

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局(43) 国際公開日
2009年7月16日 (16.07.2009)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2009/088071 A1(51) 国際特許分類:
H01L 31/105 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2009/050203

(22) 国際出願日: 2009年1月9日 (09.01.2009)

(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2008-003182 2008年1月10日 (10.01.2008) 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

(75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 岡本 大典 (OKAMOTO, Daisuke) [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). 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). 西研一 (NISHI, Kenichi) [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: 加藤 朝道 (KATO, Asamichi); 〒2220033 神奈川県横浜市港北区新横浜3丁目20番12号加藤内外特許事務所内 Kanagawa (JP).

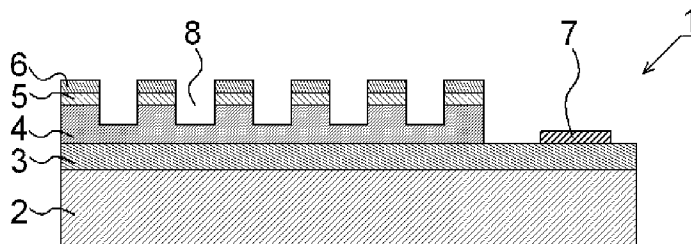
(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE,

[続葉有]

(54) Title: SEMICONDUCTOR LIGHT RECEIVING ELEMENT AND OPTICAL COMMUNICATION DEVICE

(54) 発明の名称: 半導体受光素子及び光通信デバイス

[図2]



(57) Abstract: A high-speed and high-efficiency semiconductor light receiving element with a large light receiving area and an optical communication device having the semiconductor light receiving element. The semiconductor light receiving element comprises a substrate, a semiconductor layer of a first conductivity type formed on the substrate, non-doped semiconductor light absorbing layer formed on the semiconductor layer of the first conductivity type, a semiconductor layer of a second conductivity type formed on the non-doped semiconductor light absorbing layer, and a conductive layer formed on the semiconductor layer of the second conductivity type. A periodic array of openings are formed in the multilayer body composed of the conductive layer, the semiconductor layer of the second conductivity type, and the non-doped semiconductor light absorbing layer. The widths of the openings are less than the wavelength of the incident light. The openings extend through the conductive layer and the semiconductor layer of the second conductivity type and reach the non-doped semiconductor light absorbing layer. The openings are periodically arrayed so that surface plasmon resonance at the interface between the conductive layer and the semiconductor layer of the second conductivity type is produced.

(57) 要約: 大受光面積・高速・高効率の半導体受光素子及び該半導体受光素子を備える光通信デバイスを提供する。半導体受光素子は、基板と、基板上に形成されている第1導電型半導体層と、第1導電型半導体層上に形成されているノンドープ型半導体光吸収層と、ノンドープ型半導体光吸収層上に形成されている第2導電型半導体層と、第2導電型半導体層上に形成されている導電層と、を備える。導電層、第2導電型半導体層及びノンドープ型半導体光吸収層からなる積層体には、周期的に配列された複数の開口が形成されている。開口の幅は、入射光の波長以下であり、開口は、導電層及び第2導電型半導体層を貫通し、ノンドープ型半導体光吸収層に達する。複数の開口は、導電層と第2導電型半導体層との界面における表面プラズモン共鳴を生じさせるような周期的配列を有する。

WO 2009/088071 A1



SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ,
UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

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,
SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN,
GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(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, LS, MW, MZ, NA, SD,
SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY,
KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE, BG,

添付公開書類:
— 国際調査報告書

明 細 書

半導体受光素子及び光通信デバイス

技術分野

[0001] [関連出願の記載]

本発明は、日本国特許出願：特願2008－003182号(2008年 1月10日出願)の優先権主張に基づくものであり、同出願の全記載内容は引用をもって本書に組み込み記載されているものとする。

本発明は、半導体受光素子及び該半導体受光素子を備える光通信デバイスに関し、特に、通信分野及び情報処理分野において使用される光信号を電気信号へ変換する半導体受光素子及びに該半導体受光素子を備える光通信デバイスに関する。

背景技術

[0002] 光通信、光情報、及び光計測の分野において、光電変換素子として半導体受光素子が多く用いられている。半導体受光素子における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、及び空乏層をキャリアが通過するのに要するキャリア走行時間であり、半導体受光素子的高速応答性を高めるためには、回路時定数およびキャリア走行時間を小さくすることが求められる。

[0003] 回路時定数を小さくする手段としては、例えば、受光面積を小さくして、素子容量を下げる手段が挙げられる。特許文献1に記載の半導体受光素子においては、n－型半導体基板層上に、i－型半導体光吸収層及びp－型半導体層をこの順で積層した構造を有する半導体受光素子において、p－型半導体層からi－型半導体光吸収層に達する複数個の開口領域を形成することにより、受光面積を低減することなく実効的なpn接合面積を低減し、容量低減を図っている。

[0004] また、近年、金属表面プラズモンやフォトニック結晶構造を利用して半導体受光素子を従来よりも高速化・高効率化するための種々の試みが行われている(例えば特許文献2～4参照)。

- [0005] 特許文献2に記載の、表面プラズモンを利用したショットキーフォトダイオードは、入射光の波長よりも小さな直径を有する穴と、穴の周囲に設けられた導電膜の膜面に対する入射光によって、励起された表面プラズモンによる共鳴状態を膜面に生じさせる周期構造と、を有する導電膜と、導電膜の穴近傍に導電膜と接して設けられた半導体層と、を有する。周期構造に入射した光は、表面プラズモンを励起して、表面プラズモンとの共鳴状態を生成し、導電膜と半導体層との界面において近接場光を発生させて、光電変換される。
- [0006] 特許文献3に記載の表面プラズモン強化光起電力デバイスは、入射光に照明された表面及び照明されていない表面を有し、該照明された表面及び照明されていない表面の少なくとも1つは、入射光の波長以下の直径を有するアパーチャーを備え、それらが周期的な表面トポグラフィーを有し、入射光と表面上の表面プラズモンとの共鳴相互作用を生ずる強化特性を有するアパーチャーの配列を有する第1の金属電極と、第1の金属電極から間隔を置いて配置された第2の電極と、アパーチャーの配列に対応し第1の金属電極と第2の電極の間に配置された複数の球と、を有し、各球は、第1及び第2の部分の間の接合部にp-n接合が形成されるように、pドーフト材料の第1の部分及び、nドーフト材料の第2の部分とを有し、個々の球は、第1あるいは第2の部分の一方が第1の金属電極と電氣的に接触し、第1あるいは第2の部分の他方が第2の電極と電氣的に接触しているようにアパーチャー内に配置されている。入射光は、表面トポグラフィー上の表面プラズモンと共鳴する。
- [0007] また、受光感度を高めるために、特許文献4に記載の受光素子は、半導体基板と、半導体基板の上方に配置されるn型半導体層と、n型コンタクト層の上方に配置され、所与の波長帯の光を吸収するi型半導体光吸収層と、i型半導体光吸収層の上方に配置されるp型半導体層と、を含み、p型半導体層は、周期的に配列された溝、穴又は柱状突起を有し、光の入射方向と交差する面内に周期的な屈折率分布を有する1次元又は2次元のフォトニック結晶部を含み、フォトニック結晶部は、入射光の少なくとも一部が偶数次の回折光となって光吸収層の面内に分布して伝搬するように形成されている。
- [0008] 特許文献1:特開2007-165359号公報

