

(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
2013年10月3日(03.10.2013)

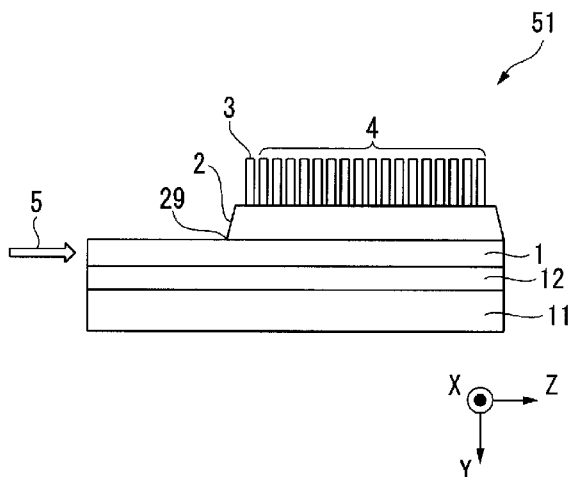


(10) 国際公開番号
WO 2013/146406 A1

- (51) 国際特許分類:
H01L 31/108 (2006.01) G02B 6/42 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2013/057622
- (22) 国際出願日: 2013年3月18日(18.03.2013)
- (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 2012-080591 2012年3月30日(30.03.2012) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 日本電気株式会社 (NEC CORPORATION) [JP/JP]; 〒1088001 東京都港区芝五丁目7番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者; および
(71) 出願人 (米国についてのみ): 藤方 潤一 (FUJIKATA Junichi) [JP/JP]; 〒1088001 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内 Tokyo (JP). 中村 隆宏 (NAKAMURA Takahiro) [JP/JP]; 〒1088001 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 棚井 澄雄, 外 (TANAI Sumio et al.); 〒1006620 東京都千代田区丸の内一丁目9番2号 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, 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, KM, 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, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:
— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

- (54) Title: WAVEGUIDE-COUPLED MSM-TYPE PHOTODIODE
- (54) 発明の名称: 導波路結合MSM型フォトダイオード



(57) Abstract: A waveguide-coupled MSM-type photodiode of the present invention comprises a structure in which a semiconductor or light-absorbing layer and an optical waveguide core layer are adjacent and optically coupled to each other, has formed metal-semiconductor-metal (MSM) junctions which are arranged at an interval on the semiconductor light-absorbing layer, and is characterized in that of the MSM electrodes arranged at the interval, a voltage is set so that a reverse bias is applied to those MSM electrodes that are arranged on a light incidence side.

(57) 要約: 半導体光吸収層と光導波路コア層が隣接して光結合された構造からなり、前記半導体光吸収層上に間隔をおいて配置されたMSM (金属-半導体-金属) 接合を形成したフォトダイオードであり、前記間隔をおいて配置されたMSM電極のうち、光入射側に配置されたMSM電極に逆バイアスがかかるように電圧設定されることを特徴とする導波路結合MSM型フォトダイオード。



WO 2013/146406 A1

明 細 書

発明の名称：導波路結合MSM型フォトダイオード

技術分野

[0001] 本発明は、導波路結合MSM型フォトダイオードに関するものであり、特に、LSIチップ内あるいはチップ間の光配線を用いた情報処理において必要とされる、赤外を含む光信号を高速に電気信号に変換するフォトダイオードに関する。

背景技術

[0002] 光検出器をシリコン電子技術によりモノリシック集積回路化することは、コストおよび歩留まりの観点から非常に魅力的である。CMOS回路と同じチップ上にモノリシック集積回路化されたシリコン-ゲルマニウム受光器、すなわちシリコン-ゲルマニウムフォトダイオードは、CMOS回路またはGaAs回路に接続されたInGaAsフォトダイオードのようなハイブリッド受光器に対する1つの魅力的な代替物である。モノリシック集積回路化された受光器は、標準的なシリコン加工プロセスを用いて製造することが出来るため、ハイブリッド受光器よりも低コストで製造可能になることが期待される。

[0003] 光信号を電気信号に高速変換するデバイスとして、フォトダイオードが広く用いられている。その代表的なものはpin型フォトダイオードである。pin型フォトダイオードは、真性半導体からなるi層を、p型半導体からなるp層、およびn型半導体からなるn層で挟んだ構造となっている。この積層構造に対して、バイアス電源により逆バイアス電圧を加えると、高抵抗のi層のほぼ全域が電荷キャリアの空乏層になる。入射光の光子は、主にi層で吸収され、電子-正孔対を生成する。発生した電子および正孔は、逆バイアス電圧により空乏層内を各々反対方向にドリフトして電流を生じさせ、負荷抵抗で信号電圧として検出される。この光電変換の応答速度を制限する主な要因は、負荷抵抗と空乏層が作る電気容量の積で決まる回路時定数と

、空乏層を電子および正孔が通過するのに要するキャリア走行時間である。

[0004] キャリア走行時間の短いフォトダイオードとしては、ショットキー型のフォトダイオードが挙げられる。ショットキー型フォトダイオードは、半導体のn層あるいはn⁻層に半透明金属膜が接する構造を備えている。n層あるいはn⁻層と半透明金属膜が接する界面付近にはショットキー障壁が形成される。このショットキー障壁付近は、半透明金属膜からn層あるいはn⁻層の電子が拡散して空乏層となる。この状態で入射光が照射されると、n層あるいはn⁻層に電子が生成され、逆バイアス電圧により空乏層内がドリフトされる。また、電子の生成により、素子表面層での光吸収を有効に利用することが可能である。

[0005] p i n型フォトダイオードでは、フォトン吸収のためにi層すなわち空乏層に十分な厚みを持たせる必要があるのに対し、ショットキー型フォトダイオードでは空乏層を薄くすることが可能である。そのため、前述のようにショットキー型フォトダイオードを用いることにより、キャリア走行時間を短くすることが出来る。また、非特許文献1に開示されているように、p i n型フォトダイオードにおいて、空乏層を薄くするためにラテラル電極構造にして、電極間隔を小さくする試みが行われているが、半導体表面層での光吸収効率が悪く、高速化が可能になるものの、高感度化は困難である。

[0006] 一方、p i n型およびショットキー型のフォトダイオードにおける回路時定数を短くするために、付加抵抗の値を小さくすると、取り出せる再生信号の電圧が下がる。従って、空乏層の電気容量の低減は、再生信号のS N比を良くして読み取りエラーを減らすために重要である。特に、キャリア走行時間を短くするために空乏層を薄くすると、電気容量が増加することから、高速化のためには空乏層あるいはショットキー接合の面積を減らす必要がある。しかしながら、ショットキー接合の面積を減らすと、信号光の利用効率が低下し、結果的に再生信号のS N比が劣化してしまう問題がある。

[0007] これらの問題を解決するために、半導体の同一平面上に2つの電極を周期的に配置した、金属-半導体-金属(MSM)型フォトダイオードが提案さ

れている。MSM型フォトダイオードは、2つの電極間の実効的な対向面積が小さく、電気容量が小さいフォトダイオードを実現することが可能である。また、一方の電極はショットキー障壁に対して、順方向に電流が流れるため、pin型フォトダイオードに比較して、付加抵抗を小さくすることが可能であり、回路時定数の小さいフォトダイオードの実現が可能である。

[0008] MSM型フォトダイオードでは、上記のように隣接する2つの電極間に印加する電圧により、キャリア空乏層が形成され、内部電場によりフォトキャリアが電極に掃引される。

従って、高速性を実現するためには、隣接する2つの電極間隔を小さくすると共に、半導体光吸収層の膜厚を小さくし、フォトキャリアの走行時間を短くすることが重要である。

先行技術文献

非特許文献

[0009] 非特許文献1：S. J. Koester, G. Dehlinger, J. D. Schaub, J. O. Chu, Q. C. Ouyang, A. Grill, "Germanium-on-Insulator Photodetectors", 2005年, 2nd International Conference on Group IV Photonics, FB1, p. 172, Fig. 3

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0010] MSM型フォトダイオードは、平面性およびシリコンLSIとの互換性を提供する。しかしながら、光導波路と共に集積化して光結合させるためには、MSM電極による光反射を低減すると共に、高速性および高効率を実現する必要がある。

[0011] MSM型フォトダイオードの応答を高速化するためには、MSM電極間のスペーシングを小さくすると共に光吸収層を薄くすること、さらに印加する

電圧を大きくしてキャリアの走行時間を短くすること、および受光面積すなわち接合容量を小さくして回路時定数を小さくすることが必要である。しかしながら、一般的には受光感度と高速性はトレードオフの関係になっており、受光感度と高速性の両方を満たすことは困難であった。

