

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第4342134号
(P4342134)

(45) 発行日 平成21年10月14日 (2009. 10. 14)

(24) 登録日 平成21年7月17日 (2009. 7. 17)

(51) Int. Cl.

F I

H O 1 S 5/323 (2006. 01)

H O 1 S 5/323 6 1 0

H O 1 L 33/00 (2006. 01)

H O 1 L 33/00 1 8 6

請求項の数 7 (全 33 頁)

(21) 出願番号 特願2001-402089 (P2001-402089)
 (22) 出願日 平成13年12月28日 (2001. 12. 28)
 (65) 公開番号 特開2002-261393 (P2002-261393A)
 (43) 公開日 平成14年9月13日 (2002. 9. 13)
 審査請求日 平成16年12月28日 (2004. 12. 28)
 審判番号 不服2008-2877 (P2008-2877/J1)
 審判請求日 平成20年2月7日 (2008. 2. 7)
 (31) 優先権主張番号 特願2000-402772 (P2000-402772)
 (32) 優先日 平成12年12月28日 (2000. 12. 28)
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(73) 特許権者 000226057
 日亜化学工業株式会社
 徳島県阿南市上中町岡491番地100
 (72) 発明者 柳本 友弥
 徳島県阿南市上中町岡491番地100
 日亜化学工業株式会社内
 合議体
 審判長 吉野 公夫
 審判官 右田 昌士
 審判官 稲積 義登

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 窒化物半導体レーザ素子

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

活性層を p 型クラッド層と n 型クラッド層とで挟みこむ導波路構造を有する窒化物半導体レーザ素子において、

前記活性層が In を含む窒化物半導体を有し発振波長が 440 nm 以上であり、

前記 p 型クラッド層と前記 n 型クラッド層が、Al を含む窒化物半導体からなり、

前記導波路内に、前記活性層を挟んで互いに組成が異なる第 1, 2 の窒化物半導体層を有し、前記活性層と n 型クラッド層との間に第 1 の窒化物半導体層、p 型クラッド層と活性層との間に第 2 の窒化物半導体層、をそれぞれ有すると共に、

前記第 1 の窒化物半導体層が、In を含む窒化物半導体であり、

前記第 1 の窒化物半導体層と前記 n 型クラッド層との間に、前記第 1 の窒化物半導体層より In 混晶比が小さく、前記活性層側に n 型不純物の低濃度ドープ領域と、前記 n 型クラッド層側に n 型不純物の高濃度ドープ領域を備えた n 側光ガイド層を有し、

前記第 1 の窒化物半導体層の n 型不純物が、前記低濃度ドープ領域より高濃度であり、

前記第 2 の窒化物半導体層が、In 混晶比が 0 の窒化物半導体であり、前記 p 型クラッド層と前記活性層との間の p 側光ガイド層内に含まれる、又は、該 p 側光ガイド層と前記活性層との間に設けられる、窒化物半導体レーザ素子。

【請求項 2】

前記活性層が In を含む窒化物半導体からなる井戸層を有する量子井戸構造を有し、前記第 1 の窒化物半導体層の In 混晶比 z が井戸層の In 混晶比 w より小さく ($z < w$)、該

10

20

第 1 の窒化物半導体層に隣接する障壁層の I_n 混晶比 v 以下 ($z < v$) である請求項 1 に記載の窒化物半導体レーザ素子。

【請求項 3】

前記第 1 の窒化物半導体層が活性層に接して設けられることを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の窒化物半導体レーザ素子。

【請求項 4】

p 型クラッド層と活性層との間に前記第 2 の窒化物半導体層からなる前記 p 側光ガイド層と、該 p 側光ガイド層と活性層との間に Al を含む窒化物半導体からなる p 側電子閉込め層を有する請求項 1 乃至 3 のいずれか一項に記載の窒化物半導体レーザ素子。

【請求項 5】

前記 n 側、p 側光ガイド層の少なくとも一方が、 I_n を含む窒化物半導体の超格子多層膜である請求項 1 乃至 4 のいずれか一項に記載の窒化物半導体レーザ素子。

【請求項 6】

前記活性層と第 1 の窒化物半導体層との間に、 I_n 混晶比が 0 である窒化物半導体からなる n 型光ガイド層を有することを特徴とする請求項 1 乃至 4 のいずれか一項に記載の窒化物半導体レーザ素子。

【請求項 7】

前記第 1 の窒化物半導体層の膜厚が 300 以上であることを特徴とする請求項 1 乃至 6 のいずれか一項に記載の窒化物半導体レーザ素子。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】

本発明は、発光ダイオード素子 (LED)、レーザダイオード素子 (LD) 等の発光素子、スーパーフォトルミネセンスダイオード、太陽電池、光センサ等の受光素子、あるいはトランジスタ、パワーデバイス等の電子デバイスに用いられる窒化物半導体 ($I_n x Al_y Ga_{1-x-y}N$, $0 < x, 0 < y, x+y < 1$) を用いた窒化物半導体素子に関し、特に光の波長が 440 nm 以上である I_n を含む窒化物半導体層を活性層に有する窒化物半導体素子、並びに、光閉込めのクラッド層に挟まれた導波路構造を有する端面発光素子、レーザ素子に関する。

【0002】

【従来の技術】

今日、窒化物半導体を用いた半導体レーザは、DVD など、大容量・高密度の情報記録・再生が可能な光ディスクシステムへの利用に対する要求が高まりを見せている。このため、窒化物半導体を用いた半導体レーザ素子は、研究が盛んになされている。また、窒化物半導体を用いた半導体レーザ素子は、紫外域から赤色に至るまで、幅広く可視光域での発振が可能と考えられ、その応用範囲は、上記光ディスクシステムの光源にとどまらず、レーザプリンタ、光ネットワークなどの光源など、多岐にわたるものと期待されている。また、本出願人は、405 nm、室温、5 mW の連続発振の条件で、1 万時間を超えるレーザを発表した。

【0003】

また、窒化物半導体を用いた発光素子、受光素子などには、 I_n を含む窒化物半導体を用いて活性層とした構造を有しており、活性層におけるより優れた活性領域の形成が、素子特性の向上において重要となる。

【0004】

窒化物半導体のレーザ素子、若しくは発光素子において、長波長の発光を得るには、活性層若しくは発光層の I_n を含む窒化物半導体における I_n 混晶比を、変化させることで、発光波長を変えることができ、特に I_n 混晶比を高くすると発光波長を長くすることができる。また、端面発光素子、レーザ素子において、活性層が上部、下部クラッド層に挟まれた構造を有する場合に、両クラッド層の屈折率を小さくし、上部、下部クラッド層に挟まれた導波路内の屈折率を高くすることで、導波路内に効率よく光が閉じこめられ、結果

10

20

30

40

50

としてレーザ素子においてはしきい値電流密度の低下に寄与する。

【0005】

従来、このようなクラッド層を有する窒化物半導体素子において、440nm以上の長波長の発光を得る構造として、例えば、レーザ素子において、ガイド層にInGa_N、クラッド層にAlGa_Nを用いたSCH構造が提案されている。

【0006】

しかしながら、長波が長くなるに従ってAlGa_NとInGa_Nとの屈折率差が小さくなり、すなわち、導波路内のガイド層で光の吸収による損失が発生し、閾値電流が高くなる。更に、上部クラッド層をp型窒化物半導体、下部クラッド層をn型窒化物半導体とした場合に、上部ガイド層にp型のInGa_Nを用いるが、p型InGa_Nを形成すると結晶性が他の層に比べて悪く、素子特性に悪影響を及ぼし、更にその上に形成するAlGa_Nの上部クラッド層の結晶性も悪化し、これによる、素子特性の低下が問題となる。

10

【0007】

【発明が解決しようとする課題】

本発明では、活性層が上部クラッド層、下部クラッド層に挟まれた構造を有する窒化物半導体素子で、光の波長が440nm以上の長波長域の発光素子において、両クラッド層に挟まれた導波路において、光の吸収を低く抑え、活性層を含む導波路内へ効率的に光を閉込め、さらに良好な結晶性で、素子構造を形成することが必要である。

【0008】

【課題を解決するための手段】

20

本発明は、上記事情に鑑みなされたものであり、閾値電流密度などの素子特性に優れ、且つ結晶性の良好な窒化物半導体素子を得るものである。

【0009】

すなわち本発明の半導体素子は、下記の構成により本発明の目的を達成することができる。

【0010】

活性層を、p型層とn型層とで挟みこむ構造を有し、p型層がp型クラッド層を有し、n型層がn型クラッド層を有する窒化物半導体素子において、前記活性層がInを含む窒化物半導体を有し、n型クラッド層と活性層との間にIn混晶比が $z > 0$ である窒化物半導体からなる第1の窒化物半導体層を有し、p型クラッド層と活性層との間にIn混晶比 u が $z > u$ である第2の窒化物半導体層を有することを特徴とする。この構成により、n型層には、In混晶比 z ($z > u$)の大きな第1の窒化物半導体層が設けられ、p型層には第1の窒化物半導体層よりもIn混晶比 u ($u = 0$ も含む)が小さい第2の窒化物半導体層が設けられた構造となり、後述する導波路構造において、導波路内の活性層を挟む非対称構造が形成される。また、別の発明としては活性層をp型クラッド層とn型クラッド層とで挟みこむ構造を有する窒化物半導体素子において、前記活性層がInを含む窒化物半導体を有し、n型クラッド層と活性層との間にInを含む窒化物半導体からなる第1の窒化物半導体層を有し、p型クラッド層と活性層との間にIn混晶比が0である第2の窒化物半導体層を有することを特徴とする。この構成により、活性層とp型クラッド層との間に、Inを含まない、若しくはIn混晶比の小さい窒化物半導体(第2の窒化物半導体層)を用いることで、結晶性の悪化を抑制し、活性層とn型クラッド層との間には、Inを含む窒化物半導体(第1の窒化物半導体層)を用いることで、両クラッド層に挟まれる導波路とクラッド層との間に適度な屈折率差を設けることができる。特に活性層内で440nm以上の長波長の発光がある窒化物半導体素子において、閾値電流の低いレーザ素子が得られるなど、素子特性に優れた窒化物半導体素子となる。これは、p型とn型のクラッド層に挟まれた導波路において、440nm以上の長波長の光を適度な広がりをもって導波させるには、活性層に用いられるInを含む窒化物半導体のIn混晶比以下のInを含む窒化物半導体、例えば後述する光ガイド層、を導波路内に設けることが好ましいと考えられていたが、p型不純物であるMgをドーブしたInを含む窒化物半導体は、結晶性が大きく悪化するため、素子特性を悪化させることにある。すなわち、本発明では、p型ク

30

40

50

ラッド層とn型クラッド層で挟まれた導波路内に、組成が異なり、活性層を挟む第1の窒化物半導体層と第2の窒化物半導体層とを有することで、非対称な導波路構造とし、長波長において素子特性に優れる窒化物半導体素子が得られる。また、n型、p型クラッド層としては、このような導波路構造を形成するように、光閉込めのクラッド層として設ける他、導波路を有していない素子においては、キャリア閉込め層として機能させた構造とすることもできる。このようなクラッド層としては、活性層よりもバンドギャップエネルギーを大きくすること、活性層が量子井戸構造の場合には、井戸層よりもバンドギャップエネルギーを大きくし、好ましくは、障壁層よりもバンドギャップエネルギーを大きくする。

【0011】

さらに、上記n型層中の第1の窒化物半導体層とp型層中の第2の窒化物半導体層との間に活性層が設けられた素子構造において、前記活性層が、活性層内の障壁層の中で、最も前記n型層側に配置されたn側障壁層(2a)と、最も前記p型層側に配置されたp側障壁層(2c)と、n側障壁層(2a)とp側障壁層(2b)との間に少なくとも1つのInを含む窒化物半導体からなる井戸層を有すると共に、前記p側障壁層(2c)のn型不純物濃度が、n側障壁層(2a)のn型不純物濃度より小さい構成とすることが好ましい。これは、後述するように、p側障壁層(2c)がキャリアの注入口となり、p側障壁層(2c)にn型不純物が高濃度にドーピングされていると、ホールの活性層への注入を阻害する傾向にあるため、n側障壁層(2a)よりもn型不純物濃度を小さくして、n側、p側障壁層の機能を異なるものとでき、キャリアの注入が良好なものとできる。一方で、n側障壁層(2a)は、p側障壁層のn型不純物濃度より大きくすることで、n型層からのキャリアの注入を促進させる構造とできる。またp側障壁層(2c)のn型不純物濃度としては、p型層近く、若しくは接して形成されることから、p型不純物の拡散が発生する場合があります。この場合、p側障壁層(2c)をn型不純物ドーピングして形成すると、n型、p型不純物を有する障壁層となるため、p側障壁層(2c)のキャリア注入機能が低下する傾向にある。そのため、このような場合、好ましくはp側障壁層(2c)のn型不純物濃度をp型不純物濃度より小さくすると、このような機能低下を回避できる。また、p側障壁層には、いずれにおいても、n型不純物濃度を低濃度にするのが好ましく、具体的には、 $5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 未満とすることで、p側障壁層(2c)の機能向上を図ることができる。

【0012】

本発明の窒化物半導体素子において、前記p型層が、活性層と第2の窒化物半導体層との間、若しくは活性層とp型クラッド層との間に、Alを含む窒化物半導体からなるp側電子閉込め層を有することが好ましい。このp側電子閉込め層は、n型層からのキャリアを活性層内に閉じ込める層として機能し、p型クラッド層が光閉込め層である場合には、p型クラッド層よりも活性層の近くに配置されたp側電子閉込め層により、主にキャリア閉込めとして機能させ、クラッド層において、主に光閉込めとして機能させた構造となり、端面発光素子、レーザ素子に用いることができる。また、p型クラッド層が光閉込めとして機能させる必要がない素子、例えば発光素子においては、p型クラッド層とp側キャリア閉込め層とで、キャリア閉込める構造となる。p側電子閉込め層としては、クラッド層と同様に活性層よりもバンドギャップエネルギーを大きくし、量子井戸構造の活性層においては、井戸層よりもバンドギャップエネルギーを大きくし、好ましくは障壁層よりもバンドギャップエネルギーを大きくすることが好ましい。また、p型クラッド層が光閉込め層である場合においては、実施例に示すようにp型クラッド層よりもバンドギャップエネルギーを大きくすることで障壁を大きくでき、効率的な電子閉込めを可能となり好ましく、一方で、Al混晶比が大きくなると、後述するp側電子閉込め層の抵抗値も大きくなる傾向にあることから、このような場合には、Al混晶比、バンドギャップエネルギーをp型クラッド層よりも小さくして、高抵抗層による発熱を抑えて、活性層の機能を高めた構造とできるため好ましい。

