

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5112511号
(P5112511)

(45) 発行日 平成25年1月9日(2013.1.9)

(24) 登録日 平成24年10月19日(2012.10.19)

(51) Int.Cl.

F 1

H01L 33/04 (2010.01)
H01L 33/06 (2010.01)H01L 33/00 110
H01L 33/00 112

請求項の数 15 (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2010-515344 (P2010-515344)
 (86) (22) 出願日 平成20年6月20日 (2008.6.20)
 (65) 公表番号 特表2010-532926 (P2010-532926A)
 (43) 公表日 平成22年10月14日 (2010.10.14)
 (86) 國際出願番号 PCT/DE2008/001039
 (87) 國際公開番号 WO2009/006870
 (87) 國際公開日 平成21年1月15日 (2009.1.15)
 審査請求日 平成23年2月17日 (2011.2.17)
 (31) 優先権主張番号 102007031926.8
 (32) 優先日 平成19年7月9日 (2007.7.9)
 (33) 優先権主張国 ドイツ(DE)

(73) 特許権者 599133716
 オスラム オプト セミコンダクターズ
 ゲゼルシャフト ミット ベシュレンクテ
 ル ハフツング
 Osram Opto Semiconductors GmbH
 ドイツ連邦共和国、93055 レーゲン
 スブルグ、ライプニッツシュトラーゼ 4
 Leibnizstrasse 4, D
 -93055 Regensburg,
 Germany
 (74) 代理人 110000305
 特許業務法人青義

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】放射線放出半導体ボディ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

コンタクト層と活性領域とを備えた放射線放出半導体ボディにおいて、
 前記コンタクト層と前記活性領域との間にトンネル接合を備え、
 前記トンネル接合は、少なくとも1つのn型トンネル接合層と、少なくとも1つのp型
 トンネル接合層とを有し、前記少なくとも1つのn型トンネル接合層と前記少なくとも1
 つのp型トンネル接合層との間に、少なくとも1つのアンドープト中間層からなるアンド
 ープト領域を含み、前記アンドープト領域は、異なる組成を有する少なくとも2つの中間
 層を含み、

前記活性領域は、前記半導体ボディに動作電流が印加されたときに電磁放射線を放出す
 る少なくとも2つの活性層を含む多重量子井戸構造を有することを特徴とする放射線放出
 半導体ボディ。

【請求項 2】

2つの活性層の間に、厚さが9nm以下であるバリア層を配置したことを特徴とする請
 求項1記載の放射線放出半導体ボディ。

【請求項 3】

3つ以上5つ以下の活性層を有することを特徴とする請求項1又は請求項2に記載の放
 射線放出半導体ボディ。

【請求項 4】

少なくとも前記活性領域は、III族窒化物半導体材料に基づいていることを特徴とす

10

20

る請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の放射線放出半導体ボディ。

【請求項 5】

前記アンドープト領域は、前記活性領域から離れた G a N 層と、前記活性領域に隣接した A l G a N 層とを有することを特徴とする請求項 1 ~ 4 のいずれか 1 項に記載の放射線放出半導体ボディ。

【請求項 6】

前記アンドープト領域は、0.5 nm 以上 15 nm 以下の厚さを有することを特徴とする請求項 1 ~ 5 のいずれか 1 項に記載の放射線放出半導体ボディ。

【請求項 7】

前記コンタクト層は、n 型コンタクト層であることを特徴とする請求項 1 ~ 6 のいずれか 1 項に記載の放射線放出半導体ボディ。 10

【請求項 8】

少なくとも前記 n 型コンタクト層、前記トンネル接合、p 型ドープト閉じ込め層、前記活性領域及び他の n 型コンタクト層が、成長方向でこの記載された順序で相互に続き、

前記トンネル接合は、前記少なくとも 1 つの n 型トンネル接合層と、成長方向でこの n 型トンネル接合層の後にある前記アンドープト領域と、成長方向でこのアンドープト領域の後にある前記少なくとも 1 つの p 型トンネル接合層とを含むことを特徴とする請求項 7 に記載の放射線放出半導体ボディ。

【請求項 9】

前記 n 型トンネル接合層及び前記 p 型トンネル接合層の少なくとも何れか一方は、組成及びドーパント濃度の少なくとも何れか一方が異なる層を交互に積層してなる超格子を含むことを特徴とする請求項 1 ~ 8 のいずれか 1 項に記載の放射線放出半導体ボディ。 20

【請求項 10】

p 型ドープト閉じ込め層を備え、

前記 p 型ドープト閉じ込め層と前記活性領域との間に、前記 p 型ドープト閉じ込め層の p 型ドーパントに対する拡散バリアを配置し、この拡散バリアが超格子を含むことを特徴とする請求項 1 ~ 9 のいずれか 1 項に記載の放射線放出半導体ボディ。

【請求項 11】

前記活性領域の前記トンネル接合とは反対側に、3 nm ~ 40 nm の厚さを有するアンドープト中間層を備えたことを特徴とする請求項 1 ~ 10 のいずれか 1 項に記載の放射線放出半導体ボディ。 30

【請求項 12】

前記半導体ボディの動作電流密度が 100 A / cm² 以上であることを特徴とする請求項 1 ~ 11 のいずれか 1 項に記載の放射線放出半導体ボディ。

【請求項 13】

前記半導体ボディの動作電流密度が 200 A / cm² 以上であることを特徴とする請求項 12 に記載の放射線放出半導体ボディ。

【請求項 14】

前記半導体ボディは、動作電流により動作している間、最大強度でスペクトル分布を有する電磁放射線を放出し、このスペクトル分布の半値全幅は、前記動作電流の電流強度から実質的に独立していることを特徴とする請求項 1 ~ 13 のいずれか 1 項に記載の放射線放出半導体ボディ。 40

【請求項 15】

成長方向で前記活性領域の後に、他のトンネル接合及び他の活性領域を備えたことを特徴とする請求項 1 ~ 14 のいずれか 1 項に記載の放射線放出半導体ボディ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、放射線放出半導体ボディに関する。

【背景技術】

【 0 0 0 2 】

本願は先行のドイツ出願第102007031926.8号に基づく優先権を主張するものであり、その記載内容を本明細書の一部を構成するものとして援用する。

【 0 0 0 3 】

放射線を放出する従来の半導体ボディは、動作中に半導体ボディに印加される動作電流の電流密度が増加するのに従って、動作中に発せられる放射電力が飽和することを示す。その結果、動作電流密度が増加するのに従って効率 (efficiency) が減少する。

【発明の概要】**【発明が解決しようとする課題】****【 0 0 0 4 】**

本発明の目的は、高い動作電流密度で改善された効率を有する放射線放出半導体ボディを特定することである。

10

【課題を解決するための手段】**【 0 0 0 5 】**

この目的は、本願請求項1の放射線放出半導体ボディによって達成される。この半導体ボディの有利な構成及び改良は、従属請求項において特定されており、その記載内容は詳細な説明中に付随して包含されている。

