

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2004-336039

(P2004-336039A)

(43) 公開日 平成16年11月25日(2004.11.25)

(51) Int. Cl.⁷

H01S 5/183

F I

H01S 5/183

テーマコード(参考)

5F173

審査請求 未請求 請求項の数 11 O L (全 17 頁)

(21) 出願番号 特願2004-133673(P2004-133673)
 (22) 出願日 平成16年4月28日(2004.4.28)
 (31) 優先権主張番号 10/427585
 (32) 優先日 平成15年4月30日(2003.4.30)
 (33) 優先権主張国 米国(US)

(71) 出願人 399117121
 アジレント・テクノロジーズ・インク
 AGILENT TECHNOLOGIES, INC.
 アメリカ合衆国カリフォルニア州パロアルト
 ページ・ミル・ロード 395
 395 Page Mill Road
 Palo Alto, California
 U. S. A.
 (74) 代理人 100087642
 弁理士 古谷 聡
 (74) 代理人 100076680
 弁理士 溝部 孝彦
 (74) 代理人 100121061
 弁理士 西山 清春

最終頁に続く

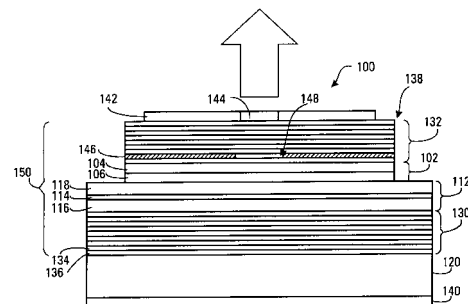
(54) 【発明の名称】 トンネル接合構造を組み込んだGaAsベースの長波長レーザ

(57) 【要約】

【課題】 GaAsを主材料とするレーザで利用することができる電圧降下の小さいトンネル接合構造を有する発光デバイスを提供する。

【解決手段】 本発明の発光デバイスは、ガリウム砒素からなる基板(120)と、n型の間隙層(114)及びp型の間隙層(116)からなる活性領域(112)と、p型の間隙層に隣接するp型のトンネル接合層(106)及びn型のトンネル接合層(104)及びp型のトンネル接合層とn型のトンネル接合層との間のトンネル接合からなるトンネル接合構造(102)とを備え、p型のトンネル接合層(106)が、ガリウムと砒素を含むp型の第1の半導体材料からなる層よりなり、n型のトンネル接合層(104)が、インジウム、ガリウム、リンを含むn型の第2の半導体材料からなる層よりなることを特徴とする。

【選択図】 図3A



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

ガリウム砒素からなる基板 (120) と、
 n 型の間隙層 (114) 及び p 型の間隙層 (116) からなる活性領域 (112) と、
 前記 p 型の間隙層に隣接する p 型のトンネル接合層 (106) 及び、n 型のトンネル接合層 (104) 及び、前記 p 型のトンネル接合層と前記 n 型のトンネル接合層の間のトンネル接合からなるトンネル接合構造 (102) とを備え、

前記 p 型のトンネル接合層 (106) が、ガリウムと砒素を含む p 型の第 1 の半導体材料からなる層よりなり、

前記 n 型のトンネル接合層 (104) が、インジウム、ガリウム、リンを含む n 型の第 2 の半導体材料からなる層よりなる発光デバイス (100)。 10

【請求項 2】

前記第 2 の半導体材料がある割合のインジウムを含み、それによって前記第 2 の半導体材料の格子定数が、前記第 1 の半導体材料の格子定数と整合する請求項 1 に記載の発光デバイス。

【請求項 3】

前記第 1 の半導体材料がガリウム砒素であり、

前記第 2 の半導体材料がインジウムガリウムリンである請求項 1 又は 2 に記載の発光デバイス。

【請求項 4】

前記インジウムガリウムリンが、約 0.51 の割合のインジウムを含む請求項 3 に記載の発光デバイス。 20

【請求項 5】

前記 n 型のトンネル接合層 (304) がさらに、前記第 2 の半導体材料からなる層 (332) と前記 p 型のトンネル接合層 (306) との間に挟まれている n 型の第 3 の半導体材料からなる層 (330) よりなり、

前記第 3 の半導体材料が、インジウム、ガリウム、砒素を含む請求項 1 ~ 4 のいずれか一項に記載の発光デバイス。

【請求項 6】

前記第 2 の半導体材料と前記第 3 の半導体材料が、前記層の間に歪み補償をもたらす組成をそれぞれ有する請求項 5 に記載の発光デバイス。 30

【請求項 7】

前記第 1 の半導体材料がガリウム砒素であり、

前記第 2 の半導体材料がインジウムガリウムリンであり、

前記第 3 の半導体材料がインジウムガリウム砒素である請求項 5 又は 6 に記載の発光デバイス。

【請求項 8】

前記 p 型のトンネル接合層 (406) がさらに、前記第 1 の半導体材料からなる層 (442) と前記第 3 の半導体材料からなる層 (430) との間に挟まれている p 型の第 4 の半導体材料からなる層 (440) よりなり、前記第 4 の半導体材料が、ガリウム、砒素、アンチモンを含む請求項 5 ~ 7 のいずれか一項に記載の発光デバイス。 40

【請求項 9】

前記第 4 の半導体材料と前記第 3 の半導体材料が、前記層の間に歪み補償をもたらす組成をそれぞれ有する請求項 8 に記載の発光デバイス。

【請求項 10】

前記第 1 の半導体材料がガリウム砒素であり、

前記第 2 の半導体材料がインジウムガリウムリンであり、

前記第 3 の半導体材料がインジウムガリウム砒素であり、

前記第 4 の半導体材料がガリウム砒素アンチモンである請求項 8 又は 9 に記載の発光デバイス。 50

【請求項 1 1】

前記発光デバイスが面発光レーザであり、

前記発光デバイスがさらに、同じ導電型の光共振器を画定するとともに相対する半導体反射器を含み、

前記活性領域と前記トンネル接合構造が前記光共振器内に位置している請求項 1 ~ 1 0 のいずれか一項に記載の発光デバイス。

【発明の詳細な説明】

【背景技術】

【0001】

発光デバイスは光通信システムを含む多くの用途で使用されている。光通信システムは大きな信号帯域幅を提供できるため、光通信システムの利用は増加の一途をたどっている。光ファイバは典型的に、約1.2マイクロメートル (μm) から約1.6 μm の範囲でもっとも低い減衰を有するため、多くの光通信システムはこの範囲の比較的長い波長で動作する。長い波長の光通信システムは、このような比較的長い波長で発光する光源を必要とする。多くの光通信システムでは、光源として面発光レーザ (VCSEL) が使用されるが、他の様式の光源も利用可能である。

10

【0002】

VCSELは典型的に、基板の主平面に対して平行に配置され、一般に分散ブラッグ反射器 (DBR) と呼ばれている 1 対のミラー (反射器) によって画定される光共振器によって特徴付けられている。光共振器は一般的に間隙層の対の間に挟まれている量子井戸構造を含む活性領域を含む。量子井戸構造は 1 つ又はそれ以上の数の量子井戸を画定し、N 個の量子井戸層と、その N 個の量子井戸層と交互に配置されている N + 1 個の障壁層を含み、ここで N = 1 である。2 つの障壁層の間に挟まれている各量子井戸層が、それぞれの量子井戸を画定する。典型的には量子井戸構造の半導体材料にはドーパントを添加しない。

