強度も変動するため、OPAモジュール104に対する外部からの光入力为前提では制御がさらに複雑化し得る。

[0080] そこで、本実施形態では、PPLN導波路143の特性を利用して、OPAモジュール104の動作温度を制御する。例えば、パラメトリック蛍光により励起光から変換された特定の帯域幅を有する波長領域の光をモニタ光に利用する。

[0081] パラメトリック蛍光は、信号光が入力されなくても非線形光学媒質からの自然放出光（ASE光）の存在によって、非線形光学媒質に入射した励起光が、その周波数よりも低い2つの周波数の光に変換される自発パラメトリック過程である。例えば、2次の非線形光学媒質に周波数 $2\omega_0$ の励起光を入射した場合、励起光は、 $\omega_1 + \omega_2 = 2\omega_0$ を満たす2つの周波数 ω_1 および周波数 ω_2 の光に変換される。

[0082] 波長分離フィルタ107は、既述のとおり、特定波長の光を透過し、その

他の波長の光は遮断するBPF型の光学フィルタである。特定波長の光は、例示的に、OPAモジュール104にてパラメトリック蛍光により発生した光の帯域のうち、WDM信号光の変換光の帯域（以下「変換光帯域」と称することがある）に重ならない波長の光であってよい。代替的または追加的に、特定波長の光は、WDM信号光の帯域に重ならない波長の光であってもよい。

- [0083] 例えば、基本波波長を基準としてWDM信号光の変換光帯域に近接した波長を特定波長（周波数： ω_{BPF} ）に選ぶことにより、変換光帯域のスペクトル形状を制御できる。例示的に、図2（b）に示すように、入力WDM信号光の波長帯域を1528～1544 nmとした場合、WDM信号光は、波長帯域1546～1562 nmの変換光に波長変換される。
- [0084] この場合、波長分離フィルタ107の中心透過波長（ λ_{BPF} ）は、波長帯域1528～1544 nmおよび1546～1562 nmの双方に重ならない波長であって変換光帯域1546～1562 nmに近接した波長、例えばWDM信号光が配置されない長波長側の波長1563 nmに設定されてよい。この波長1563 nmは、WDM信号光、および、その変換光の双方が配置されない帯域における波長の非限定的な一例である。
- [0085] 波長分離フィルタ107の中心透過波長が上述のごとく設定された状態において、パラメトリック蛍光による光強度および光強度変化の傾きが、波長分離フィルタ107の出力光から光強度検出器108および乗算器109によって検出される。
- [0086] そして、検出された光強度および光強度変化の傾きが一定になるように、励起光源101の励起光パワーとOPAモジュール104の温度とが個別に制御器111によって制御される。この制御によって、WDM信号光の変換帯域のスペクトル形状を一定に保つことができる、または、スペクトル形状の変化を最小化できる。
- [0087] 図4は、励起光パワーが一定の状態において波長変換装置10の温度が変化した場合のASE光スペクトルにおける特定の波長（例えば、1545 n

m付近)の光について、温度変化に対する強度および傾きの変化の一例を示すグラフである。図4において、符号401が温度変化に対する強度の変化(左縦軸)を示し、符号402が温度変化に対する傾きの変化(右縦軸)を示す。強度の変化は正規化されている。温度は図3に例示した状況である。

[0088] 図4に例示したように、波長領域においてある程度ASE光スペクトルが広がった状態の場合、変換帯域外の特定波長のASE光スペクトルの強度および傾きは、何れも温度変化に応じて単調に増加または減少する傾向にある。一方、温度が一定の場合、励起光パワーの増加(または減少)に応じてASE光スペクトルは、そのスペクトル形状を保ったまま強度方向にシフトする傾向にある。

[0089] したがって、特定波長のASE光の強度および強度変化の傾きをそれぞれ一定にすることで、ASE光スペクトルの形状を一定にできる、または、スペクトル形状の変化を最小化できる。そこで、制御器111は、上述した強度および傾きという2つのパラメータを基に励起光パワーと温度とについて個別にフィードバック制御を行う。

[0090] 例えば、制御器111は、温度制御によってASE光の強度変化の傾きを一定化した後、励起光パワー(例えば、EDFA102の増幅利得)の制御によってASE光の強度を一定化する。

[0091] 制御器111においては、例えば、光強度検出器108によって検出された光強度と、乗算器109によって検出されたロックイン信号(微分信号)とを基に、PID制御のための計算を行う。そして、制御器111は、その計算結果に基づいて、TEC105およびEDFA102(増幅利得)を個別にフィードバック制御する。これにより、例えば、WDM信号光の変換光帯域において光強度を0.2dB程度に安定させることができる。

[0092] 以上のように、第1の実施形態の波長変換装置10によれば、OPAモジュール104にてパラメトリック蛍光により発生した出力光から特定波長の光(例えば、波長 λ_{BPF} のASE光)が波長分離フィルタ107によって分離される。分離された波長の光強度および光強度変化の傾きがそれぞれ光強度検

出器 108 および乗算器 109 によって検出され、その検出結果に基づいて、OPA モジュール 104 の温度と励起光パワーとが制御器 111 によって個別に制御される。

[0093] このような動作により、OPA モジュール 104 に対する信号光の入力の有無に依存せずに、パラメトリック蛍光による変換光帯域のスペクトル形状を一定に制御できる。したがって、最適または好適な動作条件において波長変換装置 10 を安定的、長期的に動作させることが可能となる。

[0094] また、OPA モジュール 104 の温度と励起光パワーとの個別制御において、1 波長の特定波長（例えば、 λ_{BPF} ）の光をモニタすればよいため、例えば、上述した制御のために使用する光学部品点数の増加を抑制できる。したがって、制御器 111 を含む制御系の簡易化を図ることができる。

