

(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
2024年12月12日(12.12.2024)



(10) 国際公開番号

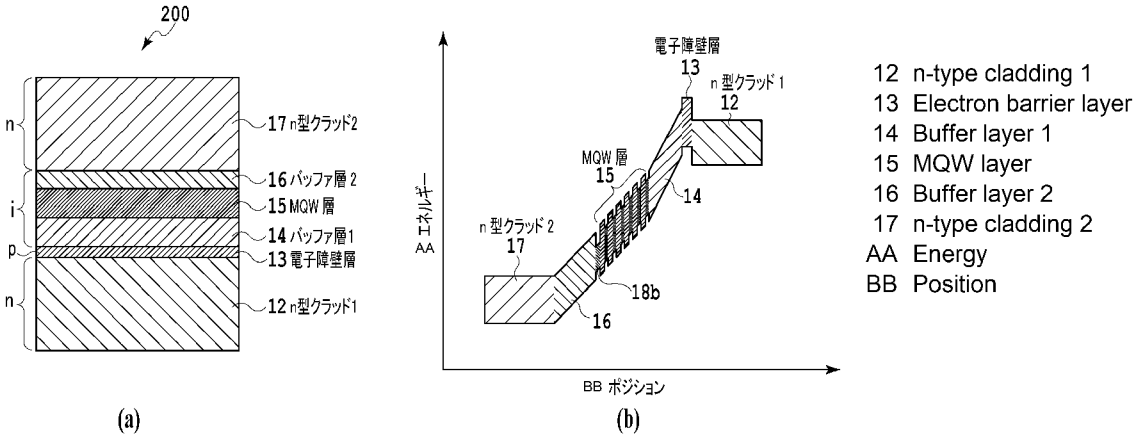
WO 2024/252989 A1

- (51) 国際特許分類:
G02F 1/017 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2024/019585
- (22) 国際出願日: 2024年5月28日(28.05.2024)
- (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 2023-092324 2023年6月5日(05.06.2023) 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). NTTイノベティブデバイス株式会社(NTT INNOVATIVE DEVICES CORPORATION) [JP/JP]; 〒2210031 神奈川県横浜市神奈川区新浦島町一丁目1番地32 Kanagawa (JP).
- (72) 発明者: 小木 曾 義 弘 (OGISO Yoshihiro); 〒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). 尾崎 常祐 (OZAKI Josuke); 〒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). 橋詰 泰彰 (HASHIZUME Yasuaki); 〒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). 布谷 伸浩 (NUNOYA Nobuhiro); 〒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). 神宝 陽太郎 (SHINPO Yotaro); 〒2128510 神奈川県川崎市

(54) Title: SEMICONDUCTOR OPTICAL MODULATION ELEMENT

(54) 発明の名称: 半導体光変調素子

[図3]



(57) Abstract: Disclosed is an InP optical modulation element which has an n-i-p-n type heterostructure. An optical modulation element according to the present disclosure has a structure in which an InGaAsP layer is eliminated as much as possible from a non-doped layer (i layer). A first buffer layer (14) which is positioned between an MQW layer (15) and a p-type electron barrier layer (13) that is adjacent to a first cladding layer (12) has a configuration in which a composition containing a material such as InGaAsP that causes optical absorption is eliminated. Meanwhile, a second buffer layer (16) which is positioned between the MQW layer (15) and a second cladding layer (17) may contain InP or InGaAsP as a constituent material. This optical modulation element greatly ameliorates the wavelength dependence of the performance of an optical modulator due to a semiconductor optical modulation element that has an n-i-p-n structure of the prior art.

幸区新小倉 1 - 1 N T T デバイスクロステクノロジ株式会社内 Kanagawa (JP).

(74) 代理人: 弁理士法人 谷・阿部特許事務所 (TANI & ABE, P.C.); 〒1070052 東京都港区赤坂 2 丁目 6 番 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, 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))

(57) 要約: n-i-p-n 型ヘテロ構造を有する InP 光変調素子が開示される。本開示の光変調素子は、ノンドープ層 (i 層) 内において、InGaAsP 層を可能な限り排除した構造を有する。第1のクラッド層 (12) に隣接する p 型電子障壁層 (13) と MQW 層 (15) との間にある第1のバッファ層 (14) は、InGaAsP などの光学吸収を生じる材料を含む組成が排除された構成である。一方、MQW 層 (15) と第2のクラッド層 (17) との間にある第2のバッファ層 (16) は、材料として InP または InGaAsP を含み得る。従来技術の n-i-p-n 構造の半導体光変調素子による光変調器の性能の波長依存性を大幅に改善する。

明 細 書

発明の名称：半導体光変調素子

技術分野

[0001] 本発明は光変調素子に関し、より詳細には、 $n-i-p-n$ 型光変調素子に関する。

背景技術

[0002] IoTや5G（第5世代移動通信システム）サービスの普及などに伴い、これらを支える光通信ネットワークに対して、より一層の高速化が求められている。キーデバイスの1つである光変調器においても、高性能化と小型・低消費電力化を実現するための研究開発が続けられている。InPなどの化合物半導体を用いたマッハツェンダ型光変調器（MZM：Mach-Zehnder Modulator）は、特に高速化の点において着目されている。

[0003] 半導体によって構成される光変調器の高速化に対して様々なアプローチがなされており、半導体層の観点から、 $n-p-i-n$ 構造または $n-i-p-n$ 構造が提案されてきた（特許文献1）。これらの構造では、半導体光変調器の高速化を制限する要因が、半導体ドーピング層の高い抵抗特性にあることに注目している。同じ濃度で大よそ一桁高い抵抗率を持つpドーピング層に代えて、nドーピング層を層構造の上下に配置して、広帯域特性と低駆動電圧特性の両立を図っている（非特許文献1）。

[0004] 図1は、従来技術の半導体光変調素子の層構造およびバンド図を示した図である。図1の(a)は、MZMの変調動作を行う光導波路の断面の層構造100を示している。 $n-i-p-n$ 構造の半導体層の構成に着目して一部を切り出して模式的に示している。図1の(b)は、(a)の $n-i-p-n$ 構造に対応したバンド図を示している。以下の説明では、光変調器、光変調素子は同じものを意味する。

[0005] 図1の(a)に示したように、図示していないInP基板がある下側から順に、n型クラッド層12、p型の拡散ストップ層18、光導波路のコア層

を含む複数の層を含むノンドープ層（ i 層）、 n 型クラッド層17が積層されている。ノンドープ層は、基板側から順に第1のバッファ層14、多重量子井戸（MQW：Multi Quantum Well）構造を有しコア層として機能するMQW層15、第2のバッファ層16を含む。上層側から基板側に向かって順に、 n 層、 i 層、 p 層、 n 層が構成されており $n-i-p-n$ 構造と呼ばれる。光導波路コアとして機能するのは、 i 層におけるMQW層15のみである。複数の層を含むノンドープの i 層は、後述するように電気的な静電容量（キャパシタ）を決定することになる。

