

(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1月2日(02.01.2025)



(10) 国際公開番号

WO 2025/005104 A1

(51) 国際特許分類:
G02F 1/377 (2006.01)

JP]; 〒7748601 徳島県阿南市上中町岡 4 9
1 番地 1 0 0 Tokushima (JP).

(21) 国際出願番号: PCT/JP2024/023094

(22) 国際出願日: 2024年6月26日(26.06.2024)

(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 2023-105432 2023年6月27日(27.06.2023) JP

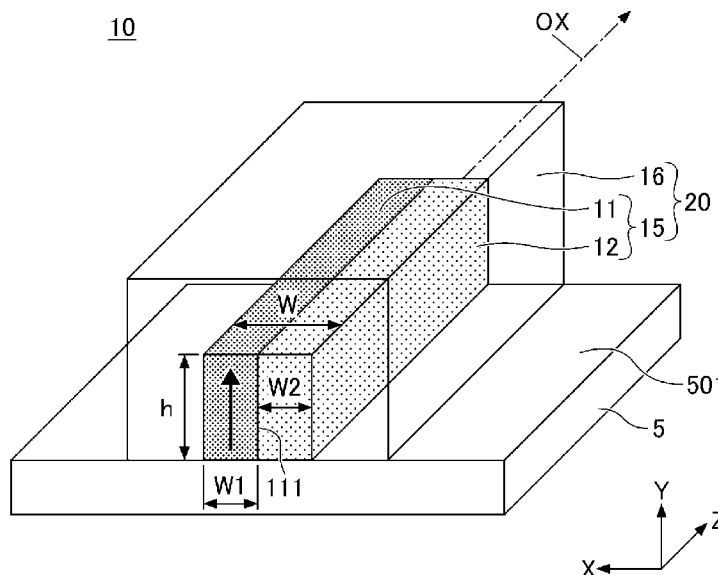
(71) 出願人: 国立大学法人大阪大学 (**OSAKA UNIVERSITY**) [JP/JP]; 〒5650871 大阪府吹田市山田丘 1 番 1 号 Osaka (JP). 日垂化学工業株式会社 (**NICHIA CORPORATION**) [JP/

(72) 発明者: 谷川 智之 (**TANIKAWA, Tomoyuki**); 〒5650871 大阪府吹田市山田丘 1 番 1 号 国立大学法人大阪大学内 Osaka (JP). 片山 竜二 (**KATAYAMA, Ryuji**); 〒5650871 大阪府吹田市山田丘 1 番 1 号 国立大学法人大阪大学内 Osaka (JP). 上向井 正裕 (**UEMUKAI, Masahiro**); 〒5650871 大阪府吹田市山田丘 1 番 1 号 国立大学法人大阪大学内 Osaka (JP). 本田 啓人 (**HONDA, Hiroto**); 〒5650871 大阪府吹田市山田丘 1 番 1 号 国立大学法人大阪大学内 Osaka (JP). 岡田 将典 (**OKADA, Masanori**);

(54) **Title:** WAVELENGTH CONVERSION ELEMENT, OPTICAL CIRCUIT USING SAME, AND LIGHT SOURCE DEVICE

(54) 発明の名称: 波長変換素子、これを用いた光回路、及び光源装置

[図1]



(57) **Abstract:** Provided is a wavelength conversion element in which high-quality crystal part can be utilized by a simple configuration. This wavelength conversion element comprises a substrate having a main surface, and an optical waveguide disposed on the main surface of the substrate, a core of the optical waveguide including a polar member having a second-order nonlinear optical constant and a first non-polar member disposed adjacent to the polar member in a direction parallel to the main surface of the substrate, and one or both side surfaces of the polar member and the first non-polar

[続葉有]

〒7748601 徳島県阿南市上中町岡4 9 1 番地 1
0 0 日亜化学工業株式会社内 Tokushima (JP).

(74) 代理人: 伊東 忠重, 外 (ITOH, Tadashige et al.);
〒1000005 東京都千代田区丸の内二丁目 1
番 1 号 丸の内 M Y P L A Z A (明治安
田生命ビル) 1 6 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, 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,
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))

member being in contact with each other in a cross section orthogonal to the optical axis of the optical waveguide.

(57) 要約: シンプルな構成で高品質な結晶の部分を利用可能な波長変換素子を提供する。波長変換素子は、主面を有する基板と、前記基板の前記主面に配置される光導波路と、を備え、前記光導波路のコアは、2次の非線形光学定数を有する極性部材と、前記基板の前記主面と平行な方向で前記極性部材と隣接して配置される第1非極性部材と、を含み、前記光導波路の光軸と直交する断面で、前記極性部材の一方または両方の側面と前記第1非極性部材とが接している。

明 細 書

発明の名称：波長変換素子、これを用いた光回路、及び光源装置
技術分野

[0001] 本開示は、波長変換素子、これを用いた光回路、及び光源装置に関する。

背景技術

[0002] 非線形光学効果を有する物質に強い光を入射すると、光電場の2乗、あるいは3乗に比例する非線形の分極が生じる。2次の非線形光学効果には、和周波発生や差周波発生等があり、第2高調波発生（SHG：Second harmonic Generation）や光パラメトリック増幅等に利用されている。また、これらの非線形光学効果を利用して波長変換が行われている。波長変換器として、ニオブ酸リチウム（LN）やタンタル酸リチウム（LT）等の強誘電体の周期的な反転分極で構成される波長変換導波路が一般的に知られているが、微細加工が困難であり、可視光帯域でダメージ閾値が低い。

[0003] 基板に形成された溝の両側の側壁から互いに向かい合う方向にGaN層を成長させ、c軸が逆向きの第1結晶領域と第2結晶領域で波長変換用の導波素子を作製する方法が提案されている（たとえば、特許文献1参照）。また、2次の非線形光学定数を持つAlN薄膜と、分極を持たないHfO₂を基板の表面に順に積層した擬似位相整合導波路が提案されている（たとえば、非特許文献1及び2参照）。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：特開2018-194617号公報

非特許文献

[0005] 非特許文献1：230nm遠紫外第二高調波発生に向けた横型擬似位相整合HfO₂/AlN導波路の設計、第82回応用物理学会秋季学術講演会 講演予稿集、2021、講演番号12p-N101-7

非特許文献2：230nm遠紫外第二高調波発生に向けたHfO₂/AlN横

型擬似位相整合チャネル導波路の作製、第69回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集、2022、講演番号26p-E203-6

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] 溝内でc軸が逆向きのGaN層を成長する方法は、作製工程が複雑であり、基板との界面近傍での結晶の品質が不十分である。AlN薄膜とHfO₂を積層する構成では、AlN薄膜の厚さが小さく、高品質の結晶薄膜を成長するのが難しい。本開示の一つの側面では、シンプルな構成で高品質な結晶の部分を利用可能な波長変換素子を提供する。

課題を解決するための手段

[0007] 一つの実施形態において、波長変換素子は、
主面を有する基板と、
前記基板の前記主面に配置される光導波路と、
を備え、
前記光導波路のコアは、2次の非線形光学定数を有する極性部材と、前記基板の前記主面と平行な方向で前記極性部材と隣接して配置される第1非極性部材と、を含み、
前記光導波路の光軸と直交する断面で、前記極性部材の一方または両方の側面と前記第1非極性部材とが接している。

発明の効果

[0008] シンプルな構成で高品質な結晶の部分を利用可能な波長変換素子の実現される。

図面の簡単な説明

[0009] [図1]第1実施形態の波長変換素子の模式的な斜視図である。
[図2]図1の光軸と直交する断面図である。
[図3]波長変換素子の光導波路を伝搬する導波モードを模式的に示す図である。

[図4]波長変換素子の第1変形例の模式図である。

[図5A]図4の波長変換素子の光導波路の作製工程図である。

[図5B]図4の波長変換素子の光導波路の作製工程図である。

[図5C]図4の波長変換素子の光導波路の作製工程図である。

[図5D]図4の波長変換素子の光導波路の作製工程図である。

[図6A]波長変換素子の第2変形例の模式図である。

[図6B]波長変換素子の第3変形例の模式図である。

[図6C]波長変換素子のさらに別の変形例の模式図である。

[図7]位相整合するコア幅を計算するモデル図である。

[図8A]光導波路の TM_{00} モードの電磁界分布を示す図である。

[図8B]光導波路の TM_{20} モードの電磁界分布を示す図である。

[図9]横モードで位相整合するコア幅の計算結果を示す図である。

[図10]第2実施形態の波長変換素子の断面図である。

[図11]第3実施形態の波長変換素子の断面図である。

[図12]第3実施形態の波長変換素子を伝搬する光の模式図である。

[図13]第4実施形態の波長変換素子の断面図である。

[図14]第4実施形態の変形例の波長変換素子の断面図である。

[図15]第5実施形態の波長変換素子の断面図である。

[図16]第5実施形態の変形例の波長変換素子の断面図である。

[図17]実施形態の波長変換素子を用いた光源装置の模式図である。

[図18]実施形態の波長変換素子を用いた光回路の模式図である。

発明を実施するための形態

[0010] 以下、図面を参照しながら、本開示を実施するための実施形態を説明する。以下の説明は、本開示の技術思想を具体化するためのものであって、特定の記載がない限り、本開示を以下の記載に限定するものではない。各図面中、同一の機能を有する部材には、同一符号を付している場合がある。要点の説明または理解の容易性を考慮して、便宜上実施形態に分けて示す場合があるが、異なる実施形態や実施例で示した構成の部分的な置換または組み合

わせは可能である。後に示す実施形態では、先に示した実施形態との異なる事項について主に説明し、先に示した実施形態と共通の事柄について重複する説明を省略することがある。各図面が示す部材の大きさや位置関係等は、説明を明確にするため、誇張して示している場合がある。

[0011] 以下の実施形態では、説明を簡単にするために、主に角周波数 ω_1 の光を角周波数 $\omega_2 (= 2 \times \omega_1)$ の光に変換するSHGを例にとり説明する。しかしながら、実施形態の波長変換素子はSHG以外の用途にも使用することができる。たとえば、SHGの逆過程の波長変換（すなわち、角周波数 ω_2 から角周波数 ω_1 への変換）が可能である。また、後述する位相整合条件を満たす範囲で、和周波発生または差周波発生により任意の波長変換を行う波長変換素子としても使用することもできる。

[0012] 光導波路において、導波モードは厳密にはTMモードとTEモードに分離することはできず、いずれの成分も含む。これは、TM-likeモードやTE-likeモードと呼ばれている。明細書中において、記載を簡略化するために単にTMモードと表記するが、これはTM-likeモードを表している。

[0013] <第1実施形態>

図1は、第1実施形態の波長変換素子10の模式的な斜視図、図2は、図1の光軸OXと直交する断面図である。図1、及び図2の座標系で、波長変換素子10の光軸OXと平行な方向をZ方向とし、光軸OXと直交するXY面内で基板5の表面に対する法線方向をY方向とする。

[0014] 波長変換素子10は、主面501を有する基板5と、基板5の主面501に配置される光導波路20と、を備える。光導波路20のコア15は、2次の非線形光学定数を有する極性部材11と、基板5の主面501と平行なX方向で極性部材11と隣接して配置される第1非極性部材12と、を含む。光導波路20の光軸OXと直交する断面であるXY面内で、極性部材11の一方または両方の側面111と、第1非極性部材12とが接している。これにより、結晶品質の比較的高い領域を導波経路とすることができ、導波路自

身による光損失を低減することができる。

[0015] ここで、主面501と「平行な方向」とは、XY面内で主面501とX軸とが厳密に平行であることを要求せず、製造誤差やプロセス誤差を含み、たとえば $\pm 2^\circ$ 以下、好ましくは $\pm 0.1^\circ$ 以下のズレを含んでもよい。図1の例では、極性部材11の一方の側面111が第1非極性部材12と接して配置されているが、後述するように、極性部材11の両側面に第1非極性部材12が接して配置されてもよい。側面111は、基板5の主面501に対して垂直である必要はなく、極性部材11のXY断面での形状は台形であってもよいし、逆台形であってもよい。

[0016] 基板5の主面501上で互いに横方向(X方向)に接する極性部材11と第1非極性部材12とで、光導波路20のコア15が構成される。極性部材11は、たとえば、c軸方向に分極をもつウルツ鉱型結晶で形成されている。極性部材11は、LNやLTと比べて大きなパワー密度の光を入射して、波長変換素子10の変換効率を高めることができる。図1の上向きの矢印で示すように、基板5上に成膜された極性部材11のc軸は基板5の501に対して垂直であり、矢印の方向に分極を有する。一般式ABで表されるAlN、GaN、ZnO等はウルツ鉱型結晶構造を有する。実施形態では、極性部材11を $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 \leq x \leq 1$)で形成する。xの値を調整することで、第1非極性部材12との屈折率の差を小さくすることができる。