[0095] さらに、波長分離フィルタ 107 の中心透過波長（別言すると、モニタ光の波長 λ_{BPF} ）を、WDM 信号光の変換光帯域に重ならない波長に設定することで、WDM 信号光の変換光に干渉せずに適切なモニタ動作を実現できる。

[0096] なお、第 1 の実施形態では、中心透過波長を電氣的に可変できる波長分離フィルタ 107 の例として、FBG タイプの光学フィルタを示した。代替的に、例えば、狭帯域 BPF と光干渉計とを組み合わせる光干渉計の光路差に変調を加える構成によって、中心透過波長が電氣的に可変である波長分離フィルタ 107 が実現されてもよい。

[0097] また、上述した第 1 の実施形態においては、モニタ光の波長（ λ_{BPF} ）に変換光帯域から長波長側に外れた波長を選んだが、例示的に、変換光帯域から短波長側に外れた波長（例えば、1545 nm）を選んでもよい。ただし、例えば、波長資源の利用効率向上のために WDM 信号光の帯域と変換光帯域との間に信号光を配置することが想定される場合、短波長側よりも長波長側に外れた波長をモニタ光の波長に選ぶ方が好ましいと云える。

[0098] [第 2 の実施形態]

図 5 は、第 2 の実施形態に係る波長変換装置 10A の構成例を示すブロック図である。図 5 において既述の符号と同一符号を付した構成要素は、特に

断らない限り、既述の構成要素と同一若しくは同様と理解されてよい。

[0099] 波長変換装置10Aは、図1に例示した構成に比して、制御光源121と、OPAモジュール104の入力側に設けられた光合波カップラ122とを追加的に備え、かつ、波長分離フィルタ107に代えて波長分離フィルタ107Aが設けられる点異なる。

[0100] 制御光源121は、例えば、半導体レーザを用いて構成され、制御光を生成する。制御光の波長については波長分離フィルタ107Aの中心透過波長との関係において後述する。光合波カップラ122は、制御光源121から出力される制御光を、OPAモジュール104に入力される信号光に合波する。

[0101] 波長分離フィルタ107Aは、第1の実施形態における波長分離フィルタ107と同様にBPFタイプの光学フィルタであり、光分岐カップラ106からの分岐光の波長帯域における特定波長の光をモニタ光の一例として光強度検出器108へ透過する。

[0102] 波長分離フィルタ107Aの透過帯域幅は、第1の実施形態と同様に、例えば1nm程度である。ただし、これに限られず、後述する制御光の中心周波数の振動に応じて出力に光量変化が現れる特性を有するフィルタであれば波長分離フィルタ107Aの透過帯域幅は制限されない。

[0103] ここで、波長分離フィルタ107Aは、第1の実施形態とは異なり、中心透過波長が可変である必要はなく、例示的に、固定の中心透過波長を有する。代替的に、波長分離フィルタ107Aに中心透過波長が可変のフィルタを適用するが、中心透過波長は可変（例えば、振動）させないこととしてもよい。

[0104] 交流信号源110は、図1に例示した構成とは異なり、制御光源121と電氣的に接続されており、制御光の中心周波数を周期的に変化させる周期信号の一例である交流信号を制御光源121に供給する。この交流信号によって、光合波カップラ122を通じてOPAモジュール104に入力される制御光の中心周波数が振動する。

- [0105] 別言すると、波長変換装置10Aは、波長分離フィルタ107Aの透過光に対してロックイン検波のための周波数変調をかける代わりに、波長分離フィルタ107Aに入力される制御光に対してロックイン検波のための周波数変調を加える構成を有する。
- [0106] そのため、第2の実施形態において、乗算器109は、光強度検出器108の出力に、交流信号源110の交流信号に同期した信号を乗じることにより、光強度検出器108の出力における変調信号成分をロックイン検波する。
- [0107] なお、第2の実施形態においても、光強度検出器108、乗算器109、および、交流信号源110は、上述した光強度と光強度変化の傾きとを検出する「検出回路」の非限定的な一例を構成すると理解されてよい。
- [0108] 制御光の中心周波数を振動させる交流信号の周波数は、第1の実施形態と同様に、ロックイン検波での応答特性に基づいて選択されてよく、例示的に、10kHzオーダの周波数である。
- [0109] 制御光源121から出力される制御光の強度は、例示的に、ASE光レベルよりも高い強度に設定されてよい。制御光の強度をASE光レベルよりも高い強度に設定することで、光強度検出および傾き検出の雑音耐性を第1の実施形態よりも高めることができる。
- [0110] 制御光源121から出力される制御光の波長（周波数： ω_i ）は、例示的に、波長分離フィルタ107Aの中心透過波長と同じ波長である。別言すると、制御光の波長は、波長分離フィルタ107Aにおいて分離される光の波長と一致する。
- [0111] 図2を参照して非限定的な波長配置を例示すると、基本波波長 λ_0 （周波数： ω_0 ）が1545nmであり、波長分離フィルタ107の中心透過波長が1563nmである場合、制御光の波長は1563nmに設定される。この波長1563nmは、WDM信号光の変換光帯域に重ならない波長であって変換光帯域から長波長側に外れた波長の非限定的な一例である。
- [0112] 上述した構成を有する波長変換装置10Aでは、交流信号源110からの

交流信号によって周波数変調を受けた制御光が、OPAモジュール104および光分岐カプラ106を経由して、波長分離フィルタ107Aに入力される。

[0113] 中心透過波長が制御光の波長に設定された波長分離フィルタ107Aは、光分岐カプラ106から入力された制御光を光強度検出器108へ透過し、光強度検出器108において制御光の強度が検出される。また、制御光の強度変化の傾きが、乗算器109および交流信号源110を用いたロックイン検波によって検出される。