特許文献2:国際公開第2005/098966号パンフレット

特許文献3:特許第3726887号公報

特許文献4:特開2005-159002号公報

発明の開示

発明が解決しようとする課題

[0009] 以上の特許文献1～4の全開示内容は、本書に引用をもって繰り込み記載されているものとする。

以下の分析は、本発明の観点から与えられる。

[0010] 半導体受光素子において、受光面積を小さくして素子容量を下げれば、回路時定数が小さくなり、高速動作を確保することができる。しかしながら、その場合には、受光面積が小さくなるので、光ファイバ等と高効率に光結合させることが困難になるという問題が生じる。

[0011] そこで、特許文献1に記載の半導体受光素子においては、p型半導体層からi型半導体光吸収層に貫通する複数個の開口領域を形成することにより、受光面積を低減させることなく素子容量を低減させている。しかしながら、より高速な動作を得るために、半導体光吸収層を薄くしてキャリア走行時間を小さくすると、量子効率が低下するというトレードオフの問題が存在する。

[0012] 特許文献2及び特許文献3に記載の装置においては、表面の金属層(電極)側から光を入射させる構造となっているが、この構造では、光は吸収層に至る前に電極で反射される割合が大きく、高い光電効率は得られない。また、特許文献3に記載の装置の製造においては、半導体基板上に高品位の結晶を成長させることが困難である。そのため、特許文献3に記載の装置は、光通信等の高速動作が要求される用途に適用することが困難である。

[0013] 特許文献4に記載の受光素子においては、フォトニック結晶部を形成する溝はp型半導体層の途中までしか形成されていないので、十分な容量低減の効果を得ることができない。

[0014] 本発明の目的は、大受光面積・高速・高効率の半導体受光素子及び該半導体受光素子を備える光通信デバイスを提供することである。

課題を解決するための手段

- [0015] 本発明の第1視点によれば、基板と、基板上に形成されている第1導電型半導体層と、第1導電型半導体層上に形成されているノンドープ型半導体光吸収層と、ノンドープ型半導体光吸収層上に形成されている第2導電型半導体層と、第2導電型半導体層上に形成されている導電層と、を備える半導体受光素子が提供される。導電層、第2導電型半導体層及びノンドープ型半導体光吸収層からなる積層体には、周期的に配列された複数の開口が形成される。開口の幅は、入射光の波長以下である。開口は、導電層及び第2導電型半導体層を貫通し、ノンドープ型半導体光吸収層に達する。
- [0016] 上記第1視点の好ましい形態によれば、複数の開口は、導電層と第2導電型半導体層との界面における表面プラズモン共鳴を生じさせるような周期的配列を有する。
- [0017] 上記第1視点の好ましい形態によれば、開口の深さを d 、導電層の厚さを t_1 、第2導電型半導体層の厚さを t_2 、ノンドープ型半導体光吸収層の厚さを t_3 としたとき、開口の深さ d は、 $t_1 + t_2 \leq d \leq t_1 + t_2 + t_3 / 2$ の条件を満たす。
- [0018] 上記第1視点の好ましい形態によれば、半導体受光素子は、第1導電型半導体上に形成されると共に、第1導電型半導体層と電氣的に接続されている第1電極をさらに備える。導電層は、第2導電型半導体層と電氣的に接続され、第2電極としても機能する。
- [0019] 上記第1視点の好ましい形態によれば、半導体受光素子は、第1導電型半導体上に形成されると共に、第1導電型半導体層と電氣的に接続されている第1電極と、第2導電型半導体上に形成されると共に、第2導電型半導体層と電氣的に接続されている第2電極と、をさらに備える。導電層は、第2電極が形成されていない領域に、絶縁層を介して第2導電型半導体層上に形成されており、導電層と第2電極とは電氣的に接続されていない。
- [0020] 上記第1視点の好ましい形態によれば、第1導電型半導体層が形成されている面とは反対側の基板面の少なくとも一部は、レンズ状に形成されている。
- [0021] 上記第1視点の好ましい形態によれば、複数の開口は、三角格子状または正方格子状に周期的に配列され、開口の表面形状は、円形、楕円形又は多角形である。

- [0022] 上記第1視点の好ましい形態によれば、導電層の上面の面積(開口の面積含む)に対する複数の開口の総面積の割合は、50%以上80%以下である。
- [0023] 上記第1視点の好ましい形態によれば、入射光の波長を λ 、第2導電型半導体層の屈折率を n 、隣接する開口の中心間距離である開口の周期を P としたとき、 nP/λ は、 $0.9 < nP/\lambda < 1.1$ 、又は $1.2 < nP/\lambda < 1.5$ のいずれかの条件を満たす。
- [0024] 上記第1視点の好ましい形態によれば、半導体受光素子は、第1導電型半導体層の下層にブラッグ反射多層膜をさらに備える。
- [0025] 上記第1視点の好ましい形態によれば、導電層が、Al、Ag、Au、及びCuのうちの少なくとも1つの金属材料を含む。
- [0026] 上記第1視点の好ましい形態によれば、ノンドープ型半導体光吸収層は、Si、 $\text{SiG}_{1-x}\text{e}_x$ (但し、 x は1未満の正数)、Ge、GaN、GaAs、GaInAs、GaInP、及びInPの群の中から選ばれる少なくとも1つで形成されている。
- [0027] 上記第1視点の好ましい形態によれば、半導体受光素子は、導電体層上に、反射防止膜又は保護膜をさらに備える。
- [0028] 本発明の第2視点によれば、半導体受光素子を備える光通信デバイスが提供される。半導体受光素子は、基板と、基板上に形成されている第1導電型半導体層と、第1導電型半導体層上に形成されているノンドープ型半導体光吸収層と、ノンドープ型半導体光吸収層上に形成されている第2導電型半導体層と、第2導電型半導体層上に形成されている導電層と、を備える。導電層、第2導電型半導体層及びノンドープ型半導体光吸収層からなる積層体には、周期的に配列された複数の開口が形成される。開口の幅は、入射光の波長以下である。開口は、導電層及び第2導電型半導体層を貫通し、ノンドープ型半導体光吸収層に達する。
- [0029] 上記第2視点の好ましい形態によれば、半導体受光素子は、基板側から光が入射するように配置されている。

発明の効果

- [0030] 本発明は、以下の効果のうち少なくとも1つを有する。
- [0031] 本発明においては、周期的な開口を有する導電層(又は第2電極)に入射した光は、導電層と半導体界面における表面プラズモンを励起し、共鳴状態を形成する。その

結果、ノンドープ型半導体光吸収層内に強い電場が発生し、薄いノンドープ型半導体光吸収層に対しても効率良く吸収が行われる。これにより、光吸収層を薄くした場合においても高い量子効率を得ることができる。また、複数の開口が設けられているため、単位面積当たりの素子容量を小さくすることができる。これにより、高速性を高めることができる。さらに、素子容量を低下させても受光面積を維持できるので、光ファイバ等とのアライメントを容易にすることができる。したがって、本発明によれば、高効率・高速・高適用性の半導体受光素子及び光通信デバイスが実現される。

[0032] また、本発明によれば、SiのCMOSプロセスと相性の良いGeを用いて高速・高効率の半導体受光素子可以实现できるので、高集積化及び量産が容易であり製造コストを引き下げることができる。

