

(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
2020年5月22日(22.05.2020)



(10) 国際公開番号

WO 2020/100937 A1

(51) 国際特許分類:

G02F 1/377 (2006.01) *G02B 6/136* (2006.01)
G02B 6/12 (2006.01) *G02F 1/39* (2006.01)
G02B 6/124 (2006.01) *H04B 10/00* (2013.01)
G02B 6/13 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2019/044514

(22) 国際出願日: 2019年11月13日(13.11.2019)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:

特願 2018-215578 2018年11月16日(16.11.2018) JP

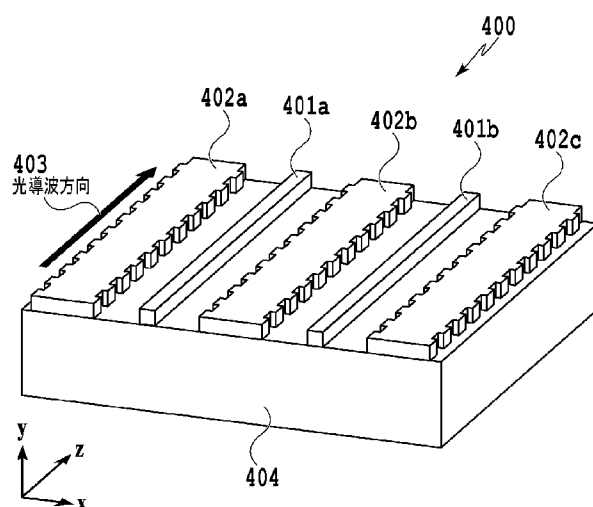
(71) 出願人: 日本電信電話株式会社 (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE

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: 風間 拓志 (KAZAMA Takushi); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 NTT知的財産センタ内 Tokyo (JP). 柏崎 貴大(KASHIWAZAKI Takahiro); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 NTT知的財産センタ内 Tokyo (JP). 忠永 修(TADANAGA Osamu); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 NTT知的財産センタ内 Tokyo (JP). 圓佛 晃次(EMBUTSU Koji); 〒1808585 東京都武蔵野市緑町3丁目9-11 NTT知的財産センタ内 Tokyo (JP). 笠原 亮一(KASAHARA Ryoichi); 〒1808585 東京都武蔵

(54) Title: WAVELENGTH CONVERSION ELEMENT AND METHOD FOR MANUFACTURING SAME

(54) 発明の名称: 波長変換素子およびその作製方法



403 Optical waveguide direction

(57) Abstract: In a wavelength conversion element using the nonlinear optical effect, an unintended slab waveguide can be incidentally formed when preparing an array waveguide including a target nonlinear waveguide. Slab waveguides induce erroneous measurements when selecting a waveguide with desirable characteristics from an array waveguide. The erroneous measurements require the process of manufacturing a wavelength conversion element to be repeated, which reduces yield and hinders the evaluation of waveguide properties when selecting a waveguide and the subsequent efficient preparation of the wavelength conversion element. The wavelength conversion element according to the present invention is provided with a plurality of waveguides prepared on a substrate with a plurality of slab waveguides provided away from and roughly parallel to each of the plurality of waveguides; each slab waveguide has a grating structure for reflecting light

野市緑町 3 丁目 9 - 1 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
1 N T T 知的財産センタ内 Tokyo (JP).

(74) 代理人: 特許業務法人 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 2 0 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, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO,
DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, KE, KG, KH,
KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,
MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ,
NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,
QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保
護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS,
MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM,
ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ,
TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ,
DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT,
LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS,
SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM,
GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

一 国際調査報告 (条約第21条(3))

of a specific wavelength. The grating structure serves to efficiently select a waveguide with desirable optical characteristics from among the plurality of waveguides.

(57) 要約: 非線形光学効果を用いた波長変換素子では、目的の非線形導波路を含むアレイ導波路を作製する段階で、付随的に意図しないスラブ導波路も形成されてしまう。スラブ導波路は、アレイ導波路から所望の特性を持つ導波路を選択する際、誤った測定を誘発していた。誤った測定は、波長変換素子の作製工程のやり直し、歩留まりの低下を生じ、導波路選択時の特性評価およびその後の波長変換素子の効率的な作製の妨げになっていた。本発明の波長変換素子は、基板上に作成された複数の導波路と、複数の導波路の各々から離間して概ね平行して複数のスラブ導波路を備えており、このスラブ導波路の各々に特定波長を反射するグレーティング構造が形成されている。このグレーティング構造によって、複数の導波路の中から所望の光学特性を持つ導波路を効率的に選択する。

明 細 書

発明の名称：波長変換素子およびその作製方法

背景技術

[0001] 本発明は、非線形光学効果を用いた光学素子に関する。より具体的には、光通信システムや光計測システムにおいて用いられる波長変換素子に関する。

[0002] 非線形光学効果を用いた光応用技術は、光通信や光を用いた量子情報通信などの分野において期待されている。基本的な非線形光学効果として、非線形光学媒質へ入射する光を別の周波数を有する光に変換する波長変換がある。具体的には、波長変換の特性を利用して、レーザー単体では発振が困難な波長帯の光を生み出す技術が広く知られている。特に、2次非線形材料であって大きな非線形定数を持つニオブ酸リチウム（ LiNbO_3 ）を用いた周期分極反転導波路（PPLN：Periodically Poled Lithium Niobate）は、非線形光学効果の効率の高さから、市販される光源内にも既に組み込まれている。

[0003] 二次非線形光学効果では、波長 λ_1 および λ_2 の光を入力して新たな波長 λ_3 を発生させる。次式を満たす波長変換を和周波発生（SFG：Sum Frequency Generation）と呼ぶ。

$$1/\lambda_3 = 1/\lambda_1 + 1/\lambda_2 \quad \text{式(1)}$$

[0004] 式(1)において $\lambda_1 = \lambda_2$ の場合はさらに変形をして、次式を満たす波長変換を第二高調波発生（SHG：Second Harmonic Generation）と呼ぶ。

$$\lambda_3 = \lambda_1/2 \quad \text{式(2)}$$

[0005] また、次式を満たす波長変換を差周波発生（DFG：Difference Frequency Generation）と呼ぶ。

$$1/\lambda_3 = 1/\lambda_1 - 1/\lambda_2 \quad \text{式(3)}$$

[0006] さらに λ_1 のみを入力し式(3)を満たす λ_2 および λ_3 を発生する光パラメトリック効果も存在する。上述のSHGおよびSFGの波長変換は、入力光に対して短波長の光すなわちエネルギーの高い光を新たに発生し、可視光域

の光の発生等に良く利用される。

[0007] 上述の二次非線形光学効果を効率良く起こすためには、相互作用する3波長の位相不整合量が0であることが求められる。周期分極反転導波路では、二次非線形光学材料の分極を周期的に反転させることにより疑似的に位相不整合量を0にすることができる。その時の反転周期を Λ とすると、式(1)で示した和周波発生では、波長 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 に対して次式を満たすように反転周期 Λ を設定すれば良い。

$$n_3/\lambda_3 - n_2/\lambda_2 - n_1/\lambda_1 - 1/\Lambda = 0 \quad \text{式(4)}$$

[0008] ここで n_1 は波長 λ_1 での屈折率、 n_2 は波長 λ_2 での屈折率、 n_3 は波長 λ_3 での屈折率である。

[0009] このような周期分極反転構造に加え、波長変換を生じさせる領域を導波路化することによって、高効率な波長変換が可能となる。非線形光学効果は、非線形相互作用を引き起こす光の重なり密度が高いほどその効果も大きくなる。小さい断面積に光を閉じ込め、かつ長い距離にわたって光を導波させることのできる導波路構造を採用することで、より高効率な波長変換が可能になる。

[0010] 非線形光学結晶であるニオブ酸リチウム(LN)を用いた導波路構造の実現には、Ti拡散やプロトン交換による手法が一般的であった。近年では、非特許文献1に記載されているように、波長変換素子としてリッジ型の光導波路が研究開発されている。リッジ型の光導波路は、結晶のバルクの特性をそのまま利用でき、高光損傷耐性、長期信頼性、デバイス設計の容易性等の特徴を持つ。このリッジ型光導波路は、二枚の基板を接合した後で一方の基板を薄膜化し、さらに薄膜部分にリッジ加工を施すことにより形成される。上述の二枚の基板を接合する際に、接着剤等を用いずに基板同士を強固に接合する直接接合技術が利用される。直接接合型リッジ型導波路は、強い光を入射することが可能で、導波路化技術の進展と共に小コア化にも成功しており(例えば非特許文献2)、その非線形光学効率は向上の一途をたどっている。

[0011] 強誘電体結晶であるLNは難加工材料であり、微細な加工が可能な半導体プロセスを用いても設計どおりのサイズや形状を得ることが難しい。また、擬似位相整合を用いたPPLN導波路内での非線形光学効果はその導波路構造に敏感である。従って現状の技術では、所望の非線形光学特性を有する非線形光学導波路を、その光学特性の設計値通りに作製することは困難である。そこで後述するように、構造パラメータを徐々に変化させた複数の導波路を基板上に並べて同時に作製し、全ての導波路の光学特性を評価した上で、所望の特性を有する導波路のみを選択して利用する手法が用いられている。

[0012] PPLN導波路における導波路形状の加工においては、ウェットエッチングよりもしばしばドライエッチング技術が用いられる。ウェットエッチングではPPLNの分極方向によってエッチングレートが大きく異なり、所望の導波路構造を得ることが難しいからである。接合基板上に複数の導波路を作製した後で、測定用の端面を形成するよう基板を切り出し、所望の特性を持つ導波路を選択する。その後、例えばファイバピッグテールデバイスとして、選択された導波路を含む波長変換素子をモジュールに実装する（非特許文献3）。選択された導波路に効率的に光を入射して変換光を出射するよう、モジュール実装の際には、レンズを介して光ファイバとのアライメントが実施される。上述のPPLN導波路を用いた波長変換素子作製の全体の一連の工程は、図2とともに後述する。

先行技術文献

非特許文献

[0013] 非特許文献1: Y. Nishida, H. Miyazawa, M. Asobe, O. Tadanaga, and H. Suzuki, "Direct-bonded QPM-LN ridge waveguide with high damage resistance at room temperature", 2003年 Electronics Letters, Vol.39, No. 7, p.609-611

非特許文献2: 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. 1206-121

3

非特許文献3 : T. Kazama, T. Umeki, M. Abe, K. Enbutsu, Y. Miyamoto, and H. Takenouchi, “Low-Parametric-Crosstalk Phase-Sensitive Amplifier for Guard-Band-Less DWDM Signal Using PPLN Waveguides” ,2017年 Journal of Lightwave Technology, Vol. 35, Issue 4, pp. 755-761

