(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6月6日(06.06.2024)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2024/116446 A1

(51) 国際特許分類:
G02B 6/122 (2006.01) *G02F 1/035* (2006.01)

(21) 国際出願番号： PCT/JP2023/022845

(22) 国際出願日： 2023年6月21日(21.06.2023)

(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 2022-192105 2022年11月30日(30.11.2022) JP

(71) 出願人: 株式会社村田製作所 (**MURATA MANUFACTURING CO., LTD.**) [JP/JP]; 〒6178555 京都府長岡京市東神足１丁目１０番１号 Kyoto (JP).

(72) 発明者: ▲浜▼村 聡希 (**HAMAMURA, Satoki**); 〒6178555 京都府長岡京市東神足１丁目１０番１号 株式会社村田製作所内 Kyoto (JP). 會田 康弘 (**AIDA, Yasuhiro**); 〒6178555 京都府長岡京市東神足１丁目１０番１号 株式会社村田製作所内 Kyoto (JP).

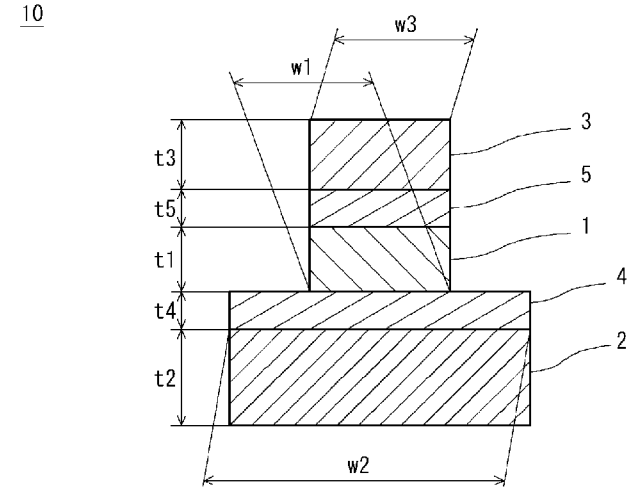
(74) 代理人: アセンド弁理士法人 (**ASCEND IP LAW FIRM**); 〒5300003 大阪府大阪市北区堂島一丁目５番１７号 Osaka (JP).

(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,

(54) **Title:** OPTICAL MODULATOR

(54) 発明の名称： 光変調器

FIG. 1



(57) **Abstract:** An optical modulator (10) comprising an optical waveguide (1), a first electrode (2), a second electrode (3), and a first low dielectric constant layer (4). The optical waveguide (1) is made of a material having electro-optical effects. The first electrode (2) is made of a semiconductor material and is disposed with a gap from the optical waveguide (1). The second electrode (3) is disposed so as to form a potential difference with the first electrode (2) and apply an electric field to the optical waveguide. The first low dielectric constant layer (4) has a refractive index smaller than the refractive index of the optical waveguide (1) and is provided in a gap between the first electrode (2) and the optical waveguide (1).

(57) 要約：光変調器（１０）は、光導波路（１）と、第１電極（２）と、第２電極（３）と、第１低誘電率層（４）とを備える。光導波路（１）は、電気光学効果を有する材料からなる。第１電極（２）は、半導体材料からなり、光導波路（１）と隙間をあけて配置される。第２電極（３）は、第１電極（２）と電位差を形成して光導波路に電界を印加するように配置される。第１低誘電率層（４）は、光導波路（１）の屈折率よりも小さい屈折率を有し、第１電極（２）と光導波路（１）との隙間に設けられる。

WO 2024/116446 A1

［続葉有］

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))

明　細　書

発明の名称 ： 光変調器

技術分野

[0001]　本開示は、光変調器に関する。

背景技術

[0002]　モバイル端末やクラウドの普及により、インターネットの通信量が著しく増加している。このため、光通信の需要が拡大している。光通信では、光信号と電気信号とを相互変換するために、光トランシーバが必要とされる。光トランシーバは、主要部品として、光変調器を備える。光変調器は、電気信号を光信号に変換する役割を担う。

[0003]　従来の光変調器は、例えば、特開２０２０－０３４６１０号公報（特許文献１）に記載されている。特許文献１の光変調器は、スロット導波路の構造を有するコア部を備える。コア部は、上部高屈折率層と、下部高屈折率層と、これらの高屈折率層の間隙（スロット）に設けられた低屈折率層とを有している。上部及び下部高屈折率層の屈折率は、低屈折率層の屈折率よりも大きい。上部及び下部高屈折率層は、それぞれ、コンタクト領域を有する。コンタクト領域の各々に金属電極が接続されている。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：特開２０２０－０３４６１０号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005]　特許文献１に記載されているように、従来の光変調器では、金属電極が使用されている。通常、光変調器の電極の材料として金属材料以外の材料が選択されることはない。金属材料以外の材料で電極を構成した場合、その材料によっては電極に光が吸収されやすくなってしまう可能性がある。電極に光が吸収されると、光の損失が大きくなる。

[0006] 本開示の目的は、金属材料以外の材料の電極への適用を実現しながら、光の損失を抑制することができる光変調器を提供することである。

課題を解決するための手段

[0007] 本開示に係る光変調器は、光導波路と、第１電極と、第２電極と、第１低誘電率層とを備える。光導波路は、電気光学効果を有する材料からなる。第１電極は、半導体材料からなり、光導波路と隙間をあけて配置される。第２電極は、第１電極と電位差を形成して光導波路に電界を印加するように配置される。第１低誘電率層は、光導波路の屈折率よりも小さい屈折率を有し、第１電極と光導波路との隙間に設けられる。

発明の効果

[0008] 本開示に係る光変調器によれば、金属材料以外の材料の電極への適用を実現しながら、光の損失を抑制することができる。

図面の簡単な説明

[0009] [図1]図１は、第１実施形態に係る光変調器の概略構成を示す断面図である。

[図2]図２は、第１実施形態において、第１低誘電率層の厚みｔ４に対する第１電極の厚みｔ２の比ｔ２／ｔ４と、終端抵抗Ｚ０に対する光変調器の抵抗Ｚの比Ｚ／Ｚ０との相関を示す図である。

[図3]図３は、第１実施形態に係る光変調器の変形例１を示す図である。

[図4]図４は、第１実施形態に係る光変調器の変形例２を示す図である。

[図5]図５は、第２実施形態に係る光変調器の概略構成を示す断面図である。

[図6]図６は、第２実施形態において、第１低誘電率層の厚みｔ４Ａに対する第１電極の厚みｔ２Ａの比ｔ２Ａ／ｔ４Ａと、終端抵抗Ｚ０に対する光変調器の抵抗Ｚの比Ｚ／Ｚ０との相関を示す図である。

[図7]図７は、第２実施形態において、第１低誘電率層の厚みｔ４Ａに対する光導波路の厚みｔ１Ａｂの比ｔ１Ａｂ／ｔ４Ａと、実効屈折率ｎとの相関を示す図である。

[図8]図８は、第３実施形態に係る光変調器の概略構成を示す断面図である。

[図9]図９は、第４実施形態に係る光変調器の概略構成を示す断面図である。

[図10]図１０は、第４実施形態に係る光変調器の変形例を示す図である。

発明を実施するための形態

[0010] 以下、本開示の実施形態について説明する。なお、以下の説明では、本開示の実施形態について例を挙げて説明するが、本開示は以下で説明する例に限定されない。以下の説明において特定の数値や特定の材料を例示する場合があるが、本開示はそれらの例示に限定されない。

[0011] 本開示の実施形態に係る光変調器は、光導波路と、第１電極と、第２電極と、第１低誘電率層とを備える。光導波路は、電気光学効果を有する材料からなる。第１電極は、半導体材料からなり、光導波路と隙間をあけて配置される。第２電極は、第１電極と電位差を形成して光導波路に電界を印加するように配置される。第１低誘電率層は、光導波路の屈折率よりも小さい屈折率を有し、第１電極と光導波路との隙間に設けられる（第１の構成）。

[0012] 第１の構成では、光導波路に電界を印加する第１電極及び第２電極のうち、第１電極が半導体材料からなる。半導体材料には、通常、不純物がドープされている。第１電極の電極としての機能を向上させるためには、不純物のドーピング量を増加させる必要がある。不純物のドーピング量が増加すると第１電極の導電率は大きくなるが、第１電極の光の吸収率が大きくなる。また、半導体材料からなる第１電極は、その屈折率が光導波路の屈折率よりも大きいため、第１電極が光導波路と接触していると、光導波路から第１電極に光が漏れやすい。そこで、第１の構成では、第１電極を光導波路と隙間をあけて配置して光導波路と非接触とした上で、第１電極と光導波路との隙間に光導波路よりも屈折率が小さい第１低誘電率層を配置している。これにより、光導波路を通過する光が第１電極側に漏れにくくなり、第１電極に吸収されにくくなる。したがって、第１電極について金属材料以外の材料である半導体材料の適用を実現しながら、光の損失を抑制することができる。

[0013] 第１の構成の光変調器は、さらに、第２低誘電率層を備えていてもよい。第２低誘電率層は、光導波路の屈折率よりも小さい屈折率を有する。この場合、第２電極は、光導波路と隙間をあけて配置され、第２低誘電率層は、第

２電極と光導波路との隙間に設けられる（第２の構成）。

[0014] 第２の構成では、光導波路に電界を印加する第１電極及び第２電極のうち、第２電極が光導波路と隙間をあけて配置されている。そのため、第２電極は光導波路と接触していない。さらに、第２電極と光導波路との隙間には、光導波路よりも屈折率が小さい第２低誘電率層が配置されている。これにより、光導波路を通過する光が第２電極側に漏れにくくなり、第２電極にも吸収されにくくなる。したがって、光の損失をより抑制することができる。

[0015] 第１の構成の光変調器において、第１低誘電率層は、光導波路の延びる方向に垂直な断面で見て光導波路を囲うとともに、光導波路と第１電極及び第２電極それぞれとの間に設けられていてもよい（第３の構成）。

[0016] 第１～第３の構成のいずれか１つの光変調器において、好ましくは、第１電極は、光導波路に積層され、第２電極は、第１電極の反対側で光導波路に積層されている（第４の構成）。この場合、第１電極、光導波路、及び第２電極の積層方向において、第１電極と第２電極との間に光導波路が存在する。そのため、第１電極及び第２電極による電界を光導波路に対して効率よく印加することができる。

