

(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
2010年8月19日(19.08.2010)

PCT

(10) 国際公開番号
WO 2010/093058 A1

- (51) 国際特許分類:
H01L 31/10 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2010/052485
- (22) 国際出願日: 2010年2月12日(12.02.2010)
- (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 2009-031235 2009年2月13日(13.02.2009) JP
特願 2009-031236 2009年2月13日(13.02.2009) JP
- (71) 出願人(米国を除く全ての指定国について): 独立行政法人産業技術総合研究所(NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY) [JP/JP]; 〒1008921 東京都千代田区霞が関一丁目3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): 小倉 睦郎(OGURA Mutsuo) [JP/JP]; 〒3058568 茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第2 独立行政法人産業技術総合研究所内 Ibaraki (JP). 崔 誠佑(CHOI SungWoo); 〒3058568 茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第2 独立行政法人産業技

術総合研究所内 Ibaraki (JP). 羽山 信幸(HAYAMA Nobuyuki) [JP/JP]; 〒3058568 茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第2 独立行政法人産業技術総合研究所内 Ibaraki (JP). 西田 克彦(NISHIDA Katsuhiko) [JP/JP]; 〒3058568 茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第2 独立行政法人産業技術総合研究所内 Ibaraki (JP).

- (74) 代理人: 福田 賢三, 外(FUKUDA Kenzo et al.); 〒1050003 東京都港区西新橋一丁目6番13号 柏屋ビル 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, 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, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, 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, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア

[続葉有]

(54) Title: HETEROJUNCTION BIPOLAR PHOTOTRANSISTOR

(54) 発明の名称: ヘテロ接合バイポーラフォトトランジスタ

図3(A)

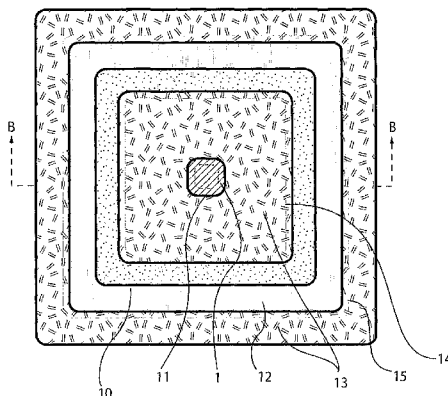
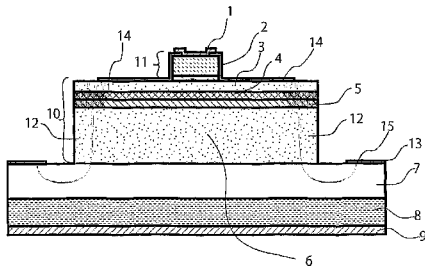


図3(B)



(57) Abstract: Disclosed is an HPT that is highly sensitive while also having wideband wavelength characteristics. A combination collector-barrier layer (5) formed on top of a light absorption layer (6) is a semiconductor layer with a higher energy level than that of the light absorption layer (6) in the conduction band, nearly equal or higher energy level than that of the light absorption layer (6) in the valence band, and a relatively wider gap than the light absorption layer. A base layer (4) formed on top of the combination collector-barrier layer (5) has a relatively narrower gap than the collector-barrier layer (5), and in the conduction band has an equal or higher energy level than that of the collector-barrier layer (5) at the interface with the collector-barrier layer (5). An emitter layer (3) formed on top of the base layer (4) is a semiconductor layer of a first conductive type with a relatively wider gap than the base layer (4), an equal or lower energy level at the interface with the base layer (4) than that of the base layer (4) in the conduction band, and a lower energy level than that of the base layer (4) in the valence band.

(57) 要約: 高感度でしかも広波長帯域特性を有する HPT を提供する。光吸収層(6)の上に形成されるコレクタ兼バリア層(5)は、伝導帯におけるエネルギー準位は光吸収層(6)のそれよりは高く、価電子帯におけるエネルギー準位は光吸収層(6)のそれにほぼ一致するか高い、相対的に光吸収層よりワイドギャップな半導体層とする。コレクタ兼バリア層(5)の上に形成されるベース層(4)は、コレクタ兼バリア層(5)に比して相対的にナローギャップで、その伝導帯におけるエネルギー準位はコレクタ兼バリア層(5)との界面においてコレクタ兼バリア層(5)のそれに一致するか高いものとする。ベース層(4)の上に形成されるエミッタ層(3)は、ベース層(4)

に比して相対的にワイドギャップで、伝導帯におけるエネルギー準位はベース層(4)のそれより低い第一導電型の半導体層とする。



(AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ
(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, 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))

明 細 書

ヘテロ接合バイポーラフォトトランジスタ

5 技術分野

本発明は光検出素子(フォトディテクタ)に関し、特に化合物半導体系ヘテロ接合バイポーラフォトトランジスタ(HPT: heterojunction bipolar phototransistor)の改良に関する。

10 背景技術

シリコン系の素子では適用不可能な近紫外及び赤外領域に感度を有する化合物半導体系フォトディテクタや、それらを一次元ないし二次元に複数個並設して成るフォトディテクタアレイは、光通信や分光システム用検出器あるいは赤外線カメラとして、医療、防災、工業検査用途等に広範な需要がある。

- 15 特に近年では、一酸化炭素、二酸化炭素、亜酸化窒素、メタン等の環境ガスの基本吸収帯が存在する中赤外光領域での高感度フォトディテクタの開発が要求されている。
- この波長帯域の赤外線ディテクタは大気汚染監視、地球温暖化対策、防災安全対策、燃焼ガスモニターによる燃費改善などの用途として益々重要となる。これらの用途には従来から、HgCdTe系の化合物半導体による赤外線ディテクタが製造されているが、公害要
- 20 因となるため生産量、用途が限定され、より安全な材料での赤外線ディテクタが求められている。また、InSb系等のナローギャップ半導体を用いた赤外線ディテクタでは、熱励起や表面リークにより暗電流が大きく、これを主原因とした雑音により検出感度が制限されていた。従って、高感度を必要とする用途では、暗電流を抑制するため液体窒素あるいは機械式冷凍機等の大がかりな装置にて-120℃以下に素子を冷却する必要があっ
- 25 た。

ナローギャップ半導体における暗電流を抑制するため、種々の工夫がなされてきた。周知のSRH(Shockley-Read-Hall)統計によって明らかなように、電子及び正孔濃度の積が熱平衡状態のそれよりも小さい場合には電子正孔対が発生し、大きい場合には電子正孔対が再結合する。また、空乏状態の場合、真性キャリア濃度が大きいバンドギャップの狭い半導体の方が、キャリア生成速度は大きくなる。従って、中赤外光用のバンドギャップの狭い半導体では、電子正孔対の生成領域である空乏領域を小さくすることが暗電流を抑制する上で重要である。

アンチモン系中赤外光ディテクタでは、下記文献1に開示されているように、広いバンドギャップを有する半導体層を、狭いバンドギャップを有するn型半導体の光吸収層と、同じく狭いバンドギャップを有するn型コンタクト層とで上下に挟んだ所謂nBn構造による暗電流の抑制方法が示されている。

文献1 : S. Maimon and G. W. Wicks, "nBn detector, an infrared detector with reduced dark current and higher operating temperature" APPLIED PHYSICS LETTERS vol. 89, Oct. 2006, p. 151109.

この構造においては、多数キャリアとなる電子による電流を広いバンドギャップの半導体層により形成された伝導帯に於ける障壁で阻止して、暗電流成分を抑制すると共に、フォトダイオード(PD)を構成するすべての半導体の価電子帯の障壁を除去し、価電子帯のバンドオフセットをほぼフラットにすることにより、光励起された正孔のみが、有効に光励起電流として検出される。

また、下記文献2にはInAlAsSb等、広いバンドギャップを有する表面バリア層を適用し、InAsSbなどの光吸収層との界面で価電子帯の不連続を無くすことで、光照射で生成する正孔を効率よく捕捉し、波長4 μ m帯においても室温での高感度化を図った構造が示されている。

文献2 : H. Shao, W. Li, A. Torfi, D. Moscicka, and W. I. Wang, "Room-Temperature InAsSb Photovoltaic Detectors for Mid-Infrared Applications", IEEE

PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 18, NO. 16, AUGUST 15, (2006) p.1756-1758.

さらに、素子分離特性に優れたメサ型フォトダイオードにおいても、本発明者等の別途な研究により、メサ端面を同一導電型とし、狭いバンドギャップを有する半導体材料で形成されるpn接合を端面に露出しない構造とすることで、プレーナ型と同等な暗電流の抑制が可能となった。

これらフォトダイオードは動作原理が簡単で定量性にも優れているが、フォトン一個に対して高々電子正孔対が一对しか生成されないため、微少光の検出時には電流出力が小さく、電気増幅器の雑音特性により検出限界が生ずる問題があった。そこで、化合物半導体系フォトディテクタとしても、内部に増幅作用を持つフォトトランジスタが開発されてきた。フォトンにより発生した正孔によりベースのポテンシャルを変化させて光電流を増幅するヘテロ接合バイポーラフォトトランジスタ(HPT)は、同じく光電流の増倍作用を有するアバランシェフォトダイオード(APD: avalanche photodiode)よりもノイズが少なく、高感度なフォトディテクタとして、1980年代から現在に至るまで、研究開発が継続している。

フォトトランジスタは、通常ベース・コレクタ接合をフォトダイオードとして兼用し、コレクタ領域において光生成されたキャリアをベース領域に注入することにより、バイポーラトランジスタにおいてベースを順方向にバイアスするのと同様な効果を生じさせる。従って、HPTの特性は、フォトダイオード(PD)、ヘテロバイポーラトランジスタ(HBT)の特性と、それらの電氣的な接続方法により決定され、それぞれの構成要素において最適設計を行う必要がある。

HPTを多層膜から成るエピタキシャル成長で実現する場合、素子分離のためにエミッタ・ベース層あるいはベース・コレクタ層をメサ構造にする場合があるが、先に述べたような本発明者等の研究結果では、メサ端面を同一導電型にすることにより、トランジスタ部の電流利得の増強と暗電流抑制を同時に達成することができた。また、これもさらに本発明者等の別途な研究の結果、DH(ダブルヘテロ)型HBTと選択不純物拡散に

よるプレーナ型PDとを積層した構造においても、PD部の暗電流を抑制することができた。

電子デバイスとしてのヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT) においては、ベースに対して相対的にバンドギャップの大きな材料をエミッタとして用い、価電子帯のエネルギー準位をベースよりも低く設定、言い換えると、正孔が感じる静電ポテンシャルとしては高く設定することにより、ベースからエミッタへの正孔の移動を阻止し大きな電流利得を得ることができる。さらに、トランジスタの耐圧を向上するために、比較的大きなバンドギャップを持つ材料をコレクタとして用いたDH型HBTも開発されている。

フォトトランジスタにおいて、その波長感度領域を拡大するためには、使用する波長帯域に対応するように、コレクタのエネルギーバンドギャップを小さくすることが一般的である。しかし、ベース・コレクタ接合に電界が集中するために、エミッタ・コレクタ間の耐圧電圧が低下するという問題が発生する。一般に、半導体材料の耐圧は、バンドギャップを狭くするほど低下するため、長い波長領域に吸収端を持つ材料をコレクタとして用いることは不利になる。

一方、耐圧の観点では有利なDH型HBTにおいては、伝導帯においてベースよりもコレクタの準位が高くなるため、電子のベースからコレクタへの走行が阻害される。また、相対的に大きなエネルギーバンドギャップを有するコレクタ層の下に、検出する波長帯域に対応する光吸収層を形成した場合、光生成された正孔に対して、光吸収層の価電子帯のエネルギー準位が低くなり、正孔が光吸収層からコレクタを通してベースに至る経路が遮断される。そのため、DH型HBTは、微少光の検出を目的としたフォトトランジスタとしては適していない。

フォトトランジスタの場合、吸収されたフォトンに対応するサブpAレベルの光励起電流を増幅するためには、微少なベース電流においても、高い電流増幅率を持つ必要がある。また光検出器では、暗電流を抑制するために、素子を冷却することが一般的に行われている。このような、微少バイアス電流、低温動作という条件に於いては、大電流

を増幅することを目的とする通常のHBTでは、問題とならなかったわずかなバンドプロフィールの不連続が電子および正孔の走行を阻害するため、バンドプロフィールの新規設計が必要となる。

III-V族化合物半導体においては、その構成元素の組成割合により、伝導帯と価電子帯のポテンシャルを独立に設計することが可能である。特に、アンチモンを含む化合物半導体は電子親和度が小さく、コンダクションバンド準位が高くなる傾向がある。例えば、InPに格子整合したGaAsSbをInP系DH-HBTのInGaAsベースと置き換えることにより、ベース層のコンダクションバンドをInPコレクタよりも高くし、しかも、ベース層の充満帯をInPエミッタよりは高く設計することができる。この点については下記文献3, 4を参考にすることができる。

文献3 : R. Bhat, W-P. Hong, C. Caneau, M. A. Koza, C-K. Nguyen, and S. Goswami, "InP/GaAsSb/InP and InP/GaAsSb/InGaAsP double heterojunction bipolar transistors with a carbon-doped base grown by organometallic chemical vapor deposition", Applied Physics Letters vol.68(7), Feb. 1996 pp.985-987.