【0013】

また、p 側電子閉込め層の位置として好ましくは、活性層に接して、若しくはバッファ層を介して接して設けられていることで、電子閉込め機能を高めた構造とできる。バッファ層については、後述するように、Al を含む窒化物半導体による大きな圧電界と、さらに Al を含む窒化物半導体が、活性層、井戸層に用いられる In を含む窒化物半導体近くに設けられることによる内部応力とによる活性層への悪影響を抑え、成長時には、下地層として好適な結晶性を得られるように形成される。バッファ層の具体的な組成としては、後述するように、GaN 若しくは、Al 混晶比が p 側電子閉込め層より小さい Al を含む窒化物半導体で構成すると良い。また、このような p 側電子閉込め層が、活性層、特に井戸層に及ぼす悪影響は、両者の距離を大きくすることで回避できることを示したが、バッファ層も、p 側障壁層 (2c) と同様に、このようなスペーサーとしての機能を持たせることができる。すなわち、活性層内で最も p 側電子閉込め層に近くに、前記 n 側障壁層 (2a) と p 側障壁層 (2c) との間に設けられた井戸層 (1b) を有し、該井戸層 (1b) と p 側電子閉込め層との距離が 100 以上とする構成により、素子特性に優れたものが得られる。この井戸層 (1b) と p 側電子閉込め層との距離を決定するものは、両者の間に介在する層により決定されるものであり、具体的には p 側障壁層、活性層と p 側電子閉込め層との間に介在するバッファ層であり、これらの層の膜厚を調節することにより、素子特性の向上を図れる。この距離の上限としては、後述するように、400 以下とすることである。また、p 側障壁層 (2c) を、In を含む窒化物半導体で構成すると、第 1 の窒化物半導体層と同様に、導波路、特に活性層近傍の屈折率を高めて、光閉込めのクラッド層との間で屈折率差を高めて、長波長域のレーザ素子、端面発光素子に優れた素子構造を形成することができる。第 2 の窒化物半導体層と、これらバッファ層、p 側障壁層 (2c) などの p 側電子閉込め層と井戸層 (1b) との間に介在する層との違いは、素子のバイアス時に、活性層近くに設けられた p 側電子閉込め層の近傍において、p-n 接合が形成されることにより、p-n 接合部よりも活性層近くに配置されたバッファ層、p 側障壁層 (2c) は、p 型層側に In を含む窒化物半導体を設けることによる悪影響を回避できる傾向にあるためである。

【0014】

これら前記 n 側障壁層 (2a)、及び/又は、p 側障壁層 (2c) は、活性層内で最も外側に配置されている構造とすることが、上述した n 側障壁層 (2a)、p 側障壁層 (2c) の機能を高めることができ好ましい。

【0015】

前記 p 型クラッド層、n 型クラッド層が、Al を含む窒化物半導体を有することを特徴とする。この構成により、両クラッド層に挟まれた導波路と、各クラッド層との間に、大きな屈折率差を設けることが可能となり、光の導波に優れた導波路構造が形成され、素子特性に優れた窒化物半導体素子が得られる。ここで、Al を含む窒化物半導体として好ましくは、In 混晶比が 0 で In を含まない窒化物半導体を用いることで、結晶性に優れ、より大きな屈折率差を設けることができ、さらに $Al_xGa_{1-x}N$ ($0 < x < 1$) で表される窒化物半導体を用いることがさらに好ましい。

【0016】

前記活性層が In を含む窒化物半導体からなる井戸層を有する量子井戸構造を有し、前記第 1 の窒化物半導体層の In 混晶比が井戸層の In 混晶比より小さいことを特徴とする。この構成により、量子井戸構造の活性層とすることで、量子井戸構造でない場合に比べて、発光再結合が促進され、閾値電流を低下させ、出力を向上させ、素子特性に優れた窒化物半導体素子が得られる。また、第 1 の窒化物半導体層に用いられる窒化物半導体の In 混晶比を、井戸層よりも小さくすることで、井戸層とのバンドギャップエネルギー差を大きくでき、キャリアの注入を良好にでき素子特性の向上につながる。それに加えて、In は光の導波において、光を吸収・散乱させる作用があることから、In 混晶比の低い窒化物半導体の第 1 の窒化物半導体層と、In を含まない第 2 の窒化物半導体層を用いることで、光の損失を抑えて、閾値電流、駆動電流を低下させた窒化物半導体素子となる。ここで、活性層が量子井戸構造でない場合にも、活性層に用いられる窒化物半導体の In 混晶

比より、第1の窒化物半導体層のIn混晶比を小さくすることで同様な効果が得られる。

【0017】

前記第1の窒化物半導体層が活性層に接して設けられることを特徴とする。この構成により、図5、6に示すように、n型クラッド層から段階的にバンドギャップエネルギー差が小さくなって活性層につながる構造となり、活性層、井戸層内にキャリアが効率的に注入され、素子特性に優れる窒化物半導体素子が得られる。また、上述したように、Inによる光の損失が発生があることから、第1の窒化物半導体層を活性層に接して設けることで、導波路内での光の分布が、活性層に重なったピークを有して、活性層内に多くの光が分布する構造となるものと考えられ、活性層とほぼ同様な層として機能し、導波路内での光の損失を低く抑えることができる。一方で、図8、図10に示すように、第1の窒化物半導体層のIn混晶比 z を、前記n側障壁層(2a)のIn混晶比 v と、ほぼ同じか、小さくすること、すなわち、 $z < v$ であることによって、In混晶比をn側障壁層よりも大きくでき、このことにより導波路の屈折率を大きくした構造とできる。この場合、p型層からのキャリア閉込めは、主にn側障壁層(2b)が担うこととなるが、ホールの拡散長が電子よりも小さい窒化物半導体においては、p側電子閉込め層のように大きな障壁を設けなくても、活性層内へのキャリア閉込めが可能とできる。すなわち、p型層からのキャリア閉込めにおいては、バンドギャップエネルギーの大きなn側障壁層(2a)が担うように、最小にして、簡略化を実現し、た構造とし、一方で、第1の窒化物半導体層が大きなIn混晶比を有することで、活性層、導波路中心部の屈折率を大きくして、光の導波に優れた素子構造の形成が可能となる。

【0018】

p型クラッド層と活性層との間に前記第2の窒化物半導体層からなるp型光ガイド層と、該p型光ガイド層と活性層との間にAlを含む窒化物半導体からなるp側電子閉込め層を有することを特徴とする。この構成により、導波路内において、活性層とp型クラッド層との間を、p側電子閉込め層と第2の窒化物半導体層からなるp型光ガイド層を有することで、結晶性の悪化、Inによる光の損失を抑えて、素子特性が向上する。このとき、p側電子閉込め層を有することで、電子が活性層に効率的に閉じ込められて、素子特性が良好なものとなり、このように作用させるには、Alを含む窒化物半導体をp側電子閉込め層に用いることが必用であり、特に光の損失を低く抑えるため好ましくは、Inを含まない窒化物半導体を用いることであり、さらに好ましくは、 $Al_zGa_{1-z}N$ ($0 < z < 1$) で表される窒化物半導体を用いることである。

【0019】

前記活性層と第1の窒化物半導体層との間に、In混晶比が0である窒化物半導体からなるn型光ガイド層を有することを特徴とする。この構成により、導波路内において、n型光ガイド層は、Inを含まないことから光の損失のないガイド層となり、第1の窒化物半導体層は、導波路とクラッド層との間の屈折率差を大きくする層として機能し、素子特性が向上する。

【0020】

前記第1の窒化物半導体層の膜厚が300以上であることを特徴とする。この構成により、上述した第1の窒化物半導体層を有することによる導波路内の屈折率を大きくする効果が大きくなり、クラッド層との屈折率差を大きくでき、素子特性が向上する。

【0021】

前記活性層内で最もn型層側の層としてn側障壁層を有し、該n側障壁層と前記第1の窒化物半導体層との膜厚の和が、300以上であることを特徴とする。

【0022】

また、本発明の別の形態としては、前記p型クラッド層と、n型クラッド層とが、光閉込めのクラッド層であり、前記p型クラッド層と、n型クラッド層との少なくとも一方は、少なくともAlを含む窒化物半導体を有する第1の層と、第1の層とはバンドギャップエネルギーの異なる第2の層とが交互に積層された多層膜クラッド層を、光閉込め層とすることである。クラッド層を多層膜で形成する場合には、組成の異なる窒化物半導体を複数

10

20

30

40

50

積層するものであり、具体的にはA 1組成比の異なる窒化物半導体を複数積層する。このように多層膜で形成すると、単一膜の場合における結晶性の悪化、クラックの発生を、抑制することが可能となる。具体的には、多層膜として、第1の層と、それと異なる組成の第2の層とを積層し、屈折率、バンドギャップエネルギーの異なる層を複数設ける。例えば、A 1組成比 $\times 1$ の第1の層と、A 1組成比 $\times 2$ ($\times 1 < \times 2$)の第2の層とを積層した構造の多層膜でも良く、この時A 1組成比を $\times 1 > \times 2$ ($0 < \times 2$ 、 $\times 1 = 1$)とした構成とすると、A 1組成比の大きな第1の層で屈折率を小さく、バンドギャップエネルギーを大きくし、A 1組成比の小さい第2の層で、第1の層を形成することによる結晶性の悪化を抑えることができる。また、第1の層、第2の層を積層し、第2の層と組成の異なる第5の層を積層するなどして、更に複数の組成の異なる層を積層しても良い。また、第1の層、第2の層を交互に複数積層した構造であっても良く、少なくとも第1の層、第2の層を有する対を、複数対形成した構造としても良い。このような、多層膜構造では、A 1を含む窒化物半導体の結晶性悪化を抑えて、膜厚を大きくすることができるため、光閉込めにおいて重要となる膜厚を得ることが可能となる。

10

【0023】

多層膜構造のクラッド層において、超格子構造とすることで、更に結晶性を良好なものとして、クラッド層を形成することができ好ましい。ここで、超格子構造は、クラッド層の少なくとも一部に設けることであり、好ましくは全てにおいて超格子構造を設けることで、結晶性良くクラッド層を形成できる。この時、超格子構造としては、光ガイド層の場合と同様に、少なくとも第1の層と、第2の層とを交互に複数積層したり、少なくとも第1の層と第2の層とを有する対を、複数対設けた構造とする。超格子構造を構成する各層の膜厚としては、組成及び各層の組み合わせによりその膜厚は異なるが、具体的には、10 nm以下とすることであり、好ましくは7.5 nm以下とすることで結晶性を良好に保つことができ、更に好ましくは5 nm以下とすることで、より良好な結晶性とすることができる。このとき、少なくとも第1、2の層の一方を上記膜厚範囲とし、好ましくは両方の膜厚とも上記膜厚範囲とすることで厚膜でのクラッド層形成が良好な結晶性となる。

20

【0024】

クラッド層には、少なくとも各導電型の不純物をドーピングすることが好ましく、光ガイド層と同様に、全体にドーピングしても、部分的にドーピングしても良い。また、多層膜の場合にも光ガイド層と同様に、例えば前記第1の層、第2の層を有する多層膜で、両方にドーピングしても良く、又は第1の層と第2の層とで異なるドーピング量とするか、一方にドーピングして、他方をアンドーピングとした変調ドーピングとしても良い。例えば、前記第1の層/第2の層が、 $A 1_{\times 1}Ga_{1-\times 1}N$ ($0 < \times 1 = 1$) / $A 1_{\times 2}Ga_{1-\times 2}N$ ($0 < \times 2 = 1$ 、 $\times 1 > \times 2$)の超格子多層膜構造である場合に、A 1組成比の小さい第2の層に不純物ドーピングして、第1の層をアンドーピングとすることで、光ガイド層と同様に結晶性を良くすることができる。

30

【0025】

クラッド層の膜厚としては特に限定されないが、10 nm以上2 μ m以下、50 nm以上1 μ m以下の範囲で形成する。これは、10 nm以上とすることでキャリアの閉込めが可能で、2 μ m以下とすることで、結晶性の悪化を抑え、更に50 nm以上とすることで光閉込めが可能となりレーザ素子、端面発光素子などに用いることができ、1 μ m以下とすることで、結晶性良くクラッド層を形成することができる。

40

【0026】

さらに、上記光閉込めのクラッド層に加えて、前記p型クラッド層、n型クラッド層の少なくとも一方と、活性層との間に、光ガイド層を有し、該光ガイド層は、少なくともInを含む窒化物半導体を有する第3の層と、第3の層とはバンドギャップエネルギーの異なる第4の層とが交互に積層された多層膜光ガイド層を設けた構造とすることができる。この多層膜光ガイド層の組成については、上記多層膜クラッド層と同様に、超格子構造の多層膜とすることが好ましい。具体的には、In組成比の異なる窒化物半導体を複数積層する。このように多層膜で形成すると、図10に示すように、n型層側には、活性層近傍に

