

(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  
2014年3月6日(06.03.2014)



(10) 国際公開番号  
WO 2014/034249 A1

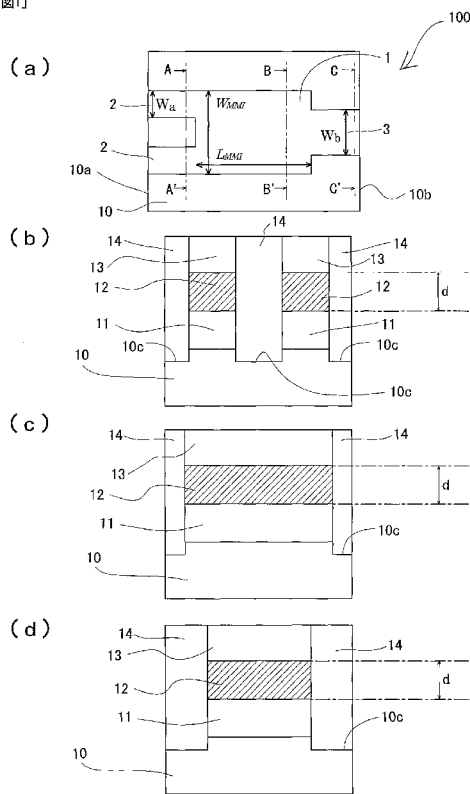
- (51) 国際特許分類:  
G02B 6/14 (2006.01) G02B 6/122 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2013/067885
- (22) 国際出願日: 2013年6月28日(28.06.2013)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:  
特願 2012-186994 2012年8月27日(27.08.2012) JP
- (71) 出願人: 国立大学法人九州大学(KYUSHU UNIVERSITY, NATIONAL UNIVERSITY CORPORATION) [JP/JP]; 〒8128581 福岡県福岡市東区箱崎6丁目10番1号 Fukuoka (JP).
- (72) 発明者: 浜本 貴一(HAMAMOTO Kichi); 〒8128581 福岡県福岡市東区箱崎6丁目10番1号 国立大学法人九州大学内 Fukuoka (JP).
- (74) 代理人: 平井 安雄(HIRAI Yasuo); 〒8120011 福岡県福岡市博多区博多駅前2丁目20-1 大博多ビル9階 Fukuoka (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, 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, 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,

[続葉有]

(54) Title: MODE CONVERSION ELEMENT

(54) 発明の名称: モード変換素子

[図1]



(57) Abstract: [Problem] To provide a mode conversion element that can output light similar to the light strength distribution of  $LP_{21}$  in accordance with a unique high-order mode of an optical fiber (multimode fiber, few-mode fiber, multicore fiber). The mode conversion element (100) is provided with: a  $2 \times 1$ -type MMI waveguide (1) having two input ports and one output port and of which the thickness (d) of a core layer (12) permits first-order mode light; two input waveguides (2) of which one end is connected respectively to the input ports of the MMI waveguide (1); and one output waveguide (3) of which one end is connected to the output port of the MMI waveguide (1).

(57) 要約: 【課題】 光ファイバ (マルチモードファイバ、フェューモードファイバ、マルチコアファイバ) の固有高次モードに対応し、 $LP_{21}$  の光強度分布に類似する光を出力することができるモード変換素子を提供するものである。モード変換素子 100 は、2 個の入力ポート及び 1 個の出力ポートを有し、コア層 12 の膜厚 d が 1 次モード光を許容する厚みである  $2 \times 1$  型 MMI 導波路 1 と、MMI 導波路 1 の各入力ポートに一端がそれぞれ接続される 2 本の入力導波路 2 と、MMI 導波路 1 の出力ポートに一端が接続される 1 本の出力導波路 3 と、を備える。

WO 2014/034249 A1

NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI 添付公開書類:  
(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, — 國際調查報告 (條約第 21 條(3))  
MR, NE, SN, TD, TG).

## 明 細 書

**発明の名称**：モード変換素子

**技術分野**

[0001] 本発明は、多モード光干渉導波路を備えるモード変換素子に関する。

**背景技術**

[0002] 近年の情報通信量の増大を背景に、将来の大容量化手段の一つとして、モード多重伝送技術が注目されている。

本願発明者は、モード多重伝送システムのキーデバイスの一つであるモード変換器についての基礎検討を行ない、多モード光干渉導波路に基づくモード変換器の設計を検討し、波長分割多重通信（WDM：Wavelength Division Multiplex）で利用する光信号の波長を指す総称であるCバンド（波長の帯域：1530nm～1570nm）全域で、ほぼ無損失で0次モード光と1次モード光とを互いに変換できることを確認した（例えば、非特許文献1参照）。

**先行技術文献**

**非特許文献**

[0003] 非特許文献1：ZHAO Zhao他、「マルチモード多重伝送用モードコンバーターの基礎検討」、電子情報通信学会大会講演論文集、Vol.2012、エレクトロニクス1、Page151、2012.03.06

**発明の概要**

**発明が解決しようとする課題**

[0004] 従来のモード変換器は、入力導波路から位相が互いに $\pi$ ずれた2つの0次モード光を入射すると1次モード光として結像し、光ファイバの伝搬モードの一つである $LP_{11}$ の光強度分布（電磁界分布及び位相関係）に類似する光（以下、「擬似 $LP_{11}$ 」と称す。図3（c）参照）を出力することができる。

しかしながら、従来のモード変換器は、光ファイバの他の伝搬モードであ

る  $LP_{21}$  の光強度分布（電磁界分布及び位相関係）に類似する光（以下、「擬似  $LP_{21}$ 」と称す。図3（b）参照）を出力することができるものではなく、光ファイバの垂直方向への光強度分布による更なる大容量化の余地を残すものである。

[0005] この発明は、上述のような課題を解決するためになされたもので、光ファイバ（マルチモードファイバ、フューモードファイバ、マルチコアファイバ）の固有高次モードに対応し、 $LP_{21}$  の光強度分布に類似する光（擬似  $LP_{21}$ ）である高次モードを出力することができるモード変換素子を提供するものである。

### 課題を解決するための手段

[0006] 本発明に係るモード変換素子においては、 $N$ 個（ $N$ は2以上の整数）の入力ポート及び1個の出力ポートを有し、コア層の膜厚が高次モード光を許容する厚みである  $N \times 1$  型多モード光干渉導波路と、 $N \times 1$  型多モード光干渉導波路の各入力ポートに一端がそれぞれ接続される  $N$ 本の入力導波路と、 $N \times 1$  型多モード光干渉導波路の出力ポートに一端が接続される1本の出力導波路と、を備えるものである。

### 発明の効果

[0007] 本発明に係るモード変換素子においては、 $M$ 次モード光（ $M$ は  $M \geq 1$  を満たす整数）を高次モードに変換して、 $LP_{21}$  の光強度分布に類似する光（擬似  $LP_{21}$ ）を出力することができ、光ファイバ（マルチモードファイバ、フューモードファイバ、マルチコアファイバ）の固有高次モードによる伝送容量の増加を図ることができる。

### 図面の簡単な説明

[0008] [図1]（a）は第1の実施形態に係るモード変換素子の概略構成の一例を示す平面図であり、（b）は図1（a）に示すモード変換素子の矢視  $A-A'$  線の断面図であり、（c）は図1（a）に示すモード変換素子の矢視  $B-B'$  線の断面図であり、（d）は図1（a）に示すモード変換素子の矢視  $C-C'$  線の断面図である。

[図2]第1の実施形態に係るモード変換素子の製造方法を説明する説明図であり、(a)は図1(c)に示すモード変換素子の矢視B-B'線の断面図に対応するSOI基板上にSiO<sub>2</sub>膜を堆積した状態の断面図であり、(b)は図1(c)に示すモード変換素子の矢視B-B'線の断面図に対応するマスクを形成した状態の断面図であり、(c)は図1(c)に示すモード変換素子の矢視B-B'線の断面図に対応するエッチングによりハイメサ構造を形成した状態の断面図である。

[図3](a)は図1(a)に示すモード変換素子におけるビーム伝搬法 (beam propagation method: BPM) シミュレーションによる1次モード光の伝播の様子(光フィールド)を示す説明図であり、(b)は図1(a)に示す出力導波路の出射面におけるBPMシミュレーションによる擬似LP<sub>2,1</sub>の光強度分布を示す説明図であり、(c)は従来のモード変換器の出力導波路の出射面におけるBPMシミュレーションによる擬似LP<sub>1,1</sub>の光強度分布を示す説明図である。

[図4](a)は0次モード光又は1次モード光を入射した場合における図1(a)に示すモード変換素子による変換効率のTEモードの波長依存性を示す透過スペクトルであり、(b)は0次モード光又は1次モード光を入射した場合における図1(a)に示すモード変換素子による変換効率のTMモードの波長依存性を示す透過スペクトルである。

[図5](a)は第2の実施形態に係るモード変換素子の概略構成の一例を示す平面図であり、(b)は図5(a)に示す入力導波路における屈折率変化手段の拡大図であり、(c)は図5(b)に示す屈折率変化手段の矢視D-D'線の断面図であり、(d)は図5(a)に示すモード変換素子の矢視E-E'線の断面図である。

[図6](a)は第3の実施形態に係るモード変換素子の概略構成の一例を示す平面図であり、(b)は図6(a)に示すモード変換素子の矢視F-F'線の断面図であり、(c)は図6(a)に示すモード変換素子の矢視G-G'線の断面図である。

[図7]第3の実施形態に係るモード変換素子の製造方法を説明する説明図であり、(a)は図6(b)に示すモード変換素子の矢視F-F'線の断面図に対応するSOI基板の断面図であり、(b)は図6(b)に示すモード変換素子の矢視F-F'線の断面図に対応する第1のマスクを形成した状態の断面図であり、(c)は図6(b)に示すモード変換素子の矢視F-F'線の断面図に対応するエッチングによりストリップ構造を形成した状態の断面図であり、(d)は図6(b)に示すモード変換素子の矢視F-F'線の断面図に対応する第1のマスクを除去した状態の断面図であり、(e)は図6(b)に示すモード変換素子の矢視F-F'線の断面図に対応する第2のマスクを形成した状態の断面図であり、(f)は図6(b)に示すモード変換素子の矢視F-F'線の断面図に対応するエッチングによりコア層に段差を形成した状態の断面図である。

[図8](a)は第3の実施形態に係るモード変換素子の概略構成の一例を示す斜視図であり、(b)は図8(b)に示す高次モード変換器のコア層を説明するための断面図であり、(c)は図8(b)に示す高次モード変換器におけるBPMシミュレーションによる0次モード光の伝播の様子(光フィールド)を示す説明図である。

[図9](a)は図6(a)に示すモード変換素子におけるBPMシミュレーションによるモード光の伝播の様子(光フィールド)を示す説明図であり、(b)は図6(a)に示す補助導波路におけるBPMシミュレーションによる2つの基本モードの様子(光フィールド)を示す説明図であり、(c)は図6(a)に示す入力導波路におけるBPMシミュレーションによる2つの垂直方向1次モードの様子(光フィールド)を示す説明図であり、(d)は図6(a)に示す出力導波路の出射面におけるBPMシミュレーションによる擬似LP<sub>21</sub>の光強度分布を示す説明図である。

[図10]図6(a)に示すモード変換素子による擬似LP<sub>11</sub>の過剰損失の波長依存性を示すグラフである。

[図11](a)は図8(a)に示す高次モード変換器の補助導波路の導波路幅

を異ならせた場合の一例を示す斜視図であり、(b)は図8(a)に示す高次モード変換器の補助導波路の導波路幅を異ならせた場合の他の例を示す斜視図であり、(c)は図8(a)に示す高次モード変換器の補助導波路の導波路幅を異ならせた場合のさらに他の例を示す斜視図であり、(d)は図8(a)に示す高次モード変換器の補助導波路の導波路幅及び膜厚を異ならせた場合の一例を示す斜視図であり、(e)は図8(a)に示す高次モード変換器の補助導波路の導波路幅及び膜厚を異ならせた場合の他の例を示す斜視図である。

[図12] (a)は第4の実施形態に係るモード変換素子の概略構成の一例を示す平面図であり、(b)は第4の実施形態に係るモード変換素子の概略構成の他の例を示す平面図である。

[図13] (a)は第4の実施形態に係るモード変換素子の概略構成の一例を示す斜視図であり、(b)は図13(a)に示すMMI導波路の導波路長及び導波路幅の理論式を説明するための説明図であり、(c)は図12(a)に示すモード変換素子におけるBPMシミュレーションによるモード光の伝播の様子(光フィールド)を示す説明図である。

### 発明を実施するための形態

[0009] (本発明の第1の実施形態)

本実施形態に係るモード変換素子100は、図1(a)に示すように、2入力かつ1出力型である $2 \times 1$ 型多モード光干渉(Multimode Interference: MMI)導波路(以下、「MMI導波路」と称す)1と、MMI導波路1の入力側の各ポート(以下、「入力ポート」と称す)に一端がそれぞれ接続され他端を入射面とする2本の入力導波路2と、MMI導波路1の出力側のポート(以下、「出力ポート」と称す)に一端が接続され他端を出射面とする1本の出力量導波路3と、が基板10上に集積されている。また、入力導波路2及び出力導波路3は、基板10の水平面で考えるとシングルモード導波路であるが、基板10に対して光の導波方向の垂直面で考えるとMMI導波路である。

[0010] なお、本実施形態に係るMMI導波路1は、光の導波方向に沿った導波路の長さ（以下、「導波路長 $L_{MMI}$ 」と称す）が $80\mu\text{m}$ であり、導波路幅 $W_{MMI}$ が $6\mu\text{m}$ である、略矩形状の干渉領域を有する。

[0011] また、本実施形態に係る各入力導波路2は、導波路長が $50\mu\text{m}$ 程度であり、導波路幅 $W_a$ が $1\mu\text{m}$ である直線導波路である。

