

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6918631号
(P6918631)

(45) 発行日 令和3年8月11日(2021.8.11)

(24) 登録日 令和3年7月27日(2021.7.27)

(51) Int.Cl. F I
 H O 1 L 31/108 (2006.01) H O 1 L 31/10 C
 B 8 2 Y 20/00 (2011.01) B 8 2 Y 20/00

請求項の数 11 (全 14 頁)

| | | | |
|-----------|------------------------------|-----------|-------------------------------------|
| (21) 出願番号 | 特願2017-158033 (P2017-158033) | (73) 特許権者 | 000236436 |
| (22) 出願日 | 平成29年8月18日 (2017.8.18) | | 浜松ホトニクス株式会社 |
| (65) 公開番号 | 特開2019-36663 (P2019-36663A) | | 静岡県浜松市東区市野町1126番地の1 |
| (43) 公開日 | 平成31年3月7日 (2019.3.7) | (74) 代理人 | 100088155 |
| 審査請求日 | 令和2年3月25日 (2020.3.25) | | 弁理士 長谷川 芳樹 |
| | | (74) 代理人 | 100113435 |
| | | | 弁理士 黒木 義樹 |
| | | (74) 代理人 | 100140442 |
| | | | 弁理士 柴山 健一 |
| | | (74) 代理人 | 100148013 |
| | | | 弁理士 中山 浩光 |
| | | (72) 発明者 | 藤原 弘康 |
| | | | 静岡県浜松市東区市野町1126番地の1 浜松ホトニクス株式会社内 |

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光検出素子

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

半導体層の一方面に光の入射面を有する光検出素子であって、
 前記半導体層の他方面に設けられ、前記入射面から入射した前記光に対する縦共振器及び横共振器を構成する凸部及び凹部を有し、前記光を表面プラズモンに変換する周期的ナノ凹凸構造と、
 前記周期的ナノ凹凸構造を覆うように設けられた金属膜と、を備え、
 前記周期的ナノ凹凸構造における凸部の高さ及び配列ピッチは、前記縦共振器の共振波長と前記横共振器の共振波長とが揃うように設定され、
 前記金属膜の厚さは、20nm以上となっており、
 前記周期的ナノ凹凸構造で発生する前記表面プラズモンの波長を ρ とした場合に、前記凸部の高さ T が $3/8 \rho < T < 5/8 \rho$ を満たし、前記凸部の配列ピッチ P が $9/10 \rho < P < 11/10 \rho$ を満たす光検出素子。

【請求項2】

半導体層の一方面に光の入射面を有する光検出素子であって、
 前記半導体層の他方面に設けられ、前記入射面から入射した前記光に対する縦共振器及び横共振器を構成する凸部及び凹部を有し、前記光を表面プラズモンに変換する周期的ナノ凹凸構造と、
 前記周期的ナノ凹凸構造を覆うように設けられた金属膜と、を備え、
 前記周期的ナノ凹凸構造における凸部の高さ及び配列ピッチは、前記縦共振器の共振波

長と前記横共振器の共振波長とが揃うように設定され、

前記金属膜の厚さは、20 nm以上となっており、

前記金属膜は、前記半導体層に接する第1の膜と、当該第1の膜よりも屈折率が小さい第2の膜とを含む複数層の膜によって構成されている光検出素子。

【請求項3】

前記周期的ナノ凹凸構造で発生する前記表面プラズモンの波長を λ_p とした場合に、前記凸部の高さ T が $3/8 \lambda_p < T < 5/8 \lambda_p$ を満たし、前記凸部の配列ピッチ P が $9/10 \lambda_p < P < 11/10 \lambda_p$ を満たす請求項2記載の光検出素子。

【請求項4】

前記周期的ナノ凹凸構造で発生する前記表面プラズモンの波長を λ_p とした場合に、前記凹部の幅 D が $50 \text{ nm} < D < \lambda_p - 50 \text{ nm}$ を満たす請求項1～3のいずれか一項記載の光検出素子。

【請求項5】

前記半導体層は、シリコンによって構成されている請求項1～4のいずれか一項記載の光検出素子。

【請求項6】

前記金属膜は、アルミニウムを含んで構成されている請求項1～5のいずれか一項記載の光検出素子。

【請求項7】

前記周期的ナノ凹凸構造における前記凹部は、平面視でマトリクス状の配置パターンを有している請求項1～6のいずれか一項記載の光検出素子。

【請求項8】

前記凹部の横断面形状は、円形状又は矩形状となっている請求項7記載の光検出素子。

【請求項9】

前記周期的ナノ凹凸構造における前記凹部は、平面視でストライプ状の配置パターンを有している請求項1～6のいずれか一項記載の光検出素子。

【請求項10】

前記周期的ナノ凹凸構造における前記凹部は、平面視で同心円状の配置パターンを有している請求項1～6のいずれか一項記載の光検出素子。

【請求項11】

前記周期的ナノ凹凸構造における前記凹部は、平面視で同心多角形状の配置パターンを有している請求項1～6のいずれか一項記載の光検出素子。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光検出素子に関する。

【背景技術】

【0002】

光検出の分野では、近赤外光の検出を安価に実施できる技術の需要が高まってきている。近赤外光の検出は、例えば自動車の自動運転技術への応用などが期待されている。近赤外光の検出が可能な従来の光検出素子としては、例えばII族～VI族の元素を含む化合物半導体を用いた光検出素子が挙げられるが、化合物半導体を用いた光検出素子は製造工程が複雑で高価であった。また、一般的なpn接合型の光検出素子では、シリコンのバンドギャップよりも長い波長(1100 nm以上)の光の検出が困難であり、ブラックシリコンを用いた光検出素子であっても長波長側の検出限界は1200 nm程度であった。