[0114] 制御器111は、検出された制御光の強度および強度変化の傾きに基づいて、励起光源101の励起光パワーとOPAモジュール104の温度とを個別に制御（例えば、PID制御）する。この制御によって、変換光帯域のスペクトル形状が一定に保たれる、または、スペクトル形状の変化が最小化される。例えば、変換光帯域において光強度を0.2dB程度に安定させることができる。

[0115] なお、上述した第2の実施形態においては、制御光の波長が波長分離フィルタ107Aの中心透過波長と一致する例について説明したが、制御光の波長は、波長分離フィルタ107Aの中心透過波長と不一致であってもよい。

[0116] 例えば、制御光の周波数を ω_1 によって表した場合、制御光がOPAモジュール104においてパラメトリック蛍光により変換された光の周波数 ω_i は、励起光の周波数 $2\omega_0$ を使って、以下の式2によって表される。

$$\omega_i = 2\omega_0 - \omega_1 \quad (2)$$

[0117] この周波数 ω_i の変換光についても、変換前の制御光（周波数： ω_1 ）と同じく、交流信号源110によって加えられた周波数変調に応じた変調成分が含まれる。したがって、波長分離フィルタ107Aの中心透過波長は、制御光の変換光の周波数 ω_i に対応する波長に設定されてもよい。

[0118] 非限定的な波長配置を例示すると、基本波波長 λ_0 （周波数： ω_0 ）が1545nmである場合、制御光の波長 λ_{CONT} および波長分離フィルタ107Aの中心透過波長 λ_{BPF} の組み合わせは、以下の（a）および（b）の何れであっても

よい。

$$(a) \lambda_{\text{CONT}} = 1563 \text{ nm}; \lambda_{\text{BPF}} = 1527 \text{ nm}$$

$$(b) \lambda_{\text{CONT}} = 1527 \text{ nm}; \lambda_{\text{BPF}} = 1563 \text{ nm}$$

[0119] 別言すると、波長分離フィルタ107Aの中心透過波長は、制御光の波長に設定されてもよいし、制御光のパラメトリック蛍光による変換光の波長に設定されてもよい。さらに別言すれば、制御光の波長および波長分離フィルタ107Aの中心透過波長は、前掲の式2を満たす周波数 ω_1 および ω_2 のそれぞれに対応する2波長の何れに設定されてもよい。

[0120] なお、OPAモジュール104の出力光に含まれる制御光は、例えば、光分岐カプラ106の出力側に個別に設けられた光学フィルタによってカットされてよい。代替的に、例えば、光分岐カプラ106をWDMフィルタに置換することによって、OPAモジュール104の出力光から制御光をWDMフィルタにおいて分離して波長分離フィルタ107Aに入力する構成としてもよい。

[0121] [各実施形態に共通の補足]

上述した各実施形態では、励起光の第2高調波(SH光)を、SHGモジュール103によって生成する構成について例示したが、SH光の波長の光を出力可能な光源を励起光源101に適用する場合には、SHGモジュール103は設けられなくてもよい。

[0122] また、上述した各実施形態では、励起光パワーの制御がEDFA102の増幅利得制御によって行われる例を示した。代替的または追加的に、励起光パワーの制御は、例えば、出力光パワーが可変の励起光源101に対する出力光パワー制御、またはEDFA102とSHGモジュール103との間に設けた可変光減衰器(VOA)の光減衰量制御によって行われてもよい。

[0123] なお、SHGモジュール103からOPAモジュール104に入力される励起光の2倍高調波であるSH光の光パワーレンジとして、OPAの動作に十分なレンジを確保できる場合、EDFA102は省略されてもよい場合がある。

- [0124] また、EDFA102の増幅利得制御に加えて、励起光源101の出力光パワー制御が可能である場合には、例えば、励起光パワーの制御可能なレンジの拡大を図ることができる。さらに、EDFA102の増幅利得制御に加えて、励起光源101の出力光パワー制御またはVOAの減衰量制御が可能である場合には、例えば、個々の応答速度に応じて制御（例えば、追従動作）が分担されてよい。
- [0125] 非限定的な一例として、EDFA102の応答速度よりも励起光源101またはVOAの応答速度の方が早い場合を想定する。この場合、相対的に大きな変動はEDFA102の増幅利得制御によって追従し、相対的に小さく早い変動は励起光源101に対する制御またはVOAの減衰量制御によって追従するといった制御動作の分担が可能である。
- [0126] また、上述した各実施形態においては、温度と励起光パワーとの双方が制御対象であるが、温度と励起光パワーとの一方が制御対象とされてもよい。例えば、光強度（例えば、励起光パワー）が一定化、または、光強度の変動が最小化されている状況では、OPAモジュール104の温度が制御対象とされてよい。
- [0127] これに対し、例えば、OPAモジュール104の温度が一定化（または、温度変動が最小化）されている状況では、制御対象が光強度（例えば、励起光パワー）とされてよい。ただし、温度と励起光パワーとの双方を制御対象とすることにより、光強度方向のシフトを含んで一意にスペクトル形状を決定できるため、スペクトル形状を安定化させるための制御時間を短縮できる。
- [0128] また、各実施形態において、光分岐カプラ106は、例えば、信号光または変換光と既述の特定波長の光（別言すると、モニタ光）とを分離するWDMフィルタに置換されてもよい。BPF特性を有する波長分離フィルタ107または107Aは、例えば、ロングパスフィルタおよびショートパスフィルタの組み合わせによって実現されてもよい。
- [0129] さらに、各実施形態においては、信号光のパラメトリック蛍光による変換

