

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5437253号  
(P5437253)

(45) 発行日 平成26年3月12日(2014.3.12)

(24) 登録日 平成25年12月20日(2013.12.20)

(51) Int.Cl.

F I

H O 1 L 33/06 (2010.01)

H O 1 L 33/00 1 1 2

請求項の数 28 (全 24 頁)

(21) 出願番号	特願2010-528843 (P2010-528843)	(73) 特許権者	510101480
(86) (22) 出願日	平成19年10月12日(2007.10.12)		エイジェンシー フォア サイエンス テ
(65) 公表番号	特表2011-501408 (P2011-501408A)		クノロジー アンド リサーチ
(43) 公表日	平成23年1月6日(2011.1.6)		シンガポール 1 3 8 6 3 2 シンガポー
(86) 国際出願番号	PCT/SG2007/000350		ル コネキス フュージョノポリス ウェ
(87) 国際公開番号	W02009/048425		イ 1 ナンバー 2 0 - 1 0
(87) 国際公開日	平成21年4月16日(2009.4.16)	(74) 代理人	100092093
審査請求日	平成22年9月22日(2010.9.22)		弁理士 辻居 幸一
		(74) 代理人	100082005
			弁理士 熊倉 禎男
		(74) 代理人	100067013
			弁理士 大塚 文昭
		(74) 代理人	100086771
			弁理士 西島 孝喜

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 蛍光体を含まない赤色及び白色窒化物ベースのLEDの作製

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

発光ダイオードのための多重量子井戸(MQW)構造であって、  
 前記MQW構造が複数の量子井戸構造を含み、個々の量子井戸構造が、  
 バリア層と、  
 前記バリア層上に形成され量子ドットナノ構造を組み込んだ井戸層と、  
 を含み、前記バリア層及び前記井戸層が第1の金属窒化物ベースの材料を含み、  
 前記量子井戸構造の少なくとも1つが、前記第1の金属窒化物ベースの材料と比較して  
 異なる金属元素を有する第2の金属窒化物ベースの材料を含む、前記井戸層上に形成され  
 たキャッピング層と、

前記第2の金属窒化物ベースの材料と比較して異なる金属元素を有する第3の金属窒化  
 物ベースの材料を含む、前記キャッピング層上に形成された第2のキャッピング層とを、  
 さらに含むことを特徴とするMQW構造。

【請求項 2】

個々の量子井戸構造が、前記量子ドットナノ構造の形成を促進するための、前記バリア  
 層と前記井戸層との間に形成された湿潤層をさらに含む、  
 ことを特徴とする請求項1に記載のMQW構造。

【請求項 3】

前記MQW構造が、前記複数の量子井戸構造の最も外側の構造上に形成されたp型コン  
 タクト構造をさらに含み、該p型コンタクト構造が、電子ブロッキング層と、該電子プロ

ッキング層上に形成された p 型金属窒化物層とを含む、  
ことを特徴とする請求項 1 から請求項 2 のいずれか 1 項に記載の MQW 構造。

【請求項 4】

前記 p 型金属窒化物層がインジウム (In) 材料を含む、  
ことを特徴とする請求項 3 に記載の MQW 構造。

【請求項 5】

前記 p 型金属窒化物層が、約 750 ~ 800 の間の温度を使用して形成される、  
ことを特徴とする請求項 4 に記載の MQW 構造。

【請求項 6】

前記 MQW 構造が、前記複数の量子井戸構造の下にある  $n^+$  層に電気接触するための  $n$  10  
型コンタクト層をさらに含む、  
ことを特徴とする請求項 1 から請求項 5 のいずれか 1 項に記載の MQW 構造。

【請求項 7】

前記 MQW 構造が赤色から黄色までの波長範囲の光を発光することができる、  
ことを特徴とする請求項 1 から請求項 6 のいずれか 1 項に記載の MQW 構造。

【請求項 8】

前記 MQW 構造が赤色光を発光することができる、  
ことを特徴とする請求項 1 から請求項 7 のいずれか 1 項に記載の MQW 構造。

【請求項 9】

前記キャッピング層が窒化アルミニウム (AlN) 材料を含む、 20  
ことを特徴とする請求項 1 から請求項 8 のいずれか 1 項に記載の MQW 構造。

【請求項 10】

前記キャッピング層の厚みが約 3 nm 又はこれよりも薄く 保持される、  
ことを特徴とする請求項 1 から請求項 9 のいずれか 1 項に記載の MQW 構造。

【請求項 11】

前記量子ドットナノ構造が窒化インジウムガリウム (InGaN) を含む、ことを特徴  
とする請求項 1 から請求項 10 のいずれか 1 項に記載の MQW 構造。

【請求項 12】

発光ダイオード構造であって、  
赤色から黄色までの波長範囲の光を発光する赤色 / 黄色発光の多重量子井戸 (MQW) 30  
構造を含み、該赤色 / 黄色発光の MQW の個々の量子井戸構造が、  
バリア層と、

前記バリア層上に形成され量子ドットナノ構造を組み込んだ井戸層と、  
を含み、前記バリア層及び前記井戸層が第 1 の金属窒化物ベースの材料を含み、  
前記赤色 / 黄色発光の MQW の前記量子井戸構造の少なくとも 1 つが、前記井戸層上に  
形成されたキャッピング層をさらに含み、該キャッピング層が、前記第 1 の金属窒化物ベ  
ースの材料と比較して異なる金属元素を有する第 2 の金属窒化物ベースの材料を含み、そ  
して、前記キャッピング層上に形成された第 2 のキャッピング層をさらに含み、該第 2 の  
キャッピング層が、前記第 2 の金属窒化物ベースの材料と比較して異なる金属成分を有す  
る第 3 の金属窒化物ベースの材料を含み、 40

前記発光ダイオード構造がさらに、

前記発光ダイオード構造から白色光を発光するために前記赤色 / 黄色発光の MQW と一  
体に形成された青色発光の MQW 構造を含む、  
ことを特徴とする発光ダイオード構造。

【請求項 13】

前記青色発光の MQW が、前記赤色 / 黄色発光の MQW 構造の前記複数の量子井戸構造  
の最も外側の構造上に形成される、  
ことを特徴とする請求項 12 に記載の発光ダイオード構造。

【請求項 14】

前記赤色 / 黄色発光の MQW 構造の前記複数の量子井戸構造が前記青色発光の MQW 構 50

造上に形成される、  
ことを特徴とする請求項 1 2 に記載の発光ダイオード構造。

【請求項 1 5】

前記赤色 / 黄色発光及び青色発光の MQW 構造の下にある  $n^+$  層に電気接触するための  $n$  型コンタクト層と、前記赤色 / 黄色発光及び前記青色発光の MQW 構造上に形成されたそれぞれの  $p$  型コンタクト構造とをさらに含み、該  $p$  型コンタクト構造が各々、電子ブロッキング層と、該電子ブロッキング層上に形成された  $p$  型金属窒化物層とを含む、  
ことを特徴とする請求項 1 2 から請求項 1 4 のいずれか 1 項に記載の発光ダイオード構造。

【請求項 1 6】

前記青色発光の MQW 構造の下にある  $n^+$  層に電気接触するための  $n$  型コンタクト層と、前記青色発光の MQW 構造を活性化するための、前記青色発光の MQW 構造上に形成された  $p$  型コンタクト構造とをさらに含み、前記赤色 / 黄色発光の MQW 構造が、前記青色発光の MQW 構造からの青色発光の吸収に基づいて赤色から黄色までの波長範囲の光を発光することができる、  
ことを特徴とする請求項 1 4 に記載の発光ダイオード構造。

【請求項 1 7】

前記キャッピング層が窒化アルミニウム (AlN) 材料を含む、  
請求項 1 2 から請求項 1 6 のいずれか 1 項に記載の発光ダイオード構造。

【請求項 1 8】

前記キャッピング層の厚みが約 3 nm 又はこれよりも薄く 保持される、  
ことを特徴とする請求項 1 2 から請求項 1 7 のいずれか 1 項に記載の MQW 構造。

【請求項 1 9】

前記量子ドットナノ構造が窒化インジウムガリウム (InGaN) を含む、ことを特徴とする請求項 1 2 から請求項 1 8 のいずれか 1 項に記載の MQW 構造。

【請求項 2 0】

発光ダイオード構造であって、  
赤色から黄色までの波長範囲の光を発光する赤色 / 黄色発光の多重量子井戸 (MQW) 構造を含み、該赤色 / 黄色発光の MQW の個々の量子井戸構造が、

バリア層と、

前記バリア層上に形成され量子ドットナノ構造を組み込んだ井戸層と、  
を含み、前記バリア層及び前記井戸層が第 1 の金属窒化物ベースの材料を含み、  
前記赤色 / 黄色発光の MQW の前記量子井戸構造の少なくとも 1 つが、前記井戸層上に形成されたキャッピング層をさらに含み、該キャッピング層が、前記第 1 の金属窒化物ベースの材料と比較して異なる金属元素を有する第 2 の金属窒化物ベースの材料を含み、そして、前記キャッピング層上に形成された第 2 のキャッピング層をさらに含み、該第 2 のキャッピング層が、前記第 2 の金属窒化物ベースの材料と比較して異なる金属成分を有する第 3 の金属窒化物ベースの材料を含み、

前記発光ダイオード構造がさらに、

青色発光の MQW 構造と、

緑色発光の MQW 構造と、

を含み、前記発光ダイオード構造から白色光を発光するために前記青色発光の MQW 構造及び前記緑色発光の MQW 構造が前記赤色 / 黄色発光の MQW と一体に形成される、  
ことを特徴とする発光ダイオード構造。

【請求項 2 1】

前記赤色 / 黄色発光の MQW 構造が、前記青色発光の MQW 構造及び前記緑色発光の MQW 構造上に形成される、  
ことを特徴とする請求項 2 0 に記載の発光ダイオード構造。

【請求項 2 2】

前記赤色 / 黄色発光、青色発光及び緑色発光の MQW 構造の下にある  $n^+$  層に電気接触

10

20

30

40

50

するための n 型コンタクト層と、

前記青色発光の MQW 構造及び前記緑色発光の MQW 構造をそれぞれ活性化するための、前記青色発光の MQW 構造及び前記緑色発光の MQW 構造上に形成されたそれぞれの p 型コンタクト構造と、

をさらに含み、

前記 p 型コンタクト構造が各々、電子ブロッキング層と、前記電子ブロッキング層上に形成された p 型金属窒化物層とを含み、さらに前記赤色 / 黄色発光の MQW 構造が、前記青色発光の MQW 構造からの青色発光、前記緑色発光の MQW 構造からの緑色発光、又はこれらの両方の吸収に基づいて赤色から黄色までの波長範囲の光を発光することができる、

10

ことを特徴とする請求項 20 又は請求項 21 に記載の発光ダイオード構造。

【請求項 23】

前記キャッピング層が窒化アルミニウム (AlN) 材料を含む、  
ことを特徴とする請求項 20 から請求項 22 のいずれか 1 項に記載の発光ダイオード構造。