[0017] 第４の構成の光変調器において、第１低誘電率層の厚みに対する第１電極の厚みの比は、２０．０以上、４４．０以下であることが好ましい（第５の構成）。この場合、電気信号の反射波の発生を抑制することができる。

[0018] 第１の構成の光変調器において、光導波路は、基板部と、基板部の表面から突出しているリッジ部とを含む。第１低誘電率層は、基板部及びリッジ部に積層され、第１電極及び第２電極は、第１低誘電率層上に積層され、互いに隙間をあけて並列に配置されていてもよい（第６の構成）。

[0019] 第６の構成の光変調器において、リッジ部の位置での第１低誘電率層の厚みに対する第１電極の厚みの比は、０．１以上、４．０以下であることが好ましい（第７の構成）。この場合、電気信号の反射波の発生を抑制することができる。

[0020] 第１～第７の構成のいずれか１つの光変調器において、好ましくは、第１

電極と光導波路との隙間の大きさは、０．７５０μｍ以上、１．６７５μｍ以下である（第８の構成）。

[0021] 第１電極と光導波路との隙間に設けられた第１低誘電率層には、光導波路から微弱ながら光がしみ出す。このしみ出した光は、エバネッセント光と称される。第８の構成のように、第１電極と光導波路との隙間の大きさが０．７５０μｍ以上であれば、エバネッセント光が第１電極に接触しにくくなり、光の損失をより抑制することができる。

[0022] 第８の構成では、第１電極と光導波路との隙間の大きさが１．６７５μｍ以下となっている。この場合、第１電極と光導波路との距離が大きくなり過ぎず、第１電極と第２電極との間に印加する電圧を大きくしなくても、光導波路に対する電界の大きさを確保することができる。

[0023] 第１～第８の構成のいずれか１つの光変調器において、好ましくは、第１電極における半導体材料は、シリコンに不純物がドープされたシリコン半導体材料である（第９の構成）。

[0024] 第９の構成の光変調器において、好ましくは、第１電極における不純物の濃度は、１．０×10^{17}ｃｍ$^{-3}$以上、１．０×10^{22}ｃｍ$^{-3}$以下である（第１０の構成）。第１電極では、不純物の増加に伴って、抵抗率が小さくなり、導電率が大きくなる。不純物の濃度が１．０×10^{17}ｃｍ$^{-3}$以上であれば、第１電極を電極として効果的に機能させることができる。不純物の濃度が１．０×10^{22}ｃｍ$^{-3}$以下であれば、不純物の析出を防止することができる。

[0025] 第９又は第１０の構成の光変調器において、好ましくは、第１電極は、シリコン単結晶基板である（第１１の構成）。

[0026] 第９～第１１の構成のいずれか１つの光変調器において、第１低誘電率層の主成分がSiO_2であってもよい（第１２の構成）。第１電極に用いられる半導体材料がシリコン半導体材料であるため、熱酸化法によりSiO_2の第１低誘電率層を第１電極上に成膜することができる。熱酸化法による成膜では、第１電極に対する第１低誘電率層の密着性が良く、第１電極と第１低誘電

率層との界面に異物が入りにくい。このため、第１電極と第１低誘電率層との界面において、電気的な損失を抑制することができる。また、第１電極と第１低誘電率層との界面で異物の集積が抑えられるため、光変調器の信頼性及び寿命の向上を図ることができる。

[0027] 第１～第１２の構成のいずれか１つの光変調器において、第１電極の屈折率が３よりも小さい（第１３の構成）。この場合、例えば第１０の構成の不純物の濃度（ドーピング量）に対応して、第１電極の屈折率が３よりも小さくなる。

[0028] 第１～第１３の構成のいずれか１つの光変調器において、好ましくは、第１電極のうち光導波路側の表層には、第１電極の他の部分と比較して高い濃度で不純物がドープされている（第１４の構成）。この場合、第１電極において、光導波路の近傍に導電率の大きい領域を局在させることができ、表皮効果によって高周波信号の減衰を抑えることができる。

[0029] 以下、本開示の実施形態について、図面を参照しつつ説明する。各図において同一又は相当の構成については同一符号を付し、重複する説明を繰り返さない。

[0030] ＜第１実施形態＞

［光変調器の構成］

図１は、第１実施形態に係る光変調器１０の概略構成を示す断面図である。光変調器１０は、光導波路１と、第１電極２と、第２電極３と、第１低誘電率層４と、第２低誘電率層５とを備える。図１では、光導波路１の延びる方向に垂直な断面が示されている。本明細書において、特に断りがない限り、断面は、光導波路１の延びる方向に垂直な断面を意味する。

[0031] 図１に示すように、光導波路１は、実質的に矩形状の断面を有していてもよい。光導波路１は、電気光学効果を有する材料（電気光学材料）からなる。光導波路１は、光の伝送路として機能する。光導波路１として、ＬｉＮｂＯ$_3$（ニオブ酸リチウム）、ＬｉＴａＯ$_3$（タンタル酸リチウム）、ＰＬＺＴ（ジルコン酸チタン酸鉛ランタン）、ＫＴＮ（タンタル酸ニオブ酸カリウム

）、又はＢａＴｉＯ$_3$（チタン酸バリウム）等が用いられる。光導波路１として、電気光学ポリマー（ＥＯポリマー）が用いられてもよい。

[0032] 第１電極２及び第２電極３は、光導波路１を通過する光を制御するための制御電極として機能する。第１電極２及び第２電極３の各々は、実質的に矩形状の断面を有していてもよい。第１電極２及び第２電極３は、互いの間に電位差を形成して光導波路１に電界を印加するように配置されている。光導波路１は、第１電極２と第２電極３との間に配置されている。

[0033] 本実施形態の例において、第１電極２は、光導波路１に積層されている。第２電極３は、第１電極２の反対側で光導波路１に積層されている。別の観点では、第１電極２及び第２電極３は、光導波路１を挟むように配置されている。

[0034] 第１電極２は、光導波路１と隙間をあけて配置されている。本実施形態では、第１電極２は、光導波路１及び電極２，３の積層方向で光導波路１と離れている。第１電極２は光導波路１と接触していない。第１電極２と光導波路１との隙間の大きさは、例えば、０．７５０μｍ以上、１．６７５μｍ以下である。本明細書において、第１電極２と光導波路１との隙間の大きさは、第１電極２から光導波路１までの最短距離を意味する。本実施形態の場合、第１電極２から光導波路１までの積層方向の距離が、第１電極２から光導波路１までの最短距離である。

[0035] 第１電極２は、半導体材料からなる。すなわち、第１電極２は半導体電極である。第１電極２に用いられる半導体材料は、典型的には、Ｓｉ（シリコン）に不純物がドープされたシリコン半導体材料である。半導体材料として、例えば、Ｇｅ（ゲルマニウム）等を用いた他の単元素半導体、又はＧａＡｓ（ガリウム砒素）等の化合物半導体が用いられてもよい。不純物は、ｐ型不純物及びｎ型不純物のいずれでもよい。例えば、半導体材料がシリコン半導体材料である場合、ｐ型不純物として、ホウ素等の第３族元素が用いられ、ｎ型不純物として、リン、砒素、アンチモン等の第５族元素が用いられる。

[0036] 第１電極２に用いられる半導体材料がシリコン半導体材料である場合、第１電極２における不純物の濃度（ドーピング量）は、好ましくは、１．０×１０^{17}ｃｍ$^{-3}$以上、１．０×１０^{22}ｃｍ$^{-3}$以下である。不純物のドーピング量の増加に伴って、半導体材料の抵抗率が小さくなり、導電率が大きくなる。ドーピング量が１．０×１０^{17}ｃｍ$^{-3}$以上であれば、第１電極２を電極として効果的に機能させることができる。ドーピング量が１．０×１０^{22}ｃｍ$^{-3}$以下であれば、シリコン半導体材料における不純物の固溶限界より、不純物の析出を防止することができる。ドーピング量の増加に伴って、第１電極２の屈折率は低下する。例えば、第１電極２の屈折率は３よりも小さい。

[0037] 半導体材料の屈折率は、不純物のドーピングの前後にかかわらず、光導波路１を構成する電気光学材料の屈折率よりも大きい。不純物がドープされていない状態の半導体材料の屈折率は、例えば、Ｓｉで３．４、Ｇｅで５．５、ＧａＡｓで３．３である。電気光学材料の屈折率は、例えば、$LiNbO_3$で２．３、$LiTaO_3$で２．８、ＰＬＺＴで２．５、ＫＴＮで２．１、$BaTiO_3$で２．６である。不純物がドープされると半導体材料の屈折率は低下するが、ドープ後の半導体材料の屈折率も、電気光学材料の屈折率と比較して大きい。

[0038] 以下、上述したドーピング量の範囲について、より詳しく説明する。ドーピング量の上限が１．０×１０^{22}ｃｍ$^{-3}$であるのが好ましい理由は、シリコン半導体材料における不純物の固溶限界に基づく。第１電極２において、ドーピング量が固溶限界である１．０×１０^{22}ｃｍ$^{-3}$を超えると、不純物が析出し、第１電極２及び光変調器１０の信頼性が低下する。一方、ドーピング量の下限が１．０×１０^{17}ｃｍ$^{-3}$であるのが好ましい理由は、以下の通りである。電極の厚み及び幅を設計する際の指標として、表皮深さがある。電極の厚み及び幅が表皮深さよりも小さいと、抵抗値が上昇する。このため、電極の厚み及び幅を表皮深さ以上とするのが好ましい。１ＧＨｚ以上の周波数信号を扱う光変調器の運用を考慮する場合、ドーピング量が１．０×１０^{17}ｃｍ$^{-3}$であるとき、導電率は１０００Ｓ／ｍであり、表皮深さは５００μｍ

となる。例えば、微細加工によってシリコン半導体材料から電極を形成することを考慮すると、電極の厚みとしては５００μｍ程度が限界である。そうすると、電極としての性能を確保する観点から、１０００Ｓ／ｍ以上の導電率を有する電極を得るためには、ドーピング量を１．０×$10^{17}$$cm^{-3}$以上とすればよい。