文献4 : C. R. Bolognesi, N. Matine, Martin W. Dvorak, P. Yeo, X. G. Xu, and Simon P. Watkins, "InP/GaAsSb/InP Double HBTs: A New Alternative for InP-Based DHBTs", IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 48, NO. 11, Nov. 2001 pp. 2361-2639.

また、下記文献5では、アンチモン系化合物半導体を用いて、エミッタ、ベース、コレクタの伝導帯を階段状に下げたり、界面のポテンシャルを一致させることにより、電子の移動を円滑にすることが提案されている。

文献5 : 米国特許公開2006/0065952号公報

InP基板上のInGaAsに於いては、ある程度の格子不整合条件を許して、In組成を増加した場合でも、波長 $2.2\mu\text{m}$ までが実用的な限界である。GaSb、InGaSb、InAsSb等、アンチモン系半導体を光吸収層に用いると、感光波長をInGaSb光吸収層で $2.8\mu\text{m}$ 程度ま

で、また、InAsSb光吸収層で $5\mu\text{m}$ 程度まで、拡張することができる。HPTにおいても、電子デバイスとしてのHBTと同様な設計思想で、大きな増幅作用を得るためにはエミッターベース間の伝導帯のバンドオフセットを小さく、かつ価電子帯のバンドオフセットは大きくするのが望ましい。中赤外光ディテクタ用としては、具体的には下記文献6，
5 7に認められるように、AlGaAsSb/InGaAsSb系HPTがGaSb基板上に製作され、室温近傍で利得500A/W～1000A/Wを得ている。しかし、コレクタが光吸収層を兼ねているため、検出波長は高々 $2.5\mu\text{m}$ 帯止まりである。

文献6：M. Nurul Abedin, Tamer F. Refaat, Oleg V. Sulima, and Upendra N. Singh, “AlGaAsSb-InGaAsSb HPTs With High Optical Gain and Wide Dynamic
10 Range”, IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 51, NO. 12, DECEMBER 2004, p. 2013-2018.

文献7：Tamer F. Refaat, M. Nurul Abedin, Oleg V. Sulima, Syed Ismail, and Upendra N. Singh, “ $2.4\text{-}\mu\text{m}$ -Cutoff AlGaAsSb/InGaAsSb Phototransistors for Shortwave-IR Applications”, IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. 54,
15 NO. 11, NOVEMBER 2007 p. 2837-2842.

上記のアンチモン系化合物半導体は、高移動度材料でもあることから、テラヘルツ帯用超高速電子デバイス用途としても注目されてきた。HBTにおいて、ベース層のバンドギャップが論理振幅を決定することから、ナローバンドギャップ半導体材料を含み、かつ、大きなバンドオフセットを有するAlSb/GaSb/InAs系材料が着目され始めている。具体的には、AlGaAs/GaAs系およびInP/InGaAs系HBTのベース層をGaAsSbに置き換えて伝導帯のノッチを除去すること(上記文献3, 4参照)や、InGaAs/InP系HBTよりも論理振幅を下げるために、本発明者等の別途な研究ではInGaSb等をベース層に、InAlAsSb等をエミッタ層およびコレクタ層として用いることが試みられている。この場合も、論理振幅の低減や、消費電力を下げるために、ベース・コレクタ境界の伝導帯でのノッチを除去する
25 ため、コレクタ材料の組成選択に特段の留意が必要である。

但し、ナローバンドギャップ半導体をベース層に用いることにより、オージェ効果による再結合効果の増大や、耐圧の低下が生ずる。従来開示されている文献群においては、中赤外光検出器用のHPTとして動作せる場合に留意すべき事項の開示はされていない。

- 5 赤外フォトトランジスタは、フォトダイオード部にトランジスタ部が積層された構造であるので、(a)フォトダイオードの高感度化のための暗電流の抑制、(b)発生した光生成電荷の移送、および(c)トランジスタ電流増幅効果の確保、を同時に満たす必要がある。

- すなわち、フォトトランジスタにおいては、まず、その感光波長を長波長域に拡大
10 するために、(1)光吸収層となるPD部の暗電流を抑制する必要がある。そのためにはPDの表面に於いて、ナローバンドギャップ半導体のPN接合が露出しない構造を取る必要がある。また、バルク内部で発生する暗電流を抑制するためには、伝導帯にポテンシャル障壁を設け、電子による電流成分をブロックすることも有効である。

- 次に、(2)PD部で発生した電荷が滞りなくトランジスタ部に移送されるように、光
15 生成された正孔に対して光吸収層からベース層に至る価電子帯のポテンシャル障壁を除去、すなわち、バリアフリー構造にする必要がある。

- さらに、(3)トランジスタ部において、微少ベース電流に応じて大きな電流利得が
得られる構造を採る必要がある。それには、(3-1)エミッタ・ベース接合の端面に於いて、表面再結合が抑制されること、(3-2)エミッタ・ベース接合において、価電子帯に
20 十分な高さのポテンシャル障壁が形成されること、(3-3)ベース・コレクタに至る伝導帯において、電子の走行を妨げるポテンシャル障壁が無いこと、すなわち、バリアフリー構造にすること、(3-4)素子の使用温度に対して、エミッタ・ベース間オン電圧が過大とならないこと、また、実用的な使用環境においては、(3-5)ベース・コレクタ逆方向耐圧電圧が十分大きいこと、等が要求される。

- 25 コレクタ層で光吸収層を兼ねる場合には、波長に応じてコレクタ層のバンドギャッ

プを狭くする必要がある。一方ベース・コレクタ逆方向耐圧電圧を増加させるためには、ベース層およびコレクタ層を構成する材料のバンドギャップをある程度大きくする必要がある。従って、中赤外領域である程度印可電圧耐性の大きなHPTを実現するには、光吸収層とコレクタ層を分離して、コレクタ層には、比較的大きなバンドギャップ材料を使用する必要がある。

しかしながら、コレクタ層に比較的大きなバンドギャップ材料を使用したDH型HBTは、微少電流に対する電流利得が不十分で、HPTへの応用には適していない。また、光吸収層とコレクタ界面における正孔の輸送を円滑に行う必要がある。

また、エミッタ層の伝導帯がベースよりも高い場合には、エミッターベース界面に形成されるヘテロバリアが、電子の注入効率を低下させる。このようなエミッタあるいはコレクタ界面に発生する伝導帯のバリアは、電子の走行を妨げるため、特に、低温動作時の、微弱電流の増幅作用を阻害する。

発明の開示

本発明は、既掲の従来例群の持つ欠点を解消ないし緩和し、特に中赤外光領域を検出対象とするHPTにおいて、暗電流に起因するノイズ特性を大きく抑制し、高感度でしかも広波長帯域特性を有する光検出素子を提供せんとするものである。そのためにまず、大概して言えば、素子構造とバンドギャップエンジニアリング手法を用いて、トランジスタ部およびフォトダイオード部の最適化を図る。すなわち、伝導帯および価電子帯のエネルギープロファイルを独立に最適設計して、フォトダイオード部で生成した光キャリアを円滑にトランジスタ部に導くとともに、端面におけるリーク電流の発生を抑制する。

そこで、本発明では、このような条件を満たすヘテロ接合バイポーラフォトトランジスタとして、

第一導電型の半導体層により構成された光吸収層と、該光吸収層の上にコレクタ兼

バリア層、ベース層、エミッタ層が順に積層されることで構成されたトランジスタ部とを有するフォトトランジスタにおいて；

上記コレクタ兼バリア層は、伝導帯におけるエネルギー準位が該光吸収層のそれより高く、価電子帯におけるエネルギー準位が該光吸収層のそれにほぼ一致するか高い、相対的に該光吸収層よりワイドギャップな半導体層から成り；

上記コレクタ兼バリア層の上に形成された上記ベース層は、該コレクタ兼バリア層に比して相対的にナローギャップで、その伝導帯におけるエネルギー準位は該コレクタ兼バリア層との界面において該コレクタ兼バリア層のそれに一致するか高く；

上記ベース層の上に形成された上記エミッタ層は、該ベース層に比して相対的にワイドギャップで、伝導帯におけるエネルギー準位は該ベース層との界面において該ベース層のそれに一致するか低く、価電子帯におけるエネルギー準位は該ベース層のそれよりは低い上記第一導電型の半導体層から成ること；

を特徴とするヘテロ接合バイポーラフォトトランジスタを提案する。

上記の基本構成の下で、上記ベース層は、上記第一導電型とは逆極性の第二導電型の半導体層から成るものであっても良い。

また、本発明の下位態様としては、上記ベース層は、その中央部分は上記第一導電型の半導体層から成るが、周辺部は、該中央部分とは逆極性の第二導電型となっているヘテロ接合バイポーラフォトトランジスタも提案する。

さらに、本発明の特定の態様においては、上記光吸収層と上記コレクタ兼バリア層がメサ構造として構成され、該メサ構造の露呈側面部分が上記第一導電型あるいは該第一導電型とは逆極性の第二導電型に統一され、該光吸収層と該コレクタ兼バリア層により構成されるpn接合部分が側面において露出しないヘテロ接合バイポーラフォトトランジスタも提案する。

本発明のまた別な下位態様として、材質的な工夫をするならば、上記光吸収層をInGaAs、上記コレクタ兼バリア層をInGaAsPSb、上記ベース層をInGaAsPSb、上記エミッ

タ層をInP半導体で構成するか、あるいは、上記光吸収層をInAsあるいはInAsSb、上記コレクタ兼バリア層をInAlAsSb、上記ベース層をInGaSbあるいはInGaAsSb半導体、そして上記エミッタ層をInAlAsSb半導体で構成すると望ましい。

(発明の効果)

5 本発明による素子においては、光吸収層とベース層の間に、光吸収層よりもワイドギャップで価電子帯におけるエネルギー準位が光吸収層のそれにほぼ一致するか高いコレクタ兼バリア層を有している。これは、光吸収層とコレクタ兼バリア層が所謂タイプ2型ヘテロ接合を形成していることであり、光照射により光吸収層内で発生した正孔を障壁なしにベース層に注入し、もってベース層のポテンシャルを下げ、エミッタ層からの
10 電子のベース層への注入を制御できることを意味する。一方、エミッタ層からベース層を通過してバリア層に到達する電子は、所定のバイアスが印加されれば伝導帯における障壁なしに、光吸収層に導かれる。

さらに、光吸収層がナローバンドギャップ材料であっても、例えば光吸収層をn型にして、熱平衡状態における正孔濃度を下げることにより、光照射がない場合の光吸収
15 層からバリア層への正孔の流入を抑制することができる。一方、コレクタ兼バリア層はワイドバンドギャップ半導体で構成されるため、熱平衡状態での電子濃度を低く設計すれば、コレクタ兼バリア層からの電子電流の発生も抑制できる。さらに、光吸収層とコレクタ兼バリア層の伝導帯におけるエネルギー準位差分だけ、光吸収層での電界が緩和され、光照射がない場合の空乏領域での電子正孔対の生成が抑制される。