図面の簡単な説明

- [0033] [図1]本発明の第1実施形態に係る半導体受光素子の概略斜視図。
[図2]図1のII-II線における概略断面図。
[図3]開口の別の形態を示す概略平面図。
[図4]開口の別の形態を示す概略平面図。
[図5]本発明の第1実施形態に係る一態様を示す概略断面図。
[図6]図2の概略部分断面図。
[図7]本発明の第1実施形態に係る半導体素子の第2例の概略断面図。
[図8]本発明の第2実施形態に係る半導体受光素子の概略断面図。
[図9]本発明の第3実施形態に係る半導体受光素子の概略断面図。
[図10]第4実施形態に係る光通信デバイスの概略断面図。
[図11]第5実施形態に係る光通信デバイスの概略断面図。
[図12]実施例1における比較例に係る半導体受光素子の概略断面図。
[図13]実施例1における電磁界シミュレーション結果。

符号の説明

- [0034] 1, 11, 21, 31 半導体受光素子
2 基板
2a 凸部

3	第1導電型半導体層
4	バンドープ型半導体光吸収層
5	第2導電型半導体層
6	第2電極(導電層)
7	第1電極
8	開口
12	埋め込み酸化層
13, 14	バッファ層
22	絶縁層
23	導電層
24	第2電極
32	ブラッグ反射多層膜
41	光通信デバイス
42	半導体受光素子
43	電気配線
44	プリアンプIC
45	チップキャリア
46	レンズ
47	光ファイバ
48	モジュール筐体
49	信号光
51	光通信デバイス
52	半導体受光素子
53	VCSEL光源
54	LSIパッケージ
55	半導体受光素子／光源搭載ボード
56	LSI搭載ボード
57	光源・変調用電気配線ビア

58	電気配線ビア
59	光源・変調用電気配線層
60	半導体受光素子用電気配線層
61	光信号出力ファイバ
62	光信号入力ファイバ
63	凹面鏡
71	半導体受光素子(比較例)

発明を実施するための最良の形態

[0035] 本発明の第1実施形態に係る半導体受光素子について説明する。図1に、本発明の第1実施形態に係る半導体受光素子の概略斜視図を示す。図2に、図1のII-II線における概略断面図を示す。

[0036] 本発明の半導体受光素子1は、下層から順に、基板2、第1導電型半導体層3、ノンドープ型半導体光吸収層4、及び第2導電型半導体層5を有し、第1導電型半導体層3、ノンドープ型半導体光吸収層4、及び第2導電型半導体層5はpin(またはnip)半導体積層構造を形成する。また、半導体受光素子1は、第2導電型半導体層5上に第2導電型半導体層5と電氣的に接続された第2電極(導電層)6、及び第1導電型半導体層3上に第1導電型半導体層3と電氣的に接続された第1電極7を有する。第2電極6は、第2導電型半導体層5の上部に形成されており、表面プラズモン共鳴を誘起する導電層の役割も果たす。第1電極7及び第2電極6に逆バイアス電圧を印加すると、ノンドープ型半導体光吸収層4が空乏化され、ノンドープ型半導体光吸収層4で発生したフォトキャリアは、光電流として外部回路に取り出され、電気信号に変換されることになる。

[0037] さらに、半導体受光素子1は、第2電極6及び第2導電型半導体層5を貫通し、ノンドープ型半導体光吸収層4に達する複数の開口8を有する。開口8は、周期的に配列されている。図1に示す形態においては、第2電極6面の平面投影における開口8の形状は正方形であり、開口8は正方格子状に周期的に配列されている。周期的に配された開口8により、第2電極6に光を入射させると、第2電極6と第2導電型半導体層5との界面における表面プラズモン共鳴を誘起させることができる。

- [0038] 図3及び図4に、開口8の別の形態を示す概略平面図を示す。開口8の平面形状は、正方形以外の多角形であってもよいし、例えば、図3に示すような円形もしくは楕円形であってもよい。また、開口8の配列形態は、図1及び図3に示すような正方格子状の他にも、例えば、図4に示すような三角格子状の周期的配列であってもよい。
- [0039] 平面投影における個々の開口8の大きさは、入射波長以下の大きさになるようにする。開口8の大きさとなる部分は、好ましくは、開口の一番幅広の(長い)部分であり、例えば、正方形開口の場合は対角線であり、円形開口であれば直径であると好ましい。また、素子容量を下げるために、第2電極6平面における開口8が占める総面積の割合は、第2電極6の面積に対して大きくするほど好ましい。例えば、第2電極の面積(開口8含む)に対して開口8が占める総面積の割合を50%以上にすると、顕著な素子容量低減の効果を得ることができる。開口8の面積割合を増加させることによる量子効率の低下は、第2電極6による表面プラズモン共鳴の効果を利用することによって、防ぐことが可能であるが、開口8の面積割合の上限は、所望の量子効率と素子容量に応じて適宜設定すると好ましく、例えば80%以下に設定することができる。
- [0040] 開口8は一般的な加工方法、例えばウェットエッチング又はドライエッチング、により形成することができる。例えば、半導体積層構造3, 4, 5の上にリフトオフプロセスを用いて開口パターンを有する第2電極6を形成し、形成した第2電極6をマスクとして第2導電型半導体層5及びノンドープ型半導体光吸収層4にも開口を形成することができる。
- [0041] 半導体受光素子1に対する光の入射方向は、第2電極6面側からの入射であっても、基板2面側からの入射であってもよく、いずれの場合においても同様の表面プラズモン共鳴の効果を得ることができる。特に、基板2面側からの入射の場合においては、入射光は波長以下の大きさの開口8をほとんど透過せず、また第2電極6がミラーとしての役割も果たすため、より高い効率が得られ、特に好ましい。基板2面側から光を入射させる場合には、後述の第4実施形態のように用に別途レンズを用いて集光させてもよいし、または、図5に示すように半導体層3~5とは反対側の基板2面に凸部2a(レンズ形状)を形成して基板2自体にレンズ機能を持たせてもよい。
- [0042] 第2電極6に入射した光が表面プラズモンと効率良く結合するためには、開口8の

周期Pが非常に重要なパラメータとなる。図6に、図2に示す半導体受光素子1のノンドープ型半導体光吸収層4、第2導電型半導体層5及び第2電極6部分の概略部分断面図を示す。ここで、隣接する開口8の中心間の距離を周期P、入射光の真空中での波長を λ 、第2導電型半導体層5の屈折率をnとすると、 nP/λ は、 $0.9 < nP/\lambda < 1.1$ 又は $1.2 < nP/\lambda < 1.5$ の条件を満たすと好ましい。 nP/λ がこの範囲内にあると高い量子効率を得ることが可能となる。

[0043] また、開口深さd(第2電極6からノンドープ型半導体光吸収層4まで達する開口8の深さ)は、本発明の半導体受光素子1における量子効率及び高周波特性に対して重要なパラメータである。開口8の部分においては電界が小さくなるため、この部分で発生したキャリアの走行時間は長くなり、高速応答を妨げる。したがって、高速応答を得るためには、ノンドープ型半導体光吸収層4にも開口8を形成したほうが有利である。ただし、その場合には量子効率がやや低下するので、効率と高速性を両立させるためには、開口8の深さはノンドープ型半導体光吸収層4の中間程度よりも浅くするのが良い。つまり、開口8の深さをd、第2電極6の厚さを t_1 、第2導電型半導体層5の厚さを t_2 、ノンドープ型半導体光吸収層4の厚さを t_3 としたとき、開口8の深さdは、 $t_1 + t_2 \leq d \leq t_1 + t_2 + t_3 / 2$ を満たすと好ましい。なお、後述の第2実施形態のように絶縁層等がさらに介在する場合には、開口の深さdには絶縁層等の厚さも加味させる。