[0017] 第1非極性部材12は、極性を有さない物質である。第1非極性部材12は、好ましくはアモルファス層として形成されている。第1非極性部材12は、 Nb_2O_5 、 Ta_2O_5 、 TiO_2 、 HfO_2 、 ZrO_2 、 Si_3N_4 からなる群から選択されてもよい。なお、組成は必ずしもストイキオメトリに一致する必要はなく、酸素または窒素がストイキオメトリと比べて多い状態または少ない状態であってもよい。さらに、第1非極性部材12は、上記材料を2種類以上含む複合材料であってもよい。もしくは、不純物をドーピングすることで屈折率を調整してもよい。これにより、第1非極性部材12の屈折率と極性部材11の屈折率との差を小さくすることができるので、角周波数 ω_1 の

光と角周波数 ω_2 の光との間で位相整合を実現する角周波数の組み合わせの数を増やすことができる。第1非極性部材12と極性部材11を基板5の主面501上で、積層方向ではなく、横方向（X方向）に隣接させてコア15を構成することで、極性部材11の厚さを稼いで、結晶の品質を向上できる。極性を持たない第1非極性部材12を極性部材11の側面111に接して配置することで、光導波路20のコア15中に空間的な変調が導入される。この変調により、コア15中に発生する高次の横モードの振幅の正負の腹による後述する結合定数 κ の打ち消し合いが小さくなる。ここでいう空間的な変調とは、2次の非線形光学定数の有無による変調であり、波長変換の効率に寄与する。

[0018] 極性部材11と第1非極性部材12で形成されるコア15は、クラッド16に囲まれている。クラッド16は、好ましくは、コア15の側面と上面の両方を覆う。コア15を取り囲むクラッド16として空気層を用いてもよいし、コア15よりも屈折率の低い材料の層を設けてもよい。コア15よりも屈折率の低い材料として、酸化シリコン（ SiO_2 ）、酸窒化シリコン（ SiON ）、酸化アルミニウム（ Al_2O_3 ）、酸窒化アルミニウム（ AlON ）等を用いてもよい。クラッドの屈折率は、モード分散を決定するパラメータのひとつであり、適宜設定される。

[0019] XY断面でのコア15の高さ h は、極性部材11と第1非極性部材12の膜厚に相当する。コアの高さ h は、光の閉じ込めを大きくできる十分な厚さを有し、一例として300nmから1 μm である。コア15の幅 W は、極性部材11の幅 W_1 と、第1非極性部材12の幅 W_2 の合計である。実施形態では、極性部材11の幅 W_1 に対するコア15の幅 W は、基本波の TM_{00} モードと、第2高調波の TM_{20} モードが位相整合条件を満たすように設定されている。位相整合条件は後述する。極性部材11の結晶品質の良好な部分を増やす観点から、極性部材11の高さ h を、幅 W_1 以上にしてもよい。コア15の高さ h と幅 W のアスペクト比（ h/W ）は、たとえば、1以上5以下、好ましくは1以上3以下であってよい。極性部材の高さ h と幅 W_1 のアス

ペクト比 ($h/W1$) は、たとえば、2 以上 10 以下、好ましくは 2 以上 6 以下であってよい。第 1 非極性部材 12 の高さ h と幅 $W2$ のアスペクト比 ($h/W2$) は、たとえば、2 以上 10 以下、好ましくは 2 以上 6 以下であってよい。また、極性部材 11 の幅 $W1$ は、第 1 非極性部材 12 の幅 $W2$ の 0.5 倍以上 2 倍以下であってよい。

[0020] 光導波路 20 に入射する光が弱いときは、極性部材 11 の分極の大きさは光電場の大きさに比例する。一方で、十分な強度をもつ光が入射すると、極性部材 11 の分極には、2 次および／または 3 次の非線形分極が現れる。このような非線形分極から生じる効果が、非線形光学効果である。2 次の非線形光学効果の代表として SHG がある。2 つの同じ角周波数をもつ光子が非線形光学媒質と相互作用することにより、もとの光子の 2 倍のエネルギーの光子が発生する。言い換えると、角周波数が 2 倍の光子が発生する。

[0021] 図 3 は、光導波路 20 を伝搬する導波モードを模式的に示す。図 3 では、XY 断面におけるポンプ光と信号光の強度分布を、Y 方向の積分をとって、XZ 面に投影して示している。角周波数 ω_1 の TM_{00} モードのポンプ光が、Z 方向に波長変換素子 10 に入射する。ポンプ光の入射によりコア 15 の極性部材 11 に非線形分極が誘発され、 ω_1 と異なる角周波数 ω_2 の信号光が発生する。 ω_2 は、たとえば ω_1 の 2 倍の角周波数である。この例では、角周波数 ω_2 の信号光の導波モードは、 TM_{20} モードである。

[0022] コア 15 の極性部材 11 は、2 次の非線形光学定数 d を有する。2 次の非線形光学定数は、3 階のテンソルであり、極性部材 11 へ入出力される光のエネルギーが極性部材 11 のバンドギャップエネルギーよりも十分小さいとき、縮約表現を用いて 3×6 の行列の成分である d_{ij} で表される。2 次の非線形光学定数 d_{ij} は、2 次の非線形感受率 $\chi^{(2)}$ に比例する。2 次の非線形光学定数は、極性部材 11 を構成する結晶の対称性により、有限の値をとる成分が異なる。極性部材 11 は、たとえば、2 次の非線形光学定数 d_{33} を有する。基板 5 の主面 501 と垂直な方向に c 軸をもつ場合は、 d_{33} が最大成分として用いられ得る。入射したポンプ光と極性部材 11 との相互作用で発生した

角周波数 ω_2 の信号光は、 TM_{20} モードで光導波路20を伝搬し、波長変換素子10から出力される。なお、本実施形態において、2次の非線形光学定数は d_{33} に限られない。極性の方向と極性部材11へ入射する光電場の向きを考慮して、たとえば d_{31} など他の成分を利用してもよい。

[0023] 波長変換素子10において、2次の非線形光学効果を利用して効率的に第2高調波を発生させるには、ポンプ光と信号光の間で位相整合条件を満たす必要がある。一般的に、屈折率は角周波数に依存するため、角周波数が ω_1 と ω_2 の2つの状態で位相整合をとることは難しい。これを解消するために、複屈折による位相整合や、周期的分極反転による擬位相整合が用いられる。この実施形態では、横モードを用いた位相整合を利用する。ポンプ光の波長の光（すなわち、角周波数 ω_1 の光）が感じるコア15の材料の屈折率を $n_{\text{mat}}(\omega_1)$ 、信号光の波長の光（すなわち、角周波数 ω_2 の光）が感じるコア15の材料の屈折率を $n_{\text{mat}}(\omega_2)$ とすると、波長変換素子10のバンドギャップエネルギーがポンプ光および信号光のエネルギーと比べて十分大きい場合、長波長の光よりも短波長の光が感じるコア材料の屈折率の方が大きく、

$$n_{\text{mat}}(\omega_1) < n_{\text{mat}}(\omega_2)$$

である。一方、コア15の実効屈折率の横モード依存性（モード分散）により、基本モードにおけるコア15の実効屈折率 n_{00} は、高次の横モードにおける実効屈折率 n_{m0} よりも大きく、

$$n_{00} > n_{m0}$$

となる。ここで、 m はモード次数である。実効屈折率の横モード依存性を利用して、ポンプ光と信号光が感じるモードごとの実効屈折率を同等にすることで、

$$n_{00}(\omega_1) = n_{m0}(\omega_2)$$

を満たすことができる。すなわち、コア15内でのポンプ光と信号光は位相整合条件を満足し得る。

[0024] 角周波数 ω_1 のモードと ω_2 のモードとの間の結合定数 κ は、以下の式で表される。

[0025] [数1]

$$\kappa \propto \iint \chi^{(2)}(x, y) E_{\omega_2}(x, y) E_{\omega_1}^2(x, y) dx dy \quad (\omega_1 < \omega_2)$$

結合定数 κ は、2 次の非線形感受率 $\chi^{(2)}$ と、電場 E_{ω_1} の2 乗と、電場 E_{ω_2} を掛け合わせて、コア断面で積分した値に比例する。2 次の非線形感受率 $\chi^{(2)}$ は、第1 非極性部材1 2 の領域ではゼロである。

[0026] したがって、図3 の例では、例えば、第1 非極性部材1 2 が、 TM_{20} モードの電場分布のうち正負の腹を1 つずつ含むように設計することで、残りの腹のみが結合定数 κ に寄与することとなる。これは、極性部材のみからなるコアで位相整合をとる場合と比べて、結合定数 κ を大きくすることができる。

[0027] コア1 5 の結合定数 κ は、コア1 5 の断面領域での TM_{00} モードと TM_{20} モードの電場の重なり合いに依存する。たとえば、極性部材1 1 と第1 非極性部材1 2 の界面が、 TM_{20} モードの信号光の振幅の節に位置するように光導波路2 0 を設計することで、極性部材1 1 で TM_{00} モードと TM_{20} モードの重なり合いにおける正負の打ち消し合いを小さくする。これにより、極性部材1 1 のみでコア1 5 を形成したときに高次モードの正負の腹の打ち消し合いが生じる構成と比較して、結合定数 κ を大きくできる。なお、図3 においてY 方向の横モードは基本モードであることが好ましい。これにより、結合定数 κ を大きくして、効率よく波長変換ができる。

[0028] (第1 変形例)

図4 は、波長変換素子1 0 の第1 変形例としての波長変換素子1 0 A の模式図である。波長変換素子1 0 A は、基板5 の主面5 0 1 の上に、光導波路2 0 A を有する。光導波路2 0 A は、コア1 5 A とクラッド1 6 を含む。コア1 5 A は、極性部材1 1 と、極性部材1 1 の両側の側面1 1 1 と1 1 2 に接して配置される第1 非極性部材1 2 とを有する。光軸OX (図1 参照) と

直交するXY断面で、極性部材11は、第1非極性部材12の間に挟まれている。図1及び図2の波長変換素子10と同様に、波長変換素子10Aはシンプルな構成を有する。極性部材11と第1非極性部材12をY方向に厚く形成することができ、結晶品質を向上させることができる。また、対称性が高い形をとることで、 TM_{00} モードと TM_{20} モードそれぞれの電場強度が高い領域に極性材料を配置できる。

[0029] TM_{20} モードの電場分布は3つの腹をもつ。例えば、極性部材11が少なくとも真ん中の腹を含み、かつ2つの第1非極性部材12がそれぞれ外側の腹の頂点を含むようにコア15Aの幅を設定することで、数1の結合定数 κ を大きくすることができる。したがって、効率よく波長変換ができる。極性部材11の幅 $W1$ は、2つの第1非極性部材12の幅 $W2$ の合計($W-W1$)の例えば0.5倍以上3倍以下、好ましくは1倍以上2倍以下であってよい。また、コア15の高さ h と幅 W のアスペクト比(h/W)は、たとえば、0.5以上10以下、好ましくは、0.5以上6以下であってよい。

[0030] <コア15Aの作製工程>

図5Aから図5Dは、波長変換素子10Aのコア15Aの作製工程図である。図5Aにおいて、基板5の主面501に、極性材料の層110を形成する。基板5は、サファイア基板、GaN基板、石英基板、光学ガラス基板、樹脂基板、シリコン酸化膜付きのシリコン基板など、適切な基板を選択できる。基板5は、好ましくはサファイア基板またはGaN基板である。極性材料の層110を比較的高い品質で形成することができる。極性材料として、AlN、GaN、AlGaIn、ZnO等のウルツ鉱型結晶構造をもつ材料を用いる。800nm近傍の波長に対して、GaNの屈折率は2.35、AlNとZnOの屈折率は、それぞれ2.18と2.10である。スパッタリングおよび蒸着等の物理気相成長(PVD: Physical Vapor Deposition)法や、化学気相成長(CVD: Chemical Vapor Deposition)法により、結晶品質の良好な極性材料の層110が形成される。極性材料の層110としてAlGaInを成膜するときは、AlとGaの組成を調整して、所望の屈折率にし

てもよい。極性材料の層 110 の厚さは、たとえば、300 nm 乃至 1000 nm にする。位相整合条件はコアの幅方向（X 方向）の横モードを制御することで満たすことができるので、極性材料の層 110 を比較的厚くすることができる。これにより、極性材料の層 110 の結晶品質を高めることができる。

