

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B1)

(11) 特許番号

特許第5296264号
(P5296264)

(45) 発行日 平成25年9月25日(2013.9.25)

(24) 登録日 平成25年6月21日(2013.6.21)

(51) Int.Cl.		F I	
HO 1 L 33/06	(2010.01)	HO 1 L 33/00	1 1 2
HO 1 L 33/48	(2010.01)	HO 1 L 33/00	4 0 0
HO 1 L 33/32	(2010.01)	HO 1 L 33/00	1 8 6
HO 1 L 33/18	(2010.01)	HO 1 L 33/00	1 6 2

請求項の数 26 (全 32 頁)

(21) 出願番号	特願2012-551819 (P2012-551819)	(73) 特許権者	000005821
(86) (22) 出願日	平成24年9月12日 (2012.9.12)		パナソニック株式会社
(86) 国際出願番号	PCT/JP2012/005775		大阪府門真市大字門真1006番地
審査請求日	平成24年11月14日 (2012.11.14)	(74) 代理人	100101683
(31) 優先権主張番号	特願2011-215130 (P2011-215130)		弁理士 奥田 誠司
(32) 優先日	平成23年9月29日 (2011.9.29)	(74) 代理人	100155000
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		弁理士 喜多 修市
(31) 優先権主張番号	特願2011-215206 (P2011-215206)	(74) 代理人	100180529
(32) 優先日	平成23年9月29日 (2011.9.29)		弁理士 梶谷 美道
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)	(74) 代理人	100135703
早期審査対象出願			弁理士 岡部 英隆
		(74) 代理人	100125922
			弁理士 三宅 章子

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 窒化物半導体発光素子およびLEDシステム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

発光層を有する窒化物半導体発光素子であって、
前記発光層は、主面がm面である $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層 ($0 < x < 1$) を含み、
前記 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層における In 組成比 x の深さ方向プロファイル (depth profile) は複数のピークを有しており、
前記複数のピークのそれぞれにおける前記 In 組成比 x の値は異なっており、
前記発光層において発生する光の波長の温度係数は、243 K から 353 K の間の何れかの温度において0となり、243 K における波長または353 K における波長の何れか短い方と温度係数が0となる温度における波長との差が2 nm 以下である、窒化物半導体発光素子。

10

【請求項2】

発光層を有する窒化物半導体発光素子であって、
前記発光層は、主面がm面である $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層 ($0 < x < 1$) を含み、
前記 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層における In 組成比 x の深さ方向プロファイル (depth profile) は複数のピークを有しており、
前記複数のピークのそれぞれにおける前記 In 組成比 x の値は異なっており、
前記発光層において発生する光の波長の温度係数は233 K から 393 K の間の何れかの温度において0となり、233 K における波長または393 K における波長の何れか短い方と温度係数が0となる温度における波長との差が5 nm 以下である、窒化物半導体発

20

光素子。

【請求項 3】

前記 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層における In 組成比 x の平均値は、 0.08 以上 0.40 以下である、請求項 1 または 2 のいずれかに記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項 4】

前記複数のピークのうち隣り合う 2 つのピーク間の領域の In 組成比 x の最小値と、前記隣り合う 2 つのピークのうち In 組成比 x の値が大きい方の値との In 組成比 x の差は 0.005 以上 0.04 以下である、請求項 1 から 3 のいずれかに記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項 5】

前記 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層の厚さは 7 nm 以上である、請求項 1 から 4 のいずれかに記載の窒化物半導体発光素子。

【請求項 6】

前記 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層の厚さを W 、前記窒化物半導体発光素子の動作電流値を I 、前記窒化物半導体発光素子を上面視した場合の $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層の面積を S_{well} 、前記動作電流値 I を前記面積 S_{well} で割った値を電流密度 $J [A/cm^2]$ とした場合、 W は 7 nm 以上であり、かつ、以下の関係式を満足する状態で動作される、請求項 1 から 5 のいずれかに記載の窒化物半導体発光素子。

【数 27】

$$10.42 \times W [nm] - 81.3 \leq J [A/cm^2] \leq 10.42 \times W [nm] - 61.3$$

【請求項 7】

発光層を有する窒化物半導体発光素子であって、
前記発光層は、主面が m 面である $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層 ($0 < x < 1$) を含み、
前記 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層における In 組成比 x の深さ方向プロファイル (depth profile) は複数のピークを有しており、
前記複数のピークのそれぞれにおける前記 In 組成比 x の値は異なっており、
前記発光層において発生する光の波長の温度係数の絶対値は 0.03 以下である、窒化物半導体発光素子。

【請求項 8】

前記 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層の厚さを W 、前記窒化物半導体発光素子の動作電流値を I 、前記窒化物半導体発光素子を上面視した場合の $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層の面積を S_{well} 、前記動作電流値 I を前記面積 S_{well} で割った値を電流密度 $J [A/cm^2]$ とした場合、 W は 7 nm 以上であり、かつ、以下の関係式を満足する状態で動作される、請求項 1 から 5 のいずれかに記載の窒化物半導体発光素子。

【数 28】

$$J [A/cm^2] < 10.42 \times W [nm] - 71.3$$

【請求項 9】

発光層を有する窒化物半導体発光素子であって、
前記発光層は、主面が m 面である $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層 ($0 < x < 1$) を含み、
前記 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層における In 組成比 x の深さ方向プロファイル (depth profile) は複数のピークを有しており、
前記複数のピークのそれぞれにおける前記 In 組成比 x の値は異なっており、
前記発光層において発生する光の波長の温度係数は負の値である、窒化物半導体発光素子。

【請求項 10】

請求項 1 から 9 のいずれかに記載の窒化物半導体発光素子を複数備え、

前記複数の窒化物半導体発光素子は並列に接続され、

前記 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層の厚さを W 、並列接続された前記複数の窒化物半導体発光素子の全体の動作電流値を I_{total} 、前記複数の窒化物半導体発光素子のそれぞれを上面視した場合の前記 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層の面積の総和を S_{well_total} 、前記 I_{total} を前記 S_{well_total} で割った値を電流密度 J_{total} [A/cm^2] とした場合、

前記複数の窒化物半導体発光素子における前記 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層の厚さ W は等しく、かつ、 W は 7 nm 以上であり、

以下の関係式を満足する状態で動作される、LEDシステム。

【数 29】

$$10.42 \times W[\text{nm}] - 81.3 \leq \frac{I_{total}}{S_{well_total}} [A/cm^2] \leq 10.42 \times W[\text{nm}] - 61.3$$

【請求項 11】

請求項 1 から 7 のいずれかに記載の窒化物半導体発光素子を N 個 (N は 2 以上の整数) 備え、

前記 N 個の窒化物半導体発光素子は並列に接続され、

前記 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層の厚さを W 、前記 N 個の窒化物半導体発光素子を上面視した場合の $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層の面積 S_{well} 、並列接続された前記 N 個の窒化物半導体発光素子の全体の動作電流値 I_{total} とした場合、

前記 N 個の窒化物半導体発光素子の前記厚さ W および前記面積 S_{well} は等しく、かつ、 W は 7 nm 以上であり、

以下の関係式を満足する状態で動作される、LEDシステム。

【数 30】

$$10.42 \times W[\text{nm}] - 81.3 \leq \frac{I_{total}}{N \times S_{well}} [A/cm^2] \leq 10.42 \times W[\text{nm}] - 61.3$$

【請求項 12】

1 または複数の窒化物半導体発光素子を備えた LED システムであって、

前記窒化物半導体発光素子は、発光層を有する窒化物半導体発光素子であって、

前記発光層は、主面が m 面である $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層 ($0 < x < 1$) を含み、

前記 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層における In 組成比 x の深さ方向プロファイル (depth profile) は複数のピークを有しており、

前記複数のピークのそれぞれにおける前記 In 組成比 x の値は異なっており、

前記発光層において発生する光の波長の温度係数は 243 K から 353 K の間の何れかの温度において 0 となり、 243 K における波長または 353 K における波長の何れか短い方と温度係数が 0 となる温度における波長との差が 2 nm 以下となる電流を前記 1 または複数の窒化物半導体発光素子に供給する電流供給部を有する、LED システム。

【請求項 13】

1 または複数の窒化物半導体発光素子を備えた LED システムであって、

前記窒化物半導体発光素子は、発光層を有する窒化物半導体発光素子であって、

前記発光層は、主面が m 面である $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層 ($0 < x < 1$) を含み、

前記 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層における In 組成比 x の深さ方向プロファイル (depth profile) は複数のピークを有しており、

前記複数のピークのそれぞれにおける前記 In 組成比 x の値は異なっており、

前記発光層において発生する光の波長の温度係数は 233 K から 393 K の間の何れかの温度において 0 となり、 233 K における波長または 393 K における波長の何れか短い方と温度係数が 0 となる温度における波長との差が 5 nm 以下となる電流を前記 1 または複数の窒化物半導体発光素子に供給する電流供給部を有する、LED システム。

【請求項 14】

10

20

30

40

50

第1の発光層を有する1または複数の第1の窒化物半導体発光素子と第2の発光層を有する1または複数の第2の窒化物半導体発光素子とを備えたLEDシステムであって、前記第1の発光層は、主面がm面である $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層($0 < x < 1$)を含み、前記 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層におけるIn組成比xの深さ方向プロファイル(depth profile)は複数のピークを有しており、前記複数のピークのそれぞれにおける前記In組成比xの値は異なっており、320K以上453K以下の温度範囲において、前記第1の発光層において発生する光の波長の温度係数は負となり、前記第2の発光層において発生する光の波長の温度係数は正となる、LEDシステム。

【請求項15】

前記 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層の厚さをW、前記第1の窒化物半導体発光素子の動作電流値をI、前記第1の窒化物半導体発光素子を上面視した場合の $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層の面積を S_{well} 、前記動作電流値Iを前記面積 S_{well} で割った値を電流密度 $J[A/cm^2]$ とした場合、Wは7nm以上であり、かつ、以下の関係式を満足する状態で動作される、請求項14に記載のLEDシステム。

【数31】

$$J[A/cm^2] < 10.42 \times W[nm] - 71.3$$

【請求項16】

前記1または複数の第1の窒化物半導体発光素子からの光と前記1または複数の第2の窒化物半導体発光素子からの光とを合成した合成光の前記所定の温度範囲における中心波長の最大値と最小値との差は5nm以内である、請求項14または15に記載のLEDシステム。

【請求項17】

前記1または複数の第1の窒化物半導体発光素子からの光の全光量と前記1または複数の第2の窒化物半導体発光素子からの光の全光量とがほぼ等しい、請求項14から16の何れかに記載のLEDシステム。

【請求項18】

前記LEDシステムは、前記第1の窒化物半導体発光素子を複数有し、前記複数の第1の窒化物半導体発光素子は直列接続されており、前記 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層の厚さをW、前記直列接続された複数の第1の窒化物半導体発光素子に流す電流の電流値を I_{total} 、前記第1の窒化物半導体発光素子を上面視した場合の $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層の面積を S_{well} とした場合、Wは8nm以上であり、かつ、以下の関係式を満足する状態で動作される、請求項14から17のいずれかに記載のLEDシステム。

【数32】

$$10.42 \times W[nm] - 106.3 < \frac{I_{total}}{S} [A/cm^2] < 10.42 \times W[nm] - 86.3$$

【請求項19】

前記LEDシステムは、前記第1の窒化物半導体発光素子を複数有し、前記複数の第1の窒化物半導体発光素子は並列接続されており、前記 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層の厚さをW、前記並列接続された複数の第1の窒化物半導体発光素子に流す電流の電流値を I_{total} 、前記第1の窒化物半導体発光素子を上面視した場合の $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層の面積を S_{well} とした場合、Wは8nm以上であり、かつ、以下の関係式を満足する状態で動作される、請求項14から17のいずれかに記載のLEDシステム。

10

20

30

40

【数 3 3】

$$10.42 \times W[\text{nm}] - 106.3 < \frac{I_{\text{total}}}{S \times N} [A/\text{cm}^2] < 10.42 \times W[\text{nm}] - 86.3$$

【請求項 2 0】

前記 1 または複数の第 1 の窒化物半導体発光素子からの光と前記 1 または複数の第 2 の窒化物半導体発光素子からの光とを合成した合成光の 2 4 3 K から 3 5 3 K の温度範囲における中心波長の最大値と最小値との差は 2 nm 以下である、請求項 1 4 から 1 9 の何れかに記載の LED システム。

【請求項 2 1】

前記 1 または複数の第 1 の窒化物半導体発光素子からの光と前記 1 または複数の第 2 の窒化物半導体発光素子からの光とを合成した合成光の 2 3 3 K から 3 9 3 K の温度範囲における中心波長の最大値と最小値との差は 5 nm 以下である、請求項 1 4 から 1 9 の何れかに記載の LED システム。

【請求項 2 2】

前記 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 井戸層における In 組成比 x の平均値は、0.08 以上 0.40 以下である、請求項 1 4 から 2 1 のいずれかに記載の LED システム。

【請求項 2 3】

前記複数のピークのうち隣り合う 2 つのピークの間領域の In 組成比 x の最小値と、前記隣り合う 2 つのピークのうち In 組成比 x の値が大きい方の値との In 組成比 x の差は 0.005 以上 0.04 以下である、請求項 1 4 から 2 2 の何れかに記載の LED システム。