[0012] 本発明の目的は、光導波路と高効率に結合したMSM型フォトダイオードを実現し、低電圧で受光感度と高速性の両方を満たすデバイス構造を提供することにある。また、差動型フォトダイオードへの適用により、高集積化および低消費電力化を実現するフォトダイオードを提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0013] 本発明の導波路結合MSM型フォトダイオードは、半導体光吸収層と光導波路コア層が隣接して光結合された構造からなり、前記半導体光吸収層上に間隔をおいて配置されたMSM接合を形成したフォトダイオードであり、前記間隔をおいて配置されたMSM電極のうち、光入射側に配置された前記MSM電極に逆バイアスがかかるように電圧設定されていることを特徴とする。

ここで、逆バイアスとは、半導体光吸収層がn型半導体である場合は負の電圧を設定した状態、また、p型半導体である場合は正の電圧を印加した状態を指す。また、真性半導体の場合は、正・負のいずれかのバイアス印加でも良いが、実際には、不純物濃度を $10^{14}/\text{cm}^3$ 以下程度にすることは極めて困難であるため、通常はn型あるいはp型の導電タイプを示す。

発明の効果

[0014] 本発明によれば、集積化された光導波路と光結合したMSM型フォトダイオードにおいて、フォトキャリアを高速・高効率に掃引することが可能となり、低電圧で高速かつ高効率なフォトダイオードが実現される。

図面の簡単な説明

[0015] [図1]本発明の第1実施形態である導波路結合MSM型フォトダイオードの断面図である。

[図2]本発明の第1実施形態である導波路結合MSM型フォトダイオードの上面図である。

[図3]本発明の第2実施形態である導波路結合MSM型フォトダイオードの断面図である。

[図4]本発明の第2実施形態である導波路結合MSM型フォトダイオードの上面図である。

[図5]本発明の第3実施形態である導波路結合MSM型フォトダイオードの断面図である。

[図6]本発明の第3実施形態である導波路結合MSM型フォトダイオードの上面図である。

[図7]本発明の第4実施形態である導波路結合MSM型フォトダイオードの断面図である。

[図8]本発明の第4実施形態である導波路結合MSM型フォトダイオードの上面図である。

[図9]差動光信号と光結合している本発明の第5実施形態に係る導波路結合MSM型フォトダイオードをバランス型差動フォトダイオードとした構成図である。

[図10]差動光信号と光結合している本発明の第6実施形態に係る導波路結合MSM型フォトダイオードをデュアル型差動フォトダイオードとした構成図である。

[図11]本発明の第7実施形態に係る光インタコネクションモジュールの構成図であり、導波路結合MSM型フォトダイオードを搭載した光インタコネクションモジュールの構成図である。

[図12]本発明の導波路結合MSM型フォトダイオードの製造方法を示す断面図である。

[図13A]本発明の導波路結合MSM型フォトダイオードにおいて、光入射側に配置されたMSM電極に正バイアスを印加した場合の半導体光吸収層中の電界分布を示す図である。

[図13B]本発明の導波路結合MSM型フォトダイオードにおいて、光入射側に配置されたMSM電極に逆バイアスを印加した場合の半導体光吸収層中の電界分布を示す図である。

[図14A]本発明の導波路結合MSM型フォトダイオードにおいて、光入射側に配置されたMSM電極に正バイアスを印加した場合の受信感度の周波数特性を示す図である。

[図14B]本発明の導波路結合MSM型フォトダイオードにおいて、光入射側に配置されたMSM電極に逆バイアスを印加した場合の受信感度の周波数特性を示す図である。

[0016] 以下、本発明の実施形態である導波路結合MSM型フォトダイオードについて、図面を参照して詳細に説明する。

なお、以下の説明で用いる図面は、特徴をわかりやすくするために、便宜上特徴となる部分を拡大して示している場合があり、各構成要素の寸法比率などが実際と同じであるとは限らない。

[0017] (第1実施形態)

図1および図2は、本発明の第1実施形態であるMSM型フォトダイオード(導波路結合MSM型フォトダイオード)51の構造例を示している。

図1に示すように、MSM型フォトダイオード51は、隣接する光導波路コア層1と光結合した半導体光吸収層2上に形成されている。光導波路コア層1は、支持基板11に積層された埋め込み酸化層12上に形成されている。また、MSM型フォトダイオード51は、半導体光吸収層2上に間隔をおいて配置されたMSM接合を形成したフォトダイオードである。間隔をおいて配置されたMSM電極3,4のうち、光入射側(入力光信号5側)に配置されたMSM電極(1)3に逆バイアスが印加されるように、電圧設定されている。

[0018] また上記において、光導波路コア層1と半導体光吸収層2は、基板に対して垂直方向に積層されて形成されており、エバネッセント光結合している。これにより、光導波路コア層1を伝搬する光は、半導体光吸収層2との屈折

率差に応じた周期で、光導波路コア層 1 と半導体光吸収層 2 の間で、光モードフィールドが交互に移ることになる。

[0019] (第 2 実施形態)

図 3 および図 4 は、本発明の第 2 実施形態である MSM 型フォトダイオード 5 2 の構造例を示している。なお、以下で説明する第 2 ～第 4 の実施形態の MSM 型フォトダイオードの構成要素において、第 1 実施形態の MSM 型フォトダイオード 5 1 と同一の構成要素については、同一の符号を付し、その説明を省略する。

[0020] MSM 型フォトダイオード 5 2 においては、光入射側に配置された MSM 電極 (1) 3 の幅が、他の MSM 電極 4 の幅に対して大きくなるように、MSM 電極 3, 4 が形成されている。MSM 電極 (1) 3 の幅を大きくすることにより、光結合によるフォトキャリア発生領域において、内部電場強度が大きい領域が拡大され、受信感度および周波数帯域が改善される。

[0021] (第 3 実施形態)

図 5 および図 6 は、第 3 実施形態である MSM 型フォトダイオード 5 3 の構造例を示している。

MSM 型フォトダイオード 5 3 においては、光入射側に配置された MSM 電極 (1) 3 と隣接する MSM 電極 4 との間隔が、他の隣接する MSM 電極 4 間の間隔に対して小さくなるように、MSM 電極 3, 4 が形成されている。MSM 電極 (1) 3 と隣接する MSM 電極との間隔を小さくすることにより、光結合によるフォトキャリア発生領域における内部電場強度が大きくなり、受信感度および周波数帯域が改善される。

[0022] 図 7 および図 8 は、第 4 実施形態である MSM 型フォトダイオード 5 4 の構造例を示している。

MSM 型フォトダイオード 5 4 においては、半導体光吸収層 2 と光導波路コア層 1 が支持基板 (図示略) に対して水平方向に隣接して光結合しており、MSM 電極 (1) に逆バイアスが印加されるように、電圧設定されている。このような素子構造により、光結合によるフォトキャリア発生領域におけ

る内部電場強度が大きくなり、受信感度および周波数帯域が改善される。

[0023] また、上記のMSM型フォトダイオード51、52、53、54において、半導体光吸収層2上に間隔をおいて配置されたMSM電極のうち光入射側に配置されたMSM電極(1)3と半導体光吸収層2の端部29との距離は、入射される光の波長を λ 、半導体光吸収層2中の光信号電界が感じる実効的な屈折率を n_{eff} とした時、 λ/n_{eff} 以下であることが好ましい。この条件を満たすことにより、光導波路コア層1と半導体光吸収層2間で光がモード結合して、フォトキャリアが最も多く発生する領域において、内部電場強度を大きくすることができる。その結果、MSM型フォトダイオードの受信感度および周波数帯域が著しく改善される。

[0024] 上記のMSM型フォトダイオード51、52、53、54においては、光導波路コア層1として、単結晶シリコン、アモルファスシリコン、歪シリコン、多結晶シリコン、 $Si_{1-x}Ge_x$ ($x=0.01\sim0.9$ とし、以降では単に「 $Si_{1-x}Ge_x$ 」と記載する)、窒化シリコン、酸化シリコンからなる群から選択される少なくとも一層を用いることができる。一方、半導体光吸収層2としては、Ge、 $Si_{1-x}Ge_x$ 、Si、InGaAs、GaN、GaAs、GalnP、InPからなる群から選択される少なくとも一層を用いることができる。また、MSM電極3、4には、アルミニウム、銀、金、銅、タングステン、チタン、窒化チタン、ニッケルから選ばれる少なくとも一層あるいは少なくとも二種類からなる合金層を用いることができる。

[0025] 図9および図10は、2本の光導波路を伝送される差動光信号と、本発明の導波路結合MSM型フォトダイオードが光結合していることを特徴とする光受信回路の構成図である。図9は本発明の第5実施形態であるバランス型差動受光器55の受信回路構成を示しており、図10は本発明の第6実施形態であるデュアル型差動受光器56の受信回路構成を示している。