[0031] 図 5 B で、層 110 を所定の形状に加工して極性部材 11 を得る。極性部材 11 は、層 110 の上に所定の形状にパターニングされたマスクを介して加工することで得られる。所定の形状は、図 1 に示したように、XY 断面での幅 W_1 、高さ h で、Z 方向に延びる形状である。極性部材 11 の結晶品質を確保するために、高さ h を、幅 W_1 以上にしてもよい。高さ h と幅 W_1 のアスペクト比 (h/W_1) は 1 以上 10 以下、好ましくは 1.5 以上 6 以下であってよい。XY 断面の形状は必ずしも長方形でなくてもよく、台形、逆台形などであってもよい。層 110 に対して異方性エッチングを施すことで、基板 5 の主面 501 と所定の角度をなす側面 111 と 112 が得られる。異方性エッチングは、例えば、ドライプロセスであってよく、反応性イオンエッチングであってよい。以上のように、極性部材 11 は、微細加工に適した材料であり、所定の幅に加工することができる。

[0032] 図 5 C で、極性部材 11 を覆って、全面に非極性材料の層 120 を形成する。非極性材料の層 120 は、分極をもたないアモルファス層である。非極性材料として、極性部材 11 と屈折率が比較的近い材料を用いる。極性部材 11 の屈折率と非極性材料の層 120 の屈折率との差はたとえば、0.001 以上 0.2 以下であってよく、0.001 以上 0.1 以下であってよい。一例として、非極性材料は、 Nb_2O_5 、 Ta_2O_5 、 TiO_2 、 HfO_2 、 ZrO_2 、 Si_3N_4 からなる群から選択される。なお、組成は必ずしもストイキオメトリに一致する必要はなく、酸素または窒素がストイキオメトリと比べて多い状態または少ない状態であってもよい。さらに、非極性材料の層 120 は、上記材料を 2 種類以上含む複合材料の層であってよい。もしくは、不純物をドーピングすることで屈折率を調整してもよい。これにより、非極性材

料の層 1 2 0 の屈折率と極性部材 1 1 の屈折率との差を小さくすることができるので、角周波数 ω_1 の光と角周波数 ω_2 の光との間で位相整合を実現する角周波数の組み合わせの数を増やすことができる。たとえば、極性部材 1 1 を GaN で形成する場合は、Nb₂O₅ または TiO₂ で非極性材料の層 1 2 0 を形成してよい。極性部材 1 1 を AlN で形成する場合は、Ta₂O₅、HfO₂、Si₃N₄ などを用いてよい。アモルファスの非極性材料の層 1 2 0 は、PVD 法、CVD 法、または原子層堆積（ALD : Atomic Layer Deposition）法などにより形成される。CVD 法や ALD 法を用いることで、極性部材 1 1 の側面 1 1 1 と 1 1 2 に対して被覆性の良い非極性材料の層 1 2 0 を形成できる。

[0033] 図 5 D で、異方性エッチングにより、非極性材料の層 1 2 0 を加工して、極性部材 1 1 の両側の側面 1 1 1 と 1 1 2 に接する第 1 非極性部材 1 2 を形成する。これにより、波長変換素子 1 0 A のコア 1 5 A が得られる。極性部材 1 1 を十分な深さでエッチングすることで、基板 5 から離れた部分の結晶品質が良好なコア 1 5 A が得られる。結晶品質が良好な部分に光を集中させることで光損失が低減され、変換効率を向上させることができる。図 5 A から 5 D の工程は、量産に適したウェハプロセスで実現可能であり、シンプルな構成のコア 1 5 A を簡便なプロセスで作製できる。このあとにクラッド 1 6 をさらに形成してもよい。クラッド 1 6 は空気でもよい。

[0034] （第 2 変形例）

図 6 A は、波長変換素子 1 0 の第 2 変形例の波長変換素子 1 0 B の模式図である。波長変換素子 1 0 B の光導波路 2 0 B は、極性部材 1 1 と、第 1 非極性部材 1 2 B とで構成されるコア 1 5 B を有する。第 1 非極性部材 1 2 B は、極性部材 1 1 の両側の側面 1 1 1 及び 1 1 2 と、上面に接している。図 5 D の工程で、異方性エッチングの終了時点を制御することで、図 6 A の形状のコア 1 5 B が得られる。極性部材 1 1 の上面が露出する前に非極性材料の層 1 2 0 の異方性エッチングを終了することで、基板 5 の主面 5 0 1 上に非極性材料の薄膜 1 2 1 が残る。図 6 A の形状のコア 1 5 B は、極性部材 1

1 を削り過ぎることなく極性部材 1 1 の膜厚を維持できる点で有利である。
また、非極性材料の薄膜 1 2 1 が残るようにすることで、極性部材 1 1 の側面と接する第 1 非極性部材 1 2 B が削れることを低減することができる。これにより、実効屈折率の制御を容易に行うことができる。

[0035] (第 3 変形例)

図 6 B は、波長変換素子 1 0 の第 3 変形例の波長変換素子 1 0 C の模式図である。波長変換素子 1 0 C の光導波路 2 0 C は、基板 5 の主面 5 0 1 の上に、極性部材 1 1 C と第 1 非極性部材 1 2 とで構成されるコア 1 5 C を有する。第 1 非極性部材 1 2 B は、極性部材 1 1 の両側の側面 1 1 1 及び 1 1 2 と、上面に接している。図 5 B の工程で、極性材料の層 1 1 0 の異方性エッチングの終了時点を制御することで、図 6 B の形状のコア 1 5 C が得られる。基板 5 の主面 5 0 1 が露出する前に極性材料の層 1 1 0 の異方性エッチングを終了することで、基板 5 の主面 5 0 1 上に、極性材料の薄膜 1 1 5 が残るが、光をコア 1 5 C の内部に効果的に閉じ込めることができる。図 6 B の形状のコア 1 5 C も、極性部材 1 1 を削り過ぎることなく、膜厚を確保できる点で有利である。

[0036] (第 4 変形例)

図 6 C は、波長変換素子 1 0 のさらに別の変形例を示す模式図である。図 6 A の構成と、図 6 B の構成を組み合わせることで波長変換素子 1 0 C' の構成にしてもよい。光導波路 2 0 C' は、基板 5 の主面 5 0 1 の上に、極性部材 1 1 C と第 1 非極性部材 1 2 B とで構成されるコア 1 5 C' を有する。第 1 非極性部材 1 2 B は、極性材料の薄膜 1 1 5 と極性部材 1 1 C の上面とを覆って設けられ、コア 1 5 C' を覆ってクラッド 1 6 が形成される。図 6 C の構成でも、極性部材 1 1 C を削り過ぎることなく、膜厚を確保できる。

[0037] <コア幅の評価>

図 7 は、位相整合条件を満たすコア幅を求めるモデル図である。この例では、図 4 のコア形状をモデルに採用する。基板 5 をサファイア、コア 1 5 の極性部材 1 1 を A l N、極性部材 1 1 の両側面を挟む第 1 非極性部材 1 2 を

Ta_2O_5 、コア15を覆うクラッド16を Al_2O_3 とする。これにより、コアの幅および高さ、コアの屈折率、クラッドの屈折率、および基板の屈折率が定義できる。これらの情報から、有限要素法により電磁界分布および実効屈折率を得ることができる。コア15の高さ h を400 nm、極性部材11の幅 W を300 nmに固定し、第1非極性部材12の幅を変えてコア15の幅 W を変化させる。このモデルを用いて波長810 nmの光（角周波数 ω_1 ）と、波長405 nmの光（角周波数 ω_2 （ $=2 \times \omega_1$ ））に対するコア15の実効屈折率 n_{eff} を計算する。上述したように、光導波路20で、実効屈折率 n_{eff} の横モード依存性（モード分散）を利用して位相整合させるために、波長810 nmの基本波 TM_{00} モードと、波長405 nmの第2高調波 TM_{20} モードにおける実効屈折率 n_{eff} が同じか、または十分に近接している必要がある。

[0038] 図8Aと図8Bは、光導波路20内の2つの横モードの電磁界分布を示す。図8Aに示す波長810 nmの TM_{00} モードは、基本波であるポンプ光の導波モードである。図3で示した模式的な電場強度分布のように、一つのピークがコア15の中央に存在する。図8Bに示す波長405 nmの TM_{20} モードは、第2高調波の TM_{20} モードである。3つの電場の腹が1つの極性部材11と2つの第1非極性部材12に1つずつ位置している。

[0039] 図9は、極性部材11の幅 W_1 を300 nmに固定した状態でコア15の幅 W を変えたときの TM_{00} モードと TM_{20} モードにおける実効屈折率 n_{eff} の計算結果である。白丸は角周波数 ω_1 の横モード（ TM モード）における分散曲線の計算結果を表す。黒丸は角周波数 ω_2 の横モード（ TM モード）における分散曲線の計算結果を表す。コア15の幅 W が550 nmのときに、角周波数 ω_1 の TM_{00} モードの実効屈折率と角周波数 ω_2 の TM_{20} モードの実効屈折率が一致する。したがって、極性部材11の幅 W_1 が300 nmのときに、コア15の幅 W を550 nmに設定することで、基本波 TM_{00} モード（810 nm）と、第2高調波 TM_{20} モード（405 nm）とを位相整合させることができる。すなわち、 X 方向は0次と2次のモードを利用し、 Y 方向は互いに0次のモードで位相整合する。これにより、結合定数 κ が大きくなり

、効率よく波長変換することができる。

[0040] 図9で、第2高調波 TM_{20} (405 nm) の分散曲線以外に示されている黒丸の分散曲線は、第2高調波の TM_{m0} モードであり (mは0、1、および3以上の整数)、コア15の幅Wが550 nmの近傍で、複数の高次モードの存在が許容される。同様に、基本波 TM_{00} (810 nm) の分散曲線以外に示されている白丸の分散曲線は、810 nmの高次モード (例えば1次のモード) であり、コア15の幅Wが550 nmの近傍で、高次モードの存在が許容される。ただし、図9から、この幅の近傍では、810 nmの高次モードは405 nmの TM_{20} モードと位相整合しないことがわかる。コア15の幅Wがさらに広く800 nmを超えると、810 nmの高次モードが現れる。ただし、この幅領域では、基本波 TM_{00} モードと第2高調波 TM_{20} モードは位相整合しない。

[0041] ここから、光導波路20の光軸と直交する断面において、コア15の幅は、第1角周波数の成分 (第1周波数成分) に対して存在可能なモード数が3以下となる幅であり、かつ、第1角周波数よりも大きな第2角周波数の高調波成分 (第2周波数成分) に対して存在可能なモード数が2以上となる幅である。コア15の幅Wは、極性部材11の幅W1の1.5倍以上、4倍以下、好ましくは1.75倍以上、3.5倍以下、より好ましくは2倍以上、3倍以下であってよい。これにより、位相整合が可能な光導波路の幅の自由度が向上する。

[0042] 極性部材11の幅W1を100 nmから1000 nmの範囲で加工可能として、基本波 TM_{00} モードと第2高調波 TM_{20} モードが横モード位相整合条件を満たすように、コア15の幅を200 nm以上2000 nm以下の範囲で適切に選択することができる。また、極性部材11の幅W1が100 nmから500 nmの範囲であるとき、コア15の幅を200 nm以上1000 nm以下の範囲としてもよい。

[0043] 図9から、ポンプ光の角周波数と、シグナル光の角周波数と、コアの屈折率と、クラッドの屈折率と、が決まれば、位相整合条件を満足するコア幅を

求められることが示される。この例では、810 nmから405 nmへのSHGが生じるための位相整合条件を説明したが、実施形態はこれに限られない。波長変換は、405 nmから810 nmへの光パラメトリック過程であってもよい。また、和周波発生または差周波発生により任意の角周波数への変換であってもよい。また、ポンプ光とシグナル光とで位相整合条件を満たす横モードの組を見つければよいので、 TM_{00} モードと TM_{20} モードの位相整合に限られず、共に高次モードで位相整合してもよい。たとえば、 TM_{p0} モードと TM_{q0} モード（ p 、 q は1以上の整数）であってもよい。

[0044] <第2実施形態>

図10は、第2実施形態の波長変換素子10Dの断面図である。波長変換素子10Dは、基板5の主面501の上に配置される光導波路20Dを有する。光導波路20Dのコア15Dは、2次の非線形光学定数を有する極性部材11と、XY断面の主面501と平行な方向（X方向）で極性部材11と隣接して配置される第1非極性部材12と、第1非極性部材12の外側に配置されて第1非極性部材12の側面と接する第2非極性部材13と、を有する。第2非極性部材13の屈折率は第1非極性部材12の屈折率よりも大きい。第1非極性部材12の「外側」とは、XY断面のX方向で見たときに極性部材11を中心として外側という意味である。このとき、第1非極性部材12は極性部材11と第2非極性部材13との間に位置する。