【請求項 24】

前記キャッピング層の厚みが約 3 nm 又はこれよりも薄く保持される、  
ことを特徴とする請求項 20 から請求項 23 のいずれか 1 項に記載の発光ダイオード構造。

【請求項 25】

前記量子ドットナノ構造が窒化インジウムガリウム (InGaN) を含む、ことを特徴とする請求項 20 から請求項 24 のいずれか 1 項に記載の発光ダイオード構造。

20

【請求項 26】

発光ダイオードのための多重量子井戸 (MQW) 構造を作製する方法であって、  
複数の量子井戸構造であって、各々がバリア層と、前記バリア層上に形成され量子ドットナノ構造を組み込んだ井戸層とを含み、前記バリア層及び前記井戸層が第 1 の金属窒化物ベースの材料を含む複数の量子井戸構造を形成するステップと、  
前記第 1 の金属窒化物ベースの材料と比較して異なる金属元素を有する第 2 の金属窒化物ベースの材料を含む、前記井戸層上のキャッピング層と、前記第 2 の金属窒化物ベースの材料と比較して異なる金属元素を有する第 3 の金属窒化物ベースの材料を含む、前記キャッピング層上に形成された第 2 のキャッピング層とを、含むように前記量子井戸構造の少なくとも 1 つを形成するステップと、  
を含むことを特徴とする方法。

30

【請求項 27】

発光ダイオード構造を作製する方法であって、  
多重量子井戸構造であって (MQW)、各々の量子井戸構造がバリア層と、前記バリア層上に形成され量子ドットナノ構造を組み込んだ井戸層とを含み、前記バリア層及び前記井戸層が第 1 の金属窒化物ベースの材料を含む、赤色から黄色までの波長範囲の光を発光する赤色 / 黄色発光の多重量子井戸構造を形成するステップと、

前記第 1 の金属窒化物ベースの材料と比較して異なる金属元素を有する第 2 の金属窒化物ベースの材料を含むキャッピング層を前記井戸層上にさらに含み、そして、前記第 2 の金属窒化物ベースの材料と比較して異なる金属成分を有する第 3 の金属窒化物ベースの材料を含む、前記キャッピング層上に形成された第 2 のキャッピング層をさらに含むように、前記赤色 / 黄色発光の MQW の前記量子井戸構造の少なくとも 1 つを形成するステップと、

40

前記発光ダイオード構造から白色光を発光するために前記赤色 / 黄色発光の MQW と一体に青色発光の MQW 構造を形成するステップと、  
を含むことを特徴とする方法。

【請求項 28】

発光ダイオード構造を作製する方法であって、

50

多重量子井戸構造であって(MQW)、各々の量子井戸構造がバリア層と、前記バリア層上に形成され量子ドットナノ構造を組み込んだ井戸層とを含み、前記バリア層及び前記井戸層が第1の金属窒化物ベースの材料を含む、赤色から黄色までの波長範囲の光を発光する赤色/黄色発光の多重量子井戸構造を形成するステップと、

前記第1の金属窒化物ベースの材料と比較して異なる金属元素を有する第2の金属窒化物ベースの材料を含むキャッピング層を前記井戸層上にさらに含み、そして、前記第2の金属窒化物ベースの材料と比較して異なる金属成分を有する第3の金属窒化物ベースの材料を含む、前記キャッピング層上に形成された第2のキャッピング層をさらに含むように、前記赤色/黄色発光のMQWの前記量子井戸構造の少なくとも1つを形成するステップと、

10

前記赤色/黄色発光のMQWと一体に青色発光のMQW構造を形成するステップと、

前記発光ダイオード構造から白色光を発光するために前記赤色/黄色発光のMQW及び前記青色発光のMQW構造と一体に緑色発光のMQW構造を形成するステップと、を含むことを特徴とする方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、一般に発光ダイオードのための多重量子井戸構造、及び発光ダイオードのための多重量子井戸構造を作製する方法に関する。

【背景技術】

20

【0002】

発光ダイオード(LED)は照明源として機能することができ、通常、屋外フルカラーディスプレイ、交通信号灯、データストレージ、固体照明及び通信などの用途に使用される。通常、III族窒化物ベースのLEDは、窒化インジウムガリウム/窒化ガリウム(InGaN/GaN)多重量子井戸(MQW)層のバンドギャップに対応する波長の光を発光する。GaN層のp-n接合部の両端にバイアスが印加されると光が発生する。LEDでは、p型及びn-GaN層により注入された正孔と電子とが活性層で結合してLED表面から光を発光する。

【0003】

例えば、緑色又は黄色LEDなどの長波長用途のために高In含量が取り入れられたりした場合、InGaN/GaN MQWのエピタキシャル成長が実際的に困難な問題となる。さらに、高In取り入れで波長を増加させた発光では、通常、光出力効率が低下する。成長温度を低下させることによりInの取入れ量を増やすことはできるが、通常、低い温度では結晶品質が劣化するのでフォトルミネセンス(PL)強度が低下する。

30

【0004】

LEDの量子効率を高めるために、InGaN量子ドットが研究されてきた(CHOI他による国際公開第2004/054006号A1などを参照)。LEDからの発光色は、量子ドットの寸法を制御することにより青色から橙色に調節することができる(Grandjean他による米国特許第6,445,009号B1などを参照)。DenBarrs他は、米国特許出願第2006/0255347号A1に、GaNを1又はそれ以上の希土類遷移元素でドーピングして様々な色合いを有する調節可能なLEDを得ることを記載している。これらの遷移元素はCr、Ti及びCoを含み、これらの元素の組み合わせを使用して白色光を生成することが提案されている。しかしながら、MQW構造の薄い活性層内への注入の深さを制御することは実際的に困難である。

40

【0005】

Chua他は、米国特許出願第2004/0023427号A1において、LEDのMQW構造の井戸層内に取り入れたInGaN量子ドットを使用した白色発光について記載している。しかしながら、p-ドーパントマグネシウム(Mg)を活性化させるために高温の原位置アニーリングを行った際に、量子ドットの井戸層内又は障壁層内への外部拡散が生じた。通常、これによりMQW層が不明確となる。この結果、量子ドットによる閉じ

50

込め効果が危うくなる可能性がある。さらに、米国特許出願第2004/0023427号A1では、LEDからの発光色を正確に制御することができず、LEDの白色度が変動するようになっている。

【0006】

現在のところ、可視赤色 - 橙色光源及び黄色光源は、通常リン酸アルミニウムインジウムガリウム (AlInGaP) 材料に基づいて得られるのに対し、明緑色、青色及び紫色LEDは、通常GaNベースの材料系から作製される。しかしながら、現在の技術では、GaNベースのLEDが、通常、白色発光を生成するための赤色成分を提供するのに必要な赤色発光を有することは知られていない。

【0007】

通常、LEDから白色光を生成するためには、各々が赤色、緑色及び青色光という個々の色を発光する別個のLEDの組み合わせが使用される。或いは、個々の青色及び黄色LEDを組み合わせで白色光を生成する。1つの不利な点は、白色光を生成するために異なる材料からなる複数のLEDが使用され、これが作製技術の複雑さ及び全体の作製コストを増加させる点である。異なるダイオードの種類は異なる印加電圧を使用するので、結果として得られるデバイスは、通常複雑な制御電子回路を使用する。さらに、例えば(赤色発光用の) AlInGaP及び(緑色及び青色発光用の) InGaNなどの使用する材料の異なる劣化速度が、通常、得られる白色光の信頼性又は品質に影響を及ぼす。白色光生成のために黄色蛍光体で被覆した青色LEDを使用する代替の作製方法に関しても、蛍光体の劣化により上述の信頼性/品質の問題が生じる。また通常、蛍光体の使用は製造コストを増加させるとともに、蛍光体における吸収に起因して外部量子効率を低下させる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0008】

【特許文献1】国際公開第2004/054006号A1

【特許文献2】米国特許第6,445,009号B1

【特許文献3】米国特許出願第2006/0255347号A1

【特許文献4】米国特許出願第2004/0023427号A1

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

従って、上述の問題点の少なくとも1つに対処するために、発光ダイオードのための多重量子井戸(MQW)構造、及び発光ダイオードのためのMQW構造を作製する方法の必要性が存在する。

【課題を解決するための手段】

【0010】

本発明の第1の態様によれば、発光ダイオードのための多重量子井戸(MQW)構造が提供され、このMQW構造は複数の量子井戸構造を含み、個々の量子井戸構造が、バリア層と、バリア層上に形成され量子ドットナノ構造を組み込んだ井戸層とを含み、これらのバリア層及び井戸層が第1の金属窒化物ベースの材料を含み、量子井戸構造の少なくとも1つが、井戸層上に形成されたキャッピング層をさらに含み、このキャッピング層が、第1の金属窒化物ベースの材料と比較して異なる金属元素を有する第2の金属窒化物ベースの材料を含む。

【0011】

個々の量子井戸構造は、量子ドットナノ構造の形成を促進するための、バリア層と井戸層との間に形成された湿潤層をさらに含むことができる。

【0012】

量子井戸構造の少なくとも1つは、キャッピング層上に形成された第2のキャッピング層をさらに含むことができ、上記第2のキャッピング層は、第2の金属窒化物ベースの材料と比較して異なる金属元素を有する第3の金属窒化物ベースの材料を含む。

## 【 0 0 1 3 】

M Q W構造は、複数の量子井戸構造の最も外側の構造上に形成された p 型コンタクト構造をさらに含むことができ、この p 型コンタクト構造は、電子ブロッキング層と、この電子ブロッキング層上に形成された p 型金属窒化物層とを含むことができる。

## 【 0 0 1 4 】

p 型金属窒化物層はインジウム ( I n ) 材料を含むことができる。

## 【 0 0 1 5 】

p 型金属窒化物層は、約 7 5 0 ~ 8 0 0 の間の温度を使用して形成することができる。

## 【 0 0 1 6 】

M Q W構造は、複数の量子井戸構造の下にある n<sup>+</sup>層に電気接触するための n 型コンタクト層をさらに含むことができる。

## 【 0 0 1 7 】

M Q W構造は赤色 / 黄色光を発光することができる。

## 【 0 0 1 8 】

M Q W構造は赤色光を発光することができる。

## 【 0 0 1 9 】

キャッピング層は窒化アルミニウム ( A l N ) 材料を含むことができる。

## 【 0 0 2 0 】

キャッピング層の厚みは最大約 3 n m に保持することができる。

## 【 0 0 2 1 】

量子ドットナノ構造は、インジウムガリウム窒化物 ( I n G a N ) 量子ドットを含むことができる。

## 【 0 0 2 2 】

本発明の第 2 の態様によれば、発光ダイオード構造が提供され、この発光ダイオード構造は赤色 / 黄色発光多重量子井戸 ( M Q W ) 構造を含み、赤色 / 黄色発光 M Q W の個々の量子井戸構造が、バリア層と、バリア層上に形成され量子ドットナノ構造を組み込んだ井戸層とを含み、これらのバリア層及び井戸層が第 1 の金属窒化物ベースの材料を含み、赤色 / 黄色発光 M Q W の量子井戸構造の少なくとも 1 つが、井戸層上に形成されたキャッピング層をさらに含み、このキャッピング層が、第 1 の金属窒化物ベースの材料と比較して異なる金属元素を有する第 2 の金属窒化物ベースの材料を含み、発光ダイオード構造はさらに、発光ダイオード構造から白色光を発光するために赤色 / 黄色発光 M Q W と一体に形成された青色発光 M Q W 構造を含む。