20 本発明に従えばコレクタ兼バリア層と光吸収層の接合がタイプ2型のヘテロ接合になることは、伝導帯及び価電子帯のそれぞれにおいて、電子に対してはコレクタ兼バリア層から光吸収層へ、正孔に対しては光吸収層からコレクタ兼バリア層へのポテンシャル勾配が障壁なしに、すなわちバリアフリーに形成し得ることを意味する。電子と正孔の流れは互いに逆向きで、平面的にもある程度分離されている。従って本発明のHPTで
25 は、ベース層とエミッタ層は電子デバイスとして増幅率等の観点から、光吸収層とコレ

クタ兼バリア層はフォトダイオードとして量子効率等の観点からというように、それぞれ独立の観点に立つての最適設計が可能となる。

トランジスタ部の構成に関しては、素子の耐圧を上げるためにコレクタ層のバンドギャップを大きくすることが有効であるが、ダブルヘテロ (DH) 型 HBT においては、ベース・コレクタ間に伝導帯のポテンシャル障壁が発生し、微少電流の増幅が困難となる。しかし、この点に関しては、本発明を適用した上で、既掲の文献 3, 4 に準じて、ベース層の伝導帯エネルギー準位をコレクタ領域のそれに一致させるか、高くすることにより、低温あるいは、低照度における電流増幅作用を増強することができる。

トランジスタ部のベース層はエミッタ層とは逆の極性を持つが、その場合、トランジスタのオン電圧は pn 接合のビルトインポテンシャルに支配される。ビルトインポテンシャルを低くするためには、バンドギャップを小さくすることが必要であるが、再結合やキャリアの熱励起、耐電圧の低下をもたらす。従って、通常の npn あるいは pnp 型バイポーラトランジスタのオン電圧は、低温、低照度での仕様条件では過大になりやすい。ところが、本発明の特定の態様に従い、ベース層の上に形成されたエミッタ層は、ベース層に比して相対的にワイドギャップで、伝導帯におけるエネルギー準位はベース層との界面においてベース層のそれに一致するか低くなっているため、エミッタ層から注入されるキャリアを制御する伝導帯のバリアの高さは、必ずしもベース層材料のエネルギーバンドギャップに依存しない。そこで、比較的大きなエネルギーバンドギャップを持つ材料をベース層に用いれば、比較的小さなオン電圧を実現することが可能となる。ベース層の周囲を p 型に反転し、当該 p 型層から正孔を注入することにより、ベース層の伝導帯のポテンシャルを制御できる。

通常のトランジスタ増幅回路に於いては、エミッタ・ベースおよびベース・コレクタ間に適切な抵抗を配線し、バイアス電流や利得を設計するのが一般的である。しかし、pW レベルの微弱光検出を目的とした HPT の場合、最適な抵抗のレンジが $G \Omega$ となり、特殊な高抵抗と回路基板を使用する必要が生じる。しかし、本発明によれば、開放

ベースHPTの場合においても、ベース層の伝導帯のポテンシャルを設計することにより、自由にバイアス条件を設定することが可能となり、二端子素子として、装置への組み込みが容易となる。

一般に、結晶の表面欠陥密度は結晶内部よりも大きく、また結晶欠陥準位による

5 キャリア再結合および生成効果は、平衡キャリア濃度に比例する。従って、キャリア再結合によるトランジスタの電流利得の低下や、キャリア生成による暗電流の増加を抑制するためには、表面に露出するpn接合をワイドバンドギャップ半導体のみで形成し、ナロウバンドギャップ表面では、単一導電性として、熱平衡条件を保つことが有効である。本発明の特定の態様は、そのような暗電流抑制機構も具現している。

10 本発明により構築されるHPTは、フォトリソグラフィ技術と表面処理技術により最適設計されたものとなり、従来提供されていた中赤外光検出素子に比し、暗電流は一桁以上抑制できる上に、高い増幅率を備え、室温に近い動作環境でもより高感度、広帯域な中赤外光検出素子となる。

15 図面の簡単な説明

図1は本発明の望ましい一実施形態としてのHPTのバンドプロファイルの説明図である。

図2(A)は本発明の望ましい一実施形態を満たすための材料構成例を示す概略図である。

20 図2(B)は図2(A)とは異なる、他の望ましい材料構成例を示す概略図である。

図2(C)は図2(A)、(B)とはさらに異なる、また別な望ましい材料構成例を示す概略図である。

図3(A)は本発明の望ましい一実施形態におけるHPTを平面図で示した概略構成図である。

25 図3(B)は図3(A)中のB-B線に沿う断面図である。

図4は本発明の望ましい一実施形態として図2に示した材料構成によるバリアフリー型HPTの光照射前後のバンドプロファイルの説明図である。

図5は本発明HPTと従来構造のHPTとを光入力、電流出力特性の観点から比較した特性図である。

5 図6は本発明の他の望ましい一実施形態としてInAsを光吸収層に用いたHPTの光照射前後のバンドプロファイルの説明図である。

図7は図6に示したHPTの光入力、電流出力特性の温度依存性を示した図である。

図8は本発明のさらに他の望ましい一実施形態としてInGaAsSbを光吸収層に用いたHPTの光照射前後のバンドプロファイルの説明図である。

10 図9は図8に示したHPTの光入力、電流出力特性の、InGaAsSb光吸収層のキャリア濃度依存性を示した図である。

図10(A)は本発明のまた別な一実施形態として、ベース層の周囲にリング状に不純物を拡散したHPTの平面図による概略構成図である。

図10(B)は図10(A)中のB-B線に沿う断面端面図である。

15 図11は従来構造のDH型HPTのバンド構造に関するシミュレーション結果の説明図である。

図12は従来構成のHPTのバンドプロファイルの説明図である。

発明を実施するための最良の形態

20 以下、図1以降に即し、本発明の望ましい実施形態に就き説明して行くが、全図を通じ、同じ符号は同じか、または同様の構成要素を示している。従って本明細書中、各図に即しての個別的な説明の中でその図面に記載されている符号付きの構成要素に就き説明が無い場合でも、要すれば他の図面に関する説明の中でなされている同じ符号の構成要素に関する説明を援用することができる。

25 ヘテロバイポーラフォトトランジスタ(HPT)は、ヘテロバイポーラトランジスタ

(HBT)にフォトダイオード(PD)が積層した形になる。図12に示すように、古典的なHBTにナローバンドギャップの光吸収層を加えた従来例におけるバンドギャッププロファイルに認められるように、これまでは通常、ヘテロバイポーラトランジスタのベース層4'はホールを効率よく閉じ込めるためにバンドギャップを小さくし、コレクタ層5'はブレイクダウン電圧を確保するためにバンドギャップが大きい方が望ましいとだけされていた。しかし、ベース層4'にナローバンドギャップの材料を用いる場合、エミッタ層3'からコレクタ層5'に至る伝導帯に、界面位置Pc'で示すようにバンドオフセット(バリア)が発生し、黒丸で示す電子の矢印Fe方向の走行が阻害される。また赤外に感度を持つナローギャップの光吸収層6'を用いる場合に、コレクタ層5'と光吸収層6'の界面位置Pv'において価電子帯にバンドオフセット(バリア)が発生する。そのため、白抜きの丸で示す正孔に関しても矢印Fh方向の流れが阻害され、感度及びトランジスタ増幅特性が著しく低下する。

これに対し、本発明に従って構築されるHPTでは、図1に示すような、上述したヘテロ界面でのバリアのない、バリアフリー型バンド構造が提供できる。すなわち、本発明におけるコレクタ兼バリア層5は、伝導帯におけるエネルギー準位がその下の光吸収層6のそれよりは高く、価電子帯におけるエネルギー準位は光吸収層6のそれにほぼ一致するか高い、相対的に光吸収層6よりワイドギャップな半導体層から成っている。このような構成によって、まず、光吸収層6との界面位置Pvにおいて、価電子帯にバリアが生じないようにすることができ、もって矢印Fh方向の正孔の流れを阻害しない。光吸収層6において光生成された正孔は、バリアで妨げられることなくベース層4に導かれ、エミッタ・ベース接合界面Bhで留まり、順方向にベースバイアスを加える効果により電流増幅作用を起こす。

また、コレクタ兼バリア層5の上に形成されたベース層4は、コレクタ兼バリア層5に比して相対的にナローギャップで、その伝導帯におけるエネルギー準位はコレクタ兼バリア層5との界面位置Pcにおいて当該コレクタ兼バリア層5のそれに一致するか高

く、ここにバリアを生じない。さらに、ベース層 4 の上に形成されたエミッタ層 3 は、ベース層 4 に比して相対的にワイドギャップで、伝導帯におけるエネルギー準位はベース層 4 との界面において当該ベース層 4 のそれに一致するか低く、価電子帯におけるエネルギー準位はベース層 4 のそれよりは低い第一導電型の半導体層から成っている。こうすることで、ベース・コレクタ接合の界面位置 P_c での伝導帯におけるバリアを小さくすることができ、矢印 F_e 方向の電子電流も停留することなく光吸収層 6 の側へ流れるようになる。

図 1 のようなバリアフリー型バンド構造は、例えば図 2 (A) ~ (C) に示すような材料構成例で実現できる。まず一つには図 2 (A) に示すように、基板 (図示せず) を InP 基板とした場合、それに格子整合した $In_{0.47}Ga_{0.53}As$ を光吸収層 6 に、 $In_{0.45}Ga_{0.55}As_{0.47}P_{0.31}Sb_{0.21}$ を n 型にドーピングしてコレクタ兼バリア層 5 に、同じく p 型にドーピングしてベース層 4 に用いることにより実現できる。この化合物半導体のバンドギャップは、0.95 eV であり、伝導帯は InP エミッタ層 3 に、価電子帯は $In_{0.47}Ga_{0.53}As$ 光吸収層 6 に一致している。InP に格子整合する三元化合物半導体として、 $In_{0.47}Ga_{0.53}As$ に加えて $GaAs_{0.5}Sb_{0.5}$ を混合すると、格子整合を保ちながら、バンドギャップに加えて電子親和度を材料設計することが可能になる。すなわち、GaAsSb の電子親和度が小さいので、当該 GaAsSb とバンドギャップの大きな InP、バンドギャップの小さな InGaAs の三者の組成を調整し、例えば InP:InGaAs:GaAsSb=0.32:0.25:0.43 の割合で混合すれば、 $In_{0.45}Ga_{0.55}As_{0.47}P_{0.31}Sb_{0.21}$ を構成できる。なお、光吸収層 6 に上記の材料を用いた場合、その感光波長は 1.6 μm 程度までとなる。また、エミッタコンタクト層 2 としては、 $In_{0.47}Ga_{0.53}As$ を用いている。その他、図 2 (B), (C) に示す組成例に関しては、後に改めて説明する。

図 3 (A), (B) は図 1 に示したバンド構造を持つ本発明 HPT の望ましい一実施形態を素子構造的に示したもので、図 3 (A) は平面図、図 3 (B) は図 3 (A) 中の B-B 線に沿う断面図である。第一の導電型、例えば n 型化合物半導体による基板 8 上に第一半導体層としての光吸収層 6、その上に第一の導電型で第二半導体層となるコレクタ兼バリア層 5、

さらに、第一導電型とは逆極性の第二の導電型、例えばp型化合物半導体による第三半導体層となるベース層4が積層されている。ベース層4上には、当該ベース層4に比して相対的にワイドギャップな半導体から成る第一導電型、すなわちこの場合はn型半導体のエミッタ層3が第四の半導体層として積層形成されている。

5 エミッタ層3の上部には高濃度のエミッタコンタクト層2を介してエミッタ電極1が形成されている。一方、第一半導体層である光吸収層6の下には、第一導電型であるn型であって、当該光吸収層6に比して相対的にワイドギャップな半導体から成るワイドギャップバッファ層7があり、これは基板8上に形成されていて、基板8の裏側にコレクタ電極9が接触している。

10 基板側から上方に見て順に積層関係にある光吸収層6、コレクタ兼バリア層5、ベース層4、そしてエミッタ層3は、メサエッチングにより島状に切り出されたメサ構造10となっており、従ってその側面は周方向に沿ってぐるりと全て空間に露呈した露呈側面となっている。エミッタ層3上のエミッタコンタクト層2は、やはりメサエッチングにより、主たるメサ構造10よりは小さな面積の第二のメサ構造11として切り出され、
15 素子中心部分に位置している。

