

(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2010-40838

(P2010-40838A)

(43) 公開日 平成22年2月18日(2010.2.18)

(51) Int.Cl.

H01L 33/32 (2010.01)
H01S 5/343 (2006.01)

F 1

H01L 33/00
H01S 5/343 610

テーマコード(参考)

5FO41
5F173

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 11 頁)

(21) 出願番号

特願2008-203039 (P2008-203039)

(22) 出願日

平成20年8月6日 (2008.8.6)

(71) 出願人 000003078

株式会社東芝

東京都港区芝浦一丁目1番1号

(74) 代理人 100108062

弁理士 日向寺 雅彦

(72) 発明者 田中 明

東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社
東芝内F ターム(参考) 5F041 AA03 CA05 CA12 CA34 CA48
CA57 CA58 CA60 CA65
5F173 AF04 AF06 AF13 AF18 AH22
AJ13 AR25

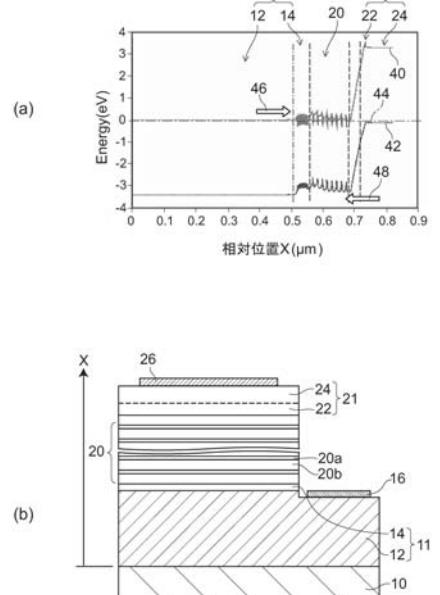
(54) 【発明の名称】発光装置

(57) 【要約】

【課題】広い注入電流範囲において、発光効率が改善可能な発光装置を提供する。

【解決手段】第1導電型の半導体からなる第1の層と、第2導電型の半導体からなる第2の層と、前記第1の層と前記第2の層との間に設けられた多重量子井戸を含む活性層であって、前記多重量子井戸のそれぞれの障壁層内の第1導電型の不純物濃度は略平坦な分布であるかまたは前記第2の層に向かって増加し、前記多重量子井戸のそれぞれの井戸層からみて前記第2の層側の障壁層の不純物濃度の平均値は前記第1の層側の障壁層の不純物濃度の平均値以上であり、前記第2の層に最も近い障壁層の不純物濃度の平均値は前記第1の層に最も近い障壁層の不純物濃度の平均値よりも高い活性層と、を備えたことを特徴とする発光装置が提供される。

【選択図】図1



10:サファイア基板 11:第1の層(n型層) 12:下地層 14:超格子層 16:n側電極
20:活性層 20a:井戸層(W) 20b:障壁層(B) 21:第2の層(p型層) 22:クラッド層
24:コンタクト層 26:p側電極 40:伝導帯 42:価電子帯 44:フェルミレベル 46:電子流
48:ホール流

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

第1導電型の半導体からなる第1の層と、
第2導電型の半導体からなる第2の層と、

前記第1の層と前記第2の層との間に設けられた多重量子井戸を含む活性層であって、前記多重量子井戸のそれぞれの障壁層内の第1導電型の不純物濃度は略平坦な分布であるかまたは前記第2の層に向かって増加し、前記多重量子井戸のそれぞれの井戸層からみて前記第2の層側の障壁層の不純物濃度の平均値は前記第1の層側の障壁層の不純物濃度の平均値以上であり、前記第2の層に最も近い障壁層の不純物濃度の平均値は前記第1の層に最も近い障壁層の不純物濃度の平均値よりも高い活性層と、

を備えたことを特徴とする発光装置。

【請求項 2】

前記活性層は、 $In_xGa_{1-x}N$ （但し、 $0.05 < x < 1$ ）からなる前記井戸層と、 $In_yGa_{1-y}N$ （但し、 $0 < y < 1$ 且つ $x > y$ ）からなる前記障壁層と、を有し、前記第1の層は、 $Al_tGa_{1-t}N$ （但し、 $0 < t < 1.0$ ）からなり、前記第2の層は、 $Al_uGa_{1-u}N$ （但し、 $0 < u < 1.0$ ）からなることを特徴とする請求項1記載の発光装置。

【請求項 3】

前記第1導電型は、n型であることを特徴とする請求項1または2に記載の発光装置。

【請求項 4】

前記障壁層の不純物濃度は、前記第1の層の不純物濃度以上であることを特徴とする請求項1～3のいずれか1つに記載の発光装置。

【請求項 5】

前記障壁層の幅は、5nm以上25nm以下であることを特徴とする請求項1～4のいずれか1つに記載の発光装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、発光装置に関する。