後の帯域におけるスペクトル形状を一定に制御する例について示した。代替的に、パラメトリック蛍光による変換前の信号光帯域のスペクトル形状が一定に制御されてもよい。

[0130] 図2を参照して非限定的な一例について説明すると、1528~1544 nmの信号光帯域から短波長側に外れた1527 nmが、波長分離フィルタ107または107Aの中心透過波長(λ_{BPF})に設定されてもよい。この設定によれば、光パラメトリック増幅器としての動作における「信号光帯域のスペクトル形状」を一定に制御することが可能である。

[0131] 以上、本開示について詳細に説明したが、本開示を通じて説明した内容に本開示の趣旨および範囲が限定されないことは当業者に明らかである。本開示は、請求の範囲の記載によって定まる本開示の趣旨および範囲を逸脱することなく修正および変更態様として実施可能である。したがって、本開示の記載は、例示的な説明を目的とし、本開示の趣旨および範囲に対して何らの制限的な意味を有さない。

産業上の利用可能性

[0132] 本開示は、例えば、非線形光学効果を用いた光学素子の安定的な動作に活用されることが想定され、光通信システム、光計測システム、光通信用の増幅技術一般に有用である。

符号の説明

- [0133] 10、10A 波長変換装置
 - 101 励起光源
 - 102 エルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA)
 - 103 第1の波長変換器(SHGモジュール)
 - 104 第2の波長変換器(OPAモジュール)
 - 105 熱電クーラ(TEC)
 - 106 光分岐カプラ
 - 107、107A 波長分離フィルタ
 - 108 光強度検出器

- 1 0 9 乗算器
- 1 1 0 交流信号源
- 1 1 1 制御器
- 1 2 1 制御光源
- 1 2 2 光合波カプラ
- 1 3 1 第1の空間光学系
- 1 3 2 第1のP P L N導波路
- 1 3 3 第2の空間光学系
- 1 4 1 第3の空間光学系
- 1 4 2 第1のダイクロイックミラー
- 1 4 3 第2のP P L N導波路
- 1 4 4 第4の空間光学系
- 1 4 5 第2のダイクロイックミラー

請求の範囲

- [請求項1] 非線形光学媒質を用いた波長変換器と、
前記非線形光学媒質への励起光の入力に応じてパラメトリック蛍光により前記波長変換器において発生した出力光の一部を分離する波長分離フィルタと、
前記波長分離フィルタによって分離された光の強度と前記強度の変化の傾きとを検出する検出回路と、
前記強度と前記傾きとに基づいて、前記励起光の強度および前記波長変換器の温度を個別に制御する制御回路と、を備える、波長変換装置。
- [請求項2] 前記波長分離フィルタは、前記波長変換器において入力された波長多重信号光が波長変換された変換光の帯域に重ならない波長を中心透過波長に有し、
前記変換光の帯域は、前記励起光の波長の2倍の波長である基本波波長を基準とした前記パラメトリック蛍光の差周波発生により生成される位相共役光の帯域に相当する、請求項1に記載の波長変換装置。
- [請求項3] 前記波長分離フィルタは、中心透過波長が可変の光バンドパスフィルタであり、
前記検出回路は、
前記光バンドパスフィルタの前記中心透過波長を周期的に変化させる周期信号を前記光バンドパスフィルタに供給する信号源と、
前記光バンドパスフィルタの出力光の強度を検出する光強度検出器と、
前記周期信号に同期した信号と前記光強度検出器の出力とを基に前記傾きを検出する傾き検出器と、を備える、請求項1または2に記載の波長変換装置。
- [請求項4] 前記波長変換装置は、
出力する制御光の中心周波数が可変の制御光源と、

前記波長変換器に入力される信号光に前記制御光を合波する光合波カプラと、をさらに備え、

前記検出回路は、

前記制御光の前記中心周波数を周期的に変化させる周期信号を前記制御光源に供給する信号源と、

前記波長分離フィルタの出力光の強度を検出する光強度検出器と、

前記周期信号に同期した信号と前記光強度検出器の出力とを基に前記傾きを検出する傾き検出器と、を備える、請求項1または2に記載の波長変換装置。

[請求項5] 前記制御光の波長は、前記波長分離フィルタによって分離される光の波長と一致する、請求項4に記載の波長変換装置。

[請求項6] 前記制御光の波長 ω_1 は、前記波長分離フィルタによって分離される光の波長に対応した光周波数を ω_0 と表した場合に、前記励起光の光周波数 $2\omega_0$ に対して、 $\omega_1 = 2\omega_0 - \omega_1$ を満たす波長である、請求項4に記載の波長変換装置。