[0006] 上述の $n-i-p-n$ 構造などのように、MZMの光導波路のクラッドの大部分を n 型ドーピング層の第1の n 型クラッド層12、第2の n 型クラッド層17によって構成した場合、逆バイアス電圧印加時の耐圧確保のため、 p 型のドーピング層が必要となる。図1の（a）においては、 p 型のドーピング層は電子障壁層13として示されている。InP基板上に構成される半導体デバイスの場合、電子障壁層13に用いるドーパントとして、Zn、Be、Cなどが用いられている。化合物半導体結晶の作製に用いられ量産製造にも適したMOVPE法による結晶成長では、ほとんどの場合、ドーパントとしてZnを用いている。

[0007] Znドーパントは拡散係数が非常に大きいことでも知られており、レーザーダイオード、光変調器等の光デバイス設計では、Zn拡散をいかに抑制するかが重要な課題である。一般にZn拡散を抑制する効果的な手法は、Znがドーピングされた層とノンドープコア層との間に、バンドギャップの異なるヘテロ界面を形成することである。例えば p -InPクラッド層からのZn拡散防止には、InPよりも飽和濃度の高いノンドープのInGaAsP層、InAlGaAs層、InAlAs層などを隣接して挿入することが知られている。特にInGaAsPは、最も高い飽和濃度特性を示すことからZnの高い拡散防止効果が期待されている。

[0008] 図1の（a）の $n-i-p-n$ 構造の半導体光変調素子の層構成では、上述のZnの拡散を防止する層として、第1の n 型クラッド層12および第1のバ

ツファ層14の間に、InGaAsPで構成された拡散ストップ層18を備えている。InGaAsP層は、V族元素としてAsとPの両方を含むことから、エピタキシャル成長において、InAlAs層からInP層へ切り替える中間層としても多用されている。この中間層を各層の層間に形成することによって、結晶欠陥を減らすことができる。

[0009] 図1の(b)のバンド図は、上述のn-i-p-n構造の半導体光変調素子の層構成に対応している。電子障壁層13は、逆バイアス印可時に大きな暗電流が流れない程度のドーピング濃度と厚さを有する、ダムの壁のように示されている。上述の拡散ストップ層18は、バンド図においても、電子障壁層13に隣接する比較的薄い領域として示されている。バンド図における各部の傾斜は、その部分(層)に掛かる電界強度に対応しており、バンドの傾斜が急であれば強い電界が、バンドの傾斜が緩ければ弱い電界が掛かっていることになる。

先行技術文献

特許文献

[0010] 特許文献1：特許第6458143号公報

非特許文献

[0011] 非特許文献1：Y. Ogiso et al., "80-GHz Bandwidth AND 1.5-V V_{π} InP-Based IQ Modulator", January 2020, IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 38, No. 2, pp. 249-255

非特許文献2：N. Kikuchi et al., "80-Gb/s Low-Driving-Voltage InP DQ PSK Modulator With an n-p-i-n Structure", June 2009, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 21, No. 12, pp. 787-789

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0012] 図1で説明した従来技術のn-i-p-n構造の半導体光変調素子では、拡散ストップ層における光吸収によって、光変調器の性能に波長依存性が生じて

しまう問題があった。逆バイアス電圧の波長依存性に加えて、フランツ・ケルディッシュ効果による損失の影響によって、MZMからの変調光出力品質に大きな波長依存性を生じさせていた。具体的には、吸収スペクトルがより長波長側に広がり、光変調器の光挿入損失を増大させていた。長波長側における変調光の出力レベル変動は、変調光のSN比にも悪影響を与え、光変調器としての性能を劣化させていた。

[0013] 本発明はこのような問題に鑑みてなされたものであって、目的とするところは、 $n-i-p-n$ 型光変調素子の変調出力性能における波長依存性を低減させることにある。

課題を解決するための手段

[0014] 本発明の1つの態様は、入力光導波路と、前記入力光導波路から分岐され、電気信号によりコアの屈折率が変調される2本の干渉光導波路と、前記2本の干渉光導波路からの合波された変調光のための出力光導波路とを備えたマッハツェンダ型の半導体光変調素子であって、前記干渉光導波路の各々は、半絶縁性のInP半導体結晶基板の(100)面と等価な基板面上に、前記InP半導体結晶基板から上層に向かって第1のn型クラッド層、p型電子障壁層、第1のバッファ層、前記コアを構成する多重量子井戸層、第2のバッファ層、および、第2のn型クラッド層が、この順に配置されており、前記第1のバッファ層はV族元素としてAsのみを含む半導体光変調素子である。

[0015] 好ましくは、前記第2のバッファ層はV族元素としてPおよびAsを含むことができる。前記p型電子障壁層のドーパントは炭素であることもできる。さらに前記p型電子障壁層および前記多重量子井戸層の間の構成材料は、単一の組成で構成され、前記組成は前記多重量子井戸層のp型電子障壁層と同一組成であることができる。

発明の効果

[0016] 以上説明をしたように、光変調素子の性能の波長依存性を低減させることができる。

図面の簡単な説明

- [0017] [図1]従来技術のn-i-p-n型光変調素子の層構造、バンド図を示す図である。
- [図2] InGaAsP層の吸収スペクトルの電界強度依存性を表す図である。
- [図3]本開示のn-i-p-n型光変調素子の層構造、バンド図を示す図である。
- [図4]本開示の半導体光変調素子の実施例1の上面構成を示す図である。
- [図5]実施例1の半導体光変調素子の屈折率変調領域の断面構造を示す図である。
- [図6]実施例1の半導体光変調素子の入力光導波路の断面構造を示す図である。

発明を実施するための形態

- [0018] n-i-p-n型ヘテロ構造を有するInP光変調素子が開示される。以下では、まず従来技術のn-i-p-n構造の半導体光変調素子における、光変調器の性能に生じる大きな波長依存性について確認する。その後、本開示の光変調素子の構成および動作を説明する。
- [0019] 図1に示した拡散ストップ層18の材料であるInGaAsPは、1.3~1.5 μ m帯の通信波長に対して高バイアス電界印加時にフランツ・ケルディッシュ効果に起因した吸収スペクトルのブロードニングによって光学吸収を伴うことが知られている。MZMにおいて低損失な光変調導波路を作製する場合、以下に述べるよう、電界印加領域であるノンドープ層に形成された拡散ストップ層18が、却って変調光出力の品質の波長依存性を招いてしまう。
- [0020] InPを用いたMZMにおいては、MQW構造による量子閉じ込めシュタルク効果を主に利用した屈折率変化によって、出力光に対してオンオフ変調（強度変調）が実施される。屈折率変化の結果、分岐した干渉光導波路の各々を伝搬する光に対して生じる位相変調により、MZMからの出力光に対してオンオフ変調が実施される。