## 【 0 0 2 3 】

青色発光 M Q W 構造は、赤色 / 黄色発光 M Q W 構造の複数の量子井戸構造の最も外側の構造上に形成することができる。

## 【 0 0 2 4 】

赤色 / 黄色発光 M Q W 構造の複数の量子井戸構造の最も内側の構造は、青色発光 M Q W 構造上に形成することができる。

## 【 0 0 2 5 】

発光ダイオード構造は、赤色 / 黄色発光及び青色発光 M Q W 構造の下にある n<sup>+</sup>層に電気接触するための n 型コンタクト層と、赤色 / 黄色発光 M Q W 構造及び青色発光 M Q W 構造上に形成されたそれぞれの p 型コンタクト構造とをさらに含むことができ、この p 型コンタクト構造は各々、電子ブロッキング層と、この電子ブロッキング層上に形成された p 型金属窒化物層とを含むことができる。

## 【 0 0 2 6 】

発光ダイオード構造は、青色発光 M Q W 構造の下にある n<sup>+</sup>層に電気接触するための n 型コンタクト層と、青色発光 M Q W 構造の活性化するための、青色発光 M Q W 構造上に形成された p 型コンタクト層とをさらに含むことができ、赤色 / 黄色発光 M Q W 構造は、青色発光 M Q W 構造からの青色発光の吸収に基づいて赤色 / 黄色光を発光することができる

10

20

30

40

50

。

【 0 0 2 7 】

キャッピング層は窒化アルミニウム ( A l N ) 材料を含むことができる。

【 0 0 2 8 】

キャッピング層の厚みは最大約 3 n m に保持することができる。

【 0 0 2 9 】

量子ドットナノ構造はインジウムガリウム窒化物 ( I n G a N ) 量子ドットを含むことができる。

【 0 0 3 0 】

本発明の第 3 の態様によれば、発光ダイオード構造が提供され、この発光ダイオード構造は赤色 / 黄色発光多重量子井戸 ( M Q W ) 構造を含み、赤色 / 黄色発光 M Q W の個々の量子井戸構造が、バリア層と、バリア層上に形成され量子ドットナノ構造を組み込んだ井戸層とを含み、これらのバリア層及び井戸層が第 1 の金属窒化物ベースの材料を含み、赤色 / 黄色発光 M Q W の量子井戸構造の少なくとも 1 つが、井戸層上に形成されたキャッピング層をさらに含み、このキャッピング層が、第 1 の金属窒化物ベースの材料と比較して異なる金属元素を有する第 2 の金属窒化物ベースの材料を含み、発光ダイオード構造はさらに、青色発光 M Q W 構造と緑色発光 M Q W 構造とを含み、これらの青色発光 M Q W 構造及び緑色発光 M Q W 構造が、発光ダイオード構造から白色光を発光するために赤色 / 黄色発光 M Q W と一体に形成される。

10

【 0 0 3 1 】

赤色 / 黄色発光 M Q W 構造は、青色発光 M Q W 構造及び緑色発光 M Q W 構造上に形成することができる。

20

【 0 0 3 2 】

発光ダイオード構造は、赤色 / 黄色発光、青色発光及び緑色発光 M Q W 構造の下にある n + 層に電気接触するための n 型コンタクト層と、青色発光 M Q W 構造及び緑色発光 M Q W 構造をそれぞれ活性化するための、青色発光 M Q W 構造及び緑色発光 M Q W 構造上に形成されたそれぞれの p 型コンタクト構造とをさらに含むことができ、この p 型コンタクト構造は各々、電子プロッキング層と、この電子プロッキング層上に形成された p 型金属窒化物層とを含むことができ、さらに赤色 / 黄色発光構造は、青色発光 M Q W 構造からの青色発光、緑色発光 M Q W 構造からの緑色発光、又はこれらの両方の吸収に基づいて赤色 / 黄色光を発光することができる。

30

【 0 0 3 3 】

キャッピング層は窒化アルミニウム ( A l N ) 材料を含むことができる。

【 0 0 3 4 】

キャッピング層の厚みは最大約 3 n m に保持することができる。

【 0 0 3 5 】

量子ドットナノ構造はインジウムガリウム窒化物 ( I n G a N ) 量子ドットを含むことができる。

【 0 0 3 6 】

本発明の第 4 の態様によれば、発光ダイオードのための多重量子井戸 ( M Q W ) 構造を作製する方法が提供され、この方法は、各々がバリア層と、バリア層上に形成され量子ドットナノ構造を組み込んだ井戸層とを含み、これらのバリア及び井戸層が第 1 の金属窒化物ベースの材料を含む複数の量子井戸構造を形成するステップと、第 1 の金属窒化物ベースの材料と比較して異なる金属元素を有する第 2 の金属窒化物ベースの材料を含むキャッピング層を井戸層上にさらに含むように量子井戸構造の少なくとも 1 つを形成するステップとを含む。

40

【 0 0 3 7 】

本発明の第 5 の態様によれば、発光ダイオード構造を作製する方法が提供され、この方法は、各々がバリア層と、バリア層上に形成され量子ドットナノ構造を組み込んだ井戸層とを含み、これらのバリア及び井戸層が第 1 の金属窒化物ベースの材料を含む複数の量子

50



井戸構造を形成するステップと、第1の金属窒化物ベースの材料と比較して異なる金属元素を有する第2の金属窒化物ベースの材料を含むキャッピング層を井戸層上にさらに含むように赤色／黄色MQWの量子井戸構造の少なくとも1つを形成するステップと、発光ダイオード構造から白色光を発光するために赤色／黄色発光MQWと一体に青色発光MQW構造を形成するステップとを含む。

【0038】

本発明の第6の態様によれば、発光ダイオード構造を作製する方法が提供され、この方法は、各々がバリア層と、バリア層上に形成され量子ドットナノ構造を組み込んだ井戸層とを含み、これらのバリア及び井戸層が第1の金属窒化物ベースの材料を含む複数の量子井戸構造を形成するステップと、第1の金属窒化物ベースの材料と比較して異なる金属元素を有する第2の金属窒化物ベースの材料を含むキャッピング層を井戸層上にさらに含むように赤色／黄色MQWの量子井戸構造の少なくとも1つを形成するステップと、青色発光MQW構造を赤色／黄色発光MQWと一体に形成するステップと、発光ダイオード構造から白色光を発光するために赤色／黄色発光MQW及び青色発光MQW構造と一体に緑色発光MQW構造を形成するステップとを含む。

【0039】

当業者には、例示のみの目的で図面とともに示す以下の説明から、本発明の実施形態がより良く理解されるとともに容易に明らかになるであろう。

【図面の簡単な説明】

【0040】

【図1】単色LED構造を示す概略図である。

【図2】単色LED構造上の電気コンタクトの形成を示す概略図である。

【図3(a)】黄色LEDのエレクトロルミネセンススペクトルを示す強度対波長のグラフである。

【図3(b)】橙色LEDのエレクトロルミネセンススペクトルを示す強度対波長のグラフである。

【図3(c)】赤色LEDのエレクトロルミネセンススペクトルを示す強度対波長のグラフである。

【図4】調節可能な白色LED構造を示す概略図である。

【図5】調節可能な白色LED構造上の電気コンタクトの形成を示す概略図である。

【図6】「冷」白色LEDのエレクトロルミネセンススペクトルを示す強度対波長グラフである。

【図7】別の調節可能な白色LED構造上の電気コンタクトの形成を示す概略図である。

【図8】さらに別の調節可能な白色LED構造を示す概略図である。

【図9】調節可能なLED構造上の電気コンタクトの形成を示す概略図である。

【図10】黄色LED構造及び白色LED構造から得たI-V計測値を示す電流(I)対電圧(V)のグラフである。

【図11】白色LED構造の表面モルフォロジーを示す走査電子顕微鏡(SEM)画像である。

【図12】図7に概略的に示す構造を有するサンプル白色LED構造の表面モルフォロジーを示す走査電子顕微鏡(SEM)画像である。

【図13】図7に概略的に示す構造を有する白色LED構造の拡大した走査電子顕微鏡(SEM)画像である。

【図14】図7に概略的に示す構造を有する白色LED構造のエレクトロルミネセンススペクトルを示す強度対波長のグラフである。

【図15】図7に概略的に示す構造を有する白色LED構造から得たI-V計測値を示す電流(I)対電圧(V)のグラフである。

【図16】発光ダイオードのためのMQW構造を作製する方法を示すフロー図である。

【図17】発光ダイオードを作製する方法を示すフロー図である。

【図18】発光ダイオードを作製する別の方法を示すフロー図である。

10

20

30

40

50

## 【発明を実施するための形態】

## 【0041】

説明する実施形態例では、有機金属化学気相成長（MOCVD）装置を使用してLEDの成長が行われる。実施形態例では、トリメチルガリウム（TMGa）、トリメチルインジウム（TMIn）、トリメチルアルミニウム（TMA）、マグネシウム（ $\text{Cp}_2\text{Mg}$ ）及びシラン（ $\text{SiH}_4$ ）が前駆体として使用される。LED表面上で元素を効果的に取り込むための搬送ガスとして水素及び窒素が使用される。

## 【0042】

実施形態例では、多重量子井戸（MQW）構造が、InGaIn井戸層上におけるInGaIn量子ドットの取入れとともに規定の温度で成長する。その後、形成された量子井戸が薄い窒化アルミニウム（AlN）層でキャッピングされる。以下、この実施形態例について詳述する。

## 【0043】

AlN層は、InGaIn量子ドットの外部拡散を防ぐためのキャップ層として機能することができる。In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N又はInN量子ドットの格子定数が約3.5446オングストローム（ $\text{\AA}$ ）であるのに対し、AlN層の格子定数は約3.1114（ $\text{\AA}$ ）である。これにより、GaIn/InN系（約10.6%）と比較した場合、AlN/InN系（約13%）ではより大きな格子不整合が生じる。このより大きな格子不整合が、その後の層成長及びアニーリング処理中に高温が印加された場合の量子ドットの外部拡散をさらに阻止することができる。AlN層は、その後のInGaIn井戸の成長に対してより大きな圧縮応力を発生させる可能性があるため、本発明者らは、GaInバリアの成長後かつInGaIn量子ドット及びInGaIn井戸層の成長前の中間層としてAlN層を使用することは推奨しない。この結果、インジウムの取入れ及びその発光波長の青色シフトが弱まる可能性がある。