メサ構造10の露呈側面から素子の内部に向かっては、所定の横方向寸法分だけ、所定の不純物を用いてベース層4と同一導電型、すなわち第二導電型の半導体層に転換された拡散層12が設けられている。こうすることで、素子表面に形成されるpn接合は、エミッタ層側のpn接合14もバッファ層側のpn接合15も、いずれも結晶欠陥の影響が小さい
20 ワイドバンドギャップ半導体上に形成されることになる。素子の試作においては、プラズマCVD等による厚さ200nm程度のSiNx薄膜を選択的に開口し、それを拡散マスク13として、Znを開管あるいは閉管中にて拡散した。

図4には、図3(A)，(B)に示した構造を満たすように作製した本発明バリアフリー型HPTのバンド構造のシミュレーション例が示されている。バイアス電圧は2Vで、光吸
25 収層6は直径60 μ mであって、中心部に直径4 μ mのエミッタコンタクト層2が形成され

ている。エミッタコンタクト層 2 は厚さ 100nm でキャリア濃度 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ と、厚さ 200nm でキャリア濃度 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ の n 型 InGaAs の二層構造で、既述した図 2 (A) に示す組成関係に従い、エミッタ層 3 には厚み 230nm, n 型濃度 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ の InP を、ベース層 4 には厚み 100nm, p 型濃度 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ の $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}_{0.47}\text{P}_{0.31}\text{Sb}_{0.21}$ を、コレクタ兼バリア層 5 には厚み 200nm, n 型濃度 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ の $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}_{0.47}\text{P}_{0.31}\text{Sb}_{0.21}$ を、そして光吸収層 6 には厚み 1500nm, n 型濃度 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ の n 型 $\text{In}_{0.47}\text{Ga}_{0.53}\text{As}$ を用いてそれらを積層関係としている。

ベース層 4 およびコレクタ兼バリア層 5 に用いた $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{As}_{0.47}\text{P}_{0.31}\text{Sb}_{0.21}$ のバンドギャップは室温にて 0.95eV で、その伝導帯は InP エミッタ層 3 のそれに、その価電子帯は $\text{In}_{0.47}\text{Ga}_{0.53}\text{As}$ 光吸収層 6 のそれに、それぞれ整合されている。

さらに、図 3 (A), (B) に示したメサ構造 10, 11 の形成後、Zn 拡散層 12 が深さ $1 \mu\text{m}$ に渡って形成されている。本シミュレーションにおいては、表面結晶欠陥を設けているが、メサ構造側面からの Zn 拡散により表面電流が効果的に阻止される。

ベース層 4 とエミッタ層 3 間には伝導帯上でバリア Be を、価電子帯上にはバリア Bh を持つバンドプロファイルが形成される。エミッタ電極 1 に対しコレクタ電極 9 を正にバイアスした状態で光を照射すると、光吸収層 6 中で生成した正孔は表面側にドリフト電界を受けてベース層 4 に注入され、注入された正孔はバリア Bh によりベース層 4 内に閉じ込められる。この際、ベース層 4 のバンドプロファイルが下がり、すなわちエミッタ層 3 中の電子の移動を阻止していたバリア Be が小さくなり、エミッタ層 4 から電子が注入され、その大部分は再結合することなくベース層 4 を経由してコレクタ兼バリア層 5 に流れ出て、光照射で生成した正孔が電子電流として大きく増幅される。

一方、図 11 は、従来構造の DH 型 HPT のバンド構造のシミュレーション結果を示している。符号はダッシュが付されて本発明の素子における各層との対応が取られている。すなわち、エミッタコンタクト層は符号 2' で、エミッタ層は符号 3' で、ベース層は符号 4' で、コレクタ層は符号 5' で、光吸収層層は符号 6' で、そしてバッファ層は符号 7' で、それぞれ示されているが、ベース層 4' を、本発明とは異なり、バンドギャップ 0.95eV の

In_{0.86}Ga_{0.28}As_{0.61}P_{0.29} に置き換えた他は、図 4 に示した本発明に従う場合と同じ形状、組成である。この従来構造の場合には、伝導帯においてエミッタ層 3' とベース層 4' 間にバリア Be' が生じ、価電子帯においてはコレクタ層 5' と光吸収層 6' との界面位置 Pv' にバリアが生じて不連続であるのに対し、図 4 においては、それらの不連続点が除去され、バリアフリーとなっている。

図 5 は、200Kにおける光入力、電流出力特性を実線で示す本発明HPTの場合と破線で示す従来構造のHPTの場合で比較した図である。ベース層にInGaAsSbを用いた本発明HPTにおいては、光入力に対して電流出力は10fW程度に相当する素子内励起電流10fA付近からリニアに増加するのに対し、ベース層にInGaAsを用いた従来構造のHPTでは10fW程度以下で電流出力が遮断されている。またいくつかの電流出力変曲点が生じており、光入力に対する線形応答性が阻害されている。このように、従来のHPTでは、PD部の暗電流を抑制するために素子を冷却すると、トランジスタ部におけるキャリア走行がヘテロ界面のバンド不連続により阻害され、結果として、素子を冷却しても必ずしも感度の向上に繋がっていなかった。これに対し、本発明によれば、低温環境下での極微弱光入射時においてもトランジスタ部の電流増幅機能が担保され、数fW以下の検出感度を得ることができる。

図 6 は、図 2 (B) の材料構成例に従い、光吸収層 6 を InAs として感光波長領域を 3.5 μm まで拡張した場合のバンドプロファイルを示す。図中、実線は暗状態の場合、破線は強度 0.1W/cm² の光を照射した場合のバンドプロファイルである。計算を実行する上で具体的な材料パラメータは、エミッタ層 3 は厚み 100nm、n 型濃度 $2 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ の In_{0.58}Al_{0.42}As_{0.56}Sb_{0.44}、ベース層 4 は厚み 100nm、p 型濃度 $3 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ の In_{0.2}GaAsSb、コレクタ兼バリア層 5 は厚み 100nm、n 型濃度 $2 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ の In_{0.69}Al_{0.31}As_{0.65}Sb_{0.35}、そして光吸収層 6 は厚み 400nm、n 型濃度 $2 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ と厚み 2 μm 、濃度 $2 \times 10^{16}\text{cm}^{-3}$ の n 型 InAs を用いてそれらを積層したものであるとした。

なおエミッタ層 3 のバンドギャップおよび電子親和度はそれぞれ 0.95eV、4.2eV、

In_{0.2}GaAsSbベース層 4 のバンドギャップおよび電子親和度は0.62eV、4.17eV、コレクタ兼バリア層 5 のバンドギャップおよび電子親和度はそれぞれ0.75eV、4.4eV、とした。

また、InAsのバンドギャップおよび電子親和度を室温にて0.35eV、4.9eVとして計算した。さらに、計算を実行する上で、図 2 (B)に示した具体的なHPTの寸法として、エミッタ
5 タコンタクト層 2 を含む第二メサ構造の直径は4 μ m、ベース層 4 を規定する第一メサ構造の領域部分、即ち光吸収層 6 で光の実質的な吸収領域として機能する領域部分の直径は24 μ mとしている。コレクタ電圧は1Vとした。

本図のバンドギャッププロファイルにおいても、伝導帯においては、エミッタ層 3
からベース層 4 への接合部分においてコレクタ電流を制御するためのポテンシャルバリア
10 が形成されていることを除いて、ベース層 4、コレクタ兼バリア層 5 および光吸収層 6 に沿って、電子を基板方向に加速する方向にポテンシャル勾配が形成されている。一方、価電子帯においては、光吸収層 6 からコレクタ兼バリア層 5 を経由してベース層 4 に至る経路において、正孔を表面側方向に加速する電界が形成されている。

図 7 は、図 6 に示したバンドプロファイルを有するHPTのコレクタ電流を、当該HPT
15 に光照射発生した励起電流に対し、素子温度をパラメータとしてシミュレーションし、プロットしたものである。計算を実行する上で、図 2 (B)に示した具体的なHPTの寸法として、エミッタコンタクト層 2 を含む第二メサ構造の直径は4 μ m、ベース層 4 を規定する第一メサ構造の領域部分、即ち光吸収層 6 で光の実質的な吸収領域として機能する領域の直径を24 μ mとしている。コレクタ電圧は1Vとした。ちなみに、第二メサ構造の寸
20 法が小さい程、光の入射し得る面積は広がることは当然である。

図 7 において、例えば200K(約-70°C)での計算結果に着目すると、InAs光吸収層 6
における励起光電流値 10^{-10} Aに対応する動作点でのコレクタ電流は 10^{-5} A程度となり、本実施例でのHPTの感度は、 10^5 A/W程度となる。これは例えば上述した文献 6、7 に開示されている従来素子に比し、2~4桁以上大きく改善された値である。

25 なお、動作環境温度をさらに下げると、電子正孔対の生成が抑制されるため、暗電

流は大きく減少し、例えば150K(約-120°C)程度の動作では、暗電流は約2nA程度まで小さくなり、光強度に対するダイナミックレンジも5桁以上拡大される。

コレクタ兼バリア層5には、使用する環境温度で電子正孔対の生成が少ないバンドギャップを有する半導体を選択される。例えば室温近傍動作であれば1eV以上の半導体
5 が望ましい。また正孔もしくは電子のトンネリングによる通過を避けるため、数10nm以上の厚みに設定するのが望ましい。

本実施形態では、光吸収層6にInAsを用い、吸収波長帯を3.5μm程度までを想定しているが、より長波長の中赤外光ディテクタとするには、例えばInAsSb系の半導体を光吸収層6に用いれば良い。この場合約5μmまでの波長の光を検出できる。

10 図8は図2(C)に示した材料構成に従い、光吸収層6をInGaAsSbとし、感光波長領域を5μm付近まで拡張した場合のバンドプロファイルを示す。図中、実線は暗状態の場合、破線は強度0.1W/cm²の光を照射した場合のバンドプロファイルである。計算を実行する上での具体的材料パラメータは、エミッタ層3は厚み100nm, n型濃度 $2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ のIn_{0.8}Al_{0.2}As_{0.74}Sb_{0.26}、ベース層4は厚み100nm, p型濃度 $3 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ のIn_{0.15}Ga_{0.85}As_{0.14}Sb_{0.86}
15 、コレクタ兼バリア層5は厚み100nm, n型濃度 $2 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ のIn_{0.8}Al_{0.2}As_{0.74}Sb_{0.26}、そして光吸収層6は厚み2μm、濃度 $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ のn型In_{0.95}Ga_{0.05}As_{0.86}Sb_{0.14}であるとした。

なおIn_{0.8}Al_{0.2}As_{0.74}Sb_{0.26}エミッタ層3およびコレクタ兼バリア層5のバンドギャップおよび電子親和度はそれぞれ0.69eV、4.41eV、In_{0.15}Ga_{0.85}As_{0.14}Sb_{0.86}ベース層4のバンドギャップおよび電子親和度は0.56eV、4.14eVとした。また、In_{0.95}Ga_{0.05}As_{0.86}Sb_{0.14}光吸
20 収層6のバンドギャップおよび電子親和度を室温にて0.27eV、4.88eVとして計算した

図9は、光吸収層6をn型In_{0.95}Ga_{0.05}As_{0.86}Sb_{0.14}とし、そのキャリア濃度をそれぞれ $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ (実線) と $2 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ (破線) とした場合の受光により素子内部に発生した電流とコレクタ電流をプロットしたものである。光吸収層6のバンドギャップが狭くなると熱励起によるキャリアの影響により暗電流が増加する傾向にある。しかし、本素子
25 では、nBn構造に準じて、多数キャリアである電子流を遮断しているため、光吸収層の

電子濃度を増すことにより、暗電流の原因となる正孔濃度が減少する。実際、図 9 において光吸収層の電子濃度を増加することにより、暗電流が減少している。

下記の表 1 は、近中赤外帯および中赤外感度波長帯におけるバリアフリー (BF) 型 HPT のエピタキシャル層構成の設計例を示す。

5 (表 1)