また、本実施形態に係る出力導波路3は、導波路長が $50\mu\text{m}$ 程度であり、導波路幅 $W_b$ が $2\mu\text{m}$ である直線導波路である。また、本実施形態に係る出力導波路3は、MMI導波路1の出力側の辺に対して略中央に接続されている。

[0012] なお、本実施形態に係るMMI導波路1、入力導波路2及び出力導波路3は、層構造が同一であり、ハイメサ導波路である。また、これらの断面構造は、図1(b)、図1(c)及び図1(d)に示すように、Si基板を基材とする基板10上に、 $\text{SiO}_2$ からなる第1のクラッド層11、Siからなるコア層12、及び $\text{SiO}_2$ からなる第2のクラッド層13が、それぞれ積層されたハイメサ構造である。また、ハイメサ構造に対しては、 $\text{SiO}_2$ や低誘電率有機膜であるBCB (benzocyclobutene: ベンゾシクロブテン) を非導波領域に埋め込み、埋め込み層14が形成される。

[0013] 本実施形態においては、第1のクラッド層11の膜厚は $1\mu\text{m}$ 程度であり、コア層12の膜厚は $1\mu\text{m}$ であり、第2のクラッド層13の膜厚は $1\mu\text{m}$ 程度である。

なお、本発明の特徴であるコア層12の膜厚 $d$ は、垂直方向の1次モード光を許容する（1次モードカットオフ層厚より厚い）厚みであれば、 $1\mu\text{m}$ に限られるものではなく、理論上は、1次モード光をコア層12内に閉じ込めることができない（1次モード光がコア層12から放射する）厚みが $0.29\mu\text{m}$ 以下であるために、コア層12の膜厚 $d$ を $0.29\mu\text{m}$ より厚くすればよい。

また、本実施形態においては、少なくとも1次モード光を許容させるために、コア層12の膜厚 $d$ を $0.29\mu\text{m}$ より厚くしているが、2次以上の高



次モード光を許容するには、その高次モード光を許容する厚みに応じて、コア層12の膜厚dを設定すればよい。

[0014] 特に、コア層12の膜厚dは、モード変換素子100の製造時間及びコスト等の実用面を考慮すると、 $0.6\mu\text{m}$ 以上であり、 $3\mu\text{m}$ 以下であることが好ましい。

また、光ファイバを接続する出力導波路3は、コア層12の縦横の比率（コア層12の膜厚d及び導波路幅Wb）が同一である対称的な矩形の断面形状にすることにより、出力導波路3から出射する光の分布を均一にすることができ、光ファイバのコアに効率よく入射することができる。

[0015] また、本実施形態に係るモード変換素子100の層構造は、光導波路の材料系として、 $\text{SiO}_2/\text{Si}/\text{SiO}_2$ 構造としているが、この材料系に限定するものではなく、例えば、InP系半導体材料であってもよいし、 $\text{LiNbO}_3$ 系材料であっても適用可能である。

[0016] なお、本実施形態に係るモード変換素子100は、MMI導波路1、入力導波路2及び出力導波路3をハイメサ導波路とし、埋め込み構造としているが、層構造を限定するものではなく、リッジ構造やハイメサ構造であっても適用可能である。

[0017] つぎに、図1及び図2を参照して、本実施形態に係るモード変換素子100の製造方法を説明する。

まず、通常のSOI（Silicon on Insulator）基板20上に、熱CVD（Chemical Vapor Deposition：化学気相成長）法を用いて、 $\text{SiO}_2$ 膜30を堆積する（図2（a））。

[0018] そして、ステッパ（縮小投影露光装置）によるフォトリソグラフィ法を用いて、図1（a）に示す、MMI導波路1、入力導波路2及び出力導波路3の平面形状に合わせて、エッチング用のマスク40を形成する（図2（b））。

[0019] このマスク40を用いて、ICP（Inductively Coupled Plasma：誘導結合プラズマ）法によりドライエッチングを施して、第2のクラッド層13と

なる $\text{SiO}_2$ 膜30、コア層12となるSOI基板20のSi層、及び第1のクラッド層11となるSOI基板20の $\text{SiO}_2$ 層における不要な部分を除去し、断面形状としてハイメサ構造を形成する(図2(c))。なお、図2(c)においては、エッチングの進行が、SOI基板20の基板10の表面まで達して一部が除去されており、基板10にエッチング底面10cを図示している。

[0020] その後、熱CVD法を用いて、エッチングで除去した部分に $\text{SiO}_2$ 膜30を堆積して埋め込み層14を形成し、第2のクラッド層13の直上にあるマスク40を、有機溶剤及びアッシング法により除去する(図1(c))。

[0021] そして、複数のモード変換素子100素子が形成された基板10に対して、モード変換素子100素子間の境界に沿って劈開することで、図1に示す構造を有するモード変換素子100素子を得ることができる。この劈開により、モード変換素子100素子の後方端面(基板10の一端面10a、入力導波路2の入射面)及び前方端面(基板10の他端面10b、出力導波路3の出射面)がそれぞれ形成される。

[0022] 最後に、前方端面及び後方端面に反射防止膜をそれぞれ形成して、モード変換素子100素子の製造を終了する。

[0023] なお、本実施形態に係るモード変換素子100の製造方法においては、フォトリソグラフィ法にステッパを用いているが、必ずしもこれに限られるわけではなく、例えば、電子ビーム露光装置であっても適用可能である。

[0024] また、本実施形態に係る製造方法においては、 $\text{SiO}_2$ 膜30及び埋め込み層14の形成に熱CVD法を用いているが、例えば、プラズマCVD法であっても、スパッタ法であっても適用可能である。

[0025] また、本実施形態に係るモード変換素子100の製造方法においては、ハイメサ構造の製造工程をICP法に限られるものではなく、例えば、NLD(magnetic neutral loop discharge)法、もしくはRIE(Reactive Ion Etching: 反応性イオンエッチング)法であっても適用可能である。

[0026] さらに、本実施形態に係るモード変換素子100の製造方法においては、

エッチングの進行を基板10にまで到達させたハイメサ構造としているが、必ずしも基板10にまでエッチングを施す必要はなく、コア層12となるSOI基板20のSi層がエッチングされていればよく、例えば、メサ構造であってもよい。

[0027] また、本実施形態に係るモード変換素子100の製造方法においては、モード変換素子100素子の後方端面及び前方端面の形成は、必ずしも劈開である必要はなく、例えば、モード変換素子100素子を切り出した後に研磨してもよいし、切り出したモード変換素子100素子の後方端面及び前方端面に、コーティング等を施してもよい。

[0028] つぎに、本実施形態に係るモード変換素子100の動作について説明する。

モード変換素子100は、図示しない他の集積デバイス（発光素子、レーザー装置など）からの位相が互いに $\pi$ ずれた2つの1次モード光を2本の入力導波路2の入射面にそれぞれ入射すると、図3（a）に示すように、出力導波路3で0次モード光及び1次モード（高次モード）として結像し、図3（b）に示すように、光ファイバの伝搬モードの一つである $LP_{21}$ の光強度分布（電磁界分布及び位相関係）に類似する光（擬似 $LP_{21}$ ）を出力導波路3の出射面から出力することができる。

[0029] このように、本実施形態に係るモード変換素子100は、他の集積デバイスから入力導波路2に入力される1次モード光を0次モード光及び1次モード光（高次モード）に変換して、擬似 $LP_{21}$ として出力することができ、出力導波路3に接続する光ファイバ（マルチモードファイバ、フェューモードファイバ、マルチコアファイバ）の固有高次モードを有効に活用することができ、伝送容量の増加を図ることができる。

[0030] つぎに、本実施形態に係るモード変換素子100において、波長多重伝送技術（波長分割多重通信（WDM））を前提に考え、Cバンド（波長の帯域：1530nm～1570nm）内での変換効率の波長依存性及び偏波依存性をビーム伝搬法（beam propagation method：BPM）を用いて検討した。

[0031] 位相が互いに $\pi$ ずれた2つの0次モード光を2本の入力導波路2にそれぞれ入射した場合（擬似LP<sub>11</sub>）におけるTE（Transverse Magnetic）モード及びTM（Transverse Electric）モードの透過率と、位相が互いに $\pi$ ずれた2つの1次モード光を2本の入力導波路2にそれぞれ入射した場合（擬似LP<sub>21</sub>）におけるTEモード及びTMモードの透過率とを、ビーム伝搬法により求めた結果を図4に示す。

[0032] 擬似LP<sub>11</sub>及び擬似LP<sub>21</sub>における透過率の過剰損失は、図4に示すように、Cバンド全域で2dB（特に、TEモードでは、0.5dB）以内に抑制されており、波長依存性が弱く、モード変換素子100を通信に使用するうえで問題がないことがわかる。なお、TMモードにおける透過率の過剰損失がTEモードにおける透過率の過剰損失より大きいのは、MMI導波路1の導波路長L<sub>MMI</sub>によるモード間の依存性によるものである。

[0033] なお、本実施形態に係るモード変換素子100は、MMI導波路1、入力導波路2及び出力導波路3を同一工程にて製造し、MMI導波路1のコア層12の膜厚dと、入力導波路2のコア層12の膜厚dと、出力導波路3のコア層12の膜厚dとを等しくしている。

これに対し、MMI導波路1のコア層12の膜厚dと出力導波路3のコア層12の膜厚dとが、垂直方向の1次モード光を許容する厚みであれば、MMI導波路1のコア層12の膜厚dと入力導波路2のコア層12の膜厚dと出力導波路3のコア層12の膜厚dとが異なってもよい。

しかしながら、MMI導波路1のコア層12の膜厚dと入力導波路2のコア層12の膜厚dと出力導波路3のコア層12の膜厚dとを異ならせることは、製造工程の増加を招くために、MMI導波路1のコア層12の膜厚dと入力導波路2のコア層12の膜厚dと出力導波路3のコア層12の膜厚dとを等しくすることが好ましい。

[0034] なお、本実施形態に係るモード変換素子100は、2個の入力ポート及び1個の出力ポートを有する2×1型MMI導波路1を備え、擬似LP<sub>21</sub>を出力する場合について説明したが、MMI導波路1は2個の入力ポートに限ら

れるものではなく、 $N$ 個 ( $N$ は2以上の整数) の入力ポートを有する  $N \times 1$  型MMI導波路1により、光ファイバの他の伝搬モード (例えば、 $LP_{31}$  など) の光強度分布に類似する光を出力することができる。

[0035] (本発明の第2の実施形態)

図5(a)は第2の実施形態に係るモード変換素子の概略構成の一例を示す平面図であり、図5(b)は図5(a)に示す入力導波路における屈折率変化手段の拡大図であり、図5(c)は図5(b)に示す屈折率変化手段の矢視D-D'線の断面図であり、図5(d)は図5(a)に示すモード変換素子の矢視E-E'線の断面図である。図5において、図1乃至図4と同じ符号は、同一又は相当部分を示し、その説明を省略する。

[0036] 本実施形態に係るモード変換素子100は、図5(a)に示すように、各入力導波路2に対してそれぞれ配設され、導波路の屈折率を変化させる屈折率変化手段50をさらに備える。

なお、本実施形態に係る屈折率変化手段50は、PIN (p-intrinsic-n) ダイオード構造によるキャリア注入により導波路の屈折率を変化させる構造を一例として説明するが、導波路の屈折率を変化させる構造であれば、この構造に限られるものではない。

[0037] 屈折率変化手段50は、図5(b)及び図5(c)に示すように、半導体層110の真性半導体領域111に不純物を添加してなるp型半導体領域112及びn型半導体領域113を真性半導体領域111と共に導波方向に沿って並設してpin接合を構成する屈折率変化領域51と、屈折率変化領域51のp型半導体領域112に電圧を印加するための第1の電極52aと、屈折率変化領域51のn型半導体領域113に電圧を印加するための第2の電極52bと、p型半導体領域112及び第1の電極52aを電氣的に接続する第1の接続部53aと、n型半導体領域113及び第2の電極52bを電氣的に接続する第2の接続部53bと、を備える。

[0038] 屈折率変化領域51は、第1の電極52a及び第1の接続部53a並びに第2の電極52b及び第2の接続部53bを介してpin接合に順方向の電

圧が印加されると、キャリア（電子及びホール）が真性半導体領域 1 1 1 に供給され、このキャリアのプラズマ効果により真性半導体領域 1 1 1 の屈折率が変化する。

[0039] なお、本実施形態に係る屈折率変化領域 5 1 は、真性半導体領域 1 1 1 の屈折率の変化により、他の集積デバイスから入力導波路 2 の入射面に入射される 1 次モード光が、MMI 導波路 1 の入力ポートで 0 次モード光として結合するように、入力導波路 2 を伝播する光の光路長を変化させる。

[0040] また、屈折率変化領域 5 1 は、真性半導体領域 1 1 1 が p 型半導体領域 1 1 2 及び n 型半導体領域 1 1 3 とのそれぞれの境界において導波方向に延在する 2 つの溝（トレンチ 5 1 a）を有する構造である。

特に、屈折率変化領域 5 1 のトレンチ 5 1 a の幅は、波長オーダー若しくはそれ以下にすることにより、狭いパターンほどエッチング深さが浅くなり、周囲に比べてエッチング量が抑制される効果（RIE ラグ：reactive ion etching lag）を利用し、オーバーエッチングを抑制することができる。

[0041] また、屈折率変化領域 5 1 における真性半導体領域 1 1 1 は、導波路（コア層 1 2）になるリブ部 1 1 1 a と、リブ部 1 1 1 a の膜厚（エッチングされない Si 層の膜厚）よりも膜厚（エッチングされた Si 層の膜厚（Si 層残厚））が薄く、導波方向に沿ってリブ部 1 1 1 a の両側に並設されるスラブ部 1 1 1 b と、を備える。