【背景技術】

【0002】

白色LEDの発光効率を上げると、白熱電球及び蛍光灯などを代替可能な照明装置が実現し低消費電力が容易となる。また、青紫色半導体レーザ装置の発光効率を高めると、DVD(Digital Versatile Disc)など光ディスク駆動装置の高性能化が容易になる。

【0003】

これらの発光装置の材料には窒化物系半導体が用いられる。その活性層を多重量子井戸構造とする場合、格子不整合に基づくピエゾ効果を生じ障壁層及び井戸層のエネルギーバンドがそれぞれ傾く。エネルギー bandwidth が傾くと、電子とホールとは井戸層内において空間的に離れた位置に存在しやすくなる。

【0004】

また、多重量子井戸へキャリアが注入された場合、多重量子井戸の一方の端部に位置する井戸層には電子がホールよりも多く存在し、他方の端部に位置する井戸層にはホールが電子よりも多く存在しやすくなる。

これらのために、窒化物系半導体からなる多重量子井戸では、キャリアの再結合が抑制され発光効率が低下することが問題である。

【0005】

圧縮歪が緩和された多重量子井戸構造の発光層を有する窒化物半導体発光素子に関する技術開示例がある（特許文献1）。この技術開示例では、発光層を両側から挟むように設けられた障壁層が、層内全体にわたって不純物を有し、且つ、厚み方向における中央部の不純物の濃度が井戸層に接する部分よりも高濃度となるように設けられている。この結果

10

20

30

40

50

、高い発光強度を得ることが可能であるとされる。

しかしながら、この技術開示例を用いても、活性層を構成する多重量子井戸層全領域にまたがったエネルギー・バンドの曲がりは少なく、キャリアを多重量子井戸層に効率よく閉じ込めるように移動させるには不十分である。特に質量の重いホールは、電子よりも移動が困難である。このために、発光効率を高めることは容易ではない。

【特許文献1】特開2006-13463号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

広い注入電流範囲において、発光効率が改善可能な発光装置を提供する。

10

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明の一態様によれば、第1導電型の半導体からなる第1の層と、第2導電型の半導体からなる第2の層と、前記第1の層と前記第2の層との間に設けられた多重量子井戸を含む活性層であって、前記多重量子井戸のそれぞれの障壁層内の第1導電型の不純物濃度は略平坦な分布であるかまたは前記第2の層に向かって増加し、前記多重量子井戸のそれぞれの井戸層からみて前記第2の層側の障壁層の不純物濃度の平均値は前記第1の層側の障壁層の不純物濃度の平均値以上であり、前記第2の層に最も近い障壁層の不純物濃度の平均値は前記第1の層に最も近い障壁層の不純物濃度の平均値よりも高い活性層と、を備えたことを特徴とする発光装置が提供される。

20

【発明の効果】

【0008】

広い注入電流範囲において、発光効率が改善可能な発光装置が提供される。

【発明を実施するための最良の形態】

【0009】

以下、図面を参照しつつ本発明の実施の形態について説明する。

図1は、本発明の実施形態にかかる窒化物系半導体発光装置を表す図である。すなわち、図1(a)はその平衡状態のエネルギー・バンド図、図1(b)は模式断面図である。

本図に表す実施形態は、白色LED光源に用いられ紫外～緑色波長範囲の光を放出可能な発光装置を表すものとする。

30

【0010】

発光装置の活性層20は、 $In_xGa_{1-x}N$ （但し、 $0.05 < x < 1$ ）からなる井戸層20aと、 $In_yGa_{1-y}N$ （但し、 $0 < y < 1$ 且つ $x > y$ ）からなる障壁層20bと、からなる。また、n型である第1の層11は、 $Al_tGa_{1-t}N$ （但し、 $0 < t < 1.0$ ）からなり、p型である第2の層21は、 $Al_uGa_{1-u}N$ （但し、 $0 < u < 1.0$ ）からなるものとする。アルミニウムの組成比t及びuは、それぞれ0以上0.2以下とすることがより好ましい。

【0011】

図1(b)は、より詳細な構造を表す。すなわち、サファイア基板10上に、第1の層(n型層)11、活性層20、第2の層(p型層)21、及びp側電極26が設けられている。第1の層11は、n型GaN層からなる下地層12と、下地層12内での電流の拡散を容易にするn型 $In_{0.1}Ga_{0.9}N / In_{0.05}Ga_{0.95}N$ からなる超格子層14と、を有している。

40

【0012】

また、活性層20は、 $In_{0.2}Ga_{0.8}N / In_{0.05}Ga_{0.95}N$ からなる多重量子井戸構造を有しているものとする。さらに、第2の層21は、p型 $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ からなるクラッド層22、及びp型GaNからなるコンタクト層24を有している。

