



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

非極性面または半極性面を成長主面とする III 族窒化物半導体からなる半導体レーザダイオード構造を有する半導体レーザ素子であって、

前記半導体レーザダイオード構造が、

p 型クラッド層および n 型クラッド層と、

前記 p 型クラッド層および n 型クラッド層に挟まれた p 型ガイド層および n 型ガイド層と、

前記 p 型ガイド層および n 型ガイド層に挟まれ、In を含む活性層とを備え、

前記 p 型ガイド層および n 型ガイド層は、それぞれ、前記活性層に近づくほど In 組成が大きくなっている、半導体レーザ素子。

10

## 【請求項 2】

前記 p 型ガイド層および n 型ガイド層は、それぞれ複数の  $In_xGa_{1-x}N$  層 ( $0 < x < 1$ ) を有しており、前記複数の  $In_xGa_{1-x}N$  層は、前記活性層に近いほど In 組成が大きくなる順序で積層されている、請求項 1 記載の半導体レーザ素子。

## 【請求項 3】

前記複数の  $In_xGa_{1-x}N$  層の少なくとも一層は、InGa<sub>N</sub> 超格子で構成されており、前記 InGa<sub>N</sub> 超格子の構成素層の膜厚の比率を調整することによって、平均 In 組成が変調されている、請求項 2 記載の半導体レーザ素子。

20

## 【請求項 4】

前記 p 型ガイド層の全層厚途中に、p 型 AlGa<sub>N</sub> 電子ブロック層が介装されている、請求項 1 ~ 3 のいずれか一項に記載の半導体レーザ素子。

## 【請求項 5】

前記活性層から前記 p 型 AlGa<sub>N</sub> 電子ブロック層までの距離が 40 nm 以上である、請求項 4 記載の半導体レーザ素子。

## 【請求項 6】

前記活性層から前記 p 型 AlGa<sub>N</sub> 電子ブロック層までの距離が 40 nm 以上 100 nm 以下である、請求項 4 記載の半導体レーザ素子。

## 【発明の詳細な説明】

30

## 【技術分野】

## 【0001】

この発明は、III 族窒化物半導体からなる半導体レーザダイオード構造を有する半導体レーザ素子に関する。

## 【背景技術】

## 【0002】

III 族窒化物半導体とは、III-V 族半導体において V 族元素として窒素を用いた半導体である。窒化アルミニウム (AlN)、窒化ガリウム (GaN)、窒化インジウム (InN) が代表例である。一般には、 $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$  ( $0 < x < 1, 0 < y < 1, 0 < x + y < 1$ ) と表わすことができる。

40

青紫色といった短波長のレーザ光源は、DVD に代表される光ディスクへの高密度記録、画像処理、医療機器、計測機器などの分野で活用されるようになってきている。このような短波長レーザ光源は、たとえば、GaN 半導体を用いたレーザダイオードで構成されている。

## 【0003】

GaN 半導体レーザダイオードは、c 面を主面とする窒化ガリウム (GaN) 基板に III 族窒化物半導体を有機金属気相成長法 (MOVPE: Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy) によって成長させて製造される。より具体的には、GaN 基板に、有機金属気相成長法によって、n 型 GaN コンタクト層、n 型 AlGa<sub>N</sub> クラッド層、n 型 GaN ガイド層、活性層 (発光層)、p 型 GaN ガイド層、p 型 AlGa<sub>N</sub> クラッド層、p 型 GaN

50

コンタクト層が順に成長させられ、これらの半導体層からなる半導体積層構造が形成される。活性層では、n型層から注入される電子とp型層から注入される正孔との再結合による発光が生じる。その光は、n型AlGaInクラッド層およびp型AlGaInクラッド層の間に閉じ込められ、半導体積層構造の積層方向と垂直な方向に伝搬する。その伝搬方向の両端に共振器端面が形成されており、この一对の共振器端面間で、誘導放出を繰り返しながら光が共振増幅され、その一部がレーザ光として共振器端面から出射される。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2006-135221号公報

10

【特許文献2】特開平11-54794号公報

【特許文献3】特開2005-235830号公報

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献1】T. Takeuchi et al., Jap. J. Appl. Phys. 39, 413-416, 2000

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

半導体レーザダイオードの重要な特性の一つは、レーザ発振を生じさせるための閾値電流（発振閾値）である。この閾値電流が低いほど、エネルギー効率の良いレーザ発振が可能になる。

20

ところが、c面を主面として成長された活性層から生じる光はランダム偏光であるため、TEモードの発振に寄与する光の割合が少ない。そのため、レーザ発振の効率が必ずしもよくなく、閾値電流を低減するうえで、改善の余地がある。

【0007】

そこで、m面等の非極性面を主面とするレーザダイオードが提案されている。たとえば、m面を結晶成長主面とするIII族窒化物半導体積層構造でレーザダイオードを作製すると、活性層は、m面に平行な偏光成分（より具体的にはa軸方向の偏光成分）を多く含む光を発生する。これにより、活性層で生じた光のうち、多くの割合をレーザ発振に寄与させることができるので、レーザ発振の効率が良くなり、閾値電流を低減することができる。

30

【0008】

その他、活性層が量子井戸構造（より具体的にはInを含むもの）からなる場合に、量子井戸での自発圧電分極によるキャリアの分離が抑制されるので、これによっても、発光効率が増加する。さらに、m面を結晶成長の主面とすることで、結晶成長を極めて安定に行うことができ、c面やその他の結晶面を結晶成長の主面とする場合に比較して、結晶性を向上することができる。その結果、高性能のレーザダイオードの作製が可能になる。

【0009】

一方、発光波長を450nm以上の長波長とするには、量子井戸層のIn組成を増大させる必要がある。また、光閉じ込めのための屈折率差を確保するために、ガイド層にはInGaIn層を適用する必要がある。

40

ところが、m面GaIn層上にInGaIn量子井戸層およびInGaInガイド層をコヒーレントに成長させると、これらの層には、面内異方性圧縮応力が働く。より具体的には、c軸に垂直な方向、すなわち、a軸方向に沿って比較的大きな圧縮応力が生じる。これは、InGaInのa軸格子定数が、GaInのa軸格子定数よりも大きいからである。そのため、InGaIn量子井戸層またはInGaInガイド層のIn組成や膜厚を大きくしたりすると、a面に沿って結晶欠陥が生じる。この結晶欠陥は、蛍光顕微鏡により観察したときに、a面に平行なダークラインとして観察される。したがって、非発光性の欠陥であると考えられる。この非発光性の欠陥を抑制することができれば、さらに発光効率を高めることができると思われる。

50

## 【0010】

光閉じ込めのための屈折率差を確保するために、AlGa<sub>N</sub>クラッド層のAl組成を大きくすることが考えられる。しかし、この場合には、結晶にクラックが発生し、このクラックに起因する電流リークのために、動作可能な半導体レーザを作製することができない。

他の非極性面であるa面や半極性面を成長主面としたIII族窒化物半導体を用いるレーザ素子についても、同様の課題がある。

## 【0011】

そこで、この発明の目的は、非極性面または半極性面を成長主面としたIII族窒化物半導体を用いて、低閾値電流で、かつ発光効率が高い半導体レーザ素子を提供することである。

10

## 【課題を解決するための手段】

## 【0012】

この発明は、非極性面または半極性面を成長主面とするIII族窒化物半導体からなる半導体レーザダイオード構造を有する半導体レーザ素子である。前記半導体レーザダイオード構造は、p型クラッド層およびn型クラッド層と、前記p型クラッド層およびn型クラッド層に挟まれたp型ガイド層およびn型ガイド層と、前記p型ガイド層およびn型ガイド層に挟まれ、Inを含む活性層とを備え、前記p型ガイド層およびn型ガイド層は、それぞれ、前記活性層に近づくほどIn組成が大きくなっている。

## 【0013】

20

この構成によれば、ガイド層は、活性層（発光層）に近いほどIn組成が高いため、良好な光閉じ込め効果を得ることができる。すなわち、ガイド層の層厚を厚くしたり、その全体のIn組成を高くしたりする必要がない。また、クラッド層をたとえばAlGa<sub>N</sub>で構成する場合に、そのAl組成を過度に高める必要もない。その一方で、活性層から離れるほどIn組成が低くなるので、たとえばGa<sub>N</sub>層上にIII族窒化物半導体からなるレーザダイオード構造を形成する際の格子不整合が緩和される。そのため、格子不整合に起因する欠陥を抑制できるから、レーザダイオード構造は、優れた結晶性を有することができる。これにより、非極性面または半極性面を主面とするIII族窒化物半導体を用いることで低閾値電流を実現しつつ、かつ、優れた発光効率を得られる半導体レーザ素子を実現できる。

30

## 【0014】

ガイド層は活性層に近づくに従って連続的にIn組成が減少する構成であってもよいが、前記p型ガイド層およびn型ガイド層が、それぞれ複数のIn<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N層（0 < x < 1）を有しており、前記複数のIn<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N層は、前記活性層に近いほどIn組成が大きくなる順序で積層されていてもよい。この場合は、活性層に近づくに従って段階的にIn組成が増大することになる。

## 【0015】

上記の構成において、前記複数のIn<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N層の少なくとも一層が、InGa<sub>N</sub>超格子で構成されており、前記InGa<sub>N</sub>超格子の構成素層の膜厚の比率を調整することによって、平均In組成が変調されていてもよい。より具体的には、ガイド層を構成する複数のIn<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N層は、In組成の大きな第1In<sub>x1</sub>Ga<sub>1-x1</sub>N層とIn組成の小さな第2In<sub>x2</sub>Ga<sub>1-x2</sub>N層（0 < x<sub>2</sub> < x<sub>1</sub> < 1）とを所定の周期厚で繰り返し積層した超格子で構成することができる。この場合に、第1In<sub>x1</sub>Ga<sub>1-x1</sub>N層および第2In<sub>x2</sub>Ga<sub>1-x2</sub>N層の層厚比率を変化させることによって、超格子全体の平均InGa<sub>N</sub>組成を変調することができる。

40

## 【0016】

また、上記の構成において、前記p型ガイド層の全層厚途中に、p型AlGa<sub>N</sub>電子ブロック層が介装されていてもよい。

p型AlGa<sub>N</sub>電子ブロック層は、キャリアのオーバーフローを防ぐ。p型AlGa<sub>N</sub>電子ブロック層は、屈折率が小さいので、活性層の近傍に位置していると、光閉じ込めを