50

配置された第1の窒化物半導体層と、クラッド層側に配置された多層膜光ガイド層とが設けられる構造とでき、導波路の屈折率を低下できる構造となり、単一膜のInを含む窒化物半導体からなる光ガイド層を設ける場合における結晶性の悪化を、抑制することが可能となる。具体的には、多層膜として、第6の層と、それと異なる組成の第4の層とを積層し、屈折率、バンドギャップエネルギーの異なる層を複数設ける。例えば、In組成比 y_1 の第3の層と、In組成比 y_2 ($y_1 > y_2$) の第4の層とを積層した構造の多層膜でも良く、この時In組成比を $y_1 > y_2$ ($0 < y_2 < y_1 < 1$) とした構成とすると、In組成比の大きな第3の層で屈折率を大きく、バンドギャップエネルギーを大きくし、In組成比の小さい第4の層で、第3の層を形成することによる結晶性の悪化を抑えることができる。また、第3の層、第4の層を積層し、第4の層と組成の異なる第6の層を積層するなどして、更に複数の組成の異なる層を積層しても良い。また、第3の層、第4の層を交互に複数積層した構造であっても良く、少なくとも第3の層、第4の層を有する対を、複数対形成した構造としても良い。このような、多層膜構造では、Inを含む窒化物半導体の結晶性悪化を抑えて、導波路の屈折率を大きくした構造とでき、クラッド層との屈折率差を高めることができる。

10

【0027】

多層膜構造の光ガイド層において、超格子構造とすることで、更に結晶性を良好なものとして、光ガイド層を形成することができ好ましい。ここで、超格子構造は、光ガイド層の少なくとも一部に設けることであり、好ましくは全てにおいて超格子構造を設けることで、結晶性良く光ガイド層を形成できる。この時、超格子構造としては、クラッド層の場合と同様に、少なくとも第3の層と、第4の層とを交互に複数積層したり、少なくとも第3の層と第4の層とを有する対を、複数対設けた構造とする。超格子構造を構成する各層の膜厚としては、組成及び各層の組み合わせによりその膜厚は異なるが、具体的には、10 nm以下とすることであり、好ましくは7.5 nm以下とすることで結晶性を良好に保つことができ、更に好ましくは5 nm以下とすることで、より良好な結晶性とすることができる。このとき、少なくとも第1、2の層の一方を上記膜厚範囲とし、好ましくは両方の膜厚とも上記膜厚範囲とすることで光ガイド層形成が良好な結晶性となる。

20

【0028】

クラッド層には、少なくとも各導電型の不純物をドーピングすることが好ましく、光ガイド層と同様に、全体にドーピングしても、部分的にドーピングしても良い。また、多層膜の場合にも光ガイド層と同様に、例えば前記第3の層、第4の層を有する多層膜で、両方にドーピングしても良く、又は第3の層と第4の層とで異なるドーピング量とするか、一方にドーピングして、他方をアンドーピングとした変調ドーピングとしても良い。例えば、前記第3の層/第4の層が、 $\text{In}_{y_1}\text{Ga}_{1-y_1}\text{N}$ ($0 < y_1 < 1$) / $\text{In}_{y_2}\text{Ga}_{1-y_2}\text{N}$ ($0 < y_2 < 1$, $y_1 > y_2$) の超格子多層膜構造である場合に、In組成比の小さい第4の層に不純物ドーピングして、第3の層をアンドーピングとすることで、クラッド層と同様に結晶性を良くすることができる。

30

【0029】

また、光ガイド層の膜厚としては、特に限定されるものではないが、10 nm以上1 μm 以下、好ましくは50 nm以上500 nm以下とすることで、上記第1、2の窒化物半導体層とを組み合わせた構造において、優れた導波路構造が形成される。さらに好ましくは、100 nm以上300 nm以下とすることで、前記第1の窒化物半導体層、第2の窒化物半導体層と光ガイド層とを組み合わせる構成において、好適な光導波路が形成され、効率的に光が閉じ込められて、閾値電流を低減させることができる。

40

【0030】

n型層が、光ガイド層を有し、該n型層の光ガイド層と活性層との間に、第1の窒化物半導体層を有することで、良好な導波路構造が形成される。

前記p型層が、光ガイド層を有し、該p型層の光ガイド層が、前記第2の窒化物半導体層を有することで、Inを含む窒化物半導体による結晶性悪化を抑えると共に、導波路の屈折率を高めた構造とできる。

50

【0031】

【発明の実施の形態】

本発明の窒化物半導体素子に用いる窒化物半導体としては、 GaN 、 AlN 、もしくは InN 、又はこれらの混晶である窒化ガリウム系化合物半導体($In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ 、 $0 < x$ 、 $0 < y$ 、 $x + y < 1$)がある。その他に前記窒化ガリウム系化合物半導体の一部を、 B 、 P で置換した、混晶でもよい。また、活性層、井戸層、障壁層などに用いられる In を含む窒化物半導体は、具体的には、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x$ 、 $0 < y$ 、 $x + y < 1$)で表される窒化物半導体を用いることである。また、 Al を含む窒化物半導体として、具体的には、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x$ 、 $0 < y$ 、 $x + y < 1$)で表される窒化物半導体を用いることである。

10

【0032】

(活性層)

本発明における活性層としては、少なくとも In を含む窒化物半導体を有し、特に波長440nm以上の発光をするものである。ここで、 In を含む窒化物半導体としては、その組成は特に限定されないが、好ましくは $In_xGa_{1-x}N$ ($0 < x < 1$)で表される窒化物半導体を用いることである。このとき、 In を含む窒化物半導体には、ノンドープ、 n 型不純物ドープ、 p 型不純物ドープのいずれでもよいが、好ましくはノンドープ若しくはアンドープ、又は n 型不純物ドープの In を含む窒化物半導体を活性層内に設けることで、レーザ素子、発光素子などの窒化物半導体素子において、高出力化が図れる。また、活性層が、量子井戸構造を有する場合には、この In を含む窒化物半導体が少なくとも井戸層に用いられる。ここで、量子井戸構造としては、多重量子井戸構造、単一量子井戸構造のどちらでも良い。好ましくは、多重量子井戸構造とすることで、出力の向上、発振閾値の低下などが図ることが可能となる。活性層の量子井戸構造としては、後述する井戸層、障壁層を積層したものを用いることができる。この時、量子井戸構造である場合に、井戸層数としては、1以上4以下とすることで、例えばレーザ素子においては、閾値電流を低くすることが可能となり好ましく、更に好ましくは、井戸層数を2又は3とした多重量子井戸構造とすることで、高出力のレーザ素子、発光素子が得られる傾向にある。

20

【0033】

また、多重量子井戸構造において、井戸層に挟まれた障壁層は、特に1層であること(井戸層/障壁層/井戸層)に限るものではなく、2層若しくはそれ以上の層の障壁層を、「井戸層/障壁層(1)/障壁層(2)/障壁層(3)/・・・/井戸層」というように、組成・不純物量等の異なる障壁層を複数設けても良い。例えば、井戸層の上に、 Al を含む窒化物半導体からなる上部障壁層と、その上に上部障壁層よりもエネルギーバンドギャップの小さな下部障壁層を設ける構造などがあげられる。具体的には、井戸層の上に配置され Al を含む窒化物半導体からなる上部障壁層を設けることで、井戸層内に、 In の偏析、 In 濃度の面内分布を誘発し、量子ドット、量子細線効果が得られる傾向にあるため、これを用いても良い。この時、 Al を含む窒化物半導体としては、具体的には、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 < x$ 、 $0 < y$ 、 $x + y < 1$)で表される窒化物半導体を用いることであり、好ましくは3元混晶の $Al_zGa_{1-z}N$ ($0 < z < 1$)を用いることで、結晶性、制御性良く成長させることが可能となるため好ましい。また、 Al を含む窒化物半導体は、上部障壁層に限らず、井戸層の下に配置された下部障壁層としても良く、前記障壁層(1)と(3)に挟まれた障壁層(2)として設けても良い。好ましくは、井戸層の下部に接して設けられる下部障壁層以外に用いることであり、なぜなら良好な結晶性をもって井戸層が形成される傾向にあり、また上述した量子効果が得られやすい傾向にあるからである。井戸層の下に接する下部障壁層としては、 Al を含まない窒化物半導体を用いることが好ましく、 $In_xGa_{1-x}N$ ($0 < x < 1$)の窒化物半導体を用いることが、井戸層の結晶性の点から好ましく、さらには In 混晶比 x が0より大きい $InGaN$ とする方が、井戸層に対する下地層の効果が得られ好ましい。

30

40

【0034】

(井戸層)

50

本発明における井戸層としては、 In を含む窒化物半導体層を用いることが好ましく、この時具体的な組成としては、 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ ($0 < x < 1$) を好ましく用いることができる。このことにより、良好な発光・発振を可能とする井戸層となる。この時、 In 混晶比により、発光波長を決めることができる。

【0035】

また、井戸層の膜厚及び井戸層の数としては、膜厚及び井戸層の数を任意に決めることが可能である。具体的な膜厚としては、 10 \AA 以上 300 \AA 以下の範囲、好ましくは 20 \AA 以上 200 \AA 以下の範囲とすることで、 V_f 、しきい値電流密度を低減させることができる。また、結晶成長の観点からは、 20 \AA 以上であると、膜厚に大きなむらがなく比較的均一な膜質の層が得られ、 200 \AA 以下とすることで結晶欠陥の発生を低く抑えて結晶成長が可能となる。活性層内の井戸層数としては特に限定されず、 1 以上であり、この時、井戸層の数が 4 以上である場合には、活性層を構成する各層の膜厚が厚くなると、活性層全体の膜厚が厚くなって、 V_f の上昇を招くこととなるため、井戸層の膜厚を 100 \AA 以下の範囲として、活性層の膜厚を低く抑えることが好ましい。

【0036】

本発明の井戸層には、前記活性層内の In を含む窒化物半導体と同様に、 n 型不純物がドーピングされていても、いなくても良い。しかしながら、井戸層は In を含む窒化物半導体を用いられ、 n 型不純物濃度が大きくなると結晶性が悪化する傾向にあるため、 n 型不純物濃度を低く抑えて結晶性の良好な井戸層とすることが好ましい。具体的には、結晶性を最大限に良好なものとするために井戸層をアンドープで成長させることであり、この時 n 型不純物濃度は $5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 以下と実質的に n 型不純物を含まない井戸層とすることである。また、井戸層に n 型不純物をドーピングする場合には、 n 型不純物濃度が 1×10^{18} 以下 5×10^{16} 以上の範囲でドーピングされていると、結晶性の悪化を低く抑え、なおかつキャリア濃度を高くすることができ、しきい値電流密度、 V_f を低下させることができる。この時、井戸層の n 型不純物濃度としては、障壁層の n 型不純物濃度とほぼ同じか、若しくは小さくすることで、井戸層での発光再結合を促し、発光出力が向上する傾向にあるため好ましい。この時、井戸層、障壁層をアンドープで成長させて、活性層の一部を構成しても良い。

【0037】

特に、大電流で素子を駆動させた場合（高出力の LD 、ハイパワー LED 、スーパーフォトルミネセンスダイオードなど）では、井戸層がアンドープで、実質的に n 型不純物を含有しないことで、井戸層でのキャリアの再結合が促進され、高い効率での発光再結合が実現され、逆に n 型不純物が井戸層にドーピングされると、井戸層でのキャリア濃度が高いため、かえって発光再結合の確率が減少し、一定出力下で駆動電流、駆動電流の上昇を招く悪循環が発生し、素子の信頼性（素子寿命）が大幅に低下する傾向にある。このため、このような高出力の素子では、井戸層の n 型不純物濃度を、少なくとも $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 以下にすることであり、好ましくはアンドープ若しくは実質的に n 型不純物を含有しない濃度とすることで、高出力で安定した駆動が可能な窒化物半導体素子が得られる。また、井戸層に n 型不純物をドーピングしたレーザ素子では、レーザ光のピーク波長のスペクトル幅が広がる傾向にあるため、好ましくなく $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 、好ましくは $1 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ 以下とすることである。

【0038】

（障壁層）

本発明において、障壁層の組成としては、特に限定されないが、井戸層との間にバンドギャップエネルギー差が設けられる、井戸層よりもバンドギャップエネルギーが大きくなる、ように、井戸層より In 混晶比の低い In を含む窒化物半導体若しくは GaInN 、 AlIn を含む窒化物半導体などを用いることができる。具体的な組成としては、 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ ($0 < x < 1$), GaInN 、 $\text{AlIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ ($0 < x < 1$) などを用いることができる。ここで、井戸層に接して下地層となる障壁層（下部障壁層）の場合には、 Al を含まない窒化物半導体を用いることが好ましい。これは、 In を含む窒化物半導体からな

10

20

30

40

50

る井戸層を AlGaIn などの Al を含む窒化物半導体の上に直接成長させると、結晶性が低下する傾向にあり、井戸層の機能が悪化する傾向にあるためである。

【0039】

また、障壁層には、p 型不純物、n 型不純物がドーピングされていても、ノンドープであっても良いが、好ましくは n 型不純物がドーピングされているかノンドープ若しくはアンドープとされていることである。この時、障壁層中の n 型不純物をドーピングする場合にはその濃度として、少なくとも $5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 以上ドーピングされていることである。具体的には、例えば LED である場合には、 $5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 以上 $2 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 以下の範囲で n 型不純物を有することであり、また、より高出力の LED 及び高出力の LD では、 $5 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ 以上 $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 以下の範囲、好ましくは $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 以上 $5 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 以下の範囲でドーピングされていることが好ましく、このように高濃度でドーピングする場合には、井戸層を n 型不純物を実質的に含まないか、アンドープで成長させることが好ましい。