【0013】

このような窒化物系半導体を結晶成長する場合、MOCVD (Metal Organic Chemic

50

al Vapor Deposition)法またはMBE (Molecular Beam Epitaxy)法を用いると、良好な結晶性を保ちつつ、量産性を高めることができる。

【0014】

なお、本明細書において、窒化物系半導体とは、 $(A_{1-x}B_{1-x})_yGa_zIn_{1-y-z}N$ ($0 < x < 1$ 、 $0 < y < 1$ 、 $0 < z < 1$ 、 $y + z < 1$) からなる半導体をいい、さらにV族元素としてAsやPなどを含むものや、p型あるいはn型の不純物を含むものも窒化物系半導体に包含されるものとする。

【0015】

n側電極16は下地層12の上に選択的に形成され、p側電極26はコンタクト層24の上に選択的に形成される。活性層20からの光は上方、側方、下方にそれぞれ放出される。このうちサファイア基板10の下方に反射層を形成しておけば、下方に向かう光を反射して、上方または側方から取り出し、光取り出し効率を高めることが容易となる。

10

【0016】

図1(a)のエネルギー-band図において、横軸Xは図1(b)の垂直方向に沿った相対位置を表し、第1の層11から第2の層21に向かう方向をプラスとする。伝導帯40の電子は、第2の層21へ向かう電子流46となり活性層20に注入される。また、価電子帯42のホールは、第1の層11へ向かうホール流48となり活性層20に注入される。なお、擬フェルミレベルを44で表す。本図において、井戸数は8つである。

【0017】

図2は、エネルギー-bandの曲がりを説明する図である。すなわち、図2(a)は、図1(a)の活性層近傍のエネルギー-band図、図2(b)は障壁層内の不純物濃度を表す図である。

20

窒化物系半導体は圧電効果の大きい材料であり、格子不整合により井戸層20aの面内には圧縮歪が加わり、活性層20内においてX軸に沿って内部電界を生じる。この内部電界により、井戸層20a及び障壁層20bのエネルギー-bandがそれぞれ傾く。

【0018】

なお、井戸層20aの幅は、例えば2~8nmの範囲、障壁層20bの幅は、例えば5~25nmの範囲とすることができます。障壁層20bの幅をより狭くするとキャリアを閉じ込めることができ難くなる。また幅をより厚くすると量子効果が抑制されキャリアの移動が困難となる。

30

【0019】

本実施形態では、障壁層20bの不純物濃度を徐々に変化させる。

すなわち、多重量子井戸のそれぞれの障壁層20b内の第1導電型の不純物濃度は、略平坦な分布であるかまたは第2の層21に向かって増加する。また、多重量子井戸のそれぞれの井戸層20aからみて第2の層21側の障壁層20bの不純物濃度の平均値は、第1の層11側の障壁層20bの不純物濃度の平均値以上である。さらに、第2の層21に最も近い障壁層20bの不純物濃度の平均値は、第1の層11に最も近い障壁層20bの不純物濃度の平均値よりも高い。

図2に表した具体例においては、障壁層20bをn型としそのドナー濃度を第1の層11(p型層)に向かうに従って徐々に高くする。すなわち、j番目の障壁層B_jのドナー濃度の平均値N_jと、(j+1)番目の障壁層B_{j+1}のドナー濃度の平均値N_{j+1}との間に次式が成り立つようとする。

40

【0020】

$$N_j < N_{j+1}$$

但し、 $1 \leq j \leq M$ (M: 井戸数)

なお、図2(b)においてドナー濃度は障壁層20b内でそれぞれ一定値(すなわち平均値に等しい)とする。

【0021】

例えば、第1の層11のドナー濃度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、且つ第2の層21のアク

50

セプタ濃度が $2 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-3}$ である場合、障壁層 B_j のドナー濃度の平均値 N_j を、第1の層11のドナー濃度よりも第2の層21側に向かって徐々に高くする。このようにすると、多重量子井戸からなる活性層20において、ドット線で表す伝導帯40及び価電子帯42のエネルギー帯を全体的に徐々に曲げることができ、注入されたキャリアをそれぞれの井戸層 W_j 内に分散して効率よく閉じ込めることができ容易になる。

【0022】

特に、質量が重く移動しにくいホールは、このバンド曲がりにより第1の層11(n 型)側への移動がより容易となり、それぞれの井戸層 W_j へ効率よく閉じ込めることができ容易となる。このために多重量子井戸構造における再結合の効率を高めることが容易となる。

10

【0023】

なお、比較のため、障壁層 B_j のドナー濃度の平均値 N_j がその位置に依存せず略同一である場合の伝導帯140及び価電子帯142をそれぞれ実線で表している。

【0024】

また、図2(a)において、($j+1$)番目の障壁層 B_{j+1} の傾きが j 番目の障壁層 B_j の傾きよりも緩やかになっている。すなわち、障壁が第2の層21に近づくに従い低くなっている、キャリアの移動を一層容易にしている。