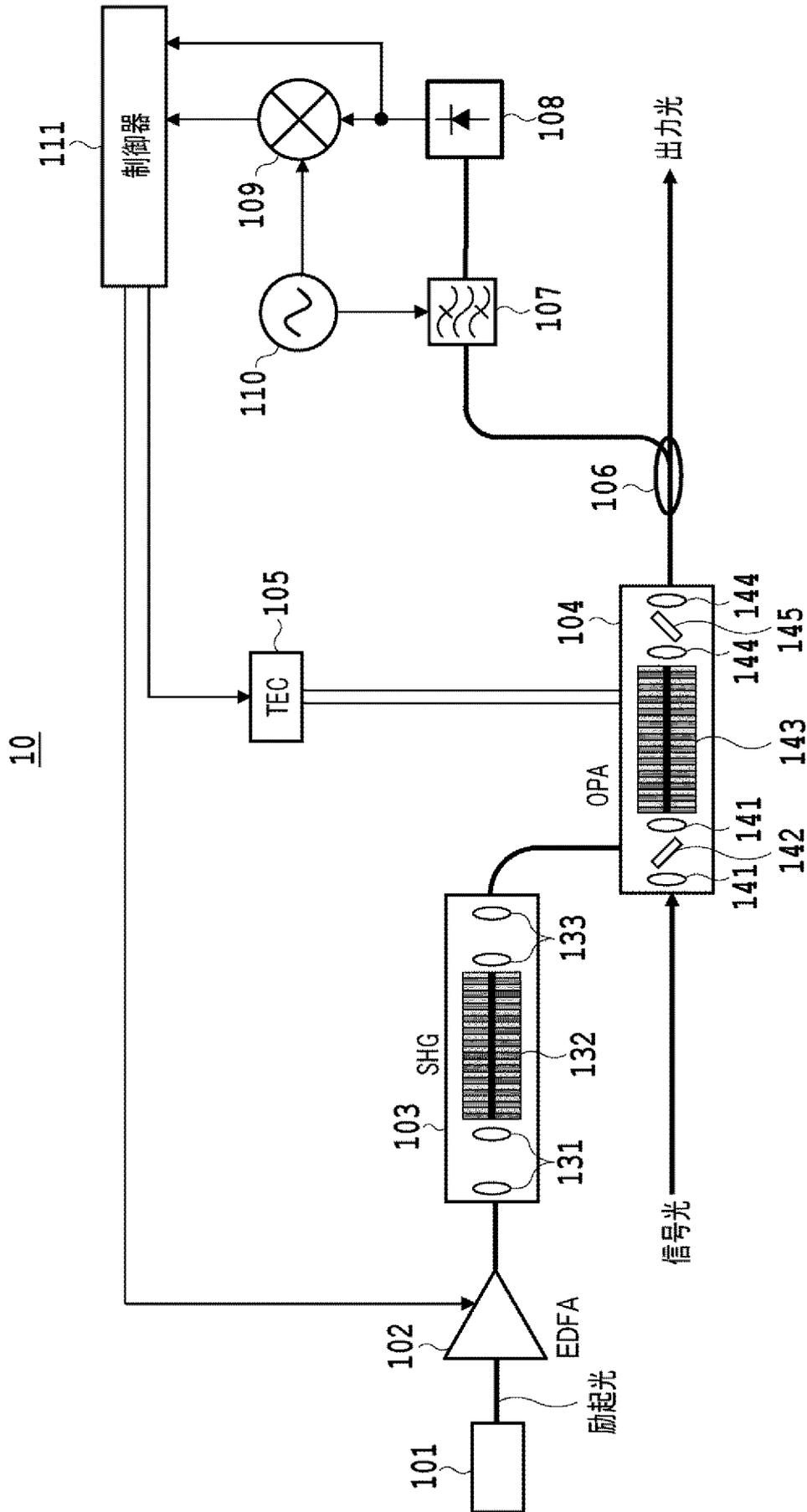
[請求項7] 前記非線形光学媒質は、 LiNbO_3 、 LiTaO_3 、 $\text{LiNb}_{(x)}\text{Ta}_{(1-x)}\text{O}_3$ ($0 \leq x \leq 1$)、または、それらにMg、Zn、Sc、Inからなる群から選ばれた少なくとも一種を添加物として含有する、請求項1に記載の波長変換装置。

[請求項8] 非線形光学媒質を用いた波長変換器への励起光の入力に応じてパラメトリック蛍光により前記波長変換器において発生した出力光の一部を波長分離フィルタによって分離すること、

前記波長分離フィルタによって分離された光の強度と前記強度の変化の傾きとを検出回路によって検出すること、および、

検出した前記強度と前記傾きとに基づいて、前記励起光の強度および前記波長変換器の温度を制御回路によって個別に制御すること、を含む、制御方法。

[图1]