波長感度域	エミッタ	ベース	コレクタ	光吸収層
~1.6 μm	InP	InGaAsSb 又は InAlGaAs	InAlGaAs	$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$
~2.5 μm	InAlAsSb	InGaAsSb	InGaAsSb	$\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}_{0.3}\text{Sb}_{0.7}$
~3.5 μm	InAlAsSb	InGaSb	InAlAsSb	InAs
~5 μm	InAlAsSb	InGaAsSb	InAlAsSb	$\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$ または $\text{In}_{0.95}\text{Ga}_{0.05}\text{As}_{0.86}\text{Sb}_{0.14}$

感度波長が 2.5 μm までの用途には、光吸収層として InGaAsSb コレクタ層を兼用できる。バンドギャップが小さくなる程、熱励起による暗電流成分が増加するため、使用波長に応じて、光吸収層のバンドギャップを最適化することが重要である。ベース層を
 10 InGaAsSb、コレクタ兼バリア層を InAlAsSb 系にすることにより、電子走行に関してコンダクションバンドをバリアフリーとする。一方、価電子帯は、InAlAsSb コレクタ層と InAs もしくは InAsSb 光吸収層とにおいてほぼバリアフリーとなるバンドプロファイルが実現できる。

PD 部の表面電流を抑制するために、図 10 (A), (B) に示すように、コレクタ露呈表面
 15 16 とベース層 4 およびエミッタ層 3 の側面 17 をドーナツ型に p 型選択拡散することにより、電氣的に接続した構造も有効である。図 10 (A) は平面図、図 10 (B) は図 (A) 中の B-B 線に沿う断面図であるが、本実施形態においては図 3 に示した構造におけると同じないし同様の構成要素には同じ符号を示しており、ここでの説明を省略するものに就いては、既になした図 3 に即しての説明を援用できる。但し、第一のメサ構造 10' は光吸収層 6

やコレクタ兼バリア層 5 を含まず、ベース層 4 とエミッタ層 3 とで構成されている。

この実施形態の構造において表面リーク電流を抑制するためには、コレクタ層 5 が光吸収層 6 に比べてワイドバンドギャップである必要がある。すなわち、このHPTのトランジスタ部はDH型HBTとなり、従来構造ではベース・コレクタ間のヘテロバリアにより、微弱光における電流増幅機能が阻害される。また、光吸収層 6 とコレクタ兼バリア層 5 間のヘテロバリアは、光生成された正孔のベース層 4 への移動を阻害する。そこで、ベース層 4、コレクタ兼バリア層 5、および光吸収層 6 に対し、既掲の表 1 に示した材料系を用いることにより、ベース層 4 の伝導帯の準位を持ち上げ、光吸収層 6 とコレクタ兼バリア層 5 の価電子帯を整合させることにより、耐電圧に優れ、暗電流が抑制されたHPTを実現することができる。実際、この実施形態のHPTでも、本発明に従い各層組成関係を選択することで、光照射に伴い、ベース層のバリアが消滅してバリアフリーとなり、良好な導通状態になる結果が得られている。但し、素子温度が下がると、細かなバンド不連続により電子や正孔の輸送が阻害されるため、ヘテロ界面の組成を徐々に変化させる、グレード組成構造を併用することが望ましい。

エミッタ・ベース接合のビルトインポテンシャルに関しては、使用する素子温度に対応する熱エネルギー kT の10倍程度が適当である。すなわち、室温に於ける kT は25meVであるので、室温動作デバイスでは0.25eV程度が適当であるが、素子温度を下げるに従って、ポテンシャルバリアを低くしないと、出力電流を確保できない。一般に、pn接合のターン・オン電圧は、その接合を形成する材料のバンドギャップ程度になるため、当該ターン・オン電圧を下げるためには、その接合を形成する材料のバンドギャップを狭くする必要がある。しかし、バンドギャップの狭い材料は一般的に再結合速度が大きく、暗電流の抑制や電流利得の確保が困難になる。なお、図10(A)、(B)に示すHPTのベース層 4 は p 型でも良いし、コンダクションバンドを高くした n 型半導体層でも良い。

また、これまで述べてきた所では、本発明HPTとして、第一メサ構造10(10')の中央部に第二メサ構造11が配置された構造例に就き説明して来たが、第一メサ構造10(10')

の周縁に沿った部分(外周部)に第二メサ構造11を配置しても良いし、第二メサ構造11が複数個所に分かたれて形成されていても良い。

請 求 の 範 囲

1. 第一導電型の半導体層により構成された光吸収層と、該光吸収層の上にコレクタ兼バリア層、ベース層、エミッタ層が順に積層されることで構成されたトランジスタ部とを有するフォトトランジスタにおいて；

5 上記コレクタ兼バリア層は、伝導帯におけるエネルギー準位が該光吸収層のそれより高く、価電子帯におけるエネルギー準位が該光吸収層のそれにほぼ一致するか高い、相対的に該光吸収層よりワイドギャップな半導体層から成り；

上記コレクタ兼バリア層の上に形成された上記ベース層は、該コレクタ兼バリア層に比して相対的にナローギャップで、その伝導帯におけるエネルギー準位は該コレクタ
10 兼バリア層との界面において該コレクタ兼バリア層のそれに一致するか高く；

上記ベース層の上に形成された上記エミッタ層は、該ベース層に比して相対的にワイドギャップで、伝導帯におけるエネルギー準位は該ベース層との界面において該ベース層のそれに一致するか低く、価電子帯におけるエネルギー準位は該ベース層のそれよりは低い上記第一導電型の半導体層から成ること；

15 を特徴とするヘテロ接合バイポーラフォトトランジスタ。

2. 上記ベース層は、上記第一導電型とは逆極性の第二導電型の半導体層から成ること；

を特徴とする請求項 1 記載のヘテロ接合バイポーラフォトトランジスタ。

3. 上記ベース層は、その中央部分は上記第一導電型の半導体層から成るが、周辺部
20 は該中央部分とは逆極性の第二導電型となっていること；

を特徴とする請求項 1 記載のヘテロ接合バイポーラフォトトランジスタ。

4. 上記光吸収層と上記コレクタ兼バリア層がメサ構造として構成され、該メサ構造の露呈側面部分が上記第一導電型あるいは該第一導電型とは逆極性の第二導電型に統一され、該光吸収層と該コレクタ兼バリア層により構成されるpn接合部分が側面において
25 露出しないこと；

を特徴とする請求項 1 記載のヘテロ接合バイポーラフォトトランジスタ。

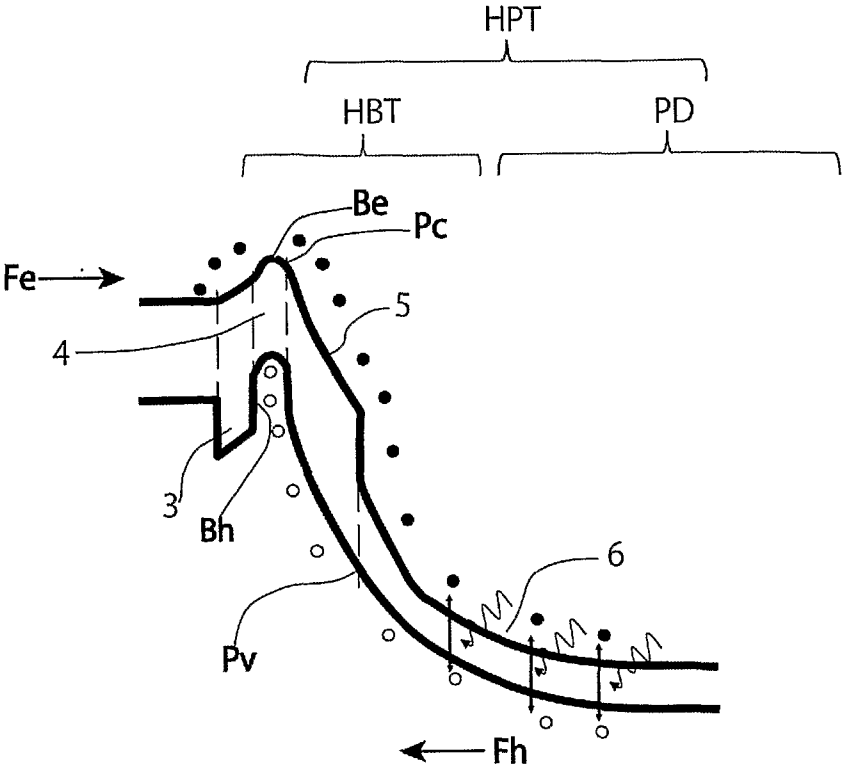
5. 上記光吸収層をInGaAs、上記コレクタ兼バリア層をInGaAsPSb、上記ベース層をInGaAsPSb、上記エミッタ層をInP半導体で構成したこと；

を特徴とする請求項 1 記載のヘテロ接合バイポーラフォトトランジスタ。

- 5 6. 上記光吸収層をInAsあるいはInAsSb、上記コレクタ兼バリア層をInAlAsSb、上記ベース層をInGaSbあるいはInGaAsSb半導体、そして上記エミッタ層をInAlAsSb半導体で構成したこと；

を特徴とする請求項 1 記載のヘテロ接合バイポーラフォトトランジスタ。

図 1



2/12

図2(A)

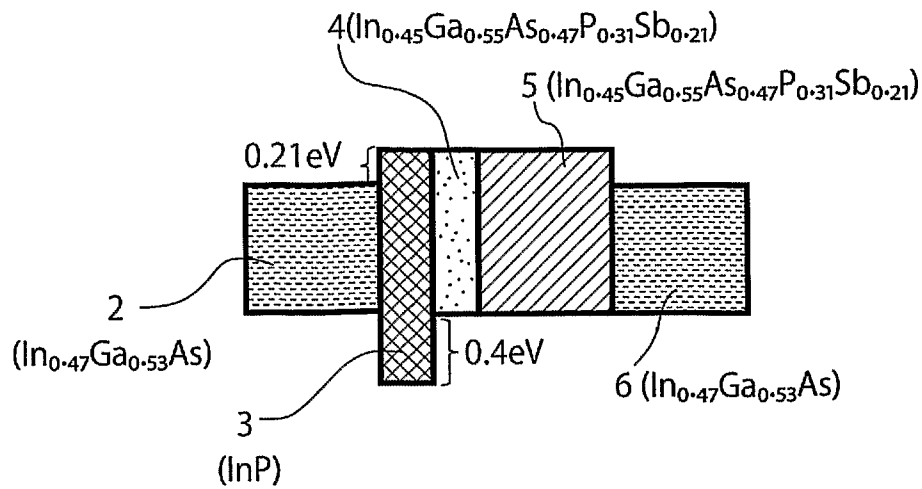


図2(B)

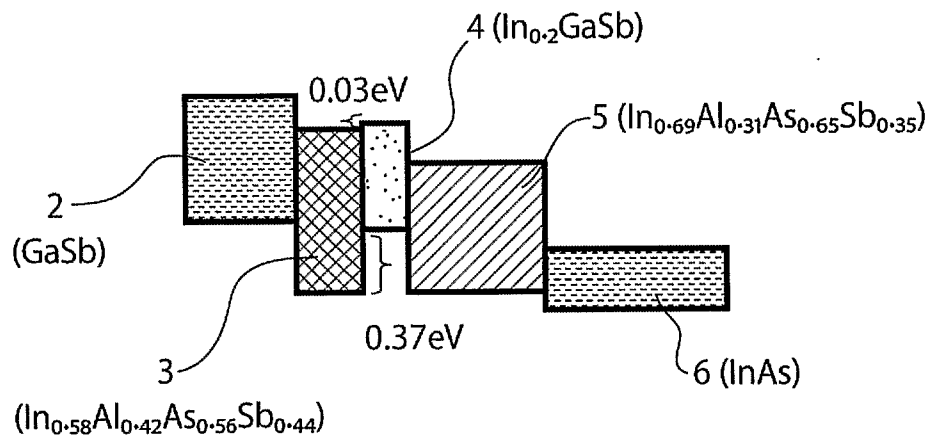


図2(C)