【0025】

さらに、図2では、第1の層11及びそれぞれの障壁層 B_j を n 型とし、第2の層21を p 型としたが、これとは反対導電型としてもよい。すなわち、第1の層を p 型、第2の層を n 型、障壁層20bを p 型とし、障壁層 B_j のアクセプタ濃度を第2の層21に向かって徐々に高くしてもよい。

20

【0026】

他方、図3は比較例にかかる窒化物系半導体発光装置のバンドを説明する図である。すなわち、図3(a)はチップ全体のバンド図、図3(b)、及び図3(c)は活性層のバンド図を表す。

図3(b)において、井戸数の多い発光素子(LED)において、障壁層120bへ n 型不純物(Si)がドープされている。このドナー濃度をそれぞれの障壁層120b内で略 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の一定値とし、且つ多重量子井戸活性層120内における障壁層120bの位置に依存せずに略同一としている。

30

【0027】

この場合、井戸層120a及び障壁層120bが傾くので、それぞれの井戸層120a内において電子150とホール152とが空間的に分離されやすく、且つ井戸層120a間でのキャリア移動が困難となる。また、活性層120全体としては、伝導帯140及び価電子帯142のバンド曲がりを生じることではなく、第1の層111側の井戸層120aには電子150が、第2の層121側の井戸層120aにはホール152がそれより多く蓄積され、活性層120の両端の井戸層120aにキャリアが分離されやすい。

これらのために、キャリアが活性層120内で不均一に分布し再結合の効率が低下する。特に、キャリアの注入量が少ない場合、再結合効率の低下が大きく、発光効率の低下が顕著となる。すなわち、図3(b)の比較例においては再結合効率の改善には限界がある。

40

【0028】

また、障壁層120aの中央部のドナー濃度を井戸層120bに接する部分のドナー濃度よりも高くすると、図3(c)にドット線で表すように、第2の層121に向かうに従って障壁層120bの中央部の障壁を低下させ、且つ障壁層120bと井戸層120aとの界面におけるバンドの傾きを低減する。しかしながら、キャリアの移動が容易となる程にバンド曲がりを生じることはない。

【0029】

これに対して、図2(a)の本実施形態では多重量子井戸層全域にわたってバンド曲がりを生じ、キャリアが活性層20内を移動しやすくなり、電子50及びホール52をM個の井戸層 W_j 内に効率よく閉じ込め可能である。このために、それぞれの井戸層 W_j 内で

50

再結合がより促進されるので、キャリアオーバーフローを抑制しつつ、発光効率の改善が容易となる。

【0030】

図4は、光出力及び内部(発光)効率のシミュレーション結果を表すグラフ図である。すなわち、縦軸は光出力 P_o (W/m) 及び内部効率 i_n 、横軸は電流 (A/m) をそれぞれ表す。なお、mはメートルであり、図1(b)の断面の奥行き方向の単位長さを表している。また、実線は本実施形態、破線は比較例をそれぞれ表す。

【0031】

例えは電流が 250 A/mにおいて、本実施形態の光出力 P_o は略 530 W/mであり、略 475 W/mである比較例の光出力 P_o の約 1.12 倍と高い。また、同じ 250 m A/m の電流において、本実施形態の内部効率 i_n は略 51 %であり、略 46 %である比較例の内部効率 i_n の約 1.11 倍と高い。さらに、低電流である 50 A/mにおいて、本実施形態の光出力 P_o は略 110 W/mであり、略 85 W/mである比較例の光出力 P_o の 1.29 倍と高い。また、同じ 50 mA/m の電流において、本実施形態の内部効率 i_n は略 52 %であり、略 43 %である比較例の内部効率 i_n の約 1.21 倍と高い。このように、本実施形態では広い電流範囲において、高い光出力 P_o 及び内部効率 i_n を保つことが容易である。

【0032】

なお、井戸数と、活性層 20 内の不純物濃度分布と、の間には適正な範囲がある。窒化物系半導体では応力歪が大きいため井戸数は通常 15 以下とすることが好ましく、発光素子 (LED) の場合、6 ~ 12 の範囲がより好ましい。障壁層 B_j のドナー濃度を変化してバンドを曲げる場合、バンド曲がりを大きくし過ぎると井戸層 20a に閉じ込め可能なキャリア数が減少し、活性層 20 を通過する量が増加する。このために、再結合に寄与するキャリアが減少し、発光効率が十分には改善されない場合を生じる。井戸層 W_j の数を 6 ~ 12 とし、ドナー濃度の平均値の範囲を、 $1 \times 10^{18} \sim 2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ とすると、発光効率の改善が容易である。