- [0021] 光導波路の材料のバンド端波長に近い短波長側において、比較的低い逆バイアス電圧で所望の変調動作を実現できる。C帯波長における短波長側の1527nmにおいては、所定の半波長電圧に対して、比較的低い逆バイアス電圧で済む。バンド端波長から離れた長波長側の1565nmにおいては、より高いバイアス電圧が必要となる。ここで、半波長電圧とは、MZMにおける分岐した干渉光導波路間の相対位相を半波長シフトさせるのに必要な電気信号の交流振幅のことを言う。半波長電圧は、MZMからの光出力をオンオフするのに必要な電気信号の振幅に対応する。波長に関係なく半波長電圧を一定化できれば、DSP等からMZMに供給する変調信号振幅を一定化し、システムを簡易化できる。
- [0022] 一般に、量子閉じ込めシュタルク効果では、電界印可に伴う励起子の乖離が妨げられるために、バンド端吸収スペクトルはブロードニングを起こさずに、長波長側へシフトした振る舞いを示す。これは、異なる波長において所望の屈折率変化（位相変化）を得るために伴う光学吸収量に大差が無いことを示している。したがって、C帯波長全域で一定の半波長電圧による変調動作を実現させたい場合、動作波長に合わせて逆バイアス電圧のみを調整すれば良い。しかしながら、n-i-p-n構造において、InGaAsP層などがノンドープ層中に形成されている場合、光吸収の波長依存性が大きくなる。
- [0023] 図2は、InGaAsP層の吸収スペクトルの電界強度依存性を説明する図である。図2の横軸は波長を、縦軸はInGaAsPの材料固有の光吸収スペクトル、すなわち損失を表している。InGaAsPに掛かる電界強度が小さい場合、吸収スペクトルは、C帯から離れた短波長側にある。電界強度が大きくなると、吸収スペクトルはC帯側に広がり、吸収スペクトルのすそ野は長波長側にまで及ぶようになる。電界強度に依存した吸収スペクトルのこのような変化は、フランツ・ケルディッシュ効果に因るものである。
- [0024] 上述の逆バイアス電圧の波長依存性は、フランツ・ケルディッシュ効果による損失の影響が加わることによって、光変調器（MZM）の性能に悪影響を与える。具体的には、半波長電圧を2.0Vとすると、C帯波長における

短波長側の1527 nmでは、-5 V程度の逆バイアス電圧で済む。一方、バンド端波長から離れた長波長側の1565 nmでは、より高い-10 V程度のバイアス電圧を印加しなければ、同じ半波長電圧2.0 Vで変調動作を得ることができない。この時に図1に示した、n-i-p-n構造において、電子障壁層13に隣接する拡散ストップ層18には、大きな電界が掛かる。

[0025] 再び図1の(b)を参照すれば、波長によって逆バイアス電圧が変わることは、バンド図における、2つのn型クラッド層12、17間の高さ差が変わることに対応する。また変調効率が一定となる動作を実現するためには、MQW層に実質的に半波長電圧が印可される必要がある。図1の(b)のように、第1のn型クラッド層12とMQW層15の間のノンドープ層では、バンドの傾斜が急峻になっており、バッファ層14および拡散ストップ層18に、より強い電界が掛かる。長波長側において逆バイアス電圧が増加すれば、拡散ストップ層18にもさらに強い電界が掛かることになる。

[0026] しかしながら逆バイアス電圧を増大させる代償として、フランツ・ケルディッシュ効果により、図2に示したようにInGaAsP吸収スペクトルがより長波長側に広がって、干渉光導波路を伝搬する光に損失が生じる。干渉動作のために利用する光の強度自体が減少してしまい、光変調器の光挿入損失の増大となる。長波長側における変調光の出力レベル変動は、変調光のSN比にも悪影響を与え、光変調器としての性能を劣化させる。このような性能劣化は、InGaAsPの拡散ストップ層18によるフランツ・ケルディッシュ効果の影響が大きい長波長側で著しく、変調光出力の品質に強い波長依存性を生じる。

[0027] ノンドープ層内には、図1の(a)に示した拡散ストップ層18に加えて、Al元素を含んだMQW層15と、電子障壁層13との間に、InPおよびAl系材料(V族元素としてAsのみを含む)との間の切り替えのための中間層も存在し得る。図1の(a)の層構成には示していないが、MQW層15と第1のバッファ層14の間、MQW層15と第2のバッファ層16の間にも、それぞれ中間層が配置され、例えばInGaAsP層などが形成さ

れる。これらの中間層は、図1の(b)のバンド図では、中間層18a、18bとして示されている。

[0028] 拡散ストップ層18および上述の材料切り替えのための中間層18a、18bにおける、InGaAsPの持つ光吸収の波長依存性は、MZMからの変調光出力の品質に大きな波長依存性を生じさせていた。

[0029] 本開示の光変調素子は、ノンドープ層(i層)内において、InGaAsP層を可能な限り排除した構造を有する。第1のクラッド層に隣接するp型電子障壁層とMQW層との間にある第1のバッファ層は、InGaAsPなどの光学吸収を生じる材料を含む組成が排除された構成とした。一方、MQW層と第2のクラッド層との間にある第2のバッファ層は、デバイス加工プロセス時のケミカルエッチング選択性の有用性を考慮して、材料としてInPまたはInGaAsPを含み得る構成とした。すなわち、p型電子障壁層とMQW層の間にある第1のバッファ層はV族元素としてAsのみを含む。MQW層と第2のクラッド層と間にある第2のバッファ層は、V族元素としてPおよびAsを含んで良い。ノンドープのバッファ層内でInGaAsP層を可能な限り排除した構造を採用することで、フランツ・ケルディッシュ効果により長波長側で生じる光吸収を抑制して、光変調素子の変調光出力の品質における波長依存性を改善する。

[0030] 図3は、本開示のn-i-p-n型半導体光変調素子の層構造およびバンド図を示した図である。図3の(a)は、MZMにおいて変調動作を行う光導波路の断面の層構造200を示している。n-i-p-n構造の半導体層の構成に着目して一部を切り出して模式的に示している。図3の(b)は、(a)のn-i-p-n構造に対応したバンド図を示している。基本的な構成は、図1に示した従来技術の光変調素子と同様であり、相違点のみを詳細に説明する。

[0031] 図1の(a)従来技術の層構成と比較すれば、本開示の光変調素子の光導波路の層構造200では、p型電子障壁層13とMQW層15との間には、第1のバッファ層14のみを備える。図1の(a)の拡散ストップ層18を排除した構成となっており、図3の(b)のバンド図でも、p型電子障壁層

13とMQW層15との間の傾斜の急な部分には第1のバッファ層14のみを含む。

[0032] もう1つの相違点は、p型電子障壁層13におけるドーパントである。従来技術の光変調素子では、電子障壁層のp型ドーパントとしてZnを用いていたが、図3の(a)のp型電子障壁層13では、p型ドーパントとしてカーボン(C)を採用している。これによって、第1のバッファ層14へのZn拡散を抑制するInGaAsP層などの拡散防止層が不要となる。図1の(b)の従来技術のバンド図においても説明したように、p型電子障壁層13とMQW層15との間のバンドの傾きは急峻であり、強い電界が掛かることで、フランツ・ケルディッシュ効果により長波長側で光吸収を生じていた。図3の(a)の層構成では、光吸収を生じるInGaAsP層が存在しておらず、フランツ・ケルディッシュ効果による光吸収も変調光出力の品質の波長依存性も生じない。