【0040】

一方で、図 3、5 ~ 8 に示すように、活性層内で、最も外側で、最も p 型層 13 側に位置する障壁層 2c は、好ましくは n 型不純物を実質的に含まないようにすることで、p 型層 13 からのキャリアの注入が良好となり、素子寿命が向上する傾向にある。これは、最も p 側の障壁層 2c は、p 型層に接して設けられ、p 型層からのキャリアの注入口となり、n 型不純物を有する場合には、キャリアの注入を妨げていると考えられ、n 型不純物を実質的に含まないことで、p 型層 13 からのキャリアがより深部の、p 型層から遠くの、井戸層にまで、安定して効率的にキャリアが注入されるためと考えられる。これは、特に、大電流で、多量のキャリアを注入するような、大電流駆動で高出力の LD、LED などにおいて、顕著にその素子寿命の向上効果が得られる傾向にある。この時、実質的に n 型不純物を含まないとは、最も p 側の障壁層 2c の n 型不純物濃度が、 $5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 未満となるようにすることである。また、この最も p 側の障壁層 2c は、好ましくは、活性層内で最も外側に形成されることが好ましいが、前記効果は小さくなるものの最も外側にでない場合、例えば・・・井戸層 / 障壁層 / 井戸層 / p 型層 13 の順に積層された構造、であっても、その効果は期待できる。この最も p 側の障壁層 2c の位置としては、好ましくは活性層内で最も外側に配置されること、更に好ましくは、後述する p 側電子閉込め層に接して設けられることで、電子の閉込めと、p 型層からのキャリアの注入が更に効率的なものとなる。さらにまた、最も p 側の障壁層 2c が、p 型不純物を有することで、更に深部の井戸層、p 型層 13 から遠くに位置する井戸層、に対しても p 型層 13 からのキャリアが効率的に注入され、さらに素子寿命が向上する傾向にあるため、n 型不純物を実質的に含まず且つ p 型不純物を含む障壁層とすることが好ましい。この時、p 型不純物量としては、 $5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 以上 $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 以下の範囲、好ましくは、 $5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 以上 $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 以下の範囲である。これは、 $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 以上と p 型不純物を多くしても、キャリア濃度は殆ど変化しないため、不純物を含有することによる結晶性の悪化、不純物による光の散乱作用による損失が大きくなり、かえって活性層における発光効率を低下させる。更に、 $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 以下であると、上記不純物の増加による発光効率の低下を低く抑え、なおかつ活性層内への p 型層からのキャリア濃度を安定して高く保つことが可能となる。加えて、p 型不純物の下限としては、僅かながらでも p 型不純物を有することが好ましく、これは不純物が低濃度である場合には、高濃度である場合に比較して高い確率で、p 型不純物がキャリアとして機能するものとなる傾向にあるためである。

【0041】

障壁層の膜厚としては、特に限定されず 500 以下、より具体的には井戸層と同様に 10 以上 300 以下の範囲が適用できる。

【0042】

(導波路構造)

本発明の窒化物半導体素子において、素子構造としては、活性層を、p 型窒化物半導体層、n 型窒化物半導体層内の n 型クラッド層と p 型クラッド層とで挟み込む構造を少なくと

10

20

30

40

50

も有するものとなる。このとき、活性層には、 In を含む窒化物半導体を用いることが好ましく、さらに、活性層内で、波長 440nm 以上の発光が得られる In 混晶比とすることが好ましい。また、クラッド層と活性層との間に、活性層を挟む光ガイド層を設けても良い。ここで、 p 型クラッド層と n 型クラッド層とで挟まれる領域を、導波路と呼ぶ。

【0043】

ここで、 n 型クラッド層、 p 型クラッド層としては、 Al を含む窒化物半導体が好ましく用いられ、このことにより、導波路と両クラッド層との間で、屈折率差を大きくとることができる。このとき、クラッド層の窒化物半導体には、 In を含まないことが好ましく、なぜなら、 In を含む窒化物半導体は、 In を含まない場合に比べて、結晶性が悪化する傾向にあり、特に、活性層の上に p 型クラッド層を有する構造では、その p 型クラッド層に In を含む窒化物半導体を用いると、結晶性の悪化が大きく、素子特性を大きく悪化させるものとなる。このとき、クラッド層に用いる窒化物半導体として具体的には、 $\text{Al}_b\text{Ga}_{1-b}\text{N}$ ($0 < b < 1$) が好ましく用いられる。

【0044】

本発明において、図2に示す光ガイド層のように、クラッド層と活性層との間の層が、導波路の形成において、重要なものとなる。これは、導波路内に光を閉じ込めるためには、導波路に比べて相対的にクラッド層の屈折率を下げて、屈折率差を大きくするか、導波路内の屈折率を大きくすることであるが、活性層からの光の波長が長くなると、困難な問題が発生する。それは、 AlGaIn と InGaIn との屈折率差では、波長が短い領域、例えば 400nm 付近で、大きな屈折率差を有しているが、波長が長くなるに従って、その屈折率差が小さくなるからである。このため、クラッド層に用いられる窒化物半導体の Al 混晶比を大きくして、クラッド層の屈折率を小さくするか、若しくは光ガイド層に In を含む窒化物半導体を用いて、導波路内の屈折率を小さくして、導波路とクラッド層との屈折率差を大きくすることが必要になる。しかしながら、クラッド層の Al 混晶比を大きくすると、結晶性の悪化が大きく、またクラックなどの発生もあり、リーク電流の原因になるなど、素子特性を悪化させるため、クラッド層のように、厚膜で高い Al 混晶比の窒化物半導体を素子構造内に設けることが困難である。さらに、活性層を除く導波路内の窒化物半導体層、例えば光ガイド層、に、 In を含む窒化物半導体を用いて、導波路の屈折率を大きくする構造では、 In を含む窒化物半導体による光の吸収が起こり、このため、導波路内で光の損失が発生し、閾値電流の増大など素子特性の悪化が起こる。また、上述したように、 p 型窒化物半導体として、例えば、図2に示す p 型光ガイド層に、 In を含む窒化物半導体を用いると、 p 型不純物として好ましく用いられる Mg を含むことでの結晶性の悪化が大きく、結果として素子特性を悪化させる。

【0045】

本発明では、両クラッド層に挟まれた導波路として、活性層を挟む第1の窒化物半導体層、第2の窒化物半導体層を有することで、長波長における導波路、及び結晶性の問題を解決している。すなわち、 n 型クラッド層と活性層との間に、 In を含む窒化物半導体からなる第1の窒化物半導体層を設けることで、導波路内の屈折率をクラッド層に比して、相対的に大きくし、一方で、 p 型クラッド層と活性層との間に、 In を含まない(In 混晶比が0の)窒化物半導体からなる第2の窒化物半導体層を設けて、 p 型層側の結晶性悪化の問題を解決した構造を有するものである。このため、導波路内は、 In を含む第1の窒化物半導体層と In を含まない第2の窒化物半導体層とで活性層を挟む構造で、組成が非対称な構造を有している。

【0046】

従来、活性層の発光波長が長波長になる導波路構造としては、上述した長波長域における InGaIn と AlGaIn との屈折率差の低下の問題と、 Al 高混晶による結晶性の悪化の問題から、導波路内に InGaIn などの In を含む窒化物半導体を光ガイド層に用いた構造、例えば InGaIn 単一膜、 $\text{InGaIn}/\text{GaIn}$ 多層膜(超格子層)などが考えられていた。しかしながら、 p 型光ガイド層を $\text{InGaIn}/\text{GaIn}$ の超格子多層膜として結晶性の悪化を低く抑えてもなお素子特性に影響を及ぼさない程度までの結晶性を得ることが困

難であり、また、上述した I_n による光の損失も素子特性悪化の大きな原因となる。これは、活性層の発光波長が長くなるほど、前記 I_nGaN と $AlGaIn$ との屈折率差が小さくなり、導波路内の屈折率を大きくするために光ガイド層などに用いる窒化物半導体の I_n 混晶比を大きくしなければならないが、 I_n 混晶比が大きくなれば結晶性、光の損失などによる素子特性の悪化も大きくなることにある。

【0047】

しかしながら、本発明では、導波路内において、 n 型クラッド層側に I_n を含む第 1 の窒化物半導体層を用いて導波路全体の屈折率をクラッド層に比して大きくし、クラッド層との屈折率差を大きくし、 p 型クラッド層側に第 2 の窒化物半導体層を設けることで、 I_n を含む窒化物半導体による結晶性の悪化と、光の損失を回避し、素子特性に優れる窒化物半導体素子が得られるものである。以下、各層について、説明する。

【0048】

(第 1 の窒化物半導体層)

本発明における第 1 の窒化物半導体層は、導波路内において、活性層と n 型クラッド層との間に配置され、 I_n を含む窒化物半導体からなるものである。ここで、第 1 の窒化物半導体層の組成としては、好ましくは、 Al を含まない窒化物半導体とすることであり、これにより、 Al を含む窒化物半導体を用いたクラッド層との屈折率差を大きくすること、すなわち、クラッド層とそれに挟まれた導波路において、導波路内を相対的に屈折率を大きくすることが可能となり、また $I_{n_z}Ga_{1-z}N$ ($0 < z < 1$) で表される窒化物半導体を形成することで、結晶性も良い第 1 の窒化物半導体層を得ることができる。また、第 1 の窒化物半導体層と活性層若しくは n 型クラッド層との間に、別の層を設けても良く、設けなくても良く、すなわち、第 1 の窒化物半導体層を活性層若しくは n 型クラッド層、又は両方に接して設けても良く、どちらか一方若しくは両方に離れて設けても良い。また、第 1 の窒化物半導体層を、それとは組成の異なる層と交互に積層するなどして、複数積層した多層膜構造を用いても良い。本発明の第 1 の窒化物半導体層は、活性層と n 型クラッド層との間にあって、導波路内にあることから、光ガイド層として機能する一方、 I_n を含むことで導波路全体の屈折率を大きくして、導波路内への光の閉込めに寄与することから、 p 型層側の第 2 の窒化物半導体層に比して、第 2 の光閉込め層としても機能していると考えられる。

【0049】

また、第 1 の窒化物半導体層の I_n 混晶比 z は、活性層中の I_n を含む窒化物半導体の I_n 混晶比、若しくは量子井戸構造の活性層の場合には井戸層の I_n 混晶比、を w とすると、好ましくは $z > w$ とすることであり、更に好ましくは $z < w$ とすることである。例えば、図 5、6 などに示すように、活性層 12 中の井戸層 1 の混晶比 w に比べて、第 1 の窒化物半導体層 31 の I_n 混晶比 z を、 $z > w$ となるようにすることで、図に示すように、段階的なバンドギャップエネルギー構造を形成でき、導波路内の活性層へのキャリアの効率的な注入、特に n 型層 11 側からのキャリアの注入に寄与するものとなる。この時、 $z < w$ であることで、井戸層内の I_n を含む窒化物半導体層、若しくは井戸層、と第 1 の窒化物半導体層との間に、大きなバンドギャップエネルギー差を設けることができ、前記キャリアの注入効率を向上させることができる。更に、第 1 の窒化物半導体層 31 が活性層 12 に隣接して設けられ、活性層中で最も外側で、最も n 型層 11 側に配置され、第 1 の窒化物半導体層 31 に隣接する障壁層 2a が設けられる場合には、第 1 の窒化物半導体層 31 の I_n 混晶比 z は、この障壁層 2a の I_n 混晶比 v に比べて、 $z > v$ となるようにすると更に好ましく、更に $z < v$ となるようにすると好ましい。これは、図 5、6 に示すように、 $z > v$ であると活性層 12 と n 型層 11 との接合部付近で、 n 型層 11 から活性層 12 に近づくに従って段階的に、バンドギャップエネルギーが小さくなる構造とでき、 n 型層 11 から活性層へのキャリアの注入を効率的にし、図 5 に示すように更に段階的なバンドギャップ構造とすることができ、更に効果的なものとなるからである。

【0050】

また、一方で、図 10 に示すように、第 1 の窒化物半導体層の I_n 混晶比 z を、障壁層の

I_n 混晶比 v とほぼ同じか、それよりも大きくすると ($z < v$)、好ましくは大きくすること ($z > v$) であり、バンドギャップエネルギーが障壁層よりも小さくなるが、 I_n 混晶比が大きく、障壁層 (n 側障壁層) よりも大きな膜厚で形成される第 1 の窒化物半導体層により、導波路の屈折率が大きくなり、光閉込めのクラッド層との屈折率差を大きくすることができる。この場合、 n 型層からのキャリアが注入される際に、第 1 の窒化物半導体層と n 側障壁層との間に障壁が設けられる構造となるが、バイアス地においては、その障壁が小さくなり、その影響は少なくなる。一方で、 n 側障壁層 2 a が、主に p 型層からのキャリアの閉込め層となるが、窒化物半導体ではホールの拡散長が小さいため、障壁が小さく、膜厚が薄くなることによる影響は比較的強く抑えられる。また、光ガイド層と第 1 の窒化物半導体層との I_n 混晶比については、図 8 に示すように、光ガイド層よりもバ

ンドギャップエネルギーを小さくして、 I_n 混晶比を大きくすることが好ましい。これは、第 1 の窒化物半導体層が屈折率を高めるために設け、導波路構造の中心部に当たる活性層近傍の屈折率を高めることが好ましいことから、 I_n 混晶比を光ガイド層よりも大きくした第 1 の窒化物半導体層を、光ガイド層よりも活性層の近くに設けることで、より優れた導波路構造を形成することができる。ここで、本発明において、クラッド層、光ガイド層が多層膜で構成される場合、特に超格子多層膜で構成される場合において、各層の I_n 混晶比、 A_1 混晶比、バンドギャップエネルギーは、平均組成、平均エネルギーで、他の層と比較する者であり、この平均組成、平均エネルギーは、多層膜を構成する第 1 の層 (第 3 の層)、第 2 の層 (第 4 の層) の各膜厚で、 A_1 、 I_n 組成、エネルギーを、加重平均した値となる。例えば、光ガイド層が、 I_n 混晶比 y_1 、膜厚 d_3 の第 3 の層、 I_n 混晶比 y_2 、膜厚 d_4 の第 4 の層とが交互に積層された超格子構造にあっては、 I_n の平均混晶比 y_m は、 $y_m = [(d_3 \times y_1) + (d_4 \times y_2)] / (d_3 + d_4)$ で求められる。