【0033】

図5は、障壁層内のドナー濃度分布の変形例を表す図である。すなわち、図5(a)は、不純物濃度分布が増加する図、図5(b)は不純物濃度分布の平均値を説明する図である。

不純物濃度が平坦でない場合、それぞれの障壁層 20b 内において、不純物濃度 $n(x)$ を積分し求めた不純物濃度の平均値 N_{AV} は式(1)のようになる。

【0034】

【数1】

$$N_{AV} = \frac{\int_{x1}^{x2} n(x) dx}{x2 - x1} \quad \text{式(1)}$$

但し、 N_{AV} : 不純物濃度平均値

$n(x)$: 不純物濃度

$x1$: 障壁層端位置

$x2$: 障壁層端位置

【0035】

図2(b)では、障壁層 20b 内のドナー濃度は平坦な一定値であったが、本発明はこれに限定されず、障壁層 B_i ($1 \sim M$) 内で第 2 の層 21 に向かってそれぞれ増加していくてもよい。図5(a)では、障壁層 B_j 内でドナー濃度 N_j が直線状に増加している

10

20

30

40

50

が、曲線状に増加していくてもよい。

【0036】

この場合にも、 j 番目の不純物濃度の平均値 N_{Av_j} と、 $(j + 1)$ 番目の平均値 $N_{Av_{j+1}}$ と、が式(2)を満たすようにする。

$$N_{Av_j} < N_{Av_{j+1}} \quad \text{式(2)}$$

但し、 $1 \leq j \leq M$

【0037】

このように、それぞれの障壁層 B_j 内において不純物濃度を徐々に増加すると、活性層 20 全体におけるバンド曲がりの制御が容易となり、キャリア移動がより容易になる。

10

【0038】

図6は、障壁層の不純物濃度分布の変形例を表す図である。

それぞれの障壁層 B_j 内の不純物濃度分布は平坦であるものとするが、平坦でない場合には、式(1)で表される不純物濃度の平均値 N_{Av} に置き換えればよい。

【0039】

第2の層21に最も近い障壁層 B_{M+1} の平均値 $N_{Av_{M+1}}$ が、第1の層11に最も近い障壁層 B_1 の平均値 N_{Av_1} よりも大きければよい。すなわち、 $N_{Av_j} < N_{Av_{j+1}}$ となる領域が少なくとも1つあれば、バンド曲がりを生じキャリア移動を容易にできる。

20

【0040】

図6において、例えば障壁層 B_2 の平均値 N_{Av_2} と、障壁層 B_3 の平均値 N_{Av_3} と、が等しく、かつ障壁層 B_{M-1} の平均値 $N_{Av_{M-1}}$ と、障壁層 B_M の平均値 N_{Av_M} と、が等しい。この場合においても、第2の層21に最も近い障壁層 B_{M+1} の平均値 $N_{Av_{M+1}}$ が、第1の層11に最も近い障壁層 B_1 の平均値 N_{Av_1} よりも高くできるので、活性層 20 のバンド曲がりを生じ、キャリア移動を容易にできる。図6に表す不純物濃度分布は、図2(b)に表す不純物濃度分布よりも結晶成長プロセスが簡素である。

【0041】

多重量子井戸において、例えば井戸層20aの幅を2~8nmの範囲、障壁層20bの幅を5~15nmとする場合、 $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ (井戸層) / $In_{0.05}Ga_{0.95}N$ (障壁層)からなる多重量子井戸構造をMOCVD法などを用いて逐次的に結晶成長を行うことができる。障壁層20bをn型とする場合、例えば SiH_4 (シラン)ガスを分解して得られた Si をドナーとすることができる。

30

【0042】

例えばMOCVD装置を用いて、ドーピングガスである SiH_4 ガスの流量、反応時間、及び反応温度などを自動制御すれば、図2(b)、図5(a)、及び図6のように徐々にドナー濃度を増加させることができ。本実施形態では、障壁層 B_j の不純物濃度の平均値 N_{Av} を徐々に増加するか、または徐々に減少するかであり、多重量子井戸の結晶成長に要する時間は、障壁層 B_j が一定濃度である場合と略同一にできる。このために、結晶成長工程の生産性を高めることができ、量産性に富む発光装置が提供される。

40

【0043】

以上の実施形態は窒化物系半導体を用いた発光装置であるが、本発明はこれに限定されない。すなわち、圧電効果が小さい $InAlGaP$ 系材料を用いた可視光波長範囲の光を放出可能な発光装置であってもよい。応力歪が小さい $InAlGaP$ 系材料では、井戸数を、例えば40とする。このような場合にも、障壁層の濃度を徐々に変化させバンドを曲げると、キャリアオーバーフローを抑制しつつ多重量子井戸内の再結合を促進し、発光効率の改善ができる。なお、 $InAlGaP$ 系材料とは、 $In_x(Ga_yAl_{1-y})_{1-x}P$ (但し、 $0 < x < 1$ 、 $0 < y < 1$)なる組成式で表される材料であり、p型不純物やn型不純物が添加されたものも含むものとする。