[0044] 第2電極6の材料としては、導電性の金属が好ましく、例えば、半導体デバイスに広く用いられており、多くの加工技術が確立されているAlあるいはCu等の金属を用いることができるが、特に、電気抵抗が小さく表面プラズモン損失の少ないAuあるいはAg等の金属が特に好ましい。

[0045] 第2電極6と第2導電型半導体層5の間には、密着層あるいはバリア層として、Ti、Ta、Cr、W、Ni、Ptなどの金属層を設けることもできる。これらの密着層またはバリア層の膜厚は光学的損失が少なくなるように20nm以下にすると好ましい。また、第2電極6の表面に、絶縁体からなる反射防止膜あるいは保護膜を設けても良い(開口8内面に形成されてもよい)。この反射防止膜あるいは保護膜の材料としては、成膜が容易で安定な膜を得られる SiO_2 、 SiON 、 SiN などが好ましい。

[0046] 第2導電型半導体層5、ノンドープ型半導体光吸収層4、第1導電型半導体層3は

複数の半導体材料の積層構造として構成しても良く、半導体受光素子1を作製する基板または入射光波長によって最適な材料を選ぶことができる。例えば、ノンドープ型半導体光吸収層4としては、 Si 、 Si Ge_{1-x} （但し、 x は1未満の正数）、 Ge 、 GaN 、 GaAs 、 GaInAs 、 GaInP 、及び InP の群の中から選ばれる少なくとも1つの半導体材料を選択することができる。例えば、基板2の材料として InP を用いた場合、第1導電型半導体層3に InP 、ノンドープ型半導体光吸収層4に InGaAs 、第2導電型半導体層5に InAlAs を用いることができる。また、例えば、基板2の材料として Si を用いた場合、第1導電型半導体層3および第2導電型半導体層5に Si 、ノンドープ型半導体光吸収層4に Si Ge_{1-x} または Ge を用いることができる。

[0047] 本発明においては、第1導電型及び第2導電型の組み合わせとしては、第1導電型半導体層3を n 型半導体及び第2導電型半導体層5を p 型半導体とする $p-i-n$ 型構造でもよいし、第1導電型半導体層3を p 型半導体及び第2導電型半導体層5を n 型半導体とする $n-i-p$ 型構造でもよい。

[0048] 次に、本発明の第1実施形態に係る半導体受光素子1の第1例について図1及び図2を用いて説明する。基板としての InP 基板2の上に、第1導電型半導体層として n 型 InP 層3、ノンドープ型半導体光吸収層として i 型 InGaAs 層4、第2導電型半導体層として p 型 InAlAs 層5が積層されている。これらの半導体層3, 4, 5は全て分子線エピタキシー又は有機金属気相成長法を用いて成長させることができる。 p 型 InAlAs 層5の表面には、第2電極として Ti/Pt/Au-p 電極6が形成されている。また、エッチングにより n 型 InP 層3の表面の一部を露出させ、該露出面に、第1電極として Ti/Pt/Au-n 電極7が形成されている。電極7, 6と半導体層3, 5との間には、良好なオーミック接合が形成されている。 Ti/Pt/Au-p 電極6、 p 型 InAlAs 層5及び i 型 InGaAs 層4には、周期的に配列した複数の開口8が形成されている。開口8は、 Ti/Pt/Au-p 電極6及び p 型 InAlAs 層5を貫通し、 i 型 InGaAs 層4の半ばにまで達している。半導体受光素子1に逆バイアス電圧を印加すると、 i 型 InGaAs 層4が空乏化される。入射光波長を、例えば光通信に用いられる $1.3\mu\text{m}$ あるいは $1.55\mu\text{m}$ としたとき、 i 型 InGaAs 層4は十分大きな吸収係数を持ち、高効率の半導体受光素子が可能となる。また、 InP は該波長に対して吸収のない透明材料であり、 InP 基板2

側から光入射させることができる。

[0049] 次に、本発明の第1実施形態に係る半導体受光素子の第2例について説明する。

図7に、本発明の第1実施形態に係る半導体素子の第2例の概略断面図を示す。半導体受光素子11は、本発明の第1実施形態に基づくものであるが、第1例に係る半導体受光素子とは半導体材料が異なっている。基板としての、埋め込み酸化層12を含むSi基板2の上に、第2導電型半導体層としてn型Si層3を形成し、その上にSiGeバッファ層13を形成し、その上にノンドープ半導体光吸収層としてi型Ge層4を設け、その上にSiGeバッファ層14を形成し、その上に第2導電型半導体層としてp型Si層5を形成している。n型Si層3及びi型Ge層4の上にSiGeバッファ層13、14を設けることにより、結晶欠陥の少ないi型Ge層4及びp型Si層5をエピタキシャル成長させることができる。p型Si層5の表面には、第2電極としてCr/Ag-p電極6が、n型Si層3の表面には、第1電極としてCr/Ag-n電極7が形成されている。Cr/Ag-p電極6、p型Si層5、SiGeバッファ層13及びi型Ge層4には、周期的に配列した複数の開口8が形成されている。開口8は、Cr/Ag-p電極6、p型Si層5、及びSiGeバッファ層13を貫通し、i型InGaAs層4の半ばにまで達している。ノンドープ半導体光吸収層としてi型Ge層4を用いた場合においても、 $1.3\mu\text{m}$ あるいは $1.55\mu\text{m}$ の入射光に対して本発明の半導体受光素子11は動作し、この波長帯ではSiは吸収のない透明材料となる。第2例においては、光ノンドープ半導体吸収層としてi型Ge層17を用いることにより、作製上Siプロセスと整合性が良くなるという利点がある。

[0050] 次に、本発明の第2実施形態に係る半導体受光素子について説明する。図8に、本発明の第2実施形態に係る半導体受光素子の概略断面図を示す。図1及び図2に示す第1実施形態においては、第2電極6が表面プラズモン共鳴を誘起する周期構造を有する導電層としての役割も兼ねる構造となっている(第2電極と導電層とを併せて「第2電極」と表記している)が、第2実施形態においては、第2電極24と、表面プラズモン共鳴を誘起する周期構造を有する導電層23とを別々の構成としている。

[0051] 第2電極24は、第2導電型半導体層5の一部の上に形成され、導電層23は、第2電極24が形成されていない第2導電型半導体層5上に、絶縁層22を介して形成さ

れている。すなわち、第2電極24と導電層23とは電氣的に接続されていない。絶縁層22の材料としては、例えば、 SiO_2 、 SiON 、 SiN 等が好ましい。絶縁層22の厚さは、プロセスの適合性、入射光波長、その他設計上の様々なパラメータによって適宜設定されるが、例えば、好ましくは10nm～100nm、より好ましくは50nm程度である。開口8は、導電層23、絶縁層22及び第2導電型半導体層5を貫通し、ノンドープ型半導体光吸収層4の半ばまで達している。このような第2実施形態に係る構成においても、第1実施形態と同様の表面プラズモン共鳴効果を得ることができる。