[0039] 第１電極２は、例えばシリコン単結晶基板である。不純物は、例えば、第１電極２の素材となるシリコン単結晶の母材基板に予めドープされている。この母材基板を別の基板上に配置してパターニング（エッチング、ダイシング等）することによって、第１電極２を形成できる。第１電極２は、ＳＯＩ（Ｓｉｌｉｃｏｎ　ｏｎ　Ｉｎｓｕｌａｔｏｒ）基板の活性層であってもよい。この場合、ＳＯＩ基板の活性層をパターニング（エッチング、ダイシング等）することによって、第１電極２を形成できる。このようにして形成された第１電極２に対して、熱拡散法、又はイオン注入法等によって、不純物をさらに導入してもよい。

[0040] 第１電極２は、基板上に形成された半導体シリコン層であってもよい。例えば、スパッタリング、蒸着、又はＣＶＤ等によって、基板上にシリコン層を形成できる。このシリコン層に対して、熱拡散法、又はイオン注入法等によって不純物を導入して、第１電極２としての半導体シリコン層を形成できる。

[0041] 第２電極３は、光導波路１と隙間をあけて配置されている。本実施形態では、第２電極３は、光導波路１と積層方向で離れている。第２電極３は光導波路１と接触していない。第２電極３と光導波路１との隙間の大きさは、例えば、０．７５０μｍ以上、１．６７５μｍ以下である。本明細書において、第２電極３と光導波路１との隙間の大きさは、第２電極３から光導波路１までの最短距離を意味する。本実施形態の場合、第２電極３から光導波路１までの積層方向の距離が、第２電極３から光導波路１までの最短距離である。

[0042] 第２電極３は、例えば金属材料からなる。すなわち、第２電極３は金属電

極である。ただし、第２電極３は、例えば半導体材料からなっていてもよい。すなわち、第２電極３は半導体電極であってもよい。半導体材料の例としては、第１電極２に用いられる半導体材料と同様のものを挙げることができる。

[0043] 第２電極３が金属材料からなる場合、金属材料は、例えば、その主成分が貴金属である。貴金属は、例えばＡｕ（金）である。貴金属として、Ａｇ（銀）、Ｐｔ（プラチナ）等が用いられてもよい。金属材料には、Ｃｒ、Ｔｉ等の他の金属元素が微量に含まれていてもよい。金属材料として、銅、アルミニウム、又はこれらの合金等が用いられてもよい。

[0044] 第２電極３は、信号電極として用いられ、第１電極２は、接地電極として用いられる。これとは逆に、第１電極２が信号電極として用いられ、第２電極３が接地電極として用いられてもよい。

[0045] 第１低誘電率層４は、第１電極２と光導波路１との隙間に設けられている。本実施形態では、第１電極２上に第１低誘電率層４が積層され、第１低誘電率層４上に光導波路１が積層されている。つまり、第１電極２に対し、第１低誘電率層４を介して間接的に光導波路１が積層され、第１電極２が光導波路１と接触していない。第１低誘電率層４は、光導波路１の第１低誘電率層４に対向する表面の全体を覆っていることが好ましい。

[0046] 第１低誘電率層４は、光導波路１の屈折率よりも小さい屈折率を有する。例えば、第１低誘電率層４の屈折率は、光導波路１の屈折率の１％以上小さい。光導波路１の屈折率は、第１電極２の屈折率よりも小さい。第１低誘電率層４の屈折率に対する光導波路１の屈折率の比率は、例えば、１．８以上、２．５以下である。この場合、光導波路１内に光を十分に閉じ込めることができる。また、第１低誘電率層４の屈折率に対する第１電極２の屈折率の比率は、例えば、１．５以上、６．０以下である。この場合、光ファイバーから光導波路１への光の入射時に、第１電極２への光の入射を防ぐことができる。

[0047] 第１低誘電率層４の主成分は、典型的にはSiO_2である。第１低誘電率層

４の主成分として、Al_2O_3、$LaAlO_3$、$LaYO_3$、ＺｎＯ、HfO_2、ＭｇＯ、Y_2O_3等の酸化物、又はＢＣＢ（ベンゾシクロブテン）、ＰＩ（ポリイミド）等のポリマーが用いられてもよい。

[0048] 第２低誘電率層５は、第２電極３と光導波路１との隙間に設けられている。本実施形態では、光導波路１上に第２低誘電率層５が積層され、第２低誘電率層５上に第２電極３が積層されている。つまり、第２電極３に対し、第２低誘電率層５を介して間接的に光導波路１が積層され、第２電極３が光導波路１と接触していない。第２低誘電率層５は、光導波路１の第２低誘電率層５に対向する表面の全体を覆っていることが好ましい。

[0049] 第２低誘電率層５は、光導波路１の屈折率よりも小さい屈折率を有する。第２低誘電率層５の主成分の例としては、上述した第１低誘電率層４と同様のものを挙げることができる。第２低誘電率層５の主成分は、第１低誘電率層４の主成分と同じであってもよいし、異なっていてもよい。

[0050] このような構成の光変調器１０において、第２電極３は、例えば、次のようにして光導波路１及び第１電極２に対して積層することができる。まず、ＣＶＤ、蒸着、スパッタリング等により、第１電極２上に第１低誘電率層４を成膜する。第１電極２上に成膜された第１低誘電率層４上に、電気光学効果を有する材料基板を配置し、材料基板を第１低誘電率層４と接着する。そして、材料基板にリソグラフィ及びエッチングを施し、光導波路１を形成する。次に、ＣＶＤ、蒸着、スパッタリング等により、光導波路１上に第２低誘電率層５を成膜する。そして、スパッタリング、蒸着等により、第２低誘電率層５上に金属層を成膜する。成膜された金属層に対し、リソグラフィによりパターニングし、エッチングにより第２電極３を形成する。

[0051] 光変調器１０の使用時に第１電極２に高周波電流を流す場合、表皮効果に基づいて、第１電極２に必要な厚みｔ２を見積もることができる。第１電極２の厚みｔ２は、積層方向の長さに相当する。下記の式（１）は、導体の表皮深さを算出する式である。

[0052]

[数1]

$$d = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f\mu\sigma}} \quad (1)$$

d: 表皮深さ $[m]$
ρ: 導体の電気抵抗率 $[\Omega \cdot m] = 1/\sigma$
ω: 交流電流の角周波数 $[\mathrm{rad/s}] = 2\pi f$
μ: 導体の透磁率 $[\mathrm{H/m}]$
σ: 導体の導電率 $[\mathrm{S/m}]$
f: 交流電流の周波数 $[\mathrm{Hz}]$

[0053] 式（１）より、第１電極２に必要な厚みｔ２を決定することができる。より具体的には、式（１）を用いて算出された表皮深さよりも第１電極２の厚みｔ２を大きくすることにより、第１電極２の電気抵抗を小さくすることができ、余分な電気損失を抑制することができる。第１電極２の導電率は高いほど好ましい。ただし、不純物のドーピング量に固溶限界があること、また、ドーピング量が固溶限界に近づくと不純物がクラスター化し、キャリアとして不活性な状態が生じることから、ドーピング量がある量を超えると第１電極２の導電率は飽和する。ドーピング量の固溶限界が１．０×１０^{22}ｃｍ$^{-3}$であるとすれば、第１電極２の導電率は、１×１０^{7}Ｓ／ｍとなり、１ＧＨｚの電気信号の表皮深さは、５μｍとなる。しかしながら、実際の導電率は、一桁落ちて、１×１０^{6}Ｓ／ｍ程度となることが予想される。このため、電気信号に帯域幅を持たせて、０．５ＧＨｚ以上の信号を扱う運用とすれば、第１電極２の厚みｔ２は２５μｍ以上であることが好ましい。

[0054] 光変調器１０の使用時、終端抵抗Ｚ０に対する光変調器１０の抵抗Ｚの比Ｚ／Ｚ０は、０．８以上、１．２以下であることが好ましい。比Ｚ／Ｚ０が、０．８以上、１．２以下の条件を外れると、インピーダンスのミスマッチにより、電極の終端で電気信号の反射波が発生するからである。そのため、比Ｚ／Ｚ０がこの条件を満足するように、光変調器１０の諸条件が設定されることが好ましい。具体的には、終端抵抗Ｚ０に対する光変調器１０の抵抗Ｚの比Ｚ／Ｚ０が０．８以上、１．２以下となるように、第１低誘電率層４

の厚みｔ４に対する第１電極２の厚みｔ２の比ｔ２／ｔ４が設定されることが好ましい。第１低誘電率層４の厚みｔ４は、第１電極２と光導波路１との隙間の大きさに相当する。

[0055] 図２は、第１低誘電率層４の厚みｔ４に対する第１電極２の厚みｔ２の比ｔ２／ｔ４と、終端抵抗Ｚ０に対する光変調器１０の抵抗Ｚの比Ｚ／Ｚ０との相関を示す図である。図２には、一例として、第１電極２としてシリコン半導体材料を用い、第２電極３としてＡｕを主成分とする金属材料を用い、低誘電率層４，５としてSiO_2を用い、光導波路１として$LiNbO_3$を用いて解析を行ったときの比ｔ２／ｔ４と比Ｚ／Ｚ０との関係が示されている。解析では、終端抵抗Ｚ０を５０Ωとし、第１電極２の幅ｗ２を５０μｍとし、第２電極３の幅ｗ３を４０μｍとし、第２電極３の厚みｔ３を５．０μｍとし、第１低誘電率層４の厚みｔ４を０．７μｍとし、第２低誘電率層５の厚みｔ５を０．７μｍとし、光導波路１の幅ｗ１を１．０μｍとし、光導波路１の厚みｔ１を１．３μｍとした。なお、本明細書において、厚みは、光変調器１０の断面で積層方向の長さを意味し、幅は、光変調器１０の断面で積層方向に垂直な方向の長さを意味する。

[0056] 図２に示すように、比Ｚ／Ｚ０が０．８以上、１．２以下となるには、第１低誘電率層４の厚みｔ４に対する第１電極２の厚みｔ２の比ｔ２／ｔ４は、２０．０以上、４４．０以下である。