【0044】

50

また、本発明は L E D に限定されることはなく、半導体レーザ装置であってもよい。障壁層の不純物濃度を徐々に変化させることによりバンドを曲げ、キャリアの再結合を促進し、発光効率が改善された半導体レーザ装置が可能である。

【0045】

以上、図面を参照しつつ、本発明に実施の形態について説明した。しかしながら本発明はこれらの実施形態には限定されない。例えば、発光装置を構成する活性層、多重量子井戸、井戸層、障壁層、クラッド層、コンタクト層、電流拡散層、下地層、及び基板の材質、サイズ、形状、配置などに関して、当業者が各種の設計変更を行ったものであっても、本発明の主旨を逸脱しない限り本発明の範囲に包含される。

【図面の簡単な説明】

【0046】

【図1】本実施形態にかかる発光装置を表す図

【図2】エネルギー・バンドの曲がりを説明する図

【図3】比較例にかかる発光装置のエネルギー・バンドを説明する図

【図4】光出力及び内部(発光)効率の特性を表すグラフ図

【図5】障壁層内のドナー濃度分布の変形例を表す図

【図6】障壁層の不純物濃度分布の変形例を表す図

【符号の説明】

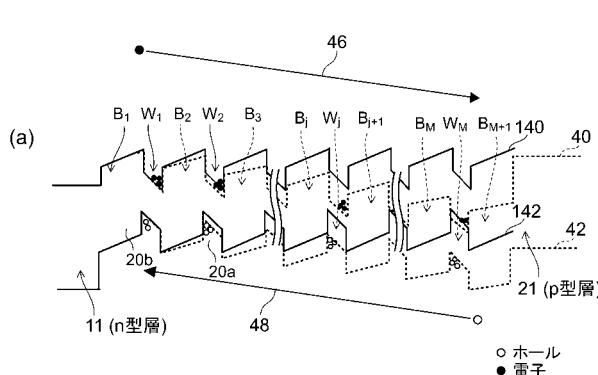
【0047】

11 第1の層、20 活性層、20a 井戸層(W_j)、20b 障壁層(B_j)、
21 第2の層、 N_{av} (不純物濃度)平均値、 n (\times) 不純物濃度、40 伝導帯
、42 僮電子帯

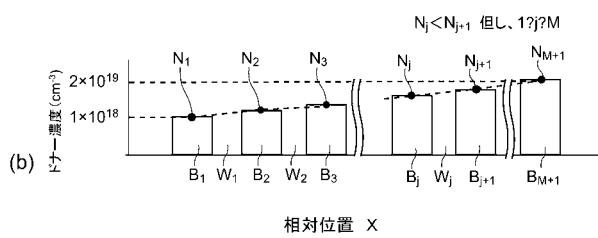
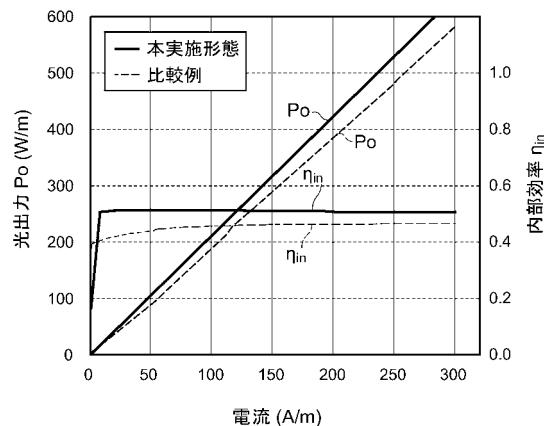
10