## 【0044】

図1は、この実施形態例の単色LED構造100を示す概略図である。処理チャンバ内にサファイア基板102が準備される。サファイア基板102上のGaInの核生成を促進するために、基板102上で低温バッファ層106を約520～550の温度範囲で約26nmの厚みに成長させる。10<sup>18</sup>cm<sup>-3</sup>のドーピング濃度のGaInのn<sup>+</sup>層108を、層106上で約900～1050の温度で成長させる。層108が成長した後、GaInバリア層110を、約2×10<sup>17</sup>cm<sup>-3</sup>～1×10<sup>18</sup>cm<sup>-3</sup>のSiドーピング濃度で約5～15nmの厚みに成長させる。当業者であれば、バリア層110をSiドーピングなしで成長させることはできるが、通常バリア層110の品質はSiドーピングで向上するので、Siドーピングが好ましいと思われる点を理解するであろう。

## 【0045】

バリア層110が成長した後、温度が約700～750に下げられ、x～0.10～0.20の組成及び約1nmの厚みを有するIn<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Nの薄い湿潤層112をバリア層110上で成長させる。湿潤層112は、Inバースト処理中の窒化インジウムリッチな量子ドットの取入れを促進することができる。薄い湿潤層112を形成した後、インジウム前駆体TMInが、基板102を越えて約20μmol/分未満の流速で約6～30秒間流れて、0.2<w<1.0とした場合In<sub>w</sub>Ga<sub>1-w</sub>Nの114などのナノ構造又は「量子ドット」を形成する。インジウム前駆体TMInからのIn原子は、InGaInの湿潤層の窒素ダングリングボンドにおいて分離して、前駆体の流速により決定される114などのInGaIn量子ドット成長のためのシード層として機能することができる。114などのインジウムリッチなInGaIn量子ドットのサイズを制御するために、アンチサーファクタントとしての機能を果たすTMInフローの量及びTMInフローの持続時間がモニタされる。TMInの流速が約20μmol/分未満に、好ましくは約20sccm（4.5μmol/分）～約80sccm（18.0μmol/分）に保持されて、114などのInリッチなInGaIn量子ドットを形成する。

## 【0046】

114などの量子ドットが成長した後、114などのナノ構造上でInGa<sub>1-x</sub>N量子井戸層116を成長させ、約3～5nmの厚みの組み込まれたInGa<sub>1-x</sub>N量子ドット/井戸層116を形成する。0.2 < x < 0.5のインジウム組成をもたらすために、In<sup>W</sup>Ga<sup>1-W</sup>N井戸層116の成長温度は約700～750に保持される。インジウムの取入れ量は所望の発光色に依存する。単色発光を得るために、MQWの成長中、114などの量子ドット及び井戸層116の成長中などは温度変動が最小限に抑えられる。井戸層116が成長した後、井戸層116はAlN層118でキャッピングされる。AlN層118の厚みは、井戸層116と比較して（好ましくは約3nmよりも薄く）相対的に薄く保たれる。この実施形態例では、InGa<sub>1-x</sub>N井戸層116の成長後、AlN層118を成長させる前に約30秒を越える時間間隔が保持される。より良好な結晶品質のために、AlN層118及びGa<sub>1-x</sub>Nバリア層110を成長させるための温度は、InGa<sub>1-x</sub>N井戸層116を成長させるための温度よりも約0～30高く設定することができる。AlN層118が成長した後、Ga<sub>1-x</sub>N層108を成長させるための条件と実質的に同じ条件を使用してGa<sub>1-x</sub>Nキャップ層120を成長させる。

#### 【0047】

バリア層110からGa<sub>1-x</sub>Nキャップ層120までが、赤色/黄色発光量子井戸構造122を形成する。この実施形態例では、バリア層110からGa<sub>1-x</sub>Nキャップ層120までを形成するステップを繰り返して（量子井戸構造124などを参照）赤色/黄色発光多重量子井戸（MQW）構造126を形成する。

#### 【0048】

当業者であれば、説明を明確にするために図1には2つの量子井戸構造122、124のみを示しているが、量子井戸構造の数は3～5などの範囲に及んでもよいことを理解するであろう。当業者であれば理解するであろうが、122、124などのより多くの量子井戸構造を形成することで、LED構造100の光度を向上させるとともに波長領域を広げることができる。

#### 【0049】

この実施形態例では、例えば、Ga<sub>1-x</sub>Nバリア層132などの次の層がより高温で成長したりする場合、InGa<sub>1-x</sub>Nとは異なる格子定数を有するAlN層118が封入を行って、114などのInリッチなInGa<sub>1-x</sub>N量子ドットの井戸層116内への、又は次の量子井戸構造124のGa<sub>1-x</sub>Nバリア層132内への拡散を防ぐことができる。

#### 【0050】

量子井戸構造124のGa<sub>1-x</sub>Nキャップ層128を成長させるために、TMGaの流速を、次のp-AlGa<sub>1-y</sub>N層を成長させるために使用する流速と同じになるように設定することにより、TMGaのフローに実質的に連続性があるようになる。Ga<sub>1-x</sub>Nキャップ層128が成長した後、Ga<sub>1-x</sub>N層130を、約740～780の温度で約2×10<sup>17</sup>～1×10<sup>18</sup>cm<sup>-3</sup>のSiドーパント濃度により約15～30nmの厚みに成長させる。p-Al<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>N（式中0.1 < y < 0.3）を含む電子ブロッキング層133を、約20～50nmの厚みに成長させる。p-Al<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>Nを成長させるためのTMAフローは、約750～800の成長温度で約40～100μmol/分に保持される。成長中、Cp<sub>2</sub>Mg源は約0.15～0.5μmol/分に維持される。p-AlGa<sub>1-y</sub>N層133は、電子がp-AlGa<sub>1-y</sub>N領域134内へ横切るのを妨げるように機能して、MQW構造126における効果的な再結合を可能にすることができる。

#### 【0051】

当業者であれば理解するであろうが、通常p-GaNを900未満の、約760～825の範囲内の温度で成長させて、量子ドットの外部拡散を防ぐ。しかしながら、この結果p型の導電性が低下し、結晶品質が劣化する。この実施形態例では、p-GaNがインジウムを取り込んでp-InGa<sub>1-x</sub>Nを生成し、導電性を向上させる。p-AlGa<sub>1-y</sub>N層133が成長した後、p型InGa<sub>1-x</sub>N層134を約150～500nmの厚みに成長させる。従来のp-GaN層の成長により高い温度を使用するのは対照的に、Mgがドーパントとして使用され、約760～800の温度範囲で成長が行われる。この成長条件は

10

20

30

40

50

、InリッチなInGaNNano構造の分解の可能性を考慮に入れている。TMInの流速は約80～150 sccmの範囲内に設定され、チャンバ圧力は約200 Torr又はそれ以下に保たれる。水素雰囲気内でMOCVDにより成長したMgドープGaNでは、MgアクセプタがHアクセプタにより不動態化され電氣的に不活性なMg-H錯体が生じる。この実施形態例では、p-InGaNN層134を900よりも低温で形成することはしておき、AlN層118が114などのInGaNN量子ドットの外部拡散のさらなる防止を支援できることを当業者であれば理解するであろう。

#### 【0052】

1つの実施形態様では、窒素雰囲気内で原位置アニーリングを約10～20分間行って、mが約0.05～0.10の範囲内にあるp型In<sub>m</sub>Ga<sub>1-m</sub>N内のMgを活性化させる。アニーリング温度は、p型In<sub>m</sub>Ga<sub>1-m</sub>N層134の成長温度を上回る約20～50で保たれる。

10

#### 【0053】

この実施形態例では、GaN層130からp-InGaNN層134までがp-InGaNNコンタクト構造136を形成する。

#### 【0054】

図2は、実施形態例の単色LED構造100上の電気コンタクトの形成を示す概略図である。GaN層108の上部にある層が、誘導結合型プラズマエッチング(ICP)を使用してエッチングされる。p-InGaNN層134上にp-コンタクト202が形成され、GaN層108上にn-コンタクト204が形成される。p-コンタクト202及びn-コンタクト204を使用して、LED構造100を活性化して単色光を発光させるための注入電流を提供するためにp-n接合部が形成される。

20

#### 【0055】

上述の実施形態例では、量子井戸構造122、124のそれぞれのInGaNN湿潤層112などは、114などのインジウムリッチな量子ドットの形成を促進することができ、量子井戸構造122、124のそれぞれのAlN層118などは、114などのInGaNN量子ドットが拡散するのを防ぐためのキャップとして機能することができる。さらに、それぞれのInGaNN湿潤層112などは、Inリッチな量子ドットを形成して単色光を提供するためのより良好なサイズ制御を行うことができる。上記の実施形態例は、黄色、橙色及び/又は赤色発光などのための、より長い波長帯で作動できる単色LEDを提供することができる。

30

#### 【0056】

図3(a)～図3(c)は、黄色、橙色及び赤色LEDのエレクトロルミネセンススペクトルをそれぞれ示す強度対波長グラフであり、これらの各々は上述の実施形態例を使用して得られる。114などのInリッチな量子ドット(図1)の成長中のTMInフロー及びInGaNN量子井戸層116(図1)の成長温度が変化して、発光の色を変化させる。グラフは、約20mAの注入電流を使用して得た計測値に基づく。図3(a)～図3(c)から、それぞれの黄色、橙色及び赤色LEDの強度は相対的に同じであることが観察される。それぞれの黄色、橙色及び赤色LEDの中心周波数が、互いに約20nmずつ偏位していることも観察される。

40

#### 【0057】

図4は、別の実施形態例の調節可能な白色LED構造400を示す概略図である。処理チャンバ内にサファイア基板402が準備される。サファイア基板402上のGaNの核形成を促進するために、基板402上で低温バッファ層406を約520～550の温度範囲で約25nmの厚みに成長させる。10<sup>18</sup>cm<sup>-3</sup>のドーピング濃度のGaNの層408を、層406上で約900～1050の温度で成長させる。層408が成長した後、青色発光量子井戸構造410を形成させる。

#### 【0058】

青色発光量子井戸構造410を形成するために、GaNバリア層412を、約2×10<sup>17</sup>cm<sup>-3</sup>～1×10<sup>18</sup>cm<sup>-3</sup>のSiドーピング濃度により約760～850の温度で