【0003】

一方、ショットキー接合を用いたショットキー型の光検出素子では、金属膜の内部での光吸収により自由電子が励起され、生成された励起電子(ホットキャリア)がショットキー障壁を超えて半導体側に光電流として流れる。長波長側の検出限界は、ショットキー障壁の高さによって決まるため、シリコンのバンドギャップよりも長い波長の光の検出が可

10

20

30

40

50

能となっている。このようなショットキー型の光検出素子としては、例えば特許文献1～4に記載の光検出素子がある。これらの従来の光検出素子は、半導体層の表面に当該半導体層とショットキー接合する金属膜を設け、半導体層の裏面を光の入射面とする裏面入射型の光検出素子として構成されている。半導体層の表面には、周期的な凹凸構造が設けられており、入射光に対する金属膜の表面積を拡大することで感度の向上が図られている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特許第4789752号公報

10

【特許文献2】特開2000-164918号公報

【特許文献3】特開2011-77274号公報

【特許文献4】特許第2659184号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

上述したショットキー接合型の光検出素子の感度（光電流量）は、ホットキャリアの生成数、ホットキャリアがショットキー障壁に到達する確率、及びホットキャリアがショットキー障壁を超える確率の積で表される。ホットキャリアの生成数は、金属膜での光吸収量に依存するため、光検出素子の感度向上には、光吸収量を向上させることが有効となる。

20

【0006】

しかしながら、上述した従来の光検出素子では、金属膜で発生したホットキャリアを半導体層から取り出すことを前提としている。このため、例えば上記特許文献2では、金属膜の厚さは、金属膜で生成されたホットキャリアの平均自由行程以下（数nm以下）となっており、金属膜での光吸収量が十分に得られるとは考えにくい。また、例えば特許文献4のように金属膜の背後に反射膜を設けた場合、断線や高抵抗化のリスクがある。

【0007】

本発明は、上記課題の解決のためになされたものであり、安価で近赤外光を十分な感度で検出できる光検出素子を提供することを目的とする。

30

【課題を解決するための手段】

【0008】

出願人は、光検出素子の研究を重ねる過程で、金属膜のうち、半導体層との界面からどの程度の距離までの部分が入射した光の吸収に寄与しているかに着目をした。そして、光を表面プラズモンに変換する周期的ナノ凹凸構造を有する光検出素子を試作し、半導体層の界面からの距離に対する金属膜での光の有効吸収量の実測値及び計算値を求めた。その結果、周期的ナノ凹凸構造を構成する凹凸パターンが一定の条件を満たす場合に、半導体層との界面から所定の距離以内となる範囲で金属膜の光吸収が高まるという知見が得られた。

【0009】

40

本発明の一側面に係る光検出素子は、半導体層の一方面に光の入射面を有する光検出素子であって、半導体層の他方面に設けられ、入射面から入射した光に対する縦共振器及び横共振器を構成する凸部及び凹部を有し、光を表面プラズモンに変換する周期的ナノ凹凸構造と、周期的ナノ凹凸構造を覆うように設けられた金属膜と、を備え、周期的ナノ凹凸構造における凸部の高さ及び配列ピッチは、縦共振器の共振波長と横共振器の共振波長とが揃うように設定され、金属膜の厚さは、20nm以上となっている。

【0010】

この光検出素子では、半導体層の裏面に入射面が設けられており、入射面から入射した光は、半導体層の表面の周期的ナノ凹凸構造において凹凸の高さ方向に形成される縦共振器と凹凸の配列方向に形成される横共振器とによって閉じ込められる。ここで、縦共振器

50

の共振波長と横共振器の共振波長とが揃う場合、半導体層の界面から20nm以内となる範囲で金属膜の光吸収が高まることが上記知見より得られている。したがって、縦共振器の共振波長と横共振器の共振波長とが揃うように周期的ナノ凹凸構造における凸部の高さ及び配列ピッチを設定し、かつ金属膜の厚さを20nm以上とすることで、金属膜での効率的な光吸収が可能となり、安価で近赤外光を十分な感度で検出できる光検出素子が得られる。

【0011】

また、周期的ナノ凹凸構造で発生する表面プラズモンの波長を λ_p とした場合に、凸部の高さ T が $3/8 \lambda_p < T < 5/8 \lambda_p$ を満たし、凸部の配列ピッチ P が $9/10 \lambda_p < P < 11/10 \lambda_p$ を満たしていてもよい。このような条件下においては、半導体層の界面から20nm以内となる範囲で金属膜の光吸収が十分に高められる。

10

【0012】

また、周期的ナノ凹凸構造で発生する表面プラズモンの波長を λ_p とした場合に、凹部の幅 D が $50\text{nm} < D < \lambda_p - 50\text{nm}$ を満たしていてもよい。このような条件下においては、半導体層の界面から20nm以内となる範囲で金属膜の光吸収が十分に高められる。

【0013】

また、半導体層は、シリコンによって構成されていてもよい。これにより、光検出素子を一層安価に製造できる。

【0014】

また、金属膜は、アルミニウムを含んで構成されていてもよい。この場合、金属膜の製造プロセスが容易なものとなる。

20

【0015】

また、金属膜は、半導体層に接する第1の膜と、当該第1の膜よりも屈折率が小さい第2の膜とを含む複数層の膜によって構成されていてもよい。この場合、金属膜において半導体層との界面付近に光を閉じ込めることが可能となり、光吸収量を一層向上できる。

【0016】

また、周期的ナノ凹凸構造における凹部は、平面視でマトリクス状の配置パターンを有していてもよい。マトリクス状の配置パターンを採用する場合、いずれの偏光方向の光も等しく表面プラズモンに変換される。したがって、偏光方向に依存しない光検出が可能となる。