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0014] 非線形光学結晶の微細加工において一般的な化学反応ドライエッチングを行うと、難揮発材料が発生し効率的にエッチングが進まない問題が知られている。このため、有機物保護膜である例えばレジストによるエッチングマスクで、エッチング不要の部分をできる限り覆う必要がある。しかしながら導波路作製工程でエッチングマスクを利用すると、所望の導波路構造の外に意図しないスラブ導波路が形成されてしまう。

[0015] 図1は、従来技術のPPLN導波路を用いた波長変換素子の構成を示す図である。前述のように、LNを用いた光導波路デバイスを作製するには、その難加工性および低歩留まり性を考慮して、導波路構造パラメータを徐々に変化させたアレイ導波路を作製する。アレイ導波路を構成する複数の導波路の中から、最も優れた光学特性の導波路のみを選択して使用する。図1は、基板104上に作成された複数の導波路101a、101bを含む波長変換素子チップ100の概念図を示している。

[0016] 図2は、PPLN導波路を用いた波長変換素子の一連の作製工程を示したフロー図である。フロー200を概観すれば、まずステップ202において接合基板の上に複数の導波路101a、101bを作製する。図1の波長変換素子チップ100は、図2のステップ203で、基板上に作製された複数の導波路の一部を含む状態にチップを切り出した状態に対応している。図1に示した波長変換素子チップ100の状態、複数の導波路101a、101bの各々に対して、図2のフロー図のステップ204に示したように、波長変換導波路としての光学特性を測定して、所望の導波路の選択を行う。

[0017] 再び図1を参照すれば、導波路101a、101bを効率的にエッチングするためにエッチングマスクで覆った部分に、スラブ導波路102a、102b、102cが形成される。これらのスラブ導波路が存在すると、図2のステップ204におけるアレイ導波路の光学特性評価の段階で、最終的に選択されることになる所望の導波路の以外の導波路に対しても、波長変換素子チップ100の端面において光学特性測定のための光調芯が可能となってしまう。アレイ導波路のほかに意図せずに形成されたスラブ導波路は、アレイ導波路特性の評価の際に、誤測定や測定のやり直し、誤った導波路を選択することによるチップの破棄など、効率的な導波路選択およびその後のモジュール製造検査を妨げる問題があった。この問題を、実際の波長変換素子の作製工程に基づいてさらに詳細に説明する。

[0018] 図3は、アレイ導波路の中から所望の導波路を選択する工程を概念的に説明する図である。通常、図3の(a)に示したように直接接合したウェーファ300の全面に例えば100本以上の導波路から成るアレイ導波路を作製し(ステップ202)、所定の大きさの領域301-1~301-4を持つチップに切り出すことで、図1に示した波長変換素子チップ100が得られる(ステップ203)。チップ切り出しは、ステップ204の光学特性評価および導波路選択のために行われ、図3の(a)の領域301-1~301-4は最終的なチップ領域よりも大きいことに留意されたい。ステップ204では、構造パラメータを徐々に変化させた複数の導波路の中から光学特性が最も優れた1つの導波路を選択する。したがって、図3の(a)の導波路に垂直な方向(x軸)の切り出しは、最終的に波長変換素子として利用する状態の最小単位で行う。一方、ステップ203における導波路に平行な方向(z軸)の切り出しは、光学特性評価が効率的に実施できるよう、選択の基礎となる1つのグループ内のアレイ導波路の数も考慮して、最終サイズの複数のチップが含まれるように適切なサイズで行われる。

[0019] 図3の(b)は、光学特性の測定のために切り出した後の1つのチップ301を概念的に説明する図である。本来、光学特性の測定のために切り出し

たチップ301には、例えば幅の異なる n 本の導波路302-1～302- n が作製されている。チップ301に含まれる導波路の数は100を超える場合もある。チップ301の一方の端面1および他方の端面2の間で、各導波路に対して、光学特性の測定が順次実施される。すなわち試験光源303から1種類以上の試験光304が光ファイバを介して端面1に入力され、端面2から出力された試験光または波長変換光305が測定器306によって測定される。各導波路の光学測定では、導波損失の測定の他に、波長変換特性を直接確認するために単一波長光源や広帯域光源等など2つ以上の信号光を使用することもある。

[0020] 図3の(b)の切り出し後のチップ301では、実際には前述のように、選択される導波路を含む多数のアレイ導波路302-1～302- n の他に、それぞれの導波路の間に図3には示していない意図していないスラブ導波路が形成されている。選択の対象となるアレイ導波路の各々の導波路は、例えば数 μm 角程度の非常に小さい断面の導波路である一方で、スラブ導波路の幅は遥かに大きく数10 μm 以上にも達する。したがって、光学特性の測定のために光ファイバを各端面に近づければ、本来は光学特性評価対象ではない多数のスラブ導波路にも簡単に光結合できてしまう。通常、光学特性評価のために光ファイバを介してチップ端面と光結合させるとき、アレイ導波路の配列方向(x 軸)に順次、光結合の位置をずらしながら光学測定を行う。しかしながら、 x 軸方向に測定点を移動させても、相当の割合でスラブ導波路領域により占められるので、広い範囲で本来の導波路と同じ程度の光結合がスラブ導波路領域でも可能である。非常に精度の良い調整用の3次元駆動機構などを利用して、誤った位置で光学測定を行ってしまう可能性がある。その結果、スラブ導波路からの誤った測定値のために、最良の光学特性を持つ導波路の選択に誤りが生じる場合が起こり得る。

[0021] 一旦、誤った測定が行われれば、図2のステップ204において本来選択すべきでない波長変換特性が不十分な導波路を選択してしまう可能性がある。さらに引き続くステップ205においてアレイ導波路のセットを含む最終

チップサイズへ切り出す際に、不適切な導波路を含むチップを形成したり、最適な導波路を含むチップを選別せずに破棄したりする場合も生じ得る。さらに図3に示した各導波路の1本あたりの測定には、通常2分程度の時間が掛るため、例えば100本の導波路の測定には、3時間を越える時間を要する。所望の導波路を選択する段階において誤った光学測定を含んでいた場合、これを是正するための工程に多大な時間と無駄なやり直しコストが生じてしまう。このようなことから、図2の一連の工程を実施してモジュール化された波長変換素子を完成させる工程全体における製造歩留まりも低下していた。したがって、図2のフロー図のステップ204において光学特性評価を本来のアレイ導波路に対して誤りなく実施することは、図2の波長変換素子の一連の作製工程を効率的に実施するための鍵の1つとなる。図1に示した本来必要とするアレイ導波路の間に形成された複数のスラブ導波路は、導波路特性評価およびその後の波長変換素子の効率的な作製の妨げになっていた。

[0022] 本発明はこのような問題に鑑みなされたものであって、非線形光学素子を用いた波長変換デバイスをより効率的に作製する構成を提供する。

課題を解決するための手段

[0023] 本発明は、このような目的を達成するために、請求項1に記載の発明は、非線形材料の基板の上に形成された複数の導波路と、前記複数の導波路の各々に離間して、概ね平行して配置された複数のスラブ導波路であって、各々が導波路長さ方向に周期的な屈折率変化を与えられたグレーティング構造を有する、複数のスラブ導波路とを備えたことを特徴とする波長変換素子である。

[0024] 請求項2に記載の発明は、請求項1の波長変換素子であって、前記複数のスラブ導波路の前記グレーティング構造はそれぞれ異なる周期を持ち、前記異なる周期に対応した特定の波長の光を反射することを特徴とする。

[0025] 請求項3に記載の発明は、請求項1または2の波長変換素子であって、前記複数のスラブ導波路の各々は、導波路長さ方向に幅または厚みを周期的に

変調されたことを特徴とする。

[0026] 請求項 4 に記載の発明は、請求項 1 または 2 の波長変換素子であって、前記複数のスラブ導波路の各々は、導波路上に、屈折率が 1 より大きい材料が導波路長さ方向に周期的に配置されたことを特徴とする。

[0027] 請求項 5 に記載の発明は、請求項請求項 1 乃至 4 いずれかの波長変換素子であって、前記複数の導波路および前記複数のスラブ導波路はそれぞれ直線導波路であって、前記複数の導波路は、各々のコアのサイズを決定する構成パラメータを徐々に変化させていることを特徴とする。

[0028] 請求項 6 に記載の発明は、請求項請求項 1 乃至 4 いずれかの波長変換素子であって、前記複数の導波路は、 LiNbO_3 または LiNbO_3 に、 Mg 、 Zn 、 Sc 、 In の内の少なくとも一種を添加物として含有する材料から成ることを特徴とする。

[0029] 請求項 7 に記載の発明は、非線形材料の基板の上に形成された複数の導波路と、前記複数の導波路の各々に離間して概ね平行して配置された複数のスラブ導波路とを備えた波長変換素子の作製方法において、前記複数のスラブ導波路の各々に、導波路長さ方向に周期的な屈折率変化を与えられたグレーティング構造を作製するステップと、前記グレーティング構造の周期に対応した波長の反射波を検出しながら、前記複数の導波路の光学特性を順次測定して、所望の光学特性を有する導波路を選択するステップと、前記選択された導波路に隣接し、少なくとも一方の側にある前記スラブ導波路からの前記反射波に基づいて、前記選択された導波路と光ファイバとの光結合を行うステップとを備えることを特徴とする方法である。

[0030] 請求項 8 に記載の発明は、請求項 7 の方法であって、前記光結合を行うステップは、前記複数のスラブ導波路の前記グレーティング構造がそれぞれ異なる周期を持ち、前記異なる周期に対応した特定の波長の反射波に基づいて、前記選択された導波路に隣接する少なくとも 1 つの前記スラブ導波路と前記光ファイバとの粗い光結合を行う第 1 の光結合ステップと、前記光ファイバと、前記選択された導波路との精密な光結合を行う第 2 の光結合ステップ