[0045] 極性部材11の屈折率を n_1 、第1非極性部材12の屈折率を n_2 、第2非極性部材13の屈折率を n_3 とすると、 $n_1 > n_3 > n_2$ である。たとえば、極性部材11にGaNを用い、第1非極性部材12にSiO₂を用い、第2非極性部材13にTa₂O₅を用いることができる。波長と導波モードを別々にみると、ポンプ光の波長の光と信号光の波長の光が感じる材料の屈折率 n_{mat} は、 $n_{\text{mat}}(\omega_1) < n_{\text{mat}}(\omega_2)$ であり、短波長の信号光が感じる屈折率が高い。また、 TM_{00} モードと TM_{20} モードにおける実効屈折率の大小関係は $n_{00} > n_{20}$ であり、 TM_{00} モードが感じる屈折率が、 TM_{20} モードが感じる屈折率よりも大きい。ここで、実効屈折率の横モード依存性を利用して、 $n_{00}(\omega_1)$

$= n_{m0}(\omega_2)$ の位相整合条件を満たすようにする。

[0046] コア15Dの構成をとることで、極性部材11に光密度を集中させ、かつ、横モードの分散を利用して位相整合をとることができる。TM₂₀モードの第2高調波である信号光は、第1非極性部材12と、第1非極性部材12に挟まれた極性部材11への閉じ込めによってコア15Dの外へのしみ出しが低減される。TM₂₀モードの腹の1つを極性部材11へ集中させることができるので、数1により、結合定数 κ を大きくして、効率よく非線形分極による波長変換を行うことができる。また、TM₀₀モードのポンプ光にとっては、第2非極性部材13の屈折率が見えて、コア15を伝搬する際に感じる屈折率が高くなる。

[0047] 第2実施形態の構成は、材料の屈折率を選択することで、横モードの分散を利用する位相整合の設計の自由度が大きくなる。

[0048] <第3実施形態>

図11は、第3実施形態の波長変換素子10EのXY断面図である。波長変換素子10Eは、基板5の主面501の上に配置される光導波路20Eを有する。光導波路20Eのコア15Eは、極性部材11の上面と第1非極性部材12の上面に配置される第3非極性部材14をさらに有する。第3非極性部材14の屈折率の大きさは、極性部材11の屈折率の大きさ以上である。この構成では、極性部材11以上の屈折率を有する第3非極性部材14により、光は基板5よりも第3非極性部材14の近くで導波できる。したがって、結晶状態が良好なコア15の上側に光をより集中させて損失を低減し、変換効率が向上する。コア15の上側は、基板5とコア15の界面よりも極性部材11の結晶品質が良好だからである。たとえば、極性部材11にAlNを用い、第1非極性部材12にTa₂O₅を用い、第3非極性部材14にNb₂O₅を用いると、極性部材11と第1非極性部材12の屈折率はほぼ同じになり、第3非極性部材14の屈折率が、極性部材11と第1非極性部材12の屈折率以上になる。

[0049] 図12は、波長変換素子10Eを伝搬する光の模式図である。ポンプ光と

信号光を含む光Lは、クラッド16との屈折率の差が大きいコア15Eの上部に集中する。この状態で、ポンプ光の TM_{00} モードにおける実効屈折率と、信号光の TM_{20} モードにおける実効屈折率が同等になり、位相整合条件が満たされる。第3実施形態の構成は、コア15内の屈折率分布を調整することで、損失を低減し変換効率を高めることができる。

[0050] <第4実施形態>

図13は、第4実施形態の波長変換素子10Fの断面図である。波長変換素子10Fは、基板5の主面501の上に配置される光導波路20Fを有する。光導波路20Fのコア15Fは、極性部材11Fと、極性部材11Fの両側の側面で接する第1非極性部材12を有する。極性部材11Fは、基板5の主面501の法線方向に、第1極性部材116と、第2極性部材117及び／または第3極性部材118と、を有する。第1極性部材116は、基板5と、第2極性部材117または第3極性部材118との間に配置される。第2極性部材117及び第3極性部材118の屈折率は、それぞれ第1極性部材116の屈折率よりも大きい。第2極性部材117と第3極性部材118のいずれか一方だけを用いてもよい。

[0051] 極性部材11Fを窒化物で形成する場合は、 $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 \leq x \leq 1$)の組成 x を調整することで、第1極性部材116と、第2極性部材117と、第3極性部材118の屈折率を調整してもよい。たとえば、第1極性部材116を $AlGaIn$ で形成し、第2極性部材117または第3極性部材118を、 GaN で形成してもよい。極性部材11Fに $InGaIn$ を用いてもよい。第4実施形態の構成も結晶状態が良好なコア15Fの上側に光を集中させて損失を低減し、変換効率を向上することができる。また、第2極性部材117および第3極性部材118の両方があるとき、第3極性部材118の屈折率が第1極性部材116の屈折率および第2極性部材117の屈折率と比べて大きくてよい。これにより、光は基板5よりも第3極性部材118の近くで導波できる。第3極性部材118の結晶品質は第1極性部材116の結晶品質よりも高いので、光を第1極性部材116よりも第3極性部材1

18の近くに集中させて、光損失を低減することができる。

[0052] 図14は、第4実施形態の変形例である波長変換素子10Gの断面図である。波長変換素子10Gは、基板5の主面501の上に配置される光導波路20Gを有する。光導波路20Gのコア15Gは、極性部材11Gと、極性部材11Gの両側の側面で接する第1非極性部材12を有する。極性部材11Gは、複数種類の結晶格子の周期的な重ね合わせである超格子を有する。超格子のヘテロ界面で生じるピエゾ電場により、極性部材11Gの結合定数 κ を大きくし、変換効率を高めることができる。たとえば、所定の膜厚に制御されたAlGaIn薄膜114とGaIn薄膜113を所定の繰り返し数で基板5の主面501上に積層することで、GaIn/AlGaIn超格子が形成される。

[0053] <第5実施形態>

第1実施形態から第4実施形態またはそれらの変形例において、極性部材の高さと非極性部材の高さはかならずしも一致しなくてもよい。例えば、極性部材の高さは非極性部材の高さよりも高くても低くてもよい。角周波数 ω_1 と角周波数 ω_2 の値、極性部材と非極性部材の材料の組み合わせおよび極性部材と非極性部材の幅などに応じて極性部材の高さと非極性部材の高さを適宜設定することができる。以下にその一例を示す。

[0054] 図15は第5実施形態の波長変換素子10Hの断面図である。波長変換素子10Hは、基板5の主面501の上に配置される光導波路20Hを有する。光導波路20Hのコア15Hは、極性部材11と、極性部材11の両側の側面で接する第1非極性部材12を有する。極性部材11と第1非極性部材12で形成されるコア15Hは、クラッド16に囲まれている。第5実施形態では、極性部材11の高さは第1非極性部材12の高さよりも低い。たとえば、エッチングの工程において第1非極性部材12の角部12xが変形したとしても、極性部材11の高さが第1非極性部材12の高さよりも低いので、コア15Hを伝搬する光は変形した角部12xの影響を受けにくい。したがって、極性部材11と第1非極性部材12との高さの差のバラツキによ

る位相整合条件のズレが設計値に対して小さく、所望の波長変換ができる。

[0055] 図16は第5実施形態の変形例である波長変換素子10Iの断面図である。以下に説明する点以外は図15に示す波長変換素子10Hと同じである。すなわち、基板5は凸部5xを有し、凸部5xの主面502に極性部材11が配置されている。第1非極性部材12は基板5の凸部5xが設けられていない主面501の上に配置され、第1非極性部材12は極性部材11の両側の側面で極性部材11と接している。

[0056] コア15Iの一部をなす第1非極性部材12と、クラッド16の一部とが基板5の主面501の上に配置され、コア15Iの一部をなす極性部材11が基板5の凸部5xの主面502に配置されている。これにより、基板5の主面501と平行なX方向において、極性部材11の下凸部5xを含む部分の実効屈折率は、凸部5xを含むことで、極性部材11を含む部分のX方向の実効屈折率よりも低くなる。したがって、光導波路20Iを伝搬する光は、実効屈折率が相対的に高い極性部材11を含む部分に効率よく閉じ込められ、基板5の影響による損失を低減することができる。また、極性部材11の高さが第1非極性部材12の高さよりも低いので、図15に示す波長変換素子10Hと同様に、コア15Iを伝搬する光は変形した角部12xの影響を受けにくい。よって、極性部材11と第1非極性部材12との高さの差のバラツキによる位相整合条件のズレが設計値に対して小さく、所望の波長変換ができる。

[0057] <波長変換素子の適用例>

図17は、実施形態の波長変換素子10を用いた光源装置100の模式図である。光源装置100は、レーザダイオード等の光源101と、光源101と光学的に結合する波長変換素子10と、を含む。波長変換素子10は、上述した実施例、及び変形例の波長変換素子10Aから10Iのいずれの構成を有していてもよい。光源101は角周波数 ω_0 の光を出射する。波長変換素子10に入射したレーザ光とコア15との相互作用により、角周波数 $2 \times \omega_0$ の第2高調波が生成され、波長変換素子10から出力される。たとえば、

青色波長帯の光を出射する光源 101 を用いると、波長変換素子 10 における S H G により、光源装置 100 から紫外光を出射することができる。光源装置 100 は高効率の紫外光源として用いられる。

[0058] 図 18 は、実施形態の波長変換素子 10 を用いた光回路 200 の模式図である。光回路 200 は、光源 101 と、光源 101 と光学的に結合するモード変換器 103 と、モード変換器 103 に光学的に結合する波長変換素子 10 とを有する。光源 101 から出射された ω_1 の基本モードの光は、モード変換器 103 で高次モードの光に変換される。モード変換器 103 は、光導波路で形成される Y 字型導波路、方向性結合器、またはマルチモード干渉計などを用いることができる。モード変換器 103 は、波長変換素子 10 と連続的に接続されてもよく、波長変換素子 10 の一部をモード変換器 103 として利用してもよい。

[0059] モード変換された ω_1 の光は、ポンプ光として波長変換素子 10 に入射する。ポンプ光と波長変換素子 10 の光導波路 20 との相互作用により光パラメトリック過程が生じ、 ω_2 の光子が生成される。光パラメトリック過程で生じた信号光を、センサ回路等を構成する回路素子 105 に入力する。あるいは、モード変換器 103 から出力されるポンプ光とともに別の波長の信号光を波長変換素子 10 に入射して、差周波発生や和周波発生を発生させてもよい。光回路 200 で、光パラメトリック過程を利用した高感度のセンサが実現される。波長変換素子 10 は、横モードによる位相整合を利用した導波路波長変換器であり、モード変換器 103 や光源 101 との集積が可能である。これによりシンプルな構成で変換効率のよい光回路 200 が実現される。

[0060] 以上、特定の構成例に基づいて説明してきたが、本開示は上述した構成例に限定されない。各実施形態あるいは変形例は互いに組み合わせ可能である。たとえば、図 13 及び図 14 の第 4 実施形態の極性部材 11F または 11G の構成を、図 1、図 10、及び図 11 の極性部材 11 に適用してもよい。図 11 の第 3 実施形態の構成を、図 10 の第 2 実施形態の構成に組み合わせてもよい。実施形態の波長変換素子を、光センサ用の光増幅器として使用す

る他、電流注入で生成するのが困難な紫外光や中赤外光を出力する光源装置に適用できる。

[0061] 本開示の実施形態は、例えば、以下のような構成を含んでよい。

(項 1)

主面を有する基板と、
前記基板の前記主面に配置される光導波路と、
を備え、
前記光導波路のコアは、2次の非線形光学定数を有する極性部材と、前記基板の前記主面と平行な方向で前記極性部材と隣接して配置される第1非極性部材と、を含み、
前記光導波路の光軸と直交する断面で、前記極性部材の一方または両方の側面と前記第1非極性部材とが接している、
波長変換素子。

(項 2)

前記第1非極性部材は、前記光導波路の前記光軸と直交する前記断面で、前記極性部材の前記両方の側面と接する、
項 1 に記載の波長変換素子。

(項 3)

前記コアは、前記光軸と直交する前記断面で前記極性部材から見て前記第1非極性部材の外側に、前記第1非極性部材の側面と接して設けられる第2非極性部材、
をさらに有し、

前記第2非極性部材の屈折率は、前記第1非極性部材の屈折率よりも大きい、
項 2 に記載の波長変換素子。

(項 4)

前記コアは、前記極性部材の上面と前記第1非極性部材の上面に配置される第3非極性部材をさらに有し、

前記第3非極性部材の屈折率の大きさは、前記極性部材の屈折率の大きさ以上である、

項1から3のいずれかに記載の波長変換素子。

(項5)