30

【0017】

また、凹部の横断面形状は、円形状又は矩形状となってもよい。凹部の横断面形状として円形状を採用する場合、周期的ナノ凹凸構造の周期性を光が感ずる面積が狭くなるために、広い波長範囲において表面プラズモンに変換される。したがって、広い波長範囲について光検出が可能となる。凹部の横断面形状として矩形状を採用する場合、周期的ナノ凹凸構造の周期性を光が感ずる面積が広がるために、特定の波長において強い表面プラズモンに変換される。したがって、特定の波長について高感度の光検出が可能となる。

【0018】

また、周期的ナノ凹凸構造における凹部は、平面視でストライプ状の配置パターンを有していてもよい。ストライプ状の配置パターンを採用する場合、ストライプ状の配置パターンに対して電場ベクトルが直交する光のみが周期的ナノ凹凸構造において強い表面プラズモンに変換される。したがって、一つの偏光方向について高感度な光検出が可能となる。

40

【0019】

また、周期的ナノ凹凸構造における凹部は、平面視で同心円状の配置パターンを有していてもよい。同心円状の配置パターンを採用する場合、いずれの偏光方向の光も等しく表面プラズモンに変換される。したがって、偏光方向に依存しない光検出が可能となる。

【0020】

また、周期的ナノ凹凸構造における凹部は、平面視で同心多角形状の配置パターンを有

50

していてもよい。同心多角形状の配置パターンを採用する場合、同心多角形状の配置パターンの各辺に対して電場ベクトルが直交する光のみが周期的ナノ凹凸構造において強い表面プラズモンに変換される。したがって、二つの偏光方向について高感度な光検出が可能となる。

【発明の効果】

【0021】

本発明によれば、安価で近赤外光を十分な感度で検出できる。

【図面の簡単な説明】

【0022】

【図1】光検出素子の一実施形態を示す断面図である。

10

【図2】図1に示した光検出素子における周期的ナノ凹凸構造の近傍の構成を示す要部拡大断面図である。

【図3】周期的ナノ凹凸構造における凹部の配置パターンを示す平面図である。

【図4】半導体層の界面からの距離と感度及び有効吸収量の比との関係を示す図である。

【図5】周期的ナノ凹凸構造における凸部の高さとの関係を示す図である。

【図6】周期的ナノ凹凸構造における凸部の配列ピッチと金属膜における光吸収量との関係を示す図である。

【図7】周期的ナノ凹凸構造における凹部の幅と金属膜における光吸収量との関係を示す図である。

20

【図8】本実施形態に係る光検出素子の感度と比較例に係る光検出素子の感度とを示す図である。

【図9】周期的ナノ凹凸構造における凹部の配置パターンの変形例を示す平面図である。

【図10】周期的ナノ凹凸構造における凹部の配置パターンの別の変形例を示す平面図である。

【図11】周期的ナノ凹凸構造における凹部の配置パターンの更に別の変形例を示す平面図である。

【発明を実施するための形態】

【0023】

以下、図面を参照しながら、本発明の一側面に係る光検出素子の好適な実施形態について詳細に説明する。

30

【0024】

図1は、光検出素子の一実施形態を示す断面図である。この光検出素子1は、例えば波長1200nm以上の近赤外光の検出に用いられるショットキー接合型の光検出素子として構成されている。光検出素子1は、同図に示すように、光検出素子1は、半導体層2と、絶縁膜3と、オーミック電極4と、ショットキー電極5とを備えている。

【0025】

半導体層2は、例えばシリコン(Si)、酸化チタン(TiO₂)、ゲルマニウム(Ge)、リン化ガリウム(GaP)などによって形成される半導体層である。本実施形態では、より安価な製造プロセスの実現のため、n型若しくはp型のシリコンによる半導体層2を例示する。光検出素子1は、裏面入射型の光検出素子であり、半導体層2の裏面(一方)2bが光検出素子1で検出する光Lの入射面Fとなっている。

40

【0026】

絶縁膜3は、例えば二酸化ケイ素(SiO₂)によって半導体層2の表面(他方面)2aに形成されている。絶縁膜3の厚さは、例えば100nm程度となっている。絶縁膜3には、オーミック電極4と半導体層2とのオーミック接合を実現するための開口部3aと、ショットキー電極5と半導体層2とのショットキー接合を実現するための開口部3bとが設けられている。絶縁膜3は、例えば化学気相成長法などを用いて形成される。開口部3a, 3bの形成には、例えばフォトリソグラフィが用いられる。

【0027】

50

オーミック電極 4 は、例えば金 (Au)、ゲルマニウム (Ge)、インジウム (In)、Ni (ニッケル)、Pt (白金) 等を含む材料によって形成されている。オーミック電極 4 は、半導体層 2 の表面 2 a において絶縁膜 3 の開口部 3 a を覆うように設けられ、開口部 3 a の底面において半導体層 2 とオーミック接合している。ショットキー電極 5 は、例えば金 (Au)、銀 (Ag)、チタン (Ti)、アルミニウム (Al)、銅 (Cu)、プラチナ (Pt) 等を含む材料によって形成されている。ショットキー電極 5 は、半導体層 2 の表面において絶縁膜 3 の開口部 3 b を覆うように設けられ、開口部 3 b の底面において半導体層 2 とショットキー接合している。オーミック電極 4 及びショットキー電極 5 は、例えば真空蒸着法などを用いて形成される。半導体層 2 の導電型が n 型の場合、光検出素子 1 の動作時には、ショットキー電極 5 側の電位がオーミック電極 4 側の電位に比べて低くなるようにバイアス電圧が印加される。半導体層 2 の導電型が p 型の場合、光検出素子 1 の動作時には、ショットキー電極 5 側の電位がオーミック電極 4 側の電位に比べて高くなるようにバイアス電圧が印加される。いずれの場合もバイアス電圧をゼロとする場合もある。