また、p 型半導体領域 1 1 2 及び n 型半導体領域 1 1 3 全体の膜厚は、真性半導体領域 1 1 1 のスラブ部 1 1 1 b の膜厚（Si 層残厚）よりも厚い。

[0042] つぎに、本実施形態に係るモード変換素子 1 0 0 の動作について説明する。

モード変換素子 1 0 0 は、第 1 の電極 5 2 a 及び第 2 の電極 5 2 b に電圧を印加しない状態において、位相が互いに  $\pi$  ずれた 2 つの 1 次モード光が他の集積デバイスから 2 本の入力導波路 2 の入射面にそれぞれ入射されると、第 1 の実施形態で前述したように、擬似 LP<sub>21</sub>（図 3（b）参照）として出力導波路 3 の出射面から出力される。

[0043] これに対し、モード変換素子100は、第1の電極52a及び第2の電極52bに電圧が印加されると、p型半導体領域112、真性半導体領域111及びn型半導体領域113からなるpin接合が順バイアスされる。

そして、p型半導体領域112及びn型半導体領域113から真性半導体領域111であるリブ部111aにキャリアが供給され、供給されたキャリアはリブ部111aに蓄積されて、キャリアのプラズマ効果により、リブ部111a（コア層12）の屈折率を変化させる。

[0044] この状態において、モード変換素子100は、位相が互いに $\pi$ ずれた2つの垂直方向1次モード（1次モード光）が他の集積デバイスから2本の入力導波路2の入射面にそれぞれ入射されると、リブ部111aの屈折率（光の光路長）が変化していることにより、MMI導波路1の各入力ポートで0次モード光としてそれぞれ結合する。

このため、モード変換素子100は、位相が互いに $\pi$ ずれた2つの0次モード光がMMI導波路1の各入力ポートにそれぞれ入射されることにより、第1の実施形態で前述したように、擬似LP<sub>11</sub>（図3（c）参照）として出力導波路3の出射面から出力される。

[0045] なお、本実施形態においては、屈折率変化手段50を各入力導波路2に対して配設するところのみが第1の実施形態と異なるところであり、屈折率変化手段50による作用効果以外は、第1の実施形態と同様の作用効果を奏する。

[0046] 本実施形態に係るモード変換素子100は、屈折率変化手段50を備えることにより、入力導波路2の入射面に入射された1次モード光を、MMI導波路1の入力ポートに1次モード光又は0次モード光として選択的に入射し、出力導波路3の出射面から擬似LP<sub>21</sub>の高次モード又は擬似LP<sub>11</sub>の基本モードを選択的に出力することができるという作用効果を奏する。

[0047] なお、本実施形態に係るモード変換素子100は、位相が互いに $\pi$ ずれた2つの垂直方向1次モード（1次モード光）が2本の入力導波路2の入射面にそれぞれ入射された場合に、屈折率変化手段50により位相差を無くして

MMI導波路1の各入力ポートに入射することで、光ファイバの伝搬モードの一つである $LP_{01}$ の光強度分布に類似する光（擬似 $LP_{01}$ ）を出力することもできる。

[0048]（本発明の第3の実施形態）

図6（a）は第3の実施形態に係るモード変換素子の概略構成の一例を示す平面図であり、図6（b）は図6（a）に示すモード変換素子の矢視F-F'線の断面図であり、図6（c）は図6（a）に示すモード変換素子の矢視G-G'線の断面図である。図7は第3の実施形態に係るモード変換素子の製造方法を説明する説明図であり、図7（a）は図6（b）に示すモード変換素子の矢視F-F'線の断面図に対応するSOI基板の断面図であり、図7（b）は図6（b）に示すモード変換素子の矢視F-F'線の断面図に対応する第1のマスクを形成した状態の断面図であり、図7（c）は図6（b）に示すモード変換素子の矢視F-F'線の断面図に対応するエッチングによりストリップ構造を形成した状態の断面図であり、図7（d）は図6（b）に示すモード変換素子の矢視F-F'線の断面図に対応する第1のマスクを除去した状態の断面図であり、図7（e）は図6（b）に示すモード変換素子の矢視F-F'線の断面図に対応する第1のマスクを形成した状態の断面図であり、図7（f）は図6（b）に示すモード変換素子の矢視F-F'線の断面図に対応するエッチングによりコア層に段差を形成した状態の断面図である。図8（a）は第3の実施形態に係るモード変換素子の概略構成の一例を示す斜視図であり、図8（b）は図8（b）に示す高次モード変換器のコア層を説明するための断面図であり、図8（c）は図8（b）に示す高次モード変換器におけるBPMシミュレーションによる0次モード光の伝播の様子（光フィールド）を示す説明図である。図9（a）は図6（a）に示すモード変換素子におけるBPMシミュレーションによるモード光の伝播の様子（光フィールド）を示す説明図であり、図9（b）は図6（a）に示す補助導波路におけるBPMシミュレーションによる2つの基本モードの様子（光フィールド）を示す説明図であり、図9（c）は図6（a）に示す入



力導波路におけるBPMシミュレーションによる2つの垂直方向1次モードの様子（光フィールド）を示す説明図であり、図9（d）は図6（a）に示す出力導波路の出射面におけるBPMシミュレーションによる擬似LP<sub>2,1</sub>の光強度分布を示す説明図である。図10は図6（a）に示すモード変換素子による擬似LP<sub>1,1</sub>の過剰損失の波長依存性を示すグラフである。図11（a）は図8（a）に示す高次モード変換器の補助導波路の導波路幅を異ならせた場合の一例を示す斜視図であり、図11（b）は図8（a）に示す高次モード変換器の補助導波路の導波路幅を異ならせた場合の他の例を示す斜視図であり、図11（c）は図8（a）に示す高次モード変換器の補助導波路の導波路幅を異ならせた場合のさらに他の例を示す斜視図であり、図11（d）は図8（a）に示す高次モード変換器の補助導波路の導波路幅及び膜厚を異ならせた場合の一例を示す斜視図であり、図11（e）は図8（a）に示す高次モード変換器の補助導波路の導波路幅及び膜厚を異ならせた場合の他の例を示す斜視図である。図6乃至図11において、図1乃至図5と同じ符号は、同一又は相当部分を示し、その説明を省略する。

[0049] 本実施形態に係るモード変換素子100は、図6及び図8（a）に示すように、MMI導波路1と、MMI導波路1の入力側の各入力ポートに一端がそれぞれ接続される2本の入力導波路2と、2本の入力導波路2の他端に一端がそれぞれ接続され、他端を入射面とし、当該入力導波路2のコア層12の膜厚より膜厚が薄いコア層12aを有する2本の補助導波路4と、MMI導波路1の出力側の出力ポートに一端が接続され他端を出射面とする1本の入力導波路3と、が基板10上に集積されている。また、本実施形態に係る各補助導波路4は、導波路幅が入力導波路2の導波路幅W<sub>a</sub>と同一である直線導波路である。

[0050] 特に、本実施形態に係るモード変換素子100は、補助導波路4及び入力導波路2から構成され、基本モード（0次モード光）を垂直方向1次モード（1次モード光）に変換する高次モード変換器101と、MMI導波路1及び出力導波路3から構成され、1次モード光をLP<sub>2,1</sub>モードに変換するLP

モード変換器 102 とに区分される。

[0051] つぎに、図 6 及び図 7 を参照して、本実施形態に係るモード変換素子 100 の製造方法を説明する。

[0052] まず、通常の SOI 基板 20 上に、ステッパ（縮小投影露光装置）によるフォトリソグラフィ法を用いて、図 6（a）に示す、MMI 導波路 1、入力導波路 2、出力導波路 3 及び補助導波路 4 の平面形状に合わせて、エッチング用の第 1 のマスク 40 a を形成する（図 7（b））。

[0053] この第 1 のマスク 40 a を用いて、ICP 法によりドライエッチングを施して、コア層 12 となる SOI 基板 20 の Si 層における不要な部分を除去し、断面形状としてストリップ構造を形成する（図 7（c））。

その後、コア層 12 の直上にある第 1 のマスク 40 a を、有機溶剤及びアッシング法により除去する（図 7（d））。

[0054] そして、ステッパ（縮小投影露光装置）によるフォトリソグラフィ法を用いて、図 6（a）に示す補助導波路 4 を除く平面形状に合わせて、エッチング用の第 2 のマスク 40 b を形成する（図 7（e））。

この第 2 のマスク 40 b を用いて、ICP 法によりドライエッチングを施して、補助導波路 4 のコア層 12 a となる SOI 基板 20 の Si 層を所定の厚さになるようにエッチングし、補助導波路 4 及び入力導波路 2 間に垂直方向に段差を設ける（図 7（f））。

その後、第 2 のマスク 40 b を、有機溶剤及びアッシング法により除去する（図 6（b）、図 6（c））。

[0055] そして、複数のモード変換素子 100 素子が形成された基板 10 に対して、モード変換素子 100 素子間の境界に沿って劈開することで、図 6 に示す構造を有するモード変換素子 100 素子を得ることができる。この劈開により、モード変換素子 100 素子の後方端面（基板 10 の一端面 10 a、補助導波路 4 の入射面）及び前方端面（基板 10 の他端面 10 b、出力導波路 3 の出射面）がそれぞれ形成される。

[0056] 最後に、前方端面及び後方端面に反射防止膜をそれぞれ形成して、モード

変換素子100素子の製造を終了する。

[0057] なお、本実施形態に係るモード変換素子100は、MMI導波路1、入力導波路2、出力導波路3及び補助導波路4をストリップ構造としているが、必ずしもこの構造に限られるものではなく、ハイメサ構造やメサ構造や埋め込み構造であっても適用可能である。

[0058] つぎに、本実施形態に係るモード変換素子100の動作について、図8及び図9に示すビーム伝搬法(BPM)によりシミュレーションした伝播結果を用いて説明する。

なお、シミュレーションでは、補助導波路4における膜厚 $D_1$ の $1\mu\text{m}$ 及び導波路幅(= $W_a$ )の $1\mu\text{m}$ 、入力導波路2における膜厚 $D_2$ (= $4\times D_1$ )の $4\mu\text{m}$ 、導波路幅 $W_a$ の $1\mu\text{m}$ 及び導波路長 $L_1$ (= $3L_c/2$ 、 $L_c$ :基本モード及び1次モードのビート長)の $72\mu\text{m}$ 、MMI導波路1における導波路長 $L_{\text{MMI}}$ の $35.9\mu\text{m}$ 、導波路幅 $W_{\text{MMI}}$ の $4\mu\text{m}$ 及び膜厚(= $D_2$ )の $4\mu\text{m}$ 、並びに、出力導波路3における導波路幅 $W_b$ (= $2\times W_a$ )の $2\mu\text{m}$ 及び膜厚(= $D_2$ )の $4\mu\text{m}$ を構造パラメータとしている。

[0059] モード変換素子100は、他の集積デバイスからの位相が互いに $\pi$ ずれた2つの基本モード(0次モード光)を2本の補助導波路4の入射面にそれぞれ入力すると(図9(b))、補助導波路4を伝播して入力導波路2に入射し、入力導波路2において2つの自己結像が $\pi/2$ の位相差で生成されて、垂直方向1次モード(1次モード光)に変換される(図9(c))。

[0060] すなわち、2つの基本モード(0次モード光)は、垂直方向1次モード(1次モード光)に変換された後、位相が互いに $\pi/2$ ずれた2つの1次モード光としてMMI導波路1の2つの入力ポートにそれぞれ入射されることになる。

[0061] そして、モード変換素子100は、第1の実施形態で前述したように、出力導波路3で0次モード光及び1次モード(高次モード)として結像し、図9(d)に示すように、光ファイバの伝搬モードの一つである $LP_{21}$ の光強度分布に類似する光(擬似 $LP_{21}$ )を出力導波路3の出射面から出力するこ

とができる。

[0062] 特に、本実施形態に係るモード変換素子100の過剰損失は、図10(a)に示すように、Cバンド全域で0.5dB以内に抑制されており、波長依存性が弱く、モード変換素子100を通信に使用するうえで問題がないことがわかる。

[0063] なお、本実施形態においては、入力導波路2の前段に補助導波路4を備えるところのみが第1の実施形態と異なるところであり、補助導波路4による作用効果以外は、第1の実施形態及び第2の実施形態と同様の作用効果を奏する。

[0064] 本実施形態に係るモード変換素子100は、他の集積デバイスから補助導波路4に入力される0次モード光を高次モード変換器101で1次モード光に変換することにより、現在、市販されていない高次モード光を出力する集積デバイスの代わりに、市販されている0次モード光を出力する集積デバイスを光源として用いることができ、モード変換素子100の汎用性を向上させることができるという作用効果を奏する。

[0065] なお、本実施形態に係る補助導波路4のコア層12は、図6及び図8に示すように、導波路幅が入力導波路2のコア層12の導波路幅 $W_a$ と同一であり、膜厚 $D_1$ が入力導波路2のコア層12の膜厚 $D_2$ より薄い場合について説明したが、高次モード変換器101が下位のモード光を上位のモード光に変換できる構造であれば、この構造に限られるものではない。

[0066] ここで、基本(0次)モード光及び高次(1次、2次、・・・)モード光は、コア層の膜厚及び導波路幅に依存しており、コア層の膜厚が厚いほど又はコア層の導波路幅が広いほど、上位のモード光が許容され、コア層内を伝播することができる。

[0067] このため、高次モード変換器101が下位のモード光を上位のモード光に変換できる構造とは、例えば、補助導波路4のコア層12aが0次モード光のみを許容する膜厚又は導波路幅であれば、入力導波路2のコア層12が0次モード光を含む少なくとも1次モード光を許容する(1次モード光以上の

高次モード光を許容してもよい) 膜厚又は導波路幅である。

[0068] すなわち、高次モード変換器 101 が 0 次モード光を 1 次モード光に変換する場合は、補助導波路 4 のコア層 12 a が 0 次モード光のみを許容する膜厚又は導波路幅であり、入力導波路 2 のコア層 12 が 0 次モード光及び 1 次モード光のみを許容する膜厚又は導波路幅であればよい。