[0026] バランス型差動受光器55においては、図9に示すように、2つのMSM型フォトダイオードが電氣的に並列接続されているため、2つのMSM型フォトダイオードにおける光入射側に配置されたMSM電極(1-1)7とM

SM電極（1-2）8に逆バイアスが印加されるように電圧設定される。差動受光器においては、一般的に2つのフォトダイオード間の特性差が性能向上の妨げとなる。本発明の導波路結合MSM型フォトダイオードでは、2つのフォトダイオードにおける光入射側（差動光信号6側）のMSM電極（1-1）7とMSM電極（1-2）8に印加するバイアス電圧を逆バイアスとなるように設定することにより、周波数特性および受光感度を一致させることが可能となり、良好な差動出力波形を得ることができる。

[0027] 一方、デュアル型差動受光器56に関しては、図10に示すように、2つのMSM型フォトダイオードが電氣的に直列接続されている。また、光入射側に配置されるMSM電極（1-3）9およびMSM電極（1-4）10に逆バイアスが印加されるように、電極配置がなされ、バイアス電圧が設定されている。このような構成により、2つのMSM型フォトダイオードにおける周波数特性および受光感度を一致させることが可能となり、良好な差動出力波形が得られる。

[0028] 上記説明した受信回路の他に、各実施形態のMSM型フォトダイオード51、52、53、54を受光部に備えたLSI上の光配線システムを構成することができる。

[0029] 図11は、第7実施形態である光インタコネクションモジュール67の構成を示している。

光インタコネクションモジュール67は、図11に示すように、本発明の導波路結合MSM型フォトダイオード17が形成されたフォトダイオード／光源搭載ボード（Si基板）28と、フォトダイオード／光源搭載ボード28上に導波路結合MSM型フォトダイオード17とモノリシックに形成されたLSI電子回路とを備えている。このLSI電子回路には、光インタコネクションモジュール67の光源であるVCSEL光源18、光源変調用電気配線層22、フォトダイオード用電気配線層23等が含まれる。

[0030] 具体的には、光インタコネクションモジュール67は、図11に示すように、上記説明したフォトダイオード／光源搭載ボード28と、LSIパッケ

ージ21と、LSI搭載ボード26とを有する。LSIパッケージ21は、光源変調用電気配線ビア19と、フォトダイオード用電気配線ビア20と、を有する。また、LSI搭載ボード26は、光信号入力ファイバー25と、光信号出力ファイバー24と、凹面鏡27と、を有する。

[0031] 光インタコネクションモジュール67において、光源変調用電気配線層22は、光源変調用電気配線ビア19に電氣的に接続されている。LSIからの電気信号は、光源変調用電気配線ビア19から光源変調用電気配線層22を通して、電気変調機構を備えたVCSEL光源18により光信号に変換される。光信号は凹面鏡27で反射されて光信号出力ファイバー24に送られる。VCSEL光源18は、電気により光を変調する公知の他の発光機構、例えば外部光源からの光を電気光学効果または熱光学効果により変調するマッハツェンダー型の変調器に置き換えることが出来る。

[0032] 光信号の入力には、光信号入力ファイバー25の代わりに平面光導波路など公知の光デバイスを用いることが出来る。また、凹面鏡27のかわりに凸レンズなどの集光機構を用いることが出来る。また、導波路結合MSM型フォトダイオード17の後段のフォトダイオード用電気配線層23の途中に電気信号増幅のためのプリアンプを配置することも出来る。

光信号入力ファイバー25からの光信号は、凹面鏡27と図示略のグレーティング・カップラーにより導波路結合MSM型フォトダイオード17に照射される。導波路結合MSM型フォトダイオード17に当接するフォトダイオード用電気配線層23は、LSIのフォトダイオード用電気配線ビア20に電氣的に接続されている。そのため、導波路結合MSM型フォトダイオード17で受光した光信号は、電気信号に変換され、LSIに送られる。

[0033] 関連のLSIチップ間インターコネクトでは、20GHz以上の高速動作を目的とする場合、高速応答化を実現するために、モジュールに搭載されるフォトダイオードに、InP基板上に成長されたInGaAsなどの化合物半導体材料などが用いられる。しかしながら、化合物半導体はSi半導体素子の製造プロセスとの整合性が悪く、コストが高くなるという課題があった

。

本実施形態によれば、導波路結合MSM型フォトダイオード17を備えることにより、光インタコネクションモジュール67の高速応答化を可能にすると共に、製造コストを引き下げることができる。

[0034] (製造方法)

次いで、本発明の導波路結合MSM型フォトダイオードの製造方法に関して、Geを半導体光吸収層に用いた場合を例として説明する。図12(a)～(g)は、本発明の第1実施形態である導波路結合MSM型フォトダイオード51の製造方法を示す断面図である。

[0035] まず、図12(a)に示すような、支持基板11、埋め込み酸化層12、ノンドープ半導体シリコン13が積層されたノンドープのSOI基板を用意する。このSOI基板は、ドーピング濃度が十分低い基板であれば良く、本実施形態においては、例えば抵抗率が $1\sim 100\ \Omega\cdot\text{cm}$ 、ドーピング濃度が $10^{15}\sim 10^{16}/\text{cm}^3$ のp型SOI基板を用いるものとする。

[0036] 次に、図12(b)に示すように、電子線リソグラフィあるいは光露光により、レジストパターンニングおよび反応性イオンエッチングを行い、光導波路コア層1を形成する。

[0037] 次に、図12(c)に示すように、 SiO_2 膜を低圧化学気相合成(低圧CVD)法などにより成膜する。その後、反応性イオンエッチングにより、Ge成長エリアに開口を形成し、SOI層表面を露出させ、Ge選択成長のための酸化膜マスク14を形成する。

[0038] 次に、図12(d)に示すように、超高真空化学気相合成(UHV-CVD)法あるいは低圧CVD法などにより、 $1\ \mu\text{m}$ 程度の厚さになるように、Geを酸化膜マスク14の開口部に成膜する。この時、MSM電極を形成した時のリーク電流を低減するため、Ge層上にはSi層を $10\sim 50\ \text{nm}$ 積層し、半導体光吸収層2を形成する。

[0039] 次に、図12(e)に示すように、酸化膜マスク14および半導体光吸収層2を覆う酸化膜クラッド15を $1\ \mu\text{m}$ の厚みで積層する。引き続き、図1

1 (f) に示すように、MSM電極とGe/Si層が電氣的にコンタクトする領域に、光リソグラフィおよび反応性イオンエッチングによりコンタクトホール16を形成する。コンタクトホール16の大きさは、例えば $1\mu\text{m}\times 5\mu\text{m}$ とする。また、コンタクトホール間のスペーシングは、 $0.8\mu\text{m}$ 程度とする。

[0040] 最後に、図12 (g) に示すように、コンタクトホールが充填されるように、スパッタ法などにより、MSM電極材料であるTi/TiN/Al膜を厚み $1\mu\text{m}$ 程度で成膜する。その後、光リソグラフィおよび反応性イオンエッチングにより、MSM電極として機能するようにTi/TiN/Al膜 ($1\mu\text{m}$) を加工する。

[0041] 以上、本発明の好ましい実施形態について詳述したが、本発明は係る特定の実施形態に限定されるものではなく、特許請求の範囲内に記載された本発明の要旨の範囲内において、種々の変形・変更が可能である。

実施例

[0042] 以下、具体例を示す。

(実施例1)

図12 (a) ~ (g) の工程を行い、本発明の第1実施形態である導波路結合MSM型フォトダイオード51を作製した。

本実施例では、光導波路コア層1から半導体光吸収層2に光モードフィールドが最初に移る領域となるMSM電極(1)3に、逆バイアスが印加されるようにバイアス電圧を設定した。これにより、光吸収によりフォトキャリアが最も多く発生する領域と、逆バイアス電圧により内部電場が大きい領域を一致することが可能となり、 -3V 程度の比較的低いバイアス電圧で、 20GHz の高速性と80%程度の高受信効率が得られた。

[0043] また、本実施例においては、光導波路コア層1としてはSiを用い、半導体光吸収層2としてはGeを用いた。選択成長によりSi層上に $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ やGeを形成した場合、ファセットと呼ばれるテーパ形状が生じることが知られている。本実施例においては、入射される光波長を λ 、前記半導体光吸