【 0 0 0 6 】

本発明の放射線放出半導体ボディは、活性領域 (active zone) を備えている。この活性領域は、動作電流が半導体ボディに印加されたときに電磁放射線 (electromagnetic) を発する2つ以上の活性層を含む多重量子井戸構造を有する。

20

【 0 0 0 7 】

この活性層は、例えば、六方晶系化合物 (hexagonal compound) 半導体材料に基づいている。本明細書において、“六方晶系化合物半導体材料に基づく”とは、活性領域又は活性領域の少なくとも1つの層、特に、活性層が、六方晶系化合物半導体材料からなることを意味する。すなわち、少なくとも1つの活性領域は、六方格子構造を有する。全体の半導体ボディは六方晶系化合物半導体材料に基づいており、この半導体ボディの半導体材料は六方格子構造を有することが好ましい。

【 0 0 0 8 】

六方晶系化合物半導体材料は、例えば、化学元素周期律表のII族 - IV族の主族元素の2成分の、3成分の及び/又は4成分の化合物からなる半導体構造である。例として、ZnO、ZnMgO、CdS、ZnCdS、MgBeOの化合物のうちの1つを含ませることができる。また、六方晶系化合物半導体材料は、IIII族 - V族の主族元素の2成分の、3成分の及び/又は4成分の化合物、例えば、窒化物からなる半導体構造である。例として、BN、AlGaN、GaN、AlInGaNの半導体構造の1つを含ませることができる。

30

【 0 0 0 9 】

この場合、上記半導体材料は、上式の1つに従う組成と正確に一致する必要はなく、むしろ、1つ以上のドーピング材料または追加の物質を含ませることができる。然し、単純化のために、上式は結晶格子の主要な物質のみを表しており、これらの物質の一部を他の物質に少量置換することができる。

40

【 0 0 1 0 】

六方晶系化合物半導体の場合、例えば、IIII - V族半導体材料のAlInGaN、すなわち、 $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$ (式中、 $0 < x < 1$ 、 $0 < y < 1$ 、且つ、 $x + y = 1$) 系の半導体ボディの場合、例えば、活性領域内に極性ウルツ鉱結晶構造 (polar wurtzite crystal structure) 及び歪み (strain) を有しているため、InGaN量子井戸構造を備えた活性領域内で、圧電場 (piezoelectric fields) が生じる。

【 0 0 1 1 】

圧電場は成長方向に沿って配向する。この圧電場の極性は、半導体ボディが成長する成長モードに依存する。有機金属気相成長 (MOVPE) を用いる場合、成長は、いわゆる

50

Ga - 表面成長モードで起こすことが好ましい。GaN結晶に関しては、例えば、これは、GaN二重層から結晶が成長する場合、結晶の成長基板とは反対側の表面の方向にガリウム原子があることを意味する。Ga - 表面成長モードで成長し、その成長方向が結晶(結晶学上)のc軸(crystallographic c-axis)と平行である結晶の場合、結晶のc軸と電場は基板から離れて結晶表面を向く。

【0012】

活性領域内の歪みによる圧電場の向きは、反対方向である。分極によって引き起こされた格子変化は、活性領域の結晶表面に面する側で消極的であり、基板と成長結晶の間の界面に面する活性領域の側で積極的である。上記c軸の方向での圧電場の配向は、Ga - 表面成長モードにおいて影響を及ぼすことができる。

10

【0013】

光電子半導体ボディの有利な構成では、p - ドープト閉じ込め層、活性領域及びn - 導電型閉じ込め層が、成長方向でこの記載した順に、すなわち、結晶のc軸と平行に相互に続く。これらp - ドープト閉じ込め層及びn - 導電型閉じ込め層は、成長方向で活性領域の前後にある半導体層である。1つの発展では、p - ドープト閉じ込め層及び/又はn - 導電型閉じ込め層は、電荷キャリア閉じ込め層及び/又はクラッド層を構成する。特に、当業者に知られているように動作中に活性領域によって発せられた電磁放射線を導くために、例えば、クラッド層が配置される。

【0014】

活性領域の周辺に、n導電型閉じ込め層、活性領域及びp - ドープト閉じ込め層が、成長方向でこの記載した順に相互に続く場合、圧電場が、活性領域への電荷キャリアの注入をより困難にする好ましくないエネルギー障壁構造を導く。それゆえ、このような光電子半導体ボディは、電流密度が増加したときに、頻繁に不十分、特に、降下する内部量子井戸効率を有する。

20

【0015】

本発明者らは、このような光電子ボディと比較し、p - ドープト閉じ込め層、活性領域及びn - 導電型閉じ込め層を成長方向でこの記載した順に相互に続くと、動作中に電子とホールの再結合が起こる領域が有利に拡がることを見出した。動作中に電子とホールの再結合が起こる領域、すなわち、再結合領域には、多重量子井戸構造の少なくとも2つの活性層が配置され、半導体ボディの動作中に電磁放射線を発する。

30

【0016】

本発明の放射線放出半導体ボディは、コンタクト層を備える。このコンタクト層は、半導体ボディの半導体層であり、半導体ボディの動作中にこの層を通して動作電流が活性領域に流れる。コンタクト層は、良好な電気伝導性を有することが好ましく、良好な電気横断伝導性を有することが好ましい。1つの構成では、コンタクト層は、成長基板上にエピタキシャルに形成された半導体層である。代替的に、コンタクト層は、成長基板に含まれることもでき、後で形成することもできる。

【0017】

1つの態様では、コンタクト層は、特に、成長基板と活性領域の間に配置されたp型コンタクト層である。この態様では、p型コンタクト層、p - ドープト閉じ込め層、活性領域、n導電型閉じ込め層及び他のコンタクト層(n型コンタクト層)が、成長方向で相互に続くことが好ましい。1つの変形例では、p - ドープト半導体層は、同時にp型コンタクト層及びp - ドープト閉じ込め層を構成する。同様に、n導電型半導体層は、同時にn型コンタクト層及びn導電型閉じ込め層を構成する。別の変形例では、成長基板とp型コンタクト層が一体的に形成される。

40

【0018】

別の変形例では、成長基板は、非常に薄いか、半導体ボディから完全に除去される。この場合、成長方向は、半導体ボディ内の原子層の順番に基づいて徐々に決定することができる。結晶成長がGa - 表面成長モードで行われた場合、成長方向でのGa - 表面からN - 表面までの距離は、N - 表面からGa - 表面までの距離の約3倍である。原理上は、N

50

- 表面成長モードで原料を生成すること、すなわち、格子構造の反対の方向又は順序にそれらを成長させることができる。この方向では、N - 表面からG a - 表面までの距離は、G a - 表面からN - 表面までの距離の約3倍である。しかしながら、N - 表面成長モードで原料を成長させるためには、一般に特別な方法が必要である。