[0069] 特に、高次モード変換器 101 は、補助導波路 4 のコア層 12 a から入力導波路 2 のコア層 12 にモード光を伝播させるにあたり、補助導波路 4 及び入力導波路 2 の境界からのモード光の射出による損失を抑制するために、補助導波路 4 のコア層 12 a の射出端面は、入力導波路 2 のコア層 12 の入射端面に内包されることが好ましい。

[0070] このように、補助導波路 4 のコア層 12 a は、例えば、図 11 (a)、図 11 (b) 及び図 11 (c) に示すように、膜厚  $D_1$  が入力導波路 2 のコア層 12 の膜厚  $D_2$  と同一であり、導波路幅 (例えば、0 次モード光のみを許容する幅) が入力導波路 2 のコア層 12 の導波路幅  $W_a$  (例えば、1 次モード光を許容する幅) より狭くしてもよい。

[0071] なお、図 11 (a) においては、補助導波路 4 のコア層 12 a の導波方向に沿う中心線と入力導波路 2 のコア層 12 の導波方向に沿う中心線とが一致するように、補助導波路 4 と入力導波路 2 とが接続されている。

[0072] これに対し、図 11 (b) 及び図 11 (c) においては、入力導波路 2 のコア層 12 の中心線に対して補助導波路 4 のコア層 12 a の中心線を偏心させて、補助導波路 4 と入力導波路 2 とが接続されており、特に、図 11 (b) においては、入力導波路 2 のコア層 12 の中心線に対する補助導波路 4 のコア層 12 a の中心線の偏心量を入力導波路 2 の実効導波路幅の  $1/4$  程度としている。

[0073] このように、入力導波路 2 のコア層 12 と補助導波路 4 のコア層 12 a との不均一な接続構造により、MMI 導波路 1 の入力ポートに入射するモード光に位相差を生じさせ、高次モード光に変換することができる。

[0074] 特に、図 11 (a)、図 11 (b) 及び図 11 (c) に示す高次モード変

換器 101 は、補助導波路 4 のコア層 12 a の膜厚  $D_1$  と入力導波路 2 のコア層 12 の膜厚  $D_2$  とが同一であるため、一括して露光することができ、図 8 に示す高次モード変換器 101 と比較して、製造工程を簡略化することができる。

[0075] また、補助導波路 4 のコア層 12 a は、図 11 (d) 及び図 11 (e) に示すように、膜厚  $D_1$  (例えば、0 次モード光のみを許容する膜厚) が入力導波路 2 のコア層 12 の膜厚  $D_2$  (例えば、1 次モード光を許容する膜厚) より薄く、導波路幅 (例えば、0 次モード光のみを許容する幅) が入力導波路 2 のコア層 12 の導波路幅  $W_a$  (例えば、1 次モード光を許容する幅) より狭くしてもよい。

[0076] 特に、図 11 (d) 及び図 11 (e) に示す高次モード変換器 101 は、図 8 に示す高次モード変換器 101 と比較して、垂直方向のみならず横方向にも高次モードに変換し、モード変換素子 100 による  $LP_{21}$  を超える更なる多重化を図ることができる。また、図 11 (d) 及び図 11 (e) に示す高次モード変換器 101 は、図 11 (a)、図 11 (b) 及び図 11 (c) に示す高次モード変換器 101 と比較して、横方向のみならず垂直方向にも高次モードに変換し、モード変換素子 100 による  $LP_{21}$  を超える更なる多重化を図ることができる。

[0077] なお、本実施形態に係る高次モード変換器 101 は、図 6、図 8 及び図 11 に示すように、補助導波路 4 及び入力導波路 2 からなる導波方向又はその垂直方向に二段の段差を設ける場合について説明したが、入力側のコア層の端面が出力側のコア層の端面に内包されるのであれば、複数の段差により構成されてもよい。

[0078] また、本実施形態に係るモード変換素子 100 は、第 2 の実施形態で前述したように、各入力導波路 2 に対してそれぞれ配設され、導波路の屈折率を変化させる屈折率変化手段 50 をさらに備えてもよい。

[0079] (本発明の第 4 の実施形態)

図 12 (a) は第 4 の実施形態に係るモード変換素子の概略構成の一例を

示す平面図であり、図12(b)は第4の実施形態に係るモード変換素子の概略構成の他の例を示す平面図である。図13(a)は第4の実施形態に係るモード変換素子の概略構成の一例を示す斜視図であり、図13(b)は図13(a)に示すMMI導波路の導波路長及び導波路幅の理論式を説明するための説明図であり、図13(c)は図12(a)に示すモード変換素子におけるBPMシミュレーションによるモード光の伝播の様子(光フィールド)を示す説明図である。図12及び図13において、図1乃至図11と同じ符号は、同一又は相当部分を示し、その説明を省略する。

[0080] 本実施形態に係るモード変換素子100は、図12及び図13(a)に示すように、2つの補助導波路4の他端に接続される1×2型MMI導波路5(以下、「前段MMI導波路5」と称す)と、前段MMI導波路5の入力ポートに一端が接続され、他端を入射面とする入力導波路6(以下、前段入力導波路6)と、をさらに備え、2つの補助導波路4が位相調整器を構成する。

[0081] 特に、本実施形態に係る2本の補助導波路4は、直線領域からなる直線導波路4aと、曲線領域を含む曲線導波路4bとから構成され、直線導波路4a及び曲線導波路4bをそれぞれ伝播する0次モード光の位相差が $\pi$ となるように、直線導波路4aの導波路長と曲線導波路4bの導波路長とを異ならせている。

[0082] なお、本実施形態に係る前段入力導波路6、前段MMI導波路5及び補助導波路4(直線導波路4a、曲線導波路4b)の層構造は、導波路幅(コア層12aの幅)が異なるだけで、第3の実施形態で前述した補助導波路4の層構造と同一であり、モード変換素子100の製造工程の説明は省略する。

[0083] ここで、MMI導波路(前段MMI導波路5、MMI導波路1、入力導波路2)は、公知の技術を用いて設計できるのであるが、例えば、MMI理論に基づいて、前段MMI導波路5の導波路長が $3L_c/8$ となり、MMI導波路1の導波路長が $3L_c/4$ となり、入力導波路2の導波路長 $L_1$ が $3L_c/2$ となる。

但し、 $L_c$ は基本モード及び1次モードのビート長であり、下記数1により算出される。

[0084] また、下記式1において、図13(b)及び図8(b)を参照して、 $W_e$ は実効導波路幅を表し(但し、前段MMI導波路5の場合は $W_E$ とし、MMI導波路1の場合は $W'_E$ とし、入力導波路2の場合は実効導波路コア厚 $D_E$ とする。)、 $W_1$ はMMI導波路の導波路幅を表し(但し、前段MMI導波路5の場合は $W_{MMI}$ とし、MMI導波路1の場合は $W'_{MMI}$ とし、入力導波路2の場合は導波路コア厚 $D_2$ とする。)、 $N_1$ は導波路(コア層)の屈折率を表し、 $N_2$ はクラッドの屈折率を表し、 $\lambda$ は入射光波長を表し、 $W_{a1}$ は前段入力導波路6の導波路幅を表し、 $W_{a2}$ は出力導波路3の導波路幅を表す。

[0085] [式1]

$$L_c = N_1 \times 3 W_e^2 / 4 \lambda$$

$$W_e = W_1 + \lambda / \{ \pi (N_1^2 - N_2^2) \}^{1/2} \quad \dots (1)$$

$$W_{a2} = 2 \times W_{a1} = W_1 / 4$$

[0086] なお、本実施形態に係る前段MMI導波路5、MMI導波路1及び入力導波路2は、入射光波長 $\lambda$ を1550nmとし、導波路の屈折率 $N_1$ を3.48とし、クラッドの屈折率 $N_2$ を1.44として設計した。

[0087] 特に、本実施形態に係るモード変換素子100は、補助導波路4(前段入力導波路6、前段MMI導波路5)の膜厚 $D_1$ を0.2 $\mu$ mとし、入力導波路2(MMI導波路1、出力導波路3)の膜厚 $D_2$ を0.6 $\mu$ mとし、入力導波路2の導波路長 $L_1$ を1.7 $\mu$ mとして、実デバイスを作製した。

[0088] つぎに、モード変換素子100の動作について、図13(a)及び図13(c)を用いて説明する。

前段入力導波路6の入射面に入射された0次モード光は、前段入力導波路6を伝搬して前段MMI導波路5に入射する。

[0089] そして、前段MMI導波路5に入射した0次モード光は、2つに平均分割して分岐され、平均分割後の一方の0次モード光は、直線導波路4aを伝搬して一方の入力導波路2に入射し、平均分割後の他方の0次モード光は、曲



線導波路4 bを伝搬して、平均分割後の一方の0次モード光に対して位相が $\pi$ ずれて他方の入力導波路2に入射する。

なお、0次モード光が入力導波路2に入射した後は、第3の実施形態で前述したモード変換素子100の動作と同様であるので、説明を省略する。

[0090] 本実施形態においては、前段MMI導波路5及び前段入力導波路6をさらに備え、2つの補助導波路4が位相調整器を構成するところのみが第3の実施形態と異なるところであり、前段MMI導波路5、前段入力導波路6及び補助導波路4による作用効果以外は、第3の実施形態と同様の作用効果を奏する。

[0091] 前述した第3の実施形態に係るモード変換素子100は、位相が互いに $\pi$ ずれた2つの基本モード(0次モード光)を入射面にそれぞれ入力するために、2つの集積デバイス(光源)を必要とすると共に、2つの集積デバイス(光源)間で位相を $\pi$ ずらした基本モード(0次モード光)をそれぞれ入力する必要がある。

[0092] これに対し、本実施形態に係るモード変換素子100は、前段MMI導波路5により1つの基本モード(0次モード光)を2つに平均分割して分岐し、補助導波路4により2つの基本モード(0次モード光)の位相を互いに $\pi$ ずらすことができるため、1つの集積デバイスのみを光源として用いて擬似LP<sub>21</sub>モードを生成することができるという作用効果を奏する。

[0093] なお、本実施形態に係るモード変換素子100は、2本の補助導波路4を直線導波路4 a及び曲線導波路4 bで構成し、2本の補助導波路4の導波路長を異ならせることにより0次モード光の位相差を与えたが、図13(b)に示すように、2本の補助導波路4を直線導波路4 aとし、第2の実施形態で前述した屈折率変化手段50を用いて、2本の入力導波路2にそれぞれ入射される0次モード光に位相差を与えてもよい。

[0094] また、本実施形態に係るモード変換素子100は、第2の実施形態で前述したように、各入力導波路2に対してそれぞれ配設され、導波路の屈折率を変化させる屈折率変化手段50をさらに備えてもよい。

## 符号の説明

[0095]	1	MM I 導波路
	2	入力導波路
	3	出力導波路
	4	補助導波路
	4 a	直線導波路
	4 b	曲線導波路
	5	前段MM I 導波路
	6	前段入力導波路
	1 0	基板
	1 0 a	一端面
	1 0 b	他端面
	1 0 c	エッチング底面
	1 1	第1のクラッド層
	1 2, 1 2 a	コア層
	1 3	第2のクラッド層
	1 4	埋め込み層
	2 0	SOI基板
	3 0	SiO <sub>2</sub> 膜
	4 0	マスク
	4 0 a	第1のマスク
	4 0 b	第2のマスク
	5 0	屈折率変化手段
	5 1	屈折率変化領域
	5 1 a	トレンチ
	5 2 a	第1の電極
	5 2 b	第2の電極
	5 3 a	第1の接続部

- 5 3 b 第2の接続部
- 1 0 0 モード変換素子
- 1 0 1 高次モード変換器
- 1 0 2 LPモード変換器
- 1 1 0 半導体層
- 1 1 1 真性半導体領域
- 1 1 1 a リブ部
- 1 1 1 b スラブ部
- 1 1 2 p型半導体領域
- 1 1 3 n型半導体領域

## 請求の範囲

- [請求項1] N個（Nは2以上の整数）の入力ポート及び1個の出力ポートを有し、コア層の膜厚が高次モード光を許容する厚みであるN×1型多モード光干涉導波路と、
- 前記N×1型多モード光干涉導波路の各入力ポートに一端がそれぞれ接続されるN本の入力導波路と、
- 前記N×1型多モード光干涉導波路の出力ポートに一端が接続される1本の出力導波路と、
- を備え、
- 前記各入力導波路は、位相差を $\pi$ とする2つの高次モード光がそれぞれ入力されることを特徴とするモード変換素子。
- [請求項2] 前記請求項1に記載のモード変換素子において、
- 前記高次モード光を許容する厚みが、1次モード光を許容する厚みであることを特徴とするモード変換素子。
- [請求項3] 前記請求項1又は2に記載のモード変換素子において、
- 前記各入力導波路は、位相差を $\pi$ とする2つの1次モード光がそれぞれ入力されることを特徴とするモード変換素子。
- [請求項4] 前記請求項1乃至3のいずれかに記載のモード変換素子において、
- 前記N×1型多モード光干涉導波路のコア層の膜厚が、 $0.29\mu\text{m}$ より厚いことを特徴とするモード変換素子。
- [請求項5] 前記請求項1乃至4のいずれかに記載のモード変換素子において、
- 前記出力導波路の導波路幅が、当該出力導波路のコア層の膜厚に等しいことを特徴とするモード変換素子。
- [請求項6] 前記請求項1乃至5のいずれかに記載のモード変換素子において、
- 前記入力導波路及び出力導波路のコア層の膜厚が、前記N×1型多モード光干涉導波路のコア層の膜厚に等しいことを特徴とするモード変換素子。
- [請求項7] 前記請求項1乃至5のいずれかに記載のモード変換素子において、