前記極性部材は、前記基板の前記主面の法線方向に、第1極性部材と、第2極性部材と、を有し、

前記第1極性部材は、前記基板と前記第2極性部材との間に配置され、

前記第2極性部材の屈折率は、前記第1極性部材の屈折率よりも大きい、
項1から4のいずれかに記載の波長変換素子。

(項6)

前記光導波路の前記光軸と直交する前記断面において、前記コアの幅は、第1角周波数の第1周波数成分に対して存在可能なモード数が3以下となる幅であり、かつ、前記第1角周波数よりも大きな第2の角周波数の第2周波数成分に対して存在可能なモード数が2以上となる幅である、

項1から5のいずれか1項に記載の波長変換素子。

(項7)

前記光軸と直交する前記断面で、前記コアの幅は200nm以上2000nm以下である、

項1から6のいずれか1項に記載の波長変換素子。

(項8)

前記光軸と直交する前記断面で、前記コアの幅は前記極性部材の幅の1.5倍以上4倍以下である、

項1から7のいずれかに記載の波長変換素子。

(項9)

前記極性部材は、c軸方向に分極をもつウルツ鉱型結晶で形成されている、

項1から8のいずれかに記載の波長変換素子。

(項10)

前記極性部材の c 軸は前記基板の前記主面に対して垂直である、
項 9 に記載の波長変換素子。

(項 1 1)

前記極性部材は、 $Al_xGa_{1-x}N$ (ただし、 $0 \leq x \leq 1$) で形成されている、
請求項 1 から 10 のいずれかに記載の波長変換素子。

(項 1 2)

前記第 1 非極性部材は、アモルファス層である、
項 1 から 11 のいずれかに記載の波長変換素子。

(項 1 3)

前記第 1 非極性部材は、 Nb_2O_5 、 Ta_2O_5 、 TiO_2 、 HfO_2 、 ZrO_2 、 Si_3N_4 からなる群から選択される 1 つである、
項 1 から 12 のいずれかに記載の波長変換素子。

(項 1 4)

レーザ素子と、
前記レーザ素子と光学的に結合するモード変換器と、
前記モード変換器と光学的に結合する、項 1 から 13 のいずれかに記載の
波長変換素子と、
を備える、光回路。

(項 1 5)

レーザ素子と、
前記レーザ素子と光学的に結合する項 1 から 13 のいずれかに記載の波長
変換素子と、
を備える光源装置。

符号の説明

[0062] この出願は 2023 年 6 月 27 日に提出された日本国特許出願第 2023-105432 号に基づいてその優先権を主張するものであり、この日本国特許出願の全内容を含む。

- [0063] 5 基板
- 5 0 1 主面
 - 1 0、1 0 A乃至1 0 I 波長変換素子
 - 1 1、1 1 F、1 1 G 極性部材
 - 1 1 1、1 1 2 側面
 - 1 1 6 第1極性部材
 - 1 1 7 第2極性部材
 - 1 1 8 第3極性部材
 - 1 2 第1非極性部材
 - 1 3 第2非極性部材
 - 1 4 第3非極性部材
 - 1 5、1 5 A乃至1 5 I コア
 - 1 6 クラッド
 - 2 0、2 0 A乃至2 0 I 光導波路
 - 1 0 0 光源装置
 - 1 0 1 光源
 - 1 0 3 モード変換器
 - 1 0 5 回路素子
 - 2 0 0 光回路

請求の範囲

- [請求項1] 主面を有する基板と、
前記基板の前記主面に配置される光導波路と、
を備え、
前記光導波路のコアは、2次の非線形光学定数を有する極性部材と、
前記基板の前記主面と平行な方向で前記極性部材と隣接して配置される第1非極性部材と、を含み、
前記光導波路の光軸と直交する断面で、前記極性部材の一方または両方の側面と前記第1非極性部材とが接している、
波長変換素子。
- [請求項2] 前記第1非極性部材は、前記光導波路の前記光軸と直交する前記断面で、前記極性部材の前記両方の側面と接する、
請求項1に記載の波長変換素子。
- [請求項3] 前記コアは、前記光軸と直交する前記断面で前記極性部材から見て前記第1非極性部材の外側に、前記第1非極性部材の側面と接して設けられる第2非極性部材、
をさらに有し、
前記第2非極性部材の屈折率は、前記第1非極性部材の屈折率よりも大きい、
請求項2に記載の波長変換素子。
- [請求項4] 前記コアは、前記極性部材の上面と前記第1非極性部材の上面に配置される第3非極性部材をさらに有し、
前記第3非極性部材の屈折率の大きさは、前記極性部材の屈折率の大きさ以上である、
請求項1に記載の波長変換素子。
- [請求項5] 前記極性部材は、前記基板の前記主面の法線方向に、第1極性部材と、第2極性部材と、を有し、
前記第1極性部材は、前記基板と前記第2極性部材との間に配置さ

れ、

前記第2極性部材の屈折率は、前記第1極性部材の屈折率よりも大きい、

請求項1から4のいずれか1項に記載の波長変換素子。

[請求項6] 前記光導波路の前記光軸と直交する前記断面において、前記コアの幅は、第1角周波数の第1周波数成分に対して存在可能なモード数が3以下となる幅であり、かつ、前記第1角周波数よりも大きな第2の角周波数の第2周波数成分に対して存在可能なモード数が2以上となる幅である、

請求項1から4のいずれか1項に記載の波長変換素子。

[請求項7] 前記光軸と直交する前記断面で、前記コアの幅は200nm以上2000nm以下である、

請求項1から4のいずれか1項に記載の波長変換素子。

[請求項8] 前記光軸と直交する前記断面で、前記コアの幅は前記極性部材の幅の1.5倍以上4倍以下である、

請求項1から4のいずれか1項に記載の波長変換素子。

[請求項9] 前記極性部材は、c軸方向に分極をもつウルツ鉱型結晶で形成されている、

請求項1から4のいずれか1項に記載の波長変換素子。

[請求項10] 前記極性部材のc軸は前記基板の前記主面に対して垂直である、
請求項9に記載の波長変換素子。

[請求項11] 前記極性部材は、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ （ただし、 $0 \leq x \leq 1$ ）で形成されている、

請求項9に記載の波長変換素子。

[請求項12] 前記第1非極性部材は、アモルファス層である、

請求項1から4のいずれか1項に記載の波長変換素子。

[請求項13] 前記第1非極性部材は、 Nb_2O_5 、 Ta_2O_5 、 TiO_2 、 HfO_2 、 ZrO_2 、 Si_3N_4 からなる群から選択される1つである、請求項

1 から 4 の何れか 1 項に記載の波長変換素子。

[請求項14]

レーザ素子と、

前記レーザ素子と光学的に結合するモード変換器と、

前記モード変換器と光学的に結合する請求項 1 から 4 の何れか 1 項
に記載の波長変換素子と、

を備える、光回路。

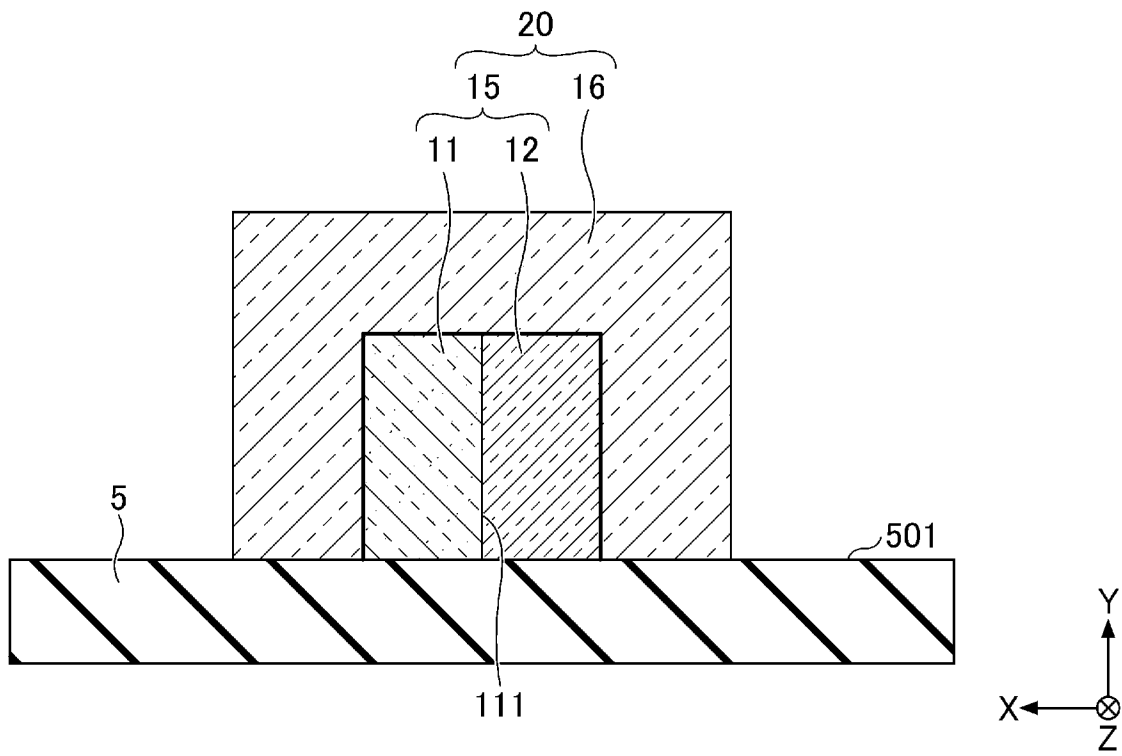
[請求項15]

レーザ素子と、

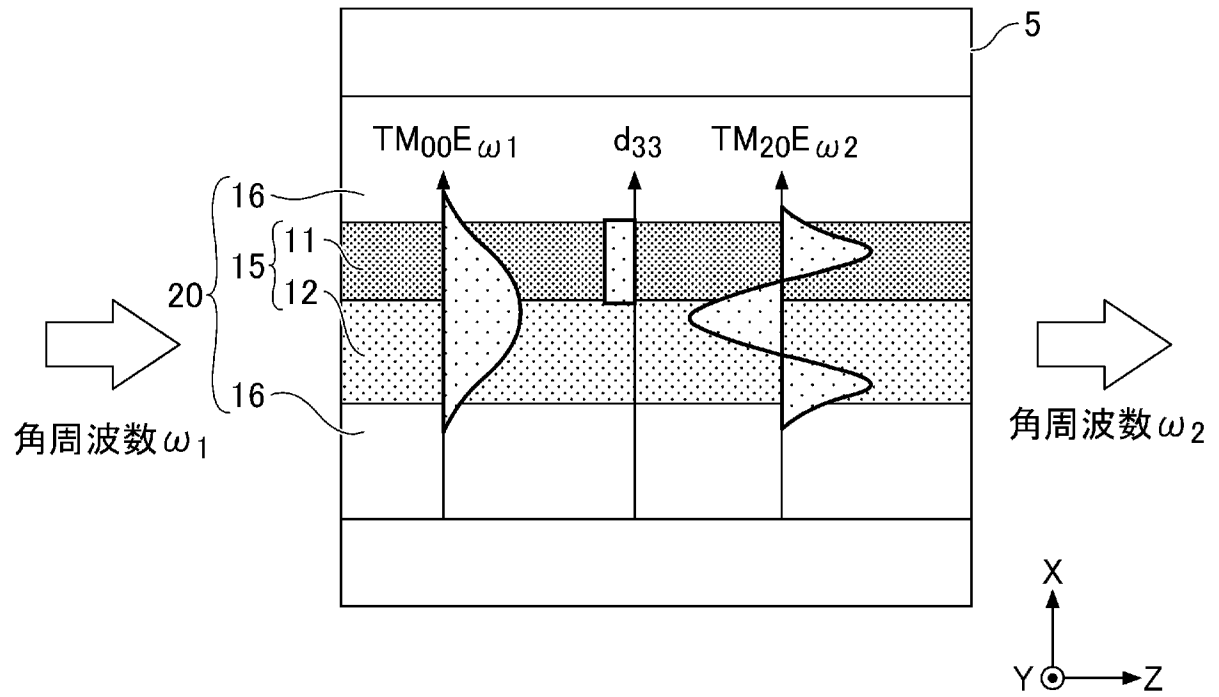
前記レーザ素子と光学的に結合する請求項 1 から 4 の何れか 1 項に
記載の波長変換素子と、

を備える光源装置。

[図2]