【請求項 2 4】

前記第 1 の窒化物半導体発光素子は、前記第 1 の発光層の主面側および裏面側のそれぞれに設けられた p 型層および n 型層をさらに備え、

前記複数のピークは 3 つ以上あり、前記 3 つ以上のピークの In 組成比 x の値は、前記 p 型層から前記 n 型層の方向に向かって小さくなっている、または大きくなっている請求項 1 4 から 2 3 の何れかに記載の LED システム。

【請求項 2 5】

前記第 1 の窒化物半導体発光素子は、前記第 1 の発光層の主面側および裏面側のそれぞれに設けられた p 型層および n 型層をさらに備え、

前記複数のピークは 4 つ以上あり、前記 4 つ以上のピークの In 組成比 x の値は、前記 p 型層から前記 n 型層の方向に向かって V 字型または逆 V 字型になっている請求項 1 4 から 2 3 の何れかに記載の LED システム。

【請求項 2 6】

前記 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 井戸層の厚さは 7 nm 以上である、請求項 1 4 から 2 5 の何れかに記載の LED システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本願は、窒化物半導体発光素子、および複数の窒化物半導体発光素子を備える LED システムに関する。

【背景技術】

【0 0 0 2】

V 族元素として窒素 (N) を含む窒化物半導体は、そのバンドギャップの大きさから、短波長発光素子の材料として有望視されている。そのなかでも、窒化ガリウム系化合物半導体の研究が盛んに行われており、窒化ガリウム系化合物半導体を用いた青色発光ダイオード (LED)、緑色 LED、および青色半導体レーザーも実用化されている。

【0 0 0 3】

窒化物半導体には、ガリウム (Ga) の一部または全部を、アルミニウム (Al) およ

10

20

30

40

50

びインジウム (In) の少なくとも一方で置換した化合物半導体が含まれる。このような窒化物半導体は、組成式 $Al_xGa_yIn_zN$ ($0 < x, y, z < 1, x + y + z = 1$) で表される。以下、窒化ガリウム系化合物半導体を窒化物半導体と呼ぶ。

【0004】

GaをAlやInで置換することによって、バンドギャップをGaNのバンドギャップよりも大きくすることも小さくすることも可能である。これにより、青色や緑色などの短波長の光のみならず、オレンジ色や赤色の光を発光させることも可能となる。このような特徴から、窒化物半導体発光素子は、画像表示装置や照明装置へ応用することも期待されている。

【0005】

窒化物半導体はウルツ鉱型結晶構造を有している。図1(a)、(b)、(c)は、ウルツ鉱型結晶構造の面を4指数表記(六方晶指数)で示している。4指数表記では、 a_1 、 a_2 、 a_3 およびcで示される基本ベクトルを用いて結晶面や方位が表される。基本ベクトルcは、 $[0001]$ 方向に延びており、この方向の軸は「c軸」と呼ばれる。c軸に垂直な面(plane)は「c面」または「 (0001) 面」と呼ばれている。図1(a)には、c面の他、a面、m面が図示されている。また、図1(b)には、r面が図示され、図1(c)には、 $(11\bar{2}2)$ 面が図示されている。

【0006】

図2(a)は、窒化物半導体の結晶構造を棒球モデルで示している。図2(b)は、m面表面付近の原子配列を、a軸方向から観察したものである。m面は、図2(b)の紙面に垂直である。図2(c)は、+c面表面の原子配列を、m軸方向から観察したものである。c面は、図2(c)の紙面に垂直である。図2(b)からわかるように、m面に平行な平面上にN原子およびGa原子が位置している。これに対して、c面では、図2(c)からわかるように、Ga原子のみが配置される層と、N原子のみが配置される層とが形成される。

【0007】

従来、窒化物半導体を用いて半導体素子を作製する場合、窒化物半導体結晶を成長させる基板として、c面基板すなわち (0001) 面を主面に有する基板が使用される。この場合、Ga原子およびN原子の配置に起因して、窒化物半導体にはc軸方向に自発的な分極(Electrical Polarization)が形成される。このため、「c面」は「極性面」とも呼ばれている。分極の結果、窒化物半導体発光素子の発光層におけるInGaNの量子井戸には、c軸方向に沿ってピエゾ電界が発生する。この電界により、発光層内における電子およびホールの分布に位置ずれが生じるため、キャリアの量子閉じ込めシュタルク効果により、発光層の内部量子効率が低下することが問題であった。発光層の内部量子効率が低下することを抑制するため、 (0001) 面に形成される発光層の厚さは、3nm以下に設計されている。

【0008】

さらに近年、非極性面と呼ばれるm面やa面、あるいは半極性面と呼ばれる-r面や $(11\bar{2}2)$ 面を表面に有する基板を使用して、発光素子を製造することが検討されている。図1に示すように、ウルツ鉱型結晶構造におけるm面はc軸に平行であり、c面と直交する6つの等価な面である。例えば、図1において $[1\bar{1}00]$ 方向に垂直な $(1\bar{1}00)$ 面がm面に該当する。 $(1\bar{1}00)$ 面と等価な他のm面には、 (-1010) 面、 $(10\bar{1}0)$ 面、 (-1100) 面、 $(01\bar{1}0)$ 面、 $(0\bar{1}10)$ 面がある。ここで、ミラー指数を表すカッコ内の数字の左に付された「-」は、「バー」を意味する。

【0009】

m面においては、図2(b)に示されるように、Ga原子およびN原子は同一原子面上に存在するため、m面に垂直な方向に分極は発生しない。そのため、m面上に形成した半導体積層構造を用いて発光素子を作製すれば、発光層にピエゾ電界が発生せず、キャリアの量子閉じ込めシュタルク効果による内部量子効率の低下という課題を解決することがで

10

20

30

40

50

きる。このことは、m面以外の非極性面であるa面でも同様であり、また、半極性面と呼ばれる-r面や(11-22)面でも類似の効果を得ることが可能である。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0010】

【特許文献1】特開2009-253164号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0011】

半導体のバンドギャップは、温度が上昇すると小さくなる(Varshni Effect)ことが知られている。窒化物半導体発光素子の温度が上昇すると、窒化物半導体発光素子内の発光層のバンドギャップが小さくなるため、発光層において生じる光の波長が長くなる。

10

【0012】

本開示の実施形態によれば、温度が変化した場合の波長の変化が抑制されたm面窒化物半導体発光素子、および、温度が上昇した場合に光が短波長化するm面窒化物半導体発光素子を提供することができる。

【0013】

本開示の他の実施形態によれば、m面窒化物半導体発光素子を有するシステムにおいて、温度が変化した場合の波長の変化を抑制することができる。

20

【課題を解決するための手段】

【0014】

本開示の窒化物半導体発光素子は、発光層を有する窒化物半導体発光素子であって、前記発光層は、主面がm面である $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層($0 < x < 1$)を含み、前記 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層におけるIn組成比xの深さ方向プロファイル(depth profile)は複数のピークを有しており、前記複数のピークのそれぞれにおける前記In組成比xの値は異なっている。

【0015】

本開示のLEDシステムは、第1の発光層を有する1または複数の第1の窒化物半導体発光素子と第2の発光層を有する1または複数の第2の窒化物半導体発光素子とを備えたLEDシステムであって、前記第1の発光層は、主面がm面である $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層($0 < x < 1$)を含み、前記 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層におけるIn組成比xの深さ方向プロファイル(depth profile)は複数のピークを有しており、前記複数のピークのそれぞれにおける前記In組成比xの値は異なっており、所定の温度範囲において、前記第1の発光層において発生する光の波長の温度係数は負となり、前記第2の発光層において発生する光の波長の温度係数は正となる。

30

【発明の効果】

【0016】

本開示の実施形態によると、波長の温度係数が0に近い、または負である窒化物半導体発光素子を実現することができる。また、本開示の他の実施形態によると、温度が変化しても波長の変化の少ないシステムを実現することができる。

40

【図面の簡単な説明】

【0017】

【図1】(a)から(c)は、ウルツ鉱型結晶構造を示す図

【図2】(a)から(c)は、窒化物半導体の結晶構造を棒球モデルで示した図

【図3】(a)、(b)は、井戸層の深さ方向のIn組成比、およびエネルギーを示す図

【図4】(a)から(c)は、温度が変化しても発光波長が維持されるメカニズムを示す図

【図5】(a)、(b)は、実施形態1の窒化物半導体発光素子(フリップチップ)の構造を示す図

50

【図6】(a)、(b)は、実施形態1の窒化物半導体発光素子(ワイヤボンディング)の構造を示す図

【図7】実施形態2のLEDシステムを示す図

【図8】(a)、(b)は、実施形態4におけるLEDシステムを示す図

【図9】(a)、(b)は、実施形態5におけるLEDシステムを示す図

【図10】実施例1におけるInGaN井戸層のフォトルミネッセンス測定の温度特性を示す図

【図11】実施例1におけるM面GaN基板上に作製した厚さ9nmのInGaN井戸層のIn組成比の測定結果を示す図

【図12】実施例2におけるLEDの電流密度と発光波長の温度係数を示す図

10

【図13】実施例2におけるLEDのInGaN井戸幅と発光波長の温度係数が0または負となる電流密度の関係を示す図

【発明を実施するための形態】

【0018】

窒化物半導体であるGaNのバンドギャップの温度依存性は、(式1)で近似される。

【数1】

$$E_g[eV] = 3.47 - 7.7 \times 10^{-4} \times \frac{T[K]^2}{T[K] + 600} \quad (\text{式1})$$

20

ここでT[K]はGaNの温度(絶対温度)である。また、発光波長は(式2)で与えられる。

【数2】

$$\lambda[nm] = \frac{1239.8}{E_g[eV]} \quad (\text{式2})$$

【0019】

温度が213K(-60)から473K(200)程度の範囲では、GaNの温度(横軸)と発光波長(縦軸)はほぼ線形の関係にあり、温度が1K上昇するごとに、発光波長が0.05nm程度長くなる。波長の温度特性の傾きを「波長の温度係数」と称すると、波長の温度係数は、GaNでは+0.05[nm/K]程度である。波長の温度係数は材料に依存しており、298K(25)における発光波長が450nm程度のInGaNでは、波長の温度係数は+0.06[nm/K]程度である。

30

【0020】

一般的に、温度が上昇することによって窒化物半導体を構成する結晶の原子間距離が長くなるため、バンドギャップが小さくなり、発光波長は長くなる。従来の窒化物半導体では、温度係数は常に正であった。

【0021】

LEDを屋内でプロジェクター光源やLCDのバックライト等に使用する場合には、例えば、243K(-30)から353K(80)の環境温度において、温度変化に伴う波長変化量は2nm以下にすることが求められる。また、LEDを屋外で街路灯や自動車のヘッドランプ等に使用する場合には、例えば、233K(-40)から393K(120)の環境温度において、温度変化に伴う波長変化量は5nm以下にすることが求められる。さらに、大電流、大発光量の場合などは、その環境温度として、233K(-40)程度から453K(180)程度が要求される。LEDをこの温度範囲で使用すると、低温時と高温時で発光波長が10nm以上も異なってしまう。

40

【0022】

本発明者らは、波長の温度係数および温度変化に伴う波長変化を制御するため、発光層であるInGaN井戸層の構成について注目した。LEDの動作範囲を233K(-40)程度から453K(180)程度とした場合、(式1)から、バンドギャップは1

50

00 meV程度低下する。従来のInGaN井戸層では、伝導帯の底と価電子帯の上で決まるエネルギー差が最も小さくなる状態、すなわちバンドギャップに対応する電子-正孔ペアが優先的に光を発するため、温度の上昇に伴い、発光波長は長くなる。

【0023】

そこで、本発明者らは、熱によって電子・正孔を高いエネルギー状態に励起し、高いエネルギー状態のまま発光させることで、温度係数を小さくするInGaN井戸構造および温度係数が負のInGaN井戸構造を発明した。

【0024】

具体的には、LEDを453K(180)に加熱した場合、その熱励起による活性化エネルギーは40 meV程度に達する。この活性化エネルギーを電子および正孔に独立に与えることで電子-正孔ペアとして80 meV程度、エネルギー状態を高めたまま発光させる。窒化物半導体のバンドギャップは453K(180)において100 meV程度低下するため、熱励起による電子・正孔の活性化が発光波長の変化を補償することになる。

【0025】

従来のInGaN発光層では、発光層の電子-正孔ペアはバンドギャップが最も小さな箇所優先的に光るため、熱によって電子・正孔を高いエネルギー状態に励起したとしても、バンドギャップで決まる発光波長でしか素子は発光しない。例えば、特許文献1には、主面が(0001)面に対して傾斜した面では膜厚方向のIn組成比のばらつきが発生することが記載されている。しかしながら、InGaN井戸層の膜厚は6 nmと薄く、さらに、波長の温度係数との関係が不明瞭であった。そこで、本発明者らはInGaN井戸層の構造に関して鋭意、検討を行い、InGaN井戸層の厚さ方向にIn組成比が波型に変動する新しい構造を実現した。