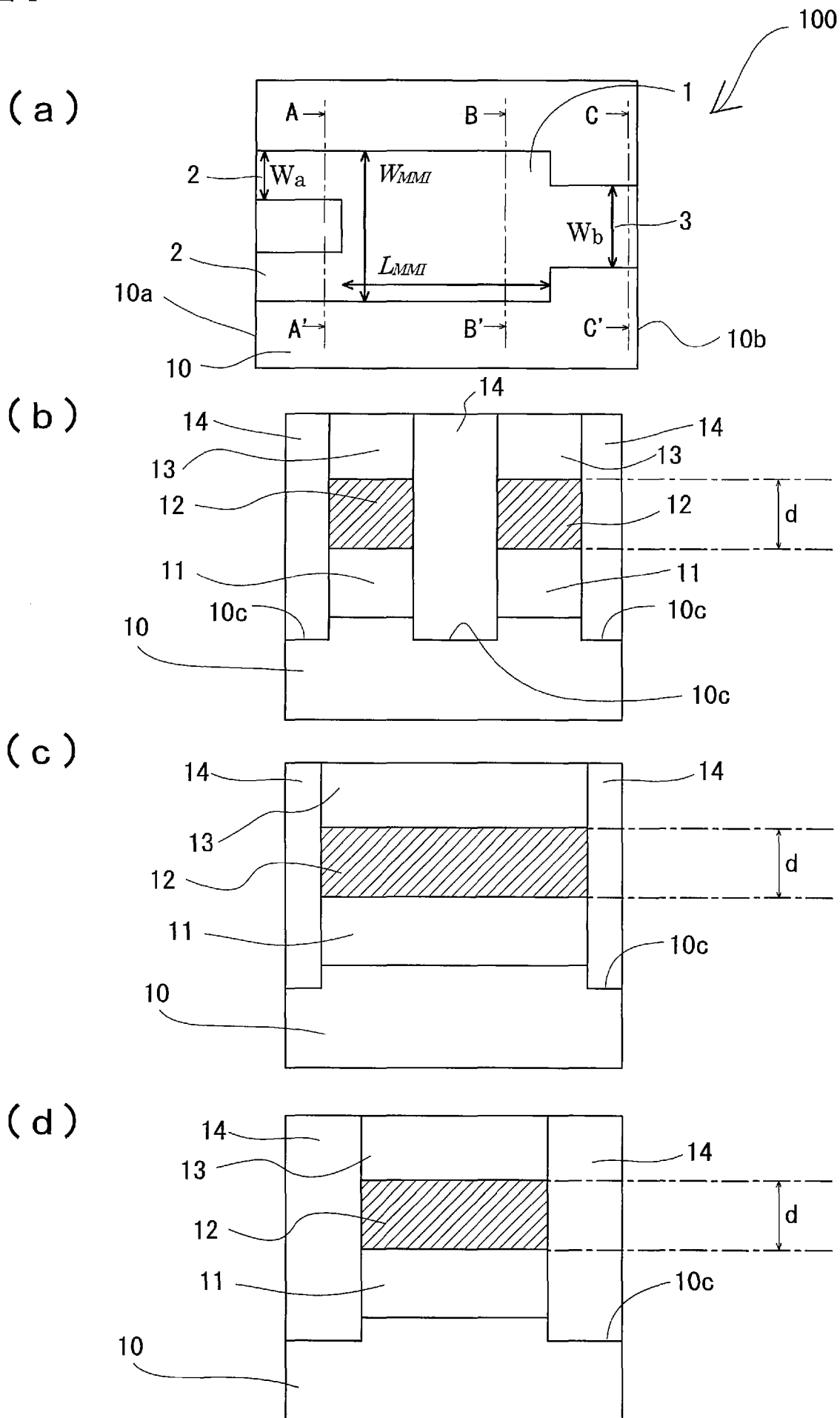
前記N本の入力導波路の他端にそれぞれ接続され、当該入力導波路のコア層に対して膜厚が薄い及び／又は導波路幅が狭いコア層を有するN本の補助導波路を備えることを特徴とするモード変換素子。

[請求項8]

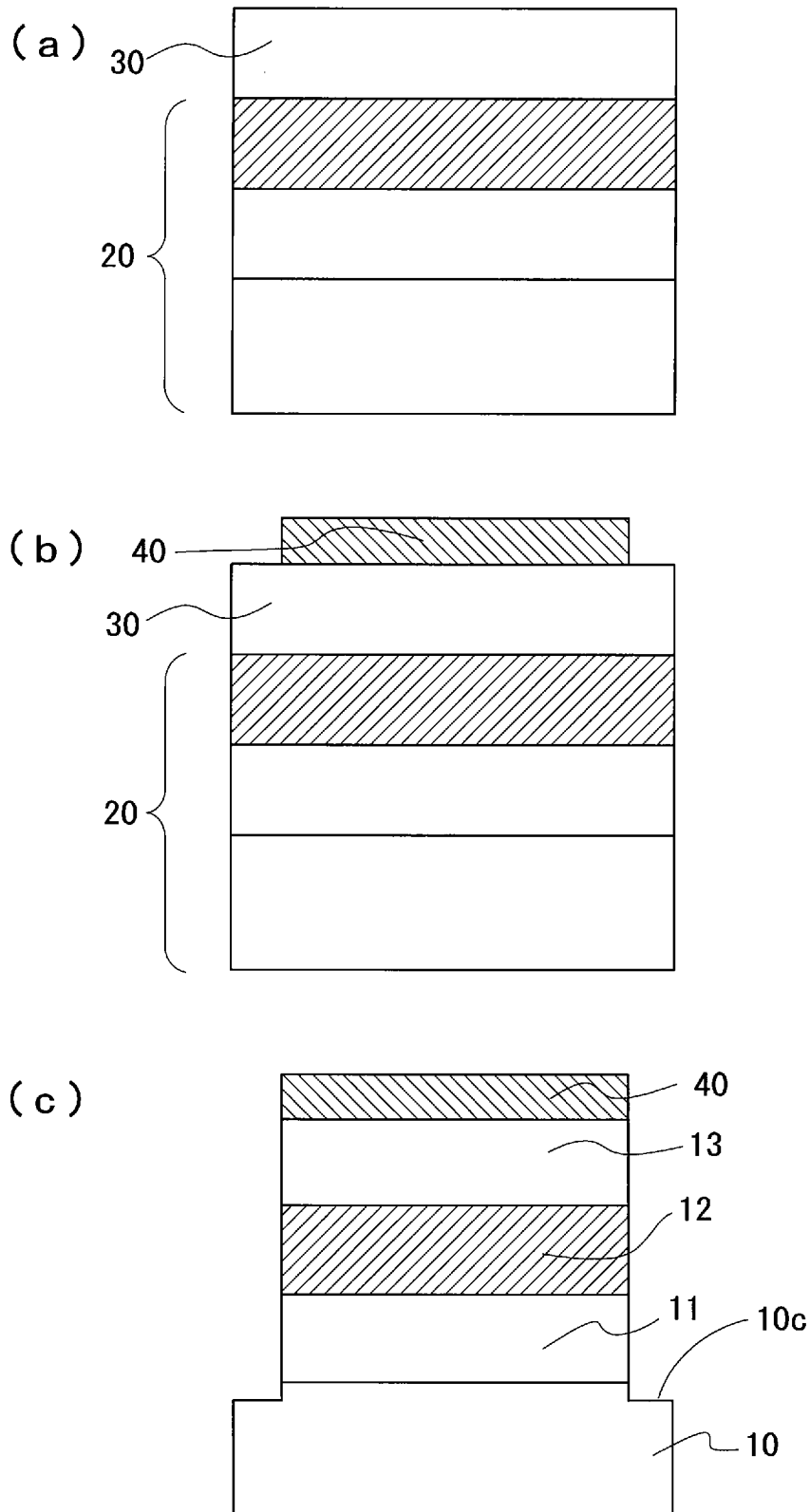
前記請求項7に記載のモード変換素子において、

前記補助導波路のコア層の膜厚又は導波路幅が、0次モード光を許容する厚み又は導波路幅であることを特徴とするモード変換素子。

[図1]

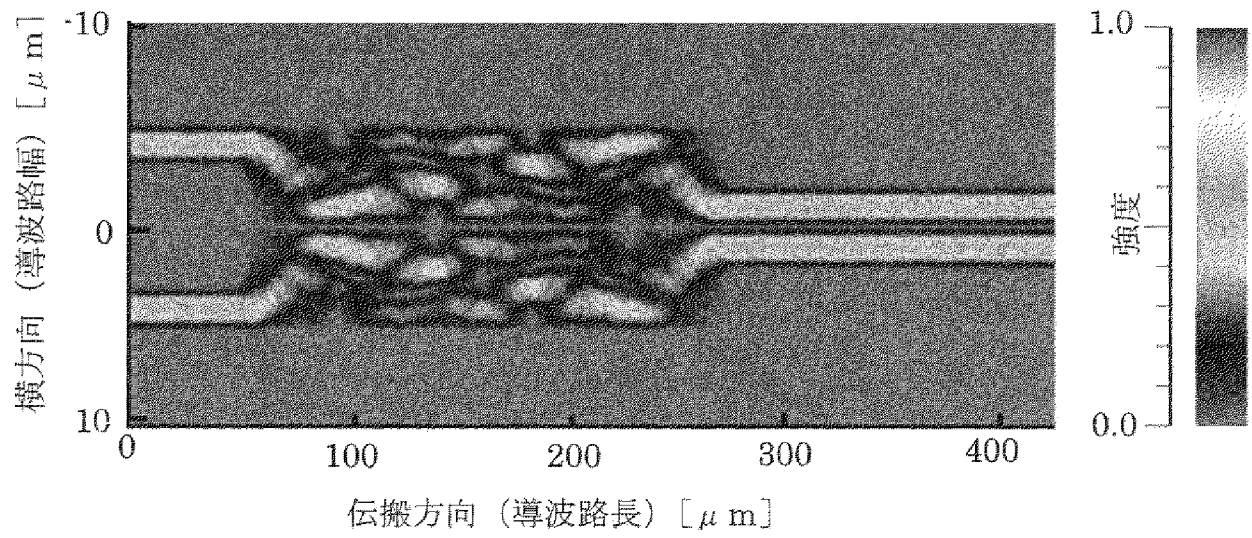


[図2]

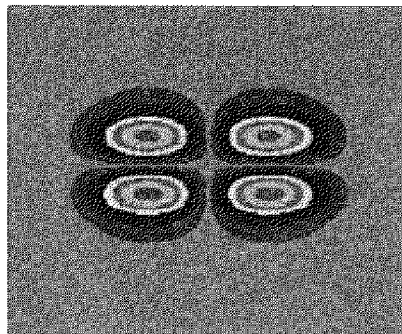


[図3]

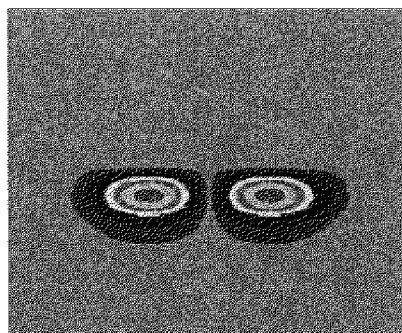
(a)



(b)



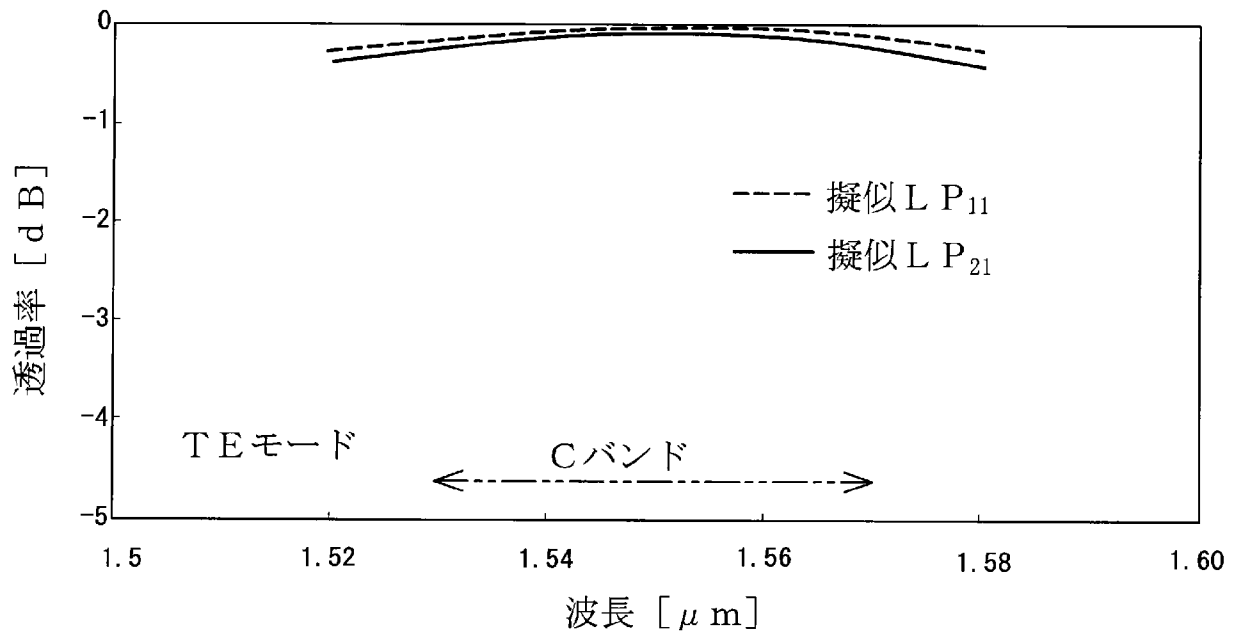
(c)