20

【0003】

間隙層のうちの一方は n 型の半導体材料の層であり、間隙層のうちの他方は p 型の半導体材料の層である。n 型と p 型の間隙層はそれぞれ、電子と正孔を量子井戸構造に注入し、さらに光共振器が、活性領域の材料内の多数の所望の発光波長の積分に等しい厚みを有するように、DBR間の距離が画定される。

【0004】

DBRは、異なる屈折率を有する材料の層を交互に重ねることによって製造される。層の対を構成する対の数と材料間の屈折率の差によって、総合的にDBRの反射率が画定される。反射率は波長に依存し、所望の発光波長でピークを有する。反射率が最大となる波長は、層の対を構成する層の厚みと、層の材料の屈折率によって決定される。DBRのうちの 1 つは他のDBRより少ない層の対を有し、そのため反射率がわずかに低い。VCSELによって生成される光は、DBRのうち反射率が低い方のDBRを介して放射される。

30

【0005】

ガリウム砒素 (GaAs) は、VCSELを製造するために圧倒的に多く使用される基板材料である。インジウムリン (InP) のような代替の材料と比較すると、GaAsウェハは実質上低コストであり、大きな直径のウェハが市販されており、より異なる結晶方向を有するウェハが市販されている。またGaAs上で良好な結晶性をもってエピタキシャル成長し、比較的大きな屈折率の差を有する半導体材料の対が存在する。このような材料の対の例は、ガリウム砒素 (GaAs) とアルミニウムガリウム砒素 (AlGaAs) である。GaAs上に成長されたこのような半導体材料から製造されたDBRは、他の基板材料上で成長される半導体材料から製造されたDBRよりも、少ない層の対で所与の反射率を得ることができる。

40

【0006】

動作において、隣接する間隙層によって量子井戸構造に注入されるキャリア、すなわち電子及び正孔は、量子井戸内に閉じ込められ、ここで再結合して所望の発光波長の光が生成する。量子井戸構造の層の材料は、所望の波長の発光をもたらすように選択される。

【0007】

50

多くの従来の様式のVCSELは、半導体材料を層の対の材料として利用する半導体DBRを使用する。このようなVCSELの例では、基板側のDBRを基板上に配置し、ついでn型の間隙層、量子井戸構造、p型の間隙層を順番に基板側のDBR上に配置し、そしてp型の間隙層の上に、基板から遠隔位置にある遠隔側のDBRを配置する。このようなDBRでは、典型的に、電流は遠隔側のDBRの上面に配置されている電極から、基板の底部に配置されている電極に流れる。DBRは、隣接する間隙層と同じ導電性を有するようにドーピングされ、導電性を有する。すなわち、基板側のDBRはn型にドーピングされ、遠隔側のDBRはp型にドーピングされている。

【0008】

従来のVCSELは、p型のDBRにおいて高い光損失と過剰なジュール加熱という問題を有する。これらの問題は、光共振器内にトンネル接合を組み込むことにより解決することができる。このときトンネル接合を組み込むことにより、両方のDBRをn型にドーピングすることができる。2つのn型のDBRを有するVCSELは、1つのDBRがn型でもう1つがp型であるVCSELと比較すると、少ない光損失と高い導電性を有する。光損失が低減されることの大きな利点は、閾値利得が低くなることであり、これに対応して差動利得が高くなることである。差動利得は、特にVCSELなど半導体レーザーで高い帯域幅変調を達成するための重要な要素である。

10

【0009】

図1は、トンネル接合を画定するトンネル接合構造12を組み込まれている例示的な半導体デバイス10の側面図である。半導体デバイス10は、たとえばVCSELの一部とすることができる。トンネル接合構造は、n型のトンネル接合層14、p型のトンネル接合層16、トンネル接合層の間のトンネル接合20を含む。n型のトンネル接合層はn型の半導体材料の層である。p型のトンネル接合層はp型の半導体材料の層である。

20

【0010】

半導体デバイス10はさらに、上にn型のトンネル接合層14が成長するn型の層22と、p型のトンネル接合層16の上に成長したp型の層24を含む。n型の層22は半導体デバイス10の基板を構成してもよい。代替的に、n型の層22は基板上又は基板を覆って成長させることができる。

【0011】

トンネル接合20を横切って逆バイアスを印加することによって、トンネル電流がトンネル接合を横切って流れる。逆バイアスは、n型のトンネル接合層14を、p型のトンネル接合層16より正の電圧に設定することによって印加される。トンネル接合20の逆導電特性は閾値特性を有する。すなわち、相当なトンネル電流が流れる前に、トンネル接合を横切る閾値電圧よりも大きな電圧を印加しなければならない。半導体デバイス10を横切る電圧降下を低減し、トンネル接合内の電力の浪費を低減するには、トンネル接合20を横切る電圧降下を最小化することが望ましい。

30

【0012】

トンネル接合20を横切る電圧降下は、トンネル接合を横切る組み込まれた大きな静電場を確立する半導体材料からなるトンネル接合構造12を形成することによって低減することができる。大きな静電場は、短い距離を横切る大きな電位差を必要とする。トンネル接合を横切る電圧の低下を最小化する従来の方法は、トンネル接合層14と16の半導体材料内のドーピング濃度を最大化することにより、トンネル接合の空乏領域の幅を最小化することに焦点が当てられていた。

40

【0013】

図2Aと図2Bは各々、トンネル接合構造12の特徴の一部を示す概略的なエネルギー図40と電気回路モデル42を含む。図2Aはバイアスを印加、適用しないトンネル接合構造の特徴を示す。図2Bは逆バイアスを印加したトンネル接合構造の特徴を示す。各エネルギー図は、n型のトンネル接合層14の半導体材料の伝導帯エネルギー E_{CN} と価電子帯エネルギー E_{VN} を示し、さらにp型のトンネル接合層16の半導体材料の伝導帯エネルギー E_{CP} と価電子帯エネルギー E_{VP} を示す。n型のトンネル接合層14とp型のトンネル接合層16は、集

50

合的にトンネル接合20を形成する。また各エネルギー図は、n型のトンネル接合層14の半導体材料のフェルミレベル E_{FN} と、p型のトンネル接合層16の半導体材料のフェルミレベル E_{FP} も示す。

【0014】

図2Aのエネルギー図は、バイアスを印加しない場合に、トンネル接合20に存在する空乏領域44を示す。バイアスを印加しない場合、n型のトンネル接合層の半導体材料のフェルミレベル E_{FN} は、p型のトンネル接合層16の半導体材料のフェルミレベル E_{FN} と等しくなる。トンネル接合層の材料の伝導帯のエネルギーは異なるので、低い順方向バイアスを印加した場合にトンネル接合を介した伝導を防ぐ、組み込まれた電位障壁46がトンネル接合において確立される。トンネル接合における静電場の強度は、組み込まれた電位障壁の高さに依存し、また空乏領域44の幅 W に反比例する。

10

【0015】

順方向バイアスをトンネル接合20を横切って印加すると、トンネル接合における組み込まれた電位障壁の高さが低下する。十分な順方向バイアスにより、電流が順方向でトンネル接合を横切って流れる。順方向バイアスは、p型のトンネル接合層16をn型のトンネル接合層14より正の電圧又は高い電圧に設定することによって確立される。順方向バイアスを印加すると空乏層44の幅は狭くなる(図示せず)。