[0033] 図3の(a)の層構成では、p型電子障壁層13とMQW層15の間には単一の第1のバッファ層14のみを備えるものとして示しているが、p型電子障壁層13とMQW層15の間に、組成の異なる複数の層を含む構成とすることもできる。p型電子障壁層とMQW層の間にあるバッファ層のV族元素としてAsのみを含むものである限り、光変調器の性能や製造工程上の理由によって、異なる組成を有する複数の層を含む構成とするとも可能である。

[0034] ヘテロ界面付近のキャリアトラップを回避するため、MQW層15からp型電子障壁層13まで単一の組成で構成することが望ましい。例えば、バンドギャップが大きく、光学吸収が起こりにくいInAlAsで構成することができる。さらに、InAlAsよりもバンドギャップが小さくなるものの、InGaAlAsとすることもできる。

[0035] 本発明の半導体光変調素子における干渉光導波路の各々は、後述するように半絶縁性のInP半導体結晶基板の(100)面と等価な基板面上の構成された層構造200を有する。基板から上層に向かって第1のn型クラッド

層12、p型電子障壁層13、第1のバッファ層14、コアを構成するMQW層15、第2のバッファ層16、および、第2のn型クラッド層17が、この順に配置されており、前記第1のバッファ層はV族元素としてAsのみを含むものとして実施できる。

実施例 1

- [0036] 図4は、実施例1の半導体光変調素子の上面構成を示した図である。光変調素子300は、半絶縁性InP(100)基板の上に図3の(a)に示した層構成を持つ干渉光導波路を備えている。入力光導波路21-1と、入力光導波路21-1から分岐された2本の干渉光導波路21a、21bと、出力光導波路21-2が構成されている。ここで詳細を説明しないが、干渉光導波路21a、21bの上方には、高周波の電気信号を印可する容量装荷型の進行波電極が形成されている。さらに、層構成によって形成されるPN接合にバイアス電圧を印可するDCバイアス電極22も形成されている。光変調素子300は、MZ型光変調器として動作する。干渉光導波路21a、21bに対して電気信号を印可してコア層に二次の光学効果を引き起こすことにより、コア層の屈折率が変調される。光変調素子300で干渉光導波路21a、21bを含む領域は、屈折率変調領域とも呼ばれる。
- [0037] 図5は、実施例1の半導体光変調素子の屈折率変調領域の断面構造を示す図である。図5の断面図は、図4のV-V線で切った、2本の干渉光導波路21a、21bの光伝搬方向に垂直な断面を示している。半絶縁性のInP基板20の上に、図3の(a)に示したn-i-p-n型の層構成を持つ干渉光導波路21a、21bが形成されている。
- [0038] 図6は、実施例1の半導体光変調素子の入力光導波路の断面構造を示す図である。図6の断面図は、図4のV1-V1線で切った、入力光導波路21-1の光伝搬方向に垂直な断面を示している。InP基板20の上に、図3の(a)に示したn-i-p-n型の層構成を一部変更した構造を持つ入力光導波路21-1が形成されている。すなわち、図3の(a)のn-i-p-n型の層構成の中で、第2のn型クラッド層17は、光学損失低減の観点から半絶

縁性 InP または ノンドープ InP によって置き換えられている。また、第 1 の n 型クラッド層 12 に接している n 型コンタクト層 23 に、DC バイアス電極 22 が形成されている。出力光導波路 21-2 の断面構成も、図 6 の入力光導波路 21-1 と全く同様である。図 5 および図 6 は模式図であって、厚さ方向を著しく拡大して表しており、各層の厚さの関係も正確に描かれていないことに留意されたい。

[0039] 以下では、実施例 1 の光変調素子 300 のより具体的な構成と、作製手順の概要を説明する。図 5 を再び参照すれば、光変調素子 300 は、InP 基板 20 の上に形成された n 型コンタクト層 23 の上に、図 3 の (a) の n-i-p-n 型の層構成を備えている。InP 基板 20 から上層に向かって第 1 の n 型クラッド層 12、p 型電子障壁層 13、第 1 のバッファ層 14、コアを構成する MQW 層 15、第 2 のバッファ層 16、および、第 2 の n 型クラッド層 17 が、この順に配置されている。

[0040] 一例を挙げれば、n 型コンタクト層 23 はキャリア濃度が $5 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ の InGaAs とし、第 1 の n 型クラッド層 12 および第 2 の n 型クラッド層 17 はキャリア濃度が $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ の InP とした。また、p 型電子障壁層 13 のキャリア濃度は光吸収係数および電気抵抗率を考慮して、 $5 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ とし、InAlAs を採用した。InAlAs は、バンドギャップが InP よりも大きく、カーボンドーパントで p 型を示し、電子キャリアブロック効果を高めることができる。

[0041] 上述の各層は、順次、有機金属気相成長 (MOVPE) によって、半絶縁性 InP (100) 基板上に結晶成長させ、堆積した。コア層である MQW 層 15 のバンドギャップ波長は、動作光波長で高効率に電気光学効果を有効に作用させ、かつ光吸収が問題にならない範囲で決定する。例えば $1.55 \mu\text{m}$ 帯の場合では、MQW 層 15 の発光波長を $1.4 \mu\text{m}$ 程度に設定した。高効率変調の観点で、MQW 層 15 は、望ましくは InGaAlAs / InAlAs の MQW 構造で形成される。例えば InGaAlAs / InGaAlAs のような多重構造としても良い。

- [0042] n型コンタクト層23、24およびクラッド層の組成は上記のものに限定されず、例えばInGaAsP組成を用いたとしても問題ない。また、下層側のp型電子障壁層13による光学吸収の影響を最小限に抑えるため、MQW層に閉じ込められた光学モードとのオーバーラップを考慮して、第1のn型クラッド層12の厚さを120nm以上とした。
- [0043] 上述のn-i-p-n型の半導体層を成膜した後で、素子間の電気分離のために、変調に寄与しない領域の上部の第2のn型クラッド層17をドライエッチングおよびウェットエッチングで除去する。入力光導波路21-1、出力光導波路21-2においては、光学損失低減の観点から第2のn型クラッド層17が除去された箇所を、半絶縁性InPまたはノンドープInP19によって埋め戻した。
- [0044] 半導体の層構造が作製された後で、[011]面方向と等価な方向に形成されたSiO₂からなるMZ干渉計光導波路パターンを形成し、ドライエッチングおよびウェットエッチング加工を用いて図5に示したリッジ形状光導波路を形成した。続いて下層側の第1のn型クラッド層12にバイアス電圧電極を形成するために、ドライ・ウェットエッチングをさらに実施して、図6に示したようにn型コンタクト層23の一部を露出させる。
- [0045] その後、絶縁膜としてベンゾシクロブテン(BCB)25を塗布して光導波路の凹凸を平坦化し、コンタクト領域のBCBを除去した後、図4に示したような容量装荷型の進行波電極パターンを金メッキ法により形成した。絶縁膜としては、BCB以外にも絶縁性の低屈折率材料であるポリイミド等を用いても良い。
- [0046] 作製した半導体光変調素子を光変調器として駆動させるため、pn接合に逆方向電界が印加されるようにDCバイアス電極22に所定のバイアスを印加し、高周波信号を信号電極(コプレーナ・ストリップ線路)に給電した。その結果、単相信号を給電して、光変調器を駆動させることができた。低消費電力化の観点から差動信号を給電して光変調器を駆動させても問題はなかった。