50

弱めるおそれがある。そこで、この発明では、p型AlGaIn電子ブロック層がp型ガイド層の全層厚途中に介装されている。これにより、活性層から離隔した位置にp型AlGaIn電子ブロック層を配置できるから、光閉じ込めを強化することができる。これにより、発光効率を一層高めることができる。

【0017】

さらに、上記の構成において、前記活性層から前記p型AlGaIn電子ブロック層までの距離が40nm以上であってもよい。

活性層から40nm以上離してp型AlGaIn電子ブロック層を配置することによって、十分な光閉じ込め効果を得ることができ、光強度のプロファイルに対するp型AlGaIn電子ブロック層の影響を十分に抑制できる。これにより、発光効率が高い半導体レーザー素子を実現できる。

10

【0018】

また、上記の構成において、前記活性層から前記p型AlGaIn電子ブロック層までの距離が40nm以上100nm以下であってもよい。

p型AlGaIn電子ブロック層を活性層から40nm~100nmの距離範囲に配置することで、前述の効果に加えて、十分に高い光強度を得ることができる。すなわち、p型AlGaIn電子ブロック層の働きによるキャリア閉じ込め効果を十分に得ることができるので、光強度のプロファイルが十分に急峻な形状を有する。これにより、光閉じ込めおよびキャリア閉じ込めを良好に行える結果、発光効率の向上に寄与できる。

20

【図面の簡単な説明】

【0019】

【図1】この発明の一実施形態に係る半導体レーザーダイオードの構成を説明するための斜視図である。

【図2】図1のII-II線に沿う縦断面図である。

【図3】図1のIII-III線に沿う横断面図である。

【図4】前記半導体レーザーダイオードの活性層の構成を説明するための図解的な断面図である。

【図5】共振器端面に形成された絶縁膜（反射膜）の構成を説明するための図解図である。

30

【図6】III族窒化物半導体の結晶構造のユニットセルを表した図解図である。

【図7】III族窒化物半導体積層構造を構成する各層の組成例を示す図である。

【図8】III族窒化物半導体積層構造を構成する各層の他の組成例を示す図である。

【図9】図9Aは図7の構成における各層の屈折率を図解的に示す図であり、図9Bは図8の構成における各層の屈折率を図解的に示す図である。

【図10】III族窒化物半導体積層構造を構成する各層のさらに他の組成例を示す図である。

【図11-1】図11A~図11Dは、図7の構成に対する光強度のシミュレーション結果を示す図である。

【図11-2】図11E~図11Hは、図7の構成に対する光強度のシミュレーション結果を示す図である。

40

【図12-1】図12A~図12Dは、図7の構成に対する光強度の別のシミュレーション結果を示す図である。

【図12-2】図12E~図12Hは、図7の構成に対する光強度の別のシミュレーション結果を示す図である。

【図13-1】図13A~図13Cは、図7の構成に対する光強度のさらに別のシミュレーション結果を示す図である。

【図13-2】図13D~図13Gは、図7の構成に対する光強度のさらに別のシミュレーション結果を示す図である。

【図14】III族窒化物半導体積層構造2を構成する各層を成長させるための処理装置の構成を説明するための図解図である。

50

## 【発明を実施するための形態】

## 【0020】

以下では、この発明の実施の形態を、添付図面を参照して詳細に説明する。

図1は、この発明の一実施形態に係る半導体レーザダイオードの構成を説明するための斜視図であり、図2は、図1のII-II線に沿う縦断面図であり、図3は、図1のIII-III線に沿う横断面図である。

この半導体レーザダイオード70は、基板1と、基板1上に結晶成長によって形成されたIII族窒化物半導体積層構造2と、基板1の裏面（III族窒化物半導体積層構造2と反対側の表面）に接触するように形成されたn型電極3と、III族窒化物半導体積層構造2の表面に接触するように形成されたp型電極4とを備えたファブリペロー型のものである。

## 【0021】

基板1は、この実施形態では、GaN単結晶基板で構成されている。この基板1は、非極性面の一つであるm面を主面としたものであり、この主面上における結晶成長によって、III族窒化物半導体積層構造2が形成されている。したがって、III族窒化物半導体積層構造2は、m面を結晶成長主面とするIII族窒化物半導体からなる。

III族窒化物半導体積層構造2を形成する各層は、基板1に対してコヒーレントに成長されている。コヒーレントな成長とは、下地層からの格子の連続性を保った状態での結晶成長をいう。下地層との格子不整合は、結晶成長される層の格子の歪みによって吸収され、下地層との界面での格子の連続性が保たれる。無歪みの状態でのInGaNのa軸格子定数はGaNのa軸格子定数よりも大きいので、InGaN層にはa軸方向への圧縮応力（圧縮歪み）が生じる。

## 【0022】

III族窒化物半導体積層構造2は、活性層（発光層）10と、n型半導体層11と、p型半導体層12とを備えている。n型半導体層11は活性層10に対して基板1側に配置されており、p型半導体層12は活性層10に対してp型電極4側に配置されている。こうして、活性層10が、n型半導体層11およびp型半導体層12によって挟持されていて、ダブルヘテロ接合が形成されている。活性層10には、n型半導体層11から電子が注入され、p型半導体層12から正孔が注入される。これらが活性層10で再結合することにより、光が発生するようになっている。

## 【0023】

n型半導体層11は、基板1側から順に、n型GaNコンタクト層13（たとえば2μm厚）、n型AlGaNクラッド層14（1.5μm厚以下。たとえば1.0μm厚）およびn型ガイド層15（たとえば総厚0.1μm）を積層して構成されている。一方、p型半導体層12は、活性層10の上に、p型ガイド層16（たとえば総厚0.1μm）、p型AlGaN電子ブロック層17（たとえば20nm厚）、p型AlGaNクラッド層18（1.5μm厚以下。たとえば0.4μm厚）およびp型GaNコンタクト層19（たとえば0.3μm厚）を積層して構成されている。p型AlGaN電子ブロック層17は、p型ガイド層16の全層厚途中に介装されている。換言すれば、p型ガイド層16は、p型AlGaN電子ブロック層17を挟んで、活性層10に近い内側部分と、p型AlGaNクラッド層18に近い外側部分とに分割されている。

## 【0024】

n型GaNコンタクト層13は低抵抗層である。p型GaNコンタクト層19は、p型電極4とのオーミックコンタクトをとるための低抵抗層である。n型GaNコンタクト層13は、GaNにたとえばn型ドーパントとしてのSiを高濃度にドーブ（ドーピング濃度は、たとえば、 $3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ）することによってn型半導体とされている。また、p型GaNコンタクト層19は、p型ドーパントとしてのMgを高濃度にドーブ（ドーピング濃度は、たとえば、 $3 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ）することによってp型半導体層とされている。

## 【0025】

n型AlGaNクラッド層14およびp型AlGaNクラッド層18は、活性層10からの光をそれらの間に閉じ込める光閉じ込め効果を生じるものである。n型AlGaNク

10

20

30

40

50

ラッド層 14 は、AlGa<sub>N</sub>にたとえば n 型ドーパントとしての Si をドーブ（ドーピング濃度は、たとえば、 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ）することによって n 型半導体とされている。また、p 型 AlGa<sub>N</sub>クラッド層 18 は、p 型ドーパントとしての Mg をドーブ（ドーピング濃度は、たとえば、 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ）することによって p 型半導体層とされている。n 型 AlGa<sub>N</sub>クラッド層 14 は、n 型ガイド層 15 よりもバンドギャップが広く、p 型 AlGa<sub>N</sub>クラッド層 18 は、p 型ガイド層 16 よりもバンドギャップが広い。これにより、良好な閉じ込めを行うことができ、高効率の半導体レーザダイオードを実現できる。

【0026】

活性層 10 の発光波長が 450 nm 以上の長波長域に設定されている場合には、n 型 AlGa<sub>N</sub>クラッド層 14 および p 型 AlGa<sub>N</sub>クラッド層 18 は、Al の平均組成が 5% 以下の AlGa<sub>N</sub>で構成されていることが好ましい。これにより、クラックの発生を抑制できる。クラッド層 14, 18 は、AlGa<sub>N</sub>層と Ga<sub>N</sub>層との超格子構造で構成することもできる。この場合でも、クラッド層 14, 18 全体の Al 平均組成が 5% 以下とされることが好ましい。

10

【0027】

n 型ガイド層 15 および p 型ガイド層 16 は、活性層 10 にキャリア（電子および正孔）を閉じ込めるためのキャリア閉じ込め効果を生じる半導体層であり、かつ、クラッド層 14, 18 とともに、活性層 10 への光閉じ込め構造を形成している。これにより、活性層 10 における電子および正孔の再結合の効率が高められるようになっている。n 型ガイド層 15 は、たとえば n 型ドーパントとしての Si をドーブ（ドーピング濃度は、たとえば、 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ）することにより n 型半導体とされており、p 型ガイド層 16 は、たとえば p 型ドーパントとしての Mg をドーブする（ドーピング濃度は、たとえば、 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ）ことによって p 型半導体とされている。

20

【0028】

p 型 AlGa<sub>N</sub>電子ブロック層 17 は、AlGa<sub>N</sub>に p 型ドーパントとしてのたとえば Mg をドーブ（ドーピング濃度は、たとえば、 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ）して形成された p 型半導体であり、活性層 10 からの電子の流出を防いで、電子および正孔の再結合効率を高めている。

活性層 10 は、たとえば InGa<sub>N</sub>を含む MQW (multiple-quantum well) 構造（多重量子井戸構造）を有しており、電子と正孔とが再結合することにより光が発生し、その発生した光を増幅させるための層である。

30

【0029】

活性層 10 は、この実施形態では、図 4 に示すように、InGa<sub>N</sub>層からなる量子井戸層（たとえば 3 nm 厚）221 と AlGa<sub>N</sub>層からなる障壁層 222 とを交互に複数周期繰り返し積層して構成された多重量子井戸（MQW: Multiple-Quantum Well）構造を有している。この場合に、InGa<sub>N</sub>からなる量子井戸層 221 は、In の組成比が 5% 以上とされることにより、バンドギャップが比較的小さくなり、AlGa<sub>N</sub>からなる障壁層 222 は、バンドギャップが比較的大きくなる。たとえば、量子井戸層 221 と障壁層 222 とは交互に 2 ~ 7 周期繰り返し積層されており、これにより、多重量子井戸構造の活性層 10 が構成されている。発光波長は、量子井戸層 221 のバンドギャップに対応しており、バンドギャップの調整は、インジウム（In）の組成比を調整することによって行うことができる。インジウムの組成比を大きくするほど、バンドギャップが小さくなり、発光波長が大きくなる。この実施形態では、発光波長は、量子井戸層（InGa<sub>N</sub>層）における In の組成を調整することによって、450 nm ~ 550 nm とされている。前記多重量子井戸構造は、In を含む量子井戸層 221 の数が 3 以下とされることが好ましい。