とを含むことを特徴とする。

発明の効果

[0031] 本発明により、非線形光学素子を用いた波長変換デバイスをより効率的に作製できる。

図面の簡単な説明

[0032] [図1]従来技術のPPLNによる波長変換素子の構成を示す図である。

[図2]PPLN導波路を用いた波長変換素子の作製フロー図である。

[図3]アレイ導波路の中から導波路を選択する工程を説明する図である。

[図4]本発明の第1の実施形態の波長変換素子の構成を説明する概念図である。

[図5]本発明の波長変換素子の構成例を示した上面図である。

[図6]本発明の第2の実施形態の波長変換素子の構成を説明する概念図である。

[図7]本発明の波長変換素子モジュールの組立・調整工程のフロー図である。

発明を実施するための形態

[0033] 本発明の波長変換素子は、基板上に作成された複数の導波路と、複数の導波路の各々から離間して概ね平行して複数のスラブ導波路を備えており、このスラブ導波路の各々には周期的に同じ形状を繰り返す構造、すなわちグレーティング構造が形成されている。導波路においては、構造によって光が感じる実効的な屈折率が変わる。このため、導波路形状を周期的に変えることで屈折率を周期的に変調することができる。このようなグレーティング構造では、グレーティングの周期および導波路の屈折率で決まる特定の波長で、入射光に対して、導波路を透過しない反射光（戻り光）を生じる。

[0034] 複数のスラブ導波路の各々に対して異なる波長で反射光を生じるようにグレーティングを構成することにより、複数の導波路の中から所望の光学特性を持つ導波路を効率的に選択する。波長変換素子の作製工程の中で、スラブ導波路毎に、グレーティング構造の周期を変化させることができる。異なる波長で反射光を生じるスラブ導波路は、モジュール内において、基板から切

り出されたチップ内の選択された導波路を外部のファイバ等と光結合する際にも利用される。グレーティングによる反射光の存在の有無やその波長を確認することで、選択した導波路および光ファイバの間の光結合のアラインメントをより容易に効率的に実施し、波長変換素子を効率的に低コストで実現できる。

[0035] [第1の実施形態]

図4は、本発明の第1の実施形態の波長変換素子の構成を説明する概念図である。図1に示した従来技術の波長変換素子チップ100に対応する本発明の波長変換素子の構成を示している。図4の波長変換素子400は、多数の導波路（アレイ導波路）が形成された基板（ウェーファ）状態から、複数の導波路を含むチップ状態に切り出された状態を示している。波長変換素子400は、複数の導波路401a、401bと、複数の導波路の各々に離間して概ね平行に構成されたスラブ導波路402a～402cとを備える。いずれの導波路もz軸方向に沿って形成され、導波路（z軸）に垂直な、図面手前および奥の2つのチップ端面（x-y面）において、光の入出力が可能となっている。一方の端面へ入力された光は、各導波路を光導波方向（z軸）に他方の端面に向かって導波する。

[0036] 本発明の波長変換素子では、1つのチップ内に、構成パラメータを少しずつ変化させた複数の導波路を含み、これらの複数の導波路の中から、最も適切な1つの導波路を選択できる。導波路間で変化させる構成パラメータとしては、導波路の形状を決定するパラメータを含み、例えば導波路幅を僅かずつ変更することができる。他に分極反転周期（QPMピッチ）を変更することもできる。最も適切な導波路の選択の一例を挙げれば、波長変換素子の応用目的にもよるが、複数の導波路の各々に対して伝搬損失を測定し、この損失最小のものを選択することで実施できる。またチップの一方の端面から異なる波長の2つに光信号を入力し、他方の端面からの波長変換光のレベルを測定して、波長変換効率最大の導波路を選択することもできる。最も適切な導波路を選択する条件は、上述の測定その他、どのような選択条件を用いても

良い。すなわち、アレイ導波路を作製して、その中から目的の機能を達成するために何等かの条件に基づいて1つまたは複数の導波路を選択する際に、本発明の構成および考え方を利用できる。したがって、本発明は導波路の選択方法としての側面も持っていることに留意されたい。

[0037] 図4の本発明の波長変換素子のスラブ導波路402a～402cは、ドライエッチングによる微細加工を利用して、上述の構成パラメータを少しずつ変化させた複数の導波路を作製する際に、エッチングマスクで覆われた部分に同時に形成される。本発明の波長変換素子では、スラブ導波路402a～402cの各々に、異なる導波路幅を周期的に繰り返すグレーティング構造が形成されている。チップの一方の端面からスラブ導波路402a～402cへ入力された試験光は、このグレーティングの周期およびスラブ導波路の屈折率で決まる特定の波長のみで強く反射される。したがって、試験光を入力する端面側に特定の波長の反射光（戻り光）が出力され、他方の端面からは反射光の波長以外の波長の試験光が出力される。

[0038] 本発明の波長変換素子において、複数の導波路401a、401bおよび隣接するスラブ導波路402a～402cは、波長変換素子として機能する非線形導波路にスラブ導波路が影響を与えない程度の間隔を置いて配置される。例えば、複数の導波路401a、401bがLNコアであって、コアの両脇が空気であるリッジ構造の導波路であれば、両導波路が導波光の波長程度以上離れていれば良い。複数の導波路の（x軸方向）繰り返し間隔（周期）は、光通信の波長変換素子の場合には、例えば数10μmから数100μmとすることができるが、応用分野によっては異なり得る。

[0039] 図2および図3で説明したように、波長変換素子の一連の作製工程の中で、上述の複数の導波路401a、401bおよびスラブ導波路402a～402cが作製され（ステップ202）、図3の（b）で示したように、多数の導波路が並列配置して構成されたチップ301の状態に切り出される（ステップ203）。この工程は未だ導波路の選択が行われていない段階であって、いわば作製途中状態のチップ状態であり、このチップ内には数十から1

00を越える多数の導波路が含まれていることに留意されたい。この後で光学特性の評価を行って、多数の導波路（導波路アレイ）の中から1本の適切な導波路（所望の導波路）を選択する工程（ステップ204）が、図4の波長変換素子400に実施される。すなわち図4に示した波長変換素子の2つの端面それぞれにおいて、光ファイバとの結合位置をx軸方向に順次ずらしながら、すべての導波路に対して光学特性を取得する。

[0040] 従来技術の構成では、本来選択対象では無いスラブ導波路に対しても制限なく光結合が可能であった。このため図2のステップ204において誤った測定を実施してしまうことで、波長変換素子の作製工程の一部のやり直しによる工程の効率低下、歩留まり低下、コスト増等の問題を生じ、一連の波長変換素子の作製の妨げとなっていた。

[0041] これに対し図4の本発明の波長変換素子の構成によれば、一方の端面からスラブ導波路のいずれかに誤って試験光が入力されても、予め分かっている波長の反射光の存在を常時モニタすることで、グレーティング構造で反射してきた光を判別可能である。誤ってスラブ導波路に対して光学特性が測定されても、試験光の入力側で検出される反射光量の大きさから直ちに測定値の異常を検出できる。出力側の透過光において、反射光の波長成分が減衰していることによっても、スラブ導波路に対する誤った測定を検出できる。

[0042] 測定対象でないスラブ導波路に関連した誤った測定が検出された段階で、光学特性評価、導波路選択工程（ステップ204）におけるエラー是正のための様々な修正工程が可能となる。例えば、直ちに光学特性の測定装置の3次元駆動機構に対して光結合をやり直しさせたり、アラームを表示したりするなどの修正工程が可能となる。通常、ステップ204の光学特性の評価は自動化された測定系によって実施されるため、誤った測定が検出されたときの修正工程としては様々なものを適用できる。このようにスラブ導波路402a～402cにグレーティング構造を備えることによって、誤測定時の反射光が利用可能となり、調整ミス（アラインメントミス）なしに、所望の導波路を選択するための光学特性測定を効率的に実施できる。

[0043] 図4の波長変換素子におけるスラブ導波路のグレーティング構造は、スラブ導波路の幅を異なる2種類の幅で周期的に繰り返す構成となっている。グレーティング構造は、入力光の内の特定の波長のみを反射させ、出力光ではこの特定の波長を減衰させることで、光フィルタとして機能する。グレーティング構造は、図4に示したような異なる導波路幅を光導波方向（ z 軸方向）に繰り返す構成以外にも、様々な形態によって実現可能である。例えば光導波方向（ z 軸方向）について、スラブ導波路の厚み方向の屈折率を周期的に変調することでも実現可能である。厚み方向の屈折率変調は、単純に導波路厚みに周期構造を持たせても良いし、スラブ導波路とは別の材料をスラブ導波路上に周期的に構築しても良い。すなわち複数のスラブ導波路の各々は、導波路上に、屈折率が1より大きい材料が導波路長さ方向に周期的に配置されたものとして構成できる。コアの両脇が空気であるリッジ構造の導波路であれば、波長変換に用いる非線形導波路およびスラブ導波路を形成するエッチングによって、スラブ導波路幅に周期構造を持たせる構成を簡単に作製できる。図4では、最も簡単なスラブ導波路の幅方向を周期的に変えたグレーティング構造を例に説明をしている。上述のような構造的な周期構造によるグレーティングでは、材料の物理定数として屈折率に変化を与えているわけではないが、導波路長さ方向に周期的に実効的な屈折率変化が与えられることになる。

[0044] したがって本発明の波長変換素子は、非線形材料の基板の上に形成された複数の導波路401a、401bと、前記複数の導波路の各々に離間して概ね平行して配置され、周期構造を備えた複数のスラブ導波路402a～402cとして実施できる。周期構造は、複数のスラブ導波路の各々に導波路長さ方向に周期的な屈折率変化を与えられたグレーティング構造を含む。

[0045] 図5は、本発明の波長変換素子の構成例を示した上面図である。従来技術を示した図1および本発明を示した図4では、波長変換素子の構成要素の基本構造の説明のため、波長変換に用いる非線形導波路（アレイ導波路）を2本しか示していない。また、各部の相対的なサイズは実際のデバイスと非常

に異なっている。図5の上面図は、波長変換素子となる非線形導波路が依然として太く描かれているが、実際のデバイスの形状のイメージにより近いものである。図5では、波長変換に用いる n 本の非線形導波路（アレイ導波路） $501-1 \sim 501-n$ が含まれており、各導波路の両側に各導波路から離間して概ね平行に $(n+1)$ 本のスラブ導波路 $502-1 \sim 502-n+1$ が構成されている。

[0046] スラブ導波路の各々は、周期的に変調された導波路幅を備えており、特定の波長の光を反射させることが可能となっている。すなわち、スラブ導波路の各々が導波路長さ方向（ Z 軸）に周期的な屈折率変化を与えられたグレーティング構造を持っている。このグレーティング構造によって反射波が生じる特定の波長は、予め知ることができる。非線形導波路の光学特性を評価する時に、特定波長の反射波の有無をモニタすることによって、測定対象でないスラブ導波路に関連した誤った測定を検出し、光学特性評価、導波路選択工程におけるエラー是正の様々なアクション（修正工程）を取ることが可能となる。

[0047] [第2の実施形態]