[0047] 以上詳細に述べたように、本発明によってn-i-p-n型光変調素子の変調出力性能における波長依存性を低減させることができる。

産業上の利用可能性

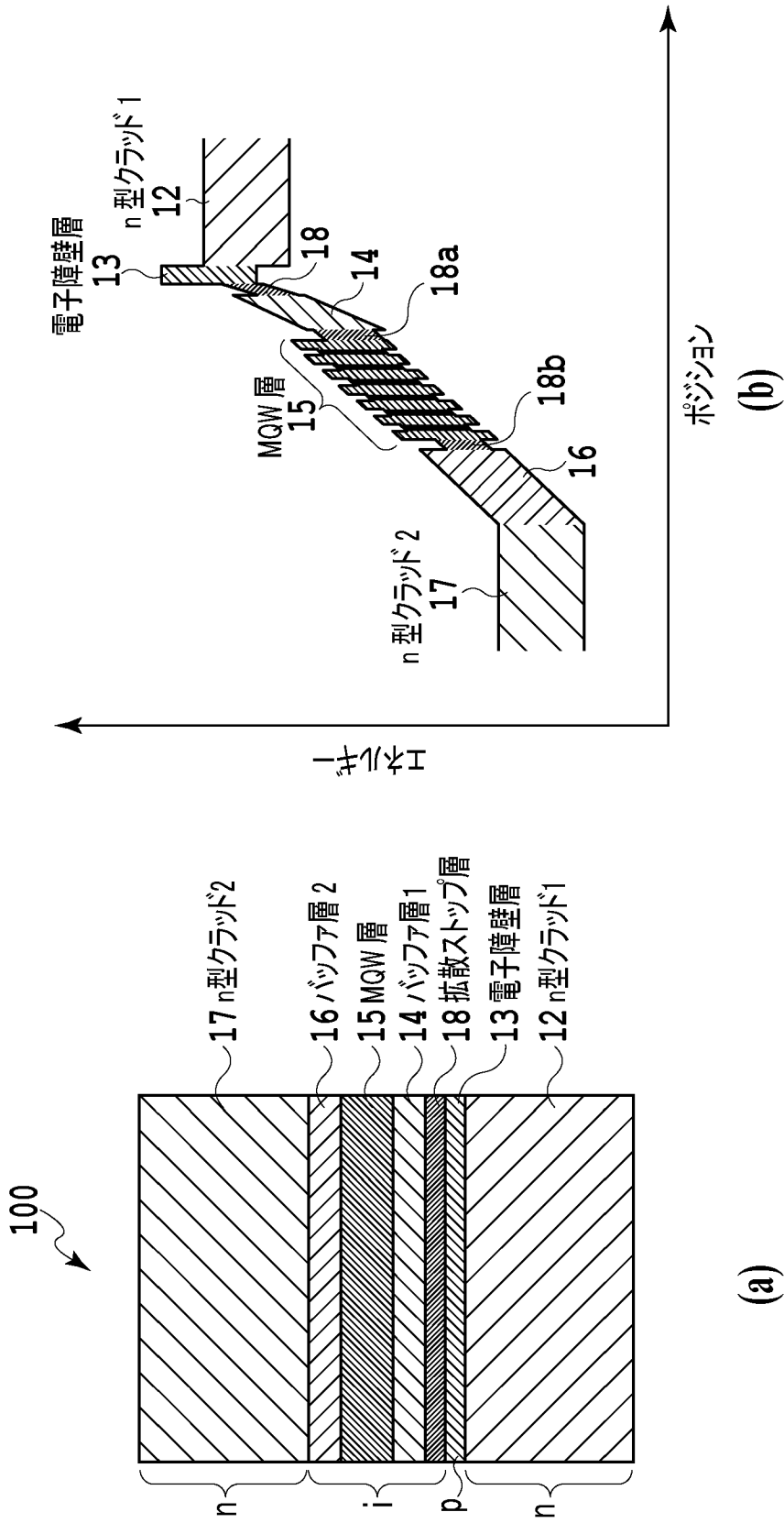
[0048] 本発明は、一般的に光通信に利用することができる。

請求の範囲

- [請求項1] 入力光導波路と、
前記入力光導波路から分岐され、電気信号によりコアの屈折率が変調される2本の干渉光導波路と、
前記2本の干渉光導波路からの合波された変調光のための出力光導波路と
を備えたマッハツェンダ型の半導体光変調素子であって、
前記干渉光導波路の各々は、半絶縁性のInP半導体結晶基板の(100)面と等価な基板面上に、前記InP半導体結晶基板から上層に向かって
第1のn型クラッド層、
p型電子障壁層、
第1のバッファ層、
前記コアを構成する多重量子井戸層、
第2のバッファ層、および、
第2のn型クラッド層が、この順に配置されており、
前記第1のバッファ層はV族元素としてAsのみを含む
半導体光変調素子。
- [請求項2] 前記第2のバッファ層はV族元素としてPおよびAsを含む請求項1に記載の半導体光変調素子。
- [請求項3] 前記p型電子障壁層のドーパントは炭素である請求項1または2に記載の半導体光変調素子。
- [請求項4] 前記p型電子障壁層および前記多重量子井戸層の間の構成材料は、単一の組成で構成され、前記組成は前記多重量子井戸層のp型電子障壁層と同一組成である請求項1または2に記載の半導体光変調素子。
- [請求項5] 前記多重量子井戸層はAl元素を含み、前記第1のバッファ層、前記多重量子井戸層および前記第2のバッファ層はノンドープ層である請求項1または2に記載の半導体光変調素子。