【0016】

図2Bに示すように、トンネル接合20を横切って逆バイアスを印加すると、組み込まれた電位障壁の高さが増加し、空乏領域44の幅が W' に増大する。逆バイアスは、フェルミレベル E_{FN} と E_{FP} をトンネル接合の相対する側に分離する。示す例では、p型のトンネル接合層16の材料のフェルミレベル E_{FP} は、バイアスを印加しないときのレベルに対して増大するが、n型のトンネル接合層14の材料のフェルミレベル E_{FN} は実質上変わらず、維持される。従来のp-n接合では、幅の広い空乏領域により、逆バイアスを印加しても接合を横切って流れる漏れ電流はわずかであった。しかしながらトンネル接合20では、狭い空乏領域を横切る逆バイアスを印加すると、電子は電位障壁を介して、p型のトンネル接合層16の価電子帯からn型のトンネル接合層の伝導帯にトンネル効果によって移動する。

20

【0017】

逆バイアスによって、p型のトンネル接合層16の半導体材料の価電子帯エネルギー E_{VP} は、n型のトンネル接合層14の半導体材料の伝導帯エネルギー E_{CN} より上のレベルにまで上昇される。これにより、図2Bに概略的に示すように、p型のトンネル接合層の半導体材料の価電子帯内の電子が、電位障壁を介して、n型のトンネル接合層14の半導体材料の伝導帯の非占有位置にトンネル効果、トンネリングにより移動する。トンネル接合20を横切って印加される逆バイアスが大きいほど、電子 e^- がトンネル接合20を横切ってトンネリングを起こす可能性は高くなり、またトンネル接合を横切る伝導も大きくなる。

30

【0018】

従来のトンネル接合構造12では、トンネル接合層14と16の半導体材料は、比較的大きなバンドギャップエネルギーの差を有する。このような材料により、トンネル接合20において比較的高いトンネル障壁が確立される。したがって、レーザダイオードのレーザ電流の水準のトンネル電流を流すためには、トンネル接合構造を横切る大きな逆バイアスを印加しなければならない。よって、このようなトンネル接合構造は典型的には大きな電圧降下を有するが、これは通常望ましくない。上記のように、トンネル接合を横切る電圧降下は、従来、トンネル接合層を可能な限り高いドーパント濃度でドーブすることによって低減されている。これによって空乏領域の幅が狭くなり、したがってトンネル現象の可能性が増大する。トンネル接合層のうち1つだけでも、縮退をもたらすドーブ濃度でドーブされていない場合、トンネル現象が始まる前に、フェルミレベルと帯域エッジの間の電圧差に等しい追加の逆バイアスを印加する必要がある。

40

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0019】

50

したがって、従来のGaAsを主材料とするトンネル接合構造よりも電圧降下が小さい、GaAsを主材料とするレーザにおいて利用することができるトンネル接合構造が必要とされている。

【課題を解決するための手段】

【0020】

本発明の一態様では、基板、活性領域、トンネル接合構造を備える発光デバイスが提供される。基板はガリウム砒素よりなる。活性領域は、n型の間隙層及びp型の間隙層からなる。トンネル接合構造は、p型の間隙層に隣接するp型のトンネル接合層、n型のトンネル接合層、p型のトンネル接合層とn型のトンネル接合層の間のトンネル接合からなる。p型のトンネル接合層は、ガリウムと砒素を含むp型の第1の半導体材料の層からなる。n型のトンネル接合層は、インジウム、ガリウム、リンを含むn型の第2の半導体材料の層からなる。

10

【0021】

本発明の別の態様では、光共振器を画定する同じ導電型の相対する半導体反射器からなる面発光レーザが提供される。面発光レーザはさらに、光共振器内に位置する活性領域とトンネル接合構造からなる。活性領域は、n型の間隙層とp型の間隙層からなる。トンネル接合構造は、p型の間隙層に隣接するp型のトンネル接合層、n型のトンネル接合層、p型のトンネル接合層とn型のトンネル接合層の間のトンネル接合からなる。p型のトンネル接合層は、ガリウムと砒素を含むp型の第1の半導体材料の層からなる。n型のトンネル接合層は、インジウム、ガリウム、リンを含むn型の第2の半導体材料からなる。

20

【0022】

n型のトンネル接合層の少なくとも一部を、インジウム、ガリウム、リンからなるn型の半導体材料によって形成することにより、n型のトンネル接合層を、n型のガリウム砒素から形成される従来のn型のトンネル接合層より一層高い濃度でドーピングすることができる。たとえば、シリコンをドーパントとして使用し、有機金属化学蒸着法(MOCVD)によって成長されたn型の半導体材料内では、現在 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ もの高いドーパント濃度がInGaPにおいて得られている。これに対し、GaAsで現在達成可能なドナードーパント濃度はもっとも高くても約 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ である。ドーパント濃度が高ければ、トンネル接合における空乏領域の幅が低減、狭められ、トンネル接合を横切る静電場が大きくなり、トンネル現象が発生する逆バイアスが低減される。

30

【0023】

トンネリング、トンネル現象が発生する逆バイアスをさらに低減させるために、トンネル接合層を各々、さらに、他のトンネル接合層と並列する別の半導体材料の層から形成することができる。

【発明の効果】

【0024】

本発明は、基板(120)、活性領域(112)、トンネル接合構造(たとえば102)を有する発光デバイスに関する。活性領域はn型の間隙層(116)とp型の間隙層(118)を有する。トンネル接合は、p型の間隙層に隣接するp型のトンネル接合層(106)と、n型のトンネル接合層(104)と、p型のトンネル接合層とn型のトンネル接合層の間のトンネル接合からなるトンネル接合からなる。p型のトンネル接合層は、ガリウムと砒素を含むp型の第1の半導体材料からなる層を含む。n型のトンネル接合層は、インジウム、ガリウム、リンを含むn型の第2の半導体材料からなる層を含む。第2の半導体材料内で達成可能な高いドーパント濃度が、トンネル接合における空乏領域の幅を狭くし、トンネル接合を横切る静電場を増大させ、それによってトンネリングが発生する逆バイアスが低下する。

40

【発明を実施するための最良の形態】

【0025】

図3Aは、本発明による発光デバイスの例としての、VCSEL 100の第1の実施形態を示す図である。VCSEL 100は、VCSELの一部を形成する電極間を通過する駆動電流にตอบสนองして

50

、所望の発光波長でコヒーレント光を生成する。VCSEL 100は、基板側の分散ブラッグ反射器 (DBR) 130、活性領域112、トンネル接合構造102、遠隔側のDBR 132からなり、これらは順に、基板120上にエピタキシャル成長されて形成されている。基板120は単結晶ガリウム砒素のウェハの一部である。

【0026】

DBR 130と132は各々、多数の層の対からなる。各層の対は、屈折率が異なる材料の2つの層からなる。層の材料は、所望の発光波長で光学的に透明である。図3Aは、屈折率の大きな材料からなる例示的な層134と、屈折率の小さな材料からなる例示的な層136を示し、これらは共に、基板側のDBR 130の例示的な層の対を構成する。層の対に加えて、各DBRは屈折率の小さな材料からなる付加的な層を含む。各層は、層の材料内で、望ましい発光波長の4分の1に等しい厚み、すなわち $t_b = \lambda / 4n_b$ である厚みを有し、ここで t_b は層の厚みであり、 λ は真空中での所望の発光波長であり、 n_b は層の材料の屈折率である。