【 0 0 1 9 】

1つの変形例では、コンタクト層は、n型コンタクト層である。例として、n型コンタクト層は、成長基板の上に堆積されて、成長方向で活性領域の後にあるか、或いは、成長基板はn型コンタクト層を有する。

【 0 0 2 0 】

1つの好ましい構成では、半導体ボディは、n型コンタクト層と活性領域の間にトンネル接合を有する。このトンネル接合により、半導体ボディの半導体層列が有利に得られる。ここで、成長方向、すなわち、結晶のc軸に平行な方向に、活性領域の前かつn型コンタクト層の後にp型閉じ込め層が配置され、n型閉じ込め層が活性領域の後に配置される。

【 0 0 2 1 】

半導体ボディの1つの好ましい構成では、2つの活性層の間、特に、2つの隣接する活性層の間に、バリア層が配置される。1つの有利な発展では、バリア層の膜厚は9nm以下であり、好ましい膜厚は4nm以下である。活性領域とバリア層は相互に直接接することが好ましい。多重量子井戸構造の量子井戸は、特に、活性層、バリア層及び終端のバリア層によって形成される。

【 0 0 2 2 】

半導体ボディの他の構成では、活性領域は、3つ以上の活性層を有する。一変形例では、5つ以下の活性層を有する。

【 0 0 2 3 】

本発明者らは、そのような1つ又は複数のバリア層を備え、再結合領域に少なくとも2つの活性層を備えたものを確立した。例として、3つ以上、特に、5つ以下の多重量子井戸構造の活性層を再結合領域に配置した。

【 0 0 2 4 】

さらに、本発明者らは、そのような膜厚9nm以下、特に、4nm以下の1つ又は複数のバリア層を備え、各活性領域の間で電子を結合させたものを確立した。これにより、各活性領域の間で帶電キャリアの共鳴トンネル現象(resonant tunneling)が起こることを本発明者らは見出した。これは、特に、動作中に半導体ボディに印加される動作電流の電流密度が高い場合に、再結合領域に配置された個々の活性領域の間での帶電キャリア分布を有利に導き、結果として、高い効率が得られる。

【 0 0 2 5 】

トンネル接合を有する半導体ボディの場合、このトンネル接合は、活性領域におけるボテンシャルプロファイルに影響する。第1に、活性領域への注入用のエネルギー・バリアは、電荷キャリアに対して低くなる。第2に、本発明者らは、多重量子井戸構造の量子井戸の有効厚さを小さくすることが有利であることを示すことができる。例として、この有効厚さは1nm以下である。

【 0 0 2 6 】

要約すると、成長方向に対する動作電流の逆特性と、小さな膜厚を有するバリア層を含む多重量子井戸構造とを組み合わせることによって、放射線の放出に寄与する少なくとも2つの、特に、少なくとも3つの活性層を有する多重量子井戸構造を備え、高い動作電流で特に高い効率を有する半導体ボディを実現することができる。この成長方向に対する動作電流の逆特性は、特に、トンネル接合によって得られる。

【 0 0 2 7 】

本発明の放射線放出半導体ボディにおいて、トンネル接合は、少なくとも1つのn型トンネル接合層と少なくとも1つのp型トンネル接合層を有する。さらに、これら少なくとも1つのn型トンネル接合層と少なくとも1つのp型トンネル接合層の間に、少なくとも

10

20

30

40

50

1つのアンドープト中間層からなるアンドープト領域を備える。このアンドープト領域は、異なる組成を有する少なくとも2つのアンドープト中間層を有する。例として、活性領域から離れたGaN層と活性領域に隣接したAlGaN層である。トンネル接合において、このように構成されたn型トンネル接合層とp型トンネル接合層とは相互に直接的に接合されておらず、少なくとも1つのアンドープト中間層によって相互に離間している。この場合、“トンネル接合層”との表現は、半導体ボディの残りの半導体層とは区別するために用いられ、このように指定されたn型トンネル接合層又はp型トンネル接合層がトンネル接合に配置されることを意味する。

【0029】

n型トンネル接合層とp型トンネル接合層をアンドープト領域により相互に分離することによって、界面での異なる荷電キャリアの不利な相殺(compensation)が防止される。そうしなければ、界面を横切る荷電キャリア及び/又はドーパントの拡散が生じる。

10

【0030】

n型トンネル接合層とp型トンネル接合層との間へのアンドープト領域の挿入は、トンネル接合内で低い電荷キャリア密度を有する領域を形成しているが、本願に関して、この領域はトンネル接合の電気特性、特に、順電圧への不利な影響を少なくすることが認められた。特に、1つ以上のアンドープト中間層の形で挿入されたアンドープト領域は、n型トンネル接合層とこれに直接接するp型トンネル接合層との界面で、この界面を拡散する電荷キャリア及び/又はドーパントが相互に相殺する領域に比べて不利な影響を少なくする。これは、半導体ボディの動作、特に、半導体ボディ内で高い電流密度を引き起こす動作電流で半導体ボディを動作させるときに重要である。

20

【0031】

更に有利な構成では、少なくとも以下の半導体層が、成長方向に記載した順序で連続する：n型コンタクト層；トンネル接合（好ましくは、成長方向において少なくとも1つのp型トンネル接合層がアンドープト領域に続き、アンドープト領域が少なくとも1つのn型トンネル接合層に続く）；p-ドープト閉じ込め層；活性領域；及び他のn型コンタクト層。

【0033】

アンドープト領域の厚さは、例えば、0.5nm以上15nm以下であり、特に、1nm以上10nm以下である。このような厚さにすることで、アンドープト領域は、n型トンネル接合とp型トンネル接合の中にそれぞれ存在する荷電キャリアに対するバリアを構成し、このバリアは、互いの電荷の相殺を防ぐ。他方、アンドープト領域は、トンネル接合の電子特性に不利な影響を与えないほど薄い。

30

【0034】

更に有利な構成では、n型トンネル接合層及び/又はp型トンネル接合層は、材料組成及び/又はドーパント濃度が異なる超格子を含む。

【0035】

別の構成では、p-ドープト層と活性領域の間に、p-ドープト層のp型ドーパントの拡散バリアが配置される。1つの発展では、この拡散バリアは、超格子を含む。

【0036】

40

別の構成では、放射線放射半導体ボディは、活性領域のトンネル接合とは反対側にアンドープト半導体層を含む。例として、このアンドープト半導体層は、n導電型の閉じ込め層である。このアンドープト半導体層は、半導体ボディの活性領域と他のコンタクト層の間に配置されることが好ましい。

【0037】

アンドープト半導体層は、例えば、3nm~40nmの膜厚を有する。従来の半導体ボディと比較して、アンドープト半導体層は、半導体ボディの効率に影響しないか、僅かに影響する。そのため、この膜厚は、半導体ボディの製造中に所望の大きな許容範囲となるように有利に選択することができる。

【0038】

50

1つの有利な構成では、半導体ボディは、 100 A/cm^2 以上、特に、 300 A/cm^2 以上の動作電流密度で動作させる。1つの発展では、半導体ボディは、より高い動作電流密度、例えば、 500 A/cm^2 以上、 1000 A/cm^2 又は 2000 A/cm^2 以上の動作電流密度で動作させる。