10

【0028】

また、半導体層 2 の表面 2 a において、絶縁膜 3 の開口部 3 b に対応する位置には、入射面 F から入射した光 L を表面プラズモンに変換する周期的ナノ凹凸構造 1 1 が設けられている。図 2 は、周期的ナノ凹凸構造の近傍 (図 1 における破線部分) の構成を示す要部拡大断面図である。また、図 3 は、周期的ナノ凹凸構造における凹部の配置パターンを示す平面図である。図 2 及び図 3 に示すように、周期的ナノ凹凸構造 1 1 は、例えば入射面 F から入射する光 L のスポットサイズと同等以上の領域にナノオーダーで形成された凹部 1 2 及び凸部 1 3 を有している。凹部 1 2 及び凸部 1 3 による凹凸パターンは、例えば電子ビーム露光法、ナノインプリントによるリソグラフィと反応性イオンエッチング若しくはリフトオフとを組み合わせた方法、集束イオンビームを用いた直接加工法などによって形成される。

20

【0029】

本実施形態では、周期的ナノ凹凸構造 1 1 を構成する凹部 1 2 は、図 3 に示すように、平面視でマトリクス状の配置パターンを有している。同図の例では、凹部 1 2 の行方向の配列ピッチと列方向の配列ピッチとが一致した状態となっている。また、凹部 1 2 は、円柱状をなしており、凹部 1 2 の横断面形状は円形状、凹部 1 2 の縦断面形状は長方形 (図 2 参照) となっている。このような配置パターンにより、図 2 に示すように、周期的ナノ凹凸構造 1 1 は、入射面 F から入射した光 L に対する縦共振器 C 1 及び横共振器 C 2 を構成している。縦共振器 C 1 は、凹凸の高さ方向に形成される共振器であり、凸部 1 3 の底面と凸部 1 3 の頂面とによって構成されている。また、横共振器 C 2 は、凹凸の配列方向に形成される共振器であり、凹部 1 2 の内壁面と隣り合う凹部 1 2 の内壁面との同じ位置同士によって構成されている。

30

【0030】

ショットキー電極 5 を構成する金属膜 1 4 は、図 2 に示すように、周期的ナノ凹凸構造 1 1 を覆うように形成されている。すなわち、金属膜 1 4 は、周期的ナノ凹凸構造 1 1 における凸部 1 3 の頂面、凹部 1 2 の底面、及び凹部 1 2 の内壁面を覆うように設けられている。金属膜 1 4 は、本実施形態のように半導体層 2 をシリコンで形成する場合には、シリコンプロセスによる製造容易性を考慮し、アルミニウム (Al) による単層膜とすることが好適である。

40

【0031】

また、金属膜 1 4 は、多層膜であってもよい。この場合、金属膜 1 4 は、半導体層 2 に接する第 1 の膜と、当該第 1 の膜よりも屈折率が小さい第 2 の膜とを含む複数層の膜によって構成されていてもよい。第 1 の膜と第 2 の膜との材料の組み合わせは、例えばチタン (Ti) / 金 (Au)、チタン (Ti) / Ag (銀)、Al (アルミニウム) / Au (金)、Ti (チタン) / Al (アルミニウム) などが挙げられる。

【0032】

50

周期的ナノ凹凸構造 11 において、半導体層 2 と金属膜 14 とはショットキー接合されている。半導体層 2 のうちショットキー接合面の近傍には、金属膜 14 とのショットキー接合に伴って空乏層が形成されている。入射面 F から入射した光 L は、縦共振器 C1 及び横共振器 C2 に閉じ込められ、金属膜 14 の表面を伝搬する伝搬型の表面プラズモンに変換される。光 L の振動と表面プラズモンとが共鳴することにより、金属膜 14 に光 L のエネルギーが吸収される。そして、金属膜 14 の内部での光吸収により自由電子が励起され、生成されたホットキャリアがショットキー障壁を超えて半導体層 2 側に光電流として流れる。

【0033】

本実施形態では、金属膜 14 での光吸収の効率を向上させるため、金属膜 14 の厚さは、20 nm 以上となっている。また、縦共振器 C1 の共振波長と横共振器 C2 の共振波長とが揃うように、周期的ナノ凹凸構造 11 における凸部 13 の高さ (= 凹部 12 の深さ) T、凸部 13 の配列ピッチ P、及び凹部の幅 D が設定されている。より具体的には、周期的ナノ凹凸構造 11 で発生する表面プラズモンの波長を λ_p とした場合に、凸部 13 の高さ T は $3/8 \lambda_p < T < 5/8 \lambda_p$ を満たし、凸部 13 の配列ピッチ P は $9/10 \lambda_p < P < 11/10 \lambda_p$ を満たしている。また、凹部 12 の幅 (ここでは凹部 12 の直径) D は、 $50 \text{ nm} < D < \lambda_p - 50 \text{ nm}$ を満たしている。以下、この構成について詳細に説明する。

【0034】

ショットキー接合型の光検出素子の感度 (光電流量) は、ホットキャリアの生成数、ホットキャリアがショットキー障壁に到達する確率、及びホットキャリアがショットキー障壁を超える確率の積で表される。ホットキャリアの生成数は、金属膜での光吸収量に依存するため、光検出素子の感度向上には、金属膜での光吸収量を向上させることが有効となる。

【0035】

励起電子の生成位置からの輸送確率 (距離 r を進む確率) は、 $\exp(-r/L)$ で表される。L は、金属膜の内部での平均自由行程であり、およそ 30 nm である。励起電子の生成位置から半導体層の界面までの最短距離を z とすると、距離 z は、励起電子の生成位置から半導体層の界面までを結ぶ垂線の距離となる。したがって、励起電子の進行方向と垂線との成す角度を θ とすると、励起電子の輸送確率は、 $\exp(-r/L \cos \theta)$ となる。電極膜の内部における励起電子の生成位置での光吸収量と輸送確率とを乗算し、更に電極膜の内部全体にわたって体積積分した積算値 (以下、当該積算値を「有効吸収量」と称す) は、ショットキー接合型の光検出素子の感度に比例した値となる。