10

【0027】

示す例では、DBR 130及びDBR 132はどちらも、ドーパされた半導体材料から製造され、したがって伝導性がある。屈折率の小さな半導体材料の層136は、アルミニウムガリウム砒素であり、屈折率の大きな半導体材料の層134はガリウム砒素である。どちらの半導体層も、たとえばシリコンなどのドナー不純物によってドーパされている。図面を簡単にするために、図3Aに示す層の対の数は、実質上少なくしている。基板側のDBR 130と遠隔側のDBR 132は各々、所望の発光波長において、それぞれ約99%と約95%より大きな反射率をもたらすのに十分な数の層の対を含む。

20

【0028】

活性領域112は、基板側の間隙層116と遠隔側の間隙層118の間に挟まれている量子井戸構造114からなる。量子井戸構造は、N個の量子井戸層 (図示せず) と、Nの量子井戸層と交互に配置されているN+1個の障壁層 (図示せず) からなり、ここでNは1と等しいか又は1より大きな整数である。量子井戸層と障壁層は、バンドギャップエネルギーが異なる半導体材料の層である。量子井戸層の半導体材料は、障壁層よりも低いバンドギャップエネルギーを有する。量子井戸構造を構成する層を成長させる時に、量子井戸構造の材料の中にはドーパントが添加されない。もっとも外側の障壁層は典型的には、量子井戸層の間に挟まれている障壁層より厚みがある。当業界では、このようなもっとも外側の障壁層をバッファ層と呼ぶこともある。

30

【0029】

量子井戸層のバルク半導体材料のバンドギャップエネルギーが、VCSEL 100の発光波長を決定する。所望の発光波長の光子エネルギーは、量子井戸層のバルク半導体材料のバンドギャップエネルギーよりわずかに高い。したがって、量子井戸構造の半導体材料は所望の発光層に依存する。

【0030】

示す例では、基板側の間隙層116と遠隔側の間隙層118は、アルミニウムガリウム砒素 (AlGaAs) の層であり、 $Al_xGa_{1-x}As$ のアルミニウムの割合 (アルミニウムの分率) は約0.2から約0.8の範囲、すなわち約0.2 \times 約0.8である。xの典型的な値は約0.4である。間隙層は相対する導電性を有するようにドーパされている。すなわち基板側の間隙層116は

40

【0031】

間隙層116と118は、活性領域112の厚みのほとんどの部分を構成する。活性領域は、活性領域の材料内で望ましい発光波長のM倍に対応する厚みを有する。すなわち $t_a = M \lambda / n_a$ であり、ここで t_a は活性領域の厚み、Mは1に等しいか1より大きな整数、 λ は真空中での所望の発光波長、 n_a は活性領域を構成する材料の実効的な屈折率である。

【0032】

基板側DBR 130と遠隔側DBR 132は、集合的に、VCSEL 100の所望の出力波長で共鳴する光共振器150を形成する。活性領域112とトンネル接合構造102は光共振器内に位置する。

【0033】

50

本発明による発光デバイスは、p型の間隙層に隣接して位置するトンネル接合構造を含む。VCSEL 100においては、トンネル接合構造102が遠隔側のp型の間隙層118と遠隔側のDBR 132の間に位置している。これによってDBR 130と132の双方の半導体材料を互いに同じ導電型、すなわちn型とすることが可能となり、どちらのDBRも優れた光学特性と電気特性を有することが可能になる。

【0034】

トンネル接合構造102は、p型の間隙層118に隣接して位置するp型のトンネル接合層106と、遠隔側のDBR 132に隣接して位置するn型のトンネル接合層104から構成されている。p型のトンネル接合層106は、ガリウムと砒素を含むp型の半導体材料の層からなる。n型のトンネル接合層104は、インジウム、ガリウム、リンを含むn型の半導体材料の層からなる。次に、より詳細に説明するように、トンネル接合層は両方とも高濃度にドーブされ、好ましくは縮退する程度にドーブされている。

10

【0035】

典型的にはVCSEL 100と同一のVCSELが数百も形成されている層構造は、GaAsのウェハ上に基板側のDBR 130、活性領域112、トンネル接合構造102、遠隔側のDBR 132に対応する層をエピタキシャル成長させて付着させることによって製造されている。遠隔側のDBR 132に対応する層の一部と、トンネル接合構造102の一部を、エッチングによって除去し、層構造の中に形成される各VCSELの位置を画定するメサ(台形形状部分)138を形成する。ついで各メサの中に電流閉じ込め構造を形成する。たとえば、メサの中にイオンを選択的に注入し、小さな、実質的に中央の導電領域以外のメサの導電性を低減させることができる。メサの導電性は導電領域内では実質上変化せず維持される。

20

【0036】

しかしながら、示す例では、電流閉じ込め構造は、AlGaAsの酸化速度が材料中のアルミニウムの割合に依存することを利用して形成されている。遠隔側のDBR 132に対応する層構造の層が成長される場合には、AlGaAsの層のうち少なくとも1つが、AlGaAsの残りの層よりも実質上大きなアルミニウムの割合をもって成長される。たとえば、アルミニウムの割合が大きな層、アルミニウムをより多く含む層は、AlGaAsの残りの層が約0.75から約0.85の範囲の割合のアルミニウムを含むときに、約0.9より多い割合のアルミニウムを含む。例示的に、アルミニウムの割合の大きなAlGaAs層を146に示す。メサ138を形成した後、層構造を、水蒸気含有量の多い雰囲気のような、酸化雰囲気内で加熱する。酸化雰囲気により、AlGaAsの全ての層の露出した領域が酸化され、酸化はメサの側部から放射状に内側に進行する。しかしながら、酸化は、アルミニウムを多く含むAlGaAs層146において、残りのAlGaAs層、アルミニウムをより少なく含むAlGaAs層よりも実質上速く進行する。酸化プロセスの終了時に、アルミニウムの割合の大きなAlGaAs層、アルミニウムをより多く含むAlGaAs層はほとんど酸化され、導電領域148を取り囲むアルミニウムの酸化物の広い環状の領域が形成される。アルミニウムの酸化物はドーブされたAlGaAsよりもはるかに低い導電性を有する。アルミニウムの割合の大きなAlGaAsは、導電領域148内では酸化されないまま残るので、導電領域の光学特性と電気特性は、実質上変化せず、維持される。残りのAlGaAs層は、周辺部の狭い環状の領域だけが酸化される。

30

【0037】

たとえばイオン注入、酸化、又は他の方法によって画定される導電領域148など導電領域の面積は、メサ138の面積と比べると小さい。VCSEL 100の動作の間、レーザ電流は導電領域内で閉じ込められ、非常に高い電流密度を達成する。レーザ電流は導電領域から活性領域112に入る。電流の広がり是比较的小さいので、電流密度は活性領域でも非常に高い。非常に高い電流密度によりVCSELの閾値電流が低下する。代替的な実施形態では、上述の酸化物電流閉じ込め構造が、トンネル接合構造102と活性領域112の間に位置している。別の代替的な例では、トンネル接合構造102が電流閉じ込めをもたらずように配列されている。