【0051】

また、図 5, 6, 10 に示すように、クラッド層 25, 30 と活性層 12 との間に、光ガイド層 26, 29 が設けられ、さらに n 型層 11 側にあっては、光ガイド層 26 と活性層との第 1 の窒化物半導体層を有する場合、図 10 に示すように、光ガイド層の I_n 混晶比若しくは平均組成よりも、活性層内で外側に配置された n 側障壁層 2 a の I_n 組成 z を大きくすることが好ましい。これは、上述した第 1 の窒化物半導体層による屈折率増加の機能を好適に引き出すものであり、具体的には、光ガイド層 26 よりも活性層側に設けられる第 1 の窒化物半導体層の I_n 混晶比を大きくし、活性層近傍の屈折率を高めることで、導波路中央付近に位置する活性層を中心に屈折率の大きな層が設けられることで、良好な光分布を実現できる。一方、 p 型層側にあっては、 p 側障壁層がこの役割を担い、すなわち、 p 側障壁層 2 c の I_n 組成比を、 p 型層の光ガイド層 29 の I_n 組成比より大きくすることで、第 1 の窒化物半導体層と同様な機能が得られる。

【0052】

ここで、第 1 の窒化物半導体層の位置における前記各形態について言及すると、活性層及び n 型クラッド層に接して第 1 の窒化物半導体層を設ける形態では、 I_n を含む窒化物半導体を結晶性良く厚膜で形成することが困難な傾向にあることから、導波路として十分な膜厚で形成すると結晶性の悪化による素子特性の悪化が現れ、逆に結晶性が素子特性を悪化しない程度の膜厚で形成すると、導波路として機能するのに不十分な膜厚となり、クラッド層外への光の漏れによる損失により素子特性の悪化が起こる傾向にある。第 1 の窒化物半導体層を活性層と n 型クラッド層との間に、複数積層した多層膜とする場合には、例えば超格子構造として、 I_n を含まない窒化物半導体と共に多数積層して、結晶性の悪化を抑えて厚膜を形成することができる。例えば、 I_nGaN/GaN の多層膜層、若しくは、 n 型クラッド層から活性層に近づくにつれて I_n 混晶比が大きくなるように組成傾斜させた構造とすることができる。一方で、導波路の屈折率を単一膜と同等とするには、多層膜の膜厚が厚くなり、その多層膜内において、 I_n を含む第 1 の窒化物半導体層が散在する構造となることから、単一膜よりも厚膜の多層膜でもって I_n による光の損失が発生することから、単一膜よりもその損失が大きくなる傾向にある。また、第 1 の窒化物半導

体層の位置としては、具体的にはn型クラッド層と活性層との間であり、n型クラッド層と活性層との間に光ガイド層が設けられる場合には、図5, 6, 10に示すように光ガイド層と活性層との間、又は図6, 7に示すように光ガイド層内部、若しくは光ガイド層内部に第1の窒化物半導体層を設けることができる。本発明において上記様々な形態を適用しうが、好ましくは活性層に近づけて、更に好ましくは活性層に接して配置することが良い傾向にある。これは、詳しいことは不明であるが、図5, 6等に示すように、n型クラッド層から活性層に至る領域で、バンドギャップ構造を段階的なものとし、n型層側11からのキャリアの注入を促進させることが影響していると考えられる。

【0053】

第1の窒化物半導体層の膜厚としては、特に限定されるものではないが、上述したようにInによる光の損失の発生を考慮して、少なくとも1500以下とすることであり、好ましくは300以上とすることで導波路全体の屈折率を上昇させ、n型クラッド層との間に大きな屈折率差を形成することができ、損失が少なく、閾値電流を低減させた優れた導波路が形成される。この時、後述するように、導波路としての機能は、クラッド層と活性層とで挟まれる領域の膜厚の総和に作用されることから、n型クラッド層と活性層とで挟まれる領域の膜厚の総和を考慮して、第1の窒化物半導体層を決定すると良い。また、図5, 6などに示すように、第1の窒化物半導体層が最もn型層側の障壁層2aに隣接して配置される場合には、第1の窒化物半導体層は、障壁層として寄与すると考えられることから、この場合の第1の窒化物半導体層の膜厚は、障壁層2aとの膜厚の総和が300以上となるようにすることで、障壁層、光の閉込めとして良好に寄与するものとなり好ましく、この時の膜厚の上限としては前記の1500以下とすることが好ましい。

【0054】

第1の窒化物半導体層には、n型不純物がドーピングされていても、ドーピングされていなくても良いが、好ましくはn型不純物をドーピングして、良好なn型導電性を有することである。この時、第1の窒化物半導体層は、Inを含む窒化物半導体であるため、上述したようにp型不純物ほどではないものの、n型不純物をドーピングすることによる結晶性の悪化があるため、好ましくはドーピング量を $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 以下の範囲とすることで、Inを含む窒化物半導体における結晶性の悪化を抑制できる。

【0055】

(第2の窒化物半導体層)

本発明において、第2の窒化物半導体層としては、In混晶比が0の窒化物半導体を用いることであり、この第2の窒化物半導体層をp型クラッド層と活性層との間に設けることで、結晶性に優れ、導波路として機能する層となる。これは、前記第1の窒化物半導体層とこの第2の窒化物半導体層とで活性層を挟む構造を導波路内に設けること、すなわちn型層側の第1の窒化物半導体層とp型層側の第2の窒化物半導体層とし、両方の層を活性層を介して対向して配置し、組成が異なることにより、導波路内で異なる機能を有する非対称な導波路構造とするものである。第2の窒化物半導体層に用いられる窒化物半導体のIn混晶比uを、 $u = 0$ とすることで、結晶性に優れた層を形成でき、結晶性悪化によるVf、閾値電流の上昇を回避できる。これは、Inを含む窒化物半導体は、Inを含まないものに比べて、結晶性が悪化する傾向にあるからである。また、第2の窒化物半導体層は、第1の窒化物半導体層と異なり、p型不純物をドーピングしてp型導電性を持たせる必要があり、不純物ドーピングによる結晶性の悪化が起こり、更にp型不純物として好ましく用いられるMgでは大幅な結晶性の悪化が起こり、これは、Inを含む窒化物半導体において、Inを含まないものに比べて、その結晶性の悪化は顕著なものである。

【0056】

また、図2~4に示すように、通常、LED、LDなどの窒化物半導体素子では、基板上に、n型層11/活性層12/p型層13の順に積層された構造が多く採用されているが、このような場合には、Inを含む窒化物半導体を用いた活性層12の下部に配置されたn型層11と、上部に配置されたp型層13とでは、通常成長条件が異なり、活性層よりも上部に配置されたp型層13では、通常活性層中のInが分解するなどして結晶性を悪

化させないような温度条件で成長させる必要があり、n型層11はそのような制限がない。このことから、低い温度で成長させるp型層13では、良好な結晶成長条件で、成長させることが困難な場合がある。

【0057】

具体的には、図2に示すように、n型層11、p型層13との間に活性層11が設けられた構造を、基板（図示せず）の上などに有し、本発明の基本的な構成として、n型層11には、n型クラッド層26が設けられ、p型層13には、p型クラッド層30が設けられた構造がある。更に、各導電型層には、これらクラッド層26、30よりも活性層から離れた位置に、n型コンタクト層25、p型コンタクト層が形成し、電極をその表面に設けても良く、基板の上に、n型層11、活性層12、p型層13が順に積層された構造において、基板のn型層に対向する面側に電極を設けて、n型コンタクト層25を電荷注入層として、n型クラッド層26よりも高濃度でn型不純物ドーブをドーブした層を設けることもできる。また、これらクラッド層がコンタクト層を兼ねる構成であってもよい。このような基本的な構造において、図3に示すように、第1の窒化物半導体層31、第2の窒化物半導体層32を、それぞれn型クラッド層26、p型クラッド層30と活性層12との間に、設ける構造となる。また、図3、4に示すように、光ガイド層26、29が、活性層とクラッド層との間に設けられる場合には、光ガイド層と活性層との間に、第1、2の窒化物半導体層が設けられても良く、光ガイド層が、第1の窒化物半導体層若しくは、第2の窒化物半導体層を有する構造とすることもできる。このため、光ガイド層が、多層膜構造を有する場合には、第1の窒化物半導体層、若しくは第2の窒化物半導体層を有する多層膜構造とできる。

【0058】

第2の窒化物半導体層の組成としては、Inを含まない窒化物半導体をもちいることであり、好ましくは $Al_tGa_{1-t}N$ ($0 < t < 1$) で表される窒化物半導体を用いることである。また、この時、p型クラッド層との屈折率差を設けるため、p型クラッド層のAl混晶比より第2の窒化物半導体のAl混晶比tを小さくすることが好ましい。更にまた、クラッド層と導波路との屈折率差を考慮して、 $t = 0.5$ として、低いAl混晶比で形成するか、導波路内の屈折率を最大限に大きくするために、 $t = 0$ のGaNを用いることが最も好ましい。また、第2の窒化物半導体層は、p型不純物を有することが好ましく、p型不純物を含有して、p型導電性を有することで良好な導電性のp型層として機能させることができる。この時、p型不純物のドーブ量としては特に限定されないが、Inを含まない窒化物半導体であってもInを含む場合に比べて結晶性の悪化は小さいものの、ドーブ量が小さいほど結晶性が良好になる傾向にあるため、好ましくは $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 以下の範囲とすることで良好な結晶性の第2の窒化物半導体層が得られる。後述する実施例では、第2の窒化物半導体層をアンドープで成長させて、隣接層からの拡散によりp型不純物がドーブされるが、特にこの方法に限定されず、他の層についても同様であるが、成長後の拡散でも、ドーブしながら成長させる方法でも、どちらでも良い。

【0059】

第2の窒化物半導体層は、単一膜で形成されても良く、多層膜で形成されても良い。多層膜としては、 $AlGaInN / GaN$ を複数積層した多層膜でも良く、Al混晶比を活性層から離れるに従って大きくするような組成傾斜させた層であっても良い。

【0060】

第2の窒化物半導体層をp型光ガイド層に用いる場合には、第2の窒化物半導体層だけでp型光ガイド層を構成しても良く、第2の窒化物半導体層とは組成の異なる層と組み合わせて構成しても良い。この時、好ましくはInを含まない第2の窒化物半導体層だけで構成すると、導波路内のInによる光の損失が回避でき好ましい。この時、p型光ガイド層の膜厚としては、特に限定されるものではないが、少なくとも200 nm以上の膜厚で形成することで、導波路として良好で、損失の少ない光の導波が実現され、閾値電流の低下につながり、この時膜厚の上限としては4000 nm以下とすることで、閾値電流、Vfの上昇を抑えることができ、好ましくは500 nm以上2000 nm以下とすることで、閾値電流

、 V_f を低くし、光の導波に適した膜厚の導波路が形成できる。この膜厚については、クラッド層と活性層に挟まれる領域の n 型層側、すなわち n 型クラッド層と活性層とで挟まれる領域の膜厚にも適用できる。具体的には、 n 型クラッド層と活性層との間に、第1の窒化物半導体層を有する場合にはその膜厚、第1の窒化物半導体層と n 型光ガイド層などの別の層を有する場合にはそれらの層の膜厚の総和について、適用できる。このように、クラッド層と活性層に挟まれた領域の膜厚を、 p 型層側、 n 型層側共にほぼ同等な膜厚として膜厚が活性層を介して対称な導波路構造としても良く、両者の膜厚を異ならしめて、膜厚が非対称な導波路構造としても良く、得られる窒化物半導体素子の特性を考慮して適宜選択すればよい。

【0061】

また、本発明の別の態様によっては、第2の窒化物半導体層の I_n 混晶比 u が、第1の窒化物半導体層の I_n 混晶比 z より小さくする構成($u < z$)では、 p 型層側に、 I_n を含む窒化物半導体が設けられることによる結晶性低下を抑えて、 p 型層側にも導波路の屈折率を大きくする層を形成でき、導波路の光分布が、 n 型層側にシフトすることを抑えた構造とできる。

【0062】

(p 側電子閉込め層)

本発明において、 p 型窒化物半導体層として、特にレーザ素子、端面発光素子において、 p 側電子閉込め層を設けることが好ましい。この p 側電子閉込め層としては、 Al を含む窒化物半導体を用いるものであり、具体的には $Al_{1-x}Ga_xN$ ($0 < x < 1$)を用いる。この時、 Al 混晶比 x としては、電子閉込め層として機能するように、活性層より十分に大きなバンドギャップエネルギーを有する(オフセットをとる)必要があり、少なくとも $0.1 < x < 1$ の範囲とすることであり、好ましくは $0.2 < x < 0.5$ の範囲とすることである。なぜなら、 x が 0.1 以下であるとレーザ素子において、十分な電子閉込め層として機能せず、 0.2 以上であると十分に電子閉込め(キャリアの閉込め)がなされ、キャリアのオーバーフローを抑え、加えて 0.5 以下であるとクラックの発生を低く抑えて成長させることができ、更に好ましくは x を 0.35 以下とすることで良好な結晶性で成長できる。この時、 Al 混晶比は、 p 型クラッド層よりも大きくすることが好ましく、これはキャリアの閉込めには光の閉込めとなるクラッド層より高い混晶比の窒化物半導体が必要となるからである。この p 側電子閉込め層は、本発明の窒化物半導体素子に用いることができ、特にレーザ素子のように、大電流で駆動させ、多量のキャリアを活性層内に注入する場合において、 p 側電子閉込め層を有していない場合に比べて、効果的なキャリアの閉込めを可能とし、レーザ素子だけでなく、高出力のLEDにも用いることができる。

【0063】

本発明の p 側電子閉込め層の膜厚としては、少なくとも 1000 Å以下とすることであり、好ましくは 400 Å以下とすることである。これは、 Al を含む窒化物半導体は、他の窒化物半導体(Al を含まない)に比べて、バルク抵抗が大きく、更に p 側電子閉込め層の Al 混晶比は上述したように高く設定されるため、 1000 Åを超えて素子内に設けると、極めて高抵抗な層となり、順方向電圧 V_f の大幅な増加を招くこととなるためであり、 400 Å以下であると V_f の上昇を低く抑えることが可能で、更に好ましくは 200 Å以下とすることで更に低く抑えることが可能となる。ここで、 p 側電子閉込め層の膜厚の下限としては、少なくとも 10 Å以上、好ましくは 50 Å以上とすることで、電子閉込めとして良好に機能する。