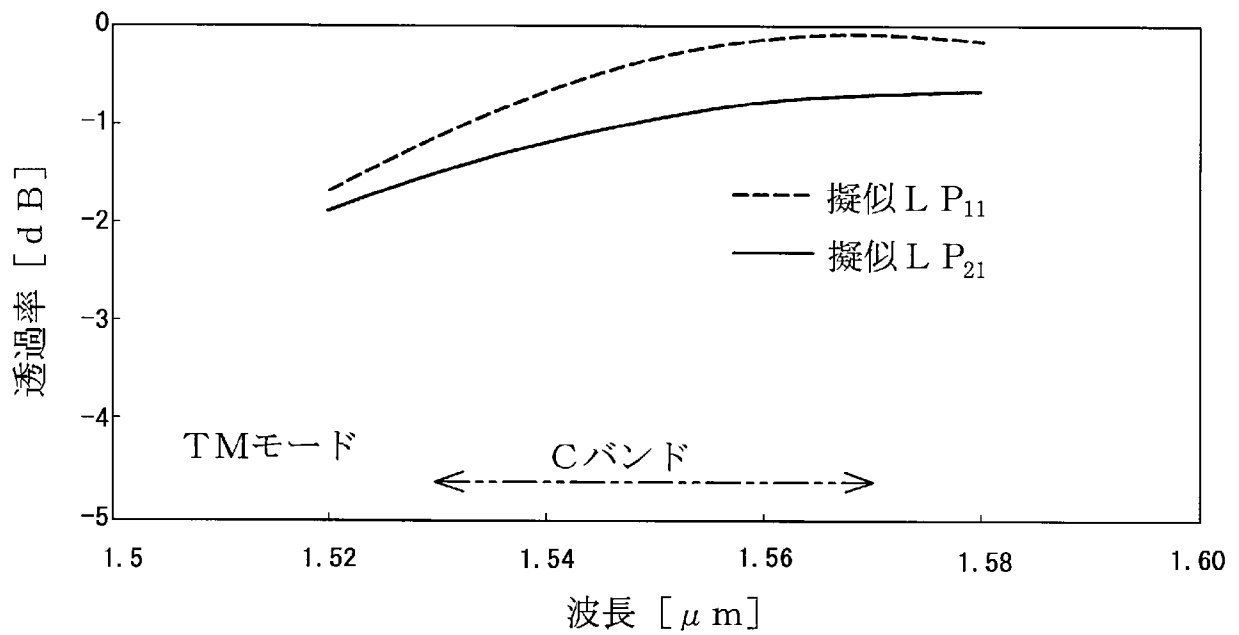


[図4]

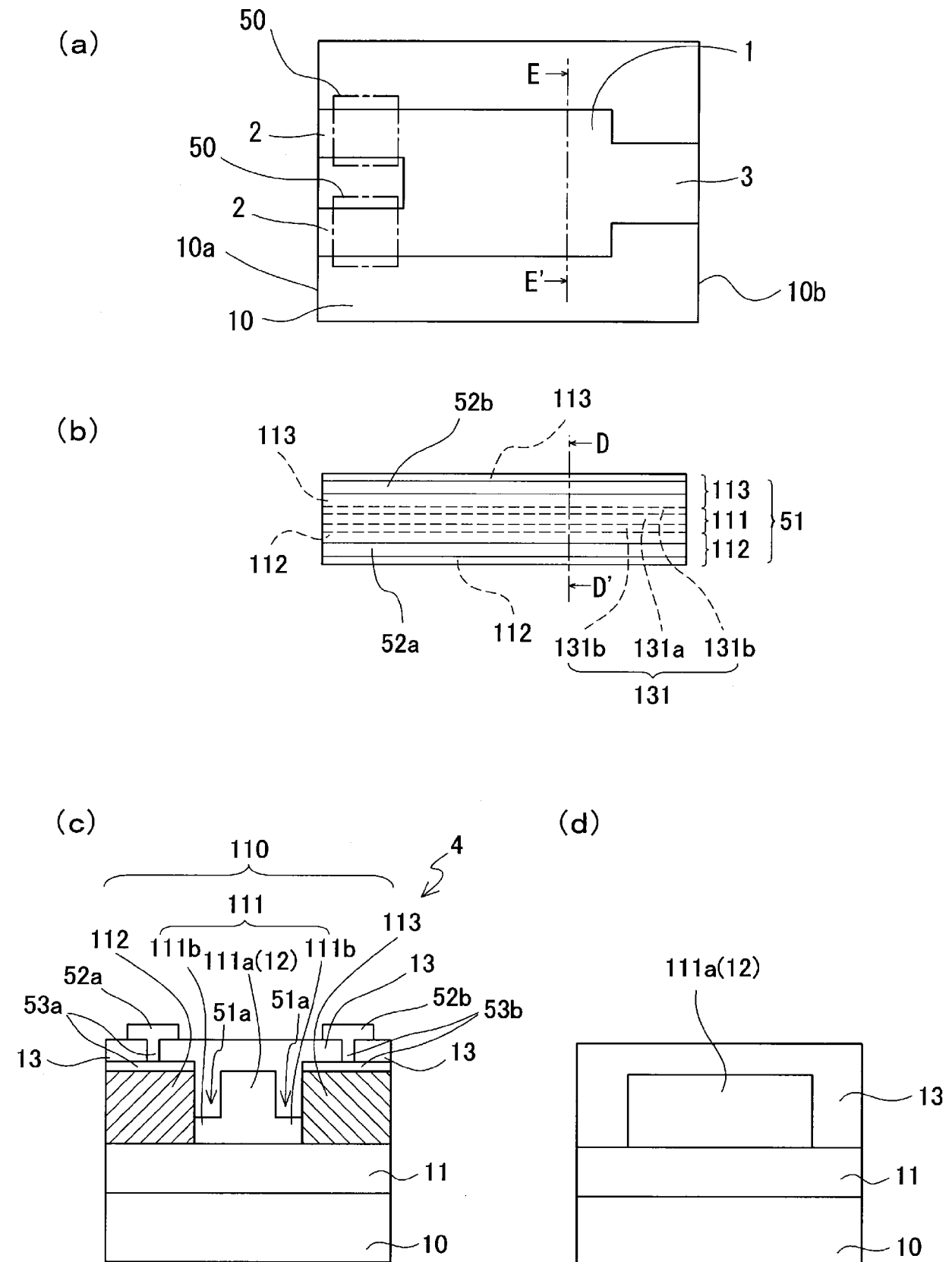
(a)



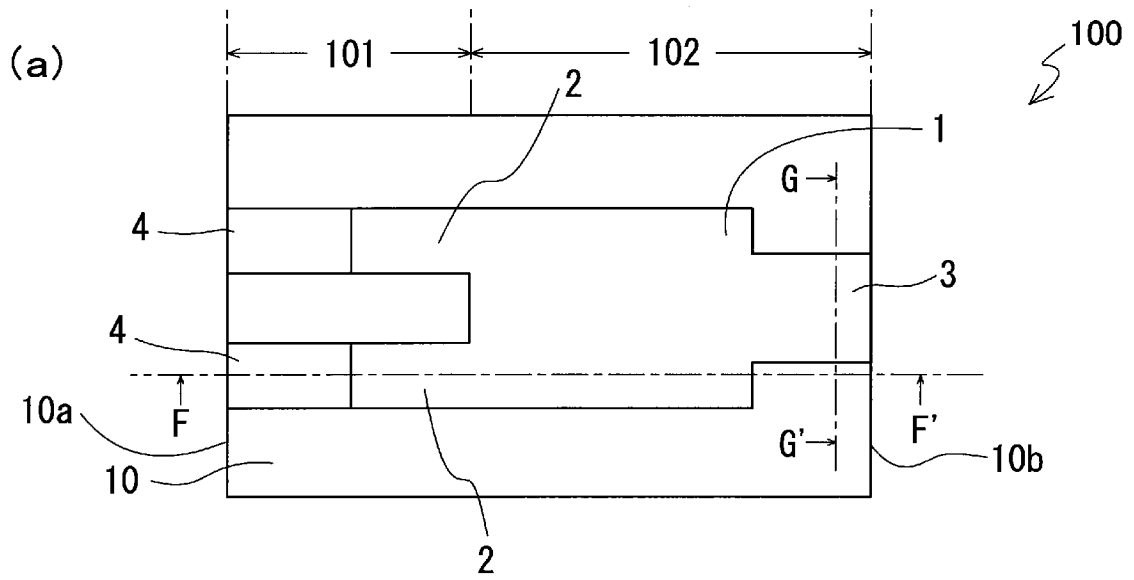
(b)



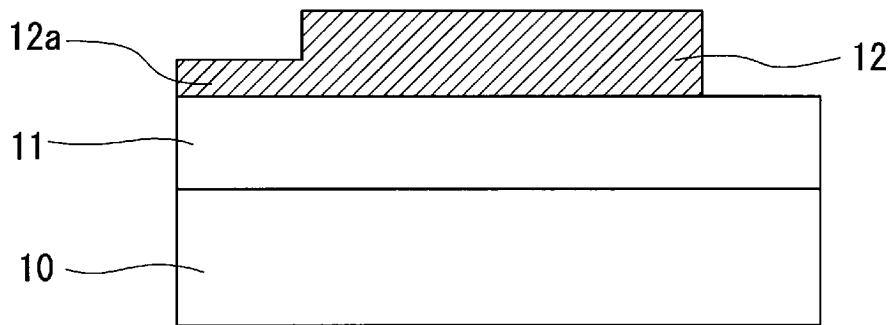
[図5]



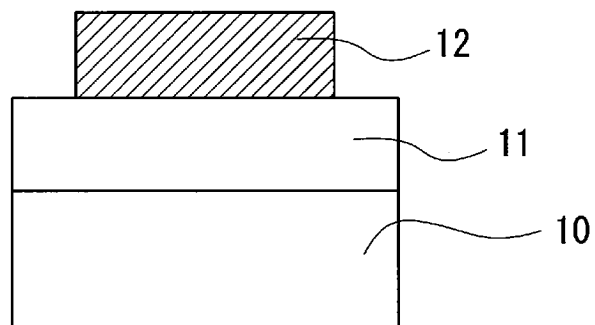
[図6]



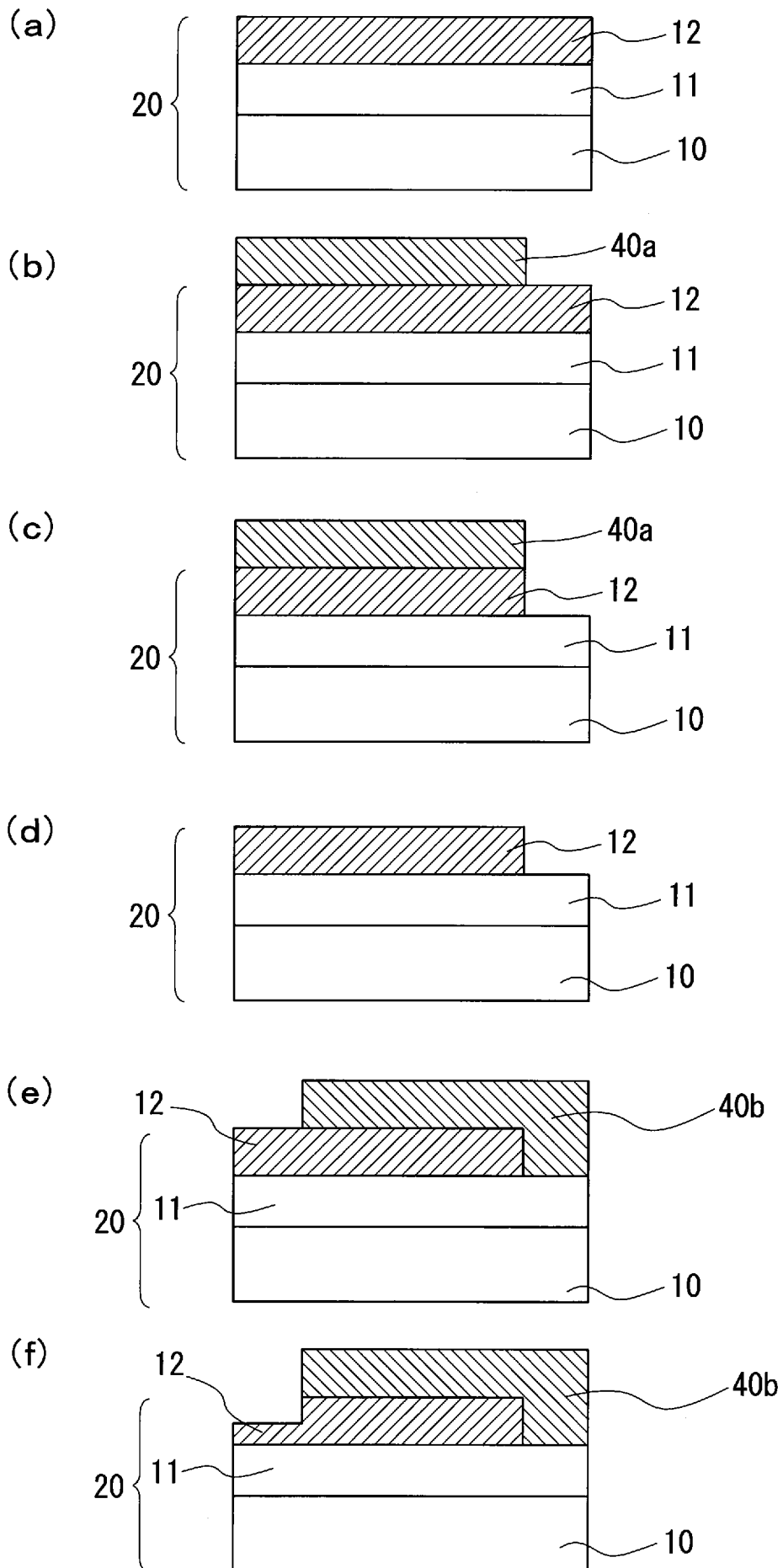
(b)