50

約  $5.0 - 15.0 \text{ nm}$  の厚みに成長させる。GaN バリア層 412 が成長した後、 $0.1 < w < 0.16$  のインジウム組成をもたらすために、バリア層 412 上で約  $2.0 \sim 4.0 \text{ nm}$  の厚みを有する  $\text{In}_w\text{Ga}_{1-w}\text{N}$  井戸層 414 を約  $760 \sim 790$  の温度で成長させる。InGa<sub>N</sub> 井戸層 414 が成長した後、InGa<sub>N</sub> 井戸層 414 の上で GaN キャップ層 416 を成長させる。説明を明確にするために、図 4 には 1 つの量子井戸構造 410 のみを示している。当業者であれば、量子井戸構造 410 を成長させるためのステップを例えば 3 ~ 5 回繰り返して MQW 構造を形成できることを理解するであろう。

#### 【0059】

青色発光量子井戸構造 410 を形成した後、GaN 層 418 を約  $740 \sim 780$  の温度で約  $2 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  の Si ドーピング濃度により約  $15 \sim 30 \text{ nm}$  の厚みに成長させる。 $p\text{-Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$  (式中  $0.1 < y < 0.3$ ) を含む電子ブロッキング層 420 を、約  $800 \sim 1020$  で約  $20 \sim 50 \text{ nm}$  の厚みに成長させる。 $p\text{-Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$  を成長させるための TMA フローは、約  $750 \sim 800$  の成長温度で約  $40 \sim 100 \mu\text{mol}/\text{分}$  に保持される。成長中、 $\text{Cp}_2\text{Mg}$  源は約  $0.15 \sim 0.5 \mu\text{mol}/\text{分}$  に維持される。 $p\text{-AlGa}_N$  層 420 が成長した後、 $p\text{-Ga}_N$  層 422 を、Mg をドーパントとして使用して約  $900 \sim 1000$  で成長させる。この実施形態例では、層 418、420 及び 422 が  $p\text{-Ga}_N$  コンタクト構造 424 を形成する。 $p\text{-Ga}_N$  コンタクト構造 424 を形成した後、GaN キャップ層 426 を、 $p\text{-Ga}_N$  コンタクト構造 424 上で約  $800 \sim 1020$  の温度範囲で約  $10 \sim 50 \text{ nm}$  の厚みに成長させる。GaN キャップ層 426 が成長して、 $p\text{-Ga}_N$  層 422 の表面を「平滑化」

#### 【0060】

GaN キャップ層 426 が成長した後、赤色 / 黄色発光量子井戸構造 428 を成長させる。赤色 / 黄色発光量子井戸構造 428 を成長させるための処理ステップは、図 1 に関して赤色 / 黄色発光量子井戸構造 122 を成長させるために説明した処理ステップと実質的に同じである。この実施形態例では、In リッチな InGa<sub>N</sub> 量子ドット成長中の TMIn フロー及び InGa<sub>N</sub> 井戸層の成長温度を約  $10 \sim 30$  だけ変化させて、量子井戸構造 428 が黄色又は橙色光などの異なる波長の赤色ベースの色を発光できるようにすることができる。

#### 【0061】

この実施形態例では、説明を明確にするために、図 4 には 1 つの量子井戸構造のみを示している。当業者であれば、量子井戸構造 428 を成長させるための処理ステップを例えば 3 ~ 5 回繰り返して MQW 構造を形成できることを理解するであろう (図 1 の MQW 構造 126 と比較)。

#### 【0062】

量子井戸構造 428 が成長した後、 $p\text{-InGa}_N$  コンタクト構造 430 を形成させる。 $p\text{-InGa}_N$  コンタクト構造 430 を形成するための処理ステップは、図 1 に関して  $p\text{-InGa}_N$  コンタクト層 136 を形成するために説明した処理ステップと実質的に同じである。

#### 【0063】

図 5 は、上述の実施形態例の調節可能な白色 LED 構造 400 上の電気コンタクトの形成を示す概略図である。 $n\text{-Ga}_N$  層 408 の上部にある層が、誘導結合型プラズマエッチング (ICP) を使用してエッチングされる。次に、 $p\text{-Ga}_N$  層 422 の上部にある層が ICP を使用してエッチングされる。 $n\text{-Ga}_N$  層 408 上に  $n\text{-コンタクト} 502$  が形成され、 $p\text{-Ga}_N$  層 422 上に  $p\text{-コンタクト} 504$  が形成され、 $p\text{-InGa}_N$  コンタクト構造 430 の  $p\text{-InGa}_N$  層上に  $p\text{-コンタクト} 505$  が形成される。青色発光量子井戸構造 410 が、コンタクト 502 とコンタクト 504 との間の  $p\text{-n}$  接合を使用して活性化されるのに対し、黄色 / 赤色発光量子井戸構造 428 は、コンタクト 502 とコンタクト 506 との間の  $p\text{-n}$  接合を使用して活性化される。

#### 【0064】

上述の実施形態例では、青色発光量子井戸構造 4 1 0 から上層へと通過する青色光の一部を黄色 / 赤色発光量子井戸構造 4 2 8 が吸収し、黄色光として再発光することができる。すなわち、黄色 / 赤色発光量子井戸構造 4 2 8 からの黄色光成分は、(コンタクト 5 0 2 とコンタクト 5 0 6 との間の p - n 接合に起因する) 直接的なキャリアの再結合及び青色成分の一部の吸収の双方から生じる。さらに、黄色 / 赤色発光量子井戸構造 4 2 8 及び青色発光量子井戸構造 4 1 0 に様々な注入電流を別個に供給することができるので、LED 構造 4 0 0 は調節可能な白色光を提供することができる。

#### 【0065】

別の実施形態例では、赤色 / 黄色発光量子井戸構造及び青色発光量子井戸構造の成長の順番を逆にすることができる。従って、この実施形態例では、最初にサファイア基板上で赤色 / 黄色発光量子井戸構造が成長し、これに p - InGa<sub>N</sub>コンタクト構造、青色発光量子井戸構造及び p - Ga<sub>N</sub>コンタクト構造が続く。p - InGa<sub>N</sub>コンタクト構造を使用して p - n 接合を形成して赤色 / 黄色発光量子井戸構造を活性化することができ、また p - Ga<sub>N</sub>コンタクト構造を使用して別の p - n 接合を形成して青色発光量子井戸構造を活性化することができる。

#### 【0066】

上述の実施形態例では、青色発光量子井戸構造の前に黄色 / 赤色発光量子井戸構造が成長するので、黄色 / 赤色発光量子井戸構造から発光される黄色光は、p - InGa<sub>N</sub>コンタクト構造を使用して形成された p - n 接合にのみ基づく(すなわち、青色光の吸収を伴わない)。さらに、黄色 / 赤色発光量子井戸構造及び青色発光量子井戸構造に様々な注入電流を別個に供給することができるので、LED 構造は調節可能な白色光を提供することができる。

#### 【0067】

図 6 は、「冷度」調節可能な白色 LED のエレクトロルミネセンススペクトルを示す強度対波長のグラフである。この調節可能な白色 LED は、最初に黄色発光量子井戸構造が成長し、これに青色発光量子井戸構造が続くことを除き、調節可能な白色 LED 構造 4 0 0 (図 4) と実質的に同じ処理条件を使用して形成される。

#### 【0068】

図 7 は、さらに別の実施形態例の調節可能な白色 LED 構造 7 0 0 を示す概略図である。LED 構造 7 0 0 は、Ga<sub>N</sub>層 7 0 1 と、Ga<sub>N</sub>層 7 0 1 上で成長した青色 / 緑色発光量子井戸構造 7 0 2 と、量子井戸構造 7 0 2 上で成長した p - Ga<sub>N</sub>コンタクト構造 7 0 4 と、p - Ga<sub>N</sub>コンタクト構造 7 0 4 上で成長した Ga<sub>N</sub>キャップ層 7 0 6 と、Ga<sub>N</sub>キャップ層 7 0 6 上で成長した赤色 / 黄色発光量子井戸構造 7 0 8 とを含む。LED 構造 7 0 0 を形成するための処理ステップは、赤色 / 黄色発光量子井戸構造 7 0 8 上に p - InGa<sub>N</sub>コンタクト構造が形成されないことを除き、図 4 に関する LED 構造 4 0 0 を形成するための処理ステップと実質的に同じである。

#### 【0069】

この実施形態例では、説明を明確にするために、図 7 には青色 / 緑色発光量子井戸構造 7 0 2 及び赤色 / 黄色発光量子井戸構造 7 0 8 ごとに 1 つの量子井戸構造を示している。当業者であれば、各々が青色 / 緑色光及び赤色 / 黄色光をそれぞれ発光するための MQW 構造を形成するためのそれぞれの量子井戸構造 7 0 2 及び 7 0 8 の形成中に、量子井戸構造 7 0 2 及び 7 0 8 を成長させるための処理ステップを、例えば 3 ~ 5 回反復できることを理解するであろう(例えば、図 1 の MQW 構造 1 2 6 と比較)。

#### 【0070】

この実施形態例では、Ga<sub>N</sub>層 7 0 1 の上にある層が誘導結合型プラズマエッチング(ICP)を使用してエッチングされる。次いで p - Ga<sub>N</sub>コンタクト構造 7 0 4 の上にある層が ICP を使用してエッチングされる。Ga<sub>N</sub>層 7 0 1 上に n - コンタクト 7 1 0 が形成され、p - Ga<sub>N</sub>コンタクト構造 7 0 4 上に p - コンタクト 7 1 2 が形成される。青色 / 緑色発光量子井戸構造 7 0 2 が、コンタクト 7 1 0 とコンタクト 7 1 2 との間の p - n 接合を使用して活性化されるのに対し、赤色 / 黄色発光量子井戸構造 7 0 8 は、青色 /

10

20

30

40

50

緑色発光量子井戸構造 702 から発光される青色光の吸収に基づいて活性化される。従って、この実施形態例では、赤色 / 黄色発光量子井戸構造 708 を活性化するための独立した p - n 接合は存在しない。

#### 【0071】

上述の実施形態例では、青色 / 緑色発光量子井戸構造 702 に様々な注入電流を供給することができるので、LED 構造 700 は調節可能な白色光を提供することができる。当業者であれば、吸収可能な青色光の量に基づいて、赤色 / 黄色発光量子井戸構造 708 を間接的に「調節可能」にできることを理解するであろう。

#### 【0072】

上述の実施形態例では、エレクトロルミネセンスの青色 / 緑色光をエレクトロルミネセンスの黄色 / 赤色光と混合することにより白色光が生成される。この実施形態例によりもたらされる 1 つの利点は、赤色 / 黄色発光量子井戸構造 708 が成長する前に p - GaN コンタクト構造 704 が成長するので、通常 InN 又は In リッチなナノ構造 / 量子ドットの外部拡散を生じる p - GaN コンタクト構造 704 の高温成長及びアニーリングがもはや懸案事項でなくなる点にある。この実施形態例は、GaN / InGa<sub>N</sub> 結晶ベースの構造を提供することができ、現在の技術と比較してより良好な演色を実現することができる。この実施形態例では、GaN キャップ層 706 が、p - GaN コンタクト構造 704 からの Mg の外部拡散を防ぐこともできる。