【0026】

本開示の窒化物半導体発光素子は、発光層を有する窒化物半導体発光素子であって、前記発光層は、主面がm面である $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層($0 < x < 1$)を含み、前記 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層におけるIn組成比xの深さ方向プロファイル(depth profile)は複数のピークを有しており、前記複数のピークのそれぞれにおける前記In組成比xの値は異なっている。

【0027】

ある実施形態において、前記発光層において発生する光の波長の温度係数は、243Kから353Kの間の何れかの温度において0となり、243Kにおける波長または353Kにおける波長の何れか短い方と温度係数が0となる温度における波長との差が2 nm以下である。

【0028】

ある実施形態において、前記発光層において発生する光の波長の温度係数は233Kから393Kの間の何れかの温度において0となり、233Kにおける波長または393Kにおける波長の何れか短い方と温度係数が0となる温度における波長との差が5 nm以下である。

【0029】

ある実施形態において、前記 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層におけるIn組成比xの平均値は、0.08以上0.40以下である。

【0030】

ある実施形態において、前記複数のピークのうち隣り合う2つのピークの間領域のIn組成比xの最小値と、前記隣り合う2つのピークのうちIn組成比xの値が大きい方の値とのIn組成比xの差は0.005以上0.04以下である。

【0031】

ある実施形態において、前記発光層の主面側および裏面側のそれぞれに設けられたp型層およびn型層をさらに備え、前記複数のピークは3つ以上あり、前記3つ以上のピークのIn組成比xの値は、前記p型層から前記n型層の方向に向かって小さくなっている、

10

20

30

40

50

または大きくなっている。

【0032】

ある実施形態において、前記発光層の主面側および裏面側のそれぞれに設けられたp型層およびn型層をさらに備え、前記複数のピークは4つ以上あり、前記4つ以上のピークのIn組成比Xの値は、前記p型層から前記n型層の方向に向かってV字型または逆V字型になっている。

【0033】

ある実施形態において、前記In_xGa_{1-x}N井戸層の厚さは7nm以上である。

【0034】

ある実施形態において、前記In_xGa_{1-x}N井戸層の厚さをW、前記窒化物半導体発光素子の動作電流値をI、前記窒化物半導体発光素子を上面視した場合のIn_xGa_{1-x}N井戸層の面積をS_{well}、前記動作電流値Iを前記面積S_{well}で割った値を電流密度J[A/cm²]とした場合、Wは7nm以上であり、かつ、以下の関係式を満足する状態で動作される。

【数3】

$$10.42 \times W[nm] - 81.3 \leq J[A/cm^2] \leq 10.42 \times W[nm] - 61.3$$

【0035】

ある実施形態において、前記発光層において発生する光の波長の温度係数の絶対値は0.03以下である。

【0036】

ある実施形態において、前記In_xGa_{1-x}N井戸層の厚さをW、前記窒化物半導体発光素子の動作電流値をI、前記窒化物半導体発光素子を上面視した場合のIn_xGa_{1-x}N井戸層の面積をS_{well}、前記動作電流値Iを前記面積S_{well}で割った値を電流密度J[A/cm²]とした場合、Wは7nm以上であり、かつ、以下の関係式を満足する状態で動作される。

【数4】

$$J[A/cm^2] < 10.42 \times W[nm] - 71.3$$

【0037】

ある実施形態において、前記発光層において発生する光の波長の温度係数は負の値である。

【0038】

本開示のLEDシステムは、上記いずれかの窒化物半導体発光素子を複数備え、前記複数の窒化物半導体発光素子は並列に接続され、前記In_xGa_{1-x}N井戸層の厚さをW、並列接続された前記複数の窒化物半導体発光素子の全体の動作電流値をI_{total}、前記複数の窒化物半導体発光素子のそれぞれを上面視した場合の前記In_xGa_{1-x}N井戸層の面積の総和をS_{well_total}、前記I_{total}を前記S_{well_total}で割った値を電流密度J_{total}[A/cm²]とした場合、前記複数の窒化物半導体発光素子における前記In_xGa_{1-x}N井戸層の厚さWは等しく、かつ、Wは7nm以上であり、以下の関係式を満足する状態で動作される。

【数5】

$$10.42 \times W[nm] - 81.3 \leq \frac{I_{total}}{S_{well_total}} [A/cm^2] \leq 10.42 \times W[nm] - 61.3$$

【0039】

本開示の他のLEDシステムは、上記いずれかの窒化物半導体発光素子をN個(Nは2以上の整数)備え、前記N個の窒化物半導体発光素子は並列に接続され、前記In_xGa_{1-x}N井戸層の厚さをW、前記N個の窒化物半導体発光素子を上面視した場合のIn_xGa_{1-x}N井戸層の面積S_{well}、並列接続された前記N個の窒化物半導体発光素子の全体

10

20

30

40

50

の動作電流値 I_{total} とした場合、前記 N 個の窒化物半導体発光素子の前記厚さ W および前記面積 S_{well} は等しく、かつ、 W は 7 nm 以上であり、以下の関係式を満足する状態で動作される。

【数 6】

$$10.42 \times W[\text{nm}] - 81.3 \leq \frac{I_{total}}{N \times S_{well}} [A/\text{cm}^2] \leq 10.42 \times W[\text{nm}] - 61.3$$

【0040】

本開示の他の LED システムは、上記いずれかの 1 または複数の窒化物半導体発光素子を備え、前記発光層において発生する光の波長の温度係数は 243 K から 353 K の間の何れかの温度において 0 となり、 243 K における波長または 353 K における波長の何れか短い方と温度係数が 0 となる温度における波長との差が 2 nm 以下となる電流を前記 1 または複数の窒化物半導体発光素子に供給する電流供給部を有する。

10

【0041】

本開示の他の LED システムは、上記いずれかの 1 または複数の窒化物半導体発光素子を備え、前記発光層において発生する光の波長の温度係数は 233 K から 393 K の間の何れかの温度において 0 となり、 233 K における波長または 393 K における波長の何れか短い方と温度係数が 0 となる温度における波長との差が 5 nm 以下となる電流を前記 1 または複数の窒化物半導体発光素子に供給する電流供給部を有する。

【0042】

20

本開示の他の LED システムは、第 1 の発光層を有する 1 または複数の第 1 の窒化物半導体発光素子と第 2 の発光層を有する 1 または複数の第 2 の窒化物半導体発光素子とを備えた LED システムであって、前記第 1 の発光層は、主面が m 面である $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 井戸層 ($0 < x < 1$) を含み、前記 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 井戸層における In 組成比 x の深さ方向プロファイル (depth profile) は複数のピークを有しており、前記複数のピークのそれぞれにおける前記 In 組成比 x の値は異なり、所定の温度範囲において、前記第 1 の発光層において発生する光の波長の温度係数は負となり、前記第 2 の発光層において発生する光の波長の温度係数は正となる。

【0043】

ある実施形態において、前記 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 井戸層の厚さを W 、前記第 1 の窒化物半導体発光素子の動作電流値を I 、前記第 1 の窒化物半導体発光素子を上面視した場合の $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 井戸層の面積を S_{well} 、前記動作電流値 I を前記面積 S_{well} で割った値を電流密度 $J [A/\text{cm}^2]$ とした場合、 W は 7 nm 以上であり、かつ、以下の関係式を満足する状態で動作される。

30

【数 7】

$$J[A/\text{cm}^2] < 10.42 \times W[\text{nm}] - 71.3$$

【0044】

ある実施形態において、前記 1 または複数の第 1 の窒化物半導体発光素子からの光と前記 1 または複数の第 2 の窒化物半導体発光素子からの光とを合成した合成光の前記所定の温度範囲における中心波長の最大値と最小値との差は 5 nm 以内である。

40

【0045】

ある実施形態において、前記 1 または複数の第 1 の窒化物半導体発光素子からの光の全光量と前記 1 または複数の第 2 の窒化物半導体発光素子からの光の全光量とがほぼ等しい。

【0046】

ある実施形態において、前記 LED システムは、前記第 1 の窒化物半導体発光素子を複数有し、前記複数の第 1 の窒化物半導体発光素子は直列接続されており、前記 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 井戸層の厚さを W 、前記直列接続された複数の第 1 の窒化物半導体発光素子に流す電

50

流の電流値を I_{total} 、前記第1の窒化物半導体発光素子を上面視した場合の $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層の面積を S_{well} とした場合、 W は 8 nm 以上であり、かつ、以下の関係式を満足する状態で動作される。

【数8】

$$10.42 \times W[\text{nm}] - 106.3 < \frac{I_{total}}{S} [A/\text{cm}^2] < 10.42 \times W[\text{nm}] - 86.3$$

【0047】

ある実施形態において、前記LEDシステムは、前記第1の窒化物半導体発光素子を複数有し、前記複数の第1の窒化物半導体発光素子は並列接続されており、前記 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層の厚さを W 、前記並列接続された複数の第1の窒化物半導体発光素子に流す電流の電流値を I_{total} 、前記第1の窒化物半導体発光素子を上面視した場合の $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層の面積を S_{well} とした場合、 W は 8 nm 以上であり、かつ、以下の関係式を満足する状態で動作される。

【数9】

$$10.42 \times W[\text{nm}] - 106.3 < \frac{I_{total}}{S \times N} [A/\text{cm}^2] < 10.42 \times W[\text{nm}] - 86.3$$

【0048】

ある実施形態において、前記1または複数の第1の窒化物半導体発光素子からの光と前記1または複数の第2の窒化物半導体発光素子からの光とを合成した合成光の 243 K から 353 K の温度範囲における中心波長の最大値と最小値との差は 2 nm 以下である。

【0049】

ある実施形態において、前記1または複数の第1の窒化物半導体発光素子からの光と前記1または複数の第2の窒化物半導体発光素子からの光とを合成した合成光の 233 K から 393 K の温度範囲における中心波長の最大値と最小値との差は 5 nm 以下である。

【0050】

ある実施形態において、前記 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層における In 組成比 x の平均値は、 0.08 以上 0.40 以下である。

【0051】

ある実施形態において、前記複数のピークのうち隣り合う2つのピーク間の領域の In 組成比 x の最小値と、前記隣り合う2つのピークのうち In 組成比 x の値が大きい方の値との In 組成比 x の差は 0.005 以上 0.04 以下である。

【0052】

ある実施形態において、前記第1の窒化物半導体発光素子は、前記第1の発光層の主面側および裏面側のそれぞれに設けられた p 型層および n 型層をさらに備え、前記複数のピークは3つ以上あり、前記3つ以上のピークの In 組成比 x の値は、前記 p 型層から前記 n 型層の方向に向かって小さくなっている、または大きくなっている。

【0053】

ある実施形態において、前記第1の窒化物半導体発光素子は、前記第1の発光層の主面側および裏面側のそれぞれに設けられた p 型層および n 型層をさらに備え、前記複数のピークは4つ以上あり、前記4つ以上のピークの In 組成比 x の値は、前記 p 型層から前記 n 型層の方向に向かって V 字型または逆 V 字型になっている。

【0054】

ある実施形態において、前記 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層の厚さは 7 nm 以上である。

【0055】

ある実施形態において、前記所定の温度範囲は、 320 K 以上 453 K 以下の範囲である。

【0056】

以下、実施形態1、2として波長の温度係数を0に近づける方法を説明し、また、実施

10

20

30

40

50

形態3として、波長の温度係数を負にする方法を説明する。また、実施形態4、5として、複数の窒化物半導体発光素子を有するLEDシステムを説明する。

【0057】

(実施形態1)

図を参照しながら、本開示による窒化物半導体発光素子の第1の実施形態を説明する。

【0058】

まず、 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層 ($0 < x < 1$) について図3を用いて説明する。図3(a)は、特許文献1に開示された従来の窒化物半導体発光素子における $InGaN$ 井戸層の In 組成比のプロファイルとエネルギーを示した図である。図3(b)は、本実施形態の窒化物半導体発光素子における $InGaN$ 井戸層の In 組成比のプロファイルとエネルギーを示した図である。従来構造では、 In 組成比が単調に変化しているため、エネルギーが安定する箇所、すなわちエネルギーが最も低い箇所が1箇所(図中において、井戸層の厚さ方向位置が6nmの箇所)である。そのため、 $InGaN$ 井戸層に注入された電子・正孔は、このエネルギーが安定する箇所で発光することになる。窒化物半導体発光素子の温度が変化しても、エネルギーが最も低い箇所が優先的に発光する。

【0059】

一方、本実施形態における窒化物半導体発光素子の発光層は、主面が m 面である $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層 ($0 < x < 1$) を有する。 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層は、 $In_yGa_{1-y}N$ 層 ($0 < y < 1$) (障壁層) によって挟まれている。 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層における In 組成比(x)の深さ方向プロファイル(depth profile) Pr は複数のピーク x_1 から x_3 を有している。複数のピーク x_1 から x_3 のそれぞれにおける In 組成比(x)の値は異なっている。

【0060】

$InGaN$ 井戸層の深さ方向(層の厚さ方向)プロファイルは、波状に変動している。本実施形態においては、ピーク x_1 から x_3 のそれぞれの周囲の領域を「高 In 領域」と示し、高濃度領域の間に挟まれる領域を「低濃度領域」と称している。