40

【0038】

少なくとも1つの金属の層を含む基板側の接触層140は、半導体材料の層がエピタキシ

50

ナル成長される表面から離れた側の、反対側のウェハの表面上に付着される。ウェハから隔置されている遠隔側の接触層142は、各VCSELの遠隔側のDBR 132の露出した面の上に付着され、パターン化されて、発光ポート144を画定している。発光ポートは導電領域148に対して放射状に整列している。遠隔側の接触層は少なくとも1つの金属層からなり、高いドーパント濃度を有する少なくとも1つのn型の半導体材料の層をさらに含み、金属層と遠隔側のDBR 132の間の接触抵抗を低減させることができる。さらに、層構造は、従来の単一化工程によって個別のVCSELに分割される。

【0039】

上記の製造工程を実行するために適した工程は当業界では知られているので、本明細書では説明しない。一例としては、上記の層構造は、有機金属化学蒸着法(MOCVD)を利用して製造することができる。他の適切な工程も当業界では公知である。 10

【0040】

図3Bは、本発明による発光デバイスの例としてのVCSELの別の実施形態160を示す。図3Aに関して上述したVCSEL 100の要素に対応するVCSEL 160の要素は、同じ参照番号を使用して示し、ここでは詳しく説明しない。VCSEL 160では、基板側の間隙層116がp型にドーパされ、遠隔側間隙層118はn型にドーパされている。トンネル接合構造102は、基板側の間隙層116と基板側のDBR 130の間に位置し、p型のトンネル接合層106は基板側の間隙層116と接触し、n型のトンネル接合層104は基板側のDBR 130と接触する。

【0041】

図3Aと図3Bでは、トンネル接合構造102を組み込んだVCSEL 100と160を、遠隔側の電極142の開口部144を介して発光する上面発光デバイスとして示しているが、代替的に、基板120及び接触層140の開口部(図示せず)を介して発光する底面発光デバイスとして構成することもできる。 20

【0042】

本発明によれば、GaAsの基板上で製造するのに適したトンネル接合構造102は、n型のトンネル接合層104、p型のトンネル接合層106、トンネル接合層の間のトンネル接合からなる。n型のトンネル接合層104は、インジウム、ガリウム、リンを含むn型の半導体材料の層を含む。p型のトンネル接合層106は、ガリウム及び砒素を含むp型の半導体材料の層を含む。n型のトンネル接合層の少なくとも一部をインジウム、ガリウム、リンを含む半導体材料から形成することによって、このn型のトンネル接合層を、ガリウム砒素から形成されている従来のn型のトンネル接合層より一層高濃度にドーパすることができる。たとえば現在、 $2 \times 10^{19} \text{ atoms cm}^{-3}$ という高濃度のドナー(n型)ドーパントがInGaPで得られるが、GaAsで達成可能なもっとも高いドナードーパント濃度は約 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ である。ドーパント濃度が高くなるとトンネル接合における空乏領域の幅が狭くなり、トンネル接合を横切る静電場が増大し、それによってトンネリング(トンネル現象)が発生する逆バイアスが低下する。 30

【0043】

上記のように、n型のトンネル接合層104は、インジウム、ガリウム、リンを含むn型の半導体材料からなる層を含む。一実施形態では、この半導体材料はインジウムガリウムリン(InGaP)である。代替的な半導体材料は、アルミニウムインジウムガリウムリン(AIInGaP)、インジウムガリウム砒素リン(InGaAsP)、アルミニウムインジウムガリウム砒素リン(AIInGaAsP)を含む。砒素を含む化合物は、典型的には10%未満の比較的低い割合の砒素を含む。 40

【0044】

また上述のように、p型のトンネル接合層106は、ガリウムと砒素を含むp型の半導体材料からなる層を含む。一実施形態では、p型のトンネル接合層106の半導体材料はガリウム砒素(GaAs)である。

【0045】

図4Aは、それぞれ図3Aと図3Bに示すVCSEL 100又はVCSEL 160の中、又はGaAs基板上に製造されている他の発光デバイスの中にトンネル接合構造102として組み込むことの 50

できるトンネル接合構造の第1の例示的な実施形態202を示す。この実施形態では、トンネル接合構造202は、集合的にトンネル接合220を画定するn型のトンネル接合層204とp型のトンネル接合層206からなる。p型のトンネル接合層206の半導体材料はGaAsである。n型のトンネル接合層204の半導体材料はInGaPである。一実施形態では、n型のトンネル接合層204の半導体材料は $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ であり、Inの割合xは0.51である。 $\text{In}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}$ は、GaAsに対して格子整合する。他の実施形態では、n型トンネル接合層204の半導体材料はさらに、アルミニウムと砒素のいずれか又は両方のある割合含むことがある。

【0046】

図4Bは、バイアスを印加しない場合の、トンネル接合構造202のバンドアライメント（バンドの調整）を示すバンドエネルギー図である。InGaPとGaAsの間のバンドギャップエネルギーの差は約0.5eVである。フォトルミネセンス測定により、InGaPのn型のトンネル接合層204とGaAsのp型のトンネル接合層206の間のトンネル接合220における伝導帯の不連続性が約0.15eVであることが示されている。したがって、価電子帯の不連続性は約0.35eVとなる。これは、トンネル障壁の高さは、両方の層がGaAsの層であるトンネル接合構造よりわずかに高いことを意味する。しかしながら、n型トンネル接合層のInGaPにおいて達成可能な高濃度のドーパントから結果得られるトンネリング、トンネル現象の増加によって、トンネル障壁の高さがわずかに高いことにより生じるトンネル現象の低減はさらに相殺される。高濃度のドーパントにより、空乏領域の幅が狭くなり、トンネル接合を横切る静電場が増大し、トンネリングが発生する逆バイアスは低下する。

【0047】

トンネル接合構造202に印加される逆バイアス V_{BIAS} により、p型のトンネル接合層206の半導体材料の価電子帯のエネルギーレベル E_{Vp} が上昇する。これにより、電子がトンネル障壁を介してn型のトンネル接合層204の伝導帯の空所（vacant site）にトンネリングを起こす。図4Cにこれを示す。図4Cは、逆バイアスを印加したトンネル接合構造202のバンドアライメントを示すバンドエネルギー図である。

【0048】

上述のように、トンネル接合構造202を構成するトンネル接合層は、たとえば有機金属化学蒸着法（MOCVD）を利用してエピタキシャル成長される。p型のトンネル接合層206の半導体材料は、炭素でドーパされたGaAsであり、500 から600 の範囲の成長温度において成長される。四臭化炭素（ CBr_4 ）は、炭素のドーパントとして適切な前駆物質である。GaAs内の炭素の結合効率が高いために、エッチングが問題となるよりも低い流量の炭素の前駆物質によって、 $1.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ という高いアクセプタドーパント濃度が達成される。 10^{16} cm^{-3} という低い水準の酸素濃度が達成可能である。