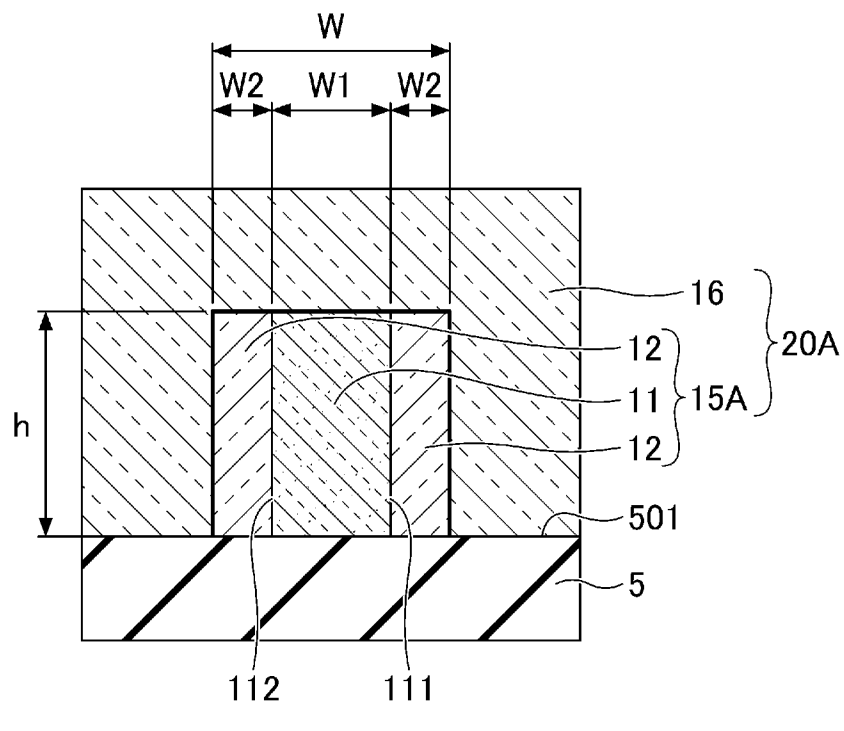
10

[図3]

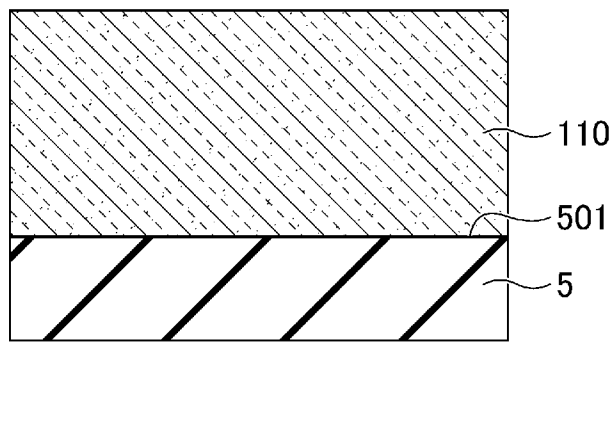
10

[図4]

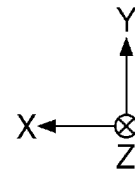
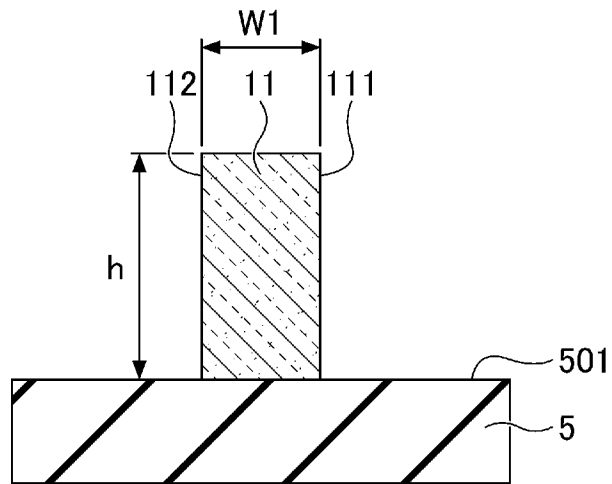
10A



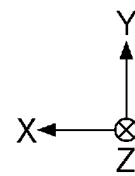
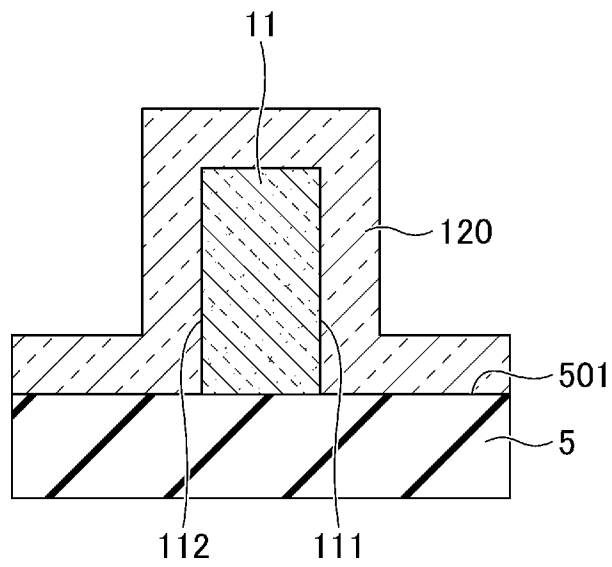
[図5A]



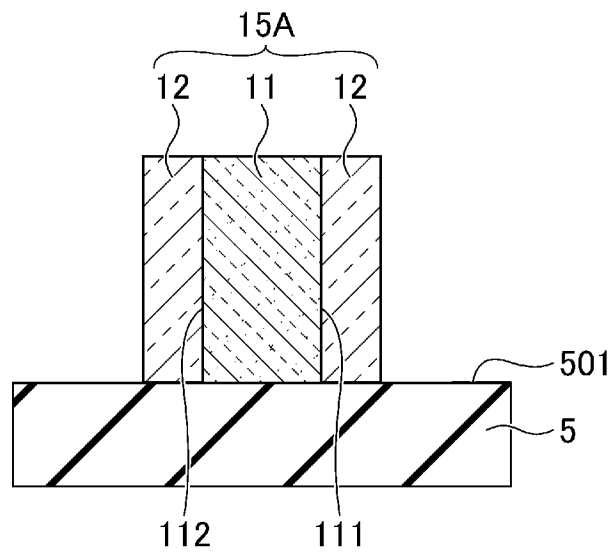
[図5B]



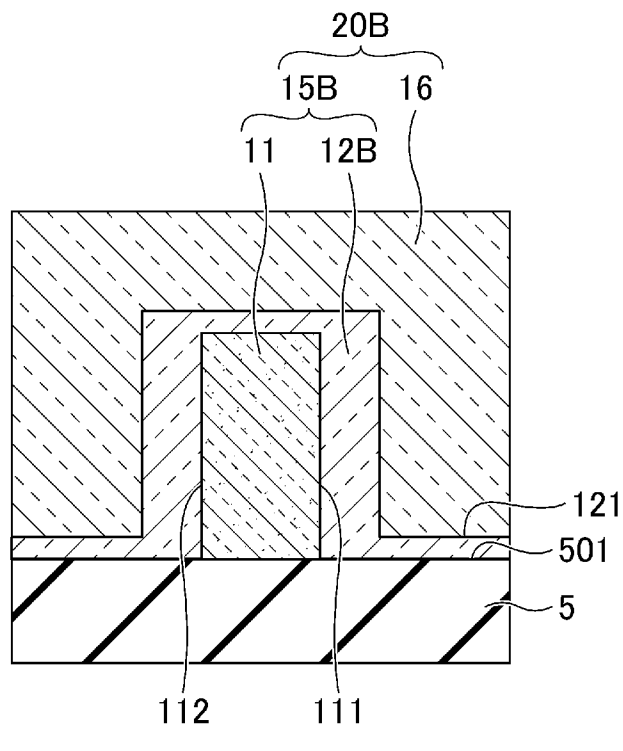
[図5C]



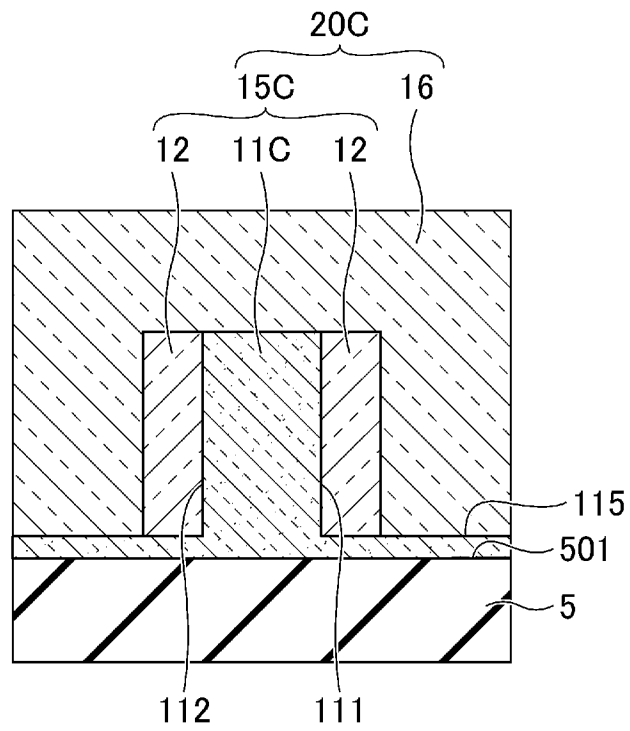
[図5D]



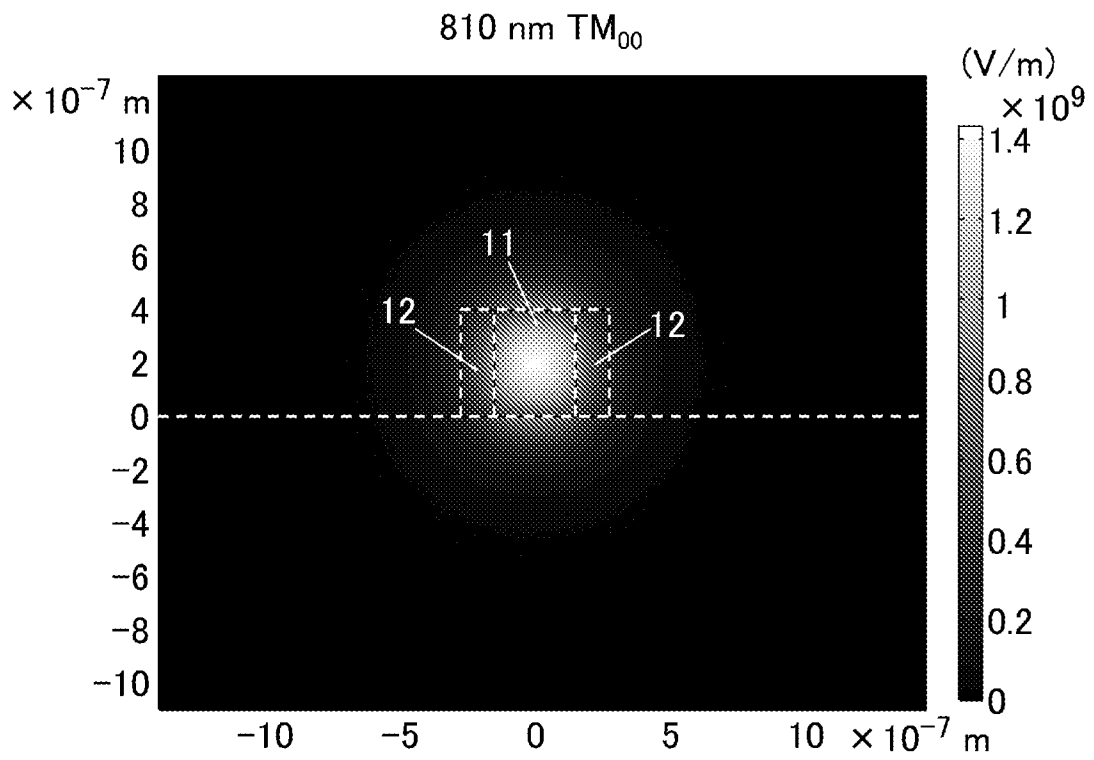
[図6A]