【0036】

有効吸収量を用いた金属膜での光吸収量の評価のため、ショットキー電極として周期的なスリット構造を備えた光検出素子のサンプルを作製した。この評価用の光検出素子は、シリコン (Si) による半導体層上に厚さ 370 nm のショットキー電極を形成し、集束イオンビーム装置によってショットキー電極に幅 100 nm、周期 850 nm でスリットを形成したものである。スリットは、貫通スリットであり、半導体層の表面が露出するように形成した。

【0037】

サンプルは、ショットキー電極を構成する金属膜を金 (Au) による単層で構成したものと、半導体層側からチタン (Ti) / 金 (Au) の二層で構成したものの 2 種類を作製した。後者では、チタン (Ti) 層の厚さは、2 nm とした。これらの 2 種類のサンプルについて感度比を実験にて求めたところ、約 0.54 であった。両サンプルの感度の差異は、電極構成膜の差によって金属膜の内部での光の空間分布及び光吸収の空間分布が異なり、有効吸収量に差が生じたことに起因すると考えられる。したがって、両サンプルの感度比は、両サンプルの有効吸収量の比と同等であると結論付けられる。

【0038】

図 4 は、半導体層の界面からの距離と感度及び有効吸収量の比との関係を示す図である

10

20

30

40

50

。同図では、横軸に半導体層の界面からの距離 h_{eff} を示し、縦軸に感度比及び有効吸収量の比を示している。図4におけるプロットは、上記2種類のサンプルについての半導体層の界面から距離 h_{eff} までの有効吸収量の比をシミュレーションによって求めたものである。この結果から、距離 h_{eff} が増加すると共に有効吸収量の比は増加し、距離 h_{eff} が 20 nm 以上となると、有効吸収量の比が一定となることが分かる。また、距離 h_{eff} が 20 nm 以上の場合の有効吸収量の比は、およそ 0.54 であり、実験によって求めた感度比（図4における点線で示す値）と略一致している。

【0039】

この結果から、金属膜の厚さが 20 nm に満たない場合には、有効吸収量が不足し、光検出素子の感度が十分に得られないことが分かる。また、金属膜の厚さが 20 nm 以上である場合には、有効吸収量が最大化され、光検出素子の感度を向上できることが分かる。このことは、ショットキー接合型の光検出素子の感度の向上には、半導体層の界面から 20 nm までの範囲での金属膜の有効吸収量を増加させることが有効であることを意味している。

【0040】

また、半導体層の界面から 20 nm までの範囲での金属膜の内部での光吸収量は、周期的ナノ凹凸構造における縦共振器の共振波長と横共振器の共振波長とが揃った場合に高まる。図5は、周期的ナノ凹凸構造における凸部の高さ t と金属膜における光吸収量との関係を示す図である。また、図6は、周期的ナノ凹凸構造における凸部の配列ピッチ P と金属膜における光吸収量との関係を示す図である。

【0041】

図5は、半導体層をシリコン(Si)、金属膜を金(Au)、真空中での入射光の波長を 1550 nm とした場合のシミュレーション結果であり、横軸に凸部の高さ t を示し、縦軸に光吸収量を示している。縦軸の光吸収量は、半導体層の界面からの距離が 0 nm ~ 20 nm の範囲における金属膜での光吸収量の積分値となっている。周期的ナノ凹凸構造で発生する表面プラズモンの波長 λ_p は、半導体層の誘電率の実部を ϵ_d 、半導体層の界面から 20 nm 以内の範囲における金属膜の主たる構成材料の誘電率の実部を ϵ_m 、真空中での入射光の波長を λ_0 とした場合に、 $\lambda_p = \lambda_0 \times \left(\frac{\epsilon_m + \epsilon_d}{\epsilon_m \times \epsilon_d} \right)^{1/2}$ で求められる。前述の条件下では、 λ_p は約 422 nm と見積もられる。

【0042】

図5に示す結果から、凸部の高さ T が $3/8 \lambda_p < t < 5/8 \lambda_p$ を満たす場合に、金属膜における光吸収量が上昇していることが分かる。縦共振器の共振波長は、表面プラズモンの波長 λ_p の約半分であり、光吸収量は、凸部の高さ T が $1/2 \lambda_p$ の近傍である場合にピークとなる。したがって、 $T = 1/2 \lambda_p$ を満たすことが特に好適である。また、図6に示す結果から、凸部の配列ピッチ P が $9/10 \lambda_p < P < 11/10 \lambda_p$ を満たす場合に金属膜における光吸収量が上昇していることが分かる。横共振器の共振波長は、表面プラズモンの波長 λ_p と略一致し、光吸収量は、凸部の配列ピッチ P が λ_p の近傍である場合にピークとなる。したがって、 $T = \lambda_p$ を満たすことが特に好適である。

【0043】

図7は、周期的ナノ凹凸構造における凹部の幅と金属膜における光吸収量との関係を示す図である。同図は、図5及び図6と同じ条件下でのシミュレーション結果であり、横軸に凹部の幅 D を示し、縦軸に光吸収量を示している。図7に示す結果から、凸部の高さ T 及び凸部の配列ピッチ P に比べて、凹部の幅 D については比較的広い範囲で光吸収量が上昇していることが分かる。ただし、現状の半導体加工技術の制約により、50 nm 未満の凹部を形成することが困難である。このため、凹部の幅 D の範囲は、 $50 \text{ nm} < D < \lambda_p - 50 \text{ nm}$ となる。

【0044】

以上説明したように、光検出素子1では、半導体層2の裏面2bに入射面Fが設けられており、入射面Fから入射した光Lは、半導体層2の表面2aの周期的ナノ凹凸構造11において凹凸の高さ方向に形成される縦共振器C1と凹凸の配列方向に形成される横共振