波長変換素子の作製工程では、波長変換効率を高めるための小コア化したアレイ導波路を作製している。この段階におけるドライエッチングの問題を解決する結果として、本来不要なスラブ導波路が形成されていた。第1の実施形態の波長変換素子では、複数の導波路の中から所望の特性を持つ導波路を選択する工程を効率良く実施するため、スラブ導波路の領域内にグレーティング構造を備えていた。本実施形態では、所望の導波路が選択された後で、波長変換素子をモジュール内に設置し調整・検査をする工程（図2のステップ206～208）をさらに効率的に実施する波長変換素子の構成を提示する。また、波長変換素子の作製方法も提示する。

[0048] 図2に示したように波長変換素子を実際に利用するためには、選択された導波路を複数含む作製途中の中間サイズチップを、選択された導波路を1本だけ含み後工程の組み立て作業に適したより小さい最終サイズチップに切り

出し、モジュール化する必要がある。光モジュールは、波長変換素子を含むチップの他、光ファイバなどによる外部との光接続機能および必要に応じた他の関連する機能を含む光機能デバイスとして構成される。例えば光モジュールは、外部接続のためにピグテールファイバを接続した形態をとることができる。さらにモジュール内では、最終サイズに切り出した波長変換素子チップの一方の端面および入力光ファイバの間、他方の端面および出力光ファイバの間で、いずれも光学接続が必須である。従って、図2に示したモジュール組み立て工程（ステップ206）および光ファイバと選択導波路とのアライメント調整工程（ステップ207）を効率的に実施する必要がある。

[0049] アレイ導波路の光学特性を評価した後、選択された導波路を含むチップは、モジュール内に実装される。最終サイズに切り出したチップをモジュール内に実装する際には、モジュール内でレンズを用いて光ファイバとチップ端面とを光結合する必要がある。PPLNを用いた非線形導波路では、端面に現れるコアの断面サイズは例えば $5 \times 5 \mu\text{m}$ 程度である。レンズを介した光ファイバとコアとの光結合は、導波路選択のために行う光学特性の評価時の光結合の場合と比べて、光学的アライメントが難しい。本実施形態の波長変換素子では、光学特性評価の妨げとなっていたスラブ導波路を、逆に光学的アライメントに積極的に利用できる構成を提案する。

[0050] 図6は、本発明の第2の実施形態の波長変換素子の構成を説明する概念図である。図6の波長変換素子600のチップは、チップの基板面を垂直に見た上面図であって、図5と同様に、複数の導波路が形成された基板（ウェーファ）状態からチップ状態に切り出された状態を示している。波長変換に用いる複数の導波路601-1～601-nと、導波路から離間して概ね平行に形成されたグレーティング構造を備えるスラブ導波路602-1～602-n+1とから構成されている。さらに、各スラブ導波路のグレーティング構造はその周期（繰り返し距離）がそれぞれ $\Lambda_1 \sim \Lambda_{n+1}$ に設定されており、それぞれのスラブ導波路が周期に対応した異なる反射波長を持っている

。したがって、複数のスラブ導波路のグレーティング構造はそれぞれ異なる周期を持ち、前記異なる周期に対応した特定の波長の光を反射するよう構成されている。図6では、 n 本の複数の導波路の中から、図面上で一番下に位置している1本の導波路601- n が所望の導波路として選択された状態を示している。複数の導波路601-1～601- n は、波長変換動作が可能な非線形導波路である。

[0051] 多数の導波路の光学特性を順次測定して、所望の導波路を選択する工程では（図2ステップ204）、選択される導波路と同等にスラブ導波路においても試験光を導波してしまうことが問題であった。この問題は、既に第1の実施形態で述べたスラブ導波路のグレーティング構造を採用することによって解消される。上述のように、所望の導波路が既に1本に選択された後の段階で、選択された導波路に対してより厳密で難しい光結合を行う必要がある。一方、非常に小さいコア断面の非線形導波路よりも大きな断面を持つスラブ導波路のほうが、光結合をより簡単に実施できる。発明者らは、大きな断面を持つスラブ導波路によって大まかなアラインメントを実施することが、モジュール組み立ておよびアラインメント調整工程ではむしろ調整精度、効率の点で有用ではないかとの着想に至った。モジュール組立・調整の工程では、導波路が選択された中間サイズのチップはさらに小さな単位（最終チップサイズ）に切り出されてモジュールに組み込まれる。このため、選択された非線形導波路がどのチップの何番目の導波路であるのかを迅速かつ正確に識別することも重要である。選択された非線形導波路の両隣またはどちらか一方のスラブ導波路の反射波長を予め知っていれば、観測される反射波長に基づいて目的とする選択した非線形導波路の位置をより正確に特定することができる。すなわち、モジュール組立・調整の工程において、選択した非線形導波路に隣接するスラブ導波路を積極的に利用することで、光ファイバとの光結合のアラインメントを効率的かつ正確に行うことができるようになる。

[0052] 図7は、波長変換素子モジュールにおける組立・調整工程を説明するフロー図である。図7のフロー700は、図2に示した波長変換素子の一連の作

製工程の全体フロー200におけるステップ206～208に相当する。図2のステップ205で最終サイズに切り出されたチップを、図7のステップ702でモジュール内に実装し、ステップ703、704で、レンズを介してチップ端面の導波路コアおよび光ファイバ間を光結合（アラインメント）する。

[0053] ステップ703で、非線形導波路よりもはるかにコアサイズの大きいスラブ導波路602-1～602-n+1を利用して、最初に大まかな光学的なアラインメントを実施する。再び図6の上面図を参照すると、非線形導波路601-1～601-nと比べ、スラブ導波路602-1～602-n+1は、導波路の配列方向（x軸方向）にはるかに広い幅を持っている。具体的には、前述のように非線形導波路のコア幅が5 μm 程度なのに対して、スラブ導波路は10～100 μm の幅を持っている。従ってスラブ導波路に対しては、少なくとも基板の厚さ方向（y軸方向）に対して、非常に精度良くアラインメントを実施できる。ステップ703におけるスラブ導波路を用いた粗調整は、入力側の試験光に対して、出力側の透過光のレベルを測定しながら実施できる。すなわち、透過光のレベルが最大となるように、入力側および出力側の光結合をそれぞれ調整すれば良い。試験光が入力される入力側については戻り光である反射波のレベルを用いても実施できる。すなわち、図3に示した試験系において試験光源側に反射波のレベルを測定することで、入力側のアラインメントが実施できる。出力側の測定器によって透過した試験光のレベルを用いて実施しても良い。

[0054] ステップ704で、アラインメントされたスラブ導波路の反射光波長を確認し、選択された非線形導波路に隣接したスラブ導波路に設定された波長であるかどうかの確認を実施する。グレーティング構造からスラブ導波路の反射波長が予め知られていれば、実測された反射波長を確認することで、選択された非線形導波路に隣接するスラブ導波路であるかどうかを確認することができる。反射波長の確認は、入力側で反射波の波長を直接観測しても良い。反射波長の確認には、例えば入力側に光サーキュレータを設け、反射光成分

のみを受光できるようにすれば良い。受光部に光スペクトラムアナライザや波長計を設置することで、反射光の波長と強度を測定することができる。また出力側の測定器において、反射波長のレベルが低下していることを観測しても良い。従って、異なる反射波長に設定された複数のスラブ導波路を備える場合には、試験光源として、すべての反射波長を含む広帯域光源を使用する必要がある。ここで、実測された反射波長が予期した波長と異なっている場合は、反射波長の確認をしながら、選択された非線形導波路に隣接するスラブ導波路に到達するまで再度移動とアライメントを行う。スラブ導波路の反射波長の間隔が予め分かっているならば、上述の移動も効率的に実施できる。

[0055] 図7のフロー図では、ステップ703およびステップ704を別個のものとして分けて説明しているが、反射波のレベルおよびその波長を同時に観測できる。したがって、これら2つのステップを実質的に同時に実施することができる。また、図5に示した第1の実施形態のように、すべてのスラブ導波路で反射波長が同一であれば、試験光の反射波のレベルまたは透過光のレベルだけでスラブ導波路との粗調整が実施され、ステップ704は不要となる。

[0056] 実測された反射波長が予期した波長と一致した後、ステップ705で、粗調整を行ったスラブ導波路から選択された導波路のコアに向かってx軸に沿って調整位置を移動させる。移動させながら、横方向（x軸方向）およびレンズ焦点方向（z軸方向）に、選択された導波路に対してさらにより微細なアライメントを実施できる。上述のステップ703～705における2段階のアライメントは調整方法の一例であってこれだけに限られず、様々な手順、調整アルゴリズムが可能で、ステップ704のスラブ導波路との粗調整の段階で焦点調整（z軸方向）を行うこともできるし、ステップ705の非線形導波路との微調整の段階で、3方向の調整を繰り返し行っても良い。

[0057] したがって本発明の波長変換素子は、非線形材料の基板の上に形成された複数の導波路501a、501bと、前記複数の導波路の各々に離間して、概ね平行して配置された複数のそれぞれ異なるグレーティング周期を持つス

ラブ導波路502a～502cとして実施できる。複数のスラブ導波路のグレーティング構造はそれぞれ異なる周期を持ち、前記異なる周期に対応した特定の波長の光を反射する。

[0058] 上述のように、スラブ導波路においてそれぞれ異なる周期のグレーティング構造を持たせることで全導波路の光学特性の評価を誤りなく実施して所望の導波路を選択できる。さらに、選択された導波路に隣接する少なくとも1本のスラブ導波路の反射波長を知っていることで、選択された導波路を含むチップをモジュールに実装する際、スラブ導波路を用いてより簡単、正確に光ファイバへの光調芯（アラインメント）ができる。スラブ導波路を用いて、波長変換素子の効率的なモジュール実装が可能となる。ステップ703～705の後は、ステップ706でモジュールの組立を完了する。ステップ707で必要な光学特性の検査を例えばピグテールファイバ経由で行い、波長変換素子モジュールの組立・調整工程フロー700は終了する。

[0059] 図2および図7に示したように、本発明は波長変換素子の作製方法の側面も持っている。すなわち、非線形材料の基板の上に形成された複数の導波路と、前記複数の導波路の各々に離間して概ね平行して配置された複数のスラブ導波路とを備えた波長変換素子の作製方法において、前記複数のスラブ導波路の各々に、波路長さ方向に周期的な屈折率変化を与えられたグレーティング構造を作製するステップと、前記グレーティング構造の周期に対応した波長の反射波を検出しながら、前記複数の導波路の光学特性を順次測定して、所望の光学特性を有する導波路を選択するステップ（第1の実施形態）と、前記選択された導波路に隣接し、少なくとも一方の側にある前記スラブ導波路からの前記反射波に基づいて、前記選択された導波路と光ファイバとの光結合を行うステップ（ステップ703～705）とを備えるものとして実施できる。前記光結合を行うステップは、前記複数のスラブ導波路の前記グレーティング構造がそれぞれ異なる周期を持ち（第2の実施形態）、前記異なる周期に対応した特定の波長の反射波に基づいて、前記選択された導波路に隣接する少なくとも1つの前記スラブ導波路と前記光ファイバとの粗い光