【0039】

半導体ボディは、動作中、最大強度のスペクトル分布を有する電磁放射線を発する。例として、最大強度は、赤外線の、可視の又は紫外のスペクトル範囲内の波長を有する。スペクトル分布の半値全幅は、動作電流の電流密度から実質的に独立している。数学的な定義では、半値全幅は、この場合、最大強度の波長から短波長側又は長波長側で強度が最大強度の半分に下がる2つの波長間の差を意味する。

10

【0040】

半導体ボディは、発光ダイオードチップ又はレーザダイオードチップ、特に、端面発光レーザダイオードチップとすることができます。

【0041】

他の構成では、半導体ボディは、少なくとも1つの他の活性領域を備えている。この構成では、成長方向で複数の活性領域が相互に続いている。例として、半導体ボディは、3乃至10の活性領域を含んでいる。他のトンネル接合は、2つの隣接する活性領域の間に配置されることが好ましい。他の活性領域及び/又は他のトンネル接合は、活性領域又はトンネル接合層として上述した構成と同様に実現することが好ましい。

【0042】

例として、半導体ボディは、以下の半導体層を記載した順番で備えている：p型ドープト閉じ込め層、活性領域、n導電型閉じ込め層、他のトンネル接合、他のp-nドープト閉じ込め層、他の活性領域、他のn導電型閉じ込め層。別の展開では、他のn型コンタクト層は、他のn導電型閉じ込め層に続く。他のp-nドープト閉じ込め層と他の活性領域との間に、他の拡散バリアを配置することができる。

20

【0043】

更なる利点や有利な態様は、図1乃至図11を参照して説明する以下の実施形態から明らかになる。

【図面の簡単な説明】

【0044】

30

【図1】一実施形態の半導体ボディの模式的断面図。

【図2】図1の実施形態に関連する半導体ボディのトンネル接合の模式的断面図。

【図3】図1の実施形態に関連する半導体ボディの拡散バリアの模式的断面図。

【図4】他の実施形態に関連する半導体ボディの模式的断面図。

【図5A】従来の多重量子井戸構造のバンド構造の模式図。

【図5B】図1の実施形態に関連する多重量子井戸構造の模式図。

【図6】図1の実施形態に関連する半導体ボディの放射電力の動作電力依存性を、他の半導体ボディと比較して示す図。

【図7】図1の実施形態に関連する半導体ボディの場合に、バリア層の膜厚の関数としての放射電力の線形性を、他の半導体ボディと比較して示す図。

40

【図8】図1の実施形態に関連する半導体ボディの場合に、動作電流の関数としてのスペクトル分布の半値全幅を、他の半導体ボディと比較して示す図。

【図9】図1の実施形態に関連する半導体ボディの場合に、動作電流の関数としての最大発光波長を、他の半導体ボディと比較して示す図。

【図10】図1の実施形態に関連する半導体ボディにより発せられる電磁放射線の強度の動作電流依存性を種々のバリア層の膜厚に対して示す図。

【図11】図1の実施形態に関連する半導体ボディにより発せられる電磁放射線の放射電力の動作電流依存性を種々の活性層の数に対して示す図。

【図12】図1の実施形態に関連する半導体ボディの場合に、アンドープト半導体層の膜厚の関数としての電磁放射線の相対強度を、他の半導体ボディと比較して示す図。

50

【発明を実施するための形態】

【0045】

実施形態及び図面において、同様の又は同様に作用する構成要素には同じ参照符号を付している。図面は、特に、図面に描かれた個々の構成要素の相対的な寸法は、縮尺通りに描かれたものではない。むしろ図面における個々の構成要素（例えば、層）は、より良い説明のために、及び／又は、より良い理解のために、誇張した大きさ又は厚さで描かれている。

【0046】

図1は、半導体ボディの一実施形態を示す。この半導体ボディは、六方晶化合物半導体材料、特に、I II族窒化物半導体材料系の半導体層列を有することが好適である。I II族窒化物半導体材料は、特に好ましくは、AlInGaN、すなわち、 $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$ （式中、 $0 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y \leq 1$ 、且つ、 $x + y = 1$ ）である。

10

【0047】

半導体ボディは、基板1を備えている。この基板1は、特に、I II族窒化物半導体材料（例えば、GaN、SiC及び／又はサファイア）の成長に好適な材料、又は、それらの材料からなる。この基板は、n導電型であり、例えば、n-GaN、n-SiC及び／又はn-Si（111）を含むか、又は、少なくともこれらの材料の少なくとも1つからなることが好ましい。

【0048】

20

図1に示すように、基板1とそれに続く半導体層との間で格子定数を整合させるために、基板1上にバッファ層（緩衝層）2を配置できる。バッファ層は、例えば、GaN又はAlGaN、すなわち、 $Al_xGa_{1-x}N$ （式中、 $0 \leq x \leq 1$ ）からなる。特に、バッファ層の膜厚は、20nm以上1500nm以下である。

【0049】

n型コンタクト層3、例えば、n-導電性、特に、n-ドープトGaN層、AlGaN層又はAlInGaN層は、基板1上に、又は、好適にはバッファ層2上に配置されている。この場合、n型コンタクト層3は、Siが、 10^{18} cm^{-3} 以上 10^{20} cm^{-3} 以下の濃度、特に、 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 10^{19} cm^{-3} 以下の濃度でn型ドープされている。トンネル接合4は、このn型コンタクト層の後に続く。

30

【0050】

トンネル接合4は、高濃度にドープされたn-pトンネル接合である。この場合、高度のドープは、 10^{19} cm^{-3} 以上、特に、 10^{20} cm^{-3} 以上のドープを意味すると理解できる。この場合、トンネル接合4のnドープ側はn型コンタクト層3に接しており、pドープ側はn型コンタクト層3とは反対側である。

【0051】

図2に示すように、本実施形態では、トンネル接合4は、n型トンネル接合層41と、成長方向でこのn型トンネル接合層41に続くp型トンネル接合層43とを含む。高濃度にドープされたn-pトンネル接合4の場合、p型トンネル接合層43及び／又はn型トンネル接合層41は高濃度にドープされる。

40

【0052】

本実施形態では、p型トンネル接合層43は多層膜として具体化される。p型トンネル接合層43は、層431、432を交互に積層してなる超格子を含んでいる。本実施形態では、この超格子は、10組の層431、432を含んでいる。例として、超格子は、高濃度にドープされたp-ドープトInGaN層431とアンドープトGaN層432を含んでいる。ここで、InGaNは、 $In_xGa_{1-x}N$ で表される（式中、 $0 \leq x \leq 1$ ）。