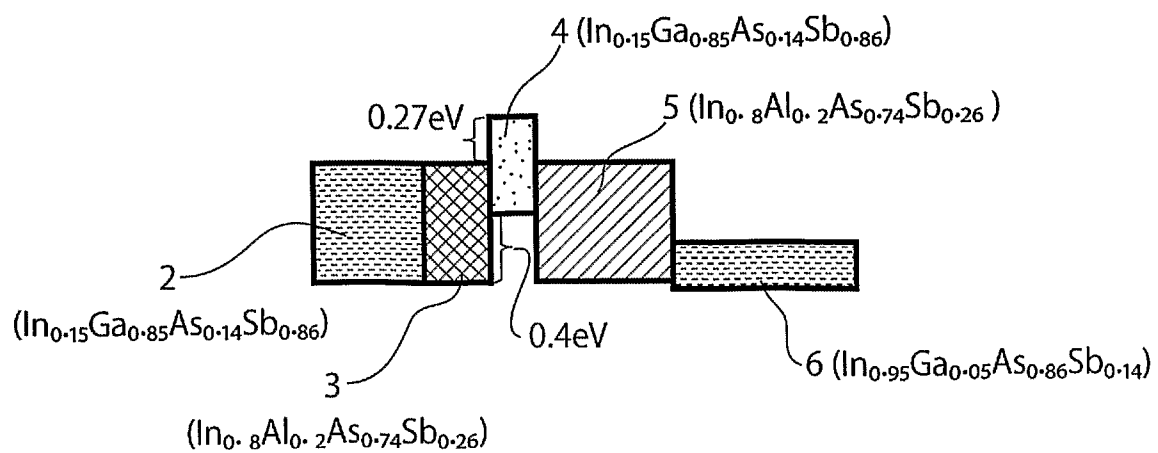


図3(A)

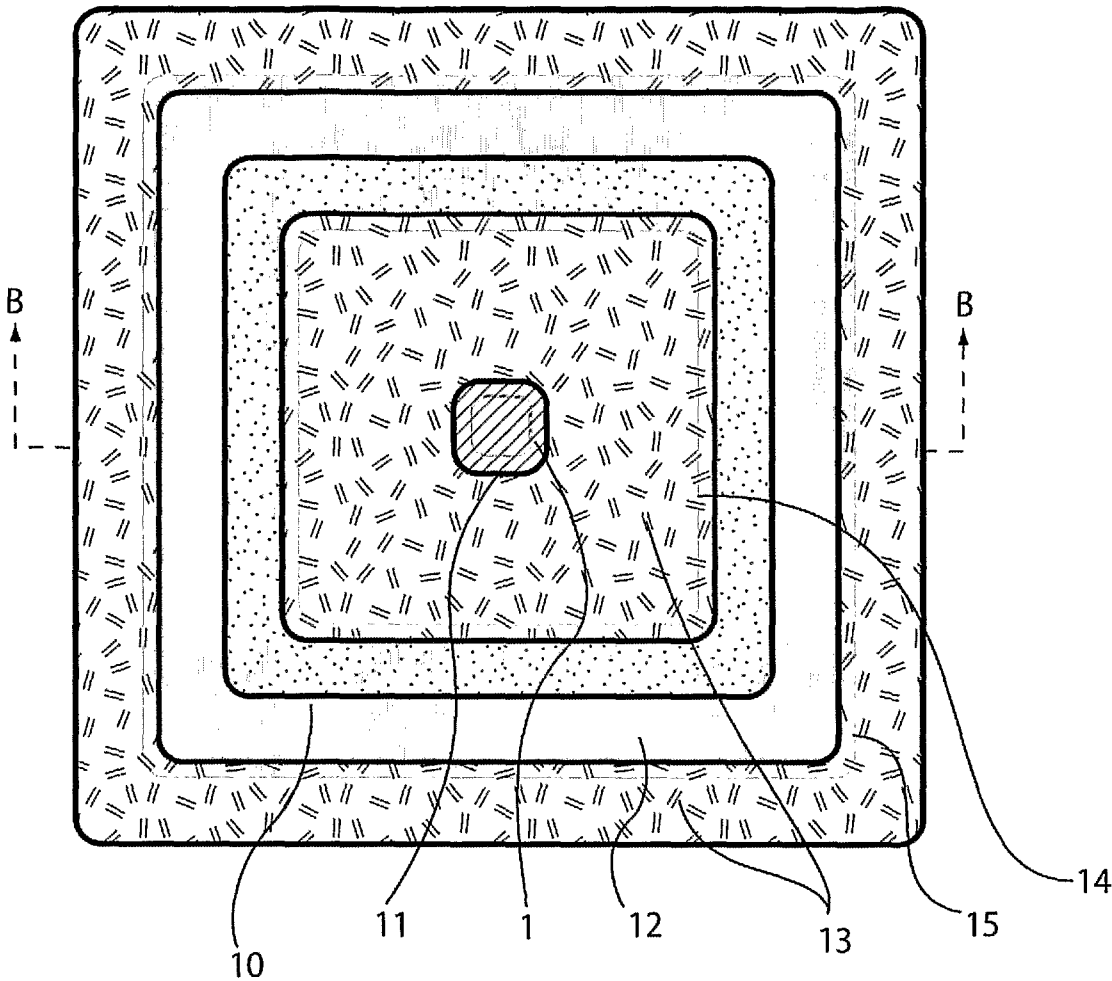
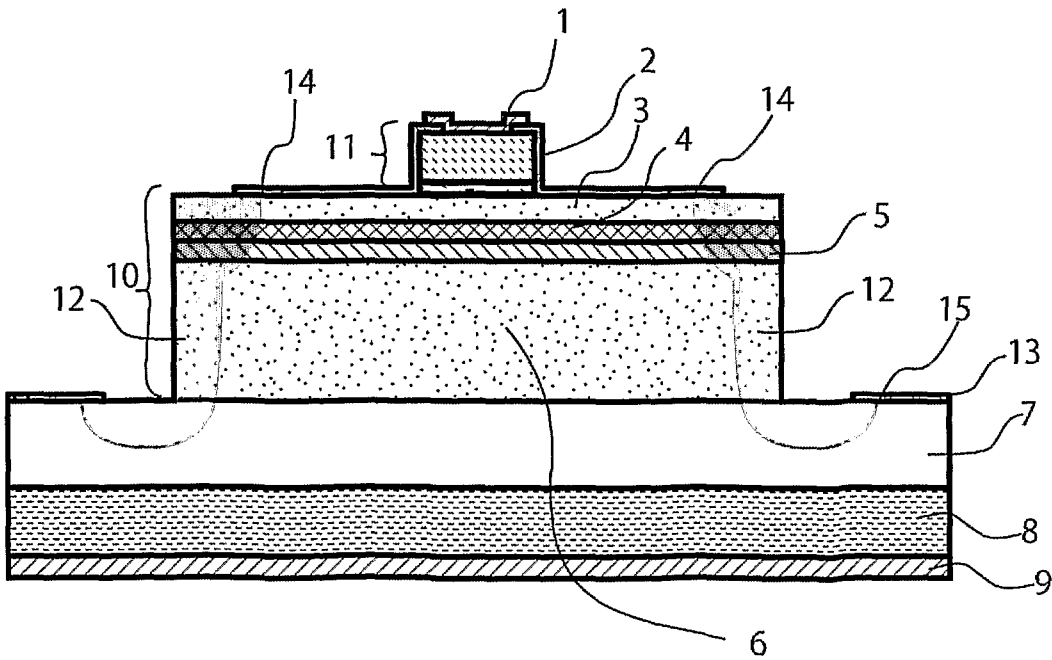
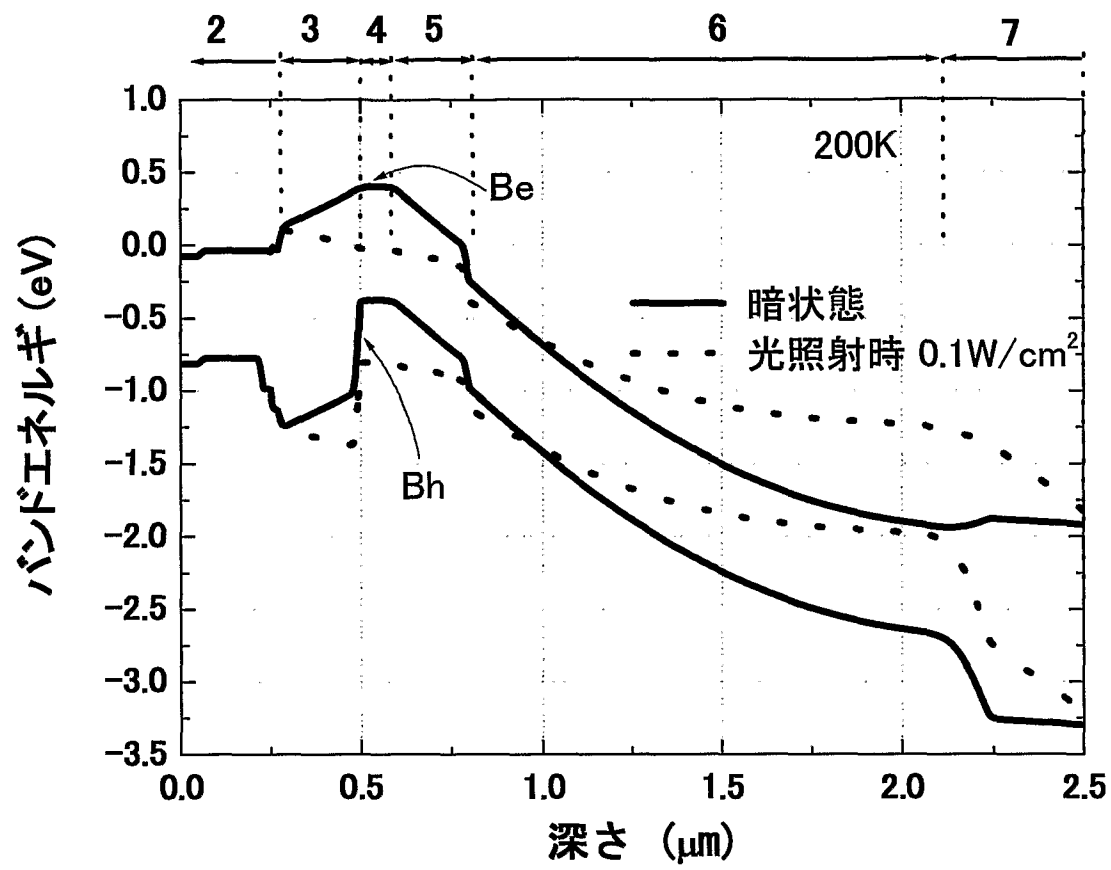


図3(B)