【0061】

このように厚さ方向に複数のピーク(高 In 領域)を形成することで、その動作温度に応じて、複数のエネルギー状態での発光が可能となると考えられる。すなわち、温度上昇に伴って、小さいバンドギャップにおいて発光が生じるのを補償することができる。よって、温度の上昇に伴う光の長波長化を抑制することができる。以下、図4を用いて、本発明者が推測する発光過程を具体的に説明する。

【0062】

図4(a)、(b)、(c)に、本実施形態における $InGaN$ 井戸層の伝導帯と価電子帯のエネルギー状態を示す。図4(a)は低温動作時、図4(c)は高温動作時、図4(b)はその中間の温度での動作、中温動作時における窒化物半導体発光素子の発光の様子を示している。高 In 領域を、高 In 領域1の In 組成比の最大値(ピーク)を x_1 、バンドギャップを E_{g1} 、発光波長を λ_1 、高 In 領域2の In 組成比の最大値を x_2 、バンドギャップを E_{g2} 、発光波長を λ_2 、高 In 領域3の In 組成比の最大値を x_3 、バンドギャップを E_{g3} 、発光波長を λ_3 と定義する。 In 組成比 x 、バンドギャップ E_g および発光波長 λ の大小関係は、下記の関係を満たす。

$$x_1 > x_2 > x_3$$

$$E_{g1} < E_{g2} < E_{g3}$$

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$$

【0063】

図4(b)および(c)では、図4(a)に対して動作温度が高い状態にある。この場合、バンドギャップおよび発光波長は(式1)および(式2)の関係式で決まる。図4(b)の中温動作でのバンドギャップを E_{g1}' 、 E_{g2}' 、 E_{g3}' 、発光波長を λ_1' 、 λ_2' 、 λ_3' とする。図4(c)の高温動作でのバンドギャップを E_{g1}'' 、 E_{g2}'' 、 E_{g3}'' 、発光波長を λ_1'' 、 λ_2'' 、 λ_3'' とする。この場合、下記

10

20

30

40

50

の関係を満たす。

$$E_{g1}'' < E_{g1}' < E_{g1}$$

$$E_{g2}'' < E_{g2}' < E_{g2}$$

$$E_{g3}'' < E_{g3}' < E_{g3}$$

$$1'' > 1' > 1$$

$$2'' > 2' > 2$$

$$3'' > 3' > 3$$

【0064】

高In領域1と高In領域2の間には低In領域1が形成されているため、高In領域1と高In領域2の間にはエネルギー障壁が存在している。伝導帯側のエネルギー障壁を E_{gc1} 、価電子帯側のエネルギー障壁を E_{gv1} とする。また、同様に、高In領域2と高In領域3の間には低In領域2が形成されており、伝導帯側のエネルギー障壁を E_{gc2} 、価電子帯側のエネルギー障壁を E_{gv2} とする。

10

【0065】

図4(a)の低温動作時では、バンドギャップが最も小さい高In領域1での発光が支配的であり、発光波長は長く 1 で発光する。図4(b)のように、窒化物半導体発光素子の動作温度が上昇し電子および正孔が熱励起されると、高In領域1で発光せずに、エネルギー障壁 E_{gc1} および E_{gv1} を乗り越えて高In領域2に移動する電子・正孔が発生する。重要な点は、高In領域2のエネルギー状態が準安定に形成されている点である。すなわち、 E_{gc1} および E_{gv1} を乗り越えて高In領域2に移動したキャリアは高In領域2内のエネルギーが小さい状態で準安定し、高In領域1に戻ることなく、高In領域2内で優先的に発光する。すなわち、 E_{g1} よりも大きなバンドギャップ E_{g2} で発光するため、発光波長は 1 よりも小さくなる。さらに温度が上昇し、図4(c)の高温動作時では、エネルギー障壁 E_{gc1} および E_{gv1} を乗り越え、さらにエネルギー障壁 E_{gc2} および E_{gv2} を乗り越える電子・正孔が発生し、高In領域3内で優先的に発光する。

20

【0066】

以上のように、窒化物半導体発光素子の動作温度が上昇するにつれて、主として発光する領域は、高In領域1、高In領域2、高In領域3の順に変化し、バンドギャップがより大きな領域、すなわち短波長な領域で発光することになる。実際には、動作温度が変化しているわけであるから、主として発光に寄与するバンドギャップは、 E_{g1} 、 E_{g2}' 、 E_{g3}'' の順に変化する。また、発光波長は、 1 、 $2'$ 、 $3''$ の順に変化する。

30

【0067】

従って、 E_{g1} 、 E_{g2}' および E_{g3}'' が、できるだけ等しくなるように各高In領域のIn組成比 x_1 、 x_2 および x_3 を設定すれば、波長の温度係数を0に近づけることができる。具体的には、動作温度範囲を決定すれば、(式1)からバンドギャップの温度変化範囲が決定される。低温動作では E_{g1} が支配的であり、高温状態では E_{g3} が支配的であるから、In組成比としては、In組成比のピーク x_1 および x_3 に注目すればよい。低温動作時の温度を T_{min} 、高温動作時の温度を T_{max} とした場合、(式1)から温度によるバンドギャップ変化 E_{g_T} は近似的に、

40

【数10】

$$\Delta E_{g_T} = 4.54 \times 10^{-4} \times (T_{max} - T_{min}) [eV] \quad (\text{式3})$$

で表される。GaNのバンドギャップを 3.4 eV 、InNのバンドギャップを 0.9 eV とした場合、高In領域1のピーク x_1 および高In領域3のピーク x_3 によって決まるバンドギャップ差 E_{g_31} は、

【数 1 1】

$$\Delta E_{g_31} = 4.3 \times (x_1 - x_3) [eV] \quad (\text{式 4})$$

で表される。 E_{g_T} と E_{g_31} がほぼ等しくなるようにピーク x_1 および x_3 の値を設定すればよいから、高 I_n 領域 1 のピーク x_1 および高 I_n 領域 3 のピーク x_3 の I_n 組成差は、

【数 1 2】

$$x_1 - x_3 = 1.056 \times 10^{-4} \times (T_{\max} - T_{\min}) \quad (\text{式 5})$$

10

を満足すればよい。具体的には、低温動作時の温度を 233 K (- 40)、高温動作時の温度を 453 K (180) とした場合、 $x_1 - x_3$ の I_n 組成比の差は 2.32% となる。

【0068】

実施例で詳しく述べるが、実際の窒化物半導体発光素子は電流注入によって動作させるため、電流注入によるバンドフィリング現象が起きる。すなわち、 I_n GaN 井戸内の電流密度が増加すると、高 I_n 領域 1 の状態密度が寡占状態になり、熱励起されることなくより高いエネルギー状態、すなわち高 I_n 領域 2 および高 I_n 領域 3 で発光するという現象が発生する。そのため、実際の I_n 組成比の差は (式 5) で決まる値よりも高く設定することが望ましい。

20

【0069】

エネルギー障壁 E_{gc1} 、 E_{gv1} 、 E_{gc2} および E_{gv2} は、高 I_n 領域 2 および高 I_n 領域 3 において電子・正孔が準安定するために重要な役割を果たす。すなわち、 E_{gc1} 、 E_{gv1} 、 E_{gc2} および E_{gv2} が熱による励起エネルギーに対して極めて大きい場合、高 I_n 領域 1 の電子・正孔は、高 I_n 領域 2 および高 I_n 領域 3 に移動できない。 E_{gc1} 、 E_{gv1} 、 E_{gc2} および E_{gv2} としては、10 meV 以上 80 meV 以下が望ましい。これは、 I_n 組成比に換算すると 0.5% 以上 4% 以下程度に相当する。すなわち、高 I_n 領域と高 I_n 領域で挟まれた低 I_n 領域の I_n 組成比の最小値と、隣り合う高 I_n 領域のうち、その I_n 組成比の最大値が大きいほうの I_n 組成比との差が、0.5% 以上 4% 以下であることが望ましい。これにより、波長の温度係数を 0 に近づけることができる。

30

【0070】

上記方法により、 I_n GaN 井戸層内の高 I_n 領域および低 I_n 領域の I_n 濃度を制御して、243 K (- 30) から 353 K (80) の環境温度の間のいずれかの温度において、波長の温度係数を 0 とすることができる。また、243 K (- 30) から 353 K (80) の環境温度において、温度変化に伴う波長変化量を 2 nm 以下にすることができる。すなわち、243 K における波長または 353 K における波長の何れか短い方と温度係数が 0 となる温度における波長との差を 2 nm 以下とすることができる。この場合、波長の温度係数の 243 K から 353 K までの平均値は、例えば + 0.02 [nm / K] 以下となる。

40

【0071】

また、233 K (- 40) から 393 K (120) の環境温度の間のいずれかの温度において、波長の温度係数を 0 とすることができる。また、233 K (- 40) から 393 K (120) の環境温度において、温度変化に伴う波長変化量を 5 nm 以下にすることもできる。すなわち、233 K における波長または 393 K における波長の何れか短い方と温度係数が 0 となる温度における波長との差を 5 nm 以下とすることができる。この場合、波長の温度係数の 233 K から 393 K までの平均値は、例えば + 0.03 [nm / K] 以下となる。

【0072】

50

さらに、InGa_xN井戸層内の高In領域は、窒化物半導体発光素子のp型層からn型層の方向に向かって、高In領域1、高In領域2、高In領域3、・・・の順に並んでいることが望ましい。すなわち、図4(a)において、図面の向かって右側がp型半導体側、図面の向かって左側がn型半導体側を意味する。本構成によって、正孔は有効質量が大きく、移動度が小さいため拡散し難いが、p型半導体側に高In領域1を配置することで、高In領域1に優先的に正孔の注入を行うことが可能となる。すなわち、複数のピークにおけるIn組成比xの値は、p型層からn型層の方向に向かって小さくなっていてもよく、この場合には、拡散しにくい正孔を、最もIn組成比が高いピークを有する領域に注入することができる。ただし、何れの方でも高In領域が並んだ順にピークのIn組成比が小さくなっていけば、温度の変化と共にキャリアが高In領域から隣接する高In領域に移動し、主として発光する高In領域が順に変わっていく。すなわち、複数のピークにおけるIn組成比xの値は、p型層からn型層の方向に向かって大きくなっていてもよいし、V字型(Vの形)または逆V字型(Vが上下逆になった形)に並んでいても良い。

10

【0073】

InGa_xN井戸層の厚さを7nm以上にすることで、In_xGa_{1-x}N井戸層(0 < x < 1)の層厚方向に対して2つ以上の高In領域の形成が容易になる。InGa_xN井戸層の厚さは8nm以上、または9nm以上にすることができる。

【0074】

実施例で詳しく述べるが、波長の温度係数を-0.03~+0.03[nm/K](絶対値が0.03[nm/K]以下)または-0.01~+0.01[nm/K](絶対値が0.01[nm/K]以下)の範囲にするためには、動作電流の設定も重要である。窒化物半導体発光素子へ投入した電流値をIとし、窒化物半導体発光素子の上面視におけるInGa_xN井戸層の面積をS_{well}とした場合、InGa_xN井戸層の電流密度JはI/S_{well}で定義される。InGa_xN井戸幅をWとした場合、JとWは以下の関係を満足することが望ましい。

20

【数13】

$$10.42 \times W[\text{nm}] - 81.3 \leq J[\text{A}/\text{cm}^2] \leq 10.42 \times W[\text{nm}] - 61.3 \quad (\text{式6})$$

【0075】

また、波長の温度係数を負にするためには、JとWが以下の関係を満足すればよい。

30

【数14】

$$1J[\text{A}/\text{cm}^2] < 10.42 \times W[\text{nm}] - 71.3$$

【0076】

図3および図4では、高In領域が3つの例を用いて説明したが、高In領域は2つ以上あればよい。また、図3、図4にはIn組成比のピークが3つである場合を示したが、ピークは4つ以上であってもよい。この場合、p型層からn型層の方向に向かってIn組成比はV字型または逆V字型になっていてもよい。このような形状を有することにより、図3、図4に示した例と同様に、温度の変化と共にキャリアが高In領域から隣接する高In領域に移動し、主として発光する高In領域が順に変わっていく。さらに、このような形状を有することにより、電子・正孔が準安定するIn領域を複数形成することが容易になり、動作電流範囲を拡大できるといった利点がある。

40

【0077】

従来の主面がc面であるIn_xGa_{1-x}N井戸層(0 < x < 1)を用いた場合、In_xGa_{1-x}N井戸層の内部に強いピエゾ電界が発生するため、図4に示すような伝導帯と価電子帯のエネルギー状態を実現することができない。従って、本実施形態を実現できるのは、m面およびa面などの非極性面、あるいは自発分極の影響が十分に小さい面に限られる。

【0078】

次に、図5(a)、(b)を参照して本実施形態の窒化物半導体発光素子の構造を説明する。図5(a)は、本開示の実施形態における窒化物半導体発光素子を模式的に示した

50

上面図である。図5(b)は、図5(a)のX-X'線断面図である。窒化物半導体発光チップ300は、例えば少なくとも表面にm面GaN層を有する基板304と、基板304上に形成されたn型窒化物半導体層305と、窒化物半導体活性層306と、p型窒化物半導体層307と、p型窒化物半導体層307に接するように形成されたp型電極308と、n型窒化物半導体層305に接するように形成されたn型電極309とを含んでいる。