10

111

控制器

109

110

108

107

106

TEC

105

104

OPA

141

142

143

144

144

145

101

EDFA

102

131

132

133

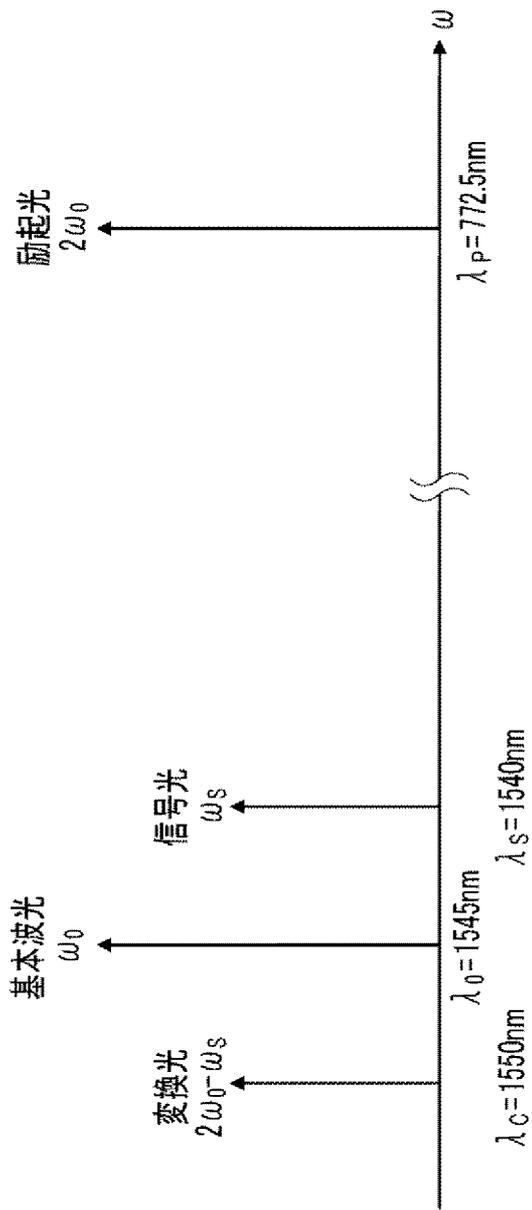
SHG

信号光

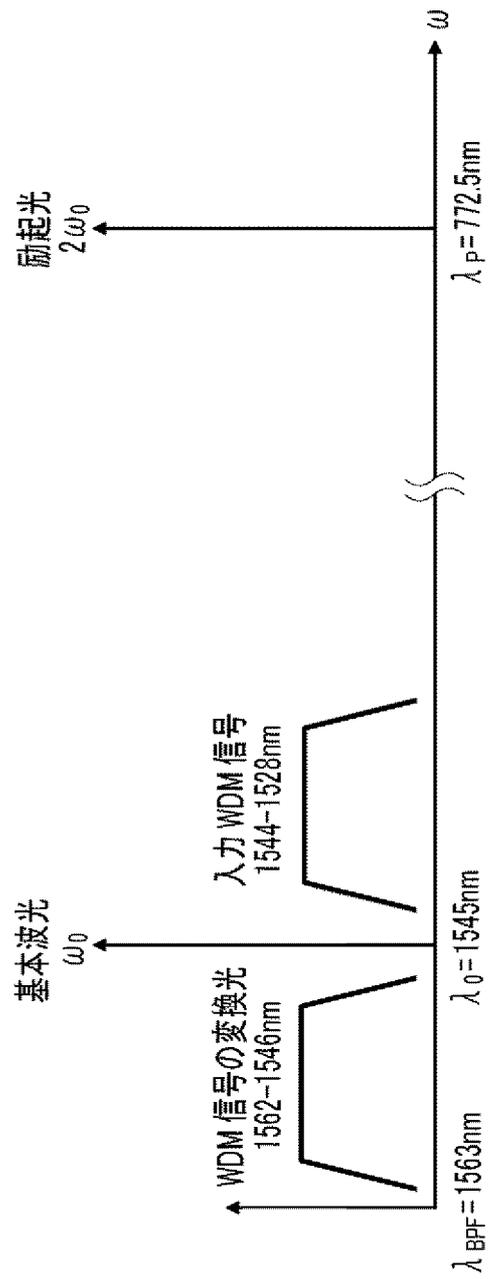
出力光

励起光

[図2]

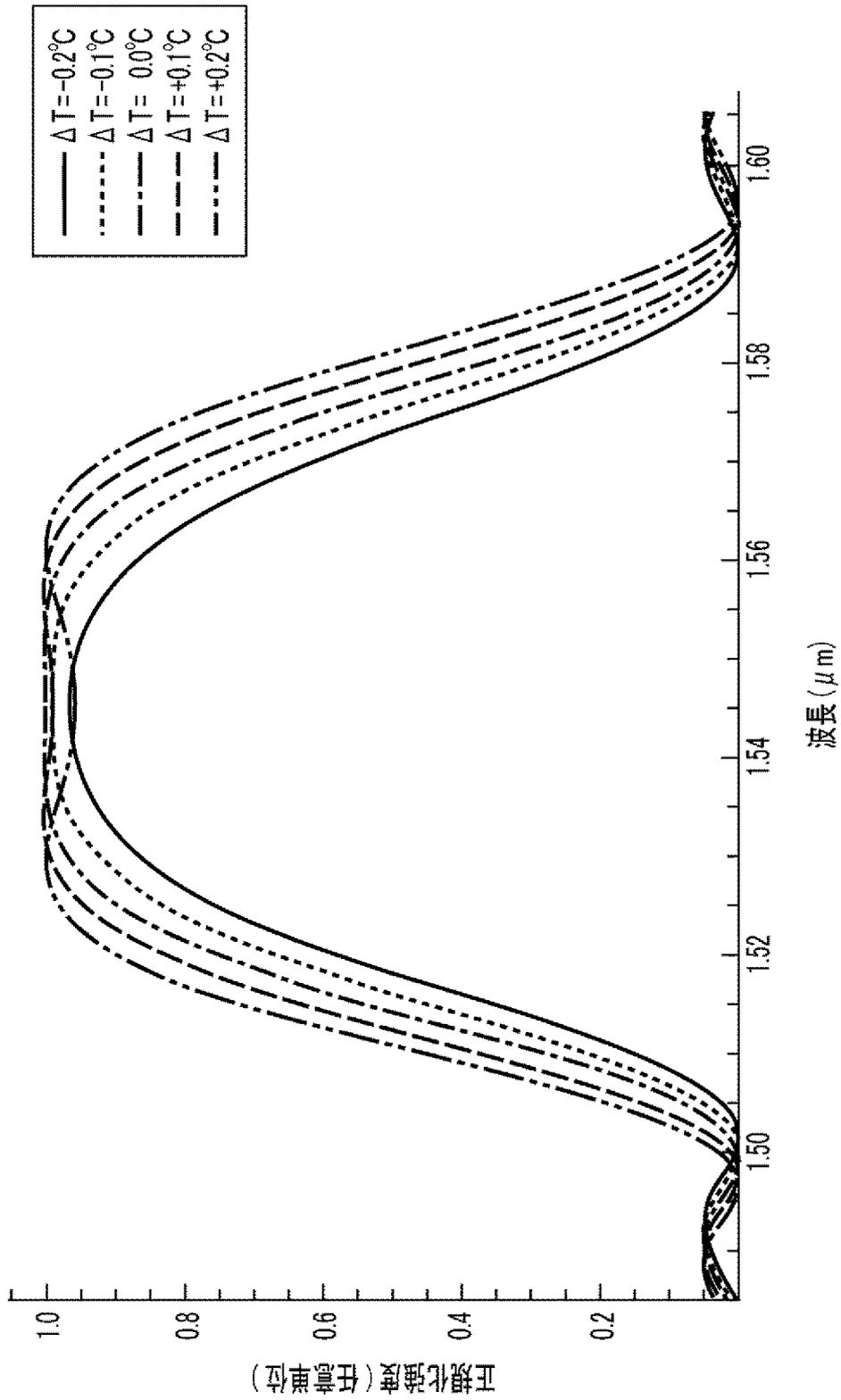


(a)