40

【0030】

障壁層 222 は、その膜厚を 3 nm ~ 8 nm（たとえば 7 nm 厚）とする。これにより、活性層 10 まわりの平均屈折率を高くすることができるため、良好な光閉じ込め効果が得られ、低閾値電流を実現できる。たとえば、連続波発振の基準となる 100 mA 以下の

50

閾値電流を実現できる。障壁層 222 の膜厚が 3 nm 未満では、障壁層としての機能が得難く、また、8 nm を超える膜厚では、活性層 10 まわりの光閉じ込め効果が弱くなり、連続波発振が困難になるおそれがある。

#### 【0031】

活性層 10 まわりの平均屈折率をより高くし、光閉じ込めをより強く行うためには、障壁層 222 は、その Al 組成を 5% 以下とすることが好ましい。

図 1 等に示すように、p 型半導体層 12 は、その一部が除去されることによって、リッジストライプ 20 を形成している。より具体的には、p 型コンタクト層 19、p 型 AlGaIn クラッド層 18、および p 型ガイド層 16 の一部がエッチング除去され、横断面視ほぼ台形形状（メサ形）のリッジストライプ 20 が形成されている。このリッジストライプ 20 は、c 軸方向に沿って形成されている。

#### 【0032】

III 族窒化物半導体積層構造 2 は、リッジストライプ 20 の長手方向両端における劈開により形成された一対の端面 21, 22（劈開面）を有している。この一対の端面 21, 22 は、互いに平行であり、いずれも c 軸に垂直である。こうして、n 型ガイド層 15、活性層 10 および p 型ガイド層 16 によって、端面 21, 22 を共振器端面とするフアブリペロー共振器が形成されている。すなわち、活性層 10 で発生した光は、共振器端面 21, 22 の間を往復しながら、誘導放出によって増幅される。そして、増幅された光の一部が、共振器端面 21, 22 からレーザ光として素子外に取り出される。

#### 【0033】

n 型電極 3 および p 型電極 4 は、たとえば Al 金属からなり、それぞれ p 型コンタクト層 19 および基板 1 にオーミック接続されている。p 型電極 4 がリッジストライプ 20 の頂面（ストライプ状の接触領域）の p 型 GaIn コンタクト層 19 だけに接触するように、p 型ガイド層 16、および p 型 AlGaIn クラッド層 18 の露出面を覆う絶縁層 6 が設けられている。これにより、リッジストライプ 20 に電流を集中させることができるので、効率的なレーザ発振が可能になる。また、リッジストライプ 20 の表面は、p 型電極 4 との接触部を除く領域が絶縁層 6 で覆われて保護されているので、横方向の光閉じ込めを緩やかにして制御を容易にすることができるとともに、側面からのリーク電流を防ぐことができる。絶縁層 6 は、屈折率が 1 よりも大きな絶縁材料、たとえば、SiO<sub>2</sub> や ZrO<sub>2</sub> で構成することができる。

#### 【0034】

さらに、リッジストライプ 20 の頂面は m 面となっていて、この m 面に p 型電極 4 が形成されている。そして、n 型電極 3 が形成されている基板 1 の裏面も m 面である。このように、p 型電極 4 および n 型電極 3 のいずれもが m 面に形成されているので、レーザの高出力化や高温動作に十分に耐えられる信頼性を実現できる。

共振器端面 21, 22 は、それぞれ絶縁膜 23, 24（図 1 では図示を省略した。）によって被覆されている。共振器端面 21 は、+c 軸側端面であり、共振器端面 22 は -c 軸側端面である。すなわち、共振器端面 21 の結晶面は +c 面であり、共振器端面 22 の結晶面は -c 面である。-c 面側の絶縁膜 24 は、アルカリに溶けるなど化学的に弱い -c 面を保護する保護膜として機能することができ、半導体レーザダイオード 70 の信頼性の向上に寄与する。

#### 【0035】

図 5 に図解的に示すように、+c 面である共振器端面 21 を被覆するように形成された絶縁膜 23 は、たとえば ZrO<sub>2</sub> の単膜からなる。これに対し、-c 面である共振器端面 22 に形成された絶縁膜 24 は、たとえば SiO<sub>2</sub> 膜と ZrO<sub>2</sub> 膜とを交互に複数回（図 5 の例では 5 回）繰り返し積層した多重反射膜で構成されている。絶縁膜 23 を構成する ZrO<sub>2</sub> の単膜は、その厚さが  $\lambda / 2n_1$ （ただし、 $\lambda$  は活性層 10 の発光波長。n<sub>1</sub> は ZrO<sub>2</sub> の屈折率）とされている。一方、絶縁膜 24 を構成する多重反射膜は、膜厚  $\lambda / 4n_2$ （但し n<sub>2</sub> は SiO<sub>2</sub> の屈折率）の SiO<sub>2</sub> 膜と、膜厚  $\lambda / 4n_1$  の ZrO<sub>2</sub> 膜とを交互に積層した構造となっている。

10

20

30

40

50

## 【0036】

このような構造により、+c軸側端面21における反射率は小さく、-c軸側端面22における反射率が大きくなっている。より具体的には、たとえば、+c軸側端面21の反射率は20%程度とされ、-c軸側端面22における反射率は99.5%程度(ほぼ100%)となる。したがって、+c軸側端面21から、より大きなレーザ出力が出射されることになる。すなわち、この半導体レーザダイオード70では、+c軸側端面21が、レーザ出射端面とされている。

## 【0037】

このような構成によって、n型電極3およびp型電極4を電源に接続し、n型半導体層11およびp型半導体層12から電子および正孔を活性層10に注入することによって、この活性層10内で電子および正孔の再結合を生じさせ、波長450nm~550nmの光を発生させることができる。この光は、共振器端面21,22の間をガイド層15,16に沿って往復しながら、誘導放出によって増幅される。そして、レーザ出射端面である共振器端面21から、より多くのレーザ出力が外部に取り出されることになる。

10

## 【0038】

図6は、III族窒化物半導体の結晶構造のユニットセルを表した図解図である。III族窒化物半導体の結晶構造は、六方晶系で近似することができ、一つのIII族原子に対して4つの窒素原子が結合している。4つの窒素原子は、III族原子を中央に配置した正四面体の4つの頂点に位置している。これらの4つの窒素原子は、一つの窒素原子がIII族原子に対して+c軸方向に位置し、他の3つの窒素原子がIII族原子に対して-c軸側に位置している。このような構造のために、III族窒化物半導体では、分極方向がc軸に沿っている。

20

## 【0039】

c軸は六角柱の軸方向に沿い、このc軸を法線とする面(六角柱の頂面)がc面(0001)である。c面に平行な2つの面でIII族窒化物半導体の結晶を劈開すると、+c軸側の面(+c面)はIII族原子が並んだ結晶面となり、-c軸側の面(-c面)は窒素原子が並んだ結晶面となる。そのため、c面は、+c軸側と-c軸側とで異なる性質を示すので、極性面(Polar Plane)と呼ばれる。

## 【0040】

+c面と-c面とは異なる結晶面であるので、それに応じて、異なる物性を示す。具体的には、+c面は、アルカリに強いなどといった化学反応性に対する耐久性が高く、逆に、-c面は化学的に弱く、たとえば、アルカリに溶けてしまうことが分かっている。

30

一方、六角柱の側面がそれぞれm面(10-10)であり、隣り合わない一对の稜線を通る面がa面(11-20)である。これらは、c面に対して直角な結晶面であり、分極方向に対して直交しているため、極性のない平面、すなわち、非極性面(Nonpolar Plane)である。さらに、c面に対して傾斜している(平行でもなく直角でもない)結晶面は、分極方向に対して斜めに交差しているため、若干の極性のある平面、すなわち、半極性面(Semipolar Plane)である。半極性面の具体例は、(10-1-1)面、(10-1-3)面、(11-22)面などの面である。

## 【0041】

非特許文献1に、c面に対する結晶面の偏角と当該結晶面の法線方向の分極との関係が示されている。この非特許文献1から、(11-24)面、(10-12)面なども分極の少ない結晶面であり、大きな偏光状態の光を取り出すために採用される可能性のある有力な結晶面であると言える。

40

たとえば、m面を主面とするGaN単結晶基板は、c面を主面としたGaN単結晶から切り出して作製することができる。切り出された基板のm面は、たとえば、化学的機械的研磨処理によって研磨され、(0001)方向および(11-20)方向の両方に関する方位誤差が、 $\pm 1^\circ$ 以内(好ましくは $\pm 0.3^\circ$ 以内)とされる。こうして、m面を主面とし、かつ、転位や積層欠陥といった結晶欠陥のないGaN単結晶基板が得られる。このようなGaN単結晶基板の表面には、原子レベルの段差が生じているにすぎない。

50

## 【0042】

このようにして得られるGaN単結晶基板上に、有機金属気相成長法によって、半導体レーザダイオード構造を構成するIII族窒化物半導体積層構造2が成長させられる。

m面を主面とするGaN単結晶基板1上にm面を成長主面とするIII族窒化物半導体積層構造2を成長させてa面に沿う断面を電子顕微鏡（STEM：走査透過電子顕微鏡）で観察すると、III族窒化物半導体積層構造2には、転位の存在を表す条線が見られない。そして、表面状態を光学顕微鏡で観察すると、c軸方向への平坦性（最後部と最低部との高さの差）は10以下であることが分かる。このことは、活性層10、とくに量子井戸層のc軸方向への平坦性が10以下であることを意味し、発光スペクトルの半値幅を低くすることができる。

10

## 【0043】

このように、無転位でかつ積層界面が平坦なm面III族窒化物半導体を成長させることができる。ただし、GaN単結晶基板1の主面のオフ角は $\pm 1^\circ$ 以内（好ましくは $\pm 0.3^\circ$ 以内）とすることが好ましく、たとえば、オフ角を $2^\circ$ としたm面GaN単結晶基板上にGaN半導体層を成長させると、GaN結晶がテラス状に成長し、オフ角を $\pm 1^\circ$ 以内とした場合のような平坦な表面状態とすることができないおそれがある。

## 【0044】

m面を主面としたGaN単結晶基板上に結晶成長させられるIII族窒化物半導体は、m面を成長主面として成長する。c面を主面として結晶成長した場合には、c軸方向の分極の影響で、活性層10での発光効率が悪くなるおそれがある。これに対して、m面を結晶成長主面とすれば、量子井戸層での分極が抑制され、発光効率が增加する。これにより、閾値の低下やスロープ効率の増加を実現できる。また、分極が少ないため、発光波長の電流依存性が抑制され、安定した発振波長を実現できる。