#### 【0073】

図 8 は、さらに別の実施形態例における調節可能な白色 LED 構造 800 を示す概略図である。処理チャンバ内にサファイア基板 802 が準備される。サファイア基板 402 上の GaN の核形成を促進するために、基板 802 上で低温バッファ層 806 を約 520 ~ 550 の温度範囲で約 25 nm の厚みに成長させる。10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup> のドーピング濃度を有する GaN の層 808 を、層 806 の上で約 900 ~ 1050 の温度で成長させる。層 808 が成長した後、青色発光量子井戸構造 810 が形成される。

#### 【0074】

緑色発光量子井戸構造 810 を形成するために、GaN バリア層 812 を、約 2 × 10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup> ~ 1 × 10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup> の Si ドーピング濃度により約 750 ~ 850 の温度で約 5.0 - 15.0 nm の厚みに成長させる。GaN バリア層 812 が成長した後、0.19 < w < 0.26 のインジウム組成をもたらすために、約 2.0 ~ 4.0 nm の厚みを有する In<sub>w</sub>Ga<sub>1-w</sub>N 井戸層 814 を、バリア層 812 上で約 730 ~ 770 の温度で成長させる。InGa<sub>N</sub> 井戸層 814 が成長した後、InGa<sub>N</sub> 井戸層 814 上で GaN キャップ層 816 を成長させる。

#### 【0075】

この実施形態例では、説明を明確にするために、図 8 には 1 つの緑色発光量子井戸構造のみを示している。当業者であれば、量子井戸構造 810 を成長させるための処理ステップを、例えば 3 ~ 5 回繰り返して MQW 構造を形成できることを理解するであろう。

#### 【0076】

緑色発光量子井戸構造 810 を形成した後、緑色発光量子井戸構造 810 上で p - GaN コンタクト構造 818 を成長させる。p - GaN コンタクト構造 818 を成長させるための処理ステップは、図 4 に関する p - GaN コンタクト構造 424 を成長させるための処理ステップと実質的に同じである。p - GaN コンタクト構造 818 を形成した後、p - GaN コンタクト構造 818 上で GaN キャップ層 820 を成長させる。GaN キャップ層 820 が成長した後、GaN キャップ層 820 上に青色発光量子井戸構造 822 を形成させる。

#### 【0077】

青色発光量子井戸構造 822 を形成するための処理ステップは、図 4 に関する青色発光量子井戸構造 410 を形成するための処理ステップと実質的に同じである。この実施形態例では、説明を明確にするために、図 8 には 1 つの青色発光量子井戸構造のみを示している。当業者であれば、青色量子井戸構造 822 を成長させるための処理ステップを例えば

10

20

30

40

50

3～5回繰り返してMQW構造を形成できることを理解するであろう。

【0078】

或いは、最初に青色発光量子井戸構造822を成長させ、これに緑色発光量子井戸構造810を続けることもできる。

【0079】

この実施形態では、青色発光量子井戸構造822を形成した後、青色発光量子井戸構造822上で別のp-GaNコンタクト構造824を成長させる。p-GaNコンタクト構造824を成長させるための処理ステップは、図4に関するp-GaNコンタクト構造424を成長させるための処理ステップと実質的に同じである。p-GaNコンタクト構造824を形成した後、p-GaNコンタクト構造824上でGaNキャップ層826を成長させる。GaNキャップ層826が成長した後、GaNキャップ層826上に赤色発光量子井戸構造828が形成される。

10

【0080】

赤色発光量子井戸構造828を形成するための処理ステップは、図1に関する赤色発光量子井戸構造122を形成するための処理ステップと実質的に同じである。この実施形態では、説明を明確にするために、図8には1つの赤色発光量子井戸構造のみを示している。当業者であれば、赤色量子井戸構造828を成長させるための処理ステップを例えば3～5回反復してMQW構造を形成できることを理解するであろう（図1のMQW構造126を比較）。

【0081】

20

図9は、上述の実施形態例のLED構造800の電気コンタクトの形成を示す概略図である。GaN層808の上にある層が誘導結合型プラズマエッチング(ICP)を使用してエッチングされる。層808のエッチングに続き、p-GaNコンタクト構造818及びp-GaNコンタクト構造824の上にある層がICPを使用して順番にエッチングされる。GaN層808上にn-コンタクト902が形成され、p-GaNコンタクト構造818上にp-コンタクト904が形成され、p-GaNコンタクト構造824上にp-コンタクト906が形成される。緑色発光量子井戸構造810が、コンタクト902とコンタクト904との間のp-n接合を使用して活性化されるのに対し、青色発光量子井戸構造822は、コンタクト902とコンタクト906との間のp-n接合を使用して活性化される。赤色発光量子井戸構造828は、緑色及び青色発光量子井戸構造810、822からそれぞれ発光される青色/緑色光の吸収に基づいて活性化される。従って、この実施形態例では、赤色発光量子井戸構造828を活性化するための独立したp-n接合は存在しない。

30

【0082】

上述の実施形態例では、緑色及び青色発光量子井戸構造810、822に様々な注入電流を供給することができるので、LED構造800は調節可能な白色光を提供することができる。当業者であれば、吸収可能な青色/緑色光の量に基づいて、赤色発光量子井戸構造828を間接的に「調節可能」にできることを理解するであろう。

【0083】

上述の実施形態例は、より長い波長領域における発光を実現するためにインジウムリッチなInGaN量子ドットを利用してインジウムの取入れを促進する単色の黄色、橙色及び/又は赤色LEDを提供することができる。

40

【0084】

図10は、黄色LED構造（図3(a)を参照）及び白色LED構造（図4を参照）から得たI-V計測値を示す電流(I)対電圧(V)のグラフである。プロット1002は黄色LED構造から得た計測値に基づき、プロット1004は白色LED構造から得た計測値に基づく。それぞれのLED構造が安定した従来のダイオード特性を示すことがプロット1002、1004から観察できる。

【0085】

図11は、図4に関する白色LED構造400の表面モルフォロジーを示す走査電子顕

50



微鏡 (SEM) 画像 1102 である。画像 1102 に示すように、p-InGa<sub>N</sub>コンタクト構造 430 (図 4) の p-InGa<sub>N</sub>層は多孔質様の表面を有し、これが散乱効果を与えることにより、410、428などの量子井戸構造 (図 4) からの光抽出を促進する。

【0086】

図 12 は、図 7 に関する白色 LED 構造 700 の表面モルフォロジーを示す走査電子顕微鏡 (SEM) 画像 1202 である。画像 1202 は、Ni/Au コンタクトパッド 1204 として p-コンタクトを、Ti/Al コンタクトパッド 1208 として n-コンタクトを示している。

【0087】

図 13 は、図 12 の画像 1202 を拡大した走査電子顕微鏡 (SEM) 画像 1302 である。画像 1302 に示すように、p-コンタクトは 1304 のような Ni/Au 金属ストライプの形であり、1304 のようなストライプの間に赤色/黄色発光量子井戸構造の表面 1306 が見える。

【0088】

図 14 は、図 12 及び図 13 のサンプル白色 LED 構造のエレクトロルミネセンススペクトルを示す強度対波長のグラフ 1402 である。グラフ 1402 は、約 456 nm で発光ピーク 1404 を示す。発光 1408 の発光ピーク 1404 は、青色/緑色発光量子井戸構造により生み出される。グラフ 1402 はまた、幅広かつ低強度の発光 1406 も示す。発光 1406 は、赤色/黄色発光量子井戸構造により生み出される。当業者であれば、赤色/黄色発光量子井戸構造は、青色/緑色発光量子井戸構造から発光される青色光の吸収に基づいて活性化されるので、青色発光 1408 よりも赤色/黄色発光 1406 の方が強度が低いことを理解するであろう。

【0089】

図 15 は、図 12 及び図 13 のサンプル白色 LED 構造から得た I-V 計測値を示す電流 (I) 対電圧 (V) のグラフ 1502 である。白色 LED 構造が、約 3 V のターンオン電圧と約 5 V で約 60 mA の電流とを有する良好な I-V 特性を示すことがグラフ 1502 から観察できる。

【0090】

図 16 は、発光ダイオードのための MQW 構造を作製する方法を示すフロー図である。ステップ 1602 において、複数の量子井戸構造が形成される。個々の量子井戸構造は、バリア層と、バリア層上に形成され量子ドットナノ構造を組み込んだ井戸層とを含み、バリア層及び井戸層は第 1 の金属窒化物ベースの材料を含む。ステップ 1604 において、量子井戸構造の少なくとも 1 つが井戸層上にキャッピング層をさらに含むように形成され、キャッピング層は第 1 の金属窒化物ベースの材料と比較して異なる金属成分を有する第 2 の金属窒化物ベースの材料を含む。

【0091】

図 17 は、発光ダイオード構造を作製する方法を示すフロー図である。ステップ 1702 において、赤色/黄色発光多重量子井戸 (MQW) 構造が形成される。赤色/黄色発光 MQW の個々の量子井戸構造は、バリア層と、バリア層上に形成され量子ドットナノ構造を組み込んだ井戸層とを含み、バリア層及び井戸層は第 1 の金属窒化物ベースの材料を含む。ステップ 1704 において、赤色/黄色発光 MQW の量子井戸構造の少なくとも 1 つが井戸層上にキャッピング層をさらに含むように形成され、キャッピング層は第 1 の金属窒化物ベースの材料と比較して異なる金属成分を有する第 2 の金属窒化物ベースの材料を含む。ステップ 1706 において、発光ダイオード構造から白色光を発光するために赤色/黄色発光 MQW と一体に青色発光 MQW 構造が形成される。

【0092】

図 18 は、発光ダイオードを作製する別の方法を示すフロー図である。ステップ 1802 において、赤色/黄色発光多重量子井戸 (MQW) 構造が形成される。赤色/黄色発光 MQW の個々の量子井戸構造は、バリア層と、バリア層上に形成され量子ドットナノ構造

10

20

30

40

50

を組み込んだ井戸層とを含み、バリア層及び井戸層は第1の金属窒化物ベースの材料を含む。ステップ1804において、赤色／黄色発光MQWの量子井戸構造の少なくとも1つが井戸層上にキャッピング層をさらに含むように形成され、キャッピング層は第1の金属窒化物ベースの材料と比較して異なる金属成分を有する第2の金属窒化物ベースの材料を含む。ステップ1806において、青色発光MQW構造が赤色／黄色発光MQWと一体に形成される。ステップ1808において、発光ダイオード構造から白色光を発光するために赤色／黄色発光MQW及び青色発光MQW構造と一体に緑色発光MQW構造が形成される。