【0049】

n型のトンネル接合層204の半導体材料は、シリコンでドーパされたInGaPであり、約650 の成長温度で成長される。シラン（ SiH_4 ）又はジシラン（ Si_2H_6 ）がシリコンドーパントとして適切な前駆物質である。シリコンでドーパされたGaAsの約 1×10^{18} と比較すると、 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ という高いドナードーパント濃度が達成できる。上記のように、トンネル接合220の両側で高いドーパント濃度が達成可能ということは、トンネル接合構造202が狭い空乏領域を有し、したがって高いトンネル電流で低い電圧降下を有することを意味する。例示的な実施形態では、 10 kAcm^{-3} の電流密度で、0.4Vの電圧降下を示した。

【0050】

トンネル接合層204と206で達成可能な高いドーパント濃度から狭い空乏領域が結果生じるということは、トンネル接合層を比較的薄くすることができ、その上、全空乏領域に対応できることを意味する。各トンネル接合層は、約5 nmから約30 nmの範囲の厚みを有する。いくつかの実施形態では、各トンネル接合層の厚みは、約10 nmから約30 nmの範囲である。一実施形態では、その厚みは約15nmである。上記のように、インジウムの割合（分率）が0.51のInGaPは、GaAsと格子整合している。しかしながら、トンネル接合層が薄いので、トンネル接合構造202の結晶の特性（結晶性）を犠牲にすることなく、インジウムの割合が約0.4から約0.6の範囲のn型のトンネル接合層204が可能になる。

【0051】

インジウムの割合が0.51であるInGaPのバンドギャップは約1.9eVである。したがって、 $1.3\ \mu\text{m}$ から $1.55\ \mu\text{m}$ の波長範囲の光を生成するVCSEL内で、n型のトンネル接合層204の半導体材料として $\text{In}_{0.51}\text{Ga}_{0.49}\text{P}$ を使用する場合には、光の吸収は問題にならない。

【0052】

図5Aは、本発明のトンネル接合構造の第2の例示的な実施形態302を示す。トンネル接合302は、図3Aに示すVCSEL 100、図3Bに示すVCSEL 160、又はGaAs基板上に製造されている他の発光デバイス内にトンネル接合構造102として組み込むことができる。トンネル接合構造302は、集合的にトンネル接合320を画定するn型のトンネル接合層304とp型のトンネル接合層306からなる。n型のトンネル接合層304は、インジウム、ガリウム、砒素を含むn型の半導体材料からなる層330を含み、この層330は、p型のトンネル接合層306と、インジウム、ガリウム、リンを含むn型の半導体材料の層332の間に挟まれている。p型のトンネル接合層306は、ガリウムと砒素からなるp型の半導体材料よりなる層である。

10

【0053】

例示的な実施形態では、n型のトンネル接合層304の層330及び332の半導体材料はそれぞれ、n型のインジウムガリウム砒素及びn型のインジウムガリウムリンであり、p型のトンネル接合層306の半導体材料はp型のガリウム砒素である。n型のトンネル接合層304の層332のInGaPは、図4Aを参照して上述したn型のトンネル接合層204のInGaPと類似している。p型のトンネル接合層306のGaAsは、図4Aを参照して上述したp型のトンネル接合層206のGaAsと類似している。

20

【0054】

例えば約10%と30%の間の範囲にあり、典型的には20%であるインジウムの割合 y が比較的低いインジウムガリウム砒素 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ は、GaAsより低いバンドギャップエネルギーと、GaAsより高いシリコンドーパントの取り込み効率を有する。層330内で、InGaAsは、シリコンによって、約 $5 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ から約 $5 \times 10^{19}\ \text{cm}^{-3}$ の範囲のドーパント濃度でドーブされる。より低いバンドギャップエネルギーとより高いドーパント濃度が達成可能であり、トンネリングが発生する閾値電圧が低下され、また所定のトンネル電流に対するトンネル接合320を横切る電圧降下も低減する。

【0055】

p型のトンネル接合層306のGaAsと並列する層330のInGaAsは、格子が整合しないため圧縮されて歪む。しかしながら、層330に並列する層332のInGaPのInの割合を、GaAsと格子整合する値から低減し、層332のInGaPの格子定数を小さくすることができる。これにより層332はInGaAs層の圧縮歪みと釣り合う引っ張り歪みを受け、p型のトンネル接合層306のGaAsに全体的な格子整合をもたらす。層330と332で高濃度のドーパントが達成可能なので、層が良好な結晶性（結晶の特性）を有するように、これらの層の厚みを臨界厚より薄くすることができる。この実施形態では、層306、330、332は各々、約5nmから約30nmの範囲の厚みを有する。

30

【0056】

図5Bと図5Cはそれぞれ、バイアスを印加しない状態と逆バイアスを印加した状態での、トンネル接合構造302のバンドアライメントを示すバンドエネルギー図である。トンネル接合構造302は、比較的薄く、歪みを受ける半導体材料の多数の層からなる。その結果、トンネル接合構造は、層が歪みを受けない場合に得られるバンドの配列（ラインアップ）とは異なるバンドの配列を有する。InGaP層332の歪みは、InGaAs層330とGaAs層306の間のバンドの配列（ラインアップ）に影響を与える。特に、引っ張り歪みを受けるInGaP層332と並列し、圧縮歪みを受けるInGaAs層330は、歪みを受けない場合と比べて、より好ましいバンドの配列を有する。InGaAs層330とGaAsのp型のトンネル接合層306の間の伝導帯の不連続性は、InGaAs層330の圧縮歪みが増大すると増大する。さらに、層332のInGaPとp型のトンネル接合層306のGaAsの間の伝導帯の不連続性は、層332のInGaPに引っ張り歪みを加えることによって低減される。

40

50

【0057】

図6Aは、本発明によるトンネル接合構造の第3の例示的な実施形態402を示す。トンネル接合構造402は、図3Aに示すVCSEL 100、図3Bに示すVCSEL 160、又はGaAs基板上に製造されている他の発光デバイス内にトンネル接合構造102として組み込むことができる。トンネル接合構造402は、集合的にトンネル接合420を画定するn型のトンネル接合層404とp型のトンネル接合層406からなる。n型のトンネル接合層404は、インジウム、ガリウム、砒素を含むn型の半導体材料からなる層430を含み、この層430は、p型のトンネル接合層406と、インジウム、ガリウム、リンを含むn型の半導体材料からなる層432の間に挟まれている。p型のトンネル接合層406は、ガリウム、砒素、アンチモンを含むp型の半導体材料からなる層440を含み、この層440は、n型のトンネル接合層404と、ガリウムと砒素を含むp型の半導体材料の層442の間に挟まれている。

10

【0058】

例示的な実施形態では、n型のトンネル接合層404の層430及び432からなる半導体材料はそれぞれ、n型のインジウムガリウム砒素及びn型のインジウムガリウムリンであり、p型のトンネル接合層406の層430及び432の半導体材料はそれぞれ、p型のガリウム砒素アンチモン及びp型のガリウム砒素である。n型のトンネル接合層404の層430のInGaAsは、図5Aに関して上述したn型のトンネル接合層304の層330のInGaAsと類似する。n型のトンネル接合層404の層432のInGaPは、図4Aに関して上述したn型のトンネル接合層204のInGaPに類似する。p型のトンネル接合層406の層442のGaAsは、図4Aに関して上述したp型のトンネル接合層206のGaAsに類似する。