20

## 【0045】

さらにまた、m面を主面とすることにより、c軸方向およびa軸方向に物性の異方性が生じる。加えて、Inを含む活性層10には、格子歪みによる2軸性応力が生じている。その結果、量子バンド構造が、c面を主面として結晶成長された活性層とは異なるものとなる。したがって、c面を成長主面とした活性層の場合とは異なる利得が得られ、レーザ特性が向上する。

## 【0046】

また、m面を結晶成長の主面とすることにより、III族窒化物半導体結晶の成長を極めて安定に行うことができ、c面やa面を結晶成長主面とする場合よりも、結晶性を向上することができる。これにより、高性能のレーザダイオードの作製が可能になる。

30

活性層10は、m面を結晶成長主面として成長させられたIII族窒化物半導体からなるので、ここから発生する光は、a軸方向、すなわちm面に平行な方向に偏光しており、TEモードの場合、その進行方向はc軸方向である。したがって、半導体レーザダイオード70は、結晶成長主面が偏光方向に平行であり、かつ、ストライプ方向、すなわち導波路の方向が光の進行方向と平行に設定されている。これにより、TEモードの発振を容易に生じさせることができ、レーザ発振を生じさせるための閾値電流を低減することができる。

40

## 【0047】

また、この実施形態では、基板1としてGaN単結晶基板を用いているので、III族窒化物半導体積層構造2は、欠陥の少ない高い結晶品質を有することができる。その結果、高性能のレーザダイオードを実現できる。

さらにまた、実質的に転位のないGaN単結晶基板上にIII族窒化物半導体積層構造を成長させることにより、このIII族窒化物半導体積層構造2は基板1の再成長面（m面）からの積層欠陥や貫通転位が生じていない良好な結晶とすることができる。これにより、欠陥に起因する発光効率低下などの特性劣化を抑制することができる。

## 【0048】

図7は、III族窒化物半導体積層構造2を構成する各層の組成例を示す図である。この

50

例では、 $n$ 型ガイド層15は、 $In$ 組成が比較的大きい $InGaN$ （図7の例では $In_{0.05}Ga_{0.95}N$ ）からなる第1部分151と、 $In$ 組成が比較的小さい $InGaN$ （図7の例では $In_{0.03}Ga_{0.97}N$ ）からなる第2部分152とを積層して構成されている。 $In$ 組成が比較的大きい第1部分151は、 $In$ 組成が比較的小さい第2部分152よりも活性層10に近い側に配置されている。

#### 【0049】

同様に、 $p$ 型ガイド層16は、 $In$ 組成が比較的大きい $InGaN$ （図7の例では $In_{0.05}Ga_{0.95}N$ ）からなる第1部分161と、 $In$ 組成が比較的小さい $InGaN$ （図7の例では $In_{0.03}Ga_{0.97}N$ ）からなる第2部分162とを備えており、これらの間に、 $p$ 型 $AlGaIn$ 電子ブロック層17が介装されている。 $In$ 組成が比較的大きい第1部分161は、 $In$ 組成が比較的小さい第2部分162よりも活性層10に近い側に配置されている。すなわち、活性層10側から順に、第1部分161、 $p$ 型 $AlGaIn$ 電子ブロック層17、および第2部分162が、この順で積層されている。

10

#### 【0050】

$p$ 型 $AlGaIn$ 電子ブロック層17は、この例では、 $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ で構成されている。また、 $n$ 型クラッド層15および $p$ 型クラッド層18は、この例では、いずれも $Al_{0.05}Ga_{0.95}N$ で構成されている。

なお、 $p$ 型電子ブロック層17は、 $In$ 組成の異なる第1部分161と第2部分162との間に配置される必要はなく、第1部分161の層厚途中や第2部分162の層厚途中に配置されてもよい。つまり、 $p$ 型電子ブロック層17の一方側と他方側とにそれぞれ接するガイド層部分は、組成が異なってもよいし、組成が等しくてもよい。ただし、活性層10から $p$ 型電子ブロック層17までの距離があまり大きくなると、キャリアのオーバーフローを抑制する機能が損なわれ、発光効率が悪くなるおそれがある。

20

#### 【0051】

図8は、III族窒化物半導体積層構造2を構成する各層の他の組成例を示す図である。この例では、 $n$ 型ガイド層15は、第1部分151、第2部分152および第3部分153を積層して構成されている。第1部分151は $In$ 組成が最も大きい $InGaIn$ （図8の例では $In_{0.05}Ga_{0.95}N$ ）からなり、第2部分152は $In$ 組成が次に大きい $InGaIn$ （図8の例では $In_{0.03}Ga_{0.97}N$ ）からなり、第3部分153は $In$ 組成が最も小さい $InGaIn$ （図8の例では $GaN$ 。すなわち、 $In$ を含まない。）からなる。 $In$ 組成が最も大きい第1部分151は、第2および第3部分152、153よりも活性層10に近い側に配置されている。また、2番目に $In$ 組成が大きい第2部分152は、 $In$ を含まない第3部分153よりも活性層10に近い側に配置されている。

30

#### 【0052】

同様に、 $p$ 型ガイド層16は、第1部分161、第2部分162および第3部分163を有している。第1部分161は $In$ 組成が最も大きい $InGaIn$ （図8の例では $In_{0.05}Ga_{0.95}N$ ）からなり、第2部分162は $In$ 組成が次に大きい $InGaIn$ （図8の例では $In_{0.03}Ga_{0.97}N$ ）からなり、第3部分163は $In$ 組成が最も小さい $InGaIn$ （図8の例では $GaN$ 。すなわち、 $In$ を含まない。）からなる。そして、第1および第2部分162、163の間に、 $p$ 型 $AlGaIn$ 電子ブロック層17が介装されている。 $In$ 組成が最も大きい第1部分161は、第2および第3部分162、162よりも活性層10に近い側に配置されている。また、2番目に $In$ 組成が大きな第2部分162は、 $In$ を含まない第3部分163よりも活性層10に近い側に配置されている。すなわち、活性層10側から順に、第1部分161、 $p$ 型 $AlGaIn$ 電子ブロック層17、第2部分162、および第3部分163が、この順で積層されている。

40

#### 【0053】

$p$ 型 $AlGaIn$ 電子ブロック層17は、この例では、 $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ で構成されている。また、 $n$ 型クラッド層15および $p$ 型クラッド層18は、この例では、いずれも $Al_{0.05}Ga_{0.95}N$ で構成されている。

なお、 $p$ 型電子ブロック層17は、 $In$ 組成の異なる第1部分161と第2部分162

50

との間に配置される必要はなく、第1部分161、第2部分162または第3部分163のいずれかの層厚途中に配置されてもよい。また、p型電子ブロック層17は、第2部分162と第3部分163との間に配置されてもよい。つまり、p型電子ブロック層17の一方側と他方側とにそれぞれ接するガイド層部分は、組成が異なってもよいし、組成が等しくてもよい。ただし、活性層10からp型電子ブロック層17までの距離が大きくなると、キャリアのオーバーフローを抑制する機能が損なわれ、発光効率が悪くなるおそれがある。

#### 【0054】

図9Aは図7の構成における各層の屈折率を図解的に示す図であり、図9Bは図8の構成における各層の屈折率を図解的に示す図である。横軸はIII族窒化物半導体積層構造2の表面からの深さを表し、縦軸は屈折率を表す。いずれの構成の場合も、ガイド層15、16は、活性層10側ほど屈折率が高くなっている。これにより、活性層10に向かって屈折率が高くなる構造とすることができるので、InGa<sub>N</sub>層の層厚を厚くしなくとも、良好な光閉じ込め効果を得ることができ、また、ガイド層15、16全体の平均In組成を低くすることができる。これにより、活性層10の付近における圧縮応力の集中を低減できるから、欠陥の発生を抑制できる。その結果、発光効率を高めることができる。

#### 【0055】

図10は、III族窒化物半導体積層構造2を構成する各層のさらに他の組成例を示す図である。この例では、n型ガイド層15は、InGa<sub>N</sub>(図10の例ではIn<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>N)からなる第1部分251と、超格子構造の第2部分252と、超格子構造の第3部分253とを積層して構成されている。第2部分252の平均In組成は、第1部分251のIn組成よりも小さい。また、第3部分253の平均In組成は、第2部分252の平均In組成よりも小さい。より具体的には、第2部分252は、層厚3nmのIn<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>N層と層厚3nmのGa<sub>N</sub>層とを交互に繰り返し積層した周期6nmの超格子構造を有している。また、第3部分253は、層厚2nmのIn<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>N層と層厚4nmのGa<sub>N</sub>層とを交互に繰り返し積層した周期6nmの超格子構造を有している。すなわち、超格子構造の構成素層の膜厚比率を変えることによって、平均In組成が変調されている。In組成が最も大きい第1部分251は、第2および第3部分252、253よりも活性層10に近い側に配置されている。また、In組成(平均In組成)が2番目に大きい第2部分252は、第3部分253よりも活性層10に近い側に配置されている。

#### 【0056】

同様に、p型ガイド層16は、InGa<sub>N</sub>(図10の例ではIn<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>N)からなる第1部分261と、超格子構造の第2部分262と、超格子構造の第3部分263とを有している。そして、第1部分261と第2部分262との間に、p型AlGa<sub>N</sub>電子ブロック層17が介装されている。第2部分262の平均In組成は、第1部分261のIn組成よりも小さい。また、第3部分263の平均In組成は、第2部分262の平均In組成よりも小さい。より具体的には、第2部分262は、層厚3nmのIn<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>N層と層厚3nmのGa<sub>N</sub>層とを交互に繰り返し積層した周期6nmの超格子構造を有している。また、第3部分263は、層厚2nmのIn<sub>0.05</sub>Ga<sub>0.95</sub>N層と層厚4nmのGa<sub>N</sub>層とを交互に繰り返し積層した周期6nmの超格子構造を有している。すなわち、超格子構造の構成素層の膜厚比率を変えることによって、平均In組成が変調されている。In組成が最も大きい第1部分261は、第2および第3部分262、263よりも活性層10に近い側に配置されている。また、In組成(平均In組成)が2番目に大きい第2部分262は、第3部分263よりも活性層10に近い側に配置されている。

#### 【0057】

このような構造によっても、ガイド層15、16を、活性層10に向かって屈折率が高くなる構造とすることができるから、ガイド層15、16の層厚および全体の平均In組成を低減しつつ、良好な光閉じ込め効果を得ることができる。これにより、結晶欠陥を抑制しつつ優れた発光効率を実現することができる。