[0057] 再度図１を参照して、本実施形態では、第１電極２が半導体材料で形成されている。第２電極３の材料として金属材料が用いられる場合、第１電極２の電極としての性能は、金属電極である第２電極３と同等であることが好ましい。第１電極２の断面積及び第２電極３の断面積は、好ましくは、第１電極２の抵抗値が第２電極３の抵抗値と実質的に一致するように設定される。例えば、第１電極２の断面積は、「（第２電極３の導電率／第１電極２の導電率）×第２電極３の断面積」とすることができる。

[0058] 具体的には、光導波路１の延びる方向に垂直な断面で見たとき、第１電極２の面積は、第２電極３の面積よりも大きいことが好ましい。第２電極３が

金属材料からなる場合、第２電極３は、断面積を大きくしなくても、比較的小さい抵抗値を有する。一方、第１電極２は、金属材料よりも導電率が小さい半導体材料からなるため、第２電極３よりも断面積を大きくすることで、第２電極３と同程度まで抵抗値を小さくすることができる。これにより、消費電力を抑えることができる。

[0059] 第１電極２の幅ｗ２が第２電極３の幅ｗ３と同一である条件下では、半導体電極である第１電極２の抵抗値を金属電極である第２電極３の抵抗値と一致させるため、第１電極２における導電率と厚みｔ２の積は、第２電極３における導電率と厚みｔ３の積と一致すればよい。例えば、第２電極３における金属材料がＡｕである場合、通常、第２電極３の厚みｔ３は、０．１μｍ以上、２．０μｍ以下とされ、その導電率は、４．３×10^{7}Ｓ／ｍである。一方、第１電極２の導電率は第２電極３の導電率よりも小さいため、第１電極２の厚みｔ２は第２電極３の厚みｔ３よりも大きくなる。第１電極２の導電率は、不純物のドーピング量に応じて変化する。

[0060] 例えば、第１電極２がシリコン半導体材料で構成されている場合において、不純物のドーピング量が上限の１．０×10^{22}ｃｍ$^{-3}$であるとき、第１電極２の導電率は１×10^{7}Ｓ／ｍとなる。このとき、第２電極３の導電率を第１電極２の導電率で除した値は４．３であり、第１電極２の厚みｔ２は、第２電極３の厚みｔ３の４．３倍とすることができる。一方、不純物のドーピング量が下限の１．０×10^{17}ｃｍ$^{-3}$であるとき、第１電極２の導電率は１０００×10^{4}Ｓ／ｍとなる。このとき、第２電極３の導電率を第１電極２の導電率で除した値は４．３×10^{3}であり、第１電極２の厚みｔ２は、第２電極３の厚みｔ３の４．３×10^{3}倍とすることができる。

[0061] したがって、第１電極２が半導体材料で形成されている一方、第２電極３が金属材料で形成されている場合、第１電極２の厚みｔ２の下限は、第２電極３の厚みｔ３の下限である０．１μｍの４．３倍とすることができる。すなわち、第１電極２の厚みｔ２は、０．４３μｍ以上とすることができる。一方、第１電極２の厚みｔ２の上限は、第２電極３の厚みｔ３の上限である

２．０μｍの４．３×１０^{3}倍とすることができる。すなわち、第１電極２の厚みｔ２は、８６００μｍ（８．６ｍｍ）以下とすることができる。ただし、第１電極２にシリコン半導体材料を用いる場合、その加工性の観点から、第１電極２の厚みｔ２は５００μｍ以下であることが好ましい。

[0062] 上述したように、第２電極３は、半導体材料で形成することもできる。第１電極２及び第２電極３がともに半導体材料からなる場合は、光導波路１の延びる方向に垂直な断面で見たとき、第１電極２の面積が第２電極３の面積と同じであることが好ましい。

[0063] 半導体電極である第１電極２の厚みｔ２、及び低誘電率層４の厚みｔ４は、例えば以下の方法により測定できる。第１の方法は、ＳＥＭ観察による計測方法である。この方法では、ＦＩＢ（収束イオンビーム）により、光変調器１０を切断して、試料を採取する。採取した試料の断面をＳＥＭにより撮像し、得られた画像から第１電極２の厚みｔ２、及び低誘電率層４の厚みｔ４を測定することができる。第２の方法は光学的な計測方法である。この方法では、干渉分光法により、直接第１電極２の厚みｔ２、及び低誘電率層４の厚みｔ４を測定することができる。いずれの方法でも、測定結果は実質的に同じである。

[0064] 第２電極３が金属電極である場合、第２電極３の厚みｔ３は、例えば以下の方法により測定できる。第１の方法は、上述したＳＥＭ観察による計測方法である。第２の方法は、Ｘ線による計測方法である。この方法では、第２電極３にＸ線を照射し、透過したＸ線量を測定することで第２電極３による減衰量を求める。求めた減衰量を逆算することにより、第２電極３の厚みｔ３を測定することができる。いずれの方法でも、測定結果は実質的に同じである。第２電極３が半導体電極である場合、第２電極３の厚みｔ３は、上述した第１電極２の厚みｔ２の測定方法により測定することができる。

[0065] 第１電極２におけるドーピング量は、エピ抵抗率測定、エアギャップＣＶ測定、水銀ＣＶ測定、表面電荷プロファイリング、二次イオン質量分析、又は広がり抵抗測定等により測定することができる。いずれの方法でも、測定

結果は実質的に同じである。

[0066] 光導波路１の延びる方向に垂直な断面で見たとき、第１電極２の光導波路１側の幅ｗ２は、光導波路１の幅ｗ１よりも大きいことが好ましい。第１電極２の光導波路１側の幅ｗ２とは、第１電極２のうち、光導波路１に最も近い表面の幅を意味する。本実施形態では、第１電極２のうち第１低誘電率層４に接している面の、積層方向に垂直な方向の長さが幅ｗ２である。この場合、光導波路１の全域に電界を印加することができる。

[0067] ［効果］

本実施形態に係る光変調器１０において、光導波路１に電界を印加する第１電極２及び第２電極３のうち、第１電極２が半導体材料からなる。半導体材料には、通常、不純物がドープされている。第１電極２の電極としての機能を向上させるためには、不純物のドーピング量を増加させる必要がある。不純物のドーピング量が増加すると第１電極２の導電率は大きくなるが、第１電極２の光の吸収率が大きくなる。また、半導体材料からなる第１電極２は、その屈折率が光導波路１の屈折率よりも大きいため、第１電極２が光導波路１と接触していると、光導波路１から第１電極２に光が漏れやすい。そこで、本実施形態では、第１電極２を光導波路１と隙間をあけて配置して光導波路１と非接触とした上で、第１電極２と光導波路１との隙間に光導波路１よりも屈折率が小さい第１低誘電率層４を配置している。これにより、光導波路１を通過する光が第１電極２側に漏れにくくなり、第１電極２に吸収されにくくなる。したがって、本実施形態に係る光変調器１０によれば、第１電極２について金属材料以外の材料である半導体材料の適用を実現しながら、光の損失を抑制することができる。

[0068] 通常、光変調器において、電極から光導波路に印加される電気信号（変調波（ＧＨｚ））の実効屈折率は、光導波路を通過する光波（搬送波（ＴＨｚ））の実効屈折率よりも大きい。電気信号の実効屈折率が光波の実効屈折率と大きく異なると、光波の伝搬速度と電気信号の伝搬速度との差が大きくなり、変調速度が低下する。本実施形態に係る光変調器１０では、少なくとも

第１電極２と光導波路１との間に第１低誘電率層４を配置しているため、光導波路１に対する第１低誘電率層４の断面積比率を調整することが可能である。光導波路１に対する第１低誘電率層４の断面積比率を調整することにより、電気信号の実効屈折率と光波の実効屈折率との差を小さくすることができ、その結果、光波の伝搬速度と電気信号の伝搬速度との差を小さくすることができる。これにより、変調速度の低下を抑制することができる。

[0069] 本実施形態において、第２電極３は光導波路１と隙間をあけて配置されている。この場合、第２電極３は光導波路１と接触していない。さらに、第２電極３と光導波路１との隙間には、光導波路１よりも屈折率が小さい第２低誘電率層５が設けられている。これにより、光導波路１を通過する光が第２電極３側に漏れにくくなり、第２電極３にも吸収されにくくなる。したがって、光の損失を抑制することができる。

[0070] 第１電極２に用いられる半導体材料は、例えば、Ｓｉに不純物がドープされたシリコン半導体材料である。第１電極２は、シリコン単結晶基板であってもよいし、基板上に成膜された半導体シリコン層であってもよい。例えば、第１電極２がシリコン単結晶基板である場合、スパッタリング、蒸着等により成膜される金属電極と比較して、第１電極２の内部応力を低減することができる。そのため、第１電極２の内部応力を抑えながら第１電極２を厚く形成することが可能である。第１電極２を厚く形成することにより、第１電極２の抵抗値が小さくなり、消費電力を抑えることができる。また、第１電極２の内部応力が低減されることにより、内部応力に起因するクラックの発生を抑制することができる。その結果、光変調器１０の故障や損傷を抑えることができる。

[0071] シリコン半導体材料は、例えば貴金属を用いた金属材料と比較して安価である。そのため、シリコン半導体材料によって第１電極２を構成すれば、光変調器１０のコストダウンを実現することができる。

[0072] 本実施形態では、第１電極２は、光導波路１に積層され、第２電極３は、第１電極２の反対側で光導波路１に積層されている。この場合、積層方向に

おいて、第１電極２と第２電極３との間に光導波路１が存在する。そのため、第１電極２及び第２電極３による電界を光導波路１に対して効率よく印加することができる。

[0073] 例えば、第１電極２に用いられる半導体材料がシリコン半導体材料であれば、熱酸化法によりSiO_2の第１低誘電率層４を第１電極２上に成膜することができる。この場合、第１電極２に対する第１低誘電率層４の密着性が良く、第１電極２と第１低誘電率層４との界面に異物が入りにくい。このため、第１電極２と第１低誘電率層４との界面において、電気的な損失を抑制することができる。また、光変調器１０の信頼性及び寿命の向上を図ることができる。第１電極２と第１低誘電率層４との界面に異物が集積し、集積した異物に電界が集中すれば、光変調器１０が破損するおそれがあるからである。