収層中の光信号電界が感じる実効的な屈折率を n_{eff} とした時に、半導体光吸収層 2 上に間隔をおいて配置された MSM 電極 3, 4 のうち光入射側に配置された MSM 電極 (1) 3 と半導体光吸収層 2 の端部 29 との距離が、 λ / n_{eff} 以下になるようにした。これにより、ファセット上に電極を配置することによって増加するリーク電流を軽減すると共に、光フィールド分布と電界分布の重なりを改善することが可能となり、高速性と受信効率がさらに改善された。また、リーク電流をさらに低減するために、Ge、 $Si_{1-x}Ge_x$ 上に $Si_{1-y}Ge_y$ ($y=0\sim 0.9$) 層を形成することにより、Ge、 $Si_{1-x}Ge_x$ 上の結晶欠陥が低減されることを確認した。

[0044] 図 13 A および図 13 B は、上記の条件での作製により、隣接する光導波路コア層 1 と光結合した半導体光吸収層 2 上に形成された導波路結合 MSM 型フォトダイオードにおいて、図 13 A に示すように光入射側に配置された MSM 電極 (1) 3 に +1 V の正バイアスを印加した場合と、図 13 B に示すように -1 V 逆バイアスを印加した場合の半導体光吸収層中の電界分布を示している。このとき、MSM 電極間の距離を $1.0\ \mu\text{m}$ とし、光結合長を $30\ \mu\text{m}$ 、Ge 層厚を $1\ \mu\text{m}$ とした。

[0045] 図 13 A からわかるように、正バイアスを印加した際には、半導体光吸収層中の光結合部において、順方向に電流が流れるため、内部電場は小さくなった。一方、図 13 B に示すように、逆バイアスを印加した際には、ショットキーバリアがエンハンスされ、内部電場も大きくなった。この時、半導体光吸収層中の光結合部において、光吸収が最も多く生じ、フォトキャリアが多く発生する。従って、本発明においては、このフォトキャリア発生領域における内部電場強度を大きくすることにより、フォトキャリアの走行時間を短くし、高速に動作するフォトダイオードを実現すると共に、より低い電圧印加で、高い光受信感度を得られることを確認した。

[0046] 図 14 A および図 14 B は、上記の導波路結合 MSM 型フォトダイオードにおいて、光入射側に配置された MSM 電極 (1) 3 に、正バイアスを印加した場合 (図 14 A) と逆バイアスを印加した場合 (図 14 B) の受信感度

の周波数特性を示している。正バイアスを印加した際には、5 Vの印加に対して周波数帯域が6～7 GHzであるのに対し、-5 Vの逆バイアスを印加した際には、受信感度の周波数帯域が10 GHzまで改善された。すなわち、導波路結合MSM型フォトダイオードにおいて、光入射側に配置されたMSM電極（1）3に逆バイアスが印加されるような電圧設定にすることにより、フォトキャリア発生領域における内部電場強度が大きくなり、周波数帯域が改善されることを確認した。

[0047] （実施例2）

本発明の第2の実施形態である導波路結合MSM型フォトダイオード52において、光入射側に配置されたMSM電極（1）3のサイズを大きくし、逆バイアスが印加されるようバイアス電圧を設定した。その結果、光結合によるフォトキャリア発生領域において、内部電場強度が大きい領域が拡大され、受信感度および周波数帯域が改善されることを確認した。

[0048] 導波路結合MSM型フォトダイオード52の周波数帯域は、MSM電極4間の距離と半導体光吸収層2の膜厚をそれぞれ小さくすることにより、拡大することができる。しかしながら、光インターコネクションで要求される10 GHz以上の周波数帯域を実現するためには、電極間スペーシングを1 μ m以下にする必要があり、微細加工や高い作製精度が要求される。本実施例においては、電極間スペーシングを0.8～1.0 μ mに固定し、かつ、光入射側に配置されるMSM電極（1）3のサイズを1.2～1.5 μ mにすることにより、20 GHz以上の周波数帯域が得られることを確認した。

[0049] （実施例3）

本発明の第3の実施形態である導波路結合MSM型フォトダイオード53においては、前述のように光入射側に配置されたMSM電極（1）3と隣接するMSM電極4との間隔を小さくすることにより、光結合によるフォトキャリア発生領域における内部電場強度が大きくなり、受信感度および周波数帯域が改善される。本実施例においては、MSM電極4間の距離を0.8 μ mとし、光入射側に配置されたMSM電極（1）3と隣接するMSM電極4

との間隔を $0.6\ \mu\text{m}$ とした。これにより、周波数帯域が $12\ \text{GHz}$ から $15\ \text{GHz}$ まで改善されると共に、バイアス電圧が $-3\ \text{V}$ から $-2\ \text{V}$ に低減され、高速化と低消費電力化を実現できることを確認した。

[0050] (実施例4)

本発明の第4の実施形態である導波路結合MSM型フォトダイオード54において、フォトキャリアが非常に多く発生する光入射部のMSM電極(1)3に $-5\ \text{V}$ の逆バイアスを印加することにより、 $40\ \text{GHz}$ 程度の高速動作が得られた。このとき、MSM電極間隔を $0.5\ \mu\text{m}$ とした。

[0051] (実施例5)

本発明の第5の実施形態であるバランス型差動受光器55において、2つの導波路結合MSM型フォトダイオードが電氣的に並列接続されるため、MSM電極(1-1)7とMSM電極(1-2)8に $-3\ \text{V}$ の逆バイアス電圧を設定した。前述のように、差動受光器においては、一般的に2つのフォトダイオード間の特性差が課題となる。本実施例の導波路結合MSM型フォトダイオードにおいて、2つのフォトダイオードにおける光入射側のMSM電極(1-1)7とMSM電極(1-2)8に印加するバイアス電圧を逆バイアスとなるように設定することにより、周波数特性および受光感度を一致させることが可能となり、良好な差動出力波形が得られた。また、変調器などの他の光アクティブデバイスと集積化した際、同相ノイズ成分が低減され、 $1\ \text{Tbps}/\text{cm}^2\sim 10\ \text{Tbps}/\text{cm}^2$ 程度の高集積化が可能であることを確認した。

[0052] (実施例6)

本発明の第6の実施形態であるデュアル型差動受光器56において、光入射側に配置されるMSM電極(1-3)9およびMSM電極(1-4)10に逆バイアスが印加されるように電極配置を行い、 $-6\ \text{V}$ のバイアス電圧を設定した。これにより、2つのフォトダイオードにおける周波数特性が $12.3\ \text{GHz}$ と $12.5\ \text{GHz}$ とほぼ一致し、受光感度も $0.8\ \text{A}/\text{W}$ 程度と一致させることが可能であった。また、良好な差動出力波形を得られた。さ

らに、インバータ型トランスインピーダンス回路との組合せにより、10 Gbpsの良好なアイパターンが得られた。

[0053] (第7実施形態)

本発明の第7の実施形態である光インタコネクションモジュール67では、-5Vの逆バイアス電圧に対し、約40GHzの高速光電気変換動作が確認された。

[0054] 本願は、2012年3月30日に、日本に出願された特願2012-080591号に基づき優先権を主張し、その内容をここに援用する。

産業上の利用可能性

[0055] 本発明に係わる導波路結合MSM型フォトダイオードによれば、光導波路と高効率に結合したフォトダイオードを実現し、低電圧で受光感度と高速性を両立させるデバイス構造を提供することができる。

符号の説明

- [0056]
- | | |
|----|--------------|
| 1 | 光導波路コア層 |
| 2 | 半導体光吸収層 |
| 3 | MSM電極(1) |
| 4 | MSM電極 |
| 5 | 入力光信号 |
| 6 | 差動光信号 |
| 7 | MSM電極(1-1) |
| 8 | MSM電極(1-2) |
| 9 | MSM電極(1-3) |
| 10 | MSM電極(1-4) |
| 11 | 支持基板 |
| 12 | 埋め込み酸化層 |
| 13 | ノンドーパ半導体シリコン |
| 14 | 酸化膜マスク |
| 15 | 酸化膜クラッド |

- 1 6 コンタクトホール
- 1 7 導波路結合MSM型フォトダイオード
- 1 8 VCSEL光源
- 1 9 光源および変調用電気配線ビア
- 2 0 フォトダイオード用電気配線ビア
- 2 1 LSIパッケージ
- 2 2 光源変調用電気配線層
- 2 3 フォトダイオード用電気配線層
- 2 4 光信号出力ファイバー
- 2 5 光信号入力ファイバー
- 2 6 LSI搭載ボード
- 2 7 凹面鏡
- 2 8 フォトダイオード／光源搭載ボード
- 2 9 端部
- 5 1 MSM型フォトダイオード
- 5 2 MSM型フォトダイオード
- 5 3 MSM型フォトダイオード
- 5 4 MSM型フォトダイオード
- 5 5 バランス型差動受光器
- 5 6 デュアル型差動受光器
- 6 7 光インタコネクションモジュール