20

【図2】

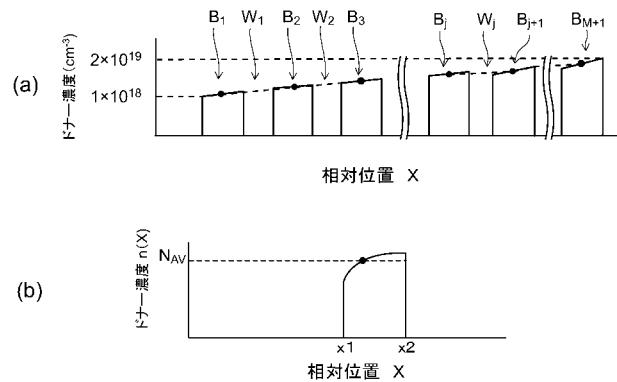


【図4】

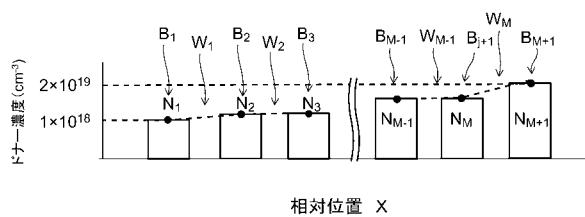


50:電子 52:ホール

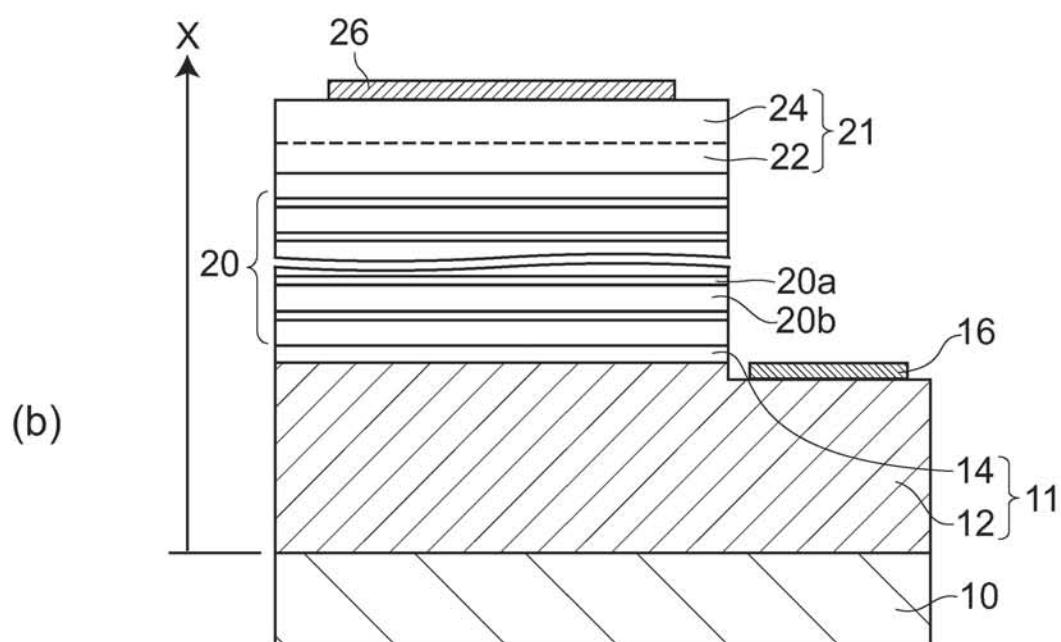
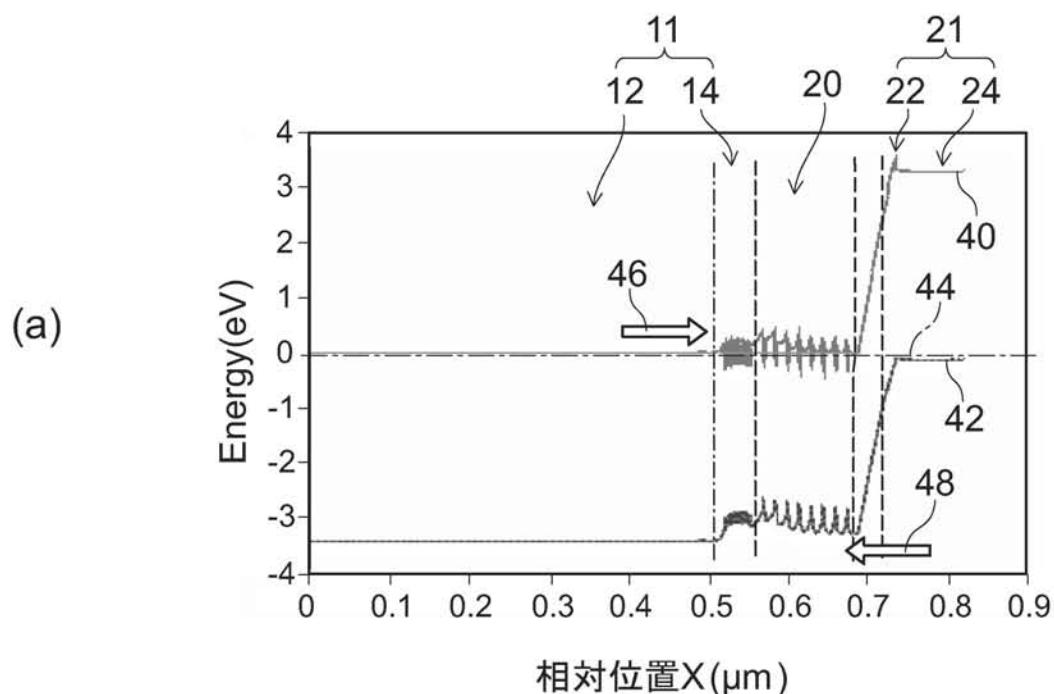
【図5】