[請求項6] 前記2本の干渉光導波路は、それぞれリッジ構造を有する請求項1または2に記載の半導体光変調素子。

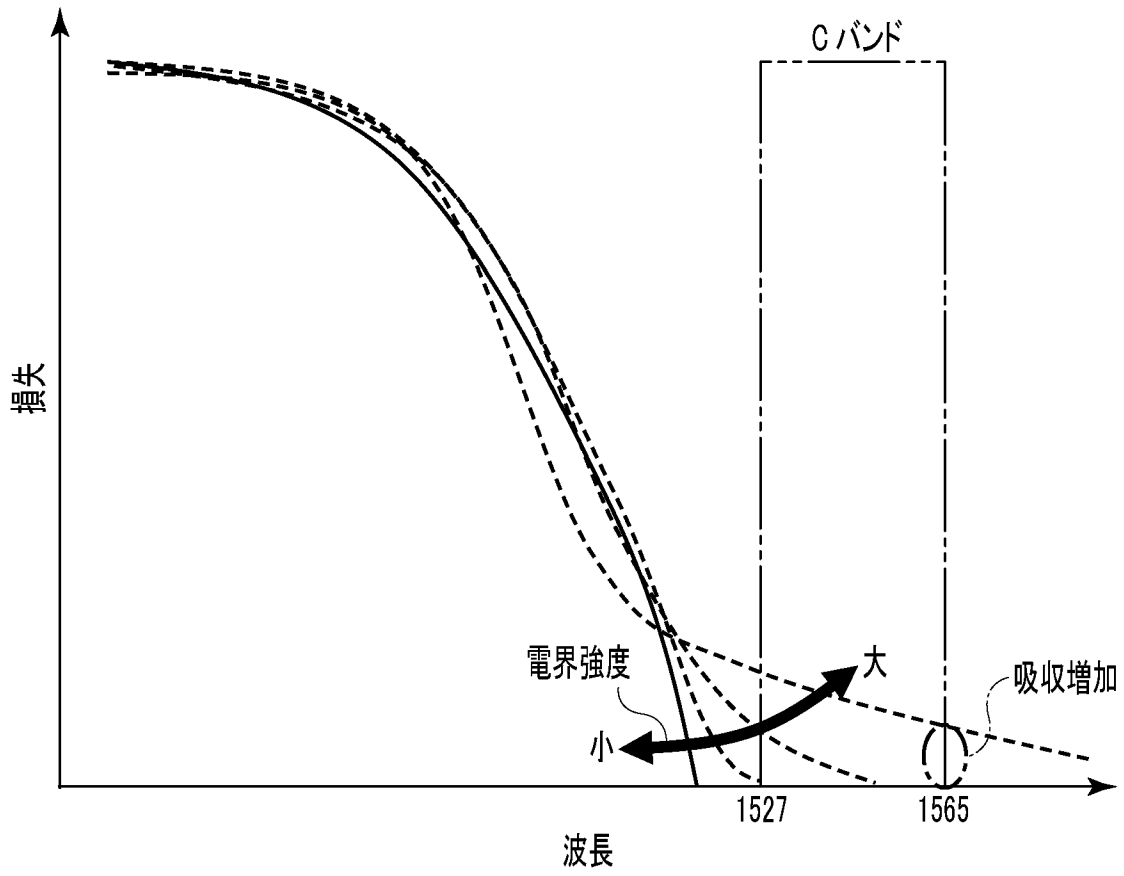
[図1]



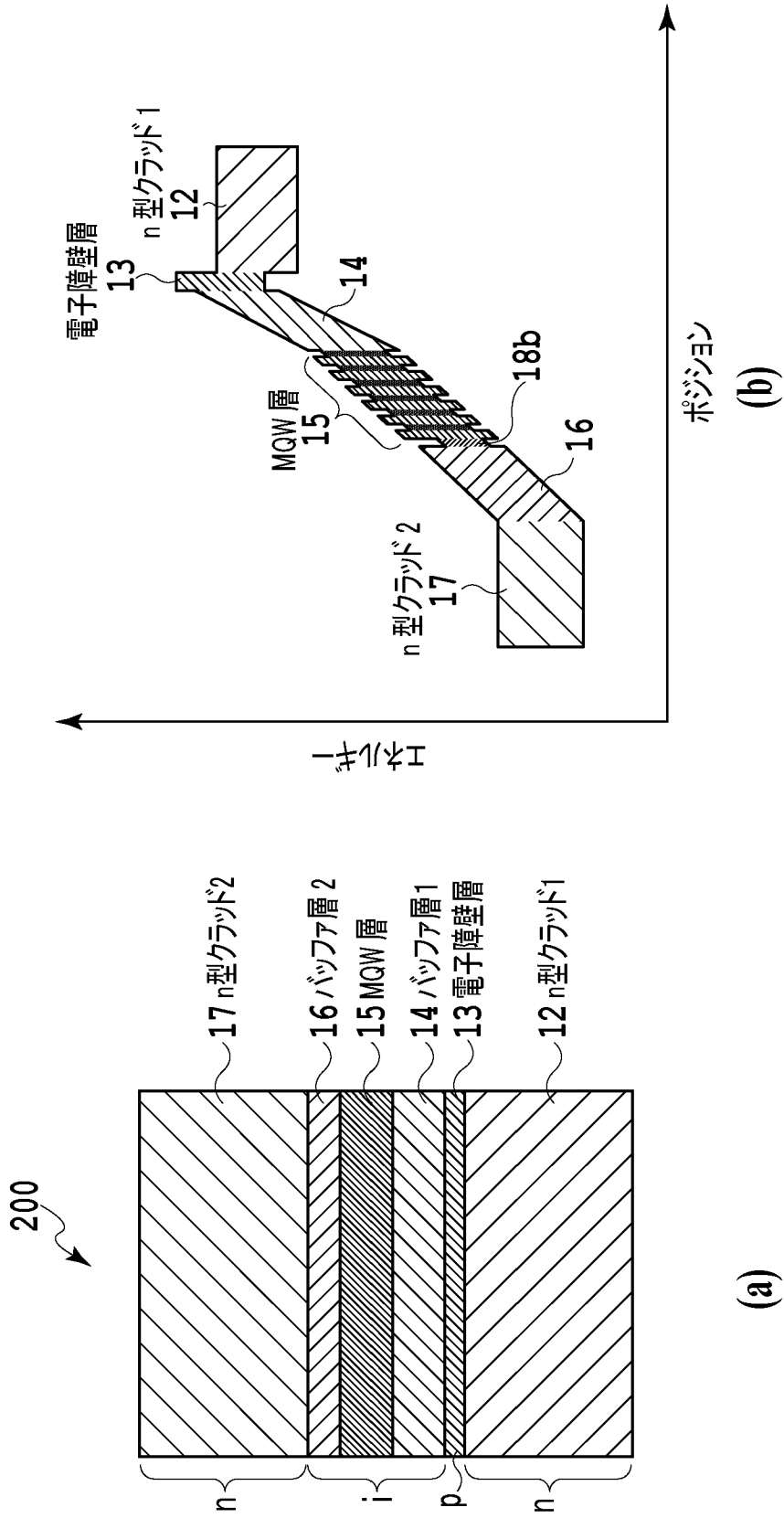
(a)

(b)