10

20

30

40

50

器 C 2 によって閉じ込められる。縦共振器 C 1 の共振波長と横共振器 C 2 の共振波長とが揃う場合、半導体層 2 の界面から 20 nm 以内となる範囲で金属膜 1 4 の光吸収が高まることが上記知見より得られている。したがって、縦共振器 C 1 の共振波長と横共振器 C 2 の共振波長とが揃うように周期的ナノ凹凸構造 1 1 における凸部 1 3 の高さ T 及び配列ピッチ P を設定し、かつ金属膜 1 4 の厚さを 20 nm 以上とすることで、金属膜 1 4 での効率的な光吸収が可能となり、安価で近赤外光を十分な感度で検出できる光検出素子 1 が得られる。

【 0 0 4 5 】

本実施形態では、周期的ナノ凹凸構造 1 1 で発生する表面プラズモンの波長を λ_p とした場合に、凸部 1 3 の高さ T が $3/8 \lambda_p < T < 5/8 \lambda_p$ を満たし、凸部 1 3 の配列ピッチ P が $9/10 \lambda_p < P < 11/10 \lambda_p$ を満たしている。このような条件を満たすことにより、半導体層 2 の界面から 20 nm 以内となる範囲で金属膜 1 4 の光吸収が十分に高められる。また、本実施形態では、周期的ナノ凹凸構造 1 1 で発生する表面プラズモンの波長を λ_p とした場合に、凹部 1 2 の幅 D が $50 \text{ nm} < D < \lambda_p - 50 \text{ nm}$ を満たしていてもよい。このような条件下においては、半導体層 2 の界面から 20 nm 以内となる範囲で金属膜 1 4 の光吸収が十分に高められる。

【 0 0 4 6 】

図 8 は、本実施形態に係る光検出素子の感度と比較例に係る光検出素子の感度とを示す図である。同図では、横軸に波長を示し、縦軸に感度を示している。横軸の波長範囲は、1300 nm ~ 1700 nm であり、縦軸の感度は基準化したものとなっている。図 8 に示すように、周期的ナノ凹凸構造 1 1 を有しない比較例では、波長 1300 nm 近傍の光に対する感度が約 0.5 であり、長波長側に行くほど感度が低下している。これに対し、周期的ナノ凹凸構造 1 1 を有する実施例では、波長 1300 nm から波長 1700 nm の近傍に至る広い範囲で 0.6 以上の感度を有し、特に波長 1500 nm ~ 1600 nm の範囲で 0.8 以上の高い感度が実現されている。

【 0 0 4 7 】

また、本実施形態では、半導体層 2 は、シリコンによって構成されている。これにより、安価な製造プロセスを実現でき、光検出素子 1 を安価に製造できる。金属膜 1 4 がアルミニウムを含んで構成される場合、シリコンプロセスによる金属膜 1 4 の製造容易性を確保できる。また、半導体層 2 に接する第 1 の膜と、当該第 1 の膜よりも屈折率が小さい第 2 の膜とを含む複数層の膜によって金属膜 1 4 を構成する場合、金属膜 1 4 において半導体層 2 との界面付近に光を閉じ込めることが可能となり、光吸収量を一層向上できる。

【 0 0 4 8 】

また、本実施形態では、周期的ナノ凹凸構造 1 1 における凹部 1 2 は、平面視でマトリクス状の配置パターンを有しており、凹部 1 2 の横断面形状は、円形状となっている（図 3 参照）。凹部 1 2 の横断面形状として円形状を採用する場合、周期的ナノ凹凸構造 1 1 の周期性を光 L が感ずる面積が狭くなるために、広い波長範囲において表面プラズモンに変換される。したがって、広い波長範囲について光検出が可能となる。

【 0 0 4 9 】

本発明は、上記実施形態に限られるものではない。例えば上記実施形態では、半導体層 2 の表面 2 a にオーミック電極 4 及びショットキー電極 5 が設けられているが、オーミック電極 4 は、半導体層 2 の裏面 2 b に設けられていてもよい。この場合、入射面 F に対応してオーミック電極 4 に開口部を設けてもよく、光 L に対する透明性を有する材料によってオーミック電極 4 を形成してもよい。透明性を有する電極材料としては、例えば酸化インジウムスズなどが挙げられる。

【 0 0 5 0 】

また、上記実施形態では、半導体層 2 の表面 2 a にオーミック電極 4 及びショットキー電極 5 が露出した状態となっているが、オーミック電極 4 及びショットキー電極 5 の表面に絶縁性の保護膜を形成してもよい。この場合、素子組立時の周期的ナノ凹凸構造 1 1 の保護、及びオーミック電極 4 の短絡防止といった技術的効果が得られる。さらに、入射面

10

20

30

40

50

Fには、反射防止膜を設けてもよい。これにより、光Lの入射効率を向上できる。

【0051】

さらに、半導体層2を薄化し、検出領域を近赤外光～可視光の範囲に拡大することも可能である。半導体層2の薄化に伴い、光検出素子1の小型化による応答速度の向上、入射面Fから入射した光Lの素子内での拡散距離が短くなることによる空間分解能の向上も図られる。半導体層2の薄化は、半導体層2の裏面2bの全体にわたってもよく、周期的ナノ凹凸構造11に対応する領域のみを薄化してもよい。前者の場合には、半導体層2の裏面2bにガラス基板を設ける構成としてもよい。

【0052】

更なる応用構造として、周期的ナノ凹凸構造11において、マトリクス状に配置された凹部12の行方向の配列ピッチと列方向の配列ピッチとを互いに異なるようにしてもよい。この場合、偏光方向の異なる2つの波長の光の検出が可能となる。また、半導体層2の表面2aに周期的ナノ凹凸構造11を複数設け、光検出素子1をアレイ化してもよい。この場合、周期的ナノ凹凸構造11毎に凹部12の配列ピッチを変えることで、複数の波長の検出が可能となり、光検出素子1を分光センサとして機能させることができる。