なお、第1部分261についても超格子構造とし、その構成素層の膜厚比率によって、

10

20

30

40

50

所要の平均 In 組成を実現する構成としてもよい。また、超格子構造は、InGa<sub>0.2</sub>N 層と GaN 層とからなる必要はなく、In 組成の比較的高い第 1 InGa<sub>0.2</sub>N 層と、In 組成が比較的低い第 2 InGa<sub>0.2</sub>N 層とを交互に繰り返し積層して超格子構造としてもよい。さらに、p 型電子ブロック層 17 は、In 組成の異なる第 1 部分 261 と第 2 部分 262 との間に配置される必要はなく、第 1 部分 261 の層厚途中に配置されてもよいし、第 2 部分 262 の層厚途中に配置されてもよいし、第 3 部分 262 の層厚途中に配置されてもよい。また、第 2 部分 262 と第 3 部分 263 との間に配置されてもよい。つまり、p 型電子ブロック層 17 の一方側と他方側とにそれぞれ接するガイド層部分は、組成が異なってもよいし、組成が等しくてもよい。ただし、活性層 10 から p 型電子ブロック層 17 までの距離があまり大きくなると、キャリアのオーバーフローを抑制する機能が損なわれ、発光効率が悪くなるおそれがある。

10

#### 【0058】

図 11A ~ 図 11H は、図 7 の構成に対する光強度のシミュレーション結果を示す。各図の横軸は III 族窒化物半導体積層構造 2 の表面からの深さ Y (μm) であり、階段状の折れ線は各層の屈折率 (Refractive Index) を表し、山形の曲線は光強度 (Optical Intensity (任意単位)) を表す。ただし、発光波長は 500 nm (緑色) とし、p 型電子ブロック層 17 については、その組成を Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N とし、層厚を 20 nm とした。また、ガイド層 15, 16 の構成層のうち、活性層 10 から遠い側の第 2 部分 152, 162 は、その組成を In<sub>0.01</sub>Ga<sub>0.99</sub>N とし、層厚を 200 nm とした。ガイド層 15, 16 の構成層のうち、活性層 10 に近い側の第 1 部分 151, 161 については、その組成を In<sub>0.03</sub>Ga<sub>0.97</sub>N とし、層厚 (すなわち、活性層 10 から p 型電子ブロック層 17 までの距離) を各図に記載のとおり、1 nm ~ 100 nm の範囲で種々に設定した。

20

#### 【0059】

図 12A ~ 図 12H は、図 7 の構成に対する光強度の別のシミュレーション結果を示す。図 11A ~ 図 11H のシミュレーションとの相違は、p 型 AlGa<sub>0.15</sub>N 電子ブロック層 17 の組成を、Al<sub>0.15</sub>Ga<sub>0.85</sub>N としたことである。

図 13A ~ 図 13G は、図 7 の構成に対する光強度のさらに別のシミュレーション結果を示す。図 11A ~ 図 11H のシミュレーションとの相違は、n 型ガイド層 15 については、活性層 10 に近い第 1 部分 151 の層厚を 80 nm に固定したことである。すなわち、p 型ガイド層 16 の第 1 部分 161 についてのみ、層厚 (すなわち、活性層 10 から p 型電子ブロック層 17 までの距離) を各図に記載のとおり、1 nm ~ 100 nm の範囲で種々に設定した。

30

#### 【0060】

これらのシミュレーション結果に対する評価は次のとおりである。

図 11A ~ 図 11D のシミュレーション結果では、光強度のプロファイルにおいて、p 型側の領域に明確な段差が生じている。すなわち、いわば 2 段ピーク形状の光強度プロファイルとなっている。したがって、光閉じ込めが不十分であり、ファーフールドパターンの形状が悪くなるおそれがある。これに対して、図 11E ~ 図 11H のシミュレーション結果では、光強度のプロファイルにおいて、p 型側の領域に生じている屈曲点が、最高強度の半分程度以下の範囲に位置しており、ガウス分布に近いプロファイルとなっている。したがって、良好な光閉じ込めを得ることができ、ファーフールドパターンも良好であると考えられる。よって、ガイド層 15, 16 において活性層 10 に近い側の第 1 部分 151, 161 の層厚は 40 nm 以上であれば、良好な発光効率の半導体レーザ素子を実現できると考えられる。ただし、図 11H のシミュレーション結果からは、第 1 部分 151, 161 の層厚は 100 nm を超えると、光強度が不十分になることが懸念されるので、それらの層厚は 100 nm 以下が好ましいと考えられる。

40

#### 【0061】

図 12A ~ 図 12H のシミュレーション結果からは、図 11A ~ 図 11H のシミュレーション結果と同様な考察が可能である。したがって、p 型 AlGa<sub>0.15</sub>N 電子ブロック層 17 の組成は、光閉じ込め特性に大きな影響を与えないことが分かる。一般に、p 型電子プロ

50

ック層 17 の Al 組成は 15% ~ 20% の範囲とされる。これは、Al 組成が 15% 未満であると電子ブロック効果を期待できず、Al 組成が 20% を超えると p 型化が困難となり活性層 10 に正孔を供給できなくなるおそれがあるからである。

#### 【0062】

次に、図 13A ~ 図 13C のシミュレーション結果では、光強度のプロファイルにおいて、p 型部分に明確な段差が生じている。すなわち、いわば 2 段ピーク形状の光強度プロファイルとなっている。これに対して、図 13D ~ 図 13G のシミュレーション結果では、光強度のプロファイルにおいて、p 型部分に生じている屈曲点が、最高強度の半分程度以下の範囲に位置しており、ガウス分布に近いプロファイルとなっている。よって、p 型ガイド層 16 において活性層 10 に近い側の第 1 部分 161 の層厚は 40 nm 以上であれば、良好な発光効率の半導体レーザ素子を実現できると考えられる。ただし、図 13G のシミュレーション結果からは、第 1 部分 161 の層厚は 100 nm を超えると、光強度が不十分になることが懸念されるので、その層厚は 100 nm 以下が好ましいと考えられる。

10

#### 【0063】

以上より、活性層 10 から p 型 AlGaIn 電子ブロック層 17 までの距離を 40 nm 以上とすることによって、良好な光強度プロファイルが得られることが分かる。そして、その距離を 100 nm 以下とすることによって、十分な光強度が得られることが分かる。

ただし、図 11A ~ 図 11H のシミュレーション結果と図 13A ~ 図 13G のシミュレーション結果とを比較すると、図 13H ~ 図 13G のシミュレーション結果においては、光強度プロファイルの中心が活性層 10 よりも n 型半導体層 11 側にシフトしている。したがって、n 型ガイド層 15 および p 型ガイド層 16 の構成を活性層 10 に対して対称とする方が、発光効率の向上の観点で有利であることが分かる。

20

#### 【0064】

図 14 は、III 族窒化物半導体積層構造 2 を構成する各層を成長させるための処理装置の構成を説明するための図解図である。処理室 30 内に、ヒータ 31 を内蔵したサセプタ 32 が配置されている。サセプタ 32 は、回転軸 33 に結合されており、この回転軸 33 は、処理室 30 外に配置された回転駆動機構 34 によって回転されるようになっている。これにより、サセプタ 32 に処理対象のウエハ 35 を保持させることにより、処理室 30 内でウエハ 35 を所定温度に昇温することができ、かつ、回転させることができる。ウエハ 35 は、前述の GaN 単結晶基板 1 を構成する GaN 単結晶ウエハである。

30

#### 【0065】

処理室 30 には、排気配管 36 が接続されている。排気配管 36 はロータリポンプ等の排気設備に接続されている。これにより、処理室 30 内の圧力は、1/10 気圧 ~ 常圧とされ、処理室 30 内の雰囲気は常時排気されている。

一方、処理室 30 には、サセプタ 32 に保持されたウエハ 35 の表面に向けて原料ガスを供給するための原料ガス供給路 40 が導入されている。この原料ガス供給路 40 には、窒素原料ガスとしてのアンモニアを供給する窒素原料配管 41 と、ガリウム原料ガスとしてのトリメチルガリウム (TMG) を供給するガリウム原料配管 42 と、アルミニウム原料ガスとしてのトリメチルアルミニウム (TMAI) を供給するアルミニウム原料配管 43 と、インジウム原料ガスとしてのトリメチルインジウム (TMIn) を供給するインジウム原料配管 44 と、マグネシウム原料ガスとしてのエチルシクロペンタジエニルマグネシウム (EtCp<sub>2</sub>Mg) を供給するマグネシウム原料配管 45 と、シリコンの原料ガスとしてのシラン (SiH<sub>4</sub>) を供給するシリコン原料配管 46 とが接続されている。これらの原料配管 41 ~ 46 には、それぞれバルブ 51 ~ 56 が介装されている。各原料ガスは、いずれも水素もしくは窒素またはこれらの両方からなるキャリアガスとともに供給されるようになっている。

40

#### 【0066】

たとえば、m 面を主面とする GaN 単結晶ウエハをウエハ 35 としてサセプタ 32 に保持させる。この状態で、バルブ 52 ~ 56 は閉じておき、窒素原料バルブ 51 を開いて、

50

処理室 30 内に、キャリアガスおよびアンモニアガス（窒素原料ガス）が供給される。さらに、ヒータ 31 への通電が行われ、ウエハ温度が 1000 ~ 1100（たとえば、1050）まで昇温される。これにより、表面の荒れを生じさせることなく GaN 半導体を成長させることができるようになる。

【0067】

ウエハ温度が 1000 ~ 1100 に達するまで待機した後、窒素原料バルブ 51、ガリウム原料バルブ 52 およびシリコン原料バルブ 56 が開かれる。これにより、原料ガス供給路 40 から、キャリアガスとともに、アンモニア、トリメチルガリウムおよびシランが供給される。その結果、ウエハ 35 の表面に、シリコンがドーブされた GaN 層からなる n 型 GaN コンタクト層 13 が成長する。

10

【0068】

次に、窒素原料バルブ 51、ガリウム原料バルブ 52 およびシリコン原料バルブ 56 に加えて、アルミニウム原料バルブ 53 が開かれる。これにより、原料ガス供給路 40 から、キャリアガスとともに、アンモニア、トリメチルガリウム、シランおよびトリメチルアルミニウムが供給される。その結果、n 型 GaN コンタクト層 13 上に、n 型 AlGaIn クラッド層 14 がエピタキシャル成長させられる。このとき AlGaIn クラッド層 14 の Al 組成が 5% 以下となるように、各原料ガス（とくにアルミニウム原料ガス）の流量比が調整される。