20

【0059】

層440では、ガリウム砒素アンチモン $\text{GaAs}_{1-z}\text{Sb}_z$ は、アンチモンの割合(分率) z が約0.2から約0.4の範囲である。一実施形態では、アンチモンの割合は0.3であった。ガリウム砒素アンチモンは、炭素によって、約 $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ から約 $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ の範囲のドーパント濃度でドーピングされている。

【0060】

上記のように、トンネル接合内のトンネリング(トンネル現象)の可能性は、トンネル接合層の間のトンネル障壁の高さに対して指数関数的に依存する。トンネル障壁の高さは、並列してトンネル接合を画定する2つの層の半導体材料のバンドギャップエネルギーに部分的に依存する。トンネル接合構造402においては、トンネル障壁の高さは、低いバンドギャップエネルギーを有する半導体材料、すなわちn-InGaAs及びp-GaAsSbからトンネル接合層の並列する部分を形成することによって低減される。

30

【0061】

トンネル接合層の半導体材料が、所望の発光波長の光子エネルギーより小さなバンドギャップエネルギーをそれぞれ有していると、光の吸収が問題になる。図3Aに示すVCSEL 100又は図3Bに示すVCSEL 160において、トンネル接合構造402の低いバンドギャップエネルギーの半導体材料による光の吸収は、バンドギャップエネルギーがもっとも低い半導体材料から製造されている層440を、DBR 130と132によって画定されている光共振器150中の光定在波の0(零)位置に配置することによって低減される。代替的には、層440の光吸収が許容可能な水準以下となるように、層440を十分に0(零)に近い位置に配置することもできる。図3Aに示すVCSEL 100では、層432の厚みを増加させ、遠隔側の間隙層118の厚みを減少させて、層440とDBR 132との分離を増加させることによって、層440を光共振器内の光定在波の0(零)に配置する。図3Bに示すVCSEL 160においては、層432の厚みを増加させ、基板側の間隙層116の厚みを減少させて、層440とDBR 130との分離を増加させることによって、層440を光共振器内の光定在波の0(零)に配置する。典型的には光定在波は、活性領域112の量子井戸構造と、活性領域に最も近いDBR 130と132の各層において最大値を有する。

40

【0062】

上述のように、トンネル接合構造400を構成する層430、432、440、442は、縮退する程度にドーピングされ、これらの層を比較的薄く形成することができる。層の厚みの範囲は典型

50

的には約5 nmから約30 nmであり、典型的には約15nmの厚みを有する。層432のInGaPは、歪み補償をもたらすように処方されている。Inの割合(分率)が約0.5であるInGaPは、実質上歪まない。引っ張り歪みをもたらすには、0.25という低いInの割合を利用することができる。層442のGaAsと層430のInGaAsの間に挟まれ、歪んだGaAsSbの層440により、さらにトンネリング(トンネル現象)が増大する。

【0063】

図6Bと図6Cは、バイアスを印加しない状態と逆バイアスを印加した状態のそれぞれの、トンネル接合構造402のバンドアライメントを示すバンドエネルギー図である。図6BはGaAsSbの低いバンドギャップエネルギーを示す。図6Bはさらに、InGaAs層430とGaAs層432の間にGaAsSb層440を組み込むことで、トンネル障壁の高さを大幅に低下できることを示す。小さなバンドギャップエネルギーを有する半導体材料の層440は、層430のInGaAsとの好ましいバンドの配列(ラインアップ)を有し、トンネル接合420を横切る電圧降下を、図4Aと図5Aに示すトンネル接合構造内の電圧降下より低くすることができる。

10

【0064】

本発明を、基板がガリウム砒素のウェハの一部である例を参照して説明した。代替的には、基板はGaAsの層が付着されている別の材料からなるウェハの一部とすることができる。基板上に付着している上記の層は、GaAs層の上に付着している。「ガリウム砒素からなる基板」という用語は、上述の両方の様式の基板を包含することを理解されたい。本発明によるトンネル接合構造がVCSELに組み込まれている例を参照して本発明を説明した。代替的には、本発明のトンネル接合構造は、たとえば端面発光レーザ、半導体光増幅器、発光ダイオードなど、他の様式の発光デバイスにも組み込むことができる。

20

【0065】

本開示では、例示的な実施形態を利用して本発明を詳細に説明した。しかしながら、添付の特許請求の範囲に記載により画定される本発明は、上記の明確な実施形態に限定されないことが理解されなくてはならない。

【図面の簡単な説明】

【0066】

【図1】トンネル接合構造を組み込んだ半導体デバイスの例を示す側面図である。

【図2A】バイアスを印加しない状態の、図1に示すトンネル接合構造の特徴の一部を示す概略的なエネルギー図と電気回路のモデル図を含む図である。

30

【図2B】逆バイアスを印加した状態の、図1に示すトンネル接合構造の特徴の一部を示す概略的なエネルギー図と電気回路のモデル図を含む図である。

【図3A】本発明による発光デバイスの例としての、VCSELの第1の実施形態を示す側面図である。

【図3B】本発明による発光デバイスの別の例としての、VCSELの第2の実施形態を示す側面図である。

【図4A】本発明による発光デバイスに組み込むのに適したトンネル接合構造の第1の例示的な実施形態を示す側面図である。

【図4B】バイアスを印加しない状態の、図4Aに示すトンネル接合構造の特徴の一部を示す概略的なエネルギー図である。

40

【図4C】逆バイアスを印加した状態の、図4Aに示すトンネル接合構造の特徴の一部を示す概略的なエネルギー図である。

【図5A】本発明による発光デバイスに組み込むのに適したトンネル接合構造の第2の例示的な実施形態を示す側面図である。

【図5B】バイアスを印加しない状態の、図5Aに示すトンネル接合構造の特徴の一部を示す概略的なエネルギー図である。

【図5C】逆バイアスを印加した状態の、図5Aに示すトンネル接合構造の特徴の一部を示す概略的なエネルギー図である。

【図6A】本発明による発光デバイスに組み込むのに適したトンネル接合構造の第3の例示的な実施形態を示す側面図である。

50

【図 6 B】バイアスを印加しない状態の、図 6 A に示すトンネル接合構造の特徴の一部を示す概略的なエネルギー図である。

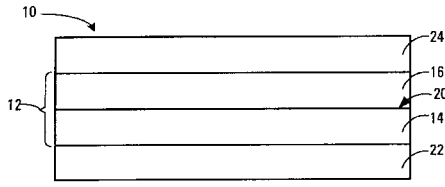
【図 6 C】逆バイアスを印加した状態の、図 6 A に示すトンネル接合構造の特徴の一部を示す概略的なエネルギー図である。