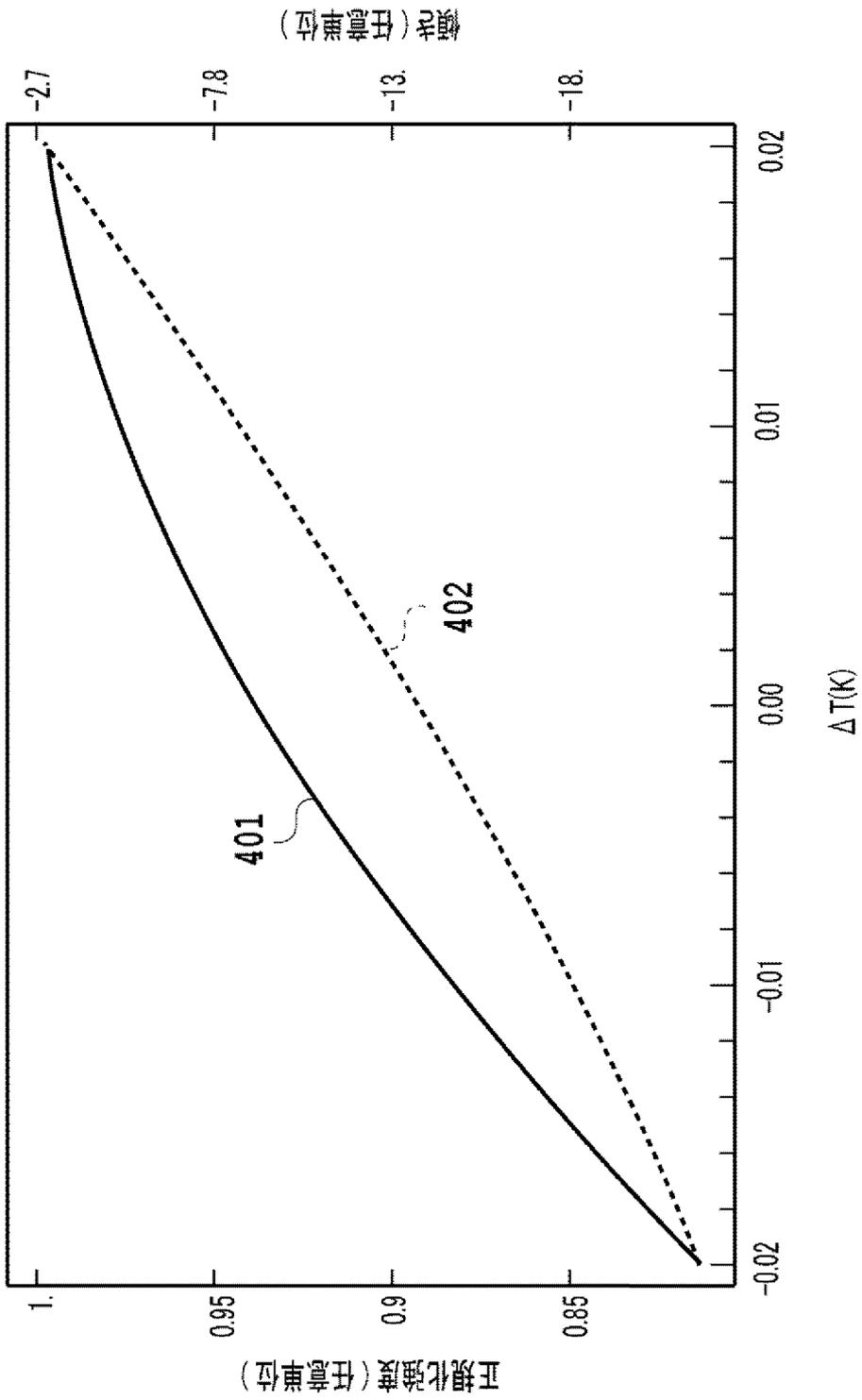


(b)

[図3]