【0053】

超格子の各層431、432の膜厚は、好ましくは2nm以下であり、より好ましくは1nm以下である。本実施形態では、層431、432の膜厚は、それぞれ0.5nmで

50

ある。従って、p型トンネル接合層43は、好ましくは40nm以下の膜厚を有し、より好ましくは20nm以下の膜厚を有する。本実施形態では、トンネル接合層43の膜厚は10nmである。

【0054】

同様に、n型トンネル接合層41を多層膜として構成できる。例として、1つの構成では、n型トンネル接合層41は、高濃度のn-ドープ層とアンドープ層を交互に積層してなる超格子を有する。例として、n-ドープ層がInGaN層であり、アンドープ層がGaN層である。特に、短周期(10nm以下、好ましくは5nm以下、特に、2nm以下の周期)の超格子構造を含むことが好適である。超格子の各層の厚さは、例えば、0.5nmである。周期の数は、好ましくは15以下である。

10

【0055】

超格子としてのn型トンネル接合層41及び/又はp型トンネル接合層43の実施形態は、高濃度の1つのドープ層の場合と比較して、結晶構造の形態(morphology)を改善できるため有利である。特に、超格子に含まれる多数の界面が、半導体ボディにおける転位(dislocations)の伝搬を低減する。

【0056】

図2に示した実施形態のトンネル接合4では、n型トンネル接合層41とp型トンネル接合層43の間に、アンドープ領域42が配置されている。このアンドープ領域42は、通常高濃度でドープされるn型トンネル接合層41及びp型トンネル接合層43が相互に直接接しないという利点を有する。これは、異なる荷電キャリアの種のそれぞれ反対の種の高濃度ドープ層への拡散、及び、荷電キャリアの濃度の減少を妨げる。

20

【0057】

アンドープ領域42は、トンネル接合4の電気特性を有利に向上させる。特に、比較的低い順電圧が得られる。例として、半導体ボディの順電圧は、5V以下である。

【0058】

アンドープ領域42は、Al_xGa_{1-x}N(式中、0<x<1)又はAl_xIn_yGa_{1-x-y}N(式中、0<x<1、0<y<1)を含むことが好ましい。0.05<x<0.3が、好適なアルミニウムの組成である。p型トンネル接合層がp型ドーパントとしてマグネシウムを含む場合の拡散層として、AlGaN層が特に好ましい。n型トンネル接合層41のn型ドーパントとして、例えば、シリコンが好ましい。

30

【0059】

アンドープ領域42は、少なくとも2つのアンドープ中間層421、422を有する多層構造からなることが好ましい。例として、n型トンネル接合層41に接する最初の(第1の)アンドープ中間層421はGaN層からなる。後者(アンドープ中間層421)の膜厚は、例えば、約2nmである。この場合、第2のアンドープ中間層422は、成長方向で後にあり、p型トンネル接合層43に接している。第2のドープ中間層422は、例えば、アンドープトAlGaN層である。この層の膜厚は、例えば、約1nm~約8nmである。

【0060】

アンドープ領域42の2層又は多層の構造は、トンネル接合層41、43にそれぞれ隣接するドーパントの拡散特性に対する材料及び膜厚に関し、アンドープ中間層421、422を有利に用いることができる。例として、AlGaN層422は、p型トンネル接合層43のp型ドーパント(特に、マグネシウム)の拡散バリアとして特に好ましい。GaN層421は、n型トンネル接合層41のn型ドーパント(特に、シリコン)の拡散バリアとして特に好ましい。それに加えて、2層又は多層の構造からなるアンドープ領域42の場合、少なくとも1つの界面は、n型及びp型トンネル接合層41、43のドーパントの拡散バリアとして機能する。

40

【0061】

1つの変形例では、アンドープ領域42は、アンドープ中間層421に加えて、1つ又は複数のp-ドープ中間層422を有する。1つの有利な構成では、少なくとも1

50

つのp-ドープト中間層422が、2つのアンドープト中間層421の間に配置される。この変形例では、トンネル接合の位置を特に正確に設定することができる。

【0062】

p-ドープト閉じ込め層5が、成長方向でトンネル接合4の後にある。例として、p-ドープト閉じ込め層は、電荷キャリア閉じ込め層及び/又はクラッド層で構成される。1つの構成では、p-ドープト閉じ込め層5は、p-ドープトA₁ × Ga₁ × N層(式中、0 × 0.1)である。p-ドープト閉じ込め層5の膜厚は、50nm～500nmであり、例えば、約100nmが好適である。1つの好ましい構成では、p型ドーパントとしてマグネシウムを用いてp-ドープを行うことができ、例として、p型ドーパントは、10¹⁸cm⁻³～5×10²⁰cm⁻³の濃度範囲で含まれ、好ましくは2×10¹⁹cm⁻³～2×10²⁰cm⁻³の濃度範囲で含まれる。10

【0063】

活性領域7が、成長方向でp-ドープト閉じ込め層5の後に配置される。1つの有利な展開では、拡散バリア6が、p-ドープト閉じ込め層5と活性領域7との間に配置される。この拡散バリア6は、p-ドープト閉じ込め層5のp型ドーパントが活性領域7に侵入するリスクを有利に低減する。

【0064】

図3は、拡散バリア6の有利な実施形態を示す。図3の実施形態のように、拡散バリア6は、複数の拡散バリア層61、62、63を配列してなる層である。20

【0065】

基板1に近い第1の拡散バリア層61は、例えば、アンドープト層であり、特に、AlGaNからなり、好ましくは、10nm以下(例えば、5nm)の膜厚を有する。

【0066】

第2の拡散バリア層62は、成長方向で第1の拡散バリア層61の後にある。第2の拡散バリア層62は、好ましくはアンドープのものであり、特に、GaN系である。第2の拡散バリア層の膜厚は、例えば、約20nmである。

【0067】

成長方向で第2の拡散バリア層62の後にある第3の拡散バリア層63として、拡散バリア6は第1の層631及び第2の層632を交互に積層してなる超格子を有する。例として、異なる材料の層、例えば、InGaN層631とGaN層632とが交互に積層される。超格子は、10組以上の層631、632を有することが好ましく、30組以上の第1及び第2の層631、632を有することが好ましい。30

【0068】

この場合、InGaN層631のインジウムの比率は、成長方向において連続的に又はステップ状に減少する。第1及び/又は第2の層631、632の膜厚は、好ましくは2nm以下であり、特に好ましくは1nm以下である。本実施形態では、第1及び第2の層631、632の各膜厚は0.5nmである。第3のバリア層63の全体の膜厚は、好ましくは2nm～100nmであり、本実施形態では30nmである。

【0069】

活性領域7は、多重量子井戸構造を構成する。活性領域7は複数の活性層71を備え、それら複数の活性層71の間にバリア層72が配置されている。成長方向で最初の活性層71の前と、最後の活性層71の後に、他のバリア層72Aがそれぞれ配置されている。40

【0070】

活性層71は、例えば、InGaNを含むか、InGaNからなる。活性層71の膜厚は、例えば、0.8nm以上であり、特に、10nm以下であり、特に好ましくは、4nm以下である。