請求の範囲

- [請求項1] 半導体光吸収層と光導波路コア層が隣接して光結合された構造からなり、前記半導体光吸収層上に間隔をおいて配置されたMSM接合を形成したフォトダイオードであり、前記間隔をおいて配置されたMSM電極のうち、光入射側に配置された前記MSM電極に逆バイアスがかかるように電圧設定されることを特徴とする導波路結合MSM型フォトダイオード。
- [請求項2] 前記半導体光吸収層上に間隔をおいて配置されたMSM電極のうち光入射側に配置されたMSM電極のサイズが、他のMSM電極に対して幅が大きいことを特徴とする請求項1に記載の導波路結合MSM型フォトダイオード。
- [請求項3] 前記半導体光吸収層上に間隔をおいて配置されたMSM電極のうち光入射側に配置されたMSM電極と隣接するMSM電極との間隔が、他の隣接するMSM電極間の間隔に対して小さいことを特徴とする請求項1または2に記載の導波路結合MSM型フォトダイオード。
- [請求項4] 前記半導体光吸収層上に間隔をおいて配置されたMSM電極のうち光入射側に配置されたMSM電極と前記半導体吸収層の端部との距離が、入射される光波長を λ 、前記半導体光吸収層中の光信号電界が感じる実効的な屈折率を n_{eff} とした時、 λ/n_{eff} 以下であることを特徴とする請求項1または2に記載の導波路結合MSM型フォトダイオード。
- [請求項5] 前記半導体光吸収層と光導波路コア層が基板に対して垂直方向に積層されて光結合することを特徴とする請求項1～4のいずれか一項に記載の導波路結合MSM型フォトダイオード。
- [請求項6] 前記半導体光吸収層と光導波路コア層が基板に対して水平方向に隣接して光結合することを特徴とする請求項1～4のいずれか一項に記載の導波路結合MSM型フォトダイオード。
- [請求項7] 二本の光導波路を伝送される差動光信号と、請求項1～4のいずれ

か一項に記載の導波路結合MSM型フォトダイオードが光結合していることを特徴とする光受信回路。

[請求項8] 前記差動光信号と光結合している導波路結合MSM型フォトダイオードがバランス型差動フォトダイオードであることを特徴とする請求項7に記載の光受信回路。

[請求項9] 前記差動光信号と光結合している導波路結合MSM型フォトダイオードがデュアル型差動フォトダイオードであることを特徴とする請求項7に記載の光受信回路。

[請求項10] 前記光導波路コア層が、単結晶シリコン、アモルファスシリコン、歪シリコン、多結晶シリコン、 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0.01\sim0.9$)、窒化シリコン、酸窒化シリコンからなる群から選択される少なくとも一層であることを特徴とする請求項1～4のいずれか一項に記載の導波路結合MSM型フォトダイオード。

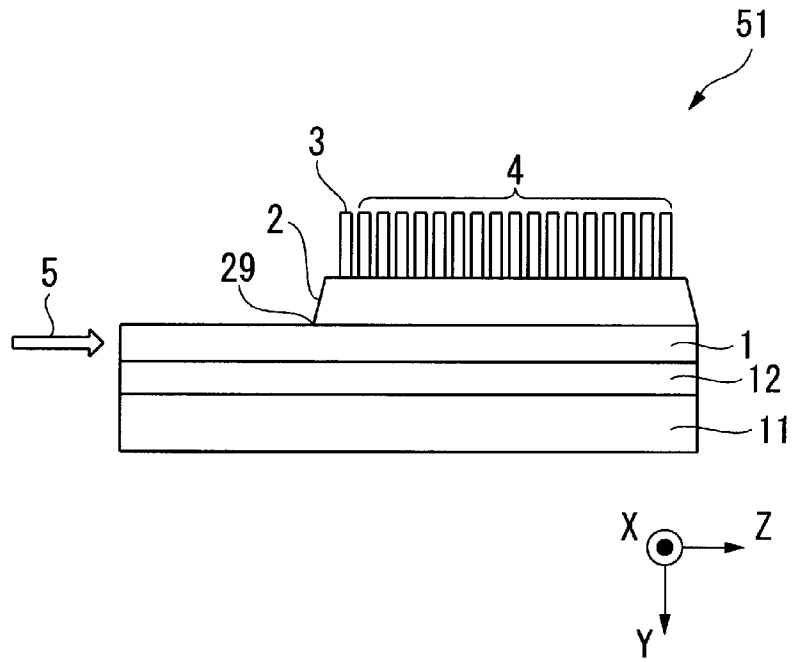
[請求項11] 前記半導体光吸収層がGe、 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0.01\sim0.9$)、Si、InGaAs、GaN、GaAs、GaInP、InPからなる群から選択される少なくとも一層であることを特徴とする請求項1～4のいずれか一項に記載の導波路結合MSM型フォトダイオード。

[請求項12] 前記フォトダイオードにおける半導体光吸収層がGe、 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0.01\sim0.9$)の時、ショットキー接合を形成するために、Ge、 $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($x=0.01\sim0.9$)上に $\text{Si}_{1-y}\text{Ge}_y$ ($y=0\sim0.9$)層が積層されることを特徴とする請求項1～4のいずれか一項に記載の導波路結合MSM型フォトダイオード。

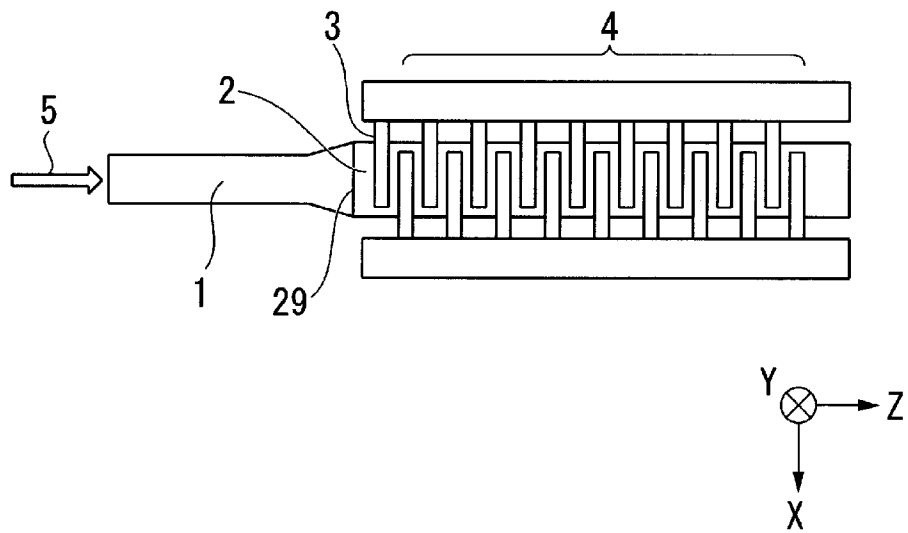
[請求項13] 前記半導体光吸収層上に間隔をおいて配置されたMSM電極が、アルミニウム、銀、金、銅、タングステン、チタン、窒化チタン、ニッケルから選ばれる少なくとも一層あるいは少なくとも二種類からなる合金層からなることを特徴とする請求項1～4のいずれか一項に記載の導波路結合MSM型フォトダイオード。

- [請求項14] 請求項1～9のいずれか一項に記載のフォトダイオードを受光部に備えるLSI上の光配線システム。
- [請求項15] 請求項1～9のいずれか一項に記載のフォトダイオードが形成されたSi基板と、前記Si基板上に前記フォトダイオードとモノリシックに形成されたLSI電子回路とを備える光インタコネクションモジュール。

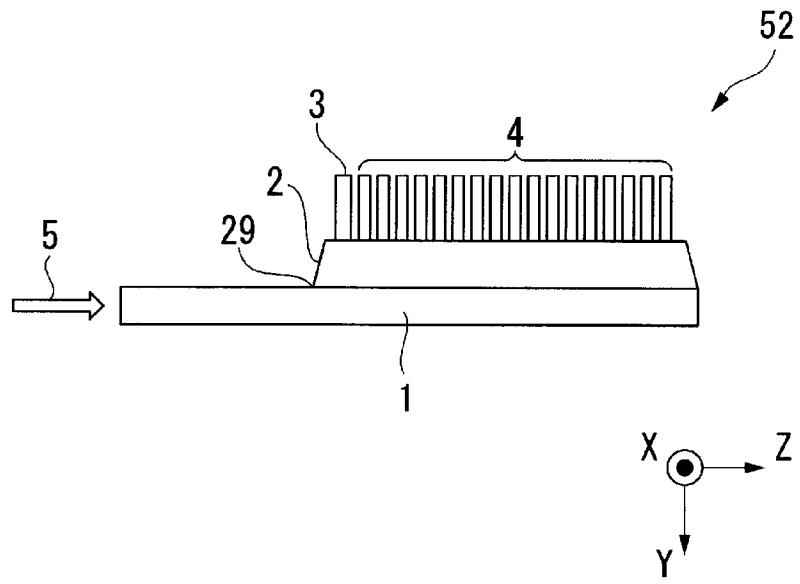
[図1]