[0074] 低誘電率層４，５の各々におけるエバネッセント光のしみ出し深さは、光導波路１を通過する光（搬送波）の波長を目安として見積もることができる。電極２，３の各々が光導波路１から搬送波の波長以上離れている場合、エバネッセント光が電極２，３の各々に接触するのを防止することができる。したがって、光導波路１と電極２，３の各々との隙間の大きさ、つまり低誘電率層４，５の各々の厚みｔ４，ｔ５（積層方向の長さ）は、光導波路１を通過する光の波長以上であることが好ましい。

[0075] 例えば、本実施形態のように、電極２，３の各々と光導波路１との隙間の大きさが０．７５０μｍ以上であれば、低誘電率層４，５の各々の厚みがエバネッセント光のしみ出し深さよりも大きくなり、光導波路１を通過する光が電極２，３の各々に漏れにくい。上述したように、電極２，３の各々と光導波路１との隙間の大きさは、１．６７５μｍ以下であってもよい。電極２，３の各々と光導波路１との隙間の大きさが１．６７５μｍ以下であれば、第１電極２と第２電極３との間に印加する電圧を大きくしなくても、光導波路１に対する電界の大きさを確保することができる。

[0076] ［変形例１］

図３に、第１実施形態に係る光変調器１０の変形例１を示す。図３に示すように、光変調器１０は、第２低誘電率層５（図１）を備えていなくてもよい。すなわち、第２電極３は、光導波路１上に直接積層され、光導波路１と接触していてもよい。この場合も、半導体電極である第１電極２と第１低誘電率層４との寸法関係は上述したようにして決定することができる。例えば、終端抵抗Ｚ０に対する光変調器１０の抵抗Ｚの比Ｚ／Ｚ０が０．８以上、１．２以下となるように、第１低誘電率層４の厚みｔ４に対する第１電極２の厚みｔ２の比ｔ２／ｔ４が設定されることが好ましい。

[0077] ［変形例２］

図４に、第１実施形態に係る光変調器１０の変形例２を示す。本変形例では、図３に示す例と同様に、光変調器１０に第２低誘電率層５（図１）が設けられていない。ただし、本変形例では、第１低誘電率層４は、光変調器１０の断面視で光導波路１を囲うように設けられている。第１低誘電率層４は、第１電極２と光導波路１との間だけでなく、第２電極３と光導波路１との間にも設けられている。すなわち、第１電極２及び第２電極３が光導波路１に対して非接触であり、且つ、第１電極２及び第２電極３のそれぞれと光導波路１との間に第１低誘電率層４が介在している。この場合、第１低誘電率層４は、第２低誘電率層５（図１）の役割を兼ねることができる。

[0078] ＜第２実施形態＞

図５は、第２実施形態に係る光変調器１０Ａの概略構成を示す断面図である。光変調器１０Ａは、光導波路１Ａの構成、並びに第１電極２Ａ及び第２電極３Ａの配置において、第１実施形態に係る光変調器１０と異なる。

[0079] 図５を参照して、光変調器１０Ａは、光導波路１Ａと、第１電極２Ａと、第２電極３Ａと、第１低誘電率層４Ａとを備える。光導波路１Ａは、基板部１Ａａと、リッジ部１Ａｂとを含む。リッジ部１Ａｂは、基板部１Ａａの表面から突出している。リッジ部１Ａｂが実質的に光導波路として機能する。光導波路１Ａには第１低誘電率層４Ａが積層されている。より具体的には、基板部１Ａａ及びリッジ部１Ａｂに対し、第１低誘電率層４Ａが積層されて

いる。

[0080] 第１電極２Ａ及び第２電極３Ａは、第１低誘電率層４Ａ上に積層されている。第１電極２Ａ及び第２電極３Ａは、互いに隙間をあけて並列に配置されている。具体的には、第１電極２Ａ及び第２電極３Ａは、光変調器１０Ａの断面視で、光導波路１Ａ及び第１低誘電率層４Ａの積層方向に対して実質的に垂直な方向に並んで配置されている。積層方向に対して実質的に垂直な方向において、リッジ部１Ａｂの一方側に第１電極２Ａが配置され、リッジ部１Ａｂの他方側に第２電極３Ａが配置されている。第１電極２Ａ及び第２電極３Ａは、互いの間に電位差を形成して光導波路１Ａのリッジ部１Ａｂに電界を印加することができる。

[0081] 本実施形態に係る光変調器１０Ａであっても、第１実施形態に係る光変調器１０と同様の効果を奏することができる。

[0082] 光変調器１０Ａの使用時、上述した通り、終端抵抗Ｚ０に対する光変調器１０Ａの抵抗Ｚの比Ｚ／Ｚ０は、０．８以上、１．２以下であることが好ましい。そのため、終端抵抗Ｚ０に対する光変調器１０の抵抗Ｚの比Ｚ／Ｚ０が０．８以上、１．２以下となるように、第１低誘電率層４Ａの厚みｔ４Ａに対する第１電極２Ａの厚みｔ２Ａの比ｔ２Ａ／ｔ４Ａが設定されることが好ましい。本実施形態における第１低誘電率層４Ａの厚みｔ４Ａは、リッジ部１Ａｂの位置での第１低誘電率層４Ａの厚みである。厚みｔ４Ａとは、リッジ部１Ａｂ、第１低誘電率層４Ａ、及び電極２Ａ，２Ｂの積層方向において、リッジ部１Ａｂと第１低誘電率層４Ａとの界面から、第１低誘電率層４Ａと第１電極２Ａとの界面までの最短距離をいう。

[0083] 図６は、第２実施形態において、第１低誘電率層４Ａの厚みｔ４Ａに対する第１電極２Ａの厚みｔ２Ａの比ｔ２Ａ／ｔ４Ａと、終端抵抗Ｚ０に対する光変調器１０Ａの抵抗Ｚの比Ｚ／Ｚ０との相関を示す図である。図６には、一例として、第１電極２Ａとしてシリコン半導体材料を用い、第２電極３ＡとしてＡｕを主成分とする金属材料を用い、第１低誘電率層４ＡとしてＳｉO_2を用い、光導波路１ＡとしてＬｉＮｂO_3を用いて解析を行ったときの比

ｔ２Ａ／ｔ４Ａと比Ｚ／Ｚ０との関係が示される。解析では、終端抵抗Ｚ０を５０Ωとし、第１電極２Ａの幅ｗ２Ａを５０μｍとし、第２電極３Ａの幅ｗ３Ａを２１．５μｍとし、第２電極３Ａの厚みｔ３Ａを１６．６μｍとし、第１低誘電率層４Ａの厚みｔ４Ａを８．３μｍとし、リッジ部１Ａｂの幅ｗ１Ａｂを２．０μｍとし、リッジ部１Ａｂの厚みｔ１Ａｂを１．０μｍとし、第１電極２Ａと第２電極３Ａとの隙間ｇを１０μｍとした。

[0084] 図６に示すように、比Ｚ／Ｚ０が０．８以上、１．２以下となるには、第１低誘電率層４Ａの厚みｔ４Ａに対する第１電極２Ａの厚みｔ２Ａの比ｔ２Ａ／ｔ４Ａは、０．１以上、４．０以下である。

[0085] 光変調器１０の使用時、実効屈折率ｎは、変調速度を最大にする値であることが好ましい。そのため、実効屈折率ｎが変調速度を最大にする値となるように、第１低誘電率層４Ａの厚みｔ４Ａに対する光導波路１Ａ（リッジ部１Ａｂ）の厚みｔ１Ａｂの比ｔ１Ａｂ／ｔ４Ａが設定されることが好ましい。

[0086] 図７は、第２実施形態において、第１低誘電率層４Ａの厚みｔ４Ａに対する光導波路１Ａの厚みｔ１Ａｂの比ｔ１Ａｂ／ｔ４Ａと、実効屈折率ｎとの相関を示す図である。図７には、一例として、図６と同様の条件で解析を行ったときの比ｔ１Ａｂ／ｔ４Ａと実効屈折率ｎとの関係が示されている。ただし、第１電極２Ａの厚みｔ２Ａを１６．６μｍとした。

[0087] 光導波路１Ａとして$LiNbO_3$を用いる場合、実効屈折率ｎが２であれば、変調速度を最も大きくすることができる。図７に示すように、実効屈折率ｎが２となるには、第１低誘電率層４Ａの厚みｔ４Ａに対する光導波路１Ａ（リッジ部１Ａｂ）の厚みｔ１Ａｂの比ｔ１Ａｂ／ｔ４Ａは、実質的に０．２８である。

[0088] ＜第３実施形態＞

図８は、第３実施形態に係る光変調器１０Ｂの概略構成を示す断面図である。光変調器１０Ｂは、第１電極２Ｂの構成において、第１実施形態に係る光変調器１０と異なる。

[0089] 図８を参照して、第１電極２Ｂは、光導波路１側の表層２Ｂａと、残部２Ｂｂとを有する。本実施形態の例において、表層２Ｂａは、第１電極２Ｂのうち第１低誘電率層４に隣接するように配置されている。表層２Ｂａは、例えば、第１電極２Ｂの光導波路１側の表面から、光導波路１に対する第１電極２Ｂの積層方向における第１電極２Ｂの長さ（厚み）の１０％の範囲にある部分である。残部２Ｂｂは、第１電極２Ｂのうち、表層２Ｂａを除いた部分を意味する。第１電極２Ｂにおいて、半導体材料にドープされている不純物の濃度は、表層２Ｂａのほうが残部２Ｂｂよりも高い。すなわち、第１電極２Ｂは、表層２Ｂａと残部２Ｂｂとで不純物の濃度、すなわちドーパント量が異なる。例えば、表層２Ｂａにおける不純物の濃度は、残部２Ｂｂにおける不純物の濃度に対して１０％以上高い。このような第１電極２Ｂにおける不純物の濃度分布は、熱拡散法、又はイオン注入法等により形成できる。