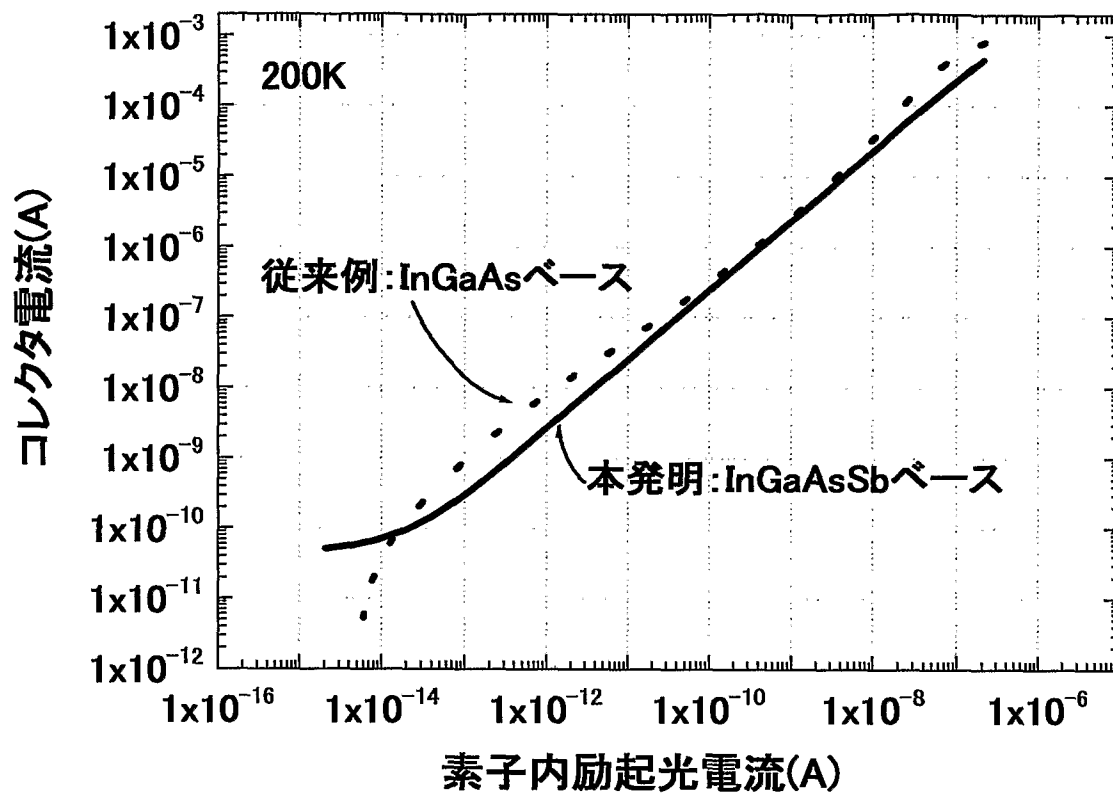
4/12

図4



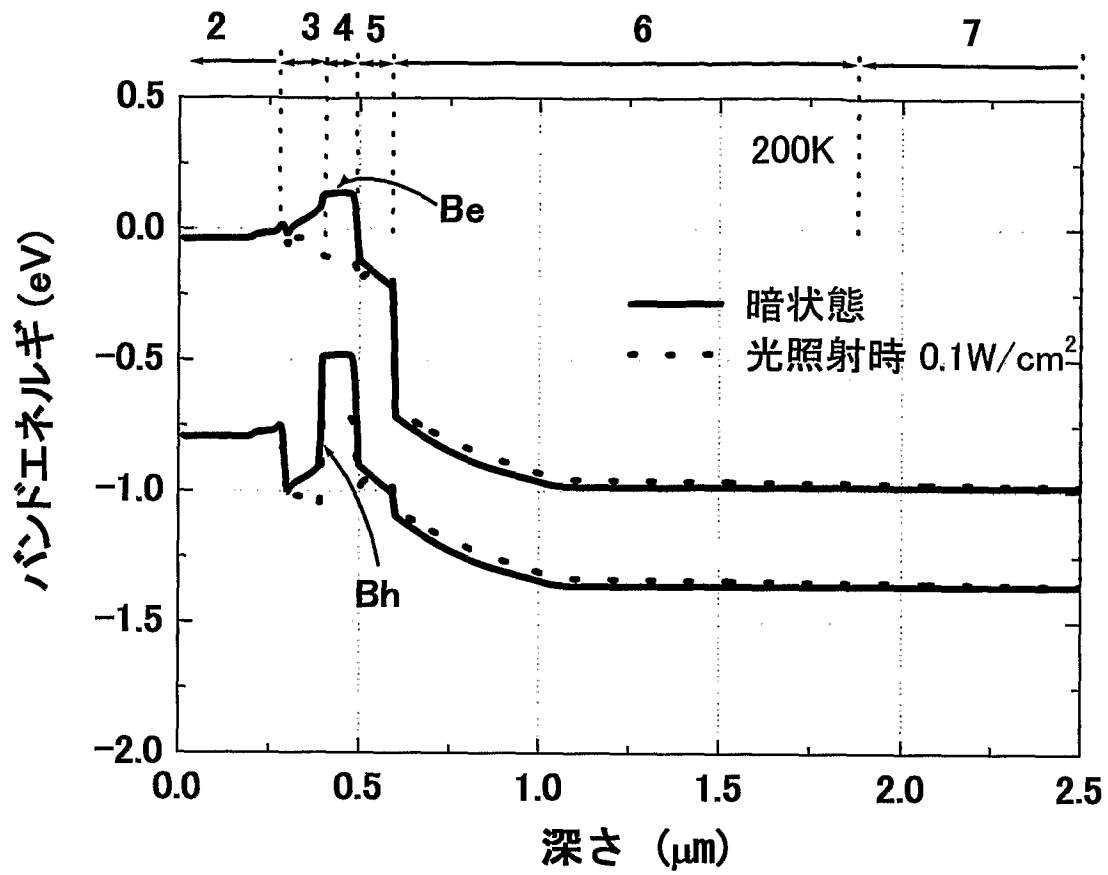
5/12

図5



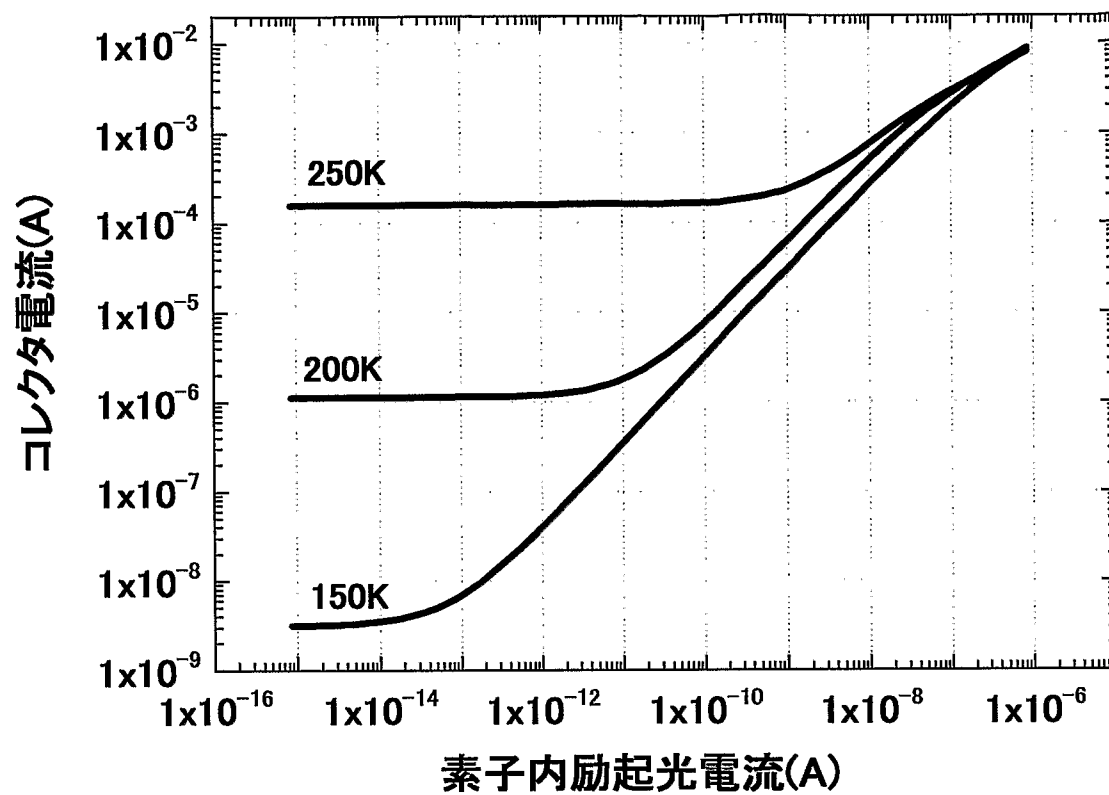
6/12

図6



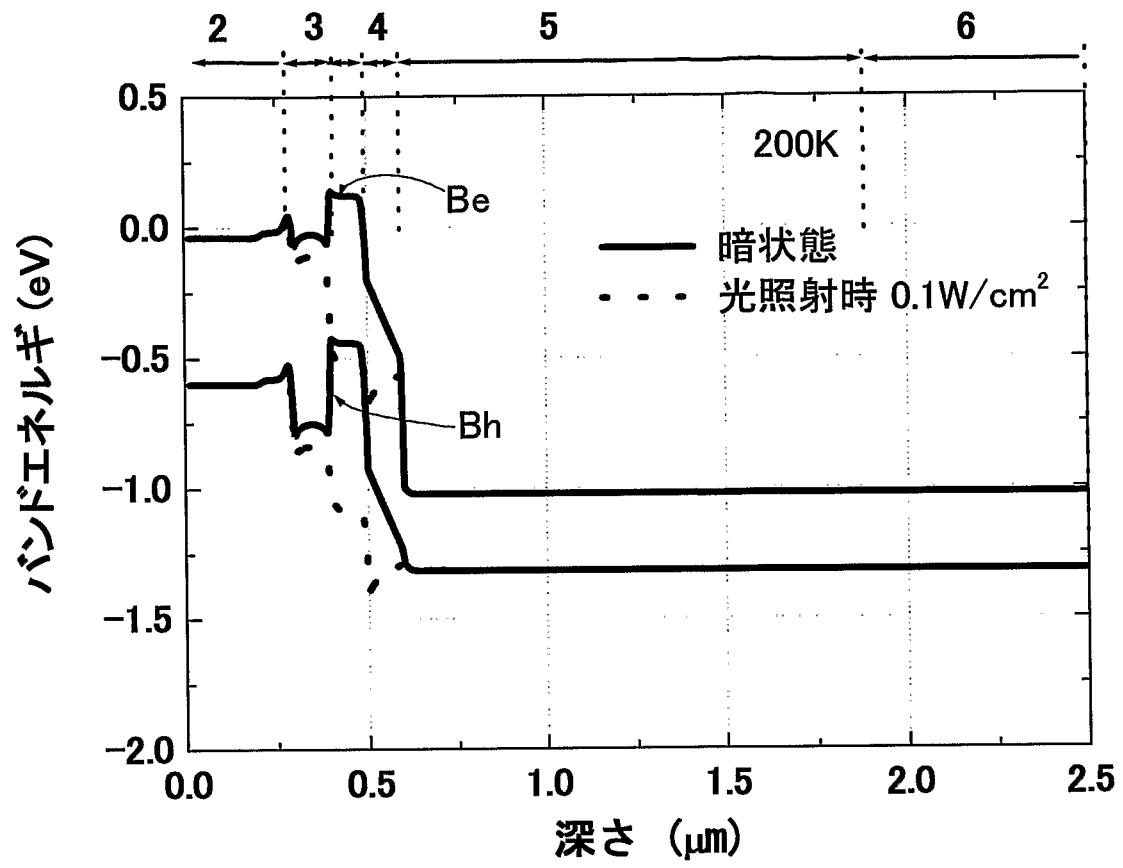
7/12

図7



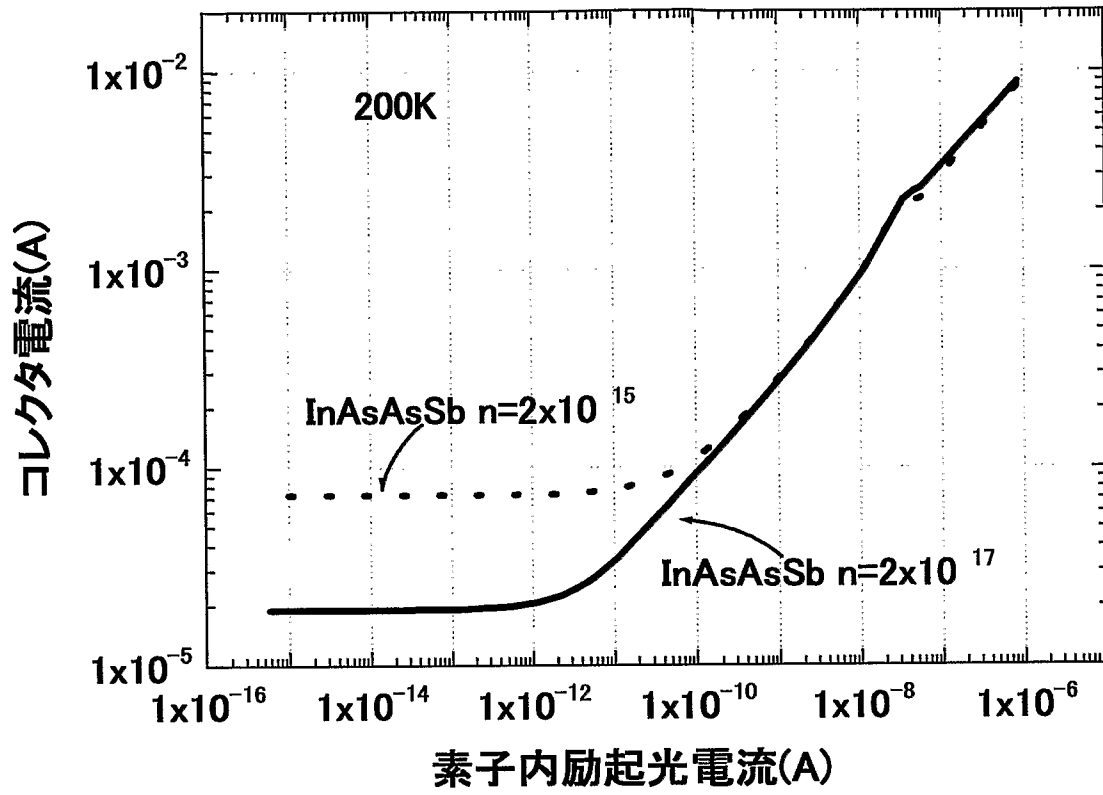
8/12

図8



9/12

図9



10/12

図 10(A)