10B

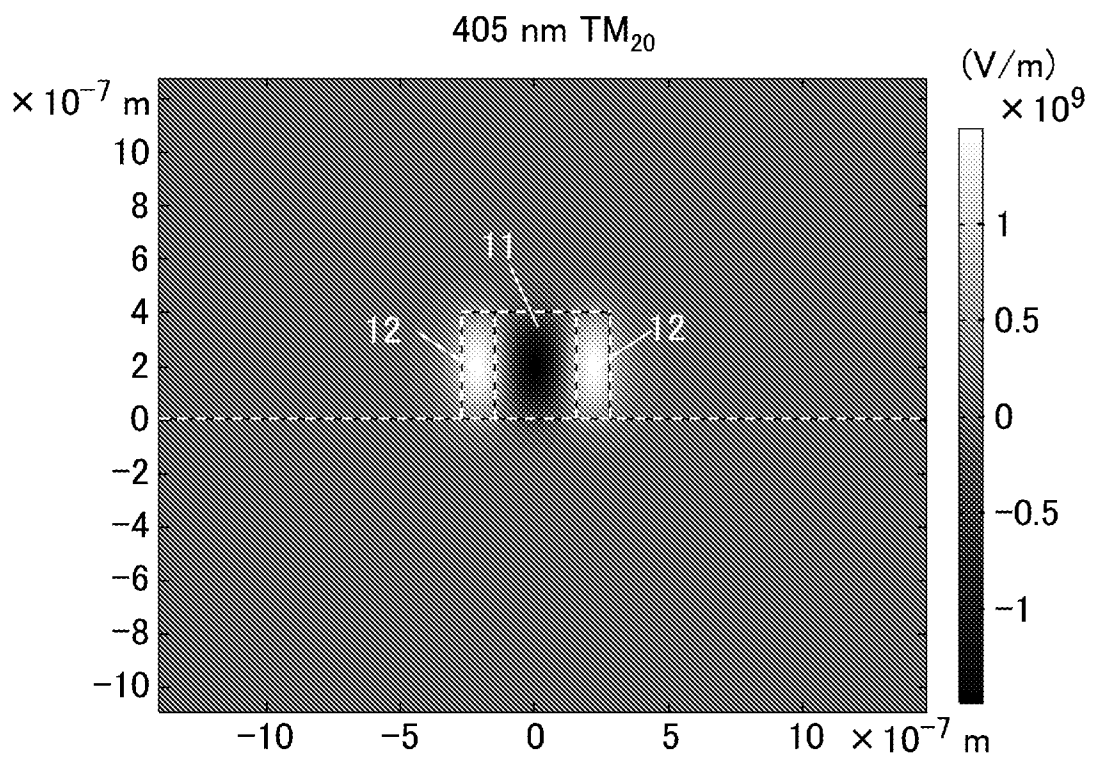
[図6B]

10C

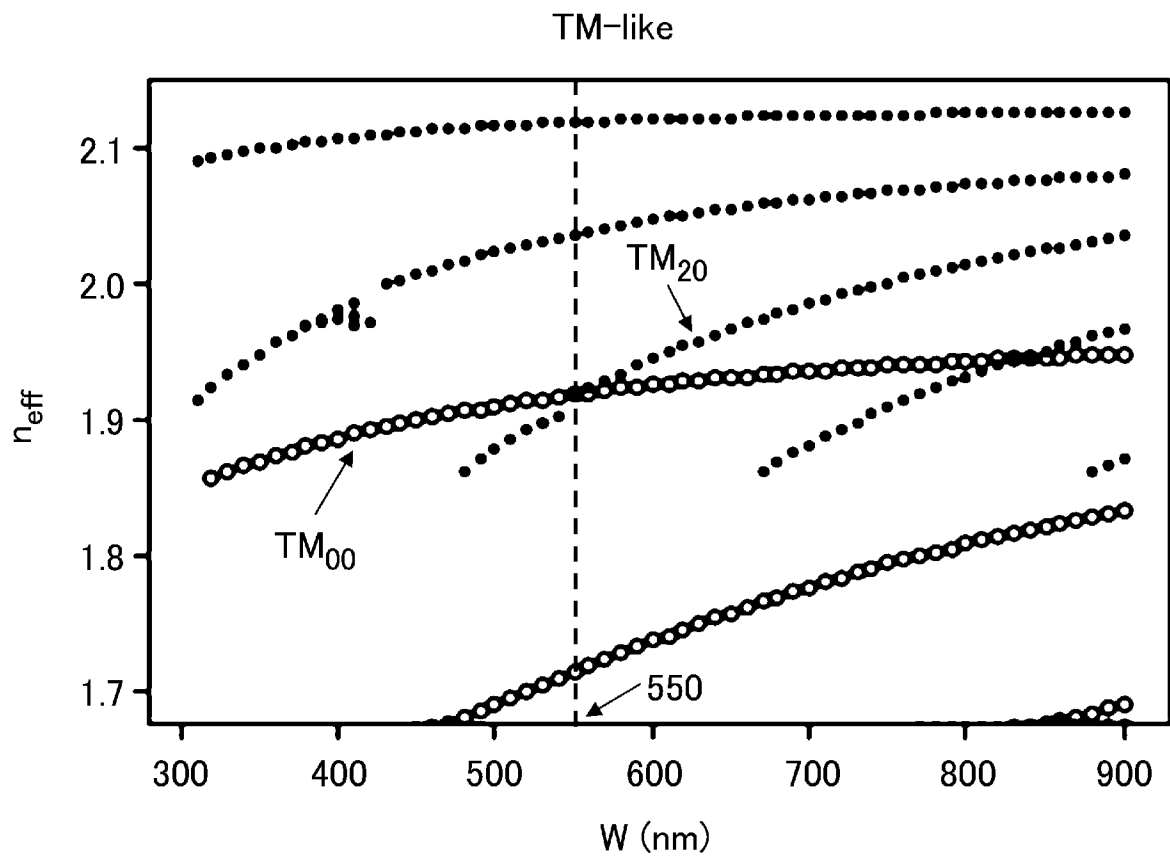
[図8A]



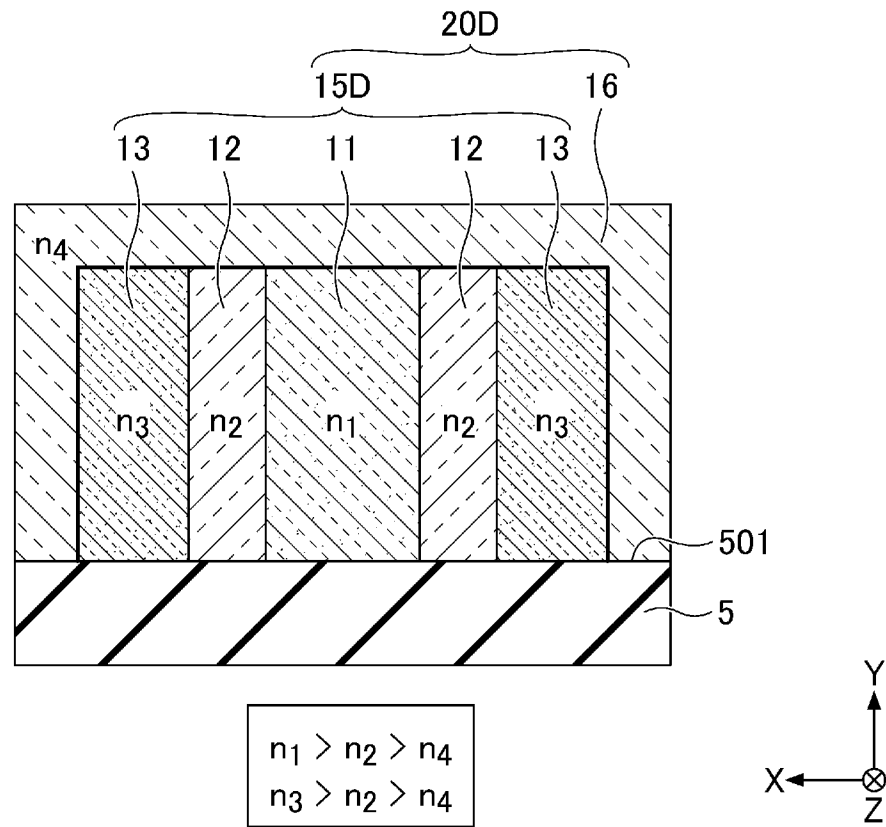
[図8B]



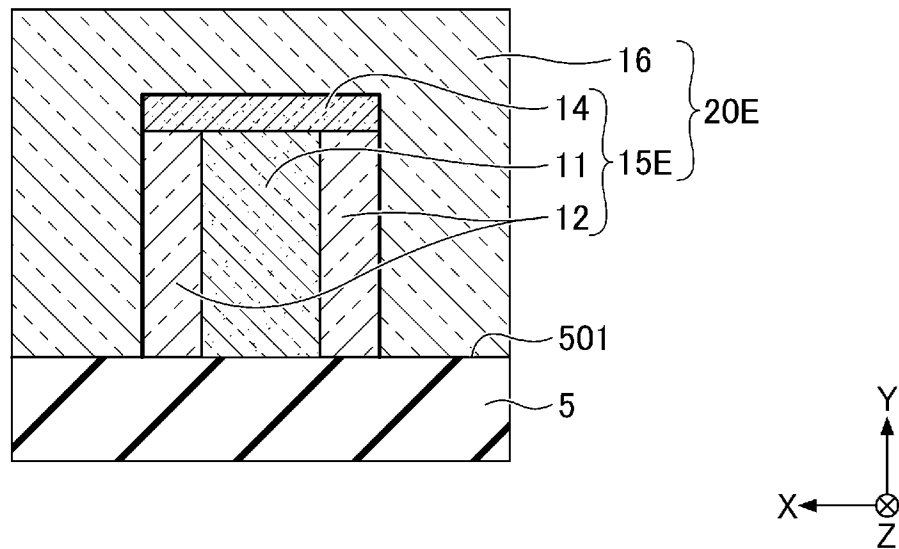
[図9]



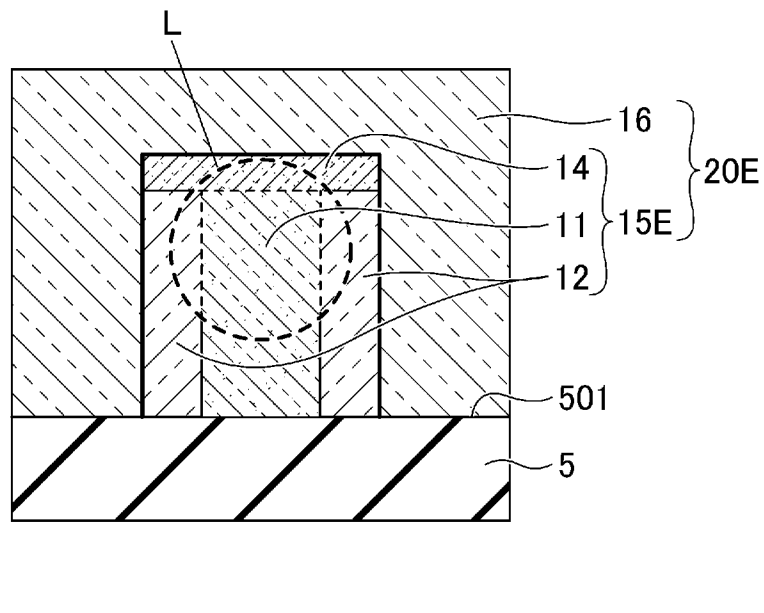
[図10]

10D

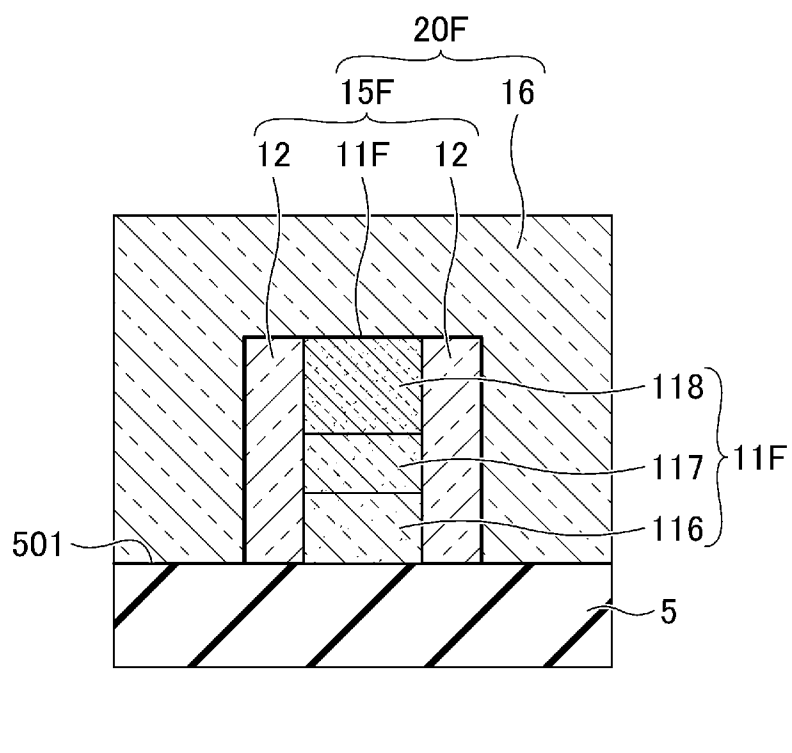
[図11]