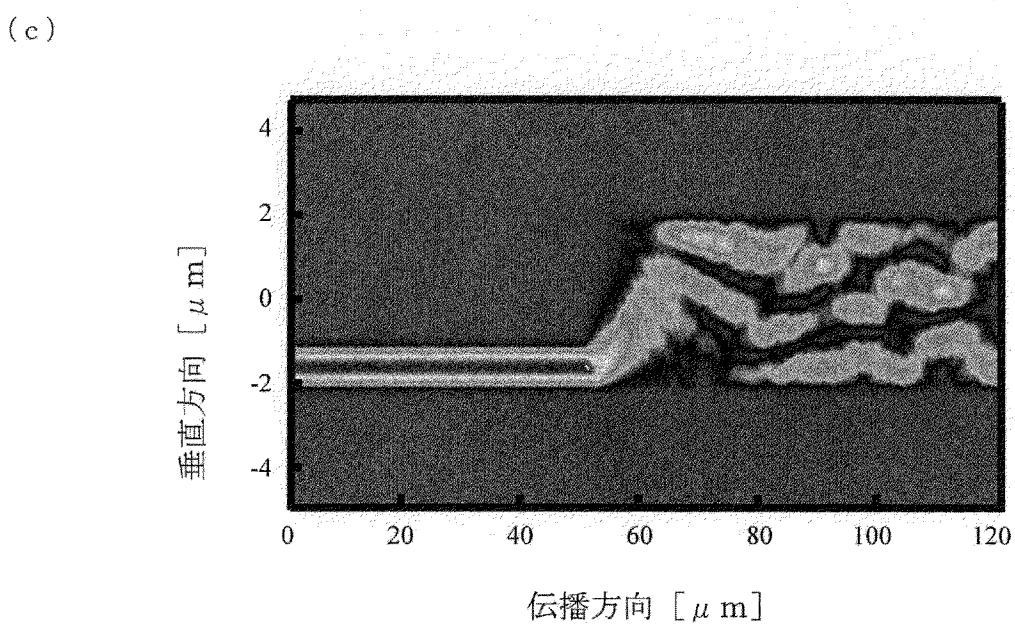
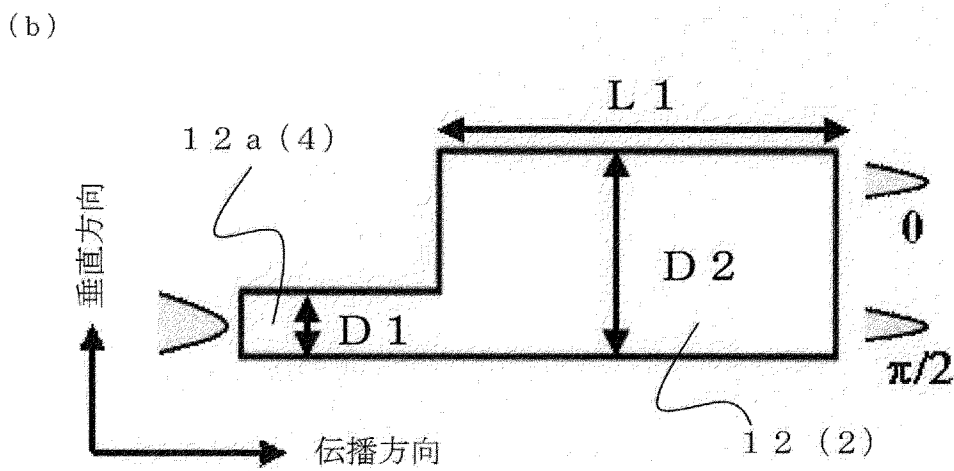
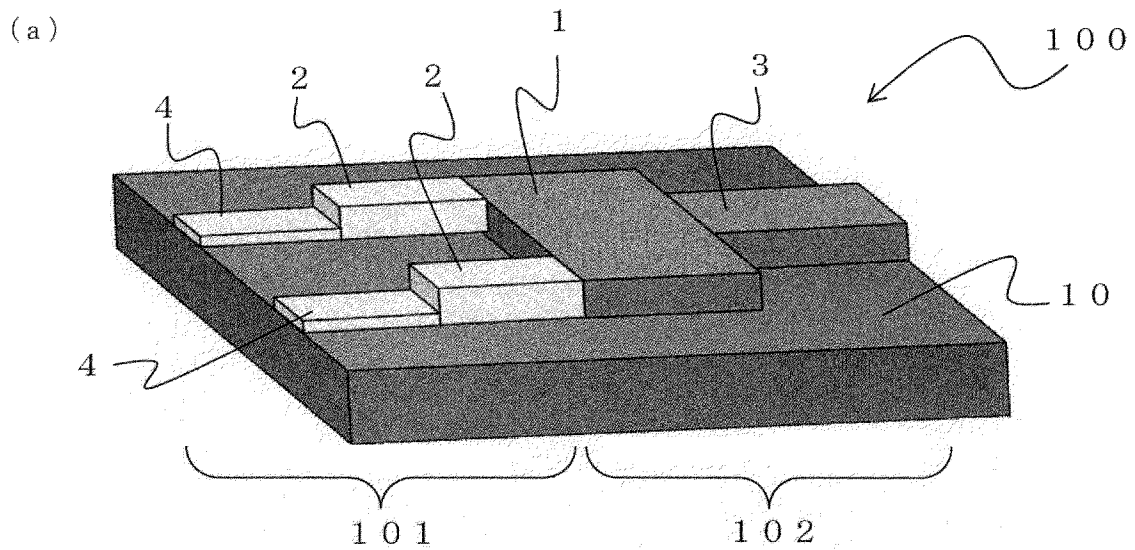
(c)



[図7]

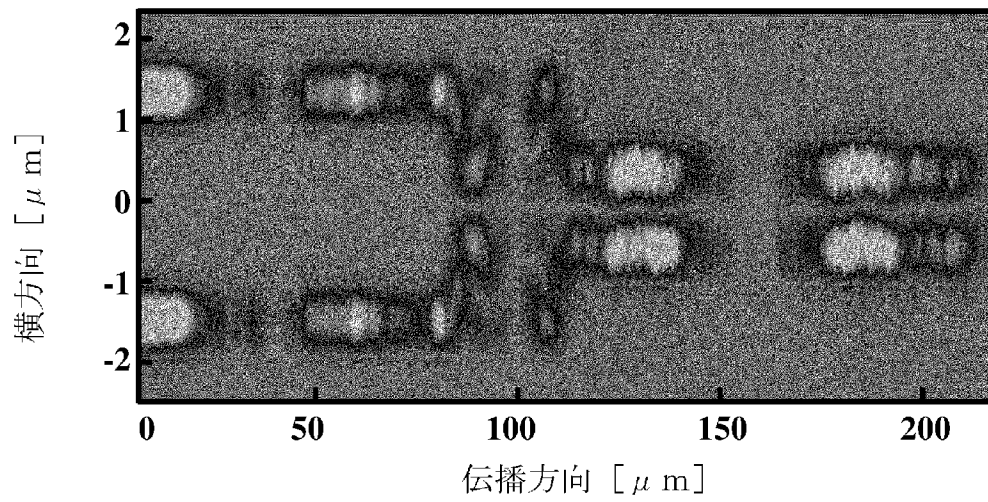


[図8]

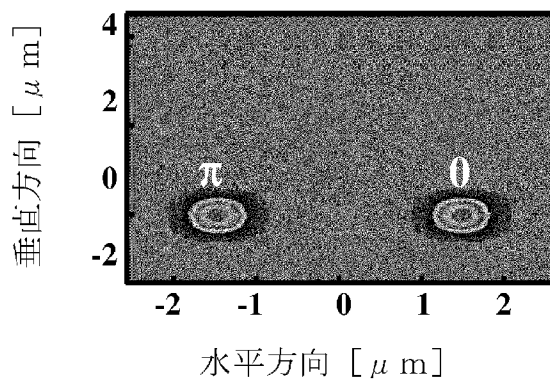


[図9]

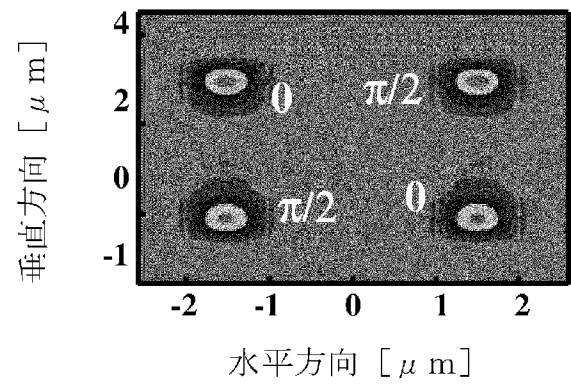
(a)



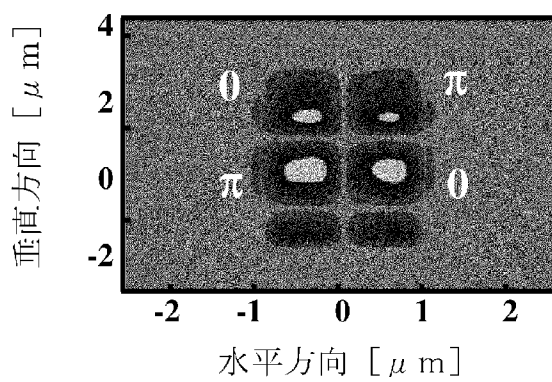
(b)



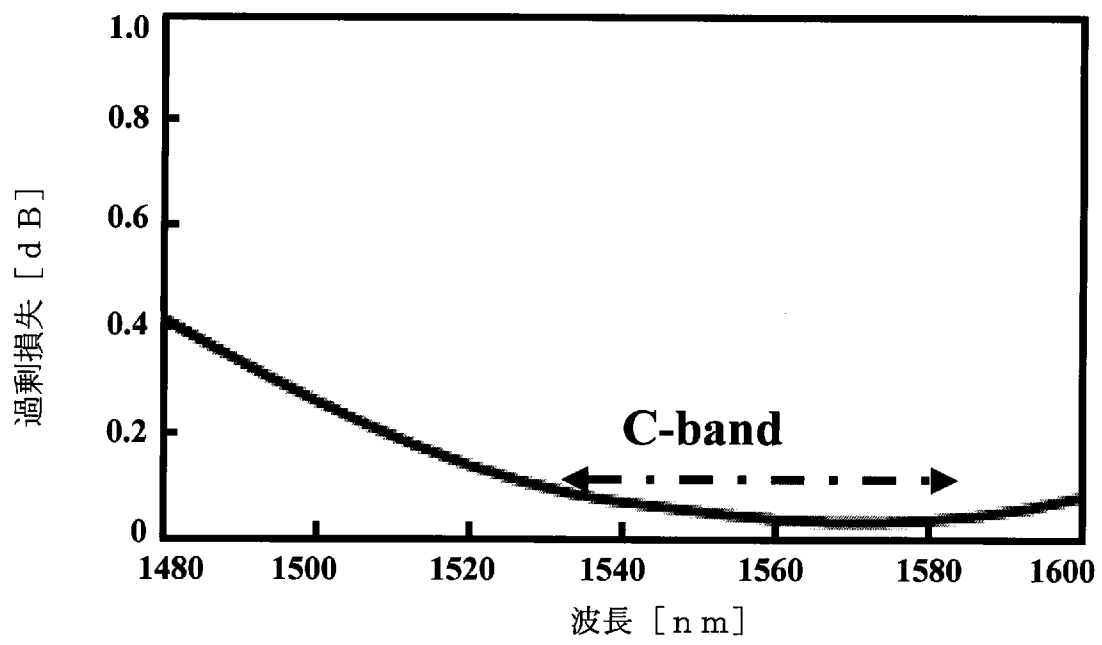
(c)



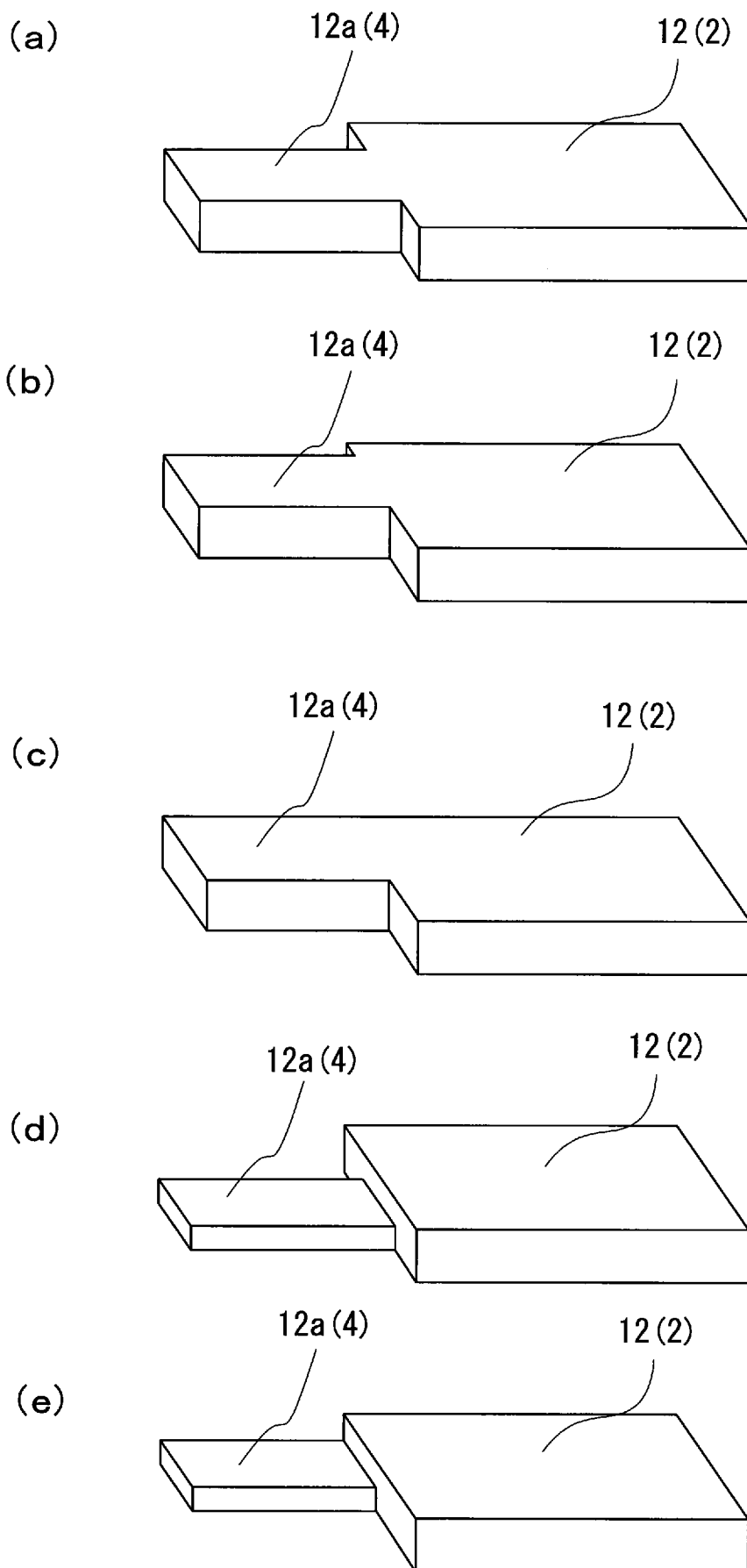
(d)