【0079】

ここで、窒化物半導体とは、GaN系からなる半導体、より具体的には、 $Al_xIn_yGa_zN$ ($x+y+z=1$ 、 $x \geq 0$ 、 $y \geq 0$ 、 $z \geq 0$)半導体である。窒化物半導体活性層306はm面にほぼ平行に形成されている。窒化物半導体発光チップ300は、実装基板301上の配線302にパンプ303を介して電氣的に接続されている。このような構成はフリップチップ構造と呼ばれる。

10

【0080】

また、図6に示すように、ワイヤボンディング構造も実施することができる。図6において、p型電極308は実装基板301上の配線302に電氣的に接続され、n型電極309はAuワイヤ310を用いて実装基板301上の配線302に電氣的に接続される。

【0081】

フリップチップ構造とワイヤボンディング構造の違いは、p型電極308およびn型電極309と、実装基板301上の配線302の接続方法の違いに起因している。その他の構成は、類似しているため、以下では、図5を用いて実施形態1を説明する。

20

【0082】

ここで、「m面」とは、m面に対して完全に平行な面のみだけでなく、m面から $\pm 5^\circ$ 以下の角度だけ傾斜した面を含む。m面から僅かに傾斜する程度では、自発分極の影響は非常に小さい。一方、結晶成長技術では結晶方位が厳密に一致した基板よりも僅かに傾斜した基板上の方が半導体層をエピタキシャル成長させやすい場合がある。したがって、自発分極の影響を十分に抑制させながら、エピタキシャル成長させる半導体層の質を向上させたり、結晶成長速度を高めたりするために結晶面を傾斜させることが有用な場合もある。

【0083】

基板304は、六方晶のm面GaN基板でも良い。また、表面にm面GaN層が形成された六方晶のm面SiC基板、m面GaN層が形成されたr面サファイア基板、m面サファイア基板、a面サファイア基板であってもよい。

30

【0084】

n型窒化物半導体層305は、例えばn型の $Al_uGa_vIn_wN$ ($u+v+w=1$ 、 $u \geq 0$ 、 $v \geq 0$ 、 $w \geq 0$)から形成されている。n型ドーパントとして例えば、シリコン(Si)を用いることができる。

【0085】

窒化物半導体活性層306は、 $In_yGa_{1-y}N$ 障壁層 ($0 < y < 1$)で挟まれた $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層 ($0 < x < 1$)を有する。 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層 ($0 < x < 1$)は単一であってもよい。また、窒化物半導体活性層306は、 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層 ($0 < x < 1$)と $In_yGa_{1-y}N$ 障壁層 ($0 < y < 1$)とが交互に積層されたGaInN/GaInN多重量子井戸(MQW)構造を有していてもよい。窒化物半導体発光チップ300から出射する光の波長は、上記井戸層の半導体組成である $In_xGa_{1-x}N$ 半導体におけるInの組成比xによって決まる。m面上に形成された窒化物半導体活性層306にはピエゾ電界が発生しないため、 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層 ($0 < x < 1$)は7nm以上に厚くすることが可能である。

40

【0086】

p型窒化物半導体層307は、例えばp型の Al_sGa_tN ($s+t=1$ 、 $s \geq 0$ 、 $t \geq 0$)半導体からなる。p型ドーパントとして、例えばMgが添加されている。Mg以外のp型ドーパントとして、例えばZn、Beなどを用いてもよい。p型窒化物半導体層30

50

7において、Alの組成比率sは、厚さ方向に一様であってもよいし、Alの組成比率sが厚さ方向に連続的または段階的に変化していてもよい。具体的には、p型窒化物半導体層307の厚さは、例えば、0.05~2μm程度である。p型窒化物半導体層307の上面近傍、すなわち、p型電極308との界面近傍はAlの組成比率sがゼロである半導体、つまり、GaNから形成され得る。また、この場合、GaNはp型の不純物が高濃度で含まれており、コンタクト層として機能し得る。

【0087】

p型電極308は概ねp型窒化物半導体層307の表面全体を覆っていることができる。p型電極308はPd層およびPt層の積層構造(Pd/Pt)などで形成される。また、反射率を高めるためにAg層およびPt層の積層構造(Pd/Pt)、あるいはPd層、Ag層およびPt層の積層構造(Pd/Ag/Pt)を用いても良い。

10

【0088】

n型電極309は、例えば、Ti層およびPt層の積層構造(Ti/Pt)などで形成される。反射率を高めるためにTi層、Al層およびPt層の積層構造(Ti/Al/Pt)を用いても良い。

【0089】

次に、本実施形態1の製造方法について、図5を再度用いて説明する。

【0090】

M面を主面とするn型GaN基板304上に、n型窒化物半導体層305を、MOCVD法などを用いてエピタキシャル成長させる。例えば、n型不純物としてシリコンを用い、TMG($\text{Ga}(\text{CH}_3)_3$)、および NH_3 を原料として供給し、900以上1100以下程度の成長温度で、GaNからなる厚さ1~3μm程度のn型窒化物半導体層305を形成する。

20

【0091】

次に、n型窒化物半導体層305上に、窒化物半導体活性層306を形成する。窒化物半導体活性層306は、例えば、厚さ15nmの $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ 井戸層と、厚さ30nmのGaN障壁層が交互に積層された InGaN/GaN 多重量子井戸(MQW)構造を有している。 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ 井戸層を形成する際には、Inの取り込みを行うために、成長温度を700以上800以下に設定することができる。窒化物半導体発光素子の用途に応じて発光波長を選択し、波長に応じたIn組成比xを決定する。波長を450nm(青色)にする場合にはIn組成比xを0.25~0.27に決定する。520nm(緑色)であれば $x=0.40\sim0.42$ であり、630nm(赤色)であれば $x=0.56\sim0.58$ となる。なお、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 井戸層($0 < x < 1$)のIn組成比xの平均値は、0.08以上0.42以下であってもよい。In組成比xの平均値がこの範囲内であれば、同様の材料物性を示すため、本実施形態の構成において効果がもっとも顕著に現れる。すなわち、波長の温度特性を0または負にすることができる高In領域の形成が容易となる。

30

【0092】

後に実施例1として説明するが、 InGaN 井戸層の厚さを調整することにより、発光層の厚さ方向に、複数の発光起源(In組成比のピークによって形成されるバンドギャップの小さい領域)を形成することができる。

40

【0093】

また、III族原料中に占めるIn原料の割合であるIn供給比($[\text{TMI}]/[\text{TMG}] + [\text{TMI}]$)を変化させることによって、Inの組成比を厚さ方向に変化させることができる。具体的には、 InGaN 井戸層の形成時にIn供給量もしくはGa供給量のどちらか、もしくは両方を時間の経過と共に変動させる。In供給比が高い条件化においてIn組成は高くなるので、In供給比が波状に変動するように原料供給量を制御すればよい。

【0094】

また、 InGaN 井戸層を形成する際の成長温度を変化させることによって、Inの

50

組成比を厚さ方向に変化させることができる。具体的には、InGa_N井戸層の形成時の成長温度を時間の経過と共に変動させる。成長温度が低い条件化においてIn組成は高くなるので、成長温度を波状に変化させればよい。

【0095】

窒化物半導体活性層306の上に、p型窒化物半導体層307を形成する。例えば、p型不純物としてCp₂Mg（シクロペンタジエニルマグネシウム）を用い、TMGおよびNH₃を原料として供給し、900以上1100以下程度の成長温度で、厚さ50～500nm程度のp型Ga_Nからなるp型窒化物半導体層307を形成する。p型窒化物半導体層307の内部に、厚さ15～30nm程度のp-AlGa_N層を含んでいても良い。p-AlGa_N層を設けることで、動作時に電子のオーバーフローを抑制することができる。

10

【0096】

次に、p-Ga_N層の活性化のため、800～900程度の温度で、20分程度の熱処理を行う。

【0097】

次に、塩素系ガスを用いてドライエッチングを行うことにより、p型窒化物半導体層307、窒化物半導体活性層306およびn型窒化物半導体層305の一部を除去して凹部312を形成し、n型窒化物半導体層305の一部を露出させる。

【0098】

次いで、露出したn型窒化物半導体層305の一部に接するように、n型電極309を形成する。例えば、n型電極309としてTi/Pt層を形成する。さらにp型窒化物半導体層307に接するように、p型電極308を形成する。例えば、p型電極308としてPd/Pt層を形成する。その後、熱処理を行って、Ti/Pt層とn型窒化物半導体層305、および、Pd/Pt層とp型窒化物半導体層307を合金化させる。

20

【0099】

その後、n型Ga_N基板304を研磨し薄膜化する。

【0100】

このようにして作製された窒化物半導体発光素子を窒化物半導体発光チップ300に小片化する。小片化工程はレーザーダイシング、壁開など、いくつかの手法がある。

【0101】

このように小片化された窒化物半導体発光チップ300は、実装基板301に実装される。ここでは、フリップチップ構造について説明する。

30

【0102】

実装基板301には、あらかじめ配線302が形成されている。実装基板の主材料としては、アルミナ、Al_Nなどの絶縁物、Al、Cuなどの金属、SiやGeなど半導体、あるいはこれらの複合材料を用いることができる。金属や半導体を実装基板301の主材料として用いる場合には、表面を絶縁膜で覆うことができる。配線302は、窒化物半導体発光チップ300の電極形状に合わせて配置すればよい。配線302には、Cu、Au、Ag、Alなどを用いることができる。これらの材料は、スパッタやメッキなどによって実装基板301上に形成される。

40

【0103】

配線302上に、バンプ303を形成する。バンプにはAuを用いると良い。バンプボンドを用いて、直径50～70μm程度のAuバンプを形成することができる。また、Auメッキ処理によってAuバンプを形成することもできる。このように、バンプ303が形成された実装基板301に、超音波接合を用いて窒化物半導体発光チップ300を接続する。

【0104】

このようにして、本実施形態の半導体発光素子が完成する。

【0105】

(実施形態2)

50

図を参照しながら、本開示による第2の実施形態を説明する。

【0106】

図7は、第1の実施形態の窒化物半導体発光素子を複数個備えるLEDシステム（第2の実施形態）の回路構成の一例を示す。第1の実施形態の窒化物半導体発光素子313は、複数個並列に接続されている。窒化物半導体発光素子の $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層（ $0 < x < 1$ ）の厚さは W で共通している。並列接続された複数の窒化物半導体発光素子313の全体の動作電流値を I_{total} 、各々の窒化物半導体発光素子313の上面視における $InGaN$ 井戸層の面積を S_1 、 S_2 、 S_3 、 \dots 、 S_n とする。これら面積の総和を S_{well_total} 、 I_{total} を S_{well_total} で割った値を電流密度 J_{total} [A/cm^2]とする。

10

【0107】

複数のLEDを使用したシステムを設計する場合、まず、目標とする総光量が決定され、システム全体としての投入電流値が決定される。すなわち、 I_{total} が最初に決定される。 W は窒化物半導体発光素子の製造時点で決定されるため、後に変更することはできない。しかし、 S_{well_total} は、 $InGaN$ 井戸層の面積および使用するLEDの個数で変更が可能である。すなわち、(式3)から以下の関係を満足するように S_{well_total} を設定すれば、波長の温度係数がほぼ0となるLEDシステムを実現できる。

【数15】

$$10.42 \times W[nm] - 81.3 \leq \frac{I_{total}}{S_{well_total}} [A/cm^2] \leq 10.42 \times W[nm] - 61.3 \quad (\text{式7})$$

20

【0108】

さらに、 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層（ $0 < x < 1$ ）の厚さ W および上面視における $InGaN$ 井戸層の面積 S_{well} がほぼ同一のLEDを複数使用する場合には、以下の関係を満足するようにLEDの個数を設定すれば、波長の温度係数がほぼ0となるLEDシステムを実現できる。

【数16】

$$10.42 \times W[nm] - 81.3 \leq \frac{I_{total}}{N \times S_{well}} [A/cm^2] \leq 10.42 \times W[nm] - 61.3 \quad (\text{式8})$$

30

【0109】

また、本実施形態においては、システム全体として、 $243K$ （ -30 ）から $353K$ （ 80 ）の環境温度の間のいずれかの温度において、波長の温度係数を0とすることができる。また、 $243K$ （ -30 ）から $353K$ （ 80 ）の環境温度において、温度変化に伴う波長変化量を $2nm$ 以下にすることができる。あるいは、 $233K$ （ -40 ）から $393K$ （ 120 ）の環境温度の間のいずれかの温度において、波長の温度係数を0とすることができる。また、 $233K$ （ -40 ）から $393K$ （ 120 ）の環境温度において、温度変化に伴う波長変化量を $5nm$ 以下にすることもできる。

【0110】

このように、第1の実施形態の窒化物半導体発光素子を複数個使用することで、上面視における $InGaN$ 井戸層の面積が異なる窒化物半導体発光素子を作製する必要がなくなり、同一構成の窒化物半導体発光素子を複数個用いることで任意の動作電流値を設定することが可能となる。よって、システム設計が容易になり、製造コストが低下するという利点がある。このようなLEDシステムは、システムの一部として回路内に組み込まれていてもよい。