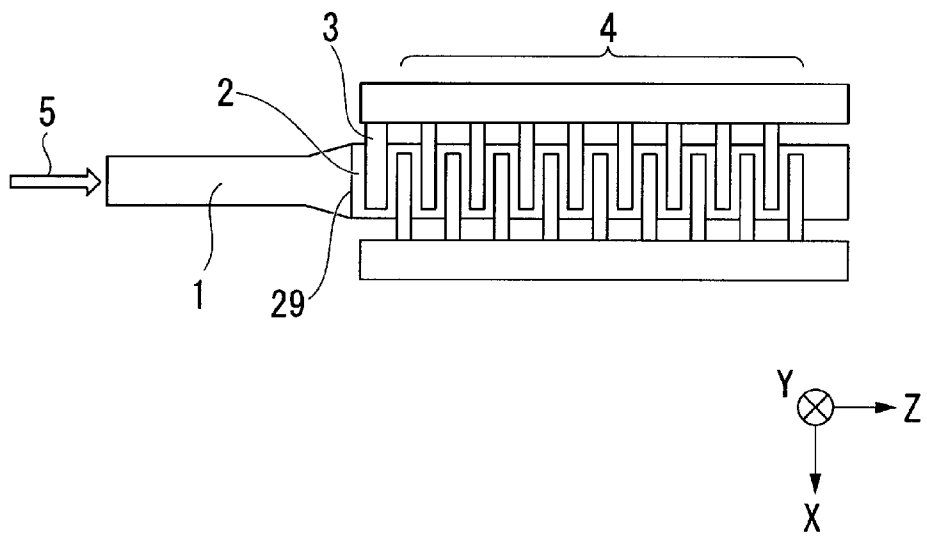
[図2]



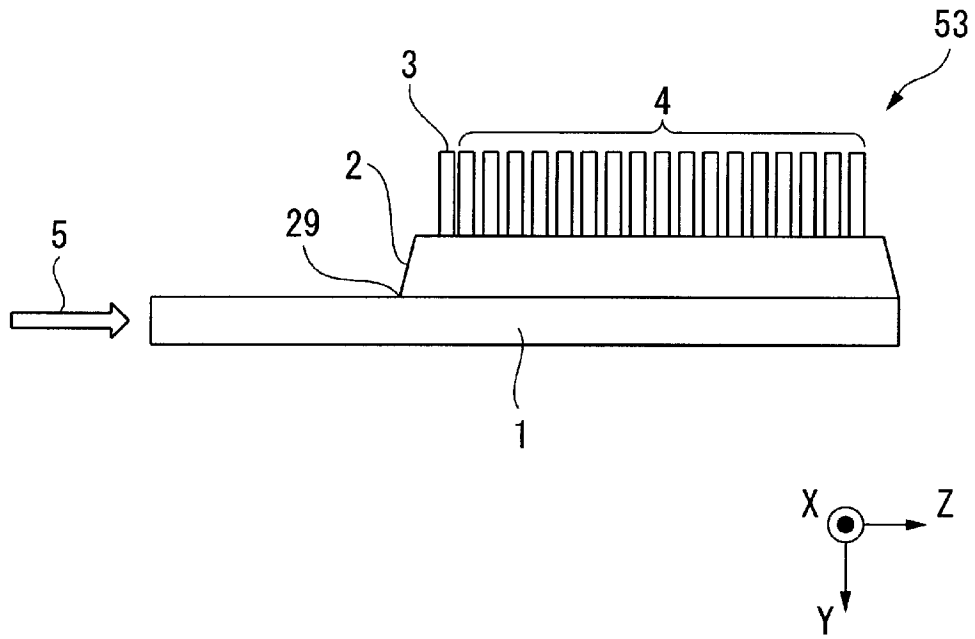
[図3]



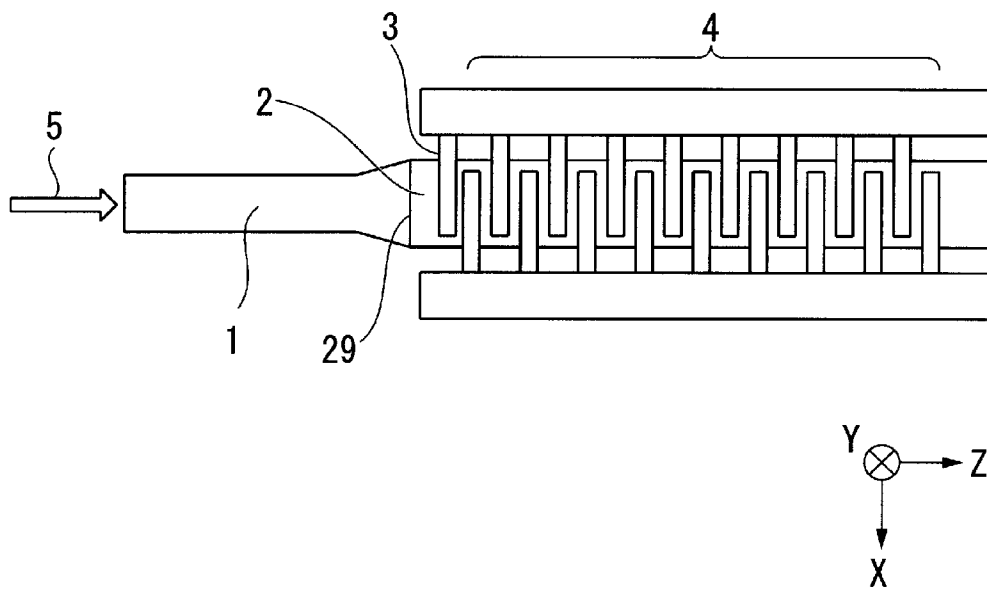
[図4]



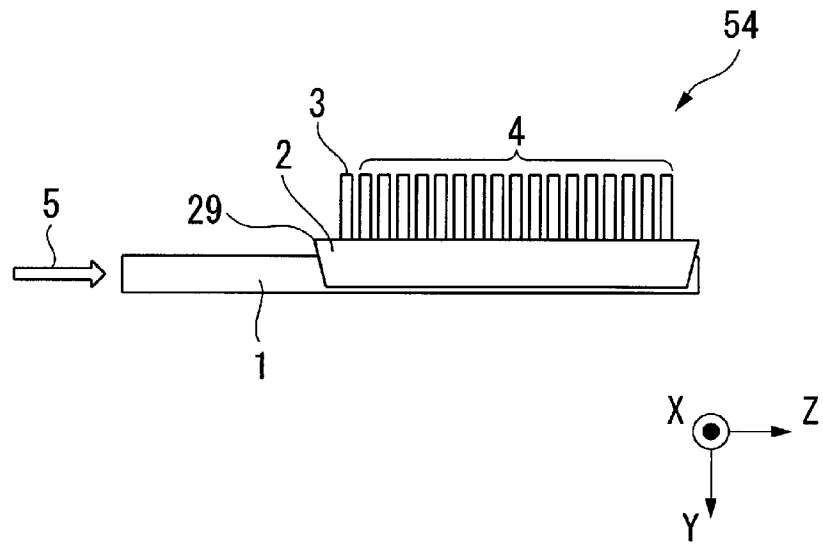
[図5]



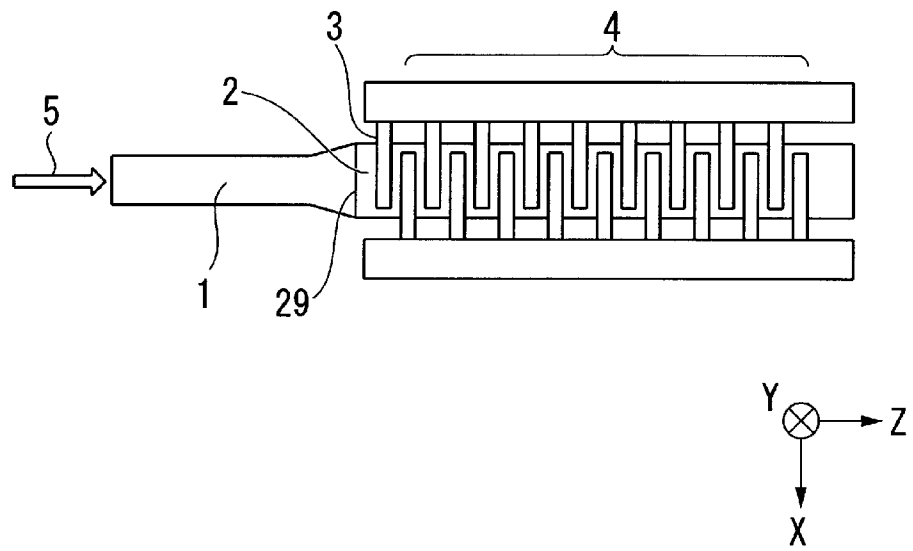
[図6]