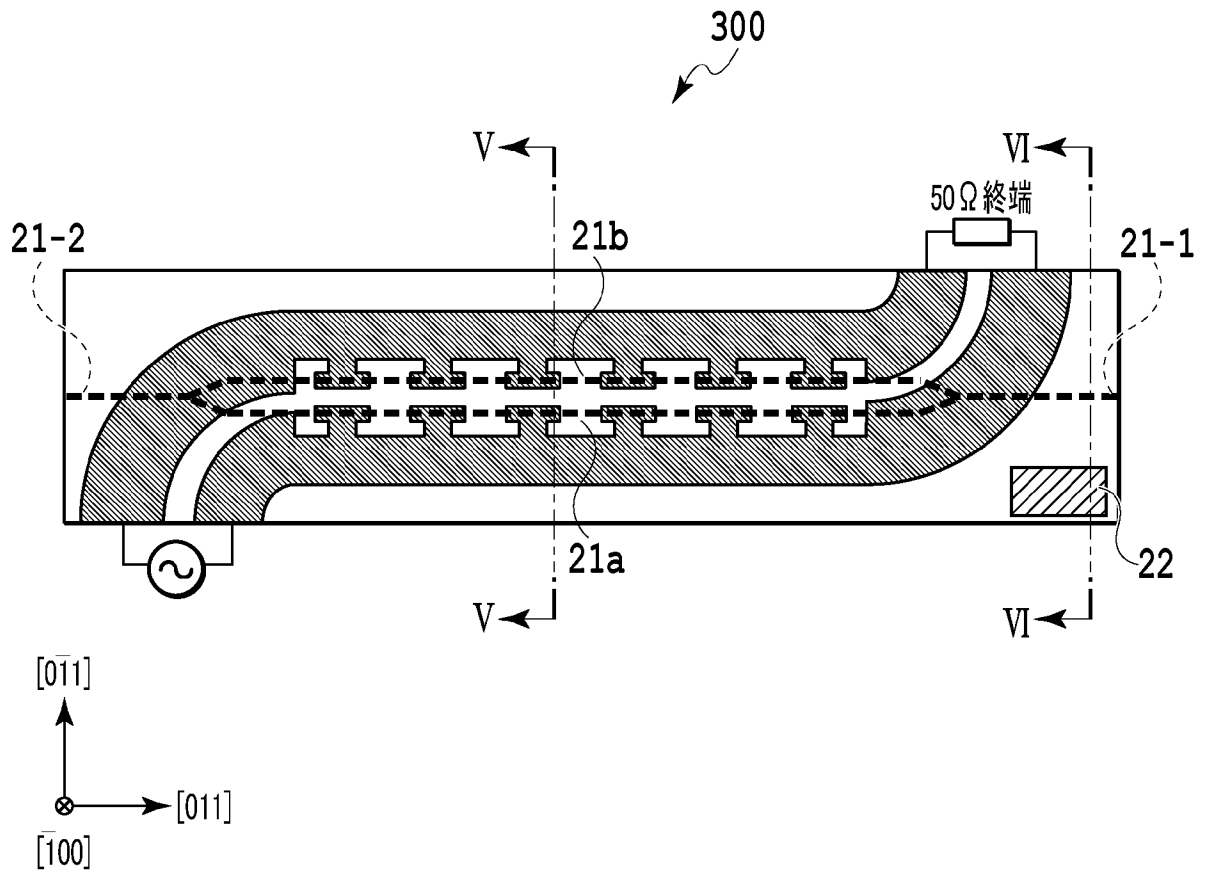
[図2]



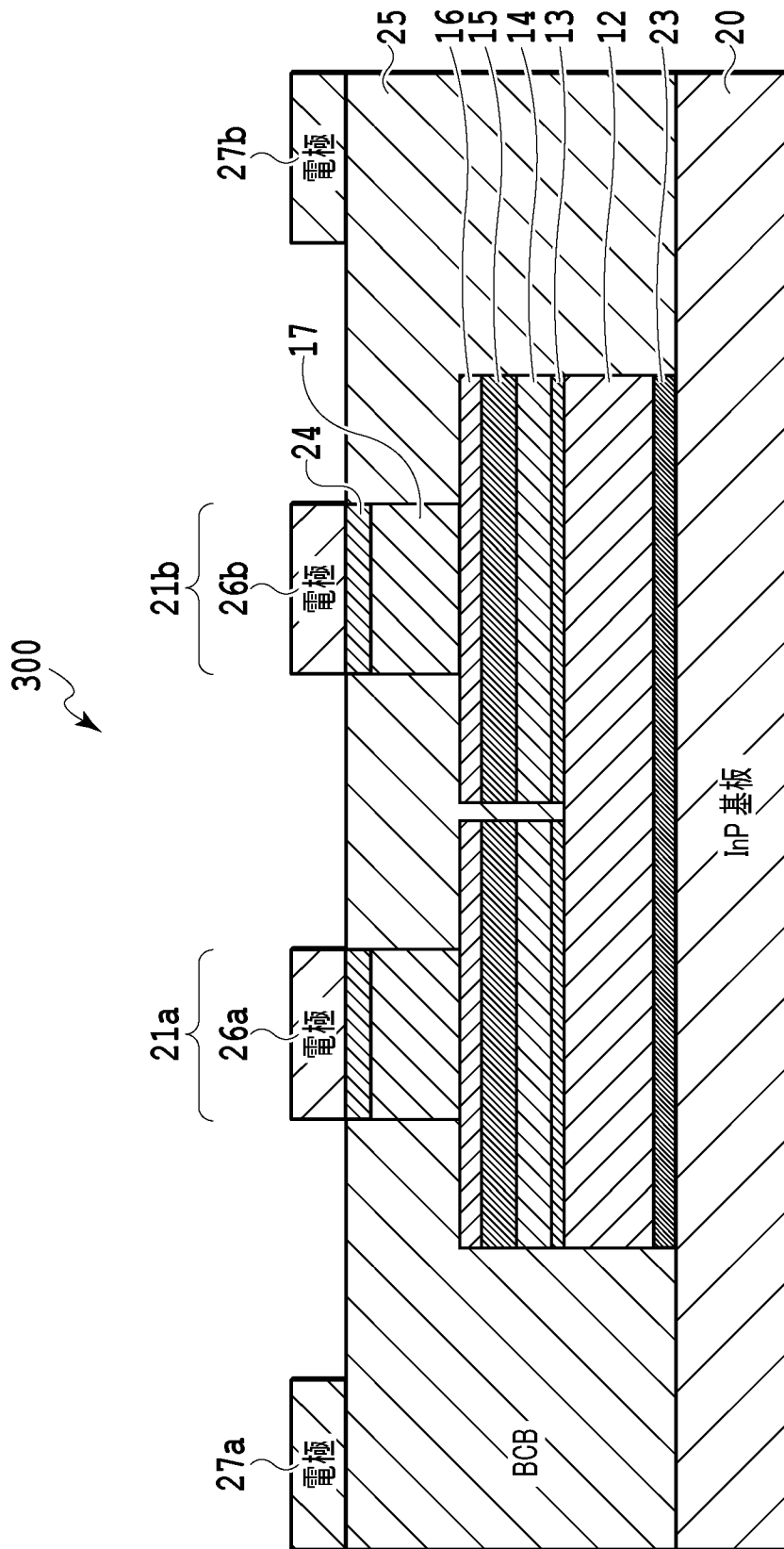
[図3]