10E

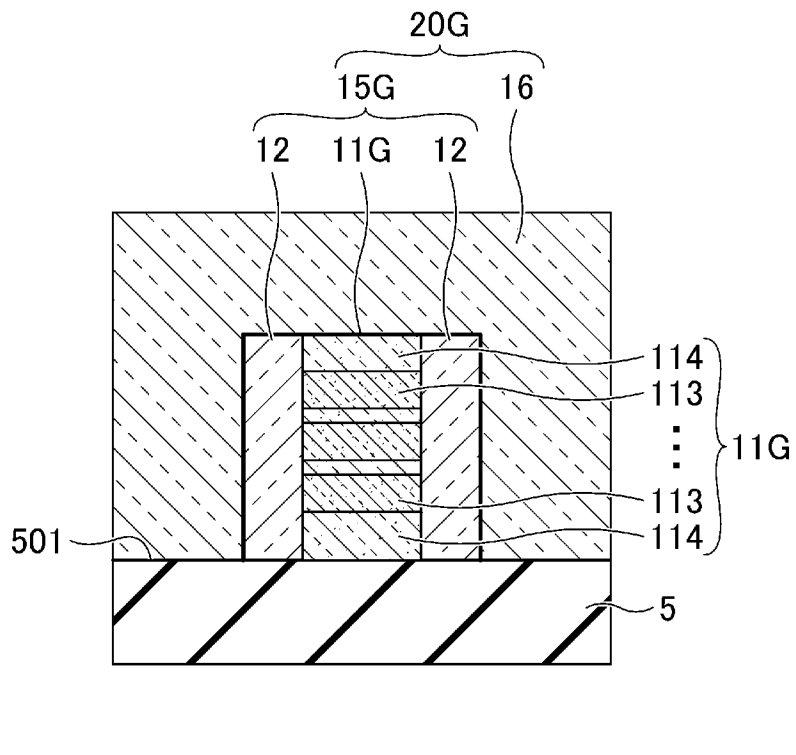
[図12]

10E

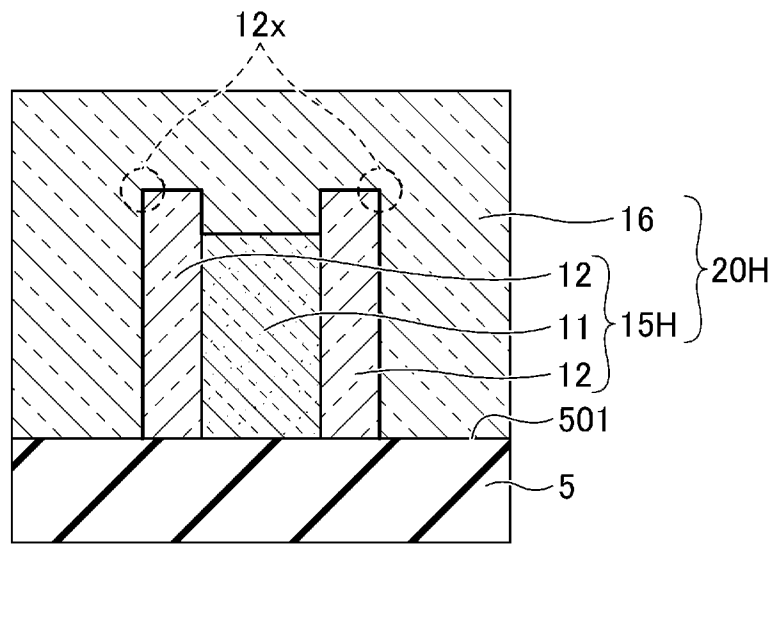
[図13]

10F

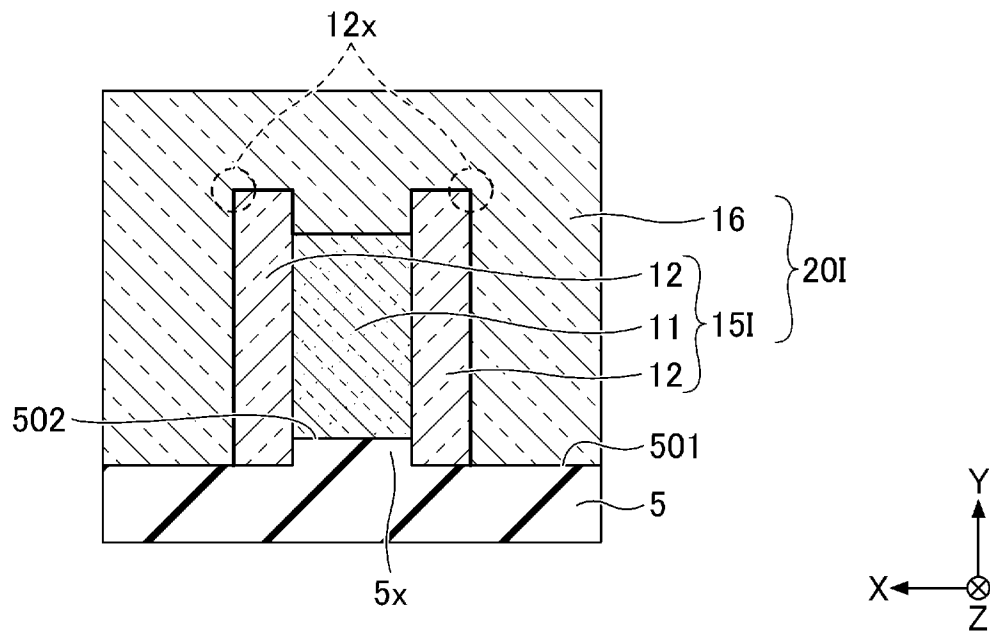
[図14]

10G

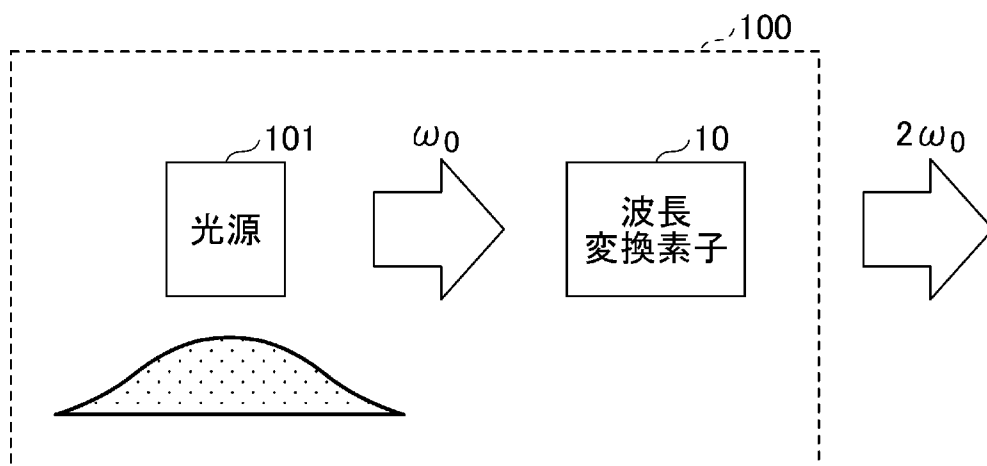
[図15]

10H

[図16]

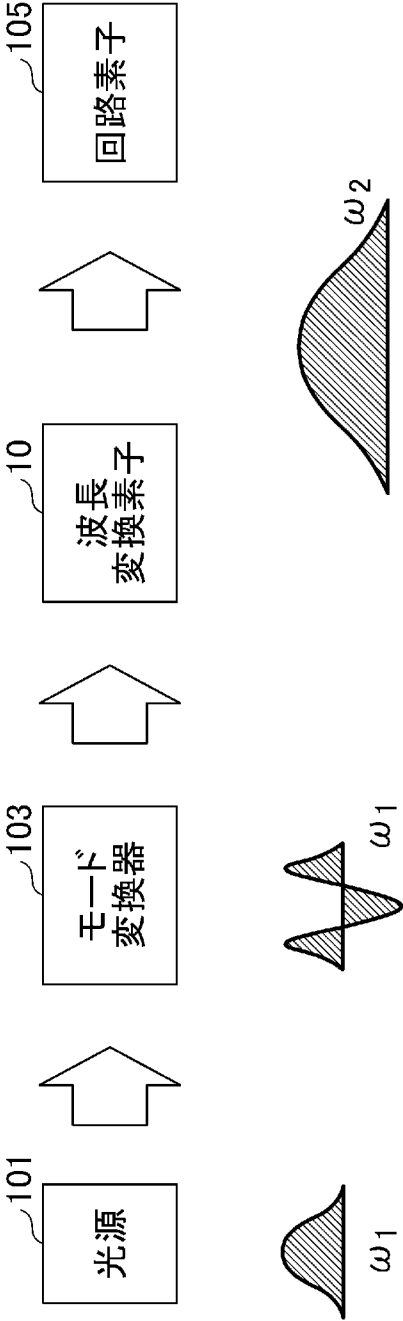
10I

[図17]



[図18]

200



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2024/023094

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G02F 1/377(2006.01)i
FI: G02F1/377

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)
G02F1/00-1/125; G02F1/21-7/00; G02B6/12-6/14

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 1971-2024
Registered utility model specifications of Japan 1996-2024
Published registered utility model applications of Japan 1994-2024

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
IEEE Xplore; SPIE Digital Library

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	本田啓人, 他, 230 nm遠紫外第二高調波発生に向けた横型擬似位相整合HfO ₂ /AlN導波路の設計, 2021年 第82回応用物理学会秋季学術講演会 講演予稿集, 12 September 2021, 12p-N101-7, (HONDA, Keito et al., Design of Transverse Quasi-Phase-Matched HfO ₂ /AlN Waveguide for 230-nm Far-UV Second Harmonic Generation, abstracts of The 82nd JSAP Autumn Meeting 2021) lines 1-18, fig. 1-3	1-15
A	CN 112099286 A (UNIV TSINGHUA) 18 December 2020 (2020-12-18) paragraph [0083], fig. 1	1-15
A	JP 2021-134122 A (KABUSHIKI KAISHA TOSHIBA) 13 September 2021 (2021-09-13) paragraphs [0050]-[0051], [0096], fig. 11	1-15
A	US 2016/0178983 A1 (KARLSRUHER INST TECHNOLOGIE) 23 June 2016 (2016-06-23) paragraphs [0072], [0081], [0094]-[0098], fig. 1-2	1-15



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 “D” document cited by the applicant in the international application “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 August 2024

Date of mailing of the international search report

10 September 2024

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/JP2024/023094

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	112099286	A	18 December 2020	(Family: none)	
JP	2021-134122	A	13 September 2021	US 2021/0273057 A1 paragraphs [0067]-[0068], [0117]-[0119], fig. 11	
US	2016/0178983	A1	23 June 2016	EP 2881780	A1

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

G02F 1/377(2006.01)i
FI: G02F1/377

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; G02B6/12-6/14

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 1971-2024年
日本国実用新案登録公報 1996-2024年
日本国登録実用新案公報 1994-2024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; SPIE Digital Library

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	本田啓人、他、230nm遠紫外第二高調波発生に向けた横型擬似位相整合HfO2/A1N導波路の設計、2021年 第82回応用物理学会秋季学術講演会 講演予稿集、2021.09.12, 12p-N101-7 第1-18行, 図1-3	1-15
A	CN 112099286 A (TSINGHUA UNIVERSITY) 18.12.2020 (2020 - 12 - 18) [0083], 図1	1-15
A	JP 2021-134122 A (株式会社東芝) 13.09.2021 (2021 - 09 - 13) [0050]-[0051], [0096], 図11	1-15
A	US 2016/0178983 A1 (KARLSRUHER INSTITUT FUER TECHNOLOGIE) 23.06.2016 (2016 - 06 - 23) [0072], [0081], [0094]-[0098], 図1-2	1-15

☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☒ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的技术水準を示すもの

“D” 国際出願で出願人が先行技術文献として記載した文献

“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

30.08.2024

国際調査報告の発送日

10.09.2024

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）

奥村 政人 2L 4752

電話番号 03-3581-1101 内線 3295

様式 PCT/ISA/210（第2ページ）（2022年7月）

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/JP2024/023094

引用文献			公表日	パテントファミリー文献	公表日
CN	112099286	A	18.12.2020	(ファミリーなし)	
JP	2021-134122	A	13.09.2021	US 2021/0273057 A1	
				[0067]-[0068], [0117]-	
				[0119], 図11	
US	2016/0178983	A1	23.06.2016	EP 2881780 A1	