結合を行う第1のステップ（ステップ703、704）と、前記光ファイバと、前記選択された導波路との精密な光結合を行う第2のステップ（ステップ705）とを含む。

[0060] 以下、本発明の上述の2つの実施形態の波長変換素子のより具体的な実施例について説明する。

実施例 1

[0061] 図5を再び参照すれば、第1の実施形態の波長変換素子500の実施例では、波長変換を行う非線形導波路501-1～501-nは、周期的にその自発分極の向きが反転されたニオブ酸リチウムを主成分とする強誘電体からなる。クラッド部分となる下基板には熱膨張係数の近いタンタル酸リチウムが用いられている。導波路501-1～501-nを構成する物質は非線形光学材料である。クラッドとなる基板またはオーバークラッドを構成する物質は、ケイ素、二酸化ケイ素、ニオブ酸リチウム、インジウムリン、ポリマー等の誘電体や半導体、またはそれらに添加物を加えた化合物など、波長変換に使用する2つの波長帯の光に対して透明であれば良い。2つの波長帯は、一例として光通信の例を挙げれば、1550nmおよび775nmを中心とする帯域とすることができる。

[0062] 図5の波長変換素子500では、位相感応増幅器や位相共役変換器などの光通信応用を想定して、導波路のコアサイズと分極反転の空間的ピッチから、位相整合波長が1.55 μ mとなるように設計した。導波路は、直線導波路とした。

[0063] タンタル酸リチウムからなる基板は、厚さ500 μ mである。導波路としてのニオブ酸リチウムは、タンタル酸リチウム基板に接合された後、研削および研磨により5 μ mまで薄膜化された。その後、非線形導波路およびスラブ導波路を、ドライエッチングによりパターンニングした。各スラブ導波路は周期的に幅が変調されたグレーティング構造が形成されるよう、導波路加工で使用するフォトリソマスク上にパターンを描画した。従来技術の波長変換素子の作製フローから工程を増やすことなく、実施例1の波長変換素子の構成を

実現することが可能である。

[0064] グレーティングによる反射波長については、次の式（５）で与えられる。

$$2 n \Lambda = m \lambda \quad \text{式（５）}$$

[0065] ここで、 n は実効屈折率、 Λ はグレーティング周期、 λ は反射波長、 m は次数(整数)である。通常、グレーティングは１次（ $m=1$ ）の反射光を用いるのが最も簡単である。本実施例においては、各スラブ導波路は第１の幅 $30\mu\text{m}$ と第２の幅 $33\mu\text{m}$ を周期的に繰り返す構造とし、波長 $1.55\mu\text{m}$ の光を反射させることを想定した。このとき、スラブ導波路の実効屈折率は約 2.13 であり、式（５）からグレーティング周期は $0.36\mu\text{m}$ とした。本実施例では１次のグレーティングを利用しているため、比較的細かい $0.36\mu\text{m}$ のグレーティング周期が要求されているが、作製が難しい場合は高次のグレーティングを用いても良い。たとえば次数 $m=10$ とした場合、同じ $1.55\mu\text{m}$ の光を反射させるときのグレーティング長は $3.64\mu\text{m}$ となる。

[0066] 一方、グレーティングの反射波長における反射率 R は、次の式（６）で与えられる。

$$R = \tanh^2 (\pi L \Delta n \eta / \lambda) \quad \text{式（６）}$$

[0067] ここで、 Δn はグレーティング構造の屈折率変調幅、 L はグレーティング長、 η はコアに含まれる伝搬光の割合を示している。 η はここでは簡単のため１として考える。本実施例においては Δn は約 0.00003 である。切り出すチップ長によって反射率は異なるが、式（６）からチップ長 2mm で反射率約 70% 、チップ長 3mm で反射率が 90% 以上となる。PPLN導波路を用いた波長変換素子では、通常素子の長さは $30\sim 50\text{mm}$ 程度であり、上述の本実施例のグレーティング構造によって、十分なレベルの反射光を観測可能である。

[0068] 上述の本実施例の構造のスラブ導波路を作製して試験光を入力したところ、 $1.55\mu\text{m}$ の反射光が観測された。所望の非線形導波路を選択するための光学特性の評価時も、選択の対象となる非線形導波路およびスラブ導波路

を、反射光の存在の有無によって明確に区別することができる。したがって、複数の導波路に対して光学特性の評価を順次行う場合（図2のステップ204）、一方のコア端面および試験光源からのファイバの間、他方のコア端面および測定装置へのファイバの間のいずれの場合も、アラインメント誤りは生じない。効率的かつ確実に測定すべき非線形導波路を認識し、光学特性の測定を実施して、所望の導波路を選択できる。

[0069] 上述の反射波長は、グレーティングの周期やスラブ導波路サイズを変更することで制御可能である。したがって、非線形導波路の動作波長や、測定系の光源や受光系の波長域に応じて調整が可能である。

実施例 2

[0070] 図6を再び参照すれば、第2の実施形態の波長変換素子600の具体的な実施例について、図5に示した実施例1の構成との相違点を中心に述べる。実施例2では、スラブ導波路602-1～602-n+1のグレーティング周期が、それぞれ $\Lambda_1 \sim \Lambda_{n+1}$ に設定されている。複数のスラブ導波路に対して、それぞれ異なる反射波長が設定されており、反射波長を予め知っていれば、スラブ導波路の位置を特定し、さらに隣接する選択された非線形導波路の位置を特定できる。反射波長 $\Lambda_1 \sim \Lambda_{n+1}$ は、概ね等間隔となるように設定されている。本実施例の波長変換素子600においては、各スラブ導波路は第1の幅 $30\mu\text{m}$ および第2の幅 $33\mu\text{m}$ を周期的に繰り返すグレーティング構造を持つ。グレーティングの繰り返し周期を、 $\Lambda_1 = 0.3591\mu\text{m}$ 、 $\Lambda_2 = 0.3603\mu\text{m}$ として、隣接するスラブ導波路間で約 1.2nm ずつ変化させている。このときの反射波長はスラブ導波路602-1で 1530nm 、スラブ導波路602-2で 1535nm となり、隣接するスラブ導波路間で反射波長を約 5nm ずつ変化させている。

[0071] 波長変換を行う非線形導波路601-1～601-nを構成する物質は非線形光学材料であって、周期的にその自発分極の向きが反転されたニオブ酸リチウムを主成分とする強誘電体からなる。クラッド部分となる下基板には熱膨張係数の近いタンタル酸リチウムが用いた。クラッドとなる基板または

オーバークラッドを構成する物質は、ケイ素、二酸化ケイ素、ニオブ酸リチウム、インジウムリン、ポリマー等の誘電体や半導体、またはそれらに添加物を加えた化合物などとすることができる。波長変換に使用する2つの波長帯の光に対して、それぞれ透明であれば良い。

[0072] 図6の波長変換素子600でも、位相感応増幅器や位相共役変換器などの光通信応用を想定し、導波路のコアサイズと分極反転の空間的ピッチから、位相整合波長が $1.55\mu\text{m}$ となるように設計した。非線形導波路601-1~601-nは、直線導波路とした。

[0073] タンタル酸リチウムからなる基板は、厚さ $500\mu\text{m}$ である。導波路としてのニオブ酸リチウムは、タンタル酸リチウム基板に接合された後、研削および研磨により $5\mu\text{m}$ まで薄膜化された。その後、非線形導波路およびスラブ導波路を、ドライエッチングによりパターンニングした。

[0074] 本実施例でも、光学特性の評価時に、選択の対象となる非線形導波路およびスラブ導波路を、反射光の存在をモニタすることで明確に区別することができる。したがって、複数の導波路に対して光学特性の評価を順次行う場合（図2ステップ204）に、一方のコア端面および試験光源からのファイバの間、他方のコア端面および測定装置へのファイバの間のいずれの場合においても、アラインメント誤りは生じない。効率的かつ確実に測定すべき非線形導波路を特定し、光学特性の測定を実施して、所望の導波路を選択できる。

[0075] さらに所望の導波路が選択された後で、波長変換素子600のチップをモジュールへ実装することを想定し、選択された導波路601-nの両側のスラブ導波路602-n、602-n+1の各反射波長が予め設定した波長であることを確認した。所望の導波路を選択して、モジュール化に向けて最終サイズのチップに切り出した（ステップ205）後で、モジュール組立時にスラブ導波路を利用した粗調整（ステップ703）および反射光観測（ステップ704）を行うことができる。ステップ703およびステップ704は同時に実施可能である。最終サイズに切り出したチップをモジュール内に実

装する際、反射光の波長およびレベルを観測することによって、レンズを介したチップ端面および光ファイバの間のアライメントが容易になり、選択した非線形導波路を誤りなく実装することができる。これにより、図2および図7に示した一連の波長変換素子の作製工程の品質、コストを改善できる。

[0076] 上述の実施例では、光通信を前提とした波長帯域（1550nm、775nm）のものを例示したが、波長変換素子は例えば光を用いた量子情報処理など分野においても利用されており、あらゆる波長帯域の波長変換素子にも適用できる。

[0077] 上述の実施形態および実施例では、波長変換素子モジュールは、切り出した単一のチップをモジュール内に設置し、波長変換機能のみを持ち、ピグテールファイバ形態のものとして説明した。しかしながら単一のチップを含む構成だけに限られず、2以上のチップを含み複数の波長変換素子を含む光感応増幅器、光送信器のような装置を構成するモジュールでも同様の効果を発揮する。このような装置では、複数の波長変換素子を利用し、複数のチップをモジュール内に設置する必要がある、各チップに対するモジュール内での光結合に際して、第2の実施形態の波長変換素子を利用できる。したがって本発明は、第2の実施形態による波長変換素子を含む光信号処理装置としての側面も持っている。

[0078] 本発明の基本的な考え方は、非線形光学を利用する波長変換素子の場合だけに限られない。複数の導波路を作製し、同時に複数の導波路と同様な光学特性・機能を持った付随する導波路が形成されてしまう状況で、複数の導波路の中から1つまたは複数の導波路を選択するような場合にも適用できる。