[0052] 次に、本発明の第3実施形態に係る半導体受光素子について説明する。図9に、本発明の第3実施形態に係る半導体受光素子の概略断面図を示す。第1実施形態との差異は、第3実施形態においては、基板2と第1導電型半導体層3との間にブラッグ反射多層膜32を設けている点である。それ以外の点については、半導体受光素子31は、図1及び図2に示す第1実施形態に係る半導体受光素子1と同様である。

[0053] 本発明の半導体受光素子では表面プラズモン共鳴を利用してノンドープ型半導体光吸収層に光を閉じ込めることができるが、それでもなお透過あるいは反射していく成分が存在する。本実施形態によれば、ブラッグ反射多層膜32を設けることにより、第2電極6とブラッグ反射多層膜32との間にファブリ・ペロー共振器が形成され、さらに量子効率を高めることができる(例えば90%以上の量子効率が可能になる)。

[0054] なお、ここでは、第2電極6が、周期構造を有する導電層を兼ねる第1実施形態を基に第3実施形態を説明したが、第3実施形態は、第2電極が導電層と別々の構成となる第2実施形態にも適用可能であることはいうまでもない。

[0055] 次に、本発明の第4実施形態に係る光通信デバイスとして、本発明の半導体受光素子を搭載した光通信デバイスについて説明する。図10に、第4実施形態に係る光通信デバイスの概略断面図を示す。光通信デバイス41は、光受信モジュールであり、例えば40Gbps伝送用光受信モジュールとすることができる。光通信デバイス41は、本発明の半導体受光素子42、電気配線43、プリアンプIC44、チップキャリア45、レンズ46及び光ファイバ47をモジュール筐体48内に有する。半導体受光素子41はチップキャリア45上に搭載され、光ファイバ47およびレンズ46により光結合がなされている。また、半導体受光素子41は、電気配線43により後段のプリアンプIC44との

電気接続が形成されている。本発明の半導体受光素子41は、基板側から光が照射されるように配置すると効率よく光電変換することができる。なお、第2電極又は導電層側から光が照射されるように配置することも可能である。波長 $1.55\mu\text{m}$ の近赤外光による伝送に用いる場合、本発明による半導体受光素子41には化合物半導体基板またはSiの上にGeをエピタキシャル成長させた基板を用いることができる。本実施形態において、本発明による半導体受光素子41を用いれば、受光面積を大きくすることができるので結合トランスを広くすることができるという利点がある。

[0056] 次に、本発明の第5実施形態に係る光通信デバイスとして、本発明の半導体受光素子と半導体装置との接続形態を説明する。図11に、第5実施形態に係る光通信デバイス(特に、LSIチップ間インターコネクト)の概略断面図を示す。光通信デバイス51は、半導体装置としてLSIパッケージ54と、本発明の半導体受光素子52及びVCS EL光源を搭載した半導体受光素子・光源搭載ボード55と、凹面鏡63及び光信号ファイバ61, 62を搭載したLSI搭載ボード56とを備える。光信号入力ファイバ62からの光信号は凹面鏡63により半導体受光素子52に照射される。半導体受光素子52は、半導体受光素子用電気配線層60及び半導体受光素子用電気配線層60に電氣的に接続された半導体受光素子用電気配線ビア58を介してLSIパッケージ54に光信号に対応した電流を流す。ここで、光信号の入力には光信号入力ファイバ62の代わりに平面光導波路など一般的に知られた他の手段を用いることもできる。また、凹面鏡63の代わりに凸レンズなどの集光機構を用いることもできる。また、半導体受光素子用電気配線層60に電気信号増幅のためのプリアンプを置くこともできる。

[0057] LSIパッケージ54からの電気信号は、光源・変調用電気配線ビア57から光源・変調用電気配線層59を通して、電気変調機構を備えたVCSEL(面発光レーザ)光源53により光信号に変換される。光信号は凹面鏡63で反射されて光信号出力ファイバ61に送られる。電気変調機構を備えたVCSEL光源53は、電気により光を変調する周知の他の機構、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エンダー型の変調器に置き換えることができる。

[0058] なお、第5実施形態においても、半導体受光素子に対する光照射は、基板側から、及び第2電極もしくは導電層側から行うことができるが、基板側から照射するほうが効

率よく光電変換することができる。

実施例 1

- [0059] 開口の周期 P の好適な範囲を求め、表面プラズモン共鳴を利用することで量子効率が増加することを示すために、電磁界シミュレーションを実施した。本発明の半導体受光素子のシミュレーションモデルは、図2及び図6に示すような第1実施形態に係るモデルであり、入射光の真空中の波長 λ を1550nmとし、ノドープ型半導体光吸収層の厚さを250nmと比較的薄くして、開口の形状を正方形、開口の一辺の幅(長さ) w を周期 P の半分、第2電極の面積(開口含む)に対する開口の総面積の割合を25%として、基板側から光を入射させる設定でシミュレーションを実施した。また、比較例として、図12に示すような、表面プラズモン共鳴を誘起する周期構造を有する導電層が存在しない半導体受光素子71についてもシミュレーションを実施した。なお、比較例において、第2電極(不図示)は、受光部分には存在せず、受光部分から少し離れた場所に設けられている。また、比較例における設定も基板側からの光入射である。
- [0060] 図13に、電磁界シミュレーションの結果を示す。図13は、第2導電型半導体層の屈折率を n とし、横軸に周期 P を λ/n で規格化した値をとり、縦軸に量子効率をとっている。なお、周期 P を大きくしていくとき、開口の総面積割合は一定にし、開口の一辺の長さ w を周期 P に比例させて大きくさせている。
- [0061] シミュレーション結果によれば、表面プラズモン共鳴によるピークが2つ存在し、 $0.9 < nP/\lambda < 1.1$ 又は $1.2 < nP/\lambda < 1.5$ の条件を満たすときに量子効率において顕著な効果が得られ、比較例と比較して3倍程度の量子効率が可能になることが分かる。また、共鳴ピーク以外の部分においても比較例よりも高い効率が得られている。これは、基板側から光を入射した場合、波長以下の大きさの開口を光がほとんど透過しないため、第2電極がミラーとしての役割も同時に果たしているためである。
- [0062] 本発明は、上記実施形態を基に説明したが、上記実施形態に限定されることなく、本発明の範囲内において種々の変更、変形、改良等を含むことはいうまでもない。また、本発明の範囲内において、開示した要素の多様な組み合わせ、置換ないし選択が可能である。