【0071】

バリア層72は、例えば、AlInGaNを含むか、AlInGaNからなる。バリア層72の膜厚は、1nm以上20nm以下であり、好ましくは2nm以上12nm以下である。バリア層72は、好ましくはGaN層である。特に、GaN層であるバリア層7250

の膜厚は、好ましくは 7 nm 以下であり、特に好ましくは 4 nm 以下である。

【0072】

n 導電型閉じ込め層（例えば、アンドープト GaN 層）8 からなるアンドープト半導体層が、活性領域 7 の後に配置される。アンドープト半導体層の膜厚は、例えば、3 nm 以上 40 nm 以下であり、特に、3 nm 以上 15 nm 以下である。

【0073】

半導体ボディの基板とは反対側の上面には、n 型閉じ込め層に続いて他の n 型コンタクト層 9 が配置されている。他の n 型コンタクト層 9 は、例えば、活性領域 7 に面する n - ドープト GaN 層（例えば、膜厚が約 120 nm）と、活性領域とは反対側の n - ドープト（特に、高濃度でドープされた）InGaN 層（例えば、膜厚が約 5 nm）とからなる積層構造である。例として、n ドープト GaN 層は、 10^{18} cm^{-3} ~ $6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の濃度、好ましくは $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ~ $8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の濃度で Si がドープされている。n - ドープト InGaN 層は、 10^{18} cm^{-3} ~ 10^{21} cm^{-3} の濃度、好ましくは $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以上の濃度で Si がドープされている。
10

【0074】

半導体ボディは、特に、発光ダイオードチップ（LED チップ）又はレーザダイオードチップであり、n 型コンタクト層 3、9 を両側に有する。半導体ボディとの電気的なコンタクトは、例えば、基板 1 の半導体層列とは反対側、及び、他の n 型コンタクト層 9 の表面で行われる。このため、例えば、他の n 型コンタクト層 9 は、パターン化されたコンタクトメタライゼーション、及び / 又は、インジウム錫酸化物（ITO）や ZnO のような透明伝導酸化物からなる透明伝導層に適用される。
20

【0075】

図 5B は、図 2 のトンネル接合 4 及び図 3 の拡散バリア 6 を備えた図 1 の半導体ボディにおける多重量子井戸構造 7 のエネルギーレベルを示す。これと比較して、図 5A は、トンネル接合の無い半導体ボディにおける同様の多重量子井戸構造のものを示す。価電子帯 VB 及び伝導帯 CB のエネルギー E (eV) が、図の縦軸に沿ってプロットされている。

【0076】

それぞれの場合の横軸は、半導体層列内の相対位置 z (nm) を特定する。基板 1 からの距離が増加するに従い、位置 z の値も増加する。それゆえ、図 5A の量子井戸構造の場合、成長基板は n 側に位置する。この n 側は、図中で文字 n が付されており、量子井戸構造の左に位置する。図 5B において、成長基板は、図中で文字 p が付され、図中の右に位置する。
30

【0077】

トンネル接合の無い半導体ボディの場合、荷電キャリアが n 導電型閉じ込め層から活性領域内に遷移するとき、及び、p - ドープト閉じ込め層から活性領域内に遷移するときに、高いエネルギーのポテンシャル障壁（potential barrier）に乗り越えなければならない。この障壁は、図 5A の約 -20 nm 及び +5 nm の位置での立ち上がりに対応する。トンネル接合 4 を備えた半導体ボディの場合、このようなポテンシャル障壁は生じない。

【0078】

図 5A と図 5B の比較において、トンネル接合 4 を備えた半導体ボディにおける活性領域の場合（図 5B）、量子井戸の深さが僅かに減少し、それらの形状が図 5A の量子井戸の形状と著しく異なる。このように、トンネル接合 4 を備えた半導体ボディにおける活性領域の場合、量子井戸間のポテンシャル障壁の実効的な厚さは減少する。このため、量子井戸間の荷電キャリアのトンネリングが促進され、個々の量子井戸に沿った荷電キャリアのより均一な分布が得られる。
40

【0079】

電子密度を計算することで、図 5A に示したトンネル接合の無い半導体ボディの場合、活性領域と p - ドープト閉じ込め層の界面（図 5A の約 0 nm の位置に対応する）付近で電子密度が最も高くなることを示すことができる。これは、p 側で非放射的に再結合する電子を許容する。

【0080】

対照的に、図5Bに関連する半導体ボディの場合、図5Bにおいて約15nm～20nmの位置に対応する活性領域7とn導電型閉じ込め層8との間の界面付近で電子密度が最も高くなる。これにより、電子の非放射的な再結合のリスクは、有利に低減される。これは、高い動作電流での、特に、高い荷電キャリア濃度での半導体ボディの効率に有利に影響する。

【0081】

図6は、動作電流Iの関数として半導体ボディから発せられる放射電力を示す。

【0082】

曲線11は、図1の実施形態に関連する半導体ボディの動作電流Iの関数としての放射電力を示す。これと比較して、曲線12は、多重量子井戸構造を備えるがトンネル接合の無い半導体ボディの動作電流Iの関数としての放射電力を示し、曲線13は、トンネル接合及び单一量子井戸構造を備えた半導体ボディの動作電流Iの関数としての放射電力を示す。これらの半導体ボディの場合、100mAの動作電流Iは、200A/cm²の動作電流密度に本質的に対応する。このため、図6に示す0～350mAの動作電流の範囲は、0～約700A/cm²の動作電流密度の範囲に対応する。

10

【0083】

多重量子井戸構造を備えるがトンネル接合の無い半導体ボディと、单一量子井戸構造及びトンネル接合を備えた半導体ボディは、約150mA以上の動作電流Iで、本発明の半導体ボディの効率を達成しない。

20

【0084】

線12及び13の場合に強い飽和状態が起こる間、図1の実施形態に関する線11は、高い動作電流Iでほぼ線形プロファイルを有する。

【0085】

図6、特に、曲線12及び13の略同一のプロファイルから、トンネル接合が無く多重量子井戸構造を備えた半導体ボディの場合、多重量子井戸のうちの1つの量子井戸だけが放射に寄与することが明らかである。

【0086】

小さい膜厚のバリア層72結合と、半導体ボディのトンネル接合4の使用による多重量子井戸構造におけるポテンシャル障壁の低減と、活性層71間で荷電キャリアの均一な分布を有する複数の量子井戸71間の放射線の放射分布だけが、高い電流密度での発光強度効率の増加を導く。

30

【0087】

図7は、動作電流密度Iの関数として半導体ボディによって発光された放射電力の略線形プロファイルが、十分に小さい膜厚のバリア層72でも実際に達成されていることを示す。

【0088】

多重量子井戸構造を備えるがトンネル接合の無い半導体ボディの場合、バリア層の膜厚d_Bは、実用的に重要ではない（曲線12）。動作電流40mAでの放射電力（40mA）に対する動作電流80mAでの放射電力（80mA）の比率は、全ての膜厚d_Bに対して、約1.6の値で強く飽和（strong saturation）していることを示す。