40

【0111】

（実施形態3）

本開示による窒化物半導体発光素子の第3の実施形態を説明する。実施形態3は、温度が上昇した場合に光の波長が短波長化する窒化物半導体発光素子である。本実施形態にお

50

いて実施形態 1 と同様の構成についての説明は省略する。

【 0 1 1 2 】

実施形態 1 においては、図 4 に示されるバンドギャップの値 E_{g1} 、 E_{g2} および E_{g3} ができるだけ等しくなるように I_n 組成比 x_1 、 x_2 および x_3 を設定した。それに対して、本実施形態においては、下記関係が成立するように I_n 組成比 x_1 、 x_2 および x_3 を設定する。これにより、波長の温度係数を負にすることができる。

$$E_{g1} < E_{g2} < E_{g3}$$

【 0 1 1 3 】

また、実施形態 1 においては、温度によるバンドギャップ変化である E_{g-T} と、高 I_n 領域 1 のピーク x_1 および高 I_n 領域 3 のピーク x_3 によって決まるバンドギャップ差である E_{g-31} とがほぼ等しくなるようにピーク x_1 および x_3 の値を決定した (式 5)。それに対して、本実施形態においては、 E_{g-31} が E_{g-T} よりも大きくなるように x_1 および x_3 を設定すればよいから、高 I_n 領域 1 の最大 I_n 組成比 x_1 および高 I_n 領域 3 の最大 I_n 組成比 x_3 の I_n 組成比の差は、下記式を満たせばよい。

【 数 1 7 】

$$x_1 - x_3 > 1.056 \times 10^{-4} \times (T_{\max} - T_{\min}) \quad (\text{式 9})$$

【 0 1 1 4 】

また、電流密度 J と I_nGaN 井戸幅 W とは、下記式の関係を満たせばよい。

【 数 1 8 】

$$1J[A/cm^2] < 10.42 \times W[nm] - 71.3 \quad (\text{式 10})$$

【 0 1 1 5 】

本実施形態によると、波長の温度係数を負にすることができる。

【 0 1 1 6 】

(実施形態 4)

図を参照しながら、本開示による第 4 の実施形態を説明する。

【 0 1 1 7 】

第 4 の実施形態は、一つまたは複数の第 1 の実施形態の窒化物半導体発光素子 3 1 3 と、それ以外の一つまたは複数の窒化物半導体発光素子 3 1 4 とを含む LED システムである。それ以外の窒化物半導体発光素子 3 1 4 とは、主面が c 面である I_nGaN 井戸層を有する窒化物半導体発光素子、あるいは主面が m 面である I_nGaN 井戸層であり、かつ I_nGaN 井戸層の膜厚が 7 nm 以下の窒化物半導体発光素子である。窒化物半導体発光素子 3 1 4 の波長の温度係数は $+0.05 \sim +0.06$ [nm/K] である。上述したように、窒化物半導体の波長の温度係数は $+0.05$ [nm/K] から $+0.06$ [nm/K] 程度であるため、窒化物半導体発光素子 3 1 4 としては従来の窒化物半導体発光素子を用いることができる。

【 0 1 1 8 】

第 1 の実施形態の窒化物半導体発光素子 3 1 3 の波長の温度係数は $-0.05 \sim -0.06$ [nm/K] になるように電流密度範囲を設定することが望ましい。より具体的には、第 1 の実施形態の窒化物半導体発光素子 3 1 3 の I_nGaN 井戸層の厚さを W とした場合、第 1 の実施形態の窒化物半導体発光素子 3 1 3 は、

【 数 1 9 】

$$10.42 \times W[nm] - 106.3 < J[A/cm^2] < 10.42 \times W[nm] - 86.3 \quad (\text{式 11})$$

の関係を満たすように電流密度 J を設定することが望ましい。このように設定することで、システム全体としての波長の温度変化を補償することが可能になる。

【 0 1 1 9 】

図 8 (a) は、井戸層の厚さが W 、上面視における I_nGaN 井戸層の面積が S である

第1の実施形態の窒化物半導体発光素子313をN個直列接続したLEDブロック321と、窒化物半導体発光素子314をM個直列接続したLEDブロック322からなる温度補償LEDシステム323である。LEDブロック321には I_{total1} の電流値を、LEDブロック322には I_{total2} の電流値を流す。この場合、LEDブロック321から出力される全光量と、LEDブロック322から出力される全光量がほぼ等しくなるようにすることが望ましい。このように設定することで、システム全体として波長の温度変化を補償することが可能になる。

【0120】

LEDブロック321では、 W 、 S 、および I_{total1} が、

【数20】

$$10.42 \times W[nm] - 106.3 < \frac{I_{total1}}{S} [A/cm^2] < 10.42 \times W[nm] - 86.3 \quad (\text{式12})$$

の関係を満足するようにすれば、LEDブロック321の波長の温度係数を $-0.05 \sim -0.06 [nm/K]$ にすることができ、LEDシステム全体として波長の温度変化を補償することが可能になる。また、図8(a)のLEDブロック322において、複数の窒化物半導体発光素子314を直列接続した例を示しているが、窒化物半導体発光素子314の接続方法は並列でも、直列でも、マトリクス状に配置してあっても構わない。 I_{total1} と I_{total2} が等しい場合には、図8(b)に示すようにLEDブロック321とLEDブロック322を直列に接続することが可能である。この場合、電流源が一つになり、LEDシステムが簡略化される。また図8(a)、(b)では、LEDブロック321とLEDブロック322が明確に区別されているが、第1の実施形態の窒化物半導体発光素子313と、窒化物半導体発光素子314は面内で様々に配置しても構わない。

【0121】

本実施形態においては、所定の温度範囲において、窒化物半導体発光素子313の発光層において発生する光の波長の温度係数を負に、窒化物半導体発光素子314の発光層において発生する光の温度係数を正にすることができる。なお、「所定の温度範囲」とは、具体的には、システムを動作させる際の温度範囲の少なくとも一部である。例えば、システムの動作範囲の温度が $233K (-40)$ から $453K (180)$ である場合、「所定の温度範囲」は、例えば $320K$ から $453K$ までの範囲である。

【0122】

本実施形態においては、窒化物半導体発光素子313の発光層において発生する光と、窒化物半導体発光素子314の発光層において発生する光とを合成した合成光がシステムから発せられる。所定の温度範囲において、温度変化に対する合成光の中心波長の変化量は、例えば $5nm$ 以内に収まっている。すなわち、所定温度範囲における合成光の中心波長の最大値と最小値との差は $5nm$ 以内となる。

【0123】

また、1つまたは複数の第1の実施形態の窒化物半導体発光素子313と、それ以外の1つまたは複数の窒化物半導体発光素子314とを組み合わせることにより、 $243K (-30)$ から $353K (80)$ の環境温度において、温度変化に伴う波長変化量を $2nm$ 以下にすることができる。また、 $233K (-40)$ から $393K (120)$ の環境温度において、温度変化に伴う波長変化量を $5nm$ 以下にすることもできる。

【0124】

(実施形態5)

図を参照しながら、本開示による第5の実施形態を説明する。

【0125】

図9は、井戸層の厚さが W 、上面視におけるInGaN井戸層の面積が S である第1の実施形態の窒化物半導体発光素子313をN個並列接続したLEDブロック321と、窒

10

20

30

40

50

化物半導体発光素子 314 を M 個並列接続した LED ブロック 322 からなる温度補償 LED システム 323 である。LED ブロック 321 には I_{total1} の電流値を、LED ブロック 322 には I_{total2} の電流値を流す。この場合、LED ブロック 321 から出力される全光量と、LED ブロック 322 から出力される全光量がほぼ等しくなるようにすることが望ましい。このように設定することで、システム全体として波長の温度変化を補償することが可能になる。

【0126】

LED ブロック 321 では、 W 、 S 、 I_{total1} 、および N が、
【数 21】

$$10.42 \times W [nm] - 106.3 < \frac{I_{total1}}{S \times N} [A/cm^2] < 10.42 \times W [nm] - 86.3 \quad (\text{式 13})$$

10

の関係を満足するようになれば、LED ブロック 321 の波長の温度係数を $-0.05 \sim -0.06 [nm/K]$ にすることができ、LED システム全体として波長の温度変化を補償することが可能になる。並列接続することで電流密度の範囲設定に自由度が向上する。また、図 9 (a) の LED ブロック 322 において、複数の窒化物半導体発光素子 314 を並列接続した例を示しているが、窒化物半導体発光素子 314 の接続方法は並列でも、直列でも、マトリクス状に配置してあっても構わない。 I_{total1} と I_{total2} が等しい場合には、図 9 (b) に示すように LED ブロック 321 と LED ブロック 322 を直列に接続することが可能である。この場合、電流源が一つになり、LED システムが簡略化される。また図 9 (a)、(b) では、LED ブロック 321 と LED ブロック 322 が明確に区別されているが、第 1 の実施形態の窒化物半導体発光素子 313 と、窒化物半導体発光素子 314 は面内で様々に配置しても構わない。

20

【0127】

(実施例 1)

InGaN 井戸層の厚さが発光特性に与える影響について検討した。

【0128】

M 面を主面とする n 型 GaN 基板を用意し、硫酸および過酸化水素水で表面の洗浄を行った。その後、有機金属気相成長用の炉内に上記 n 型 GaN 基板を配置した。n 型 GaN 基板は、窒素、水素、アンモニアの混合ガス中にて 800 で 10 分間の熱処理を行った。その後、トリメチルガリウム (TMG)、水素、窒素、アンモニアおよびシランの混合ガス中にて、基板温度を 800 から 1000 まで昇温した。基板温度が 1000 まで到達後は、その状態を維持し、厚さ約 2 μm の n 型 GaN 層を製膜した。その後、基板温度を 785 に降温した。降温後、トリメチルガリウム (TMG)、窒素およびアンモニア雰囲気中で GaN 障壁層を形成し、トリメチルガリウム (TMG)、トリメチルインジウム (TMI)、窒素およびアンモニア雰囲気中で InGaN 井戸層の結晶成長を形成し、これらの工程を繰り返すことで 3 周期の InGaN 発光層を形成した。InGaN 井戸層成長時のアンモニア供給量は 3.0 s l m とした。In の原料ガスである TMI の供給量は 3.15 s c c m、Ga の原料ガスである TMG の供給量は 9 s c c m とした。この場合の In 供給比は 0.8 である。InGaN 井戸層の厚さは 9 nm、GaN 障壁層の厚さは 15 nm となるように成長時間を制御した。InGaN 井戸層の面積は 76500 μm^2 とした。

30

40

【0129】

比較のため、同様の成長条件を用いて、M 面を主面とする n 型 GaN 基板に、厚さ 3 nm の InGaN 井戸層と厚さ 15 nm の GaN 障壁層からなる 3 周期の InGaN 発光層を作製した (比較例 1)。さらに、同様の成長条件を用いて、c 面を主面とする n 型 GaN 基板に、厚さ 3 nm の InGaN 井戸層と厚さ 15 nm の GaN 障壁層からなる 3 周期の InGaN 発光層を作製した (比較例 2)。さらに、同様の成長条件を用いて、c 面を主面とする n 型 GaN 基板に、厚さ 9 nm の InGaN 井戸層と厚さ 15 nm の GaN 障

50

壁層からなる3周期のInGa_N発光層を作製した(比較例3)。比較例1から3においても、InGa_N井戸層の面積は実施例と等しくした。

【0130】

図10は、実験例1、比較例1、比較例2および比較例3のサンプルに対してフォトルミネッセンス測定の結果であり、横軸は測定温度、縦軸はフォトルミネッセンス測定のピーク波長を示している。測定温度は10Kから400Kまで変化した。励起光源にはHe-Cdレーザを用いた。レーザの光出力は10mWである。

【0131】

比較例3は、InGa_N井戸層からの発光がほとんど観測されなかった。これは、c面Ga_N上ではピエゾ電界の影響が大きく、厚い井戸層を形成できないことを意味している。比較例1および比較例2では、温度の増加に対して、フォトルミネッセンス測定のピーク波長は単調に長波長側に变化した。一方、実験例1では300K以下の領域では温度の増加に対して、フォトルミネッセンス測定のピーク波長は単調に長波長側に变化したが、320Kを超えると、ピーク波長が短波長側に变化する現象が確認できた。この結果は、物性値で決まる温度係数が制御可能であることを意味している。

【0132】

図10に示す実験例1では、温度係数は320K付近で0となり、150Kから320Kの温度範囲において正であり、320Kから400K(「所定の温度範囲」)において、温度係数が負である。温度係数が負の発光素子を、320Kから400Kにおける温度係数が正の発光素子と組み合わせることでシステムを構成することにより、この温度範囲においてシステムから発せられる光の波長と、320Kより低い温度においてシステムから発せられる光の波長との差を小さくすることができる。