[0090] 第１電極２Ｂにおいて、不純物の濃度は、表層２Ｂａと残部２Ｂｂとの境界で急激に変化していてもよいし、表層２Ｂａから積層方向に離れるにつれて徐々に薄くなっていてもよい。第１電極２Ｂにおける不純物の濃度は、エピ抵抗率測定、エアギャップＣＶ測定、水銀ＣＶ測定、表面電荷プロファイリング、二次イオン質量分析、又は広がり抵抗測定等により測定することができる。いずれの方法でも、測定結果は実質的に同じである。表層２Ｂａの不純物の濃度と残部２Ｂｂの不純物の濃度との差異は、上記の測定方法のいずれかによって確認することができる。具体的には、上記の測定方法を実施することによって、第１電極２Ｂの光導波路１側の表面からの深さ方向における不純物濃度のプロファイルを得る。得られた不純物濃度のプロファイルより、表層２Ｂａの不純物濃度の積分平均、及び残部２Ｂｂの不純物濃度の積分平均を算出し、それぞれ表層２Ｂａの不純物の濃度及び残部２Ｂｂの不純物の濃度とする。すなわち、第１電極２Ｂの光導波路１側の表面から第１電極２Ｂの深さ（厚み）の１０％の範囲の不純物濃度の積分平均を表層２Ｂａの不純物濃度とし、残りの範囲の不純物濃度の積分平均を残部２Ｂｂの不純物の濃度とする。得られた表層２Ｂａの不純物濃度は、得られた残部２Ｂ

ｂの不純物の濃度よりも例えば１０％以上高くなっている。

[0091] 第１電極２Ｂにおいて、表皮効果により、高周波信号はより表層２Ｂａを伝って伝搬するため、表層２Ｂａ付近の導電率がより大きい方が好ましい。本実施形態に係る光変調器１０Ｂでは、第１電極２Ｂのうち光導波路１側の表層２Ｂａには、第１電極２の残部２Ｂｂと比較して高い濃度で不純物がドープされている。この場合、第１電極２Ｂにおいて、光導波路１の近傍に導電率の大きい領域を局在させることができ、表皮効果によって高周波信号の減衰を抑えることができる。

[0092] ＜第４実施形態＞

図９は、第４実施形態に係る光変調器１０Ｃの概略構成を示す断面図である。光変調器１０Ｃは、第１電極２Ｃの構成において、第２実施形態に係る光変調器１０Ａと異なる。

[0093] 図９を参照して、第１電極２Ｃは、光導波路１Ａのリッジ部１Ａｂ側の表層２Ｃａと、残部２Ｃｂとを有する。リッジ部１Ａｂ側の表層２Ｃａとは、第１電極２Ｃのうち、第２電極３Ａとともにリッジ部１Ａｂに印加する電界が通過するところの表層である。本実施形態の例において、表層２Ｃａは、第１電極２Ｃのうち、光導波路１Ａに対する第１電極２Ｃの積層方向に垂直な方向（幅方向）において、実質的に光導波路として機能するリッジ部１Ａｂ側に位置する表層である。表層２Ｃａは、例えば、第１電極２Ｃの幅方向においてリッジ部１Ａｂ側に位置づけられる表面から、第１電極２Ｃの幅方向の長さの１０％の範囲にある部分である。残部２Ｃｂは、第１電極２Ｃのうち、表層２Ｃａを除いた部分を意味する。上述した第３実施形態の第１電極２Ｂと同様に、第１電極２Ｃにおいて、半導体材料にドープされている不純物の濃度は、表層２Ｃａのほうが残部２Ｃｂよりも高い。したがって、本実施形態に係る光変調器１０Ｃであっても、第３実施形態に係る光変調器１０Ｂと同様の効果を奏することができる。

[0094] 図１０に、第４実施形態に係る光変調器１０Ｃの変形例を示す。図１０を参照して、表層２Ｃａは、第１電極２Ｃのうち、光導波路１に対する第１電

極２Ｃの積層方向において光導波路１Ａ側に位置する表層であってもよい。この場合、表層２Ｃａは、例えば、積層方向において光導波路１Ａ側に位置づけられる表面から、第１電極２Ｃの厚みの１０％の範囲にある部分である。この構成であっても、第３実施形態に係る光変調器１０Ｂと同様の効果を奏することができる。

[0095] 以上、本開示に係る実施形態について説明したが、本開示は上記実施形態に限定されるものではなく、その趣旨を逸脱しない限りにおいて種々の変更が可能である。

[0096] 例えば、第１実施形態に係る光変調器１０において、第１電極２は、凸部を含んでいてもよい。凸部は、積層方向において光導波路１側に位置する表面に設けられ、光導波路１に向かって突出する。凸部は、第１低誘電率層４と接触する。この場合、凸部により電界を光導波路に集中させることができる。このため、第１電極２と第２電極３との間に印加する電圧を小さくすることができ、消費電力をより抑えることができる。

[0097] 第１電極２が凸部を含む場合において、光導波路１の延びる方向に垂直な断面で見たとき、積層方向に垂直な方向における凸部の長さは、光導波路１に近いほど小さくてもよい。この場合、第１電極２の光導波路１側の表面の他の部分に対して凸部の側面を比較的緩やかに連続させることができる。これにより、凸部と他の部分との境界で電気的な損失を生じにくくすることができる。凸部の側面が表面に対して一定の勾配で傾斜していてもよいし、表面に対する側面の勾配は変化していてもよい。

[0098] 第１実施形態に係る光変調器１０は、さらに、第１電極２よりも厚みの薄い金属薄膜を備えていてもよい。金属薄膜は、第１電極２の光導波路１側の表面に設けられる。金属薄層は、導電率が大きく、高周波信号の減衰が小さい。金属薄層は、例えば、第２電極３に適用することが可能な金属材料を用いて形成することができる。金属薄層を第１電極２の光導波路１側の表面に設ければ、抵抗値を小さくすることができ、信号の減衰を抑えることができる。金属薄層を第２～第４実施形態に係る各光変調器１０Ａ，１０Ｂ，１０

Ｃに適用してもよい。この場合、金属薄層は、第１電極２Ａ，２Ｂ，２Ｃのうち、電界が通過するところの表面に設けられる。

[0099] ＜１＞

電気光学効果を有する材料からなる光導波路と、

半導体材料からなり、前記光導波路と隙間をあけて配置される第１電極と、

前記第１電極と電位差を形成して前記光導波路に電界を印加するように配置される第２電極と、

前記光導波路の屈折率よりも小さい屈折率を有し、前記第１電極と前記光導波路との前記隙間に設けられる第１低誘電率層と、を備える、光変調器。

[0100] ＜２＞

＜１＞に記載の光変調器であって、さらに、

前記光導波路の屈折率よりも小さい屈折率を有する第２低誘電率層を備え、

前記第２電極は、前記光導波路と隙間をあけて配置され、

前記第２低誘電率層は、前記第２電極と前記光導波路との前記隙間に設けられる、光変調器。

[0101] ＜３＞

＜１＞に記載の光変調器であって、

前記第１低誘電率層は、前記光導波路の延びる方向に垂直な断面で見て前記光導波路を囲うとともに、前記光導波路と前記第１電極及び前記第２電極それぞれとの間に設けられている、光変調器。

[0102] ＜４＞

＜１＞～＜３＞のいずれか１つに記載の光変調器であって、

前記第１電極は、前記光導波路に積層され、

前記第２電極は、前記第１電極の反対側で前記光導波路に積層されている、光変調器。

[0103] ＜５＞

＜４＞に記載の光変調器であって、

前記第１低誘電率層の厚みに対する前記第１電極の厚みの比は、２０．０以上、４４．０以下である、光変調器。

[0104] ＜６＞

＜１＞に記載の光変調器であって、

前記光導波路は、基板部と、前記基板部の表面から突出しているリッジ部とを含み、

前記第１低誘電率層は、前記基板部及び前記リッジ部に積層され、

前記第１電極及び前記第２電極は、前記第１低誘電率層上に積層され、互いに隙間をあけて並列に配置されている、光変調器。

[0105] ＜７＞

＜６＞に記載の光変調器であって、

前記リッジ部の位置での前記第１低誘電率層の厚みに対する前記第１電極の厚みの比は、０．１以上、４．０以下である、光変調器。

[0106] ＜８＞

＜１＞～＜７＞のいずれか１つに記載の光変調器であって、

前記第１電極と前記光導波路との前記隙間の大きさは、０．７５０μｍ以上、１．６７５μｍ以下である、光変調器。

[0107] ＜９＞

＜１＞～＜８＞のいずれか１つに記載の光変調器であって、

前記半導体材料は、シリコンに不純物がドープされたシリコン半導体材料である、光変調器。

[0108] ＜１０＞

＜９＞に記載の光変調器であって、

前記第１電極における前記不純物の濃度は、１．０×10^{17}ｃｍ$^{-3}$以上、１．０×10^{22}ｃｍ$^{-3}$以下である、光変調器。

[0109] ＜１１＞

＜９＞又は＜１０＞に記載の光変調器であって、

前記第１電極は、シリコン単結晶基板である、光変調器。

[0110] ＜１２＞

＜９＞～＜１１＞のいずれか１つに記載の光変調器であって、

前記第１低誘電率層の主成分がSiO_2である、光変調器。

[0111] ＜１３＞

＜１＞～＜１２＞のいずれか１つに記載の光変調器であって、

前記第１電極の屈折率が３よりも小さい、光変調器。

[0112] ＜１４＞

＜１＞～＜１３＞のいずれか１つに記載の光変調器であって、

前記第１電極のうち前記光導波路側の表層には、前記第１電極の他の部分と比較して高い濃度で不純物がドープされている、光変調器。

符号の説明

[0113] １０，１０Ａ，１０Ｂ，１０Ｃ：光変調器

１，１Ａ：光導波路

１Ａａ：基板部

１Ａｂ：リッジ部

２，２Ａ，２Ｂ，２Ｃ：第１電極

２Ｂａ，２Ｃａ：表層

２Ｂｂ，２Ｃｂ：残部

３，３Ａ：第２電極

４，４Ａ：第１低誘電率層

５：第２低誘電率層

請求の範囲

[請求項1] 電気光学効果を有する材料からなる光導波路と、

半導体材料からなり、前記光導波路と隙間をあけて配置される第１電極と、

前記第１電極と電位差を形成して前記光導波路に電界を印加するように配置される第２電極と、

前記光導波路の屈折率よりも小さい屈折率を有し、前記第１電極と前記光導波路との前記隙間に設けられる第１低誘電率層と、を備える、光変調器。

[請求項2] 請求項１に記載の光変調器であって、さらに、

前記光導波路の屈折率よりも小さい屈折率を有する第２低誘電率層を備え、

前記第２電極は、前記光導波路と隙間をあけて配置され、

前記第２低誘電率層は、前記第２電極と前記光導波路との前記隙間に設けられる、光変調器。

[請求項3] 請求項１に記載の光変調器であって、

前記第１低誘電率層は、前記光導波路の延びる方向に垂直な断面で見て前記光導波路を囲うとともに、前記光導波路と前記第１電極及び前記第２電極それぞれとの間に設けられている、光変調器。