40

【0089】

これに対して、図1及び図5Bの実施形態に関連する半導体ボディの場合、上記放射電力の比率（80mA）/（40mA）は、バリア層72の膜厚d_Bが減少するに連れて大きく増加する。本実施形態で実現されるようにバリア層72の膜厚d_Bが4nm以下の場合、上記比率は約1.8以上となる。これは、直線性が改善され、これにより、高い動作電流Iでの半導体ボディの発光強度の効率が高くなることを示している。

【0090】

これは、図10において再度図示されている。この図は、図1の実施形態に関連してバリア層72の膜厚d_Bが2nm、4nm、7nm、15nmである半導体ボディの放射電

50

力の動作電流 I 依存性を示す。バリア層 7 2 の膜厚 d_B が 7 nm 以下、好ましくは 4 nm 以下、特に、2 nm 以下の場合、高い動作電流 I での効率が増加する。

【0091】

図 8 は、種々の半導体ボディにより発せられる電磁放射線の半値全幅 (FWHM) の値を示す。図 6 と同様に、曲線 1 1、1 2、1 3 は、図 1 の実施形態に関連する半導体ボディ (曲線 1 1)、多重量子井戸構造を備えトンネル接合が無い半導体ボディ (曲線 1 2)、及びトンネル接合と单一量子井戸構造を備える半導体ボディ (曲線 1 3) に関連する。

【0092】

他の半導体ボディの放射線の半値全幅 (FWHM) の値とは対照的に、図 1 の実施形態に関連する半導体ボディの放射線の半値全幅 (FWHM) は、実質的に動作電流 I から独立する。このため、上述した 1 つの構成の半導体ボディは、高電力 (高パワー) レーザダイオードに特に適している。

【0093】

図 9 は、種々の半導体ボディにより発せられる放射線の最大強度の波長 $L_{d_0 m}$ の動作電流 I 依存性を示す。多重量子井戸構造を備えるがトンネル接合が無い半導体ボディの場合 (曲線 1 2) 及びトンネル接合と单一量子井戸構造を備える半導体ボディの場合 (曲線 1 3) には動作電流 I に応じて波長 $L_{d_0 m}$ が大きくシフトする。一方、図 1 の実施形態に関連する半導体ボディの場合 (曲線 1 1)、動作電流 I に応じた波長 $L_{d_0 m}$ の変化がほとんど目立たないことが有利である。

【0094】

高い動作電流 I での半導体ボディの効率が量子井戸構造の量子井戸の数に依存することが図 1 1 から判る。バリア層 7 2 の膜厚 d_B が 4 nm のとき、図 1 の実施形態に関連する半導体ボディの場合、正確に 3 つの活性層 7 1 を有する多重量子井戸構造を有する活性領域 7 は特に高効率である。3 つの多重量子井戸を有する多重量子井戸構造の場合 ($3 \times M QW$)、この半導体ボディにより発せられた電磁放射線の放射電力 P は、約 40 mA 以上の動作電流 I で最大となる。

【0095】

活性層 7 1 の数の更なる増加は、発せられた放射線の放射電力 P の更なる改善をもたらさない。例として、5 つの活性層 7 1 を有する多重量子井戸構造 ($5 \times M QW$ 、曲線 1 1 A) を備えた半導体ボディの放射電力 P は、3 つの活性層 7 1 を有する多重量子井戸構造 (曲線 1 1) を備えた半導体ボディのものよりも若干低い。

【0096】

発明者らは、これは、荷電キャリアが再結合できる領域の幅よりも活性領域の幅が大きいという事実に起因すると見出した。量子井戸の数の増加は、動作中に放射線を発する活性層 7 1 の数の増加を導かない。しかしながら、バリア層 7 2 の膜厚 d_B が、例えば、2 nm 以下と小さいとき、3 つ以上の活性層 7 1、例えば、4 つ又は 5 つの活性層 7 1 を有する多重量子井戸構造を形成することが好ましい。成長方向で活性領域を小さく (薄く) すると、4 つ又は 5 つの活性層 7 1 の全てが、半導体ボディの動作中に電磁放射線を発することができるという結果となる。

【0097】

单一量子井戸構造 (SQW) を有する半導体ボディは、約 40 mA 以上の動作電流で最小の放射電力 P_{min} (曲線 1 3) で発光する。これは、多重量子井戸構造及びトンネル接合 4 を有する半導体ボディの場合、複数の活性層 7 1 が放射線の発光に寄与することで再び実証される。

【0098】

図 1 2 は、図 1 の実施形態に関連する半導体ボディにより動作中に発せられた相対的な放射電力 r_{e1} のアンドープト n -導電型層の膜厚 d_n 依存性を示す (太棒)。これと比較するため、図 1 2 は、多重量子井戸構造を備え、基板と活性領域の間にトンネル接合の無い半導体ボディの相対的な放射電力 r_{e1} を示す。

【0099】

10

20

30

40

50

後者の場合、アンドープト n - 導電型層の膜厚 d_n が増加するに連れて、発せられた電磁放射線の放射電力 r_{e1} が減少する。一方、図 1 の実施形態に関する半導体ボディは、動作中に発せられた電磁放射線の放射電力 r_{e1} のアンドープト n - 導電型層の膜厚 d_n の依存性は極小さい。

【0100】

図 4 は、半導体ボディの他の実施形態を示す。この実施形態では、半導体ボディは、n 導電型閉じ込め層 8' と n 型コンタクト層 9 との間に、他のトンネル接合 4' 、他の p - ドープト閉じ込め層 5' 、他の拡散バリア 6' 、他の活性領域 7' 及び他の n 導電型閉じ込め層 8' を、n 導電型閉じ込め層 8 から n 型コンタクト層 9 に向かう方向でこの記載した順で相互に連続するように含む。10

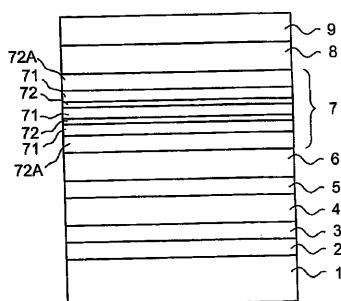
【0101】

この場合、他のトンネル接合 4' 、他の p - ドープト閉じ込め層 5' 、他の拡散バリア 6' 、他の活性領域 7' 及び他の n 導電型閉じ込め層 8' は、トンネル接合 4 、p - ドープト閉じ込め層 5 、拡散バリア 6 、活性領域 7 及び n 導電型閉じ込め層 8 と同一に実現できる。個々の層の形態は、例えば、図 1 乃至図 3 の実施形態に関する説明した構成に対応する。