【0069】

次いで、アルミニウム原料バルブ 53 を閉じ、窒素原料バルブ 51、ガリウム原料バルブ 52、インジウム原料バルブ 54、およびシリコン原料バルブ 56 を開く。これにより、原料ガス供給路 40 から、キャリアガスとともに、アンモニア、トリメチルガリウム、トリメチルインジウムおよびシランが供給される。その結果、n 型 AlGaIn クラッド層 14 上に n 型ガイド層 15 がエピタキシャル成長させられる。この n 型ガイド層 15 の形成時には、ウエハ 35 の温度は、800 ~ 900（たとえば 850）とされることが好ましい。

20

【0070】

n 型ガイド層 15 を図 7 の構成とするには、原料ガスの流量比の調整によって、始めに In 組成が比較的小さい第 2 部分 152 が形成され、次に In 組成が比較的大きい第 1 部分 151 が形成される。また、n 型ガイド層 15 を図 8 の構成とするには、原料ガスの流量比を調整することによって、始めに GaN からなる（In を含まない）第 3 部分 153 が形成され、次に InGaIn からなる In 組成の大きな第 2 部分 153 が形成され、さらにその上に第 2 部分 152 よりも In 組成の大きな第 1 部分 151 が形成される。n 型ガイド層 15 を図 10 の構成とするには、原料ガスの流量比を調整することによって、始めに第 3 部分 253 が形成され、その上に第 2 部分 252 が形成され、そのうえに第 1 部分 251 が形成される。超格子構造の第 2 および第 3 部分 252, 253 を形成するには、所要層厚の n 型 InGaIn 層を形成する工程と、所要層厚の n 型 GaN 層を形成する工程とを交互に繰り返し実行する。n 型 InGaIn 層を形成する工程では、窒素原料バルブ 51、ガリウム原料バルブ 52、インジウム原料バルブ 54 およびシリコン原料バルブ 56 を開き、他の原料バルブを閉じることにより、アンモニア、トリメチルガリウム、トリメチルインジウムおよびシランがウエハ 35 へと供給される。n 型 GaN 層を形成する工程では、窒素原料バルブ 51、ガリウム原料バルブ 52 およびシリコン原料バルブ 56 を開き、他の原料バルブを閉じることにより、アンモニア、トリメチルガリウムおよびシランがウエハ 35 へと供給される。

30

40

【0071】

次に、シリコン原料バルブ 56 が閉じられ、多重量子井戸構造の活性層 10（発光層）の成長が行われる。活性層 10 の成長は、窒素原料バルブ 51、ガリウム原料バルブ 52 およびインジウム原料バルブ 54 を開いてアンモニア、トリメチルガリウムおよびトリメチルインジウムをウエハ 35 へと供給することにより InGaIn 層からなる量子井戸層 221 を成長させる工程と、インジウム原料バルブ 54 を閉じ、窒素原料バルブ 51、ガリ

50

ウム原料バルブ52およびアルミニウム原料バルブ53を開いてアンモニア、トリメチルガリウムおよびトリメチルアルミニウムをウエハ35へと供給することにより、AlGaIn層からなる障壁層222を成長させる工程とを交互に実行することによって行える。具体的には、障壁層222を始めに形成し、その上に量子井戸層221を形成する。これを、たとえば、2回に渡って繰り返し行い、最後に障壁層222を形成する。障壁層222の形成時には、形成される層のAl組成が5%以下となるように、原料ガス（とくにアルミニウム原料ガス）の流量比が調節される。活性層10の形成時には、ウエハ35の温度は、たとえば、700 ~ 800（たとえば730）とされることが好ましい。

#### 【0072】

次に、アルミニウム原料バルブ53が閉じられ、窒素原料バルブ51、ガリウム原料バルブ52、インジウム原料バルブ54およびマグネシウム原料バルブ55が開かれる。これにより、ウエハ35に向けて、アンモニア、トリメチルガリウム、トリメチルインジウムおよびエチルシクロペンタジエニルマグネシウムが供給され、マグネシウムがドーブされたp型InGaIn層からなるガイド層16の内側部分（図7、図8および図10の構成における第1部分161, 261）が形成されることになる。In組成は、原料ガスの流量比を調整することによって所要の値に制御される。このp型ガイド層16の形成時には、ウエハ35の温度は、800 ~ 900（たとえば850）とされることが好ましい。

#### 【0073】

次いで、p型AlGaIn電子ブロック層17が形成される。すなわち、窒素原料バルブ51、ガリウム原料バルブ52、アルミニウム原料バルブ53およびマグネシウム原料バルブ55が開かれ、他のバルブ54, 56が閉じられる。これにより、ウエハ35に向けて、アンモニア、トリメチルガリウム、トリメチルアルミニウムおよびエチルシクロペンタジエニルマグネシウムが供給され、マグネシウムがドーブされたAlGaIn層からなるp型AlGaIn電子ブロック層17が形成されることになる。このp型AlGaIn電子ブロック層17の形成時には、ウエハ35の温度は、900 ~ 1100（たとえば1000）とされることが好ましい。

#### 【0074】

次に、p型ガイド層16の外側部分（図7、図8および図10の構成における第2部分162, 163および第3部分262, 263）が形成される。p型ガイド層16を図7の構成とするには、原料ガスの流量比の調整によって、第1部分161よりもIn組成が小さいInGaInからなる第2部分162がp型AlGaIn電子ブロック層17の上に形成される。また、p型ガイド層16を図8の構成とするには、原料ガスの流量比を調整することによって、始めに第1部分161よりもIn組成の小さなInGaInからなる第2部分162がp型AlGaIn電子ブロック層17の上に形成され、次にGaInからなる（Inを含まない）第3部分163がその上に形成される。p型ガイド層16を図10の構成とするには、原料ガスの流量比を調整することによって、始めに第2部分252がp型AlGaIn電子ブロック層17の上に形成され、第3部分263がその上に形成される。超格子構造の第2および第3部分262, 263を形成するには、所要層厚のp型InGaIn層を形成する工程と、所要層厚のp型GaIn層を形成する工程とを交互に繰り返し実行する。p型InGaIn層を形成する工程では、窒素原料バルブ51、ガリウム原料バルブ52、インジウム原料バルブ54およびマグネシウム原料バルブ55を開き、他の原料バルブを閉じることにより、アンモニア、トリメチルガリウム、トリメチルインジウムおよびエチルシクロペンタジエニルマグネシウムがウエハ35へと供給される。p型GaIn層を形成する工程では、窒素原料バルブ51、ガリウム原料バルブ52およびマグネシウム原料バルブ55を開き、他の原料バルブを閉じることにより、アンモニア、トリメチルガリウムおよびエチルシクロペンタジエニルマグネシウムがウエハ35へと供給される。

#### 【0075】

次いで、p型AlGaInクラッド層18が形成される。すなわち、窒素原料バルブ51、ガリウム原料バルブ52、アルミニウム原料バルブ53およびマグネシウム原料バルブ

10

20

30

40

50

55が開かれ、他のバルブ54, 56が閉じられる。これにより、ウエハ35に向けて、アンモニア、トリメチルガリウム、トリメチルアルミニウムおよびエチルシクロペンタジエニルマグネシウムが供給され、マグネシウムがドーブされてp型とされたAlGaIn層からなるクラッド層18が形成されることになる。このp型AlGaInクラッド層18の形成時には、ウエハ35の温度は、900 ~ 1100 (たとえば1000)とされることが好ましい。また、p型AlGaInクラッド層18のAl組成が5%以下となるように、各原料ガス(とくにアルミニウム原料ガス)の流量が調節されることが好ましい。

#### 【0076】

次に、p型コンタクト層19が形成される。すなわち、窒素原料バルブ51、ガリウム原料バルブ52およびマグネシウム原料バルブ55が開かれ、他のバルブ53, 54, 56が閉じられる。これにより、ウエハ35に向けて、アンモニア、トリメチルガリウムおよびエチルシクロペンタジエニルマグネシウムが供給され、マグネシウムがドーブされたGaIn層からなるp型GaInコンタクト層19が形成されることになる。p型GaInコンタクト層19の形成時には、ウエハ35の温度は、900 ~ 1100 (たとえば1000)とされることが好ましい。

10

#### 【0077】

p型半導体層12を構成する各層は、1000以下の平均成長温度で結晶成長させられることが好ましい。これにより、活性層10への熱ダメージを低減できる。

ウエハ35(GaN単結晶基板1)上にIII族窒化物半導体積層構造2の構成層10, 13~19を成長するのに際しては、いずれの層の成長の際も、処理室30内のウエハ35に供給されるガリウム原料(トリメチルガリウム)のモル分率に対する窒素原料(アンモニア)のモル分率の比であるV/III比は、1000以上(好ましくは3000以上)の高い値に維持される。より具体的には、n型クラッド層14から最上層のp型コンタクト層19までにおいて、V/III比の平均値が1000以上であることが好ましい。これにより、n型クラッド層14、活性層10およびp型クラッド層18の全ての層において、点欠陥の少ない良好な結晶を得ることができる。

20

#### 【0078】

この実施形態では、上記のような高いV/III比を用い、かつ、GaN単結晶基板1とIII族窒化物半導体積層構造2との間にバッファ層を介在することなく、m面等を主面とするIII族窒化物半導体積層構造2が、無転位の状態で、かつ、平坦に成長する。このIII族窒化物半導体積層構造2は、GaN単結晶基板1の主面から生じる積層欠陥や貫通転位を有していない。

30

#### 【0079】

こうして、ウエハ35上にIII族窒化物半導体積層構造2が成長させられると、このウエハ35は、エッチング装置に移され、たとえばプラズマエッチング等のドライエッチングによって、p型半導体層12の一部を除去してリッジストライプ20が形成される。このリッジストライプ20は、c軸方向に平行になるように形成される。

リッジストライプ20の形成後には、絶縁層6が形成される。絶縁層6の形成は、たとえば、リフトオフ工程を用いて行われる。すなわち、ストライプ状のマスクを形成した後、p型AlGaInクラッド層18およびp型GaInコンタクト層19の全体を覆うように絶縁体薄膜を形成した後、この絶縁体薄膜をリフトオフしてp型GaInコンタクト層19を露出させるようにして、絶縁層6を形成できる。

40

#### 【0080】

次いで、p型GaInコンタクト層19にオーミック接触するp型電極4が形成され、n型GaInコンタクト層13にオーミック接触するn型電極3が形成される。これらの電極3, 4の形成は、たとえば、抵抗加熱または電子線ビームによる金属蒸着装置によって行うことができる。