#### 【0093】

上述の実施形態では、井戸層に組み込まれたInリッチなInGaN量子ドット又はナノ構造を使用して、赤色、琥珀色及び／又は黄色光を生成する。高温の原位置アニーリング中などにおけるGaNバリアへの外部拡散を防止するために、個々の活性量子井戸層は薄いAlN層により封入される。白色光を生成するために、異なる色のMQWの組み合わせを単一のLED構造内に組み入れることができる。従って、説明した実施形態例のデバイスを作動させるために複雑な回路を使用する必要性をなくすることができる。さらに、蛍光体を使用しないので作製技術を単純化することができ、この実施形態例により、通常のRGB LEDの場合のような蛍光体の劣化、及び異なる材料ベースのLEDの異なる劣化作用の問題を解決することができる。説明した実施形態例はまた、LEDチップ上の蛍光体の外部コーティングの使用を排除することもできる。また、説明した実施形態例におけるInリッチなInGaN量子ドットの取入れが、再結合効率をさらに高めるとともに、高温作動時などにおけるより良好な安定性を提供することができる。

#### 【0094】

さらに、個々の量子井戸構造から青色、緑色及び赤色という個々の原色の発光を行うことができる説明した実施形態例では、ドットサイズ及びIn組成を制御することにより、例えば「冷」白色、「リンゴ」白色又は「暖」白色などの異なる品質の白色を得ることができる。

#### 【0095】

背景技術の項で説明したように、GaN LEDの生産は、主にInGaN層内の高インジウム取り入れを得ることが困難であることに起因して実際的に困難である。通常これは、インジウムの固体非混和性及び高温での分解に起因して生じる。上述の実施形態例では、TMバーストステップ中のインジウムの取入れを促進するために薄いInGaN湿潤層を使用する。これにより、発光波長を赤色波長領域内に押しこむことが判明しているインジウムリッチなInGaN量子ドットの形成を促進することができる。例えば、より長い波長領域などにおいて単色の発光色を得るために、Inリッチな量子ドット及びInGaN井戸の成長中の温度は安定した状態に保たれる。この温度の変動は、電圧バイアスが印加された際に波長のわずかな変化につながる可能性がある。さらに、温度に関しては、p-GaN層を約900の温度で成長させた場合、形成されたインジウムリッチなInGaN量子ドットが、通常、井戸層内などに拡散するとともにバリア層内にも拡散する。説明した実施形態例では、p-InGaN層の成長中、温度が約750～約800に下げられる。約800～850での原位置アニーリングが、量子ドット内のインジウムの拡散により発光波長をシフトさせる可能性があることを理解できよう。従って、説明した実施形態例では、AlN層を使用することにより、p-InGaN層の成長中、高温におけるその他の層の成長中、及び／又は約800～850での原位置アニーリング中におけるインジウムの量子ドットからの外部拡散を防ぐことができる。また、説明した実施形態例は、GaN LEDから原色の発光を得ることができ、これが固体照明のためのより良好な白色光の演色を可能にすることができる。

#### 【0096】

上述した実施形態例を使用して、看板及びディスプレイの照明、キーパッド導光、デジタルカメラのフラッシュ光、PCモニタのバックライト、演色、固体照明を含む照明及び表示目的、及び自動車のテールライト及び交通信号灯などの数多くの用途にInGaN量

10

20

30

40

50

子ドットLEDを使用することができる。

【0097】

当業者であれば、従来の有機LED(OLED)は、黄色、橙色及び赤色によるフレキシブルディスプレイを提供することができるが、通常LEDは、光束及びルミネセンス効率に関してはこの実施形態例のような無機LEDに劣ることを理解するであろう。

【0098】

当業者であれば、広範にわたって説明した本発明の思想及び範囲から逸脱することなく、特定の実施形態の形で示した本発明に対して数多くの変更及び/又は修正を行うことができることを理解するであろう。従ってあらゆる点において、本実施形態は限定的なものではなく例示的なものであると見なすべきである。

10

【図1】

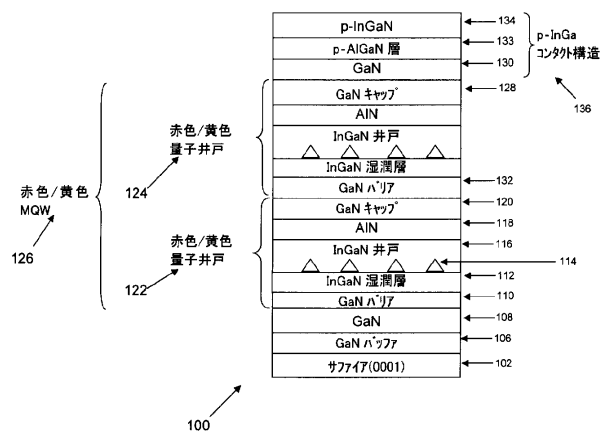


Figure 1

【図2】

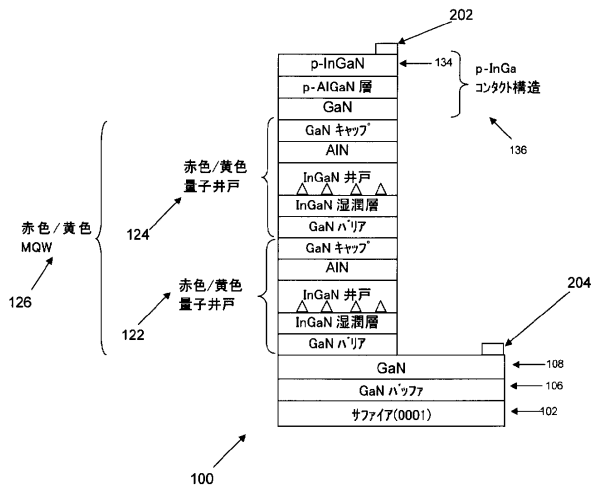


Figure 2

【図 3 ( a ) 】

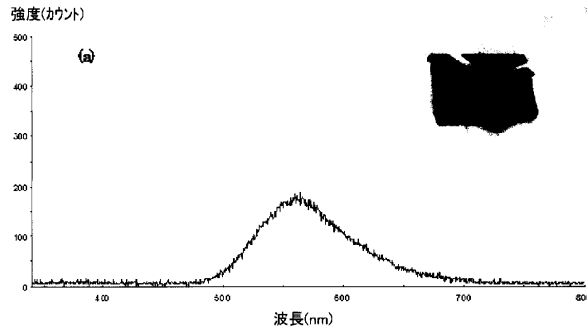


Figure 3(a)

【図 3 ( c ) 】

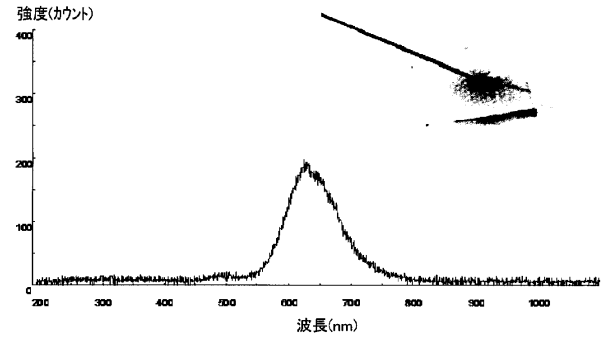


Figure 3(c)

【図 3 ( b ) 】

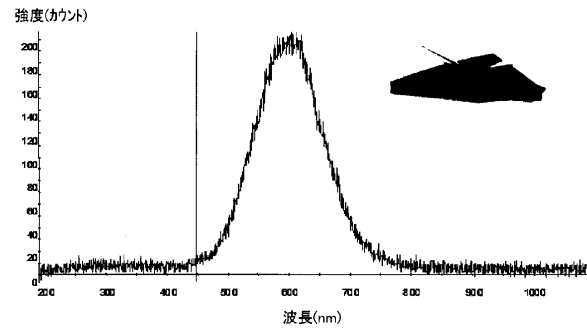


Figure 3(b)