[0079] 以上、詳細に説明してきたように、本発明によって波長変換素子を効率的に低コストで製造することができる。

産業上の利用可能性

[0080] 本発明は、一般的に通信システムに利用することができる。特に、光通信システム、光計測システムに利用できる。

符号の説明

[0081] 100、301、301-1~301-4 波長変換素子チップ
101a~101b、302-1~302-n、401a~401b、5
01-1~501-n、601-1~601-n 導波路（非線形導波路）
102a~102c、402a~402c、502-1~501-n+1
、602-1~602-n+1 スラブ導波路
104、404 基板
300 ウェーファ
303 試験光源
306 測定器
400、500、600、700 波長変換素子

請求の範囲

- [請求項1] 非線形材料の基板の上に形成された複数の導波路と、
前記複数の導波路の各々に離間して、概ね平行して配置された複数のスラブ導波路であって、各々が導波路長さ方向に周期的な屈折率変化を与えられたグレーティング構造を有する、複数のスラブ導波路とを備えたことを特徴とする波長変換素子。
- [請求項2] 前記複数のスラブ導波路の前記グレーティング構造はそれぞれ異なる周期を持ち、前記異なる周期に対応した特定の波長の光を反射することを特徴とする請求項1に記載の波長変換素子。
- [請求項3] 前記複数のスラブ導波路の各々は、導波路長さ方向に幅または厚みを周期的に変調されたことを特徴とする請求項1または2に記載の波長変換素子。
- [請求項4] 前記複数のスラブ導波路の各々は、導波路上に、屈折率が1より大きい材料が導波路長さ方向に周期的に配置されたことを特徴とする請求項1または2に記載の波長変換素子。
- [請求項5] 前記複数の導波路および前記複数のスラブ導波路はそれぞれ直線導波路であって、前記複数の導波路は、各々のコアのサイズを決定する構成パラメータを徐々に変化させていることを特徴とする請求項1乃至4いずれかに記載の波長変換素子。
- [請求項6] 前記複数の導波路は、 LiNbO_3 または LiNbO_3 に、 Mg 、 Zn 、 Sc 、 In の内の少なくとも一種を添加物として含有する材料から成ることを特徴とする請求項1乃至4いずれかに記載の波長変換素子。
- [請求項7] 非線形材料の基板の上に形成された複数の導波路と、前記複数の導波路の各々に離間して概ね平行して配置された複数のスラブ導波路とを備えた波長変換素子の作製方法において、
前記複数のスラブ導波路の各々に、導波路長さ方向に周期的な屈折率変化を与えられたグレーティング構造を作製するステップと、

前記グレーティング構造の周期に対応した波長の反射波を検出しながら、前記複数の導波路の光学特性を順次測定して、所望の光学特性を有する導波路を選択するステップと、

前記選択された導波路に隣接し、少なくとも一方の側にある前記スラブ導波路からの前記反射波に基づいて、前記選択された導波路と光ファイバとの光結合を行うステップと

を備えることを特徴とする方法。

[請求項8]

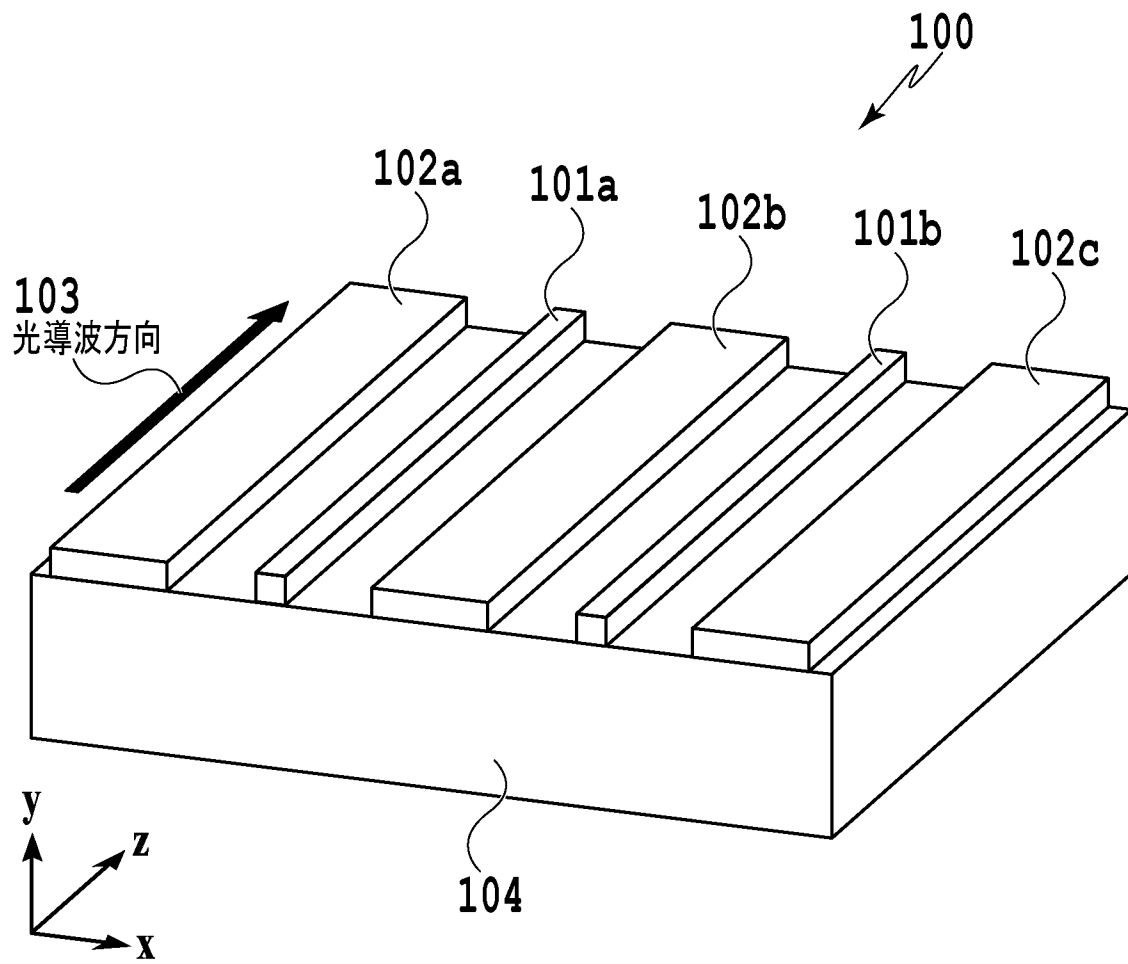
前記光結合を行うステップは、

前記複数のスラブ導波路の前記グレーティング構造がそれぞれ異なる周期を持ち、前記異なる周期に対応した特定の波長の反射波に基づいて、前記選択された導波路に隣接する少なくとも1つの前記スラブ導波路と前記光ファイバとの粗い光結合を行う第1の光結合ステップと、

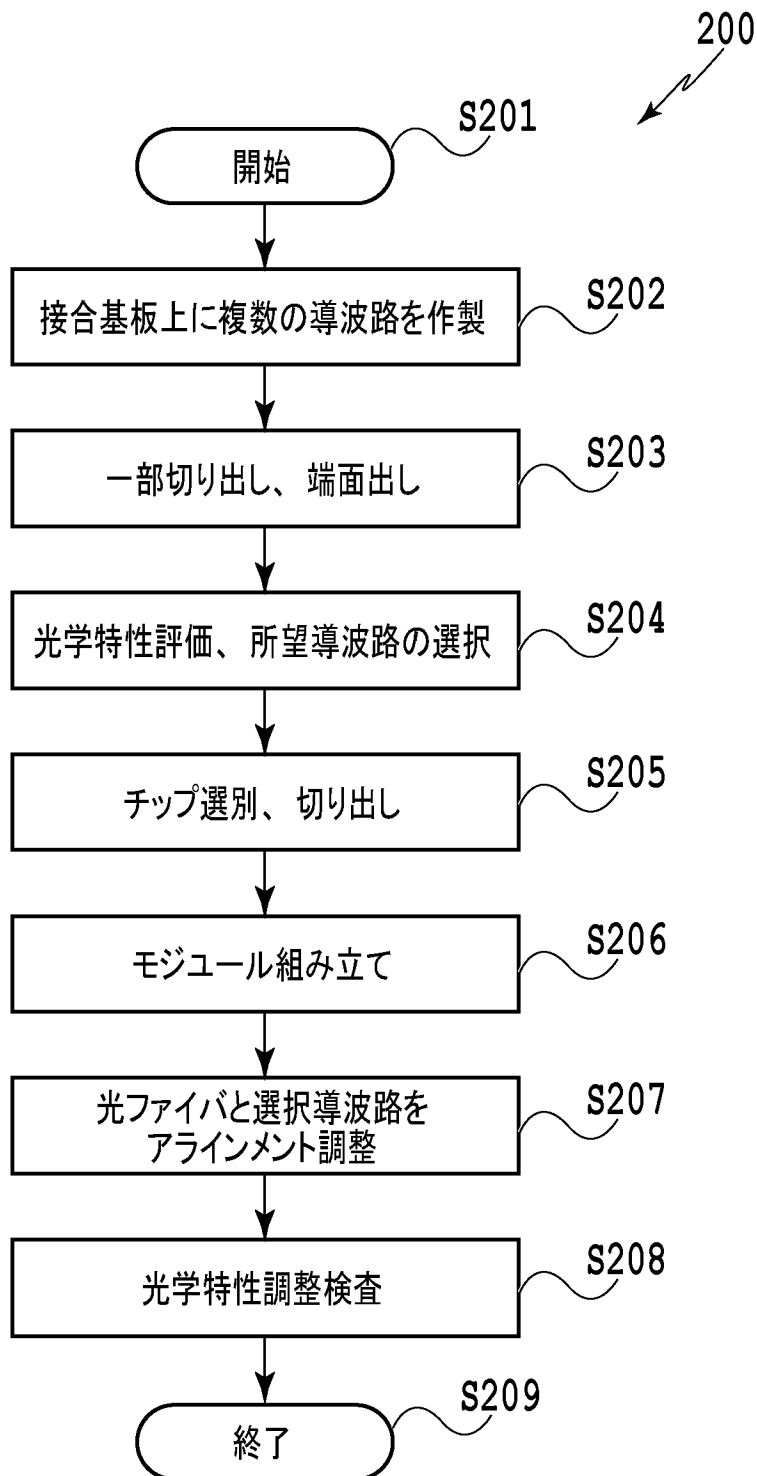
前記光ファイバと、前記選択された導波路との精密な光結合を行う第2の光結合ステップと