[0063] 本発明のさらなる課題・目的及び展開形態は、特許請求の範囲を含む本発明の全開示事項からも明らかにされる。

請求の範囲

- [1] 基板と、
 前記基板上に形成されている第1導電型半導体層と、
 前記第1導電型半導体層上に形成されているノンドープ型半導体光吸収層と、
 前記ノンドープ型半導体光吸収層上に形成されている第2導電型半導体層と、
 前記第2導電型半導体層上に形成されている導電層と、を備え、
 前記導電層、前記第2導電型半導体層及び前記ノンドープ型半導体光吸収層からなる積層体には、周期的に配列された複数の開口が形成され、
 前記開口の幅は、入射光の波長以下であり、
 前記開口は、前記導電層及び前記第2導電型半導体層を貫通し、前記ノンドープ型半導体光吸収層に達することを特徴とする半導体受光素子。
- [2] 前記複数の開口は、前記導電層と前記第2導電型半導体層との界面における表面プラズモン共鳴を生じさせるような周期的配列を有することを特徴とする請求項1に記載の半導体受光素子。
- [3] 前記開口の深さを d 、前記導電層の厚さを t_1 、前記第2導電型半導体層の厚さを t_2 、前記ノンドープ型半導体光吸収層の厚さを t_3 としたとき、前記開口の深さ d は、

$$t_1 + t_2 \leq d \leq t_1 + t_2 + t_3 / 2$$
 の条件を満たすことを特徴とする請求項1又は2に記載の半導体受光素子。
- [4] 前記第1導電型半導体上に形成されると共に、前記第1導電型半導体層と電氣的に接続されている第1電極をさらに備え、
 前記導電層は、前記第2導電型半導体層と電氣的に接続され、第2電極としても機能することを特徴とする請求項1～3のいずれか一項に記載の半導体受光素子。
- [5] 前記第1導電型半導体上に形成されると共に、前記第1導電型半導体層と電氣的に接続されている第1電極と、
 前記第2導電型半導体上に形成されると共に、前記第2導電型半導体層と電氣的に接続されている第2電極と、をさらに備え、
 前記導電層は、前記第2電極が形成されていない領域に、絶縁層を介して第2導電型半導体層上に形成されており、

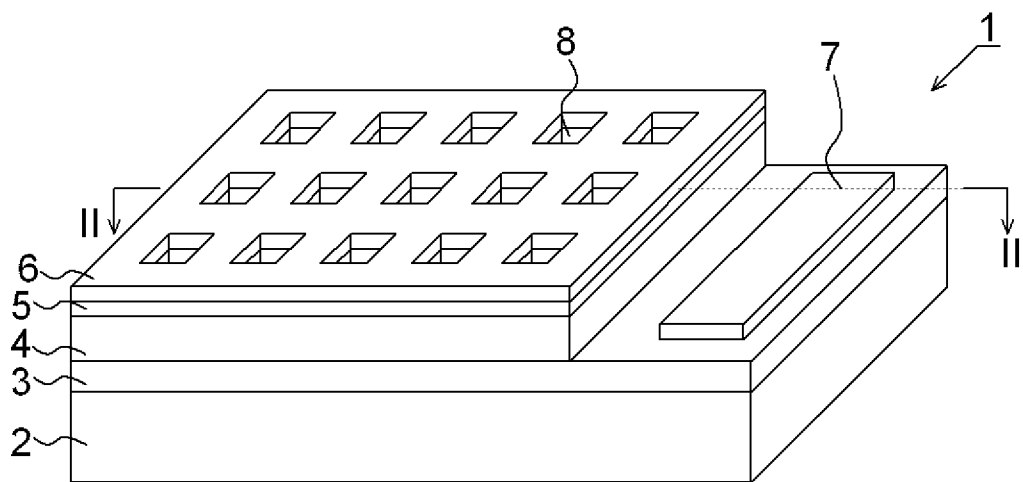
前記導電層と前記第2電極とは電氣的に接続されていないことを特徴とする請求項1～3のいずれか一項に記載の半導体受光素子。

- [6] 前記第1導電型半導体層が形成されている面とは反対側の前記基板面の少なくとも一部は、レンズ状に形成されていることを特徴とする請求項1～5のいずれか一項に記載の半導体受光素子。
- [7] 前記複数の開口は、三角格子状または正方格子状に周期的に配列され、
前記開口の表面形状は、円形、楕円形又は多角形であることを特徴とする請求項1～6のいずれか一項に記載の半導体受光素子。
- [8] 前記導電層の上面の面積(前記開口の面積含む)に対する前記複数の開口の総面積の割合は、50%以上80%以下であることを特徴とする請求項1～7のいずれか一項に記載の半導体受光素子。
- [9] 入射光の波長を λ 、前記第2導電型半導体層の屈折率を n 、隣接する前記開口の中心間距離である前記開口の周期を P としたとき、 nP/λ は、
 $0.9 < nP/\lambda < 1.1$ 、又は $1.2 < nP/\lambda < 1.5$ の条件を満たすことを特徴とする請求項1～8のいずれか一項に記載の半導体受光素子。
- [10] 前記第1導電型半導体層の下層にブラッグ反射多層膜をさらに備えることを特徴とする請求項1～9のいずれか一項に記載の半導体受光素子。
- [11] 前記導電層が、Al、Ag、Au、及びCuのうちの少なくとも1つの金属材料を含むことを特徴とする請求項1～10のいずれか一項に記載の半導体受光素子。
- [12] 前記ホドープ型半導体光吸収層は、 Si 、 $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$ (但し、 x は1未満の正数)、 Ge 、 GaN 、 GaAs 、 GaInAs 、 GaInP 、及び InP の群の中から選ばれる少なくとも1つで形成されていることを特徴とする請求項1～11のいずれか一項に記載の半導体受光素子。
- [13] 前記導電体層上に、反射防止膜又は保護膜をさらに備えることを特徴とする請求項1～12のいずれか一項に記載の半導体受光素子。
- [14] 半導体受光素子を備える光通信デバイスであって、
前記半導体受光素子は、基板と、
前記基板上に形成されている第1導電型半導体層と、

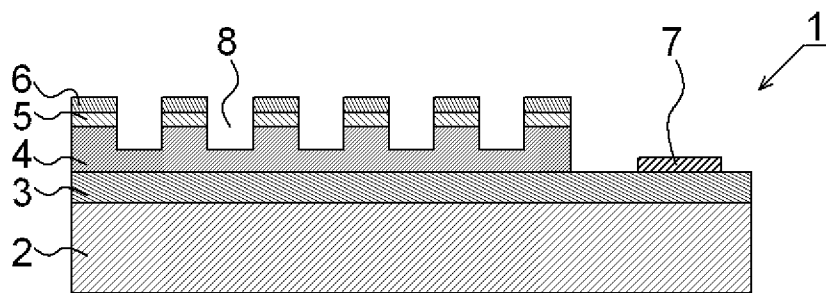
前記第1導電型半導体層上に形成されているノンドープ型半導体光吸収層と、
前記ノンドープ型半導体光吸収層上に形成されている第2導電型半導体層と、
前記第2導電型半導体層上に形成されている導電層と、を備え、
前記導電層、前記第2導電型半導体層及び前記ノンドープ型半導体光吸収層から
なる積層体には、周期的に配列された複数の開口が形成され、
前記開口の幅は、入射光の波長以下であり、
前記開口は、前記導電層及び前記第2導電型半導体層を貫通し、前記ノンドープ
型半導体光吸収層に達することを特徴とする光通信デバイス。

- [15] 前記半導体受光素子は、前記基板側から光が入射するように配置されていることを
特徴とする請求項14に記載の光通信デバイス。

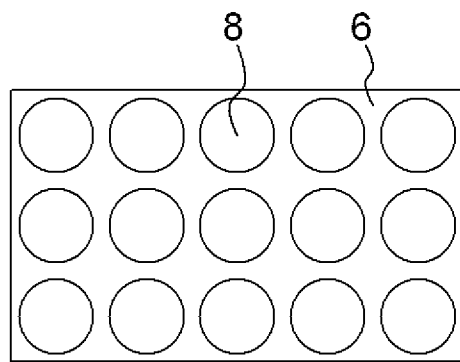
[図1]