[図10]

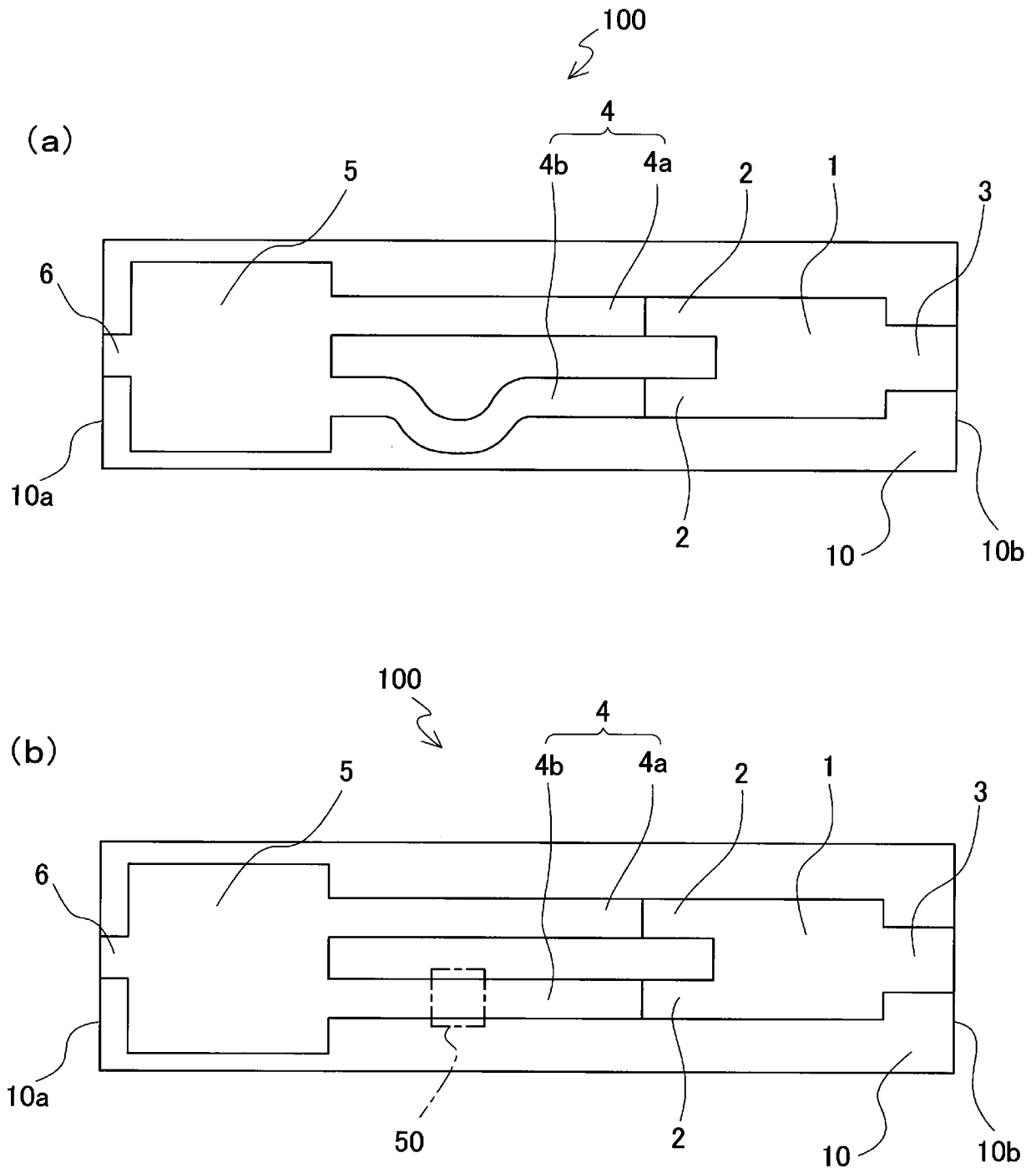


[図11]

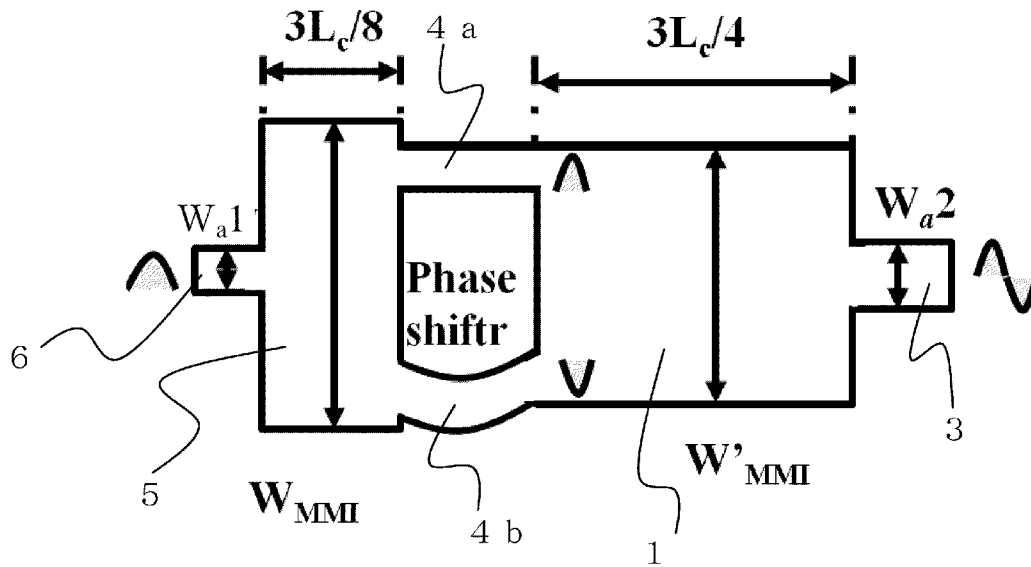
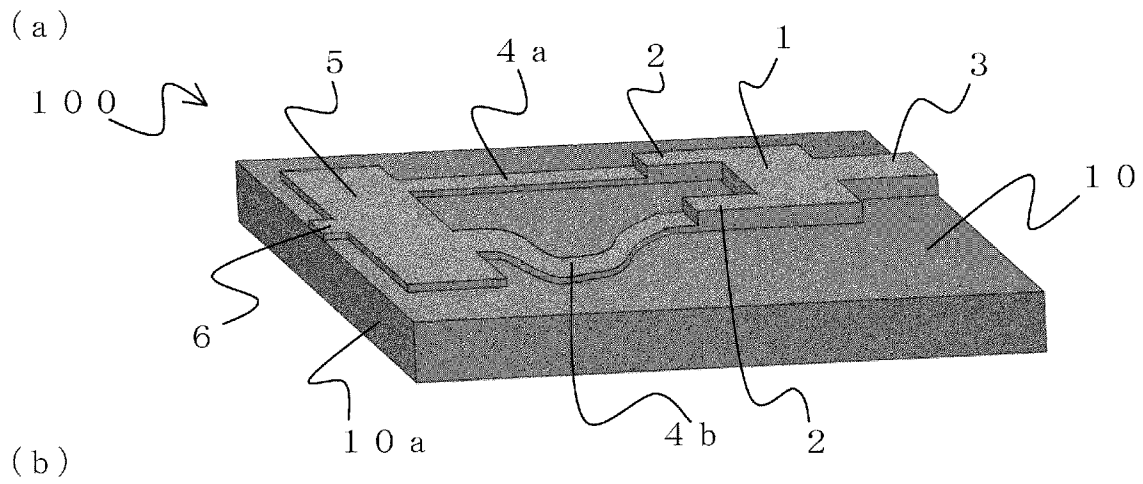




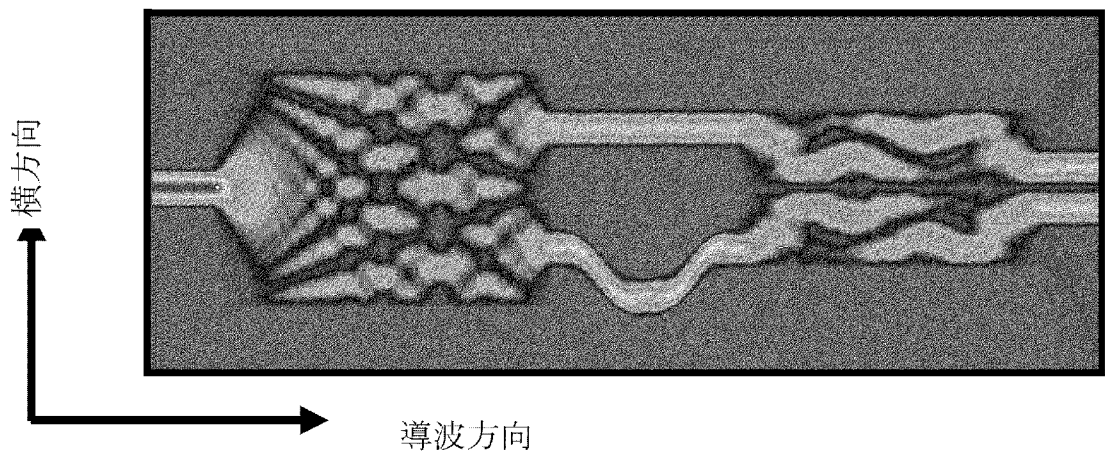
[図12]



[圖13]



(c)



**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.

PCT/JP2013/067885

**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**

G02B6/14(2006.01) i, G02B6/122(2006.01) i

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

**B. FIELDS SEARCHED**

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G02B6/12-6/14

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

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2013
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2013	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2013

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

IEEE Xplore, JSTPlus (JDreamIII), JST7580 (JDreamIII)

**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	ZHAO, Z. et al., "Mode Converter by Using MMI (Multi-Mode Interference) for Mode Multiplexing Transmission", 2012 Nen The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers Sogo Taikai Koen Ronbunshu Electronics 1, 06 March 2012 (06.03.2012), page 151	1-8
A	JP 11-502634 A (Leuthold Juerg), 02 March 1999 (02.03.1999), entire text; fig. 1 to 21 & US 5933554 A & EP 817980 A2 & WO 1996/024080 A2	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

"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  
10 July, 2013 (10.07.13)

Date of mailing of the international search report  
23 July, 2013 (23.07.13)

Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.

PCT/JP2013/067885

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	PARK, J.B. et al., Variable Optical Mode Generator in a Multimode Waveguide, IEEE Photonics Technology Letters, 2006.10.15, Vol. 18, No.20, p.2084-2086	1-8
A	JP 2007-72133 A (Nippon Telegraph and Telephone Corp.), 22 March 2007 (22.03.2007), paragraphs [0081] to [0088]; fig. 9(b), (c) (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. G02B6/14(2006.01)i, G02B6/122(2006.01)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. 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 1971-2013年  
 日本国実用新案登録公報 1996-2013年  
 日本国登録実用新案公報 1994-2013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, JSTPlus(JDreamIII), JST7580(JDreamIII)

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	ZHAO, Z. 他, マルチモード多重伝送用モードコンバーターの基礎検討, 2012年電子情報通信学会総合大会講演論文集 エレクトロニクス1, 2012.03.06, p.151	1-8
A	JP 11-502634 A (ロイトルド, ユルグ) 1999.03.02, 全文, 第1-21図 & US 5933554 A & EP 817980 A2 & WO 1996/024080 A2	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。

<p>* 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</p>	<p>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                  「&amp;」同一パテントファミリー文献</p>
---	---

国際調査を完了した日 10.07.2013	国際調査報告の発送日 23.07.2013
--------------------------	--------------------------

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)	2 X	9 8 1 3
	▲高▼ 芳徳 電話番号 03-3581-1101 内線 3294		

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	PARK, J.B. et al., Variable Optical Mode Generator in a Multimode Waveguide, IEEE Photonics Technology Letters, 2006.10.15, Vol.18, No. 20, p. 2084-2086	1-8
A	JP 2007-72133 A (日本電信電話株式会社) 2007.03.22, 段落【0081】 - 【0088】 , 第9(b), (c)図 (ファミリーなし)	1-8