[請求項4] 請求項１～３のいずれか１項に記載の光変調器であって、

前記第１電極は、前記光導波路に積層され、

前記第２電極は、前記第１電極の反対側で前記光導波路に積層されている、光変調器。

[請求項5] 請求項４に記載の光変調器であって、

前記第１低誘電率層の厚みに対する前記第１電極の厚みの比は、２０．０以上、４４．０以下である、光変調器。

[請求項6] 請求項１に記載の光変調器であって、

前記光導波路は、基板部と、前記基板部の表面から突出しているリ

ッジ部とを含み、

前記第１低誘電率層は、前記基板部及び前記リッジ部に積層され、

前記第１電極及び前記第２電極は、前記第１低誘電率層上に積層され、互いに隙間をあけて並列に配置されている、光変調器。

[請求項7] 請求項６に記載の光変調器であって、

前記リッジ部の位置での前記第１低誘電率層の厚みに対する前記第１電極の厚みの比は、０．１以上、４．０以下である、光変調器。

[請求項8] 請求項１～７のいずれか１項に記載の光変調器であって、

前記第１電極と前記光導波路との前記隙間の大きさは、０．７５０μｍ以上、１．６７５μｍ以下である、光変調器。

[請求項9] 請求項１～８のいずれか１項に記載の光変調器であって、

前記半導体材料は、シリコンに不純物がドープされたシリコン半導体材料である、光変調器。

[請求項10] 請求項９に記載の光変調器であって、

前記第１電極における前記不純物の濃度は、$1.0\times10^{17}cm^{-3}$以上、$1.0\times10^{22}cm^{-3}$以下である、光変調器。

[請求項11] 請求項９又は１０に記載の光変調器であって、

前記第１電極は、シリコン単結晶基板である、光変調器。

[請求項12] 請求項９～１１のいずれか１項に記載の光変調器であって、

前記第１低誘電率層の主成分がSiO_2である、光変調器。

[請求項13] 請求項１～１２のいずれか１項に記載の光変調器であって、

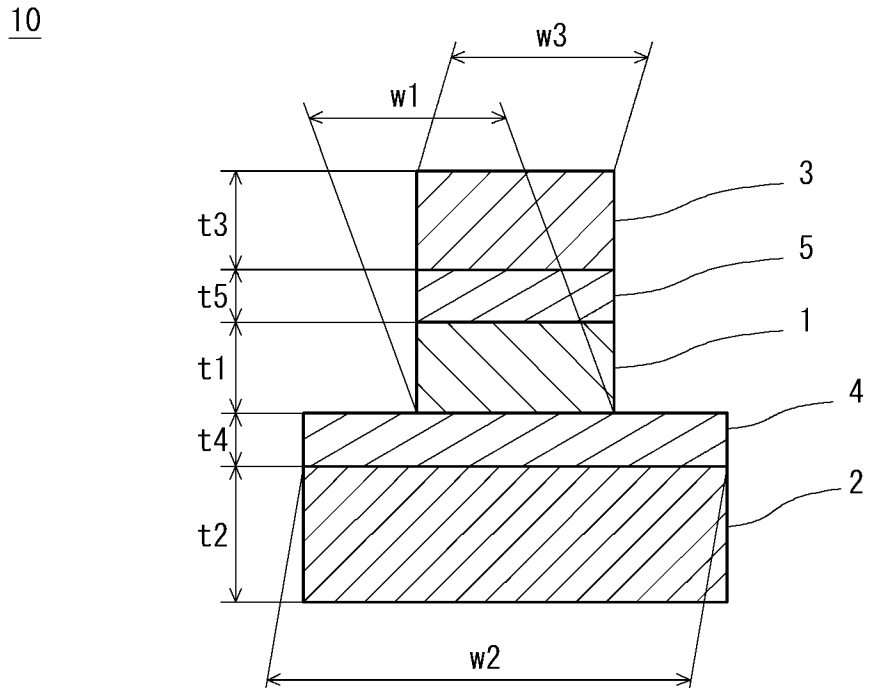
前記第１電極の屈折率が３よりも小さい、光変調器。

[請求項14] 請求項１～１３のいずれか１項に記載の光変調器であって、

前記第１電極のうち前記光導波路側の表層には、前記第１電極の他の部分と比較して高い濃度で不純物がドープされている、光変調器。

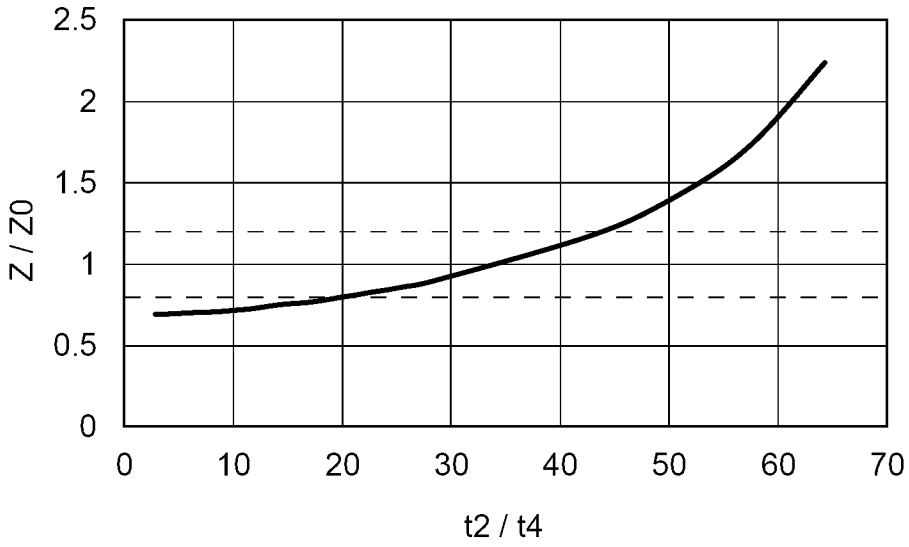
[図1]

FIG. 1



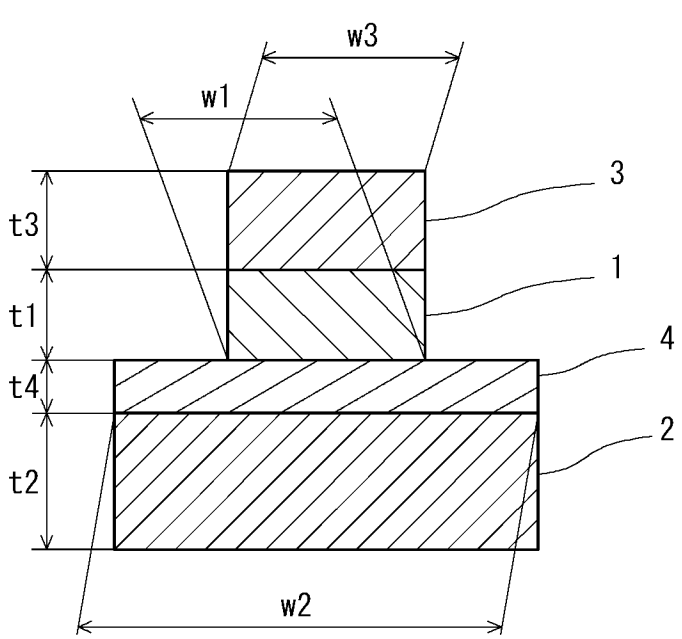
[図2]

FIG. 2



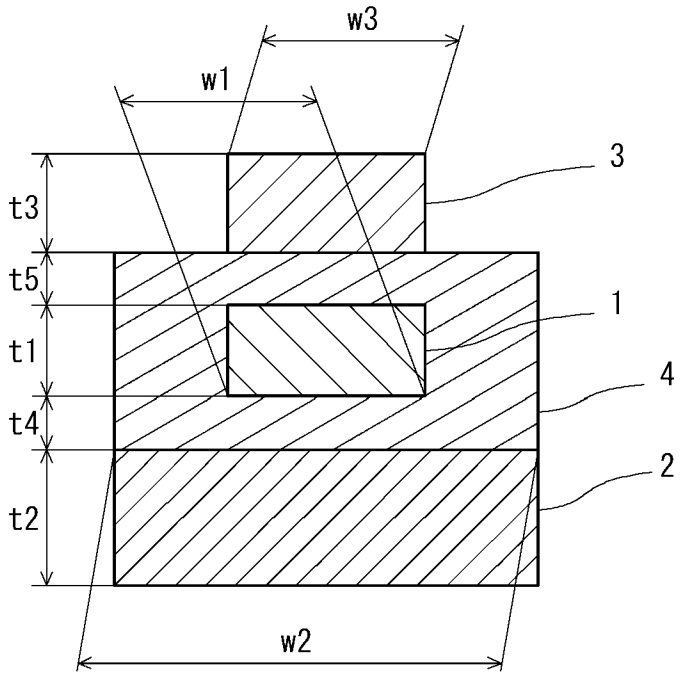
[図3]