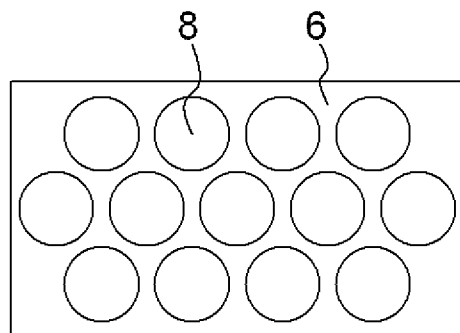
[図2]



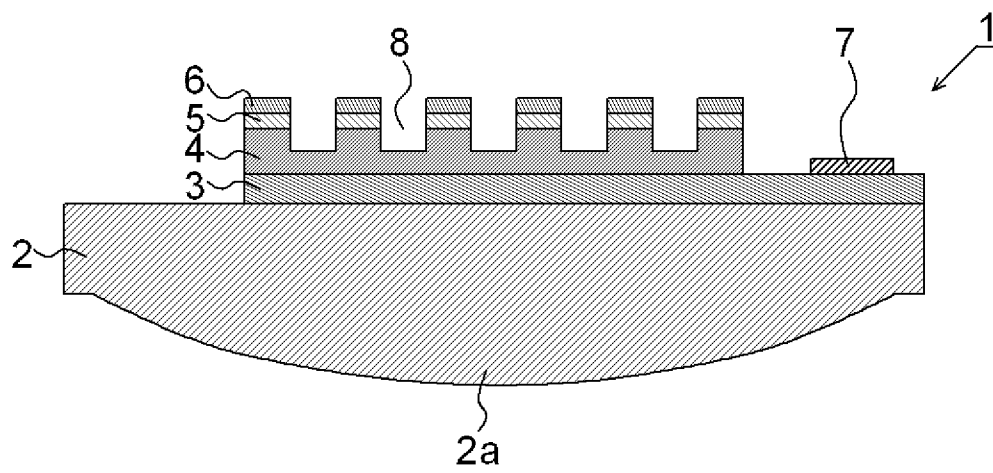
[図3]



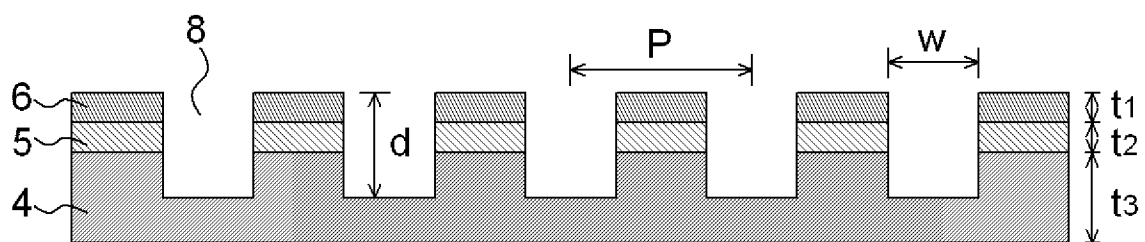
[図4]



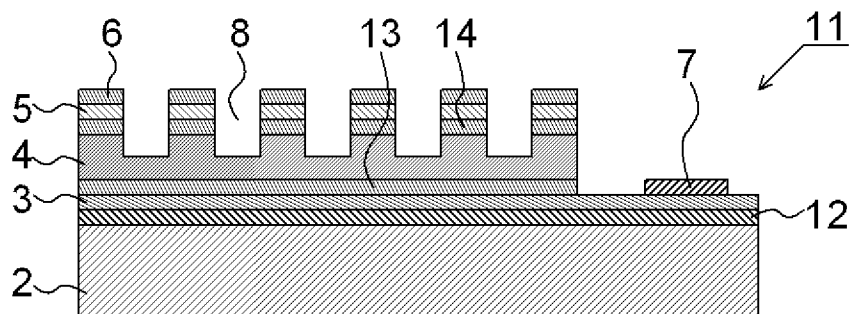
[図5]



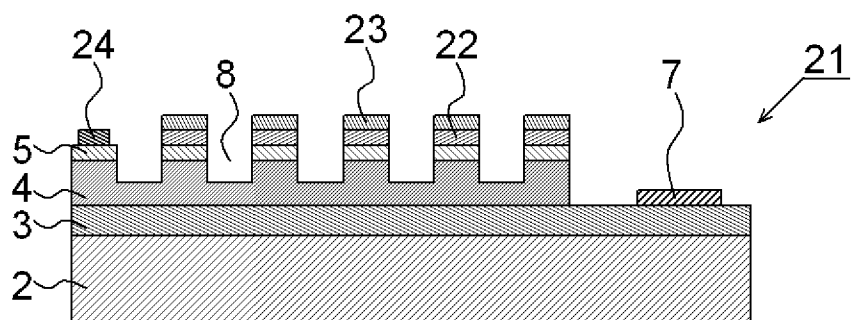
[図6]



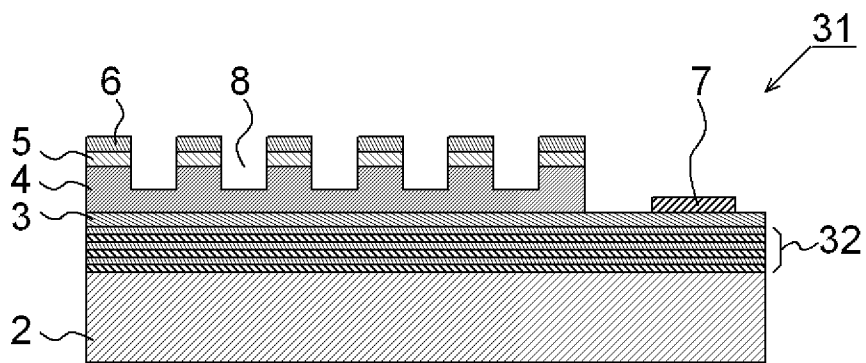
[図7]



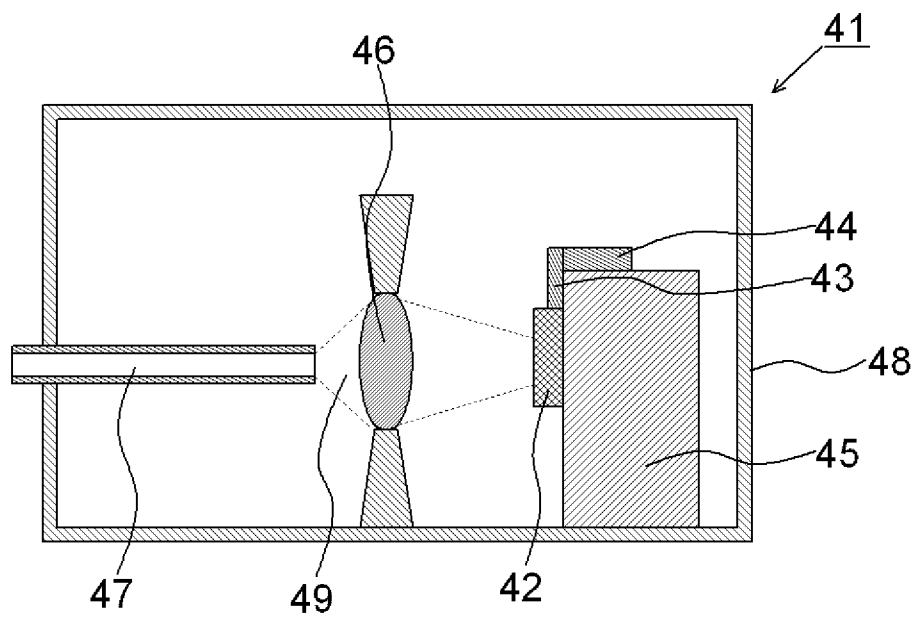
[図8]