次の工程は、個別素子への分割である。すなわち、ウエハ35をリッジストライプ20に平行な方向およびこれに垂直な方向に劈開して、半導体レーザダイオードを構成する個々の素子が切り出される。リッジストライプに平行な方向に関する劈開はa面に沿って行

50

われる。また、リッジストライプ 20 に垂直な方向に関する劈開は c 面に沿って行われる。こうして、+ c 面からなる共振器端面 21 と、- c 面からなる共振器端面 22 とが形成される。

【0081】

次に、共振器端面 21, 22 に、それぞれ前述の絶縁膜 23, 24 が形成される。この絶縁膜 23, 24 の形成は、たとえば、電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 成膜法によって行うことができる。

以上、この発明の一実施形態について説明したが、この発明はさらに他の形態で実施することもできる。

【0082】

たとえば、前述の実施形態では、ガイド層 15, 16 が 2 層または 3 層の構造を有する例を挙げたが、ガイド層 15, 16 を 4 層以上の構成とすることもできる。この場合、活性層 10 に近い方から i 番目の組成を  $In_{x_i}Ga_{1-x_i}N$  ( $0 < x_i < 1$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots$ ) と表すとすると、任意の i に対して、 $x_{i-1} > x_i > x_{i+1}$  が成立するように各層の In 組成  $x_i$  を定めればよい。

【0083】

また、前述の実施形態では、リッジストライプ 20 を c 軸に平行に形成した構造について説明したが、リッジストライプ 20 を a 軸に平行とし、共振器端面を a 面としてもよい。また、基板 1 の主面は、m 面に限らず、他の非極性面である a 面としてもよいし、半極性面としてもよい。

さらにまた、III 族窒化物半導体積層構造 2 を構成する各層の層厚や不純物濃度等は一例であり、適宜適切な値を選択して用いることができる。

【0084】

また、III 族窒化物半導体積層構造 2 を形成した後にレーザーリフトオフなどで基板 1 を除去し、基板 1 のない半導体レーザーダイオードとすることもできる。

また、前述の実施形態では、量子井戸層が複数個設けられた多重量子井戸構造の活性層を有する素子について説明したが、活性層の構造は、量子井戸層が 1 個の量子井戸構造としてもよい。

【0085】

その他、特許請求の範囲に記載された事項の範囲で種々の設計変更を施すことが可能である。

【符号の説明】

【0086】

- 1 基板 (GaN 単結晶基板)
- 2 III 族窒化物半導体積層構造
- 3 n 側電極
- 4 p 側電極
- 6 絶縁層
- 10 活性層
- 221 量子井戸層
- 222 障壁層
- 11 n 型半導体層
- 12 p 型半導体層
- 13 n 型 GaN コンタクト層
- 14 n 型 AlGaIn クラッド層
- 15 n 型ガイド層
- 151 第 1 部分
- 152 第 2 部分
- 153 第 3 部分
- 251 第 1 部分

10

20

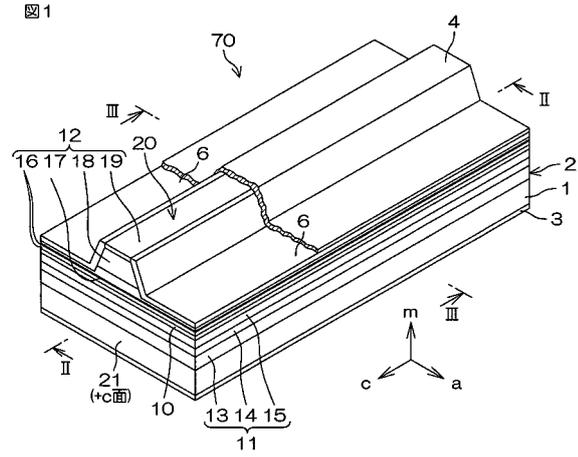
30

40

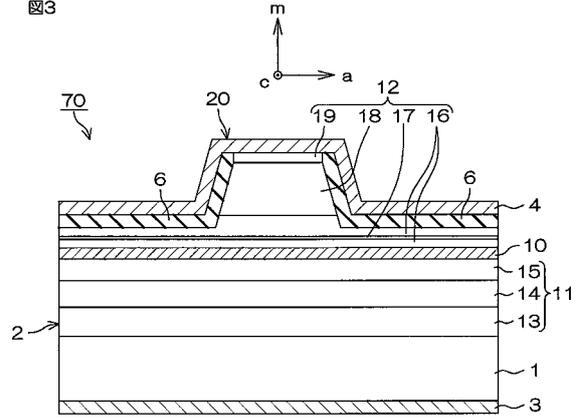
50

2 5 2	第 2 部分	
2 5 3	第 3 部分	
1 6	p 型ガイド層	
1 6 1	第 1 部分	
1 6 2	第 2 部分	
1 6 3	第 3 部分	
2 6 1	第 1 部分	
2 6 2	第 2 部分	
2 6 3	第 3 部分	
1 7	p 型 A l G a N 電子ブロック層	10
1 8	p 型 A l G a N クラッド層	
1 9	p 型 G a N コンタクト層	
2 0	リジストライブ	
2 1 , 2 2	端面	
2 3 , 2 4	絶縁膜	
3 0	処理室	
3 1	ヒータ	
3 2	サセプタ	
3 3	回転軸	
3 4	回転駆動機構	20
3 5	基板	
3 6	排気配管	
4 0	原料ガス導入路	
4 1	窒素原料配管	
4 2	ガリウム原料配管	
4 3	アルミニウム原料配管	
4 4	インジウム原料配管	
4 5	マグネシウム原料配管	
4 6	シリコン原料配管	
5 1	窒素原料バルブ	30
5 2	ガリウム原料バルブ	
5 3	アルミニウム原料バルブ	
5 4	インジウム原料バルブ	
5 5	マグネシウム原料バルブ	
5 6	シリコン原料バルブ	
7 0	半導体レーザダイオード	