【0053】

また、上記実施形態では、周期的ナノ凹凸構造11において横断面形状が円形状の凹部12がマトリクス状に配置されているが、周期的ナノ凹凸構造11の配置パターンはこれに限られるものではない。例えば凹部12は、千鳥状の配置パターンを有していてもよい。また、例えば凹部12の横断面形状は、矩形状、三角形状などの他の形状であってもよい。凹部12の縦断面形状も、四角形状に限られず、台形状、三角形状などの他の形状であってもよい。凹部12の底面は、平坦面に限られず、凹状に湾曲或いは球形となってもよい。凹部12の横断面形状として矩形状を採用する場合、周期的ナノ凹凸構造11の周期性を光Lが感ずる面積が広がるために、特定の波長において強い表面プラズモンに変換される。したがって、特定の波長について高感度の光検出が可能となる。

【0054】

また、図9に示すように、周期的ナノ凹凸構造11における凹部12は、平面視でストライプ状の配置パターンを有していてもよい。ストライプ状の配置パターンを採用する場合、ストライプ状の配置パターンに対して電場ベクトルが直交する光Lのみが周期的ナノ凹凸構造11において強い表面プラズモンに変換される。したがって、一つの偏光方向について高感度な光検出が可能となる。

【0055】

また、図10に示すように、周期的ナノ凹凸構造11における凹部12は、平面視で同心円状の配置パターンを有していてもよい。同心円状の配置パターンを採用する場合、いずれの偏光方向の光Lも等しく表面プラズモンに変換される。したがって、偏光方向に依存しない光検出が可能となる。

【0056】

さらに、図11に示すように、周期的ナノ凹凸構造11における凹部12は、平面視で同心多角状の配置パターンを有していてもよい。同心多角形状の配置パターンを採用する場合、同心多角形状の配置パターンの各辺に対して電場ベクトルが直交する光Lのみが周期的ナノ凹凸構造11において強い表面プラズモンに変換される。したがって、二つの偏光方向について高感度な光検出が可能となる。図11では、同心四角形状を図示しているが、同心三角形状、同心六角形状といった他の多角形状であってもよい。

【符号の説明】

【0057】

1...光検出素子、2...半導体層、2a...表面(他方面)、2b...裏面(一方面)、11...周期的ナノ凹凸構造、12...凹部、13...凸部、14...金属膜、C1...縦共振器、C2...横共振器、F...入射面、L...光、T...凸部の高さ、P...凸部の配列ピッチ、D...凹部の幅。