を含むことを特徴とする請求項7に記載の方法。

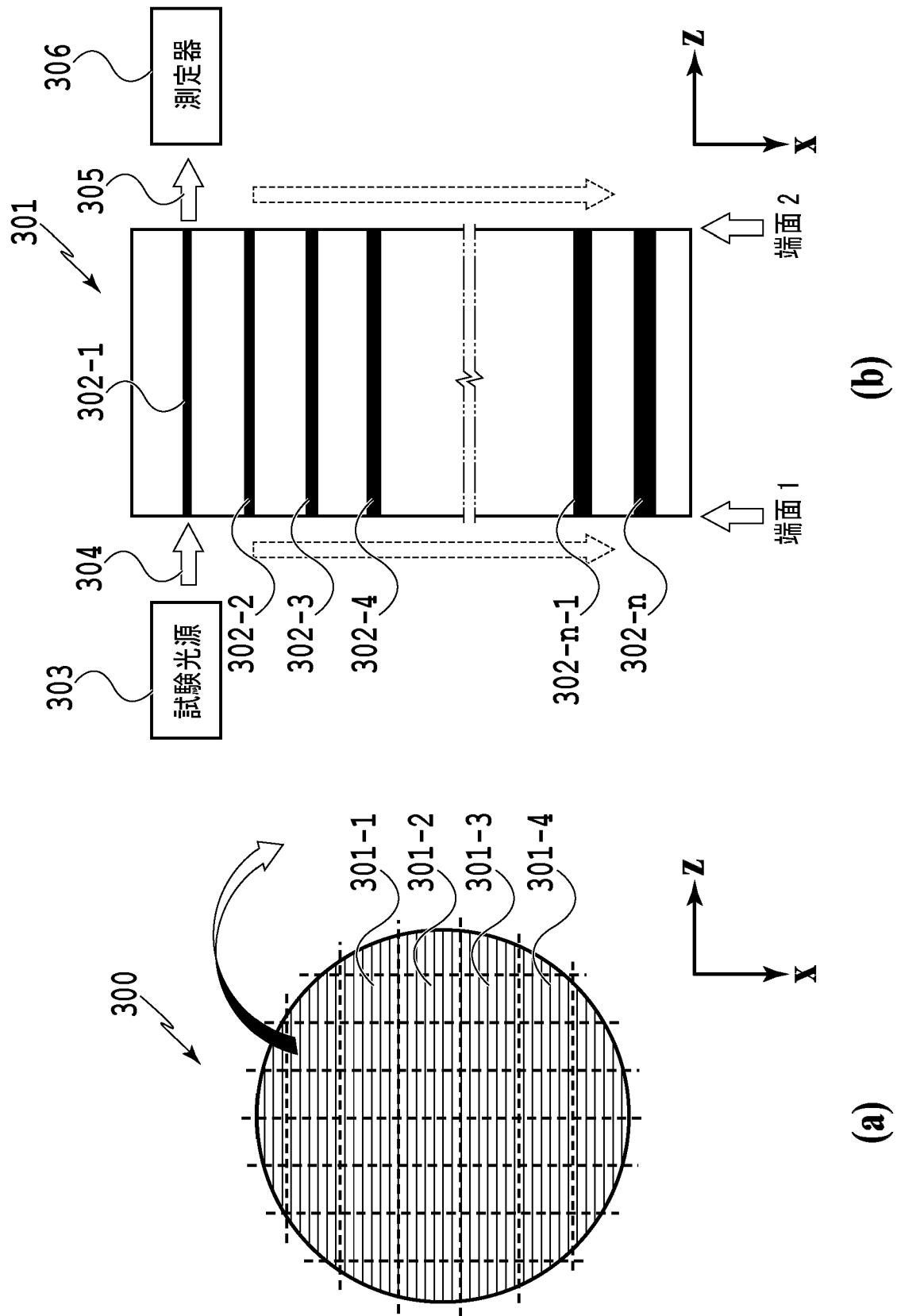
[図1]



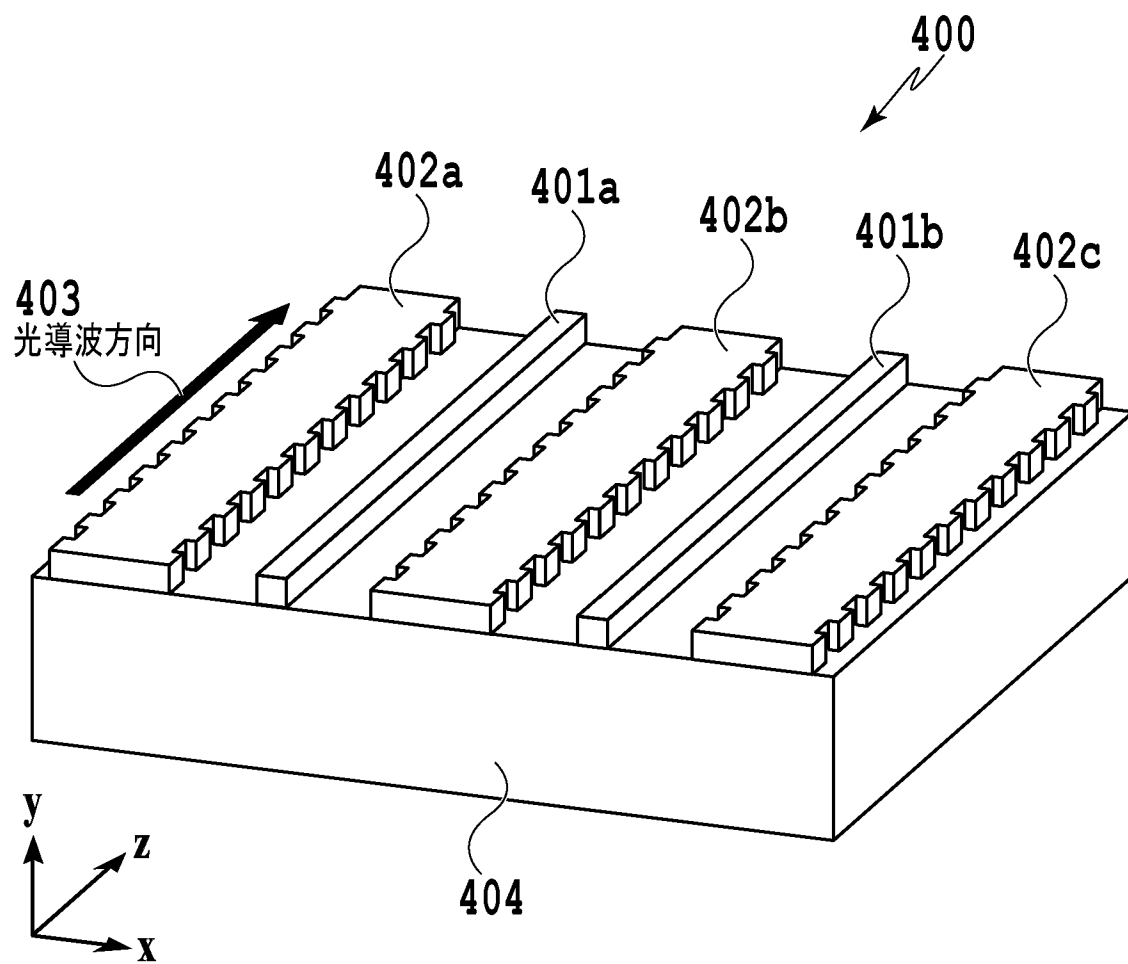
[図2]



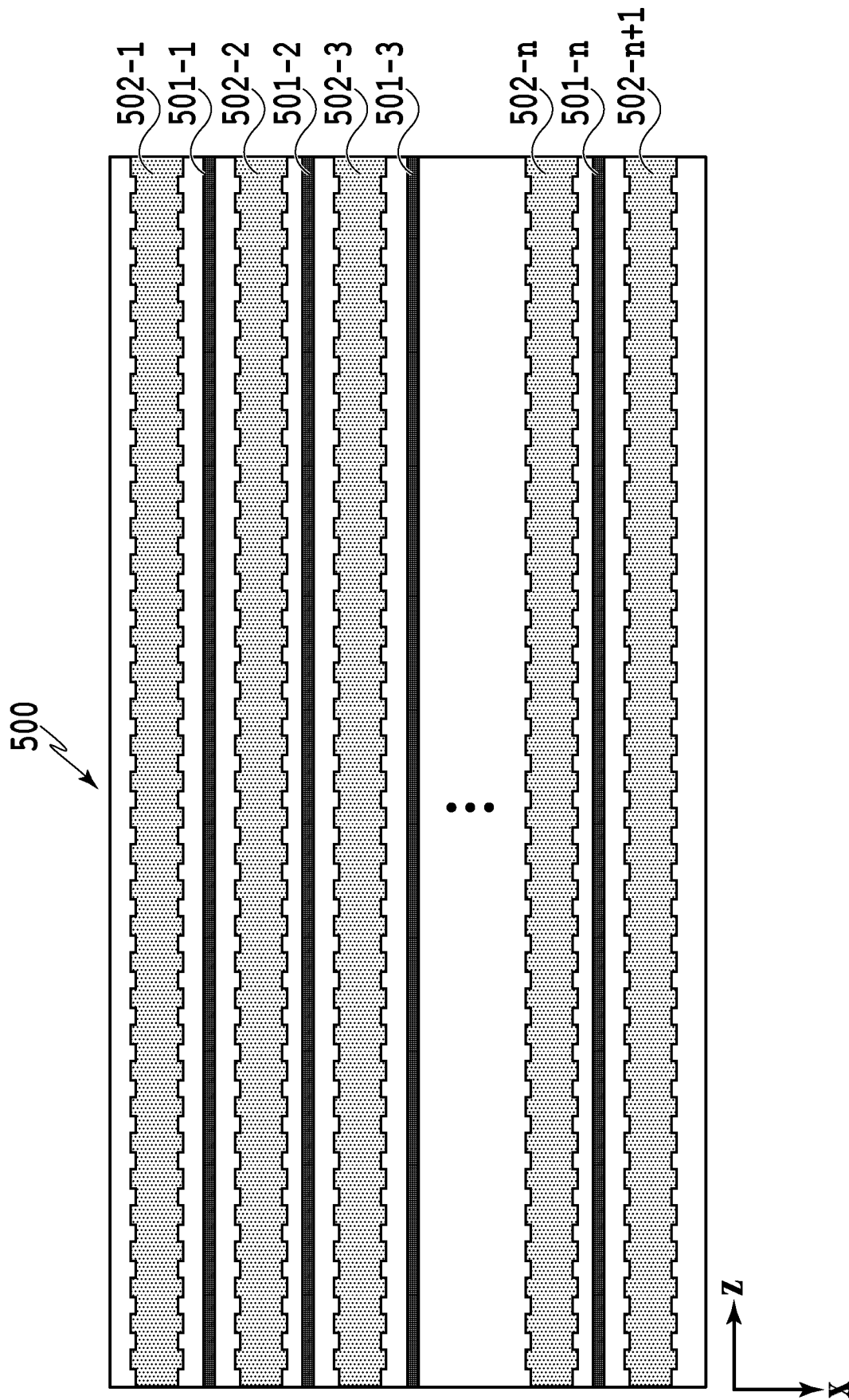
[図3]