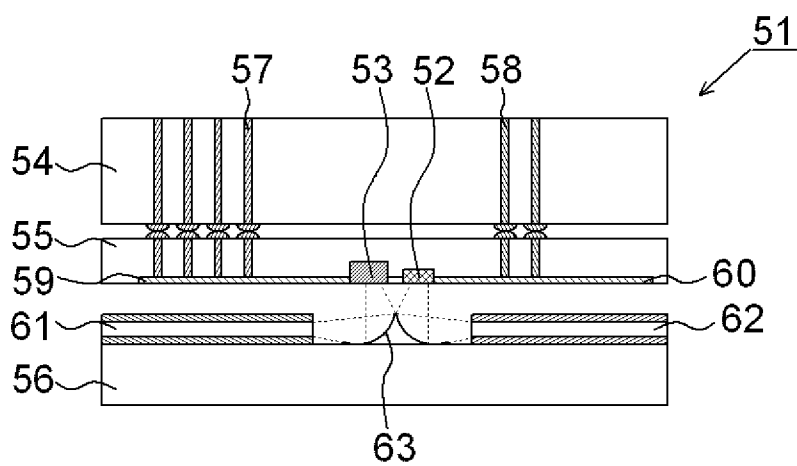
[図9]



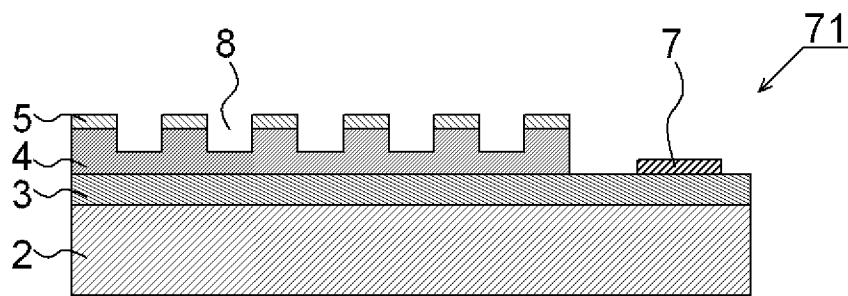
[図10]



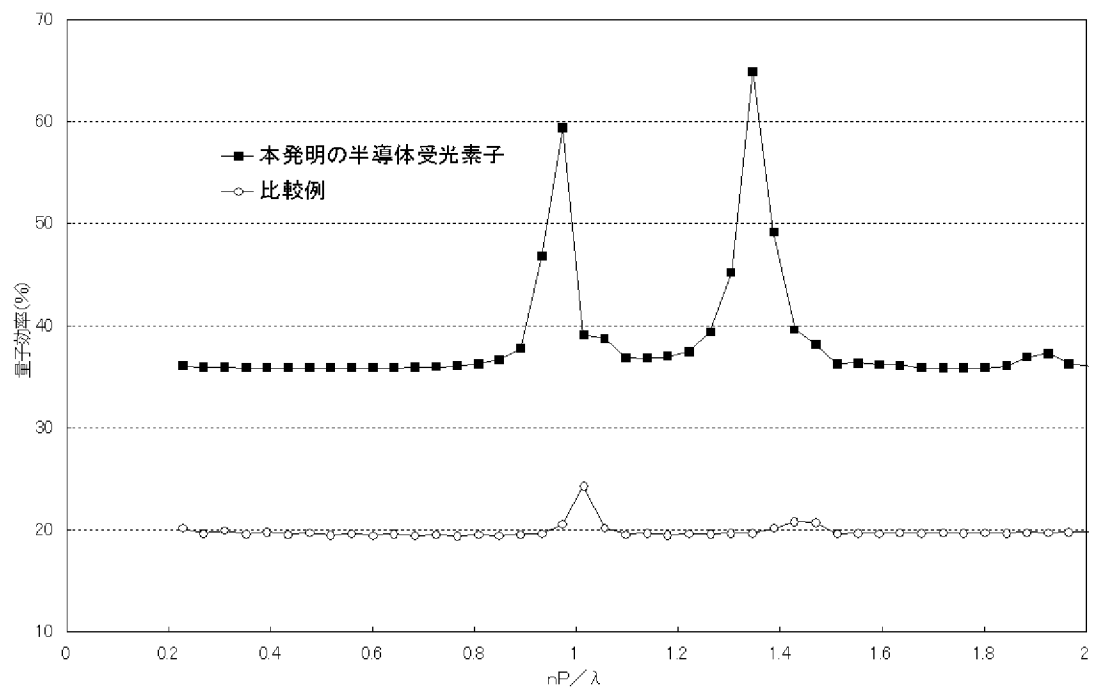
[図11]



[図12]



[図13]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2009/050203

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01L31/105 (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)

H01L31/00-31/20

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	1996-2009
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2009	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2009

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.
A	JP 2007-165359 A (NEC Corp.), 28 June, 2007 (28.06.07), (Family: none)	1-15
A	JP 2005-159002 A (Seiko Epson Corp.), 16 June, 2005 (16.06.05), (Family: none)	1-15
A	WO 2007/105593 A1 (NEC Corp.), 20 September, 2007 (20.09.07), & EP 1995793 A	1-15
A	JP 2007-303927 A (Hamamatsu Photonics Kabushiki Kaisha), 22 November, 2007 (22.11.07), & US 2007/0262239 A1 & CN 101071077 A	1-15

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"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
27 March, 2009 (27.03.09)

Date of mailing of the international search report
14 April, 2009 (14.04.09)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2009/050203

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
E, A	JP 2009-38352 A (Canon Inc.), 19 February, 2009 (19.02.09), (Family: none)	1-15

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (I P C))

Int.Cl. H01L31/105(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 (I P C))

Int.Cl. H01L31/00-31/20

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	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 0 9 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 0 9 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 0 9 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 請求の範囲の番号
A	JP 2007-165359 A (日本電気) 2007.06.28, (ファミリーなし)	1 - 1 5
A	JP 2005-159002 A (セイコーエプソン) 2005.06.16, (ファミリーなし)	1 - 1 5
A	WO 2007/105593 A1 (日本電気) 2007.09.20, & EP 1995793 A	1 - 1 5
A	JP 2007-303927 A (浜松ホトニクス) 2007.11.22, & US 2007/0262239 A1 & CN 101071077 A	1 - 1 5

☒ 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

2 7 . 0 3 . 2 0 0 9

国際調査報告の発送日

1 4 . 0 4 . 2 0 0 9

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (I S A / J P)

郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5

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

2 K

9 2 0 7

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 2 5 5

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 請求の範囲の番号
E A	JP 2009-38352 A (キヤノン) 2009.02.19, (ファミリーなし)	1 - 1 5