【0133】

図11は、実験例1のサンプルに関して、アトムプローブ法を用いて、InGa_N井戸層に含まれるIn組成比の様子を分析した結果である。横軸は深さを意味しており、向かって左側がサンプル表面、右側がM面Ga_N基板側である。向かって右側の縦軸はIn組成比、向かって左側の縦軸はGa組成比および窒素組成比を表している。InGa_N井戸層は3つ形成しているが、いずれのInGa_N井戸層においても、M面Ga_N基板側からサンプル表面側に向かうにつれてIn組成比が波状に変動していることが分かる。なお、図11の測定結果にしめされているように、「波状」とは、In組成比のプロファイルが曲線で構成されている状態だけでなく、複数のピークを有し、そのピークの間に対比的にIn組成比の小さい領域が存在する状態を含む。図11において、9nmのInGa_N井戸層の層厚方向に、2から3つの高In領域が形成されている。この高In領域と高In領域で挟まれた低In領域のIn組成比の最小値は、隣り合う高In領域のうち、そのIn組成比の最大値が大きいほうのIn組成比の値に対して1~2%程度の差を有している。

【0134】

(実施例2)

実際に、本開示に係る実施形態のInGa_N発光層を有するLEDを作製し、温度特性を調べた。

【0135】

M面を主面とするn型Ga_N基板を用意し、硫酸および過酸化水素水で表面の洗浄を行った。その後、有機金属気相成長用の炉内に上記n型Ga_N基板を配置した。n型Ga_N基板は、窒素、水素、アンモニアの混合ガス中にて800で10分間の熱処理を行った。その後、TMG、水素、窒素、アンモニアおよびシランの混合ガス中にて、基板温度を800から1000まで昇温した。基板温度が1000まで到達後は、その状態を維持し、厚さ約2μmのn型Ga_N層を製膜した。その後、基板温度を785に降温した。降温後、トリメチルガリウム(TM₃G)、窒素およびアンモニア雰囲気中でGa_N障壁層を形成し、TMG、TM₃I、窒素およびアンモニア雰囲気中でInGa_N井戸層の結晶成長を形成し、これらの工程を繰り返すことで3周期のInGa_N発光層を形成した。

InGaN井戸層成長時のアンモニア供給量は3.0slmとした。Inの原料ガスであるTMIの供給量は315sccm、Gaの原料ガスであるTMGの供給量は9sccmとした。この場合のIn供給比は0.8である。InGaN井戸層の面積は76500 μm^2 とした。

【0136】

次に、TMG、水素、窒素、アンモニアの混合ガス中にて、基板温度を785 から950 まで昇温した。さらにトリメチルアルミニウム(TMAI)およびビスシクロペンタジエニルマグネシウム(Cp2Mg)を原料として添加し、厚さ約20nmのp型AlGa_N層を形成した。さらに、TMG、Cp2Mg、水素、窒素、アンモニアの混合ガス中で、厚さ約500nmのp型Ga_N層を形成することで、窒化物半導体積層構造を形成した。

10

【0137】

このように形成した窒化物半導体積層構造に従来フォトリソグラフィ技術を用いてレジストパターンを形成し、ドライエッチングによってp型Ga_N層、p型AlGa_N層およびInGa_N発光層の一部を除去し、n型Ga_N層の一部を露出させた。このように露出させたn型Ga_N層に接するように、Ti/Al層からなるn電極を形成した。また、p型Ga_N層に接するように、Pd/Pt層からなるp電極を形成した。それぞれの電極表面には、Ti/Au層からなるパッド電極を形成した。次に、M面Ga_N基板の膜厚が約100 μm になるまで、M面Ga_N基板の裏面を研磨した。その後、従来のダイシング技術を用いることで、300 μm 角に小片化し、窒化物半導体チップを形成した。

20

【0138】

このように形成した窒化物半導体チップは、従来のフリップチップ実装法を用いて、AlN製の実装基板上にフリップチップ実装することで、窒化物半導体発光素子を形成した。

【0139】

InGa_N発光層の影響を調べるため、M面Ga_N基板の窒化物半導体発光素子においては、InGa_N井戸層の厚さが3nmでGa_N障壁層の厚さが7nm、InGa_N井戸層の厚さが6nmでGa_N障壁層の厚さが7nm、InGa_N井戸層の厚さが9nmでGa_N障壁層の厚さが15nm、InGa_N井戸層の厚さが15nmでGa_N障壁層の厚さが30nm、InGa_N井戸層の厚さが21nmでGa_N障壁層の厚さが30nm、の5種類のサンプルを準備した。さらに、比較のため、C面Ga_N基板の窒化物半導体発光素子として、InGa_N井戸層の厚さが3nmでGa_N障壁層の厚さが15nmのサンプルを準備した。

30

【0140】

図12はこのようにして作製した窒化物半導体発光素子に関して、発光層の電流密度Jと波長の温度係数との関係を示したものである。ここで発光層の電流密度Jとは、窒化物半導体発光素子へ投入した電流値Iを、窒化物半導体発光素子の上面視におけるInGa_N井戸層の面積S_{well}で割った値である。図12に示す測定結果は、300Kから390Kの範囲における平均的な温度係数である。井戸層の厚さが3nmのサンプルは、C面Ga_N基板の場合もM面Ga_N基板の場合も、動作電流密度に寄らず波長の温度係数はほぼ一定であり、+0.04~+0.06[nm/K]程度の値を示す。井戸層の厚さが9nmの窒化物半導体発光素子では、電流密度が20[A/cm²]において温度係数が0になり、電流密度が20[A/cm²]未満において温度係数が負になる。井戸層の厚さが15nmの窒化物半導体発光素子では、電流密度が90[A/cm²]において温度係数が0になり、電流密度が90[A/cm²]未満において温度係数が負になる。本実施例においては、窒化物半導体発光素子の温度係数が電流密度によって変化する。電流密度を適切に選ぶことで、動作時の波長の温度係数を負にすることもできる。

40

【0141】

図13は、InGa_N井戸幅の厚さと、波長の温度係数が0となるとき電流密度の関係、および波長の温度係数が負となるとき電流密度の関係を示した図である。図中にブ

50

ロットされた点は、InGaN井戸幅の厚さが9nm、15nm、および21nmのサンプルにおいて温度係数が0となる実測データである。図から、InGaN井戸幅の厚さと波長の温度係数が0となるときの電流密度の関係は、ほぼ線形の関係にあることが分かる。図中の太線は、実測点を線形近似した直線であり、波長の温度係数が0となるときの電流密度を示している。図中の太線よりも右下の領域は、波長の温度係数が負になる範囲を示している。本実施例では、Inの原料ガスの供給量を変化させなかったため、InGaN井戸層の厚さが3nmおよび6nmの場合、波長の温度係数が0にも負にならなかった。したがって、InGaN井戸層の厚さが3nmおよび6nmの場合は、図13中にデータはプロットされていない。

【0142】

10

図13から、本実施例の条件において、波長の温度係数が0または負を実現するためには、InGaN井戸幅を7nm以上にすれば良いことがわかる。

【0143】

井戸幅をW[nm]、電流密度をJ[A/cm²]とした場合、下記式が満たされるときに電流密度Jが0になる。

【数22】

$$J[A/cm^2] = 10.42 \times W[nm] - 71.3 \quad (\text{式14})$$

【0144】

電流密度が±10[A/cm²]程度ずれたとしても、波長の温度係数は-0.03~+0.03[nm/K]または-0.01~+0.01[nm/K]の範囲にあるため、波長の温度係数はほぼ0とみなすことができる。すなわち、InGaN井戸幅Wの窒化物半導体発光素子に対して、

20

【数23】

$$10.42 \times W[nm] - 81.3 \leq J[A/cm^2] \leq 10.42 \times W[nm] - 61.3 \quad (\text{式15})$$

の電流密度範囲で窒化物半導体発光素子を動作させれば、波長の温度係数をほぼ0にすることができる。また、動作電流値あるいは動作電流密度が決定している場合には、(式4)を修正し、

30

【数24】

$$\frac{J[A/cm^2] + 61.3}{10.42} \leq W[nm] \leq \frac{J[A/cm^2] + 81.3}{10.42} \quad (\text{式16})$$

の関係式から、InGaN井戸幅Wを設定することも可能である。ただし、Wは7nm以上にすることが望ましい。また、Wは、30nm以下であってもよい。Wを30nm以下とすることにより、InGaN井戸内の欠陥を抑制し、発光効率を高めることができる。

【0145】

一方、井戸幅をW[nm]、電流密度をJ[A/cm²]とした場合、下記式が成り立つときに、電流密度Jが負になる。

40

【数25】

$$J[A/cm^2] < 10.42 \times W[nm] - 71.3 \quad (\text{式17})$$

【0146】

さらに、波長の温度係数が-0.05~-0.06[nm/K]となる井戸幅W[nm]と電流密度J[A/cm²]の範囲は、下記式で表される。

【数26】

$$10.42 \times W[nm] - 106.3 < J[A/cm^2] < 10.42 \times W[nm] - 86.3 \quad (\text{式18})$$

50

【産業上の利用可能性】

【0147】

本開示によれば、例えば、温度変化の激しい屋外での窒化物半導体発光素子の使用や、温度上昇が大きい閉空間での使用に利用が可能となる。さらに、例えば、液晶ディスプレイ用光源や液晶プロジェクターなど、光源の波長変化を抑制する必要がある用途への応用が可能である。

【符号の説明】

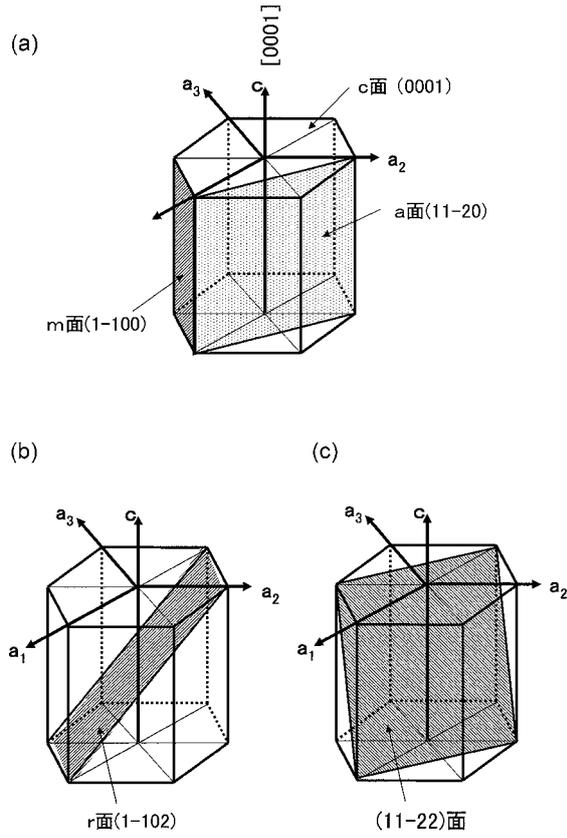
【0148】

- | | | |
|-----|------------------|----|
| 300 | 窒化物半導体発光チップ | |
| 301 | 実装基板 | 10 |
| 302 | 配線 | |
| 303 | バンブ | |
| 304 | 基板 | |
| 305 | n型窒化物半導体層 | |
| 306 | 窒化物半導体活性層 | |
| 307 | p型窒化物半導体層 | |
| 308 | p型電極 | |
| 309 | n型電極 | |
| 310 | Auワイヤ | |
| 312 | 凹部 | 20 |
| 313 | 実施形態1の窒化物半導体発光素子 | |

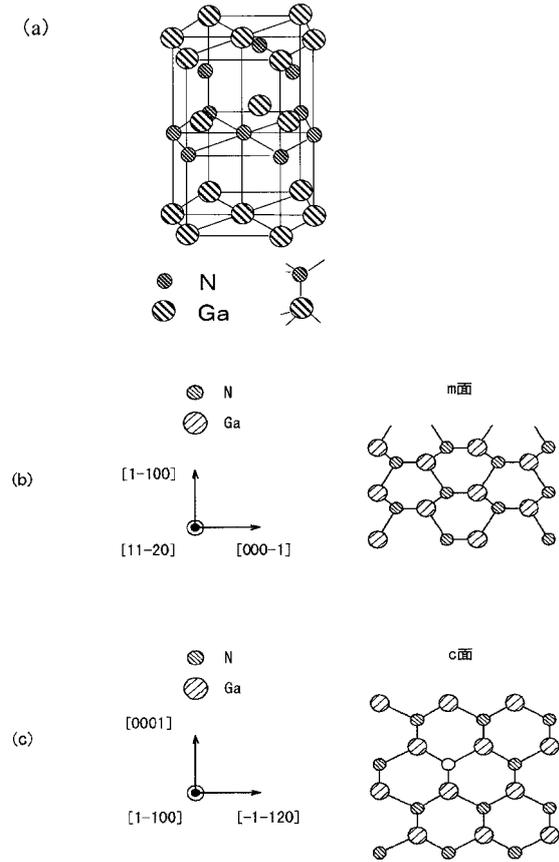
【要約】

本開示の窒化物半導体発光素子は、発光層を有する窒化物半導体発光素子であって、発光層は、主面がm面である $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層 ($0 < x < 1$) を含み、 $In_xGa_{1-x}N$ 井戸層における In 組成比 x の深さ方向プロファイル (depth profile) は複数のピークを有しており、複数のピークのそれぞれにおける In 組成比 x の値は異なっている。