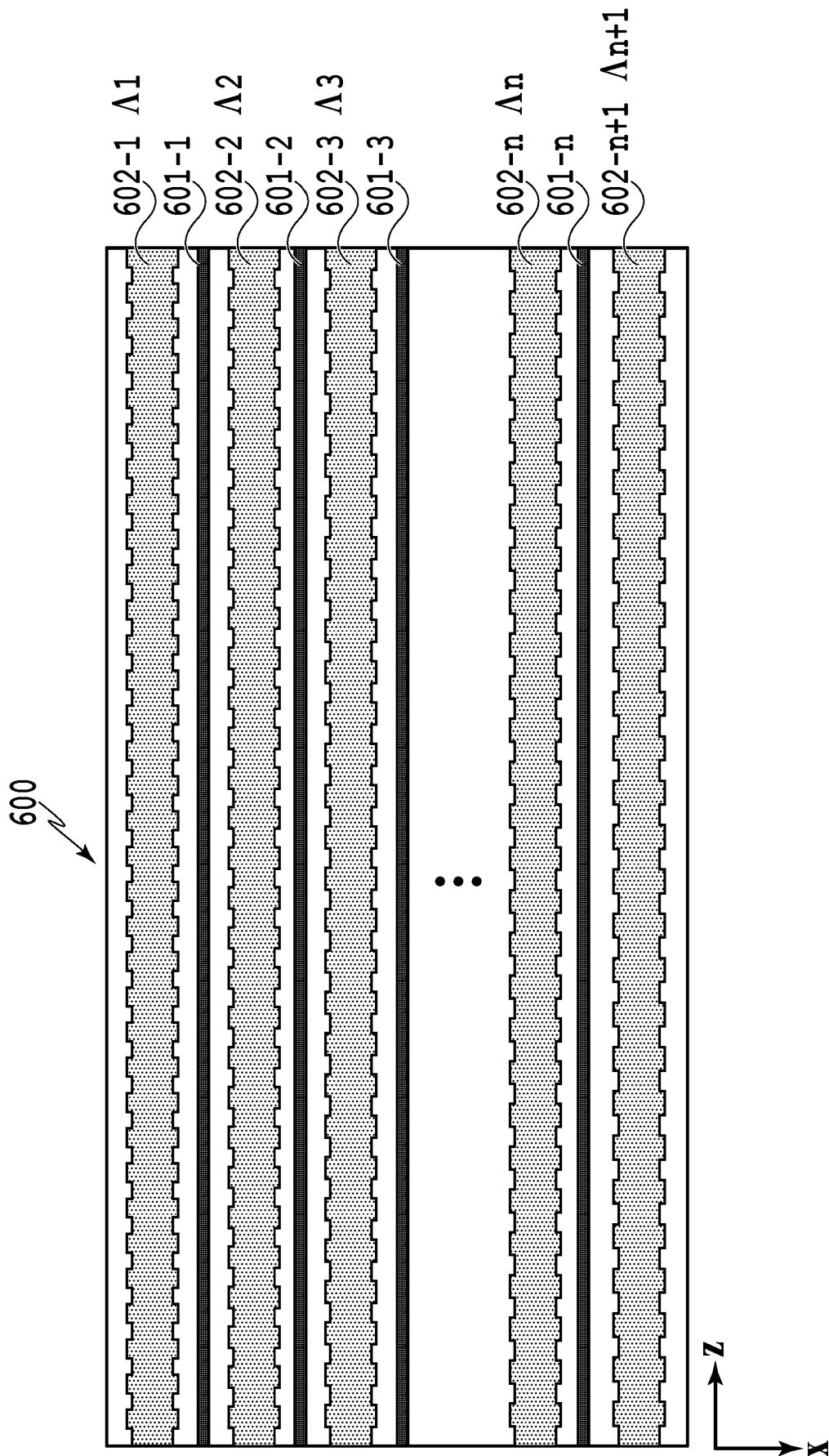
[図4]



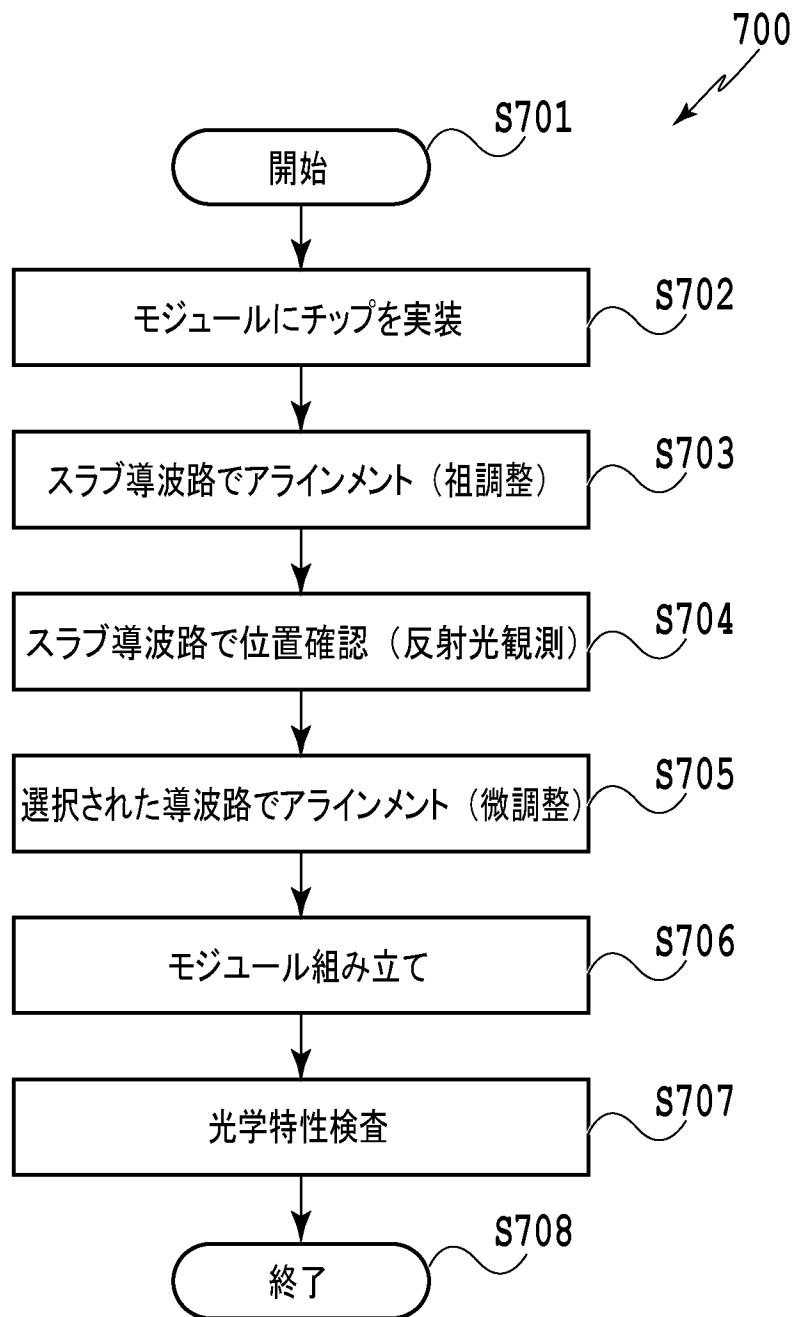
[図5]



[図6]



[図7]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/044514

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl. G02F1/37(2006.01)i, G02B6/12(2006.01)i, G02B6/124(2006.01)i,
G02B6/13(2006.01)i, G02B6/136(2006.01)i, G02F1/39(2006.01)i,
H04B10/00(2013.01)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)

Int.Cl. G02F1/35-1/39, G02B6/12-6/136, H04B10/00

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	1971-2019
Registered utility model specifications of Japan	1996-2019
Published registered utility model applications of Japan	1994-2019

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.
A	JP 2014-211539 A (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORP.) 13 November 2014, entire text, all drawings (Family: none)	1-8
A	JP 2011-043657 A (OKI ELECTRIC INDUSTRY CO., LTD.) 03 March 2011, entire text, all drawings (Family: none)	1-8



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

"I" 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
09 December 2019 (09.12.2019)

Date of mailing of the international search report
17 December 2019 (17.12.2019)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/044514

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2001-133647 A (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORP.) 18 May 2001, entire text, all drawings (Family: none)	1-8
A	JP 2017-044781 A (OKI ELECTRIC INDUSTRY CO., LTD.) 02 March 2017, entire text, all drawings & US 2017/0059779 A1, entire text, all drawings	1-8
A	US 5185752 A (SPECTRA DIODE LABORATORIES, INC.) 09 February 1993, entire text, all drawings (Family: none)	1-8

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G02F1/377(2006.01)i, G02B6/12(2006.01)i, G02B6/124(2006.01)i, G02B6/13(2006.01)i,
G02B6/136(2006.01)i, G02F1/39(2006.01)i, H04B10/00(2013.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. G02F1/35-1/39, G02B6/12-6/136, H04B10/00

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	1971-2019年
日本国実用新案登録公報	1996-2019年
日本国登録実用新案公報	1994-2019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
A	JP 2014-211539 A (日本電信電話株式会社) 2014.11.13, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-8
A	JP 2011-043657 A (沖電気工業株式会社) 2011.03.03, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-8

☑ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

09.12.2019

国際調査報告の発送日

17.12.2019

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)

郵便番号 100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

山本 貴一

2 L

4086

電話番号 03-3581-1101 内線 3295

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2001-133647 A (日本電信電話株式会社) 2001.05.18, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-8
A	JP 2017-044781 A (沖電気工業株式会社) 2017.03.02, 全文, 全図 & US 2017/0059779 A1, 全文, 全図	1-8
A	US 5185752 A (SPECTRA DIODE LABORATORIES, INC.) 1993.02.09, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-8