【0064】

また、レーザ素子において、この p 側電子閉込め層は、図3、4に示すように、電子閉込め層として機能させるため、活性層とクラッド層との間に設けるものであり、更に第2の窒化物半導体層と活性層との間に設けることである。また、窒化物半導体素子が導波路構造を有し、クラッド層と活性層との間に光ガイド層を有する場合において、 p 側電子閉込め層は、光ガイド層29と活性層27との間に設けることで、活性層に近接して p 側電子

10

20

30

40

50

閉込め層が設けられた構造とできるため好適なキャリア閉込め構造を実現でき、また別の形態としては、光ガイド層内部にp側電子閉込め層を設ける構成とすることもでき、これによりp側電子閉込め層と活性層とが離間した構造とでき、p側電子閉込め層が活性層に近接することによる内部応力、圧電界、発熱作用を回避でき好ましい。この時、活性層とp側電子閉込め層との距離は、少なくとも1000以下とすることでキャリアの閉込めとして機能し、好ましくは500以下とすることで良好なキャリアの閉込めが可能となる。すなわち、p側電子閉込め層は活性層に近いほどキャリアの閉込めが効果的に機能し、その上レーザ素子、発光素子において活性層とp側電子閉込め層の間には、殆どの場合、特に他の層を必要とすることがないため、通常は活性層に接してp側電子閉込め層を設けうることが最も好ましい。この時、量子井戸構造の活性層内で最もp型窒化物半導体層側に位置する層と、p側電子閉込め層と、を接して設けると結晶性が悪化する場合に、それを避けるため結晶成長におけるバッファ層を両者の間に設けることも可能である。例えば、活性層の最もp側の層をInGa_N、AlGa_Nのp側電子閉込め層との間に、Ga_Nからなるバッファ層を設けること、又はp側電子閉込め層よりも低いAl混晶比のAlを含む窒化物半導体からなるバッファ層、などがある。

10

【0065】

ここで、p側電子閉込め層として、具体的には、p側電子閉込め層が活性層に近いほどしきい値電流密度を低下させるが、近くなるほど素子寿命が低下させるものとなる。これは、上述したように、p側電子閉込め層が他の層に比べて極めて高い抵抗を有する層であるため、素子駆動時において発熱量の大きなものとなり、すなわち素子内において高温を呈しているものと考えられ、これが熱に弱い活性層、井戸層に悪影響を及ぼし素子寿命を大きく低下させているものと考えられる。一方で、上述したように、キャリアの閉込めを担うp側電子閉込め層は、活性層、特に井戸層に近づくほどキャリアの閉込めが効果的になるため、活性層から離れるとその効果が弱まる。このため、p側電子閉込め層は、キャリア閉込めとして好適に機能するように、活性層よりもバンドギャップエネルギーを大きく、好ましくは活性層内の少なくとも1つの障壁層よりもバンドギャップエネルギーより大きくし、更に好ましくは活性層内の全ての障壁層よりもバンドギャップエネルギーが大きくなるような組成が選択される。また、導波路構造を有する端面発光素子、レーザ素子においては、p側電子閉込め層を、光ガイド層の一部、好ましくは全部よりもバンドギャップエネルギーを大きくすることがガイド層によるキャリア閉込めが不十分な場合に、ガイド層よりも活性層の近くに配置されたp側電子閉込め層により好適な活性層内へのキャリア閉込めが実現でき好ましく、さらには、光閉込めのクラッド層の一部、若しくは全部よりもバンドギャップエネルギーを大きくすると大きな障壁が、活性層近傍に配置された構造となり好適なキャリア閉込めを実現し、また、p側電子閉込め層の膜厚を小さくしてもその機能を維持することが可能となり好ましい。

20

30

【0066】

従って、素子寿命の低下を抑えるために、図5、6において、活性層内で最もp側電子閉込め層に近い井戸層1bからp側電子閉込め層28の距離を少なくとも100以上とすることであり、好ましくは120以上とすることであり、更に好ましくは140以上とすることである。なぜなら、井戸層とp側電子閉込め層との距離が100より短いと、素子寿命が急激に低下する傾向が観られるためであり、120以上であると素子寿命の大幅な向上が可能であり、150以上であると更に素子寿命が向上する傾向にあるが、しきい値電流密度は徐々に高くなる傾向が観られ始める。更に、その距離が200より大きくなると、しきい値電流密度の明らかな上昇傾向が観られ、400より大きいとしきい値電流密度の急激な上昇が起こる傾向にあるため、上記距離の上限としては、400以下、好ましくは200以下とすることである。これは、p側電子閉込め層が井戸層から離れることで、キャリア閉込めの効率が低下し、これが主な原因となってしきい値電流密度が上昇し、また発光効率の低下を招くものと考えられる。

40

【0067】

本発明のp側電子閉込め層には、通常p型不純物がドーブされ、レーザ素子、ハイパワー

50

LEDなどの大電流で駆動させる場合には、キャリアの移動度を高めるため、高濃度でドーピングする。具体的なドーピング量としては、少なくとも $5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 以上ドーピングすることで、好ましくは $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 以上ドーピングすることであり、前記大電流駆動の素子においては、 $1 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ 以上、好ましくは $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ 以上ドーピングすることである。p型不純物量の上限は特に限定されないが、 $1 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ 以下とすることである。但し、p型不純物量が多くなると、バルク抵抗が大きくなる傾向にあり、結果としてVfが上昇することになるため、これを回避する場合に好ましくは、必要なキャリア移動度を確保しうる最低限のp型不純物濃度とすることである。また、p側電子閉込め層を低濃度でドーピングすること、例えば、ガイド層、クラッド層などのp側電子閉込め層近傍の層よりも低濃度でドーピングすることも可能であり、またノンドープ層とすることもできる。

10

【0068】

本発明の窒化物半導体素子では、実施例に示すように、ストライプ状の導波路として、リッジを設けた後、リッジ側面に埋込層となる絶縁膜を形成する。この時、埋込層としては、ここで、第2の保護膜の材料としてはSiO₂以外の材料、好ましくはTi、V、Zr、Nb、Hf、Taよりなる群から選択された少なくとも一種の元素を含む酸化物、SiN、BN、SiC、AlNの内の少なくとも一種で形成することが望ましく、その中でもZr、Hfの酸化物、BN、SiCを用いることが特に好ましい。更に、埋込層として、半絶縁性、i型の窒化物半導体、リッジ部とは逆の導電型、実施例においてはn型の窒化物半導体、電流狭窄層とするにはAlGa_{1-x-y}NなどのAlを含む窒化物半導体、等を用いることができる。また、エッチングなどによりリッジを設けずに、B、Alなどのイオンを注入して、非注入領域をストライプ状として、電流が流れる領域とする構造をとることもできる。この時用いられる窒化物半導体としては、 $\text{In}_x\text{Al}_{1-y}\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ ($0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, x + y = 1$) で表される窒化物半導体を好ましく用いることができる。

20

【0069】

また、リッジ幅としては、1 μm以上3 μm以下、好ましくは1.5 μm以上2 μm以下とすることで、光ディスクシステムの光源として、優れたスポット形状、ビーム形状のレーザ光が得られる。

【0070】

ここで、各図について以下に説明する。図2、3は、本発明の一実施形態に係る模式断面図であり、特にレーザ素子構造、発光素子構造において、活性層12がn型層11とp型層13とで挟み込まれる構造を示すものである。図2は、活性層12が上部クラッド層30と下部クラッド層25で挟まれ、活性層12と上部クラッド層30との間に電子閉込め層であるp側電子閉込め層28を有する素子構造を説明するものである。図3、4は、本発明の特徴として、上部、下部クラッド層に挟まれた領域の導波路内に、前記第1の窒化物半導体層、第2の窒化物半導体層が設けられ、第1の窒化物半導体層は、n型クラッド層内(図示せず)、n型光ガイド層26と活性層12との間(図3、4に示す)、n型光ガイド層26とn型クラッド層25との間(図示せず)、に設けられ、第2の窒化物半導体層は、p型光ガイド層29に用いられる。また、図3は、活性層12の量子井戸構造について図示するもので、障壁層2a/井戸層1aを一对として繰り返し積層され、最後に障壁層2cが設けられた構造を有している。図5~8は、本発明の一実施形態における活性層12、上部、下部クラッド層26、30で挟まれる領域の導波路構造、及び活性層周辺についての積層構造20と、その積層構造20の下に、それに対応したエネルギーバンドギャップ21を示すものである。図10についても図5~8と同様に積層構造20とその積層構造に対応してエネルギーバンド図21を示し、それらに加えて各層におけるAl組成比41、In組成比42の一実施形態を示す模式図が示されている。

30

40

【0071】

本発明の窒化物半導体素子における各層のドーピング量について、図11を用いて以下説明する。本発明の光ガイド層の不純物ドーピングについて、図11に、ドーピング量変化43として示すように、第1、2の光ガイド層226、229において、不純物ドーピング量を、活性層に近づくに従ってドーピング量を小さくする、若しくは、活性層から遠い領域に比べて活性層に

50

近い領域のドーピング量を小さくすると、導波路、特に光ガイド層内において、光の損失を更に減少させて、良好な光の導波を実現でき、閾値電流密度の低減、駆動電流の低減化を図ることができる。これは、不純物ドーピングした領域を光が導波すると、不純物により光の吸収が発生しするために光の損失が起こるからである。これに加えて、導波路は上述したように、第1の光ガイド層226と第2の光ガイド層229とで活性層227を挟む構造を少なくとも有しており、さらにそのガイド層の外側若しくは導波路を、ガイド層より屈折率の小さい上部・下部クラッド層225, 230とで挟む構造でもって光が導波路内に閉じこめられた構造となり、導波路内の活性層227及び活性層近傍に多くの光が分布するため、その活性層近傍の領域において不純物ドーピング量を少なくすることで、光が多く分布する領域での光の損失が減少することとなり、光の損失の少ない導波路となる。具体的には、第1の光ガイド層226、第2の光ガイド層229において、各層の膜厚の半分で領域を区切り活性層に近い領域と遠い領域を考えた場合、活性層に近い領域の導電型不純物濃度を、活性層に遠い領域の不純物濃度よりも小さくすることである。光ガイド層の不純物濃度としては、特に限定されないが、具体的には活性層に近い領域において $5 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ 以下とすることである。ここで、上記不純物ドーピングとは、第1の光ガイド層に第1導電型の不純物ドーピング、第2の光ガイド層に第2導電型の不純物ドーピング、することを指すものである。

【0072】

光ガイド層内でドーピング量を変化させる形態としては、具体例として、各光ガイド層内において、活性層に近づくに従ってなだらかに、連続的にドーピング量を小さくする形態(43a)、不連続で段階的にドーピング量を小さくする形態(43b)、またその段階的なドーピング量変化を細かくし、光ガイド層内で部分的にドーピング量変化を設ける形態(43c)、のいずれかでも良く、またこれらを組み合わせて用いても良い。好ましくは、光ガイド層内において、活性層側からの距離が、50nm以下の領域を低濃度ドーピング領域(226b, 229a)、好ましくはアンドーピングとすることで光の損失低減が可能となり、好ましくは100nm以下の領域を低濃度ドーピング領域(226b, 229a)とすることで良好な光損失の低減、閾値電流密度、駆動電流の低減が可能となる。この時、光ガイド層の膜厚は、低濃度ドーピング領域(226b, 229a)を50nm以下の領域とする場合には、50nm以上の膜厚とし、100nm以下の領域とする場合には、100nm以上の膜厚とすることはいうまでもない。この時、上記低濃度ドーピング領域(226b, 229a)を光ガイド層内に設ける場合、好ましくは、上述した組成傾斜構造の光ガイド層と組み合わせて用いることであり、これは図11に示すように、バンドギャップエネルギーが、活性層に近づくに従って小さくなるバンド構造であることにより、不純物ドーピングされない領域が活性層近傍に設けられても、キャリアの注入効率の低下を抑えた光ガイド層が形成されるためである。この時、組成傾斜の光ガイド層は、上述したようにGRIN構造が好ましく、また上記多層膜構造で、バンドギャップエネルギーが活性層に近づくに従って小さくなる構造であっても、低濃度ドーピング領域の形成に効果がある。ここで、各光ガイド層内において、成長時に不純物ドーピングしなくても、すなわち低濃度ドーピングで光ガイド層を成長させても、隣接層から不純物が拡散する場合があります、その場合には低濃度ドーピングで成長させた上記領域においても、不純物がドーピングされたものとなる。具体的には、p型不純物として好ましく用いられるMgは、このような拡散現象が起こりやすく、43aは、拡散によりp側電子閉込め層228から隣接層へ不純物が拡散する形態を模式的に示すものであり、高濃度ドーピングのp側電子閉込め層229に隣接する光ガイド層(229aの領域)、活性層(p側障壁層付近)では、濃度傾斜が発生して、拡散する形態が観測される。また、実施例1で示すように、低濃度ドーピングでp側光ガイド層を形成しても、隣接層の電子閉込め層とクラッド層からの拡散により、p型不純物がドーピングされる。このように、拡散により不純物ドーピングが成される場合には、上述したように活性層に近い領域の不純物濃度を、遠い領域よりも小さくすることである。このようなドーピング領域は、少なくとも一方の光ガイド層に設けることが好ましく、更に好ましくは両方の光ガイド層に設けることで光の損失を低減させた導波路となる。なお、図中の51、52は、各光ガイド層におけるドーピング量変化を

10

20

30

40

50

示している。

【0073】

また、上記光ガイド層における層構成、不純物ドーピングの形態、組成、膜厚などは、第1の光ガイド層、第2の光ガイド層とで同様なものとしても良く、異なるようにしても良い。例えば、第1の光ガイド層を単一膜とし、第2の光ガイド層を多層膜として、両光ガイド層の層構成を異なるようにした形態などがある。