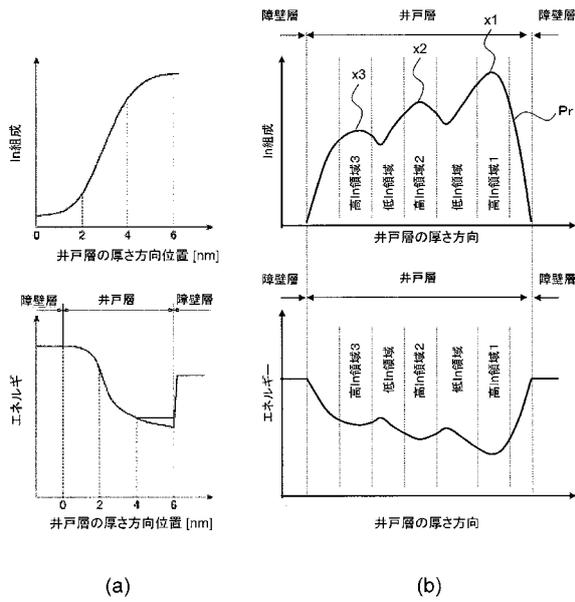
【図1】



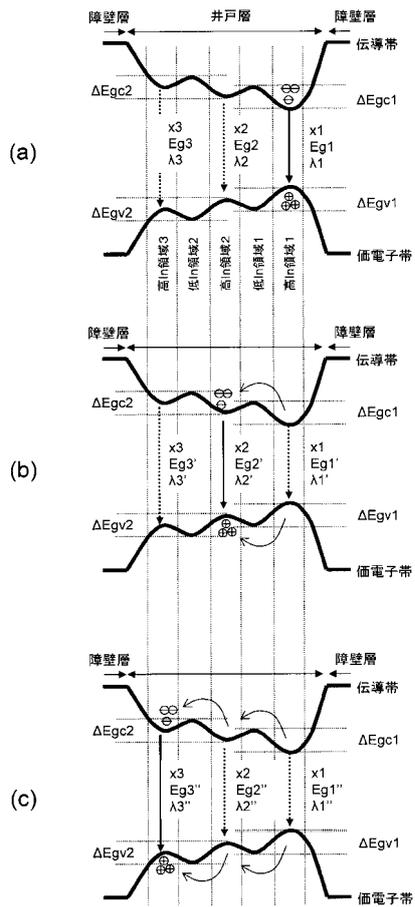
【図2】



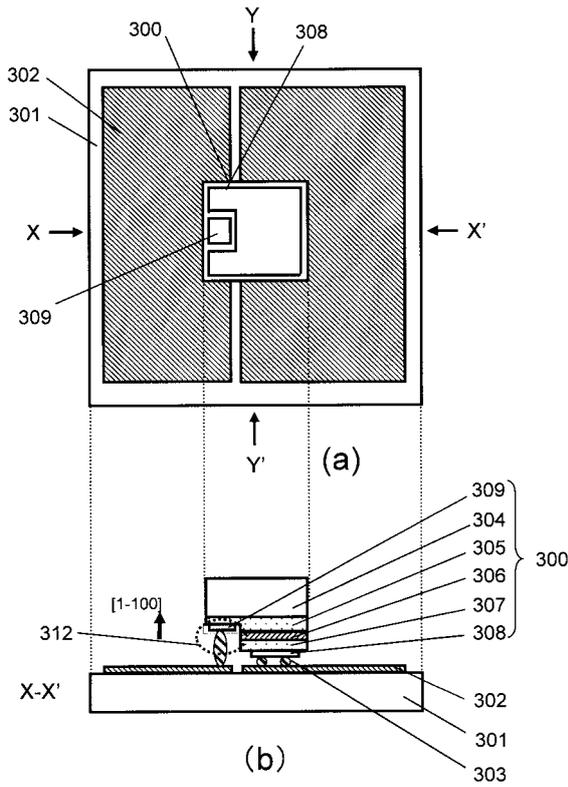
【図3】



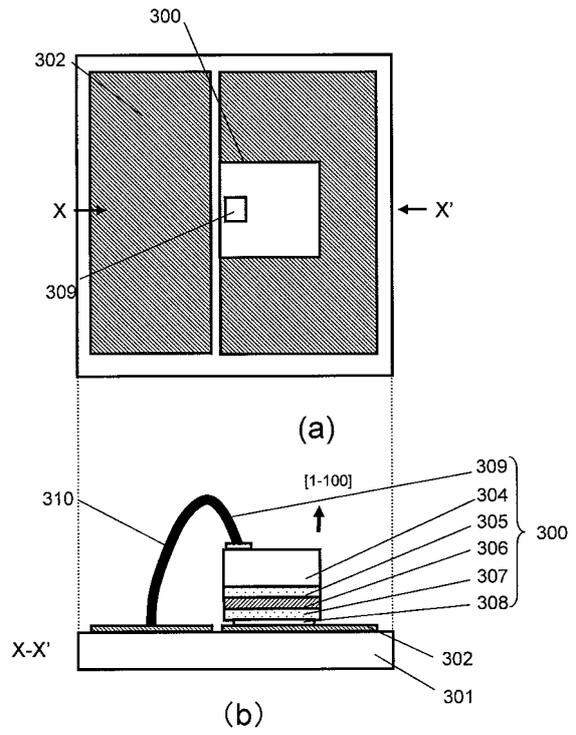
【図4】



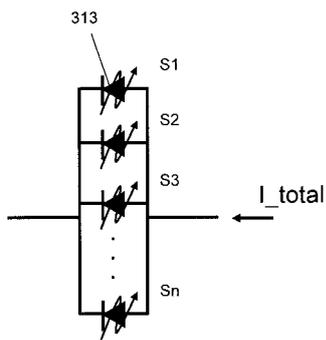
【 図 5 】



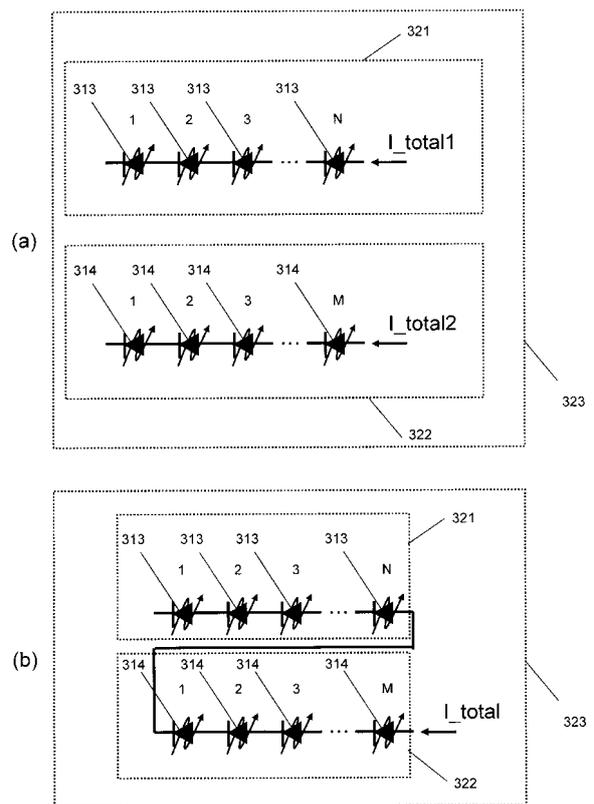
【 図 6 】



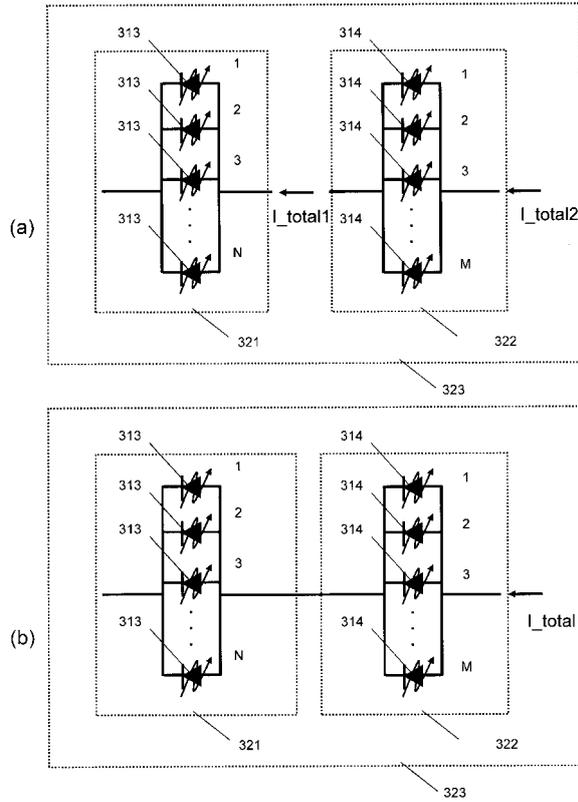
【 図 7 】



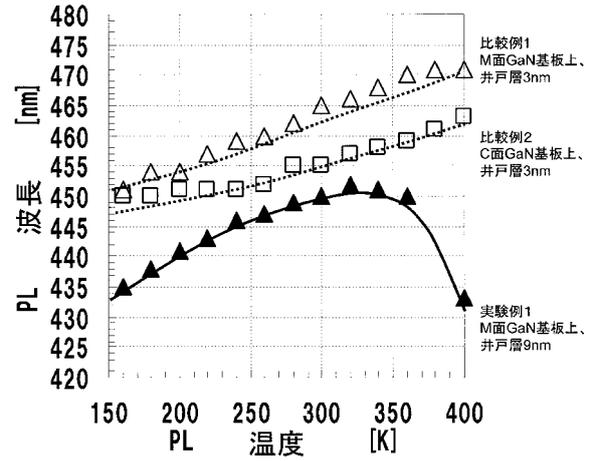
【 図 8 】



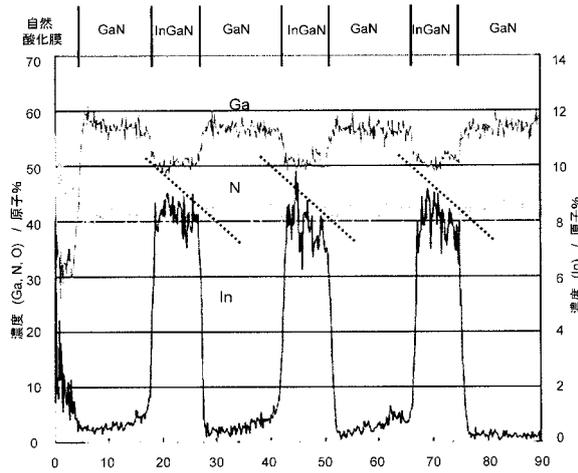
【図9】



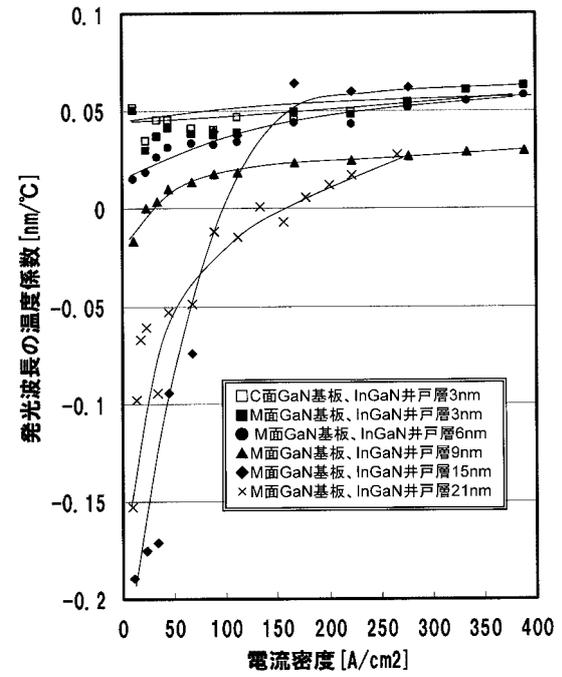
【図10】



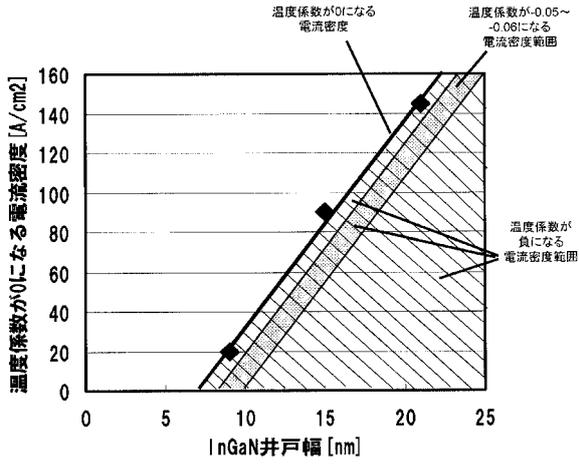
【図11】



【図12】



【図13】



フロントページの続き

- (72)発明者 井上 彰
大阪府門真市大字門真1006番地 パナソニック株式会社内
- (72)発明者 吉田 俊治
大阪府門真市大字門真1006番地 パナソニック株式会社内
- (72)発明者 横川 俊哉
大阪府門真市大字門真1006番地 パナソニック株式会社内

審査官 高椋 健司

- (56)参考文献 特開2006-270028(JP,A)
特開2010-092898(JP,A)
特開2009-245982(JP,A)
特開2007-150066(JP,A)
特開2011-077109(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 33/00 - 33/64
H01S 5/00 - 5/50