【符号の説明】

【 0 0 6 7 】

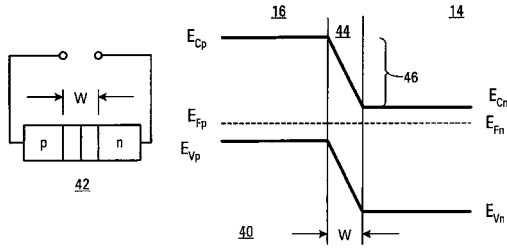
1 0	半導体デバイス	
1 2	トンネル接合構造	
1 4	n型トンネル接合層	
1 6	p型トンネル接合層	10
2 0	トンネル接合	
2 2	n型の層	
2 4	p型の層	
4 4	空乏領域	
4 6	電位障壁	
1 0 0	VCSEL	
1 0 2	トンネル接合構造	
1 1 2	活性領域	
1 1 4	量子井戸構造	
1 1 6	基板側の間隙層	20
1 1 8	遠隔側の間隙層	
1 2 0	基板	
1 3 0	基板側分散ブラッグ反射器	
1 3 2	遠隔側分散ブラッグ反射器	
1 3 4	屈折率が大きい層	
1 3 6	屈折率が小さい層	
1 3 8	メサ	
1 4 0	基板側の接触層	
1 4 2	遠隔側の接触層	
1 4 4	開口部	30
1 4 8	導電領域	
1 5 0	光共振器	
2 0 2	トンネル接合構造	
2 0 4	n型のトンネル接合層	
2 0 6	p型のトンネル接合層	
2 2 0	トンネル接合	
3 0 2	トンネル接合構造	
3 0 4	n型のトンネル接合層	
3 0 6	p型nトンネル接合層	
3 3 0	n型の半導体材料の層	40
3 3 2	n型の半導体材料の層	
4 0 2	トンネル接合構造	
4 0 4	n型のトンネル接合層	
4 0 6	p型のトンネル接合層	
4 2 0	トンネル接合	
4 3 0	n型の半導体材料の層	
4 3 2	n型の半導体材料の層	
4 4 0	p型の半導体材料の層	
4 4 2	p型の半導体材料の層	

【図 1】



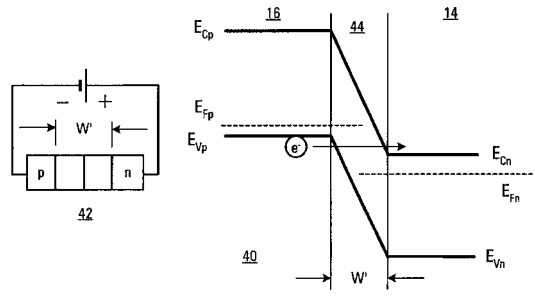
(従来技術)

【図 2 A】



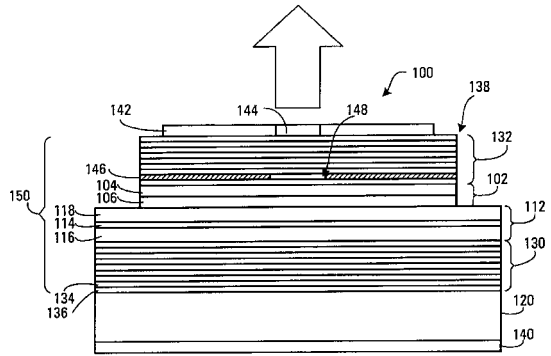
(従来技術)

【図 2 B】

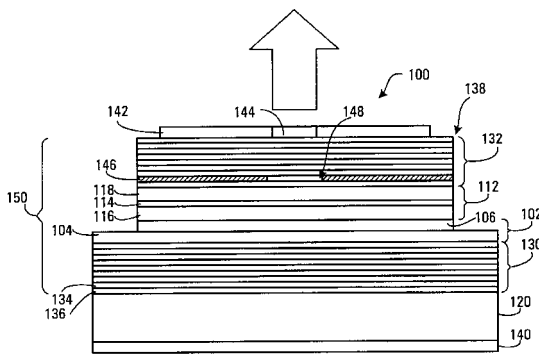


(従来技術)

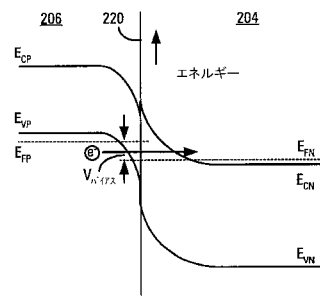
【図 3 A】



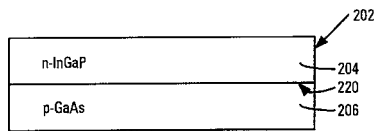
【図 3 B】



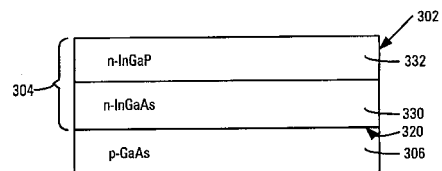
【図 4 C】



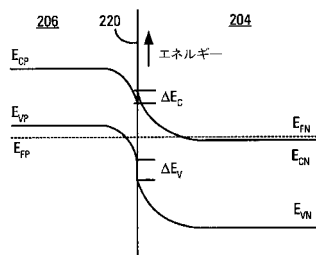
【図 4 A】



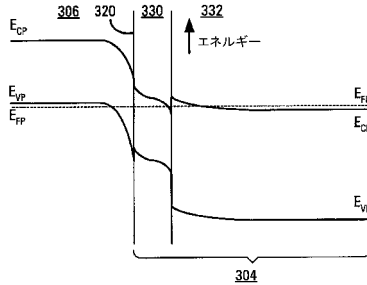
【図 5 A】



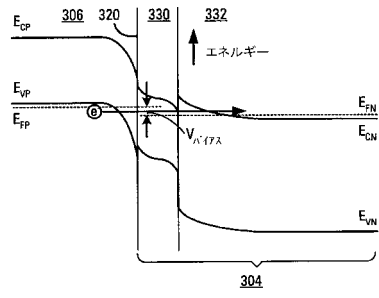
【図 4 B】



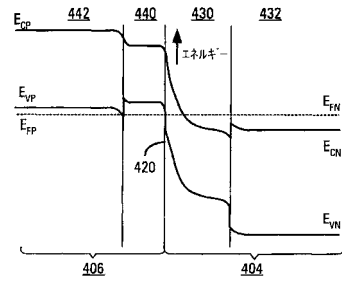
【図 5 B】



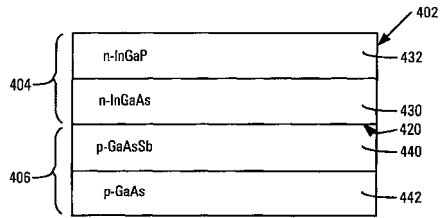
【 図 5 C 】



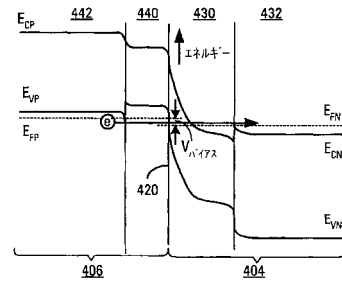
【 図 6 B 】



【 図 6 A 】



【 図 6 C 】



フロントページの続き

(72)発明者 アシシュ・タンドン

アメリカ合衆国カリフォルニア州 9 5 0 8 7 , サニーベイル, ロビン・ウェイ・9 2 7

(72)発明者 マイケル・エイチ・レアリー

アメリカ合衆国カリフォルニア州 9 4 0 4 3 , マウンテンビュー, アニー・ローリー・アベニュー
・ 3 3

(72)発明者 イン・ラン・チャン

アメリカ合衆国カリフォルニア州 9 5 0 1 4 , クパチーノ, プレシディオ・ドライブ・8 0 9 9

Fターム(参考) 5F173 AC03 AC13 AC35 AC42 AC52 AG20 AH02 AJ06 AP67 AR23

AR64 AS01