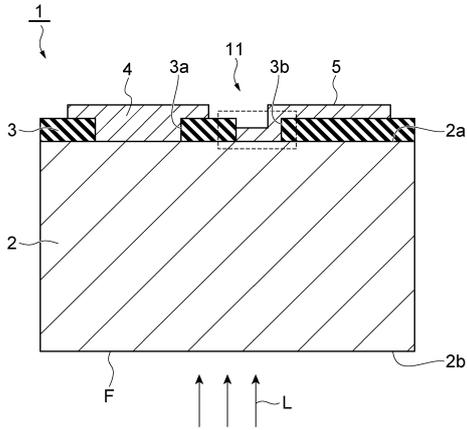
10

20

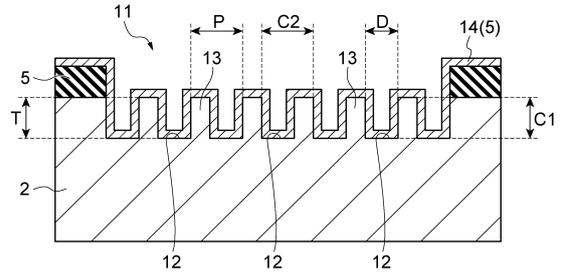
30

40

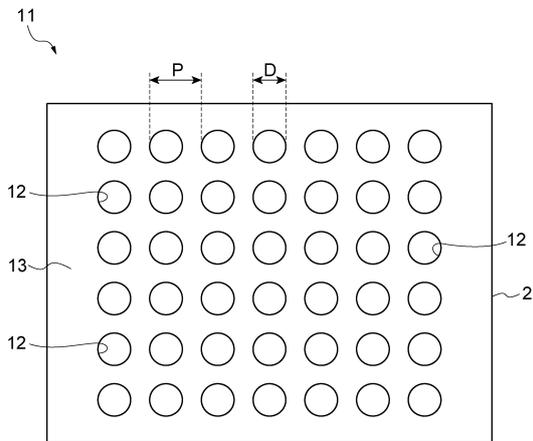
【図1】



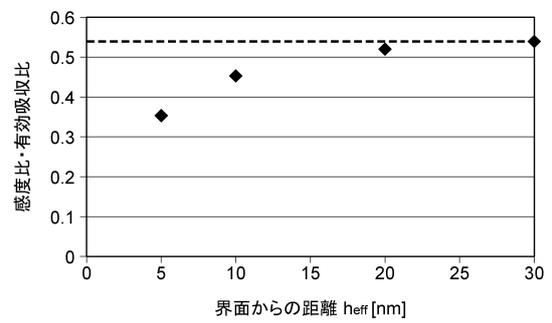
【図2】



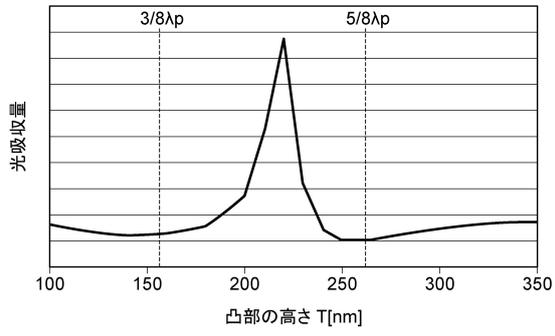
【図3】



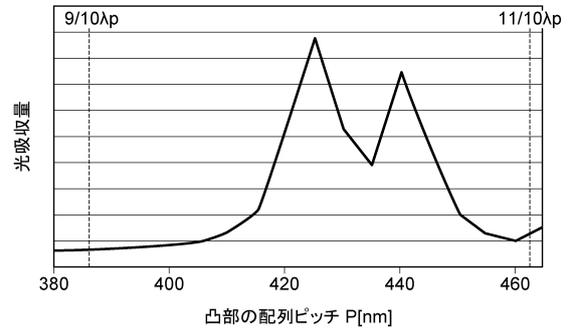
【図4】



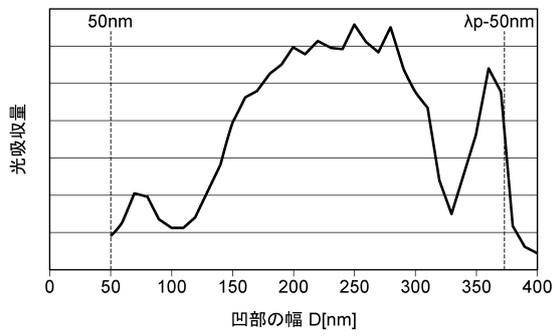
【 図 5 】



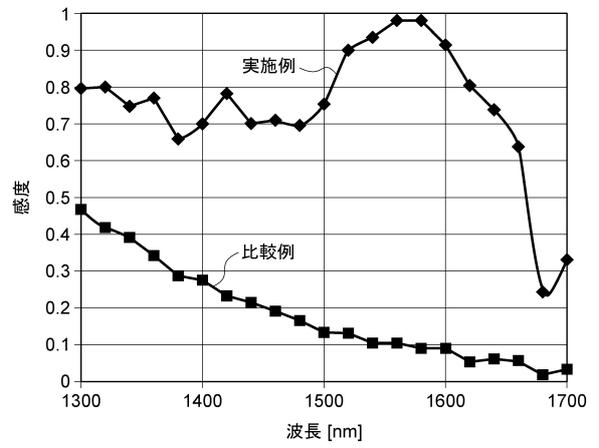
【 図 6 】



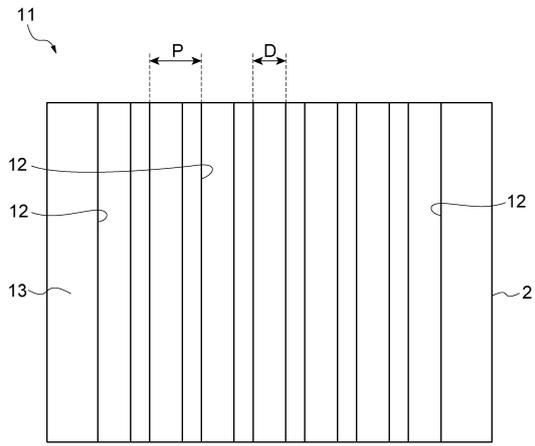
【 図 7 】



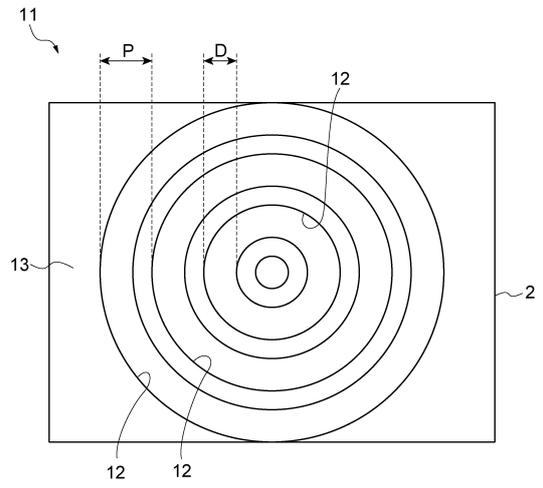
【 図 8 】



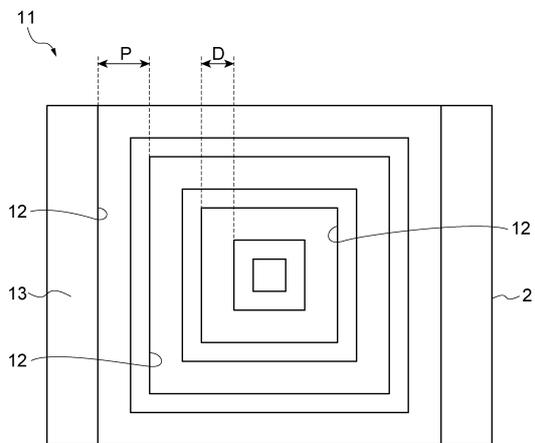
【図 9】



【図 10】



【図 11】



フロントページの続き

- (72)発明者 董 偉
静岡県浜松市東区市野町 1 1 2 6 番地の 1 浜松ホトニクス株式会社内
- (72)発明者 中嶋 和利
静岡県浜松市東区市野町 1 1 2 6 番地の 1 浜松ホトニクス株式会社内
- (72)発明者 林 昌平
静岡県浜松市東区市野町 1 1 2 6 番地の 1 浜松ホトニクス株式会社内

審査官 吉岡 一也

- (56)参考文献 特開 2 0 1 5 - 0 2 6 6 3 1 (J P , A)
特開 2 0 0 9 - 0 3 8 3 5 2 (J P , A)
特開 2 0 0 8 - 0 5 3 6 1 5 (J P , A)
特開 2 0 1 4 - 2 2 9 7 7 9 (J P , A)
中国特許出願公開第 1 0 3 8 1 1 5 8 0 (C N , A)

- (58)調査した分野(Int.Cl. , DB名)
H 0 1 L 3 1 / 0 2 - 3 1 / 0 3 9 2 , 3 1 / 0 8 - 3 1 / 1 1 9