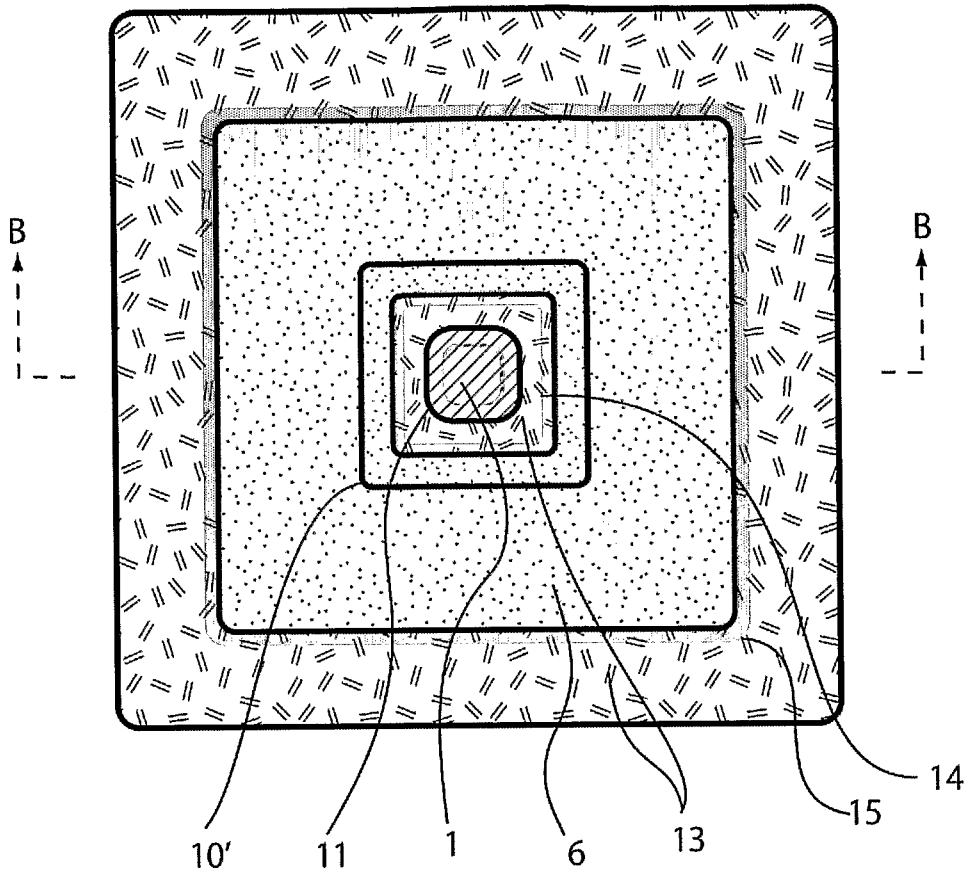
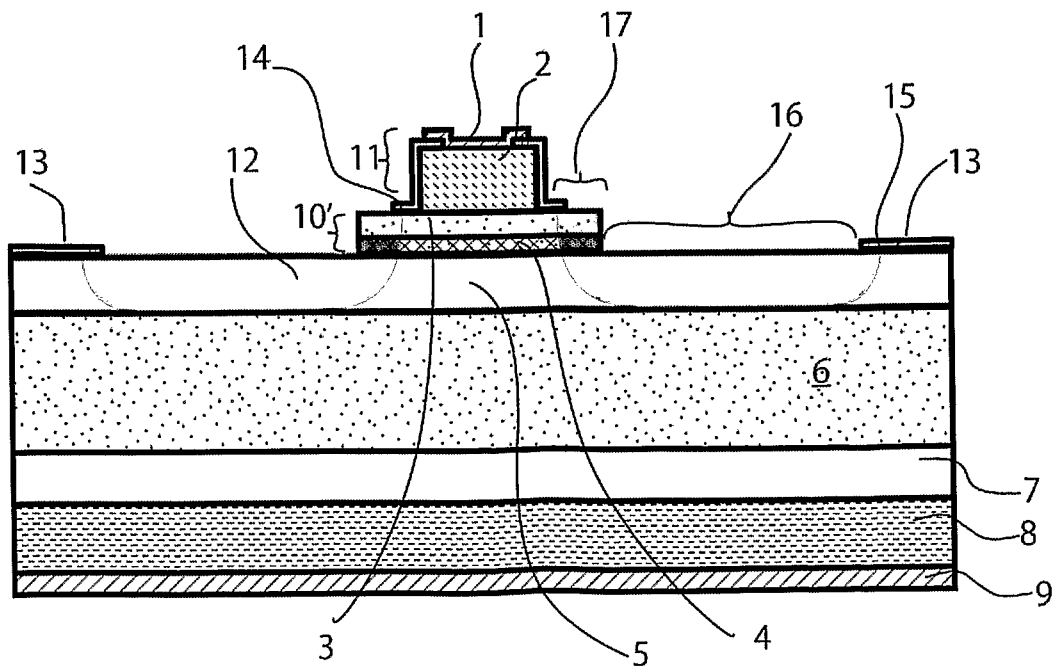
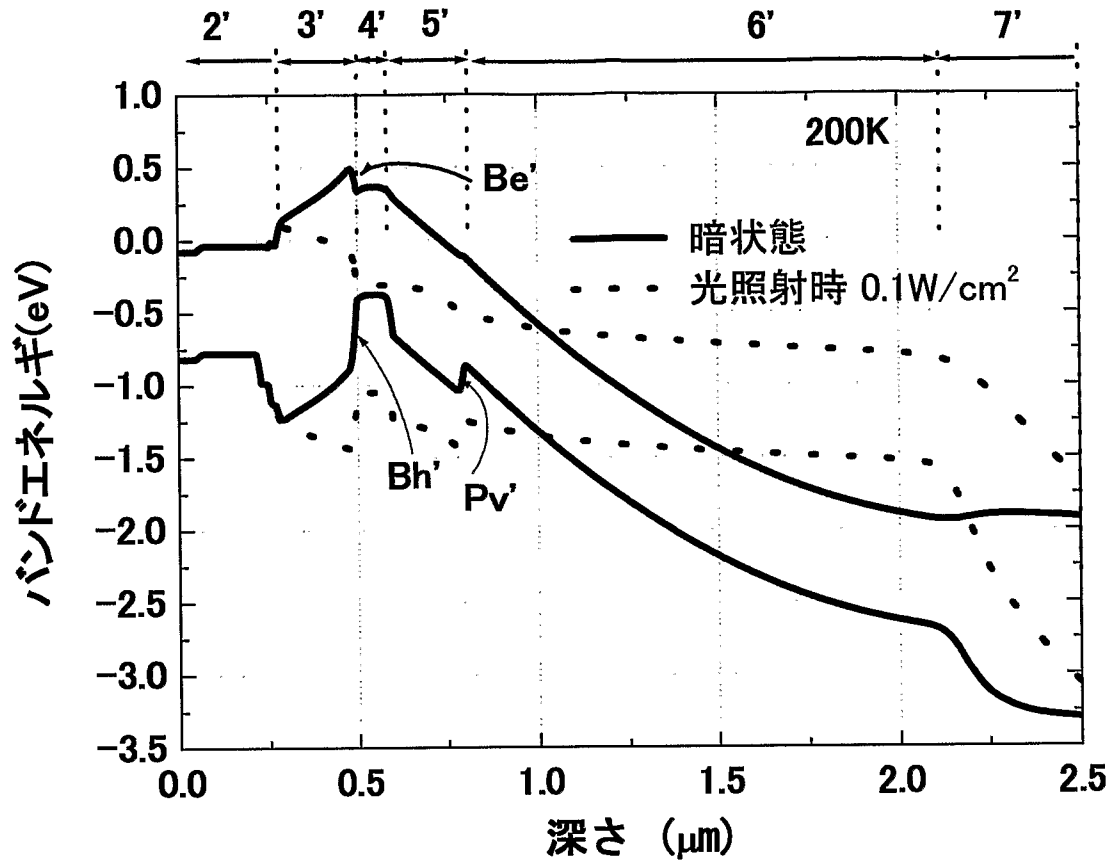


図 10(B)



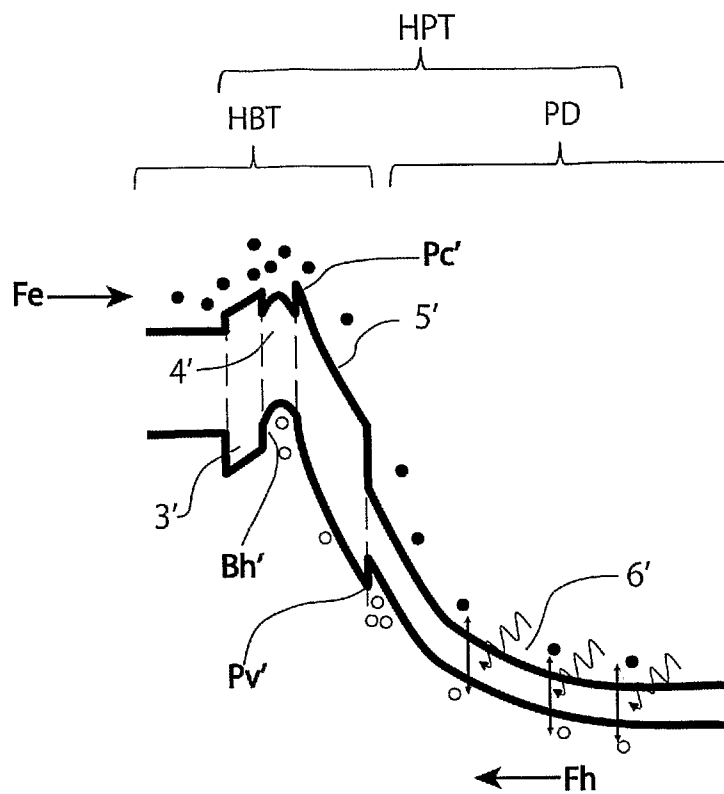
11/12

図 11



12/12

図 12



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2010/052485

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01L31/10 (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)

H01L31/10

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	1996-2010
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2010	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2010

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 2008-227328 A (Nippon Telegraph And Telephone Corp.), 25 September 2008 (25.09.2008), entire text; all drawings (Family: none)	1-6

☐ 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
15 April, 2010 (15.04.10)

Date of mailing of the international search report
27 April, 2010 (27.04.10)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. H01L31/10(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. H01L31/10

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 1 0年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6－2 0 1 0年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4－2 0 1 0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
A	JP 2008-227328 A（日本電信電話株式会社）2008.09.25, 全文、全図（ファミリーなし）	1－6

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

1 5 . 0 4 . 2 0 1 0

国際調査報告の発送日

2 7 . 0 4 . 2 0 1 0

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）

瀬川 勝久

2 K

9 1 2 0

電話番号 0 3－3 5 8 1－1 1 0 1 内線 3 2 5 5