FIG. 3



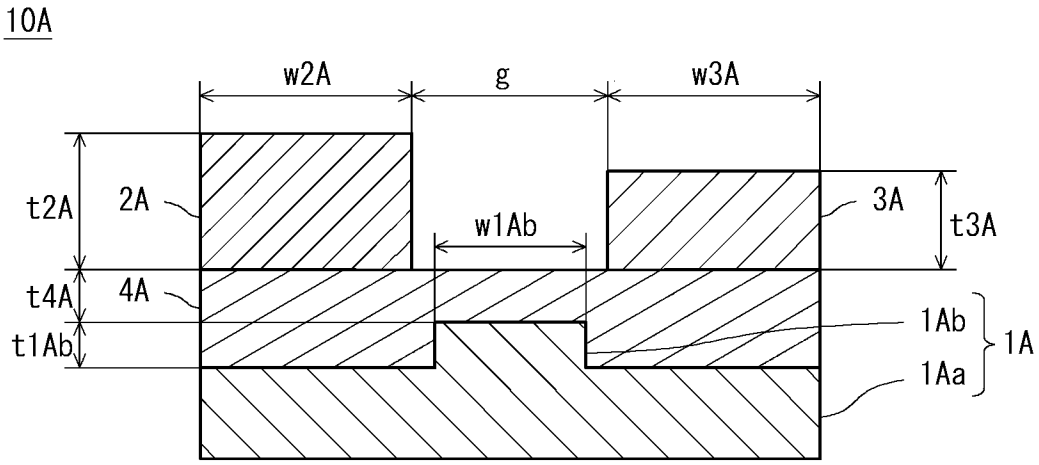
[図4]

FIG. 4



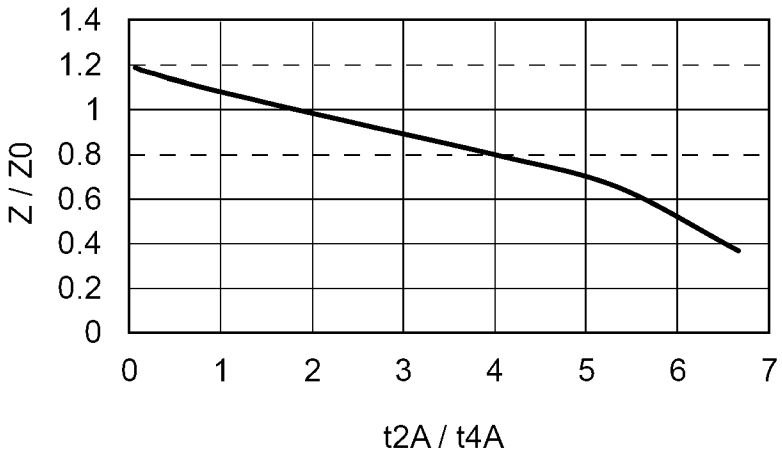
[図5]

FIG. 5



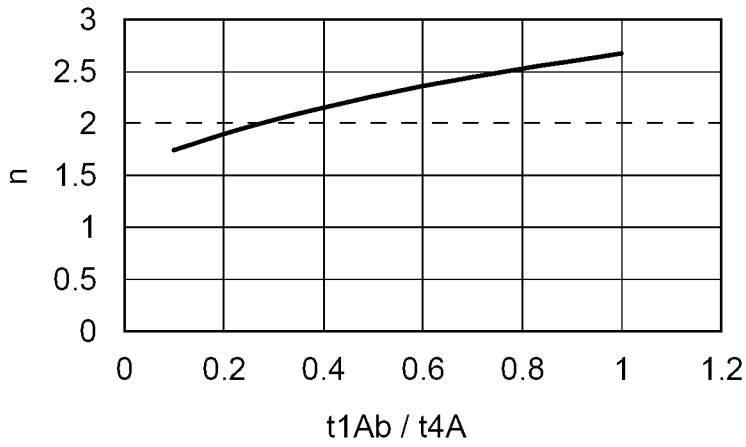
[図6]

FIG. 6



[図7]

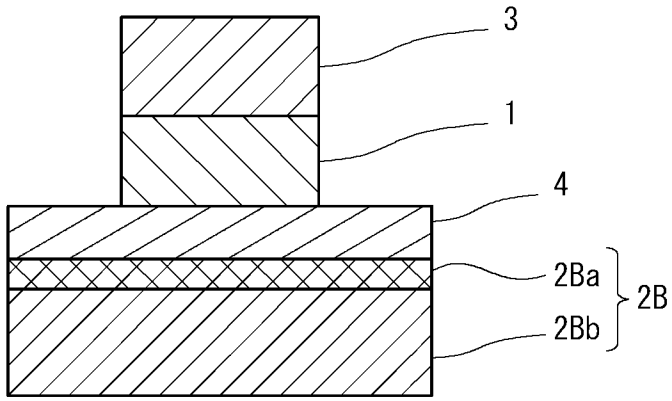
FIG. 7



[図8]

FIG. 8

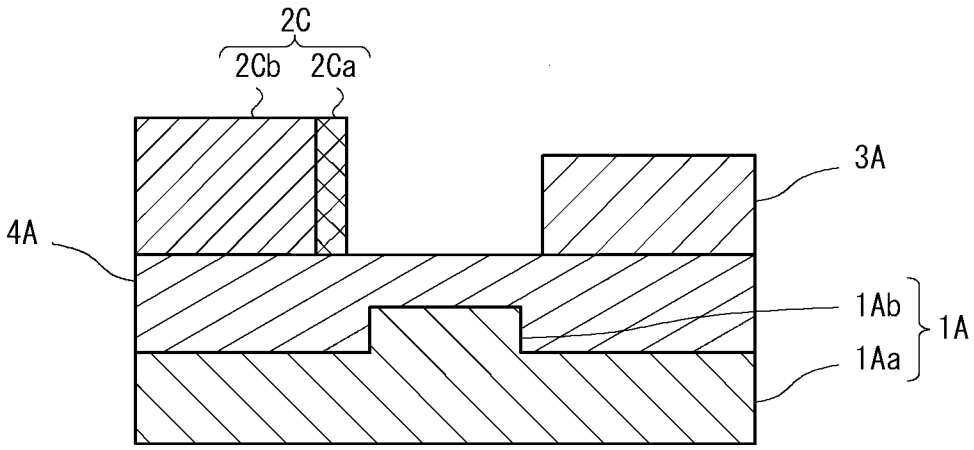
10B



[図9]

FIG. 9

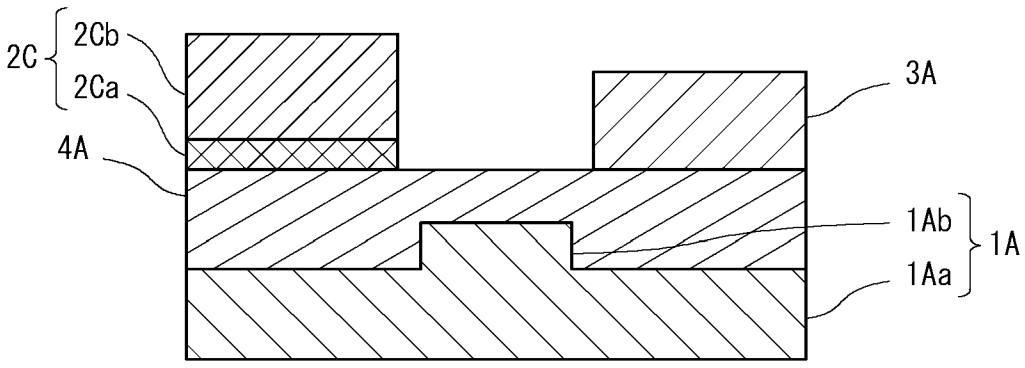
10C



[図10]

FIG. 10

10C



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2023/022845

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G02B 6/122(2006.01)i; ***G02F 1/035***(2006.01)i
FI: G02F1/035; G02B6/122

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; 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 1971-2023
Registered utility model specifications of Japan 1996-2023
Published registered utility model applications of Japan 1994-2023

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 2002-244168 A (FUJI XEROX CO LTD) 28 August 2002 (2002-08-28) paragraphs [0023]-[0130], fig. 1-11	1-5, 8-14
Y		6-14
Y	JP 2004-325536 A (SUN TEC KK) 18 November 2004 (2004-11-18) paragraphs [0150]-[0152], fig. 15	6-14
A	WO 2013/146317 A1 (NEC CORPORATION) 03 October 2013 (2013-10-03) paragraphs [0019]-[0078], fig. 1-11	1-14
A	US 2004/0066250 A1 (HUNT et al.) 08 April 2004 (2004-04-08) paragraphs [0029], [0032], [0059], claim 7, fig. 2	1-14

☐ 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	Date of mailing of the international search report
17 August 2023	**05 September 2023**
Name and mailing address of the ISA/JP **Japan Patent Office (ISA/JP)** **3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915** **Japan**	Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/JP2023/022845

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
JP 2002-244168 A	28 August 2002	(Family: none)	
JP 2004-325536 A	18 November 2004	(Family: none)	
WO 2013/146317 A1	03 October 2013	US 2015/0049978 A1 paragraphs [0040]-[0105], fig. 1-11	
US 2004/0066250 A1	08 April 2004	CN 1636158 A	

国際調査報告

国際出願番号
PCT/JP2023/022845

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

G02B 6/122(2006.01)i; G02F 1/035(2006.01)i
FI: G02F1/035; G02B6/122

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; 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	１９７１－２０２３年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０２３年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０２３年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

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
X	JP 2002-244168 A (富士ゼロックス株式会社) 28.08.2002 (2002-08-28) [0023]-[0130],図1-11	1-5,8-14
Y		6-14
Y	JP 2004-325536 A (サンテック株式会社) 18.11.2004 (2004-11-18) [0150]-[0152],図15	6-14
A	WO 2013/146317 A1 (日本電気株式会社) 03.10.2013 (2013-10-03) [0019]-[0078],図1-11	1-14
A	US 2004/0066250 A1 (HUNT et al.) 08.04.2004 (2004-04-08) [0029],[0032],[0059],請求項7,図2	1-14

☐ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☑ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー
“A” 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
“E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
“L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
“O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
“P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献
“T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
“X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
“Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の１以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
“&” 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日	国際調査報告の発送日
17.08.2023	05.09.2023

名称及びあて先
日本国特許庁(ISA/JP)
〒100-8915
日本国
東京都千代田区霞が関三丁目４番３号

権限のある職員（特許庁審査官）
奥村　政人 2L 4752
電話番号 03-3581-1101 内線 3295

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号
PCT/JP2023/022845

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
JP 2002-244168 A	28.08.2002	（ファミリーなし）	
JP 2004-325536 A	18.11.2004	（ファミリーなし）	
WO 2013/146317 A1	03.10.2013	US 2015/0049978 A1 [0040]-[0105],図1-11	
US 2004/0066250 A1	08.04.2004	CN 1636158 A	