【図6】

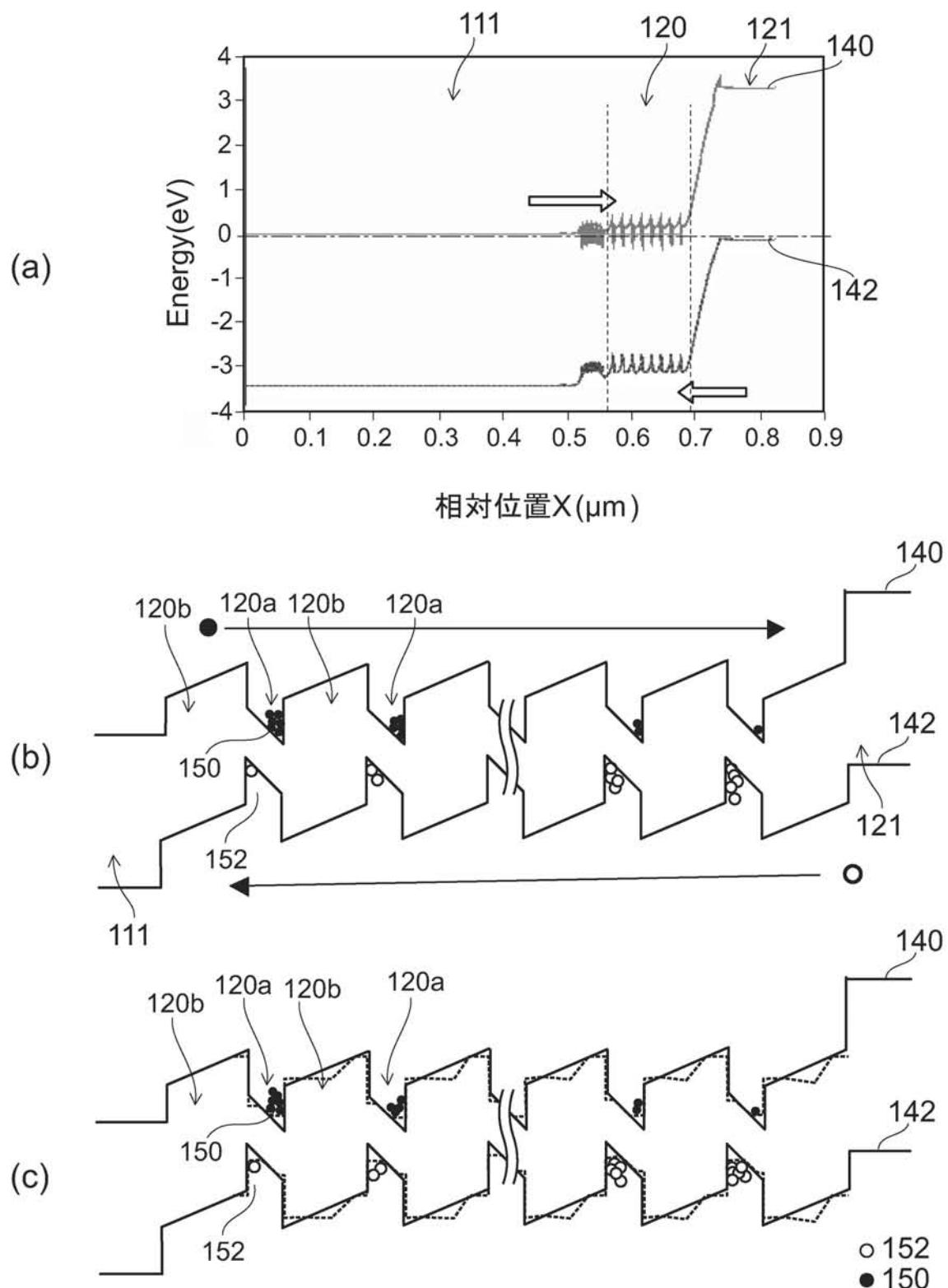


【図1】



10:サファイア基板 11:第1の層(n型層) 12:下地層 14:超格子層 16:n側電極
 20:活性層 20a:井戸層(W_j) 20b:障壁層(B_j) 21:第2の層(p型層) 22:クラッド層
 24:コンタクト層 26:p側電極 40:伝導帶 42:価電子帶 44:擬フェルミレベル 46:電子流
 48:ホール流

【図3】



111:第1の層(n型層) 120:活性層 120a:井戸層 120b:障壁層(B_j) 121:第2の層(p型層)
 140:伝導帯 142:価電子帯 150:電子 152:ホール