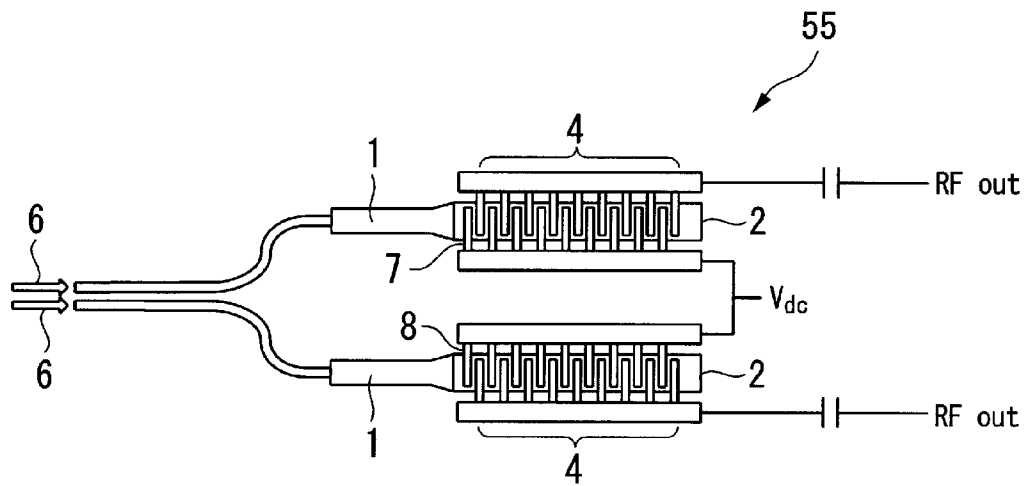
[図7]



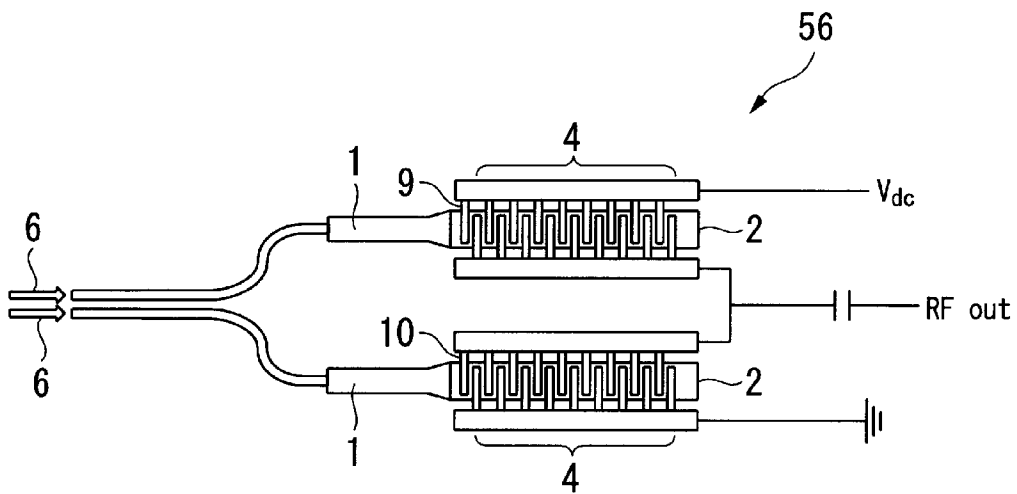
[図8]



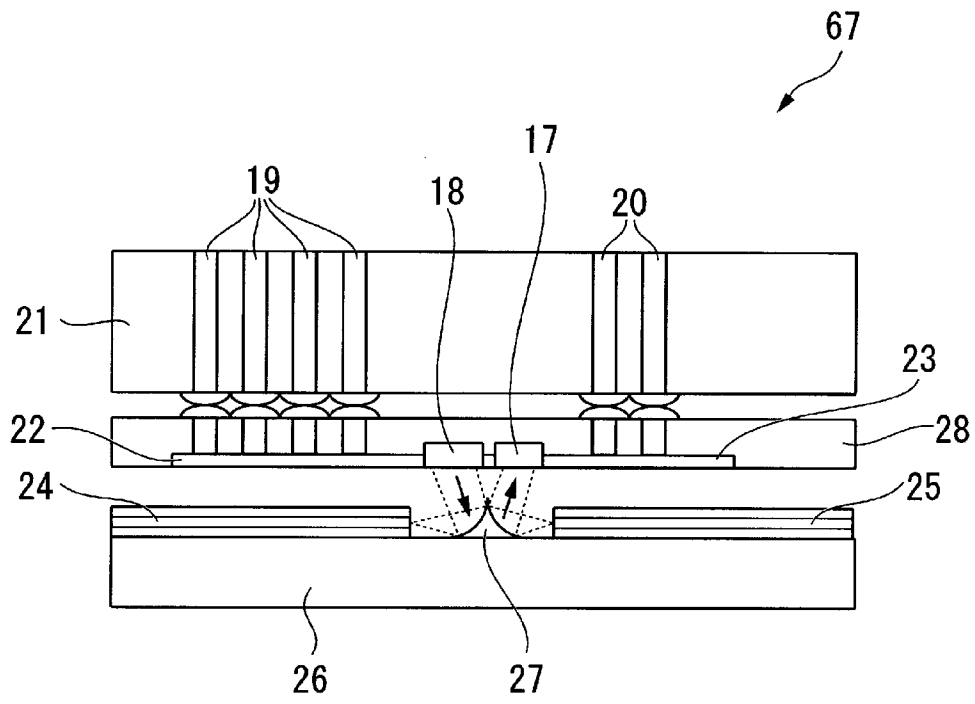
[図9]



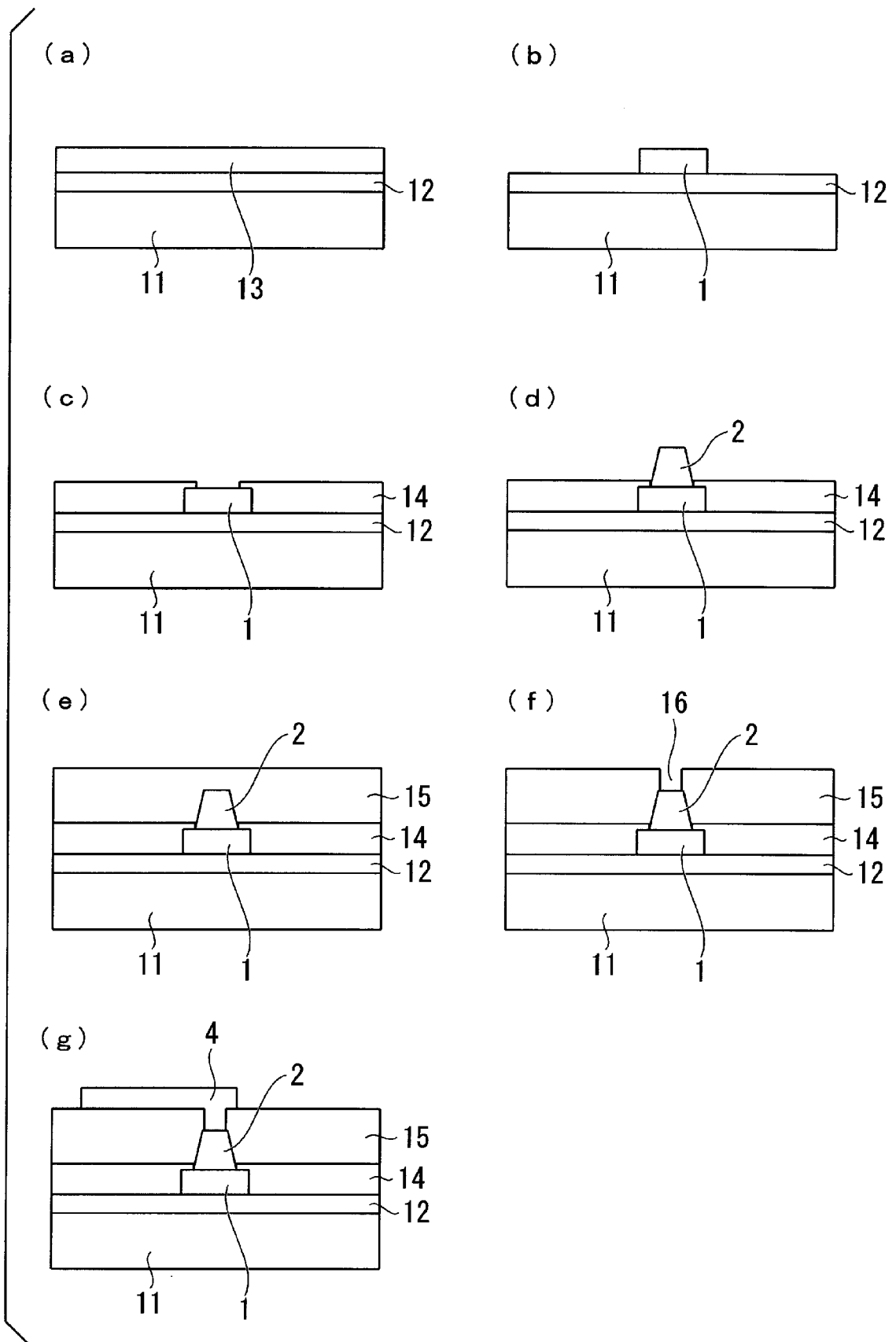
[図10]