本発明では、クラッド層225、230と、活性層227との間に、クラッド層側に配置された高濃度ドーピング領域(226a、229b)と、その高濃度ドーピング領域よりも低濃度でドーピングされ、活性層側に配置された低濃度ドーピング領域(226b、229a)とが設けられることで、導波路内における光損失を低減させた構造とできる。更に好ましくは、低濃度ドーピング領域(226b、229a)と活性層との間、すなわち、光ガイド層よりも活性層側に、高濃度ドーピング層(231、228)を設けることが好ましい。ここで、高濃度ドーピング層は、活性層近傍に位置するp側電子閉込め層228、第1の窒化物半導体層231の一部、若しくは全部として設けることができ、高濃度ドーピング層231と228のドーピング量は、それぞれ、それよりも各クラッド層側に位置する低濃度ドーピング領域226b、229aよりも、高濃度でドーピングされることであり、好ましくは、p型層内の高濃度ドーピング層228のドーピング量を、p型層内の高濃度ドーピング領域229bよりも大きくすることで、高濃度ドーピング層において、pn接合部が形成され、p型層側からのキャリアの注入に優れ、不純物ドーピング量変化、キャリア濃度変化を設けることができ、好ましい。ここで、図1の225~230は、図10における積層構造20における各層25~30に対応している。

【0074】

【実施例】

【0075】

[実施例1]

以下、実施例として、図1に示すようなレーザ素子構造、また図6に示す導波路構造について、窒化物半導体を用いたレーザ素子について、説明する。

【0076】

ここで、本実施例では、GaN基板を用いているが、基板として窒化物半導体と異なる異種基板を用いても良い。異種基板としては、例えば、C面、R面、及びA面のいずれかを主面とするサファイア、スピネル(MgAl₂O₄のような絶縁性基板、SiC(6H、4H、3Cを含む)、ZnS、ZnO、GaAs、Si、及び窒化物半導体と格子整合する酸化物基板等、窒化物半導体を成長させることが可能で従来から知られており、窒化物半導体と異なる基板材料を用いることができる。好ましい異種基板としては、サファイア、スピネルが挙げられる。また、異種基板は、オフアングルしていてもよく、この場合ステップ状にオフアングルしたものをを用いると窒化ガリウムからなる下地層の成長が結晶性よく成長させるため好ましい。更に、異種基板を用いる場合には、異種基板上に素子構造形成前の下地層となる窒化物半導体を成長させた後、異種基板を研磨などの方法により除去して、窒化物半導体の単体基板として素子構造を形成してもよく、また、素子構造形成後に、異種基板を除去する方法でも良い。

【0077】

異種基板を用いる場合には、バッファ層(低温成長層)、窒化物半導体(好ましくはGaN)からなる下地層を介して、素子構造を形成すること、窒化物半導体の成長が良好なものとなる。また、異種基板上に設ける下地層(成長基板)として、その他に、ELOG(Epitaxially Laterally Overgrowth)成長させた窒化物半導体を用いると結晶性が良好な成長基板が得られる。ELOG層の具体例としては、異種基板上に、窒化物半導体層を成長させ、その表面に窒化物半導体の成長が困難な保護膜を設けるなどして形成したマスク領域と、窒化物半導体を成長させる非マスク領域を、ストライプ状に設け、その非マスク領域から窒化物半導体を成長させることで、膜厚方向への成長に加えて、横方向への成長が成されることにより、マスク領域にも窒化物半導体が成長して成膜された層などがある。その他の

形態では、異種基板上に成長させた窒化物半導体層に開口部を設け、その開口部側面から横方向への成長がなされて、成膜される層でもよい。

【0078】

(基板101) 基板として、異種基板上に成長させた窒化物半導体、本実施例ではGaN、を厚膜(100 μm)で成長させた後、異種基板を除去して、80 μmのGaNからなる窒化物半導体基板を用いる。基板の詳しい形成方法は、以下の通りである。2インチ、C面を主面とするサファイアよりなる異種基板をMOVPE反応容器内にセットし、温度を500 にして、トリメチルガリウム(TMG)、アンモニア(NH₃)を用い、GaNよりなるバッファ層を200 の膜厚で成長させ、その後、温度を上げて、アンドープのGaNを1.5 μmの膜厚で成長させて、下地層とする。次に、下地層表面にストライプ状のマスクを複数形成して、マスク開口部(窓部)から窒化物半導体、本実施例ではGaNを選択成長させて、横方向の成長を伴った成長(ELOG)により成膜された窒化物半導体層を、さらに厚膜で成長させて、異種基板、バッファ層、下地層を除去して、窒化物半導体基板を得る。この時、選択成長時のマスクは、SiO₂からなり、マスク幅15 μm、開口部(窓部)幅5 μmとする。

10

【0079】

(バッファ層102) 窒化物半導体基板の上に、温度を1050 にして、TMG(トリメチルガリウム)、TMA(トリメチルアルミニウム)、アンモニアを用い、Al_{0.05}Ga_{0.95}Nよりなるバッファ層102を4 μmの膜厚で成長させる。この層は、AlGaNのn型コンタクト層と、GaNからなる窒化物半導体基板との間で、バッファ層として機能する。次に、窒化物半導体からなる下地層の上に、素子構造となる各層を積層する。

20

【0080】

(n型コンタクト層103)

次に得られたバッファ層102上にTMG、TMA、アンモニア、不純物ガスとしてシランガスを用い、1050 でSiドープしたAl_{0.05}Ga_{0.95}Nよりなるn型コンタクト層103を4 μmの膜厚で成長させる。n型コンタクト層、若しくはバッファ層などの下地層に、Alを含む窒化物半導体、具体的にはAl_xGa_{1-x}N(0 < x < 1)、を用いることで、GaNなどのAlを含まない窒化物半導体に比べて、ELOGを用いたことによる結晶性の悪化、特にピットの発生を抑えて、良好な下地層表面を提供できる傾向にあり、Alを含む窒化物半導体を用いることが好ましい。

30

【0081】

(クラック防止層104) 次に、TMG、TMI(トリメチルインジウム)、アンモニアを用い、温度を800 にしてIn_{0.06}Ga_{0.94}Nよりなるクラック防止層104を0.15 μmの膜厚で成長させる。なお、このクラック防止層は省略可能である。

【0082】

(n型クラッド層105) 次に、温度を1050 にして、原料ガスにTMA、TMG及びアンモニアを用い、アンドープのAl_{0.05}Ga_{0.95}NよりなるA層を25 の膜厚で成長させ、続いて、TMAを止め、不純物ガスとしてシランガスを用い、Siを5 × 10¹⁸ / cm³ドープしたGaNよりなるB層を25 の膜厚で成長させる。そして、この操作をそれぞれ200回繰り返してA層とB層の積層し、総膜厚1 μmの多層膜(超格子構造)よりなるn型クラッド層106を成長させる。この時、アンドープAlGaNのAl混晶比としては、0.05以上0.3以下の範囲であれば、十分にクラッド層として機能する屈折率差を設けることができる。

40

【0083】

(n型光ガイド層106) 次に、同様の温度で、原料ガスにTMG及びアンモニアを用い、アンドープのGaNよりなるn型光ガイド層106を0.1 μmの膜厚で成長させる。また、n型不純物をドープしてもよい。

【0084】

(第1の窒化物半導体131) 次に、図6に示すように、温度を800 にして、原料ガスにTMI(トリメチルインジウム)、TMGを用い、SiドープのIn_{0.05}Ga_{0.95}

50

N、膜厚500よりなる第1の窒化物半導体層を形成する。

【0085】

(活性層107) 次に、温度を800にして、図6に示すように、原料ガスにTMI(トリメチルインジウム)、TMGを用い、アンドープの $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ よりなる障壁層、その上に、アンドープの $\text{In}_{0.32}\text{Ga}_{0.68}\text{N}$ よりなる井戸層を、障壁層2a/井戸層1a/障壁層2b/井戸層1b/障壁層2cの順に積層する。この時、図6に示すように、障壁層2a、2b、2cを130の膜厚で、井戸層1a、1bを25の膜厚で形成する。活性層107は、総膜厚約440の多重量子井戸構造(MQW)となる。

【0086】

(p側電子閉込め層108) 次に、同様の温度で、原料ガスにTMA、TMG及びアンモニアを用い、不純物ガスとして Cp_2Mg (シクロペンタジエニルマグネシウム)を用い、Mgを $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ ドープした $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ よりなるp型電子閉込め層108を100の膜厚で成長させる。この層は、特に設けられていなくても良いが、設けることで電子閉込めとして機能し、閾値の低下に寄与するものとなる。

【0087】

(p型光ガイド層109:第2の窒化物半導体層) 次に、温度を1050にして、原料ガスにTMG及びアンモニアを用い、アンドープのGaNよりなるp型光ガイド層109を0.15 μm の膜厚で成長させる。

【0088】

このp型光ガイド層109は、アンドープとして成長させるが、p側電子閉込め層108、p型クラッド層109等の隣接層からのMgの拡散により、Mg濃度が $5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ となりp型を示す。またこの層は成長時に意図的にMgをドープしても良い。

【0089】

(p型クラッド層110) 続いて、1050でアンドープ $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ よりなる層を25の膜厚で成長させ、続いてTMAを止め、 Cp_2Mg を用いて、MgドープGaNよりなる層を25の膜厚で成長させ、それを90回繰り返して総膜厚0.45 μm の超格子層よりなるp型クラッド層110を成長させる。p型クラッド層は少なくとも一方がAlを含む窒化物半導体層を含み、互いにバンドギャップエネルギーが異なる窒化物半導体層を積層した超格子で作製した場合、不純物はいずれか一方の層に多くドープして、いわゆる変調ドープを行うと結晶性が良くなる傾向にあるが、両方に同じようにドープしても良い。クラッド層110は、Alを含む窒化物半導体層、好ましくは $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x < 1$)を含む超格子構造とすることが望ましく、さらに好ましくはGaNと $\text{AlGa}_{1-x}\text{N}$ とを積層した超格子構造とする。p側クラッド層110を超格子構造とすることによって、クラッド層全体のAl混晶比を上げることができるので、クラッド層自体の屈折率が小さくなり、さらにバンドギャップエネルギーが大きくなるので、閾値を低下させる上で非常に有効である。さらに、超格子としたことにより、クラッド層自体に発生するピットが超格子にしないものよりも少なくなるので、ショートが発生も低くなる。

【0090】

(p型コンタクト層111) 最後に、1050で、p型クラッド層110の上に、Mgを $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ ドープしたp型GaNよりなるp型コンタクト層111を150の膜厚で成長させる。p型コンタクト層111はp型の $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ ($0 < x, y, x+y < 1$)で構成することができ、好ましくはMgをドープしたGaNとすれば、p電極120と最も好ましいオーミック接触が得られる。コンタクト層111は電極を形成する層であるので、 $1 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ 以上の高キャリア濃度とすることが望ましい。 $1 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ よりも低いと電極と好ましいオーミックを得るのが難しくなる傾向にある。さらにコンタクト層の組成をGaNとすると、電極材料と好ましいオーミックが得られやすくなる。反応終了後、反応容器内において、ウエハを窒素雰囲気中、700でアニーリングを行い、p型層を更に低抵抗化する。

【0091】

以上のようにして窒化物半導体を成長させ各層を積層した後、ウエハを反応容器から取り

10

20

30

40

50

出し、最上層のp型コンタクト層の表面に SiO_2 よりなる保護膜を形成して、RIE（反応性イオンエッチング）を用い SiCl_4 ガスによりエッチングし、図1に示すように、n電極を形成すべきn型コンタクト層103の表面を露出させる。このように窒化物半導体を深くエッチングするには保護膜として SiO_2 が最適である。

【0092】

次に上述したストライプ状の導波路領域として、リッジストライプを形成する。まず、最上層のp型コンタクト層（上部コンタクト層）のほぼ全面に、PVD装置により、 Si 酸化物（主として、 SiO_2 ）よりなる第1の保護膜161を $0.5\mu\text{m}$ の膜厚で形成した後、第1の保護膜の上に所定の形状のマスクをかけ、RIE（反応性イオンエッチング）装置により、 CF_4 ガスを用い、フォトリソグラフィ技術によりストライプ幅 $1.6\mu\text{m}$ の第1の保護膜161とする。この時、リッジストライプの高さ（エッチング深さ）は、p型コンタクト層111、およびp型クラッド層109、p型光ガイド層110の一部をエッチングして、p型光ガイド層109の膜厚が $0.1\mu\text{m}$ となる深さまでエッチングして、形成する。

【0093】

次に、リッジストライプ形成後、第1の保護膜161の上から、 Zr 酸化物（主として ZrO_2 ）よりなる第2の保護膜162を、第1の保護膜の上と、エッチングにより露出されたp型光ガイド層109の上に $0.5\mu\text{m}$ の膜厚で連続して形成する。

【0094】

第2の保護膜162形成後、ウエハを 600°C で熱処理する。このように SiO_2 以外の材料を第2の保護膜として形成した場合、第2の保護膜成膜後に、 300°C 以上、好ましくは 400°C 以上、窒化物半導体の分解温度以下（ 1200°C ）で熱処理することにより、第2の保護膜が第1の保護膜の溶解材料（フッ酸）に対して溶解しにくくなるため、この工程を加えることがさらに望ましい。

【0095】

次に、ウエハをフッ酸に浸漬し、第1の保護膜161をリフトオフ法により除去する。このことにより、p型コンタクト層111の上に設けられていた第1の保護膜161が除去されて、p型コンタクト層が露出される。以上のようにして、図1に示すように、リッジストライプの側面、及びそれに連続する平面（p型光ガイド層109の露出面）に第2の保護膜162が形成される。

【0096】

このように、p型コンタクト層112の上に設けられた第1の保護膜161が、除去された後、図1に示すように、その露出したp型コンタクト層111の表面に Ni/Au よりなるp電極120を形成する。但しp電極120は $100\mu\text{m}$ のストライプ幅として、図1に示すように、第2の保護膜162の上に渡って形成する。第2の保護膜162形成後、既に露出させたn型コンタクト層103の表面には Ti/Al よりなるストライプ状のn電極121をストライプと平行な方向で形成する。