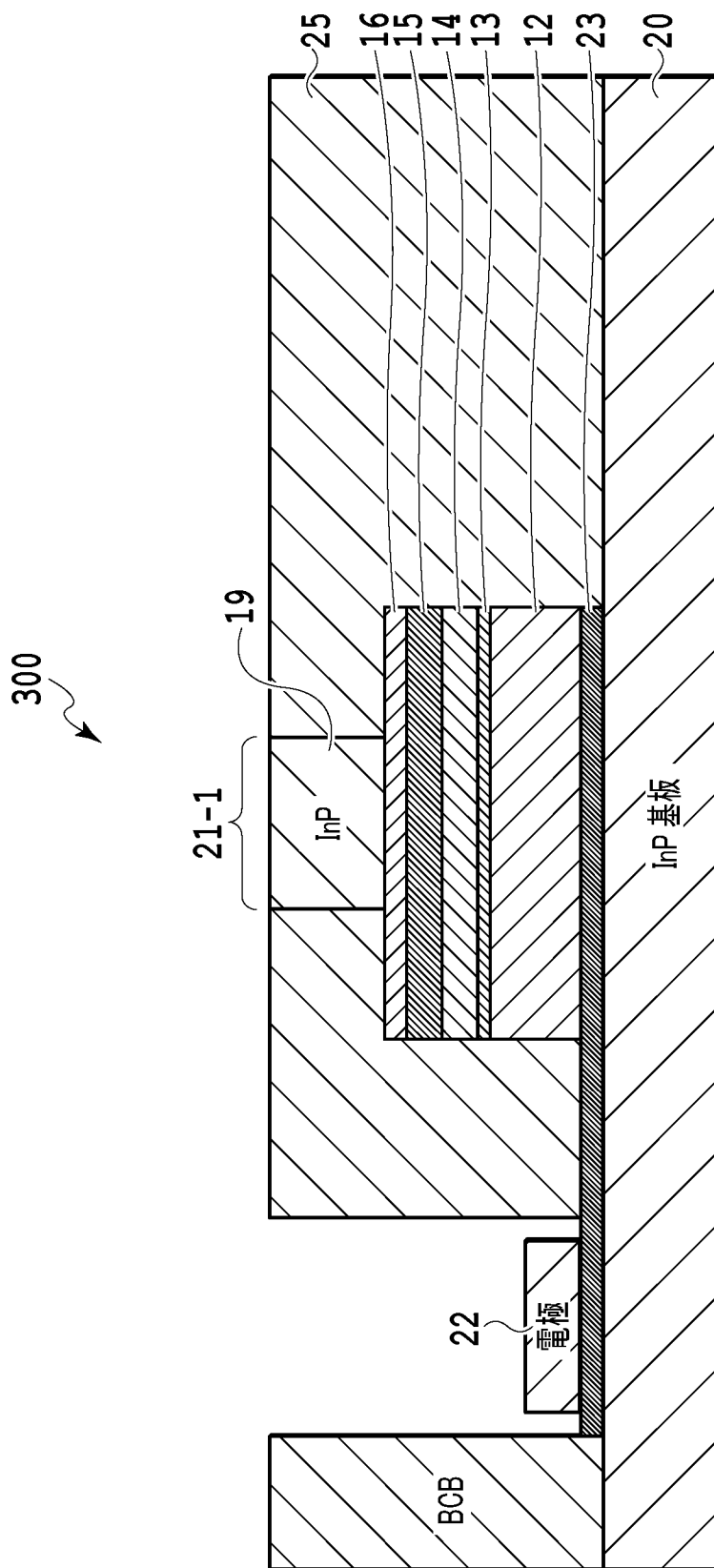
[図4]



[図5]



[図6]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2024/019585

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
G02F 1/017(2006.01)j FI: G02F1/017 503		
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; H01S5/00-5/50		
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)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2017-167359 A (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION) 21 September 2017 (2017-09-21) paragraphs [0020]-[0035], fig. 3-5	1-6
Y	JP 2023-035532 A (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION) 13 March 2023 (2023-03-13) paragraphs [0007]-[0011]	1-6
Y	JP 2018-189780 A (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION) 29 November 2018 (2018-11-29) paragraphs [0020]-[0026]	1-6
A	WO 2009/119145 A1 (NEC CORPORATION) 01 October 2009 (2009-10-01) entire text, all drawings	1-6
A	WO 2016/194369 A1 (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION) 08 December 2016 (2016-12-08) entire text, all drawings	1-6
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> 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 12 July 2024		Date of mailing of the international search report 30 July 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

International application No.

PCT/JP2024/019585

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2019/211991 A1 (NIPPON TELEGRAPH AND TELEPHONE CORPORATION) 07 November 2019 (2019-11-07) entire text, all drawings	1-6
A	US 2016/0109731 A1 (OPTONET, INC.) 21 April 2016 (2016-04-21) entire text, all drawings	1-6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2024/019585

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
JP	2017-167359	A	21 September 2017	(Family: none)	
JP	2023-035532	A	13 March 2023	(Family: none)	
JP	2018-189780	A	29 November 2018	(Family: none)	
WO	2009/119145	A1	01 October 2009	US 2011/0002575	A1
				entire text, all drawings	
WO	2016/194369	A1	08 December 2016	US 2018/0164654	A1
				entire text, all drawings	
				EP 3306381	A1
				CA 2988051	A1
				CN 107615140	A
				TW 201644064	A
WO	2019/211991	A1	07 November 2019	US 2021/0232016	A1
				entire text, all drawings	
				JP 2019-194637	A
US	2016/0109731	A1	21 April 2016	WO 2014/200920	A2
				CN 105593747	A

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） G02F 1/017(2006.01)i FI: G02F1/017 503		
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; H01S5/00-5/50 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）		
C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	JP 2017-167359 A（日本電信電話株式会社）21.09.2017（2017-09-21） 段落[0020]-[0035], 図3-5	1-6
Y	JP 2023-035532 A（日本電信電話株式会社）13.03.2023（2023-03-13） 段落[0007]-[0011]	1-6
Y	JP 2018-189780 A（日本電信電話株式会社）29.11.2018（2018-11-29） 段落[0020]-[0026]	1-6
A	WO 2009/119145 A1（日本電気株式会社）01.10.2009（2009-10-01） 全文, 全図	1-6
A	WO 2016/194369 A1（日本電信電話株式会社）08.12.2016（2016-12-08） 全文, 全図	1-6
A	WO 2019/211991 A1（日本電信電話株式会社）07.11.2019（2019-11-07） 全文, 全図	1-6
A	US 2016/0109731 A1（OPTONET, INC.）21.04.2016（2016-04-21） 全文, 全図	1-6
<input type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input checked="" type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。		
* 引用文献のカテゴリー “A” 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの “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 12.07.2024	国際調査報告の発送日 30.07.2024	
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） 大西 孝宣 2L 6006 電話番号 03-3581-1101 内線 3295	

国際調査報告
 パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2024/019585

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP 2017-167359 A	21.09.2017	(ファミリーなし)	
JP 2023-035532 A	13.03.2023	(ファミリーなし)	
JP 2018-189780 A	29.11.2018	(ファミリーなし)	
WO 2009/119145 A1	01.10.2009	US 2011/0002575 A1 全文,全図	
WO 2016/194369 A1	08.12.2016	US 2018/0164654 A1 全文,全図 EP 3306381 A1 CA 2988051 A1 CN 107615140 A TW 201644064 A	
WO 2019/211991 A1	07.11.2019	US 2021/0232016 A1 全文,全図 JP 2019-194637 A	
US 2016/0109731 A1	21.04.2016	WO 2014/200920 A2 CN 105593747 A	