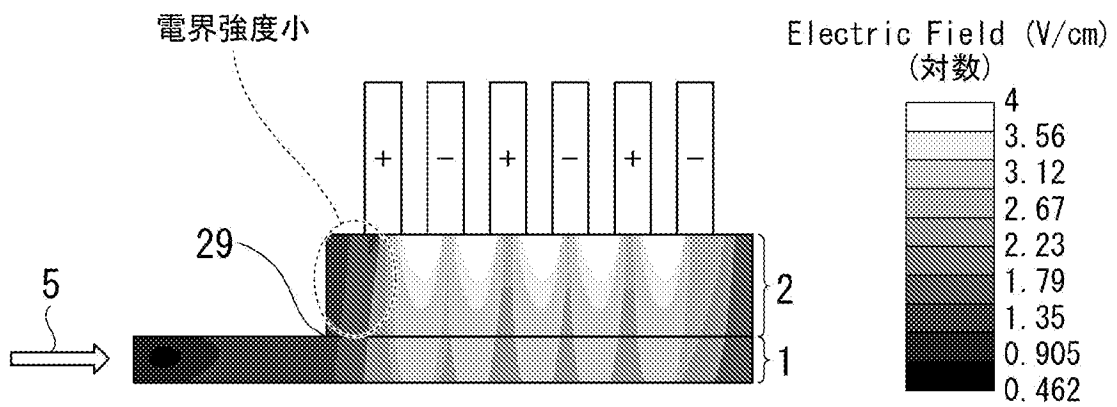
[図11]



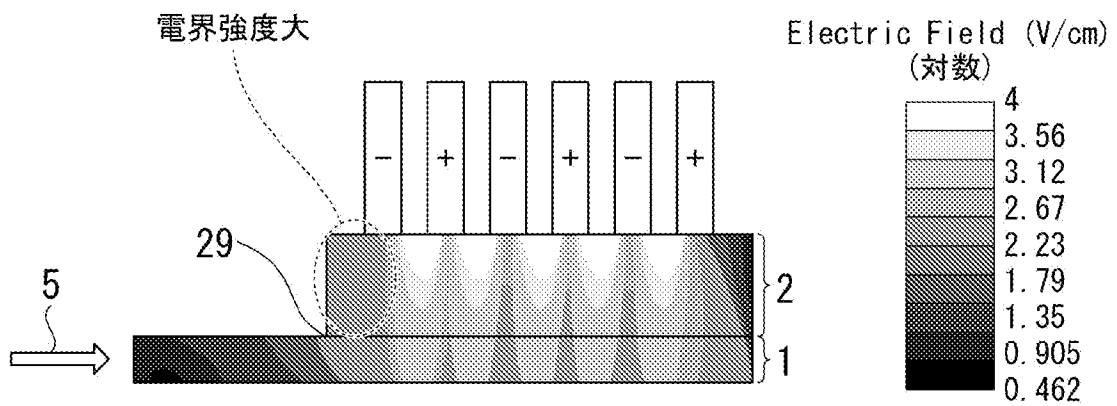
[図12]



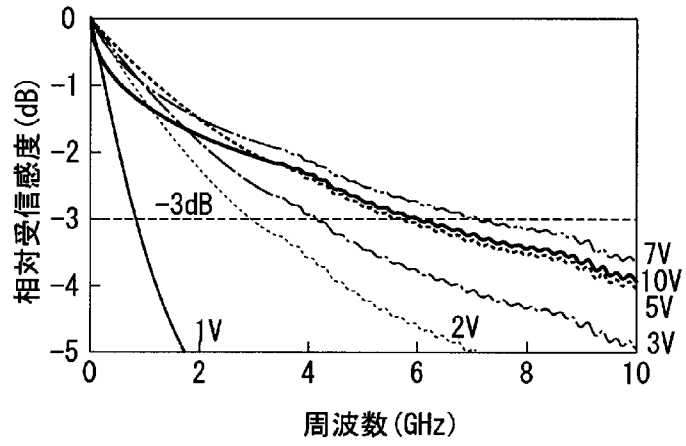
[図13A]



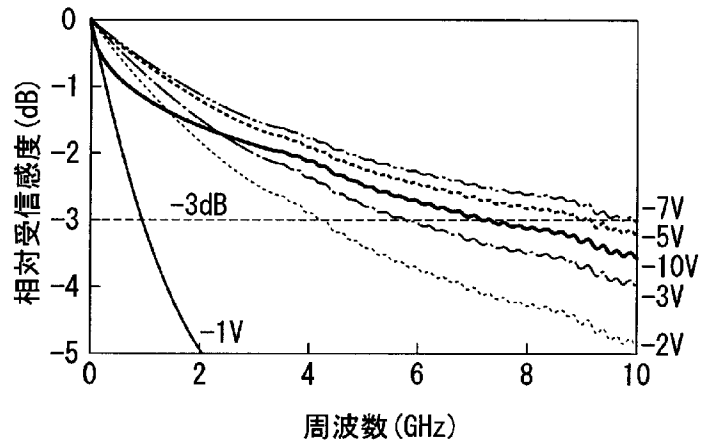
[図13B]



[図14A]



[図14B]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2013/057622

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER H01L31/108(2006.01) i, G02B6/42(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) H01L31		
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)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP 63-160373 A (Fujitsu Ltd.), 04 July 1988 (04.07.1988), (Family: none)	1-15
X	E.H.Böttcher, "Millimeter wave distributed metal - semiconductor - metal photodetectors", Applied Physics Letters, Vol.66, No.26 (1995), p.3648-3650	1-15
X	WO 96/05536 A2 (Painter), 22 February 1996 (22.02.1996), & CA 2197328 A & AU 3324995 A & US 5625729 A & EP 775328 A & JP 10-509806 A & DE 69532638 D & ES 2223052 T	1-15
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input 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 "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 26 April, 2013 (26.04.13)		Date of mailing of the international search report 14 May, 2013 (14.05.13)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office		Authorized officer
Facsimile No.		Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2013/057622

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 4-328876 A (Nippon Telegraph and Telephone Corp.), 17 November 1992 (17.11.1992), (Family: none)	1-15
Y	US 2006/0205127 A1 (Kwon), 14 September 2006 (14.09.2006), & KR 10-2006-0098317 A	1-15
A	WO 2008/072688 A1 (NEC Corp.), 19 June 2008 (19.06.2008), & US 2010/0013040 A1	1-15

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. H01L31/108(2006.01)i, G02B6/42(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. H01L31		
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)		
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 63-160373 A (富士通) 1988.07.04, (ファミリーなし)	1-15
X	E.H.Böttcher, "Millimeter wave distributed metal - semiconductor - metal photodetectors", Applied Physics Letters, Vol.66, No.26 (1995), p.3648-3650	1-15
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input 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 「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日の後に公表された文献 「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」 同一パテントファミリー文献		
国際調査を完了した日 26.04.2013	国際調査報告の発送日 14.05.2013	
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) 濱田 聖司 電話番号 03-3581-1101 内線 3255	2K 9207

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
X	WO 96/05536 A2 (Painter) 1996.02.22, & CA 2197328 A & AU 3324995 A & US 5625729 A & EP 775328 A & JP 10-509806 A & DE 69532638 D & ES 2223052 T	1-15
Y	JP 4-328876 A (日本電信電話) 1992.11.17, (ファミリーなし)	1-15
Y	US 2006/0205127 A1 (Kwon) 2006.09.14, & KR 10-2006-0098317 A	1-15
A	WO 2008/072688 A1 (日本電気) 2008.06.19, & US 2010/0013040 A1	1-15