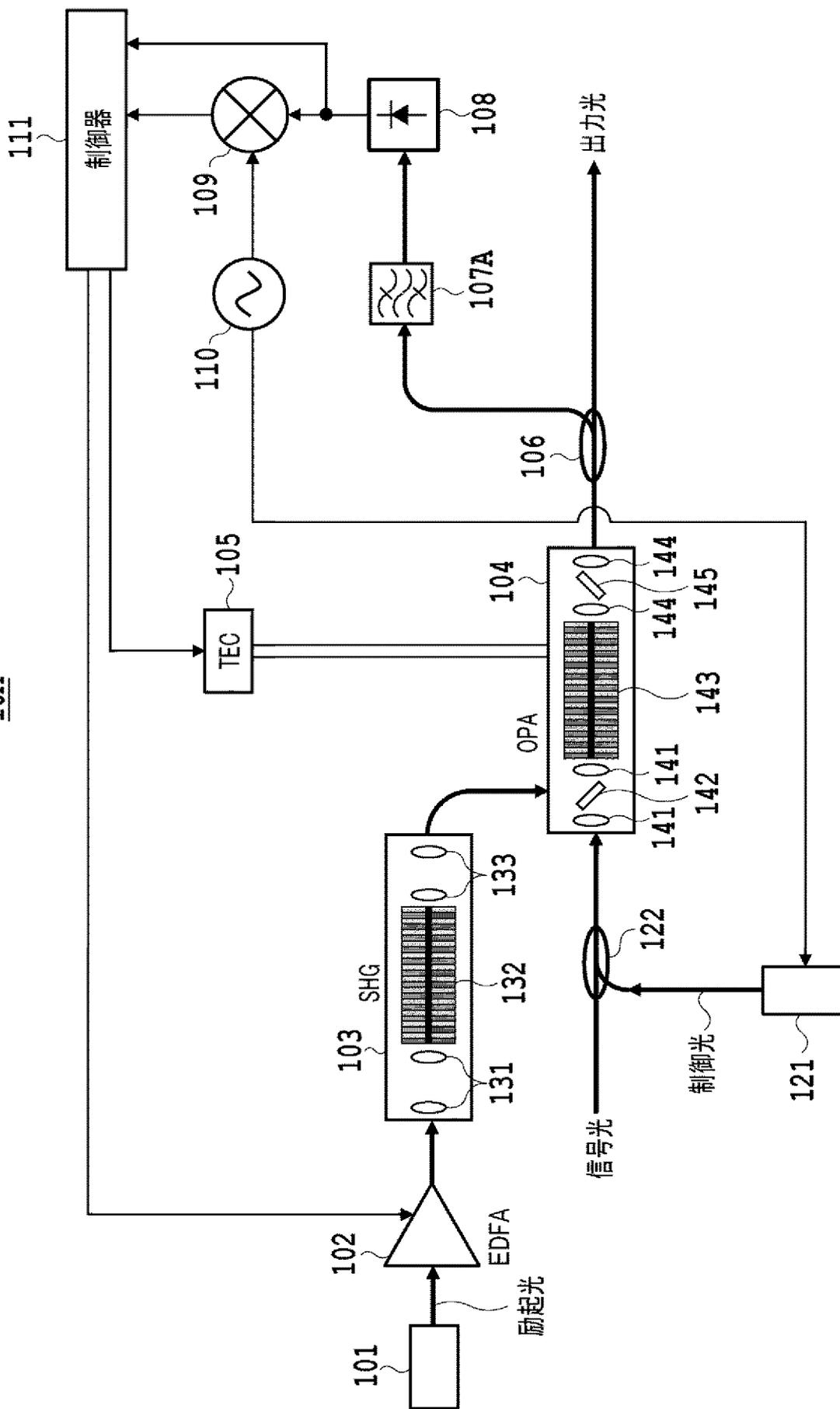


[図4]



[図5]

10A



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2023/030046

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
<p>G02F 1/37(2006.01)i FI: G02F1/37</p> <p>According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC</p>		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G02F1/00-1/125; G02F1/21-7/00		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Published examined utility model applications of Japan 1922-1996 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2023 Registered utility model specifications of Japan 1996-2023 Published registered utility model applications of Japan 1994-2023		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) IEEE Xplore		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2020-76834 A (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION) 21 May 2020 (2020-05-21) paragraphs [0022]-[0038], fig. 1-4	1-2, 7-8
A		3-6
Y	WO 2023/084621 A1 (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION) 19 May 2023 (2023-05-19) paragraphs [0045], [0049], fig. 7-8	1-2, 7-8
A		3-6
A	WO 2023/037560 A1 (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION) 16 March 2023 (2023-03-16) paragraphs [0041]-[0047], fig. 7-8	1-8
A	SHIMIZU et al. Wideband Optical Parametric Amplification of 8.375-THz WDM Signal Using Cascaded PPLN Waveguides with Reused Pump Light. Journal of Lightwave Technology, 26 July 2023, pp. 1-10, DOI: 10.1109/JLT.2023.3299017 fig. 3	1-8
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“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)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p> <p>“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</p> <p>“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</p> <p>“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</p> <p>“&” document member of the same patent family</p>		
Date of the actual completion of the international search 17 October 2023		Date of mailing of the international search report 31 October 2023
Name and mailing address of the ISA/JP Japan Patent Office (ISA/JP) 3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915 Japan		Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No. PCT/JP2023/030046

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
JP 2020-76834 A	21 May 2020	US 2021/0405502 A1 paragraphs [0027]-[0044], fig. 1-4 CN 112969960 A	
WO 2023/084621 A1	19 May 2023	(Family: none)	
WO 2023/037560 A1	16 March 2023	(Family: none)	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） G02F 1/37(2006.01)i F1: G02F1/37		
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）） G02F1/00-1/125; G02F1/21-7/00 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-2023年 日本国実用新案登録公報 1996-2023年 日本国登録実用新案公報 1994-2023年		
国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語） IEEE Xplore		
C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y A	JP 2020-76834 A（日本電信電話株式会社）21.05.2020（2020-05-21） 段落[0022]-[0038]，図1-4	1-2, 7-8 3-6
Y A	WO 2023/084621 A1（日本電信電話株式会社）19.05.2023（2023-05-19） 段落[0045]，[0049]，図7-8	1-2, 7-8 3-6
A	WO 2023/037560 A1（日本電信電話株式会社）16.03.2023（2023-03-16） 段落[0041]-[0047]，図7-8	1-8
A	SHIMIZU et al., Wideband Optical Parametric Amplification of 8.375-THz WDM Signal Using Cascaded PPLN Waveguides with Reused Pump Light, Journal of Lightwave Technology, 2023.07.26, pp. 1-10, DOI: 10.1109/JLT.2023.3299017 図3	1-8
<input type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input checked="" type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。		
* 引用文献のカテゴリー “A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの “E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの “L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） “O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 “P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献 “T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの “X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの “Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの “&” 同一パテントファミリー文献		
国際調査を完了した日	国際調査報告の発送日	
17.10.2023	31.10.2023	
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	権限のある職員（特許庁審査官） 野口 晃一 2L 5708 電話番号 03-3581-1101 内線 3295	

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2023/030046

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP 2020-76834 A	21.05.2020	US 2021/0405502 A1 段落[0027]-[0044], 図1-4 CN 112969960 A	
WO 2023/084621 A1	19.05.2023	(ファミリーなし)	
WO 2023/037560 A1	16.03.2023	(ファミリーなし)	