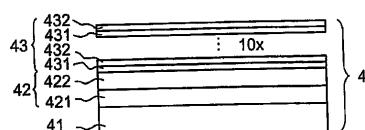
【0102】

本発明は、上記説明した実施形態に限定されない。むしろ、本発明は、請求項に記述される各特徴の任意のあらゆる組み合わせを特に含む、新規な各特徴及びいくつかの特徴の各組み合わせにおいて、この特徴または特徴の組み合わせが請求項または実施形態に明示されていないとしても実現される。20

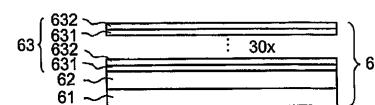
【図 1】
FIG 1



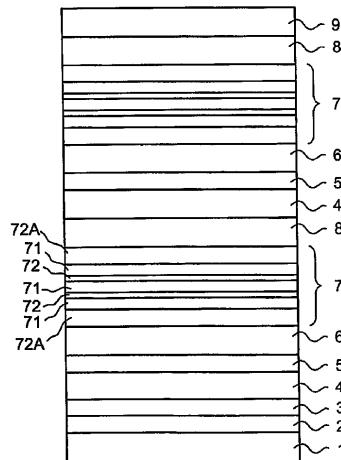
【図 2】
FIG 2



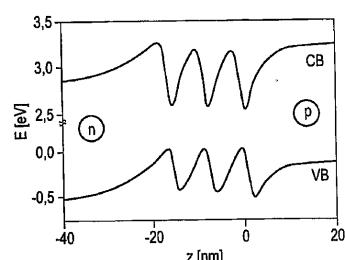
【図 3】
FIG 3



【図 4】
FIG 4

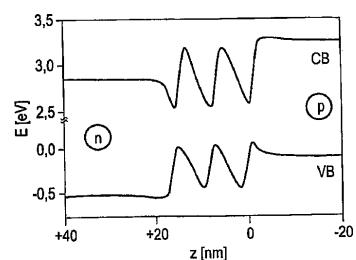


【図 5A】
FIG 5A



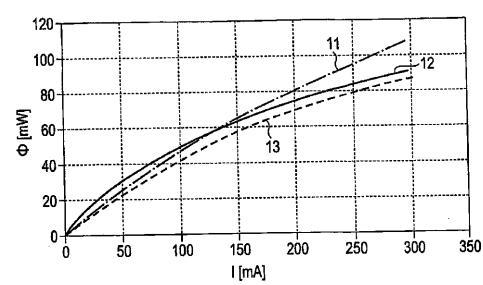
【図 5B】

FIG 5B



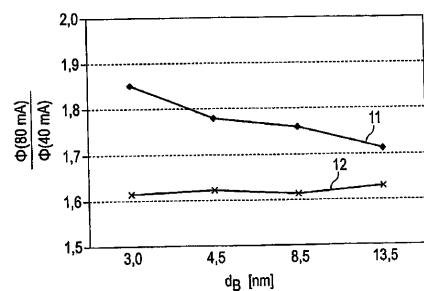
【図 6】

FIG 6



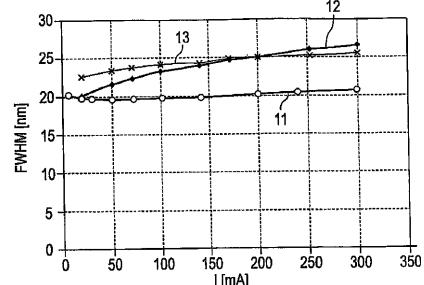
【図 7】

FIG 7



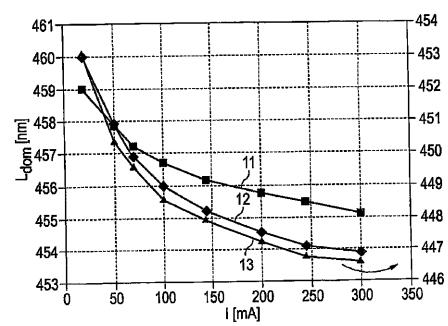
【図 8】

FIG 8



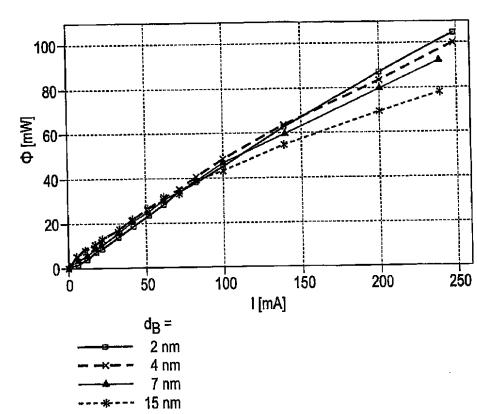
【図 9】

FIG 9



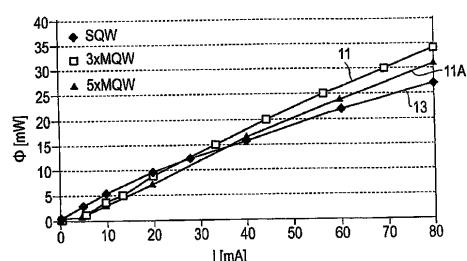
【図 10】

FIG 10



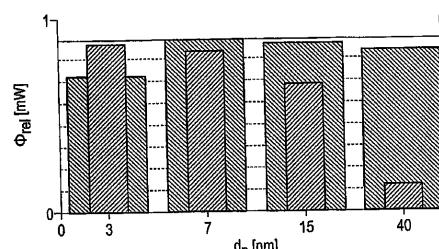
【図 11】

FIG 11



【図 12】

FIG 12



フロントページの続き

(72)発明者 マルティン シュトラスブルク
　　ドイツ連邦共和国 テゲルンハイム 93105 ルターシュトラーセ 1

(72)発明者 ルツィ ヘッペル
　　ドイツ連邦共和国 アルテグローフスハイム 93087 レッシングシュトラーセ 1

(72)発明者 マティアス ザバティール
　　ドイツ連邦共和国 レーゲンスブルク 93059 アム プロツツエンヴァイバー 21 ベー

(72)発明者 マティアス ペーター
　　ドイツ連邦共和国 アルテグローフスハイム 93087 タールマッシンガー シュトラーセ
　　18 アー

(72)発明者 ウーヴェ シュトラウス
　　ドイツ連邦共和国 バート アップバッハ 93077 エーリヒ - ケストナー - シュトラーセ
　　32

審査官 道祖土 新吾

(56)参考文献 米国特許出願公開第2004/0101012(US, A1)
米国特許出願公開第2003/0151042(US, A1)
米国特許出願公開第2004/0079947(US, A1)
特表2009-503823(JP, A)
特表2009-527920(JP, A)
特開2004-128502(JP, A)
国際公開第2007/049939(WO, A1)
特開2007-043151(JP, A)
特開2008-078297(JP, A)
特開平09-129926(JP, A)
国際公開第2007/052628(WO, A1)
特開2011-205148(JP, A)
特開平11-017222(JP, A)
特開2006-080469(JP, A)
特開平10-126006(JP, A)
特開2006-108585(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 33/00-33/64