【図 4 】

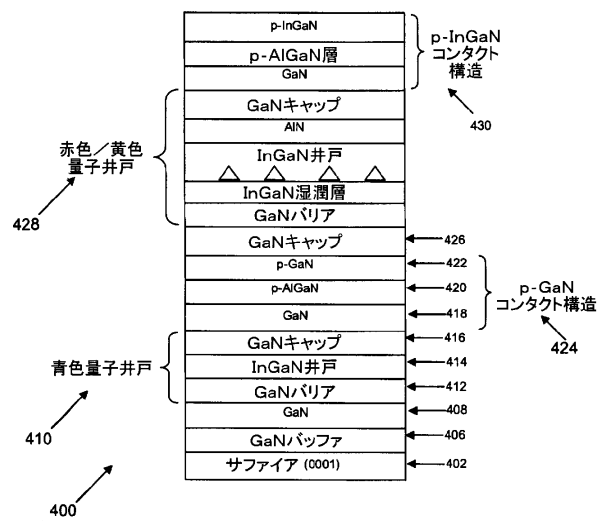


Figure 4

【図 5 】

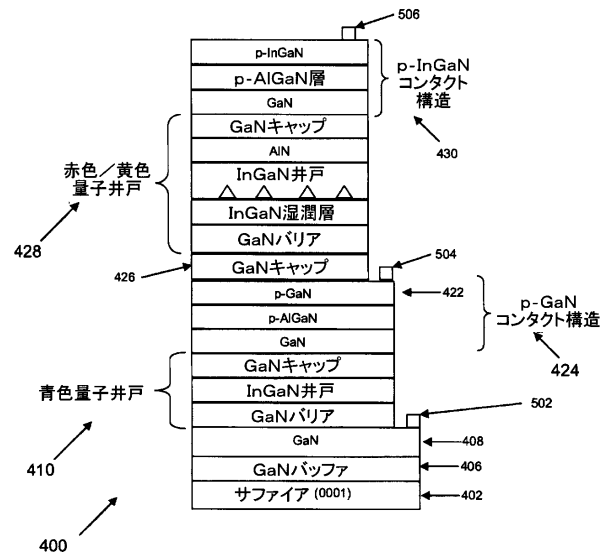


Figure 5

【図 6】

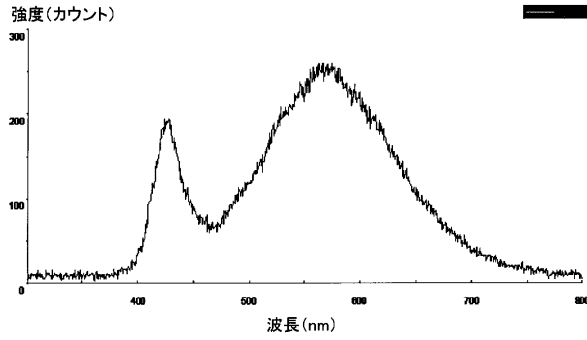


Figure 6

【図 7】

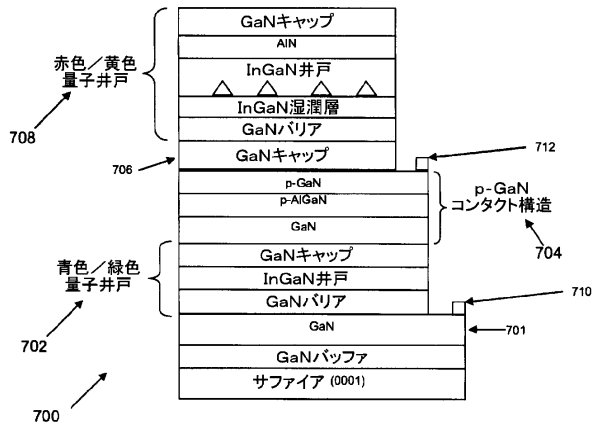


Figure 7

【図 8】

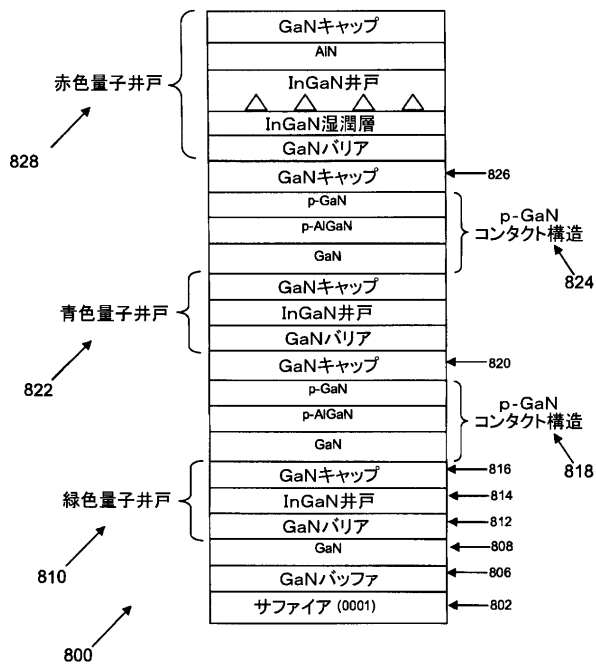


Figure 8

【図 9】

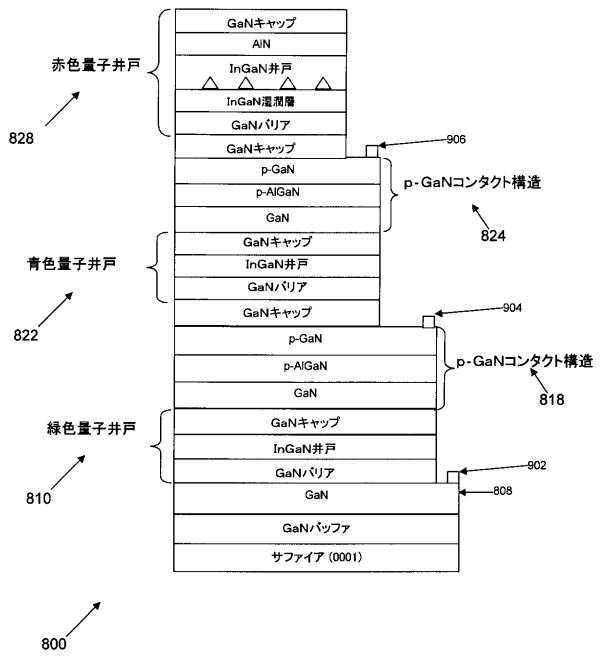


Figure 9

【図 10】

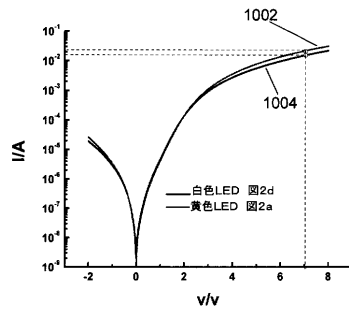


Figure 10

【図 11】

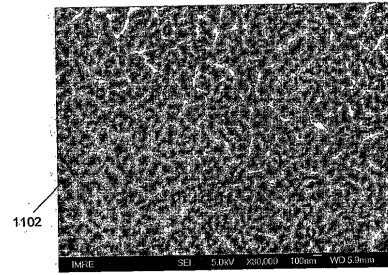


Figure 11

【図 12】

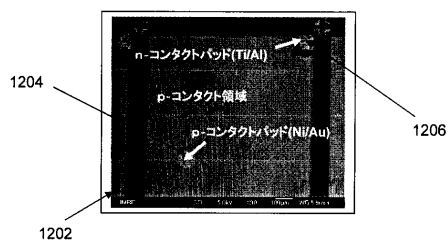


Figure 12

【図 13】

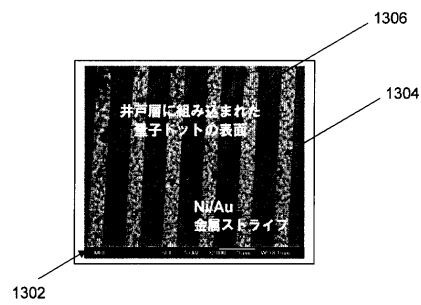


Figure 13

【図 14】

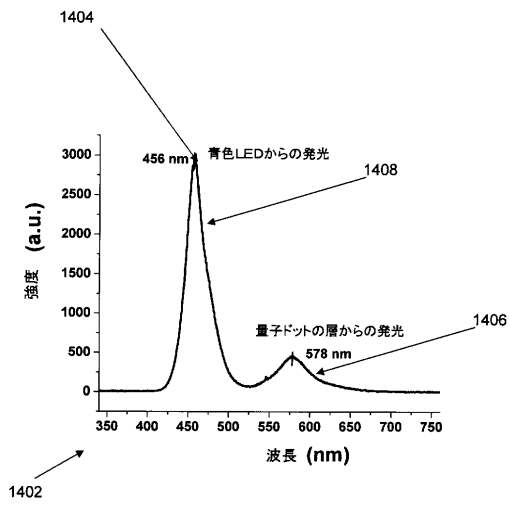


Figure 14

【図 15】

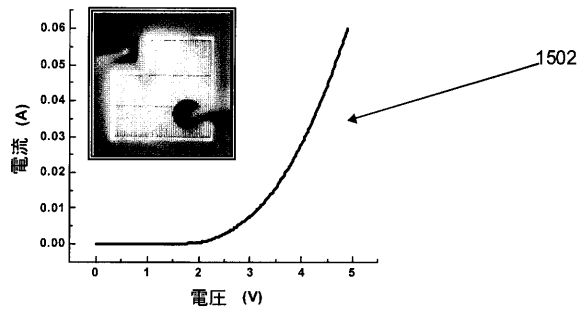


Figure 15

【図 16】

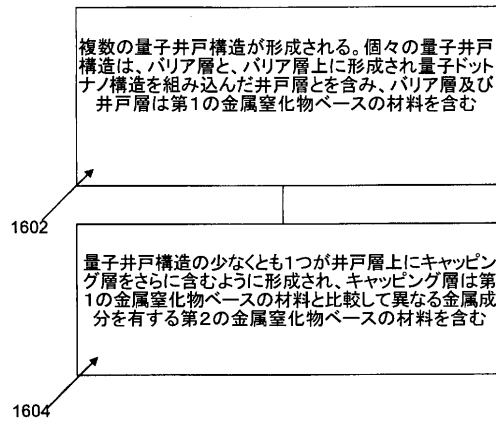


Figure 16

【図 17】

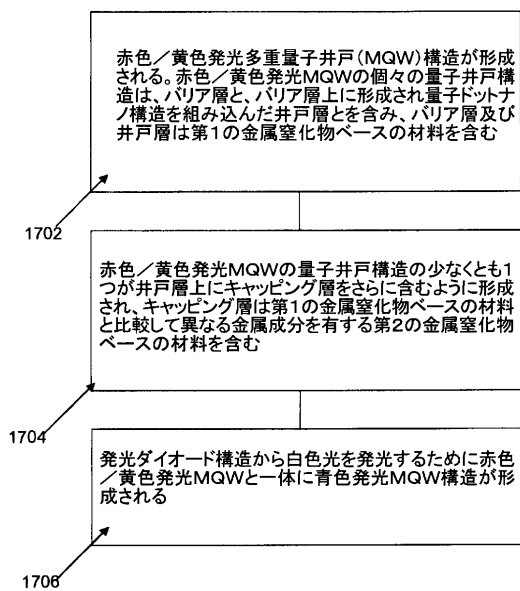


Figure 17

【図 18】

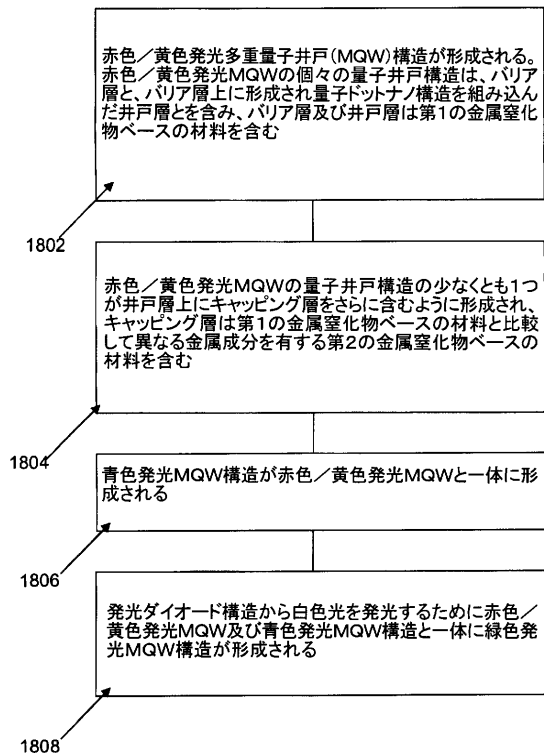


Figure 18

## フロントページの続き

(74)代理人 100109070

弁理士 須田 洋之

(74)代理人 100109335

弁理士 上杉 浩

(72)発明者 ソウ チュウ ベン

シンガポール 1 1 7 6 0 2 シンガポール リサーチ リンク 3 インスティテュート オブ  
マテリアルズ リサーチ アンド エンジニアリング内

(72)発明者 チュア ソー ジン

シンガポール 1 1 7 6 0 2 シンガポール リサーチ リンク 3 インスティテュート オブ  
マテリアルズ リサーチ アンド エンジニアリング内

(72)発明者 リウ ウェイ

シンガポール 1 1 7 6 0 2 シンガポール リサーチ リンク 3 インスティテュート オブ  
マテリアルズ リサーチ アンド エンジニアリング内

(72)発明者 テン ジン ファ

シンガポール 1 1 7 6 0 2 シンガポール リサーチ リンク 3 インスティテュート オブ  
マテリアルズ リサーチ アンド エンジニアリング内

審査官 村井 友和

(56)参考文献 国際公開第2004/042832(WO, A1)

米国特許出願公開第2004/0023427(US, A1)

特開平11-330552(JP, A)

特開平06-053549(JP, A)

特開2007-157765(JP, A)

国際公開第2007/104884(WO, A1)

国際公開第2006/023060(WO, A1)

国際公開第2006/112167(WO, A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 33/00-33/64