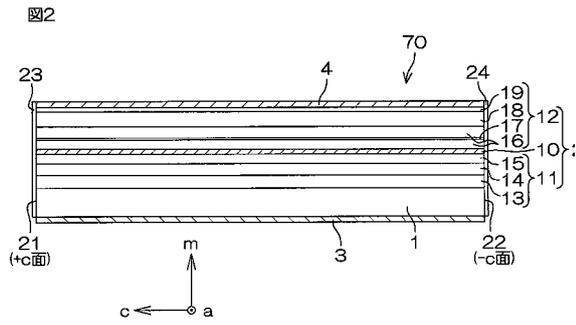
【図1】



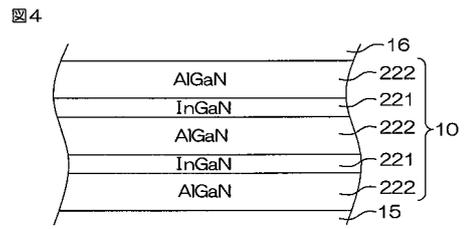
【図3】



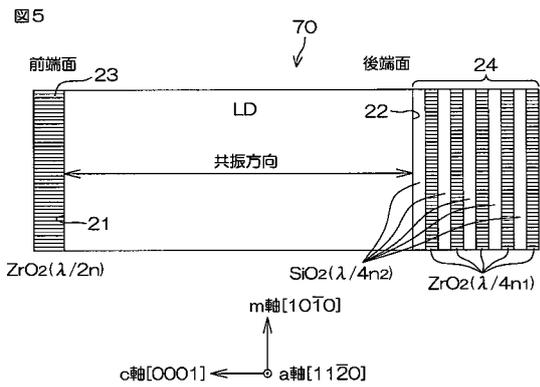
【図2】



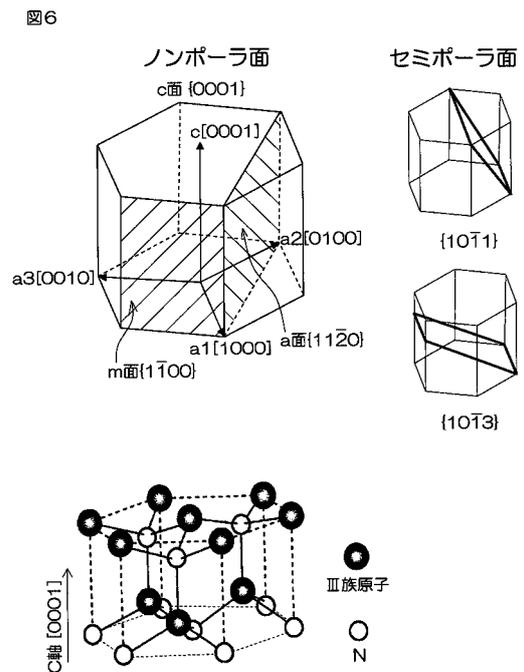
【図4】



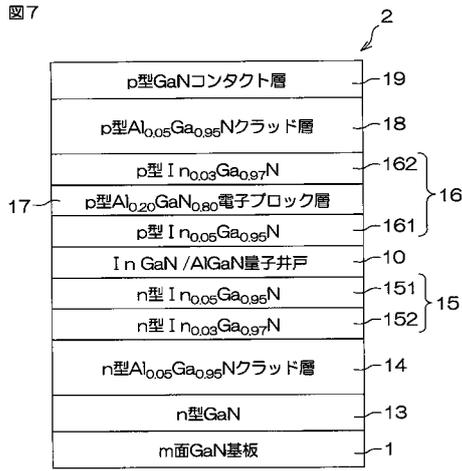
【図5】



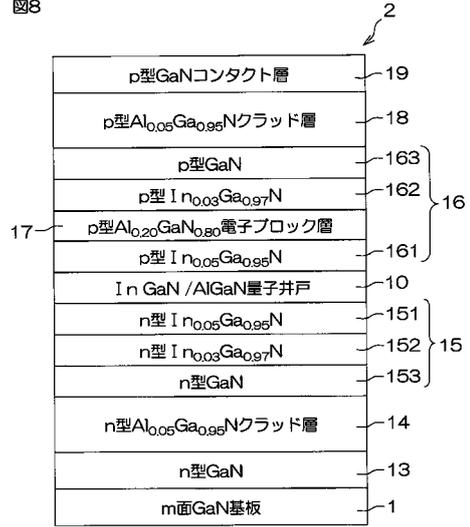
【図6】



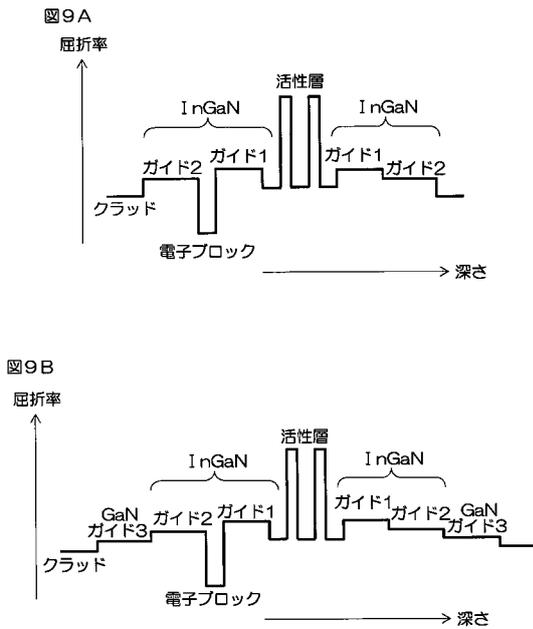
【 図 7 】



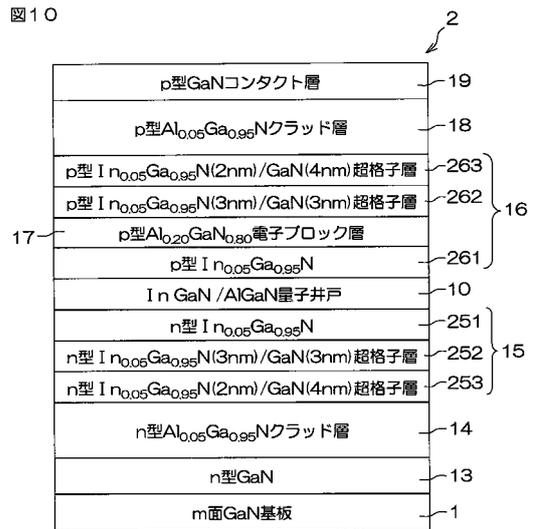
【 図 8 】



【 図 9 】



【 図 10 】



【 図 1 1 - 1 】

図 11 A

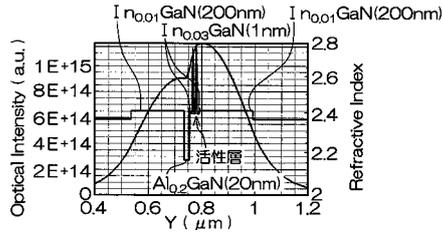


図 11 B

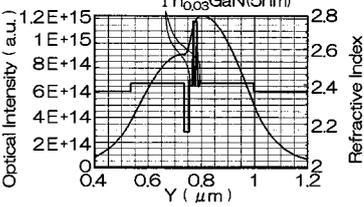


図 11 C

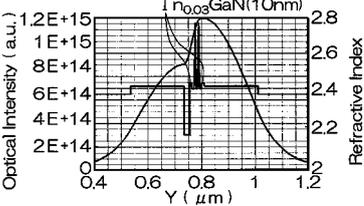
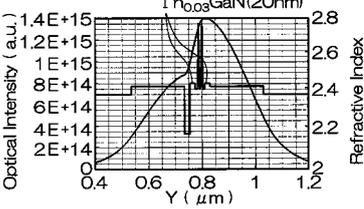


図 11 D



【 図 1 1 - 2 】

図 11 E

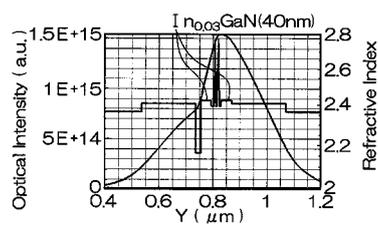


図 11 F

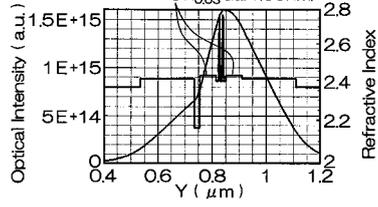


図 11 G

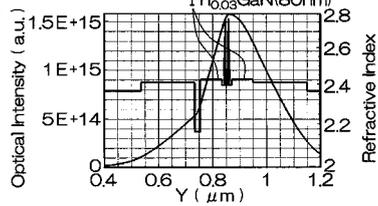
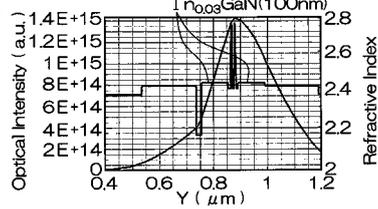


図 11 H



【 図 1 2 - 1 】

図 12 A

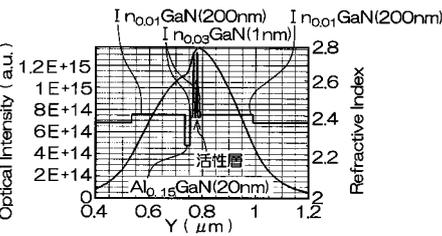


図 12 B

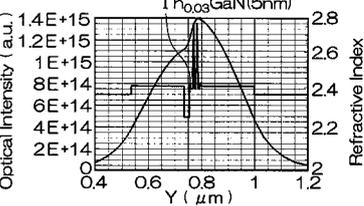


図 12 C

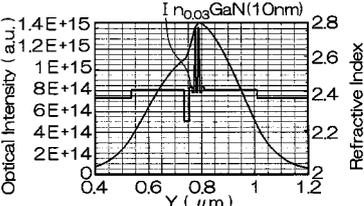
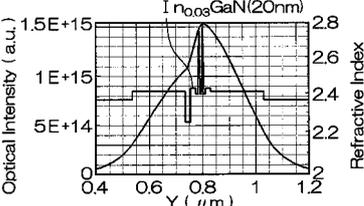


図 12 D



【 図 1 2 - 2 】

図 12 E

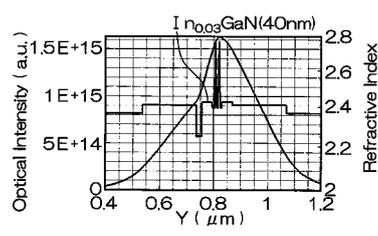


図 12 F

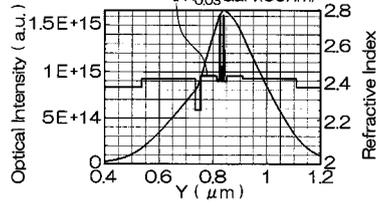


図 12 G

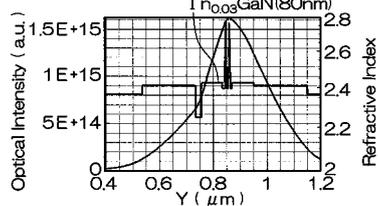
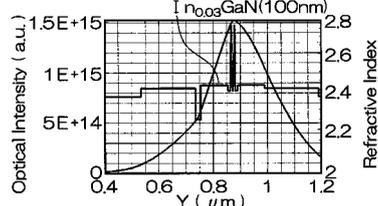


図 12 H



【 図 1 3 - 1 】

図13A

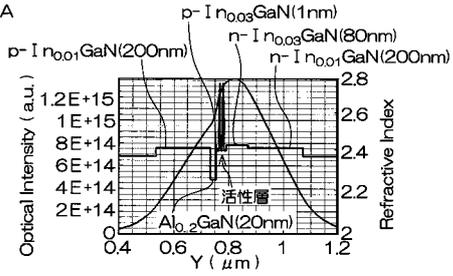


図13B

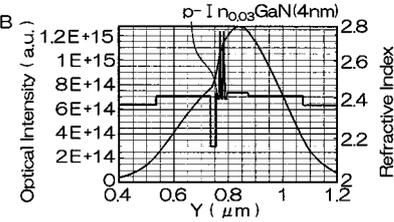
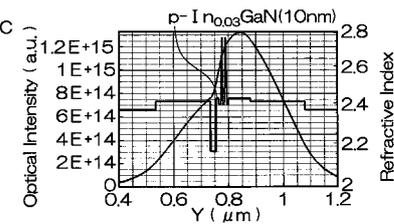


図13C



【 図 1 3 - 2 】

図13D

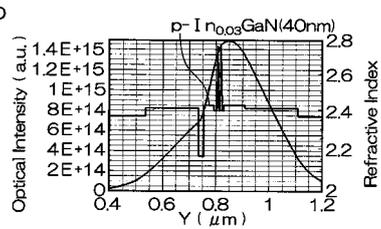


図13E

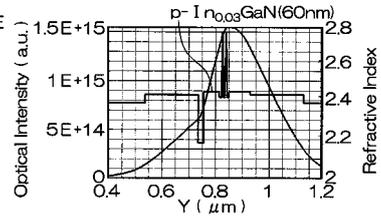


図13F

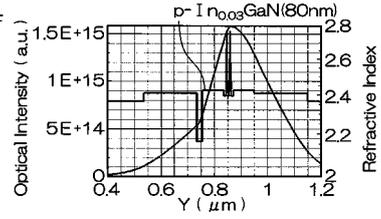
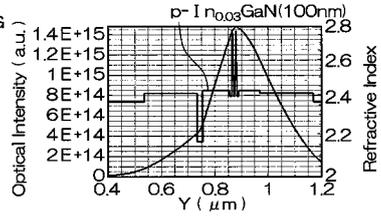
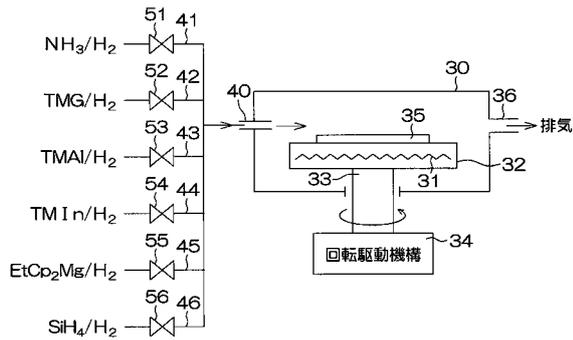


図13G



【 図 1 4 】

図14



---

フロントページの続き

(72)発明者 田中 岳利

京都市右京区西院溝崎町2 1 番地 ローム株式会社内

(72)発明者 柏木 淳一

京都市右京区西院溝崎町2 1 番地 ローム株式会社内

(72)発明者 田中 良宜

京都市右京区西院溝崎町2 1 番地 ローム株式会社内

Fターム(参考) 5F173 AA08 AF43 AF44 AF52 AF55 AH22 AP06 AP24 AR03 AR23  
AR25 AR26 AR53 AR82 AR84