【0097】

次に、n電極を形成するためにエッチングして露出された面でp、n電極に、取り出し電極を設けるため所望の領域にマスクし、 SiO_2 と TiO_2 よりなる誘電体多層膜164を設けた後、p、n電極上に $\text{Ni}-\text{Ti}-\text{Au}$ （ 1000°C - 1000°C - 8000°C ）よりなる取り出し（パット）電極122、123をそれぞれ設けた。この時、活性層107の幅は、 $200\mu\text{m}$ の幅（共振器方向に垂直な方向の幅）であり、共振器面（反射面側）にも SiO_2 と TiO_2 よりなる誘電体多層膜が設けられる。

【0098】

以上のようにして、n電極とp電極とを形成した後、ストライプ状の電極に垂直な方向で、窒化物半導体のM面（ GaN のM面、（11-00）など）でパー状に分割して、更にパー状のウエハを分割してレーザ素子を得る。この時、共振器長は、 $650\mu\text{m}$ である。このようにして得られるレーザ素子は、図6に示す積層構造20、及びバンドギャップエネルギー図となるものである。

【0099】

得られるレーザ素子は、しきい値電流密度 2.8 kA/cm^2 、波長 448 nm の窒化物半導体素子が得られ、参考例1の光ガイド層を InGaN とした場合に比べて、長波長域において、低いしきい値電流密度のレーザが得られる。

【0100】

図9は、実施例1において、井戸層1の In 混晶比を変化させて、波長 $425 \sim 450 \text{ nm}$ のレーザ素子を作製し、閾値電流密度 J_{th} を測定して、しきい値電流密度の波長依存性を示すものである。図9から明らかなように、 430 nm 以下の短波長域では、参考例1のように In を含む窒化物半導体を有する上部、下部光ガイド層で活性層を挟む構造を導波路構造に用いる方が、閾値電流密度が低い傾向にあり、 440 nm 付近 ($435 \text{ nm} \sim 445 \text{ nm}$) で、参考例1と実施例1の閾値電流密度が逆転し、 440 nm 以上の長波長の領域では、実施例1がなだらかな上昇傾向を示すのに対し、参考例1は、急激な上昇傾向が観られることがわかる。実施例1のように、本発明の特徴である第1の窒化物半導体層、第2の窒化物半導体層とで活性層を挟み込む構造を、導波路内に設けることで、上述したような In による光の損失、 p 型光ガイド層の結晶性の問題を改善でき、長波長域において優れた素子特性の窒化物半導体素子が得られることがわかる。

【0101】

[実施例2]

実施例1において、図5に示すように、障壁層2の In 混晶比より低い混晶比のアンダー $\text{In}_{0.025}\text{Ga}_{0.975}\text{N}$ からなる第1の窒化物半導体層を 500 \AA の膜厚で形成する。得られるレーザ素子は、第1の窒化物半導体層31の In 混晶比が実施例1よりも小さいことから、上部、下部クラッド層に挟まれた導波路、本実施例では n 型光ガイド層、 p 型光ガイド層で挟まれる領域、とクラッド層との屈折率差が、実施例1に比べて小さくなるため、閾値電流が大きくなるものの、長波長域のレーザ素子としてなお優れた特性のものが得られる。

【0102】

[実施例3]

実施例2において、図8に示すように、第1の窒化物半導体層31を、活性層から 200 \AA 離れたところに設ける。このとき、 n 側クラッド層と活性層とで挟まれた積層構造が、 n 型クラッド層25 / 第1の n 型光ガイド層26a / 第1の窒化物半導体層31 / 第2の n 型光ガイド層26b / 活性層12の順に積層された構造となり、第1の n 型光ガイド層26aをアンダー GaIn で 800 \AA とし、第2の n 型光ガイド層26bをアンダー GaIn で 200 \AA とする。得られるレーザ素子は、実施例2に比べて、第1の窒化物半導体層が活性層から離れていることから、第1の窒化物半導体層による光の閉じ込め、キャリアの注入効果が弱まり、また導波路内での光の分布が実施例1よりも n 型クラッド層側に多く分布するものとなり、活性層での誘導放出が減少し、また第1の窒化物半導体による光の損失も発生し、実施例2よりも閾値電流が大きくなる傾向にある。

【0103】

[実施例4]

実施例1において、図7に示すように、 n 型光ガイド層としてアンダー $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 、膜厚 0.15 \mu m からなる第1の窒化物半導体を用い、実施例1と同様にしてレーザ素子を得る。得られるレーザ素子は、実施例1に比べて、 InGaIn からなる n 型光ガイド層により、導波路とクラッド層との屈折率差が大きくなるが、厚膜の n 型光ガイド層による光の吸収が大きくなり、また導波路内での光分布も、活性層から n 型クラッド層に至る領域にブロードに広がって分布しているものと思われ、活性層での誘導放出が減少し、実施例1に比べて、閾値電流が大きくなる。この時、 n 型光ガイド層 (第1の窒化物半導体層) を $\text{InGaIn} / \text{GaIn}$ からなる超格子多層膜で形成しても、単一膜で形成する場合に比べて、膜の結晶性は良くなるものの、光の分布、導波路の屈折率、の問題は、単一膜の場合と同等なもので、得られるレーザ素子も同様な傾向の特性のものとなる。

【0104】

[参考例 1]

実施例 4 において、p 側光ガイド層を、n 側光ガイド層と同じアンドープ $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ として、その他は実施例 4 と同様にして、レーザ素子を得る。得られるレーザ素子は、実施例 1 の導波路構造に比較して、第 1 の窒化物半導体を設けずに、n 型光ガイド層を p 型光ガイド層と同じ膜厚にして、両方の光ガイド層とも In を含む窒化物半導体を用いた構造となる。このようにして得られるレーザ素子は、p 型光ガイド層に In を含む窒化物半導体を用いていることにより、大きく結晶性が悪化し、さらに、光ガイド層による光の吸収が発生し、実施例 1 に比べて閾値電流が大きくなる。図 9 は、参考例 1 で、井戸層の In 混晶比を変化させて、425 nm ~ 450 nm の波長のレーザ素子を作製し、しきい値電流密度 J_{th} を測定して、閾値電流密度の波長依存性を示すものである。図 9 から明らかなように、上部、下部光ガイド層に In を含む窒化物半導体を用いた構造では、430 nm 付近から波長が長くなるに従って急激な閾値電流密度の上昇傾向を示し、440 nm 以上の長波長域では、実施例 1 に比べて、閾値電流密度が大きくなり、そしてそれより波長が長くなるに従って、その差が大きくなることわかる。

【 0 1 0 5 】

[実施例 5]

実施例 1 において、n 型層、p 型層のクラッド層、ガイド層、活性層を以下のように形成し、図 10 に示す構造のレーザ素子を作製する。

【 0 1 0 6 】

(n 型クラッド層 1 0 5) n 型コンタクト層 1 0 3、クラック防止層 1 0 4 (省略可) の上に、n 型クラッド層として、アンドープの $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ よりなる第 1 の層を 25 の膜厚で成長させ、続いて、TMA を止め、不純物ガスとしてシランガスを用い、Si を $5 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ ドープした $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ よりなる第 2 の層を 25 の膜厚で成長させる。そして、この操作をそれぞれ 200 回繰り返して第 1 の層と第 2 の層とを交互に積層し、総膜厚 1 μm の多層膜 (超格子構造) よりなる n 型クラッド層 1 0 6 を成長させる。この n 型クラッド層は、活性層の下に設けられた下部クラッド層となる場合、超格子多層膜で構成しなくても、単一膜、若しくは膜厚 100 以上の層を有する多層膜でもクラッド層を形成することができる。

【 0 1 0 7 】

(n 型光ガイド層 1 0 6) Si ドープの GaN よりなる第 3 の層を膜厚 15 で成長させ、続いて、アンドープの $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ よりなる第 4 の層を膜厚 15 で成長させる。そして、この操作をそれぞれ 60 回繰り返して第 3 の層と第 4 の層とを交互に積層し、総膜厚 0.18 μm の多層膜 (超格子構造) よりなる n 型光ガイド層 1 0 6 を、n 型クラッド層の上に、成長させる。

【 0 1 0 8 】

(第 1 の窒化物半導体 1 3 1) 次に、Si ドープの $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 、膜厚 530 よりなる第 1 の窒化物半導体層を、n 型光ガイド層の上に形成する。

【 0 1 0 9 】

(活性層 1 0 7) 図 10 に示すように、膜厚 130 のアンドープの GaN よりなる n 側障壁層 2 a、膜厚 25 のアンドープの $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ よりなる井戸層 1 a、膜厚 100 のアンドープ GaN よりなる障壁層 2 b、その上に、井戸層 1 a と同じ井戸層 1 b、膜厚 530 のアンドープ $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ よりなる p 側障壁層 2 c を、障壁層 2 a / 井戸層 1 a / 障壁層 2 b / 井戸層 1 b / 障壁層 2 c の順に積層する。活性層 1 0 7 は、総膜厚約 810 の多重量子井戸構造 (MQW) となり、第 1 の窒化物半導体層の上に形成される。また、n 側障壁層 2 a と第 1 の窒化物半導体層が接する場合には、第 1 の窒化物半導体層が n 側障壁層 2 a を兼ねることができ、この場合には、n 側障壁層 2 a を省略でき、活性層に接する第 1 の窒化物半導体層が n 側障壁層 2 a としても機能する。

【 0 1 1 0 】

(p 側電子閉込め層 1 0 8) 次に、同様の温度で、原料ガスに TMA、TMG 及びアン

モニアを用い、不純物ガスとして Cp_2Mg (シクロペンタジエニルマグネシウム) を用い、 Mg を $1 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ ドープした $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ よりなる p 型電子閉込層 108 を 100 の膜厚で成長させる。この層は、特に設けられていなくても良いが、設けることで電子閉込めとして機能し、閾値の低下に寄与するものとなる。

【0111】

(p 型光ガイド層 109) Mg ドープの GaN よりなる第 3 の層を膜厚 15 で成長させ、続いて、 $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ よりなる第 4 の層を膜厚 5 で成長させる。そして、この操作をそれぞれ 90 回繰り返して第 3 の層と第 4 の層とを交互に積層し、総膜厚 $0.18 \mu\text{m}$ の多層膜 (超格子構造) よりなる p 型光ガイド層 109 を、p 側電子閉込め層の上に成長させる。この時、本発明の第 2 の窒化物半導体層は、第 3 の層として形成される。

10

【0112】

(p 型クラッド層 110) $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ よりなる第 1 の層を 25 の膜厚で成長させ、続いて、 Mg をドープした $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ よりなる第 2 の層を 25 の膜厚で成長させる。そして、この操作をそれぞれ 90 回繰り返して第 1 の層と第 2 の層とを交互に積層し、総膜厚 $0.45 \mu\text{m}$ の多層膜 (超格子構造) よりなる p 型クラッド層 110 を、p 型光ガイド層の上に成長させる。

【0113】

このように、n 型クラッド層 25、n 型光ガイド層 27、第 1 の窒化物半導体層 31、活性層 27、p 側電子閉込め層 28、p 型光ガイド層 29、p 型クラッド層 30 が、図 10 に示すように積層された構造となり、その時の各層における In 組成、 Al 組成は、41、42 に示すような構造となる。また、この実施例では、光ガイド層において、多層膜 n 型光ガイド層を構成する第 4 の層が、p 型光ガイド層の第 4 の層よりも膜厚が厚く形成されており、すなわち、n 型光ガイド層の In 混晶比 (平均組成) が、p 型光ガイド層に比べて大きくした構造となっていることで、p 型層側に In を含む窒化物半導体層を設けることの結晶性悪化を低減した構造となっている。また、 In 混晶比が、n 型光ガイド層よりも p 型光ガイド層を小さくする構成としては、膜厚を小さくするほかに、多層膜を構成する第 3、4 の層の In 混晶比を小さくすることでも可能である。

20

このようにして得られるレーザ素子は、しきい値電流密度 $1.9 \text{ kA} / \text{cm}^2$ 、波長 453 nm 、室温での連続発振が可能で、60、5 mW の連続発振における素子寿命 1 万時間に達する窒化物半導体レーザ素子が得られる。

30

【0114】

[実施例 6]

実施例 5 において、n 型クラッド層、p 型クラッド層の多層膜を構成する第 1 の層を、 $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ とし、第 2 の層を、それぞれ Si 、 Mg ドープ GaN とする他は、実施例 5 と同様にしてレーザ素子を得る。

【0115】

これら実施例 1、5、6 の素子構造において、井戸層の In 混晶比を変化させて、波長変化させた場合における閾値電流変化を図 12 に、実施例 1 を黒丸、実施例 5 を白抜き三角、実施例 6 を白抜き四角で示す。図 12 からわかるように、波長 440 nm 以上の長波長域において、実施例 5、6 が閾値電流が低減したレーザ素子が得られ、また、実施例 5 と 6 との比較において、実施例 5 が優れた特性のレーザ素子が得られることがわかる。

40

実施例 1 と、実施例 5、6 とでは、p 側障壁層、n 側障壁層の膜厚が大きく異なり、両方の障壁層とも 200 以上、好ましくは、300 以上、更に好ましくは 400 以上とすることで、閾値電流の低減傾向が観られ、特に p 側障壁層、若しくは p 側電子閉込め層と活性層内で最も p 型層側の井戸層 1b との距離を大きくすること、すなわち、200 以上、好ましくは 300 以上、更に好ましくは 400 以上とすることで良好な長波長域での導波路構造が形成され、図 12 に示すような閾値電流特性となると考えられる。また、その他の構成の違いとして、光ガイド層が、 In を含む窒化物半導体層を有する多層

50

膜構造を有することであり、実施例 5 , 6 では、このことによる導波路内の屈折率向上が図られ、素子特性向上につながったと考えられる。

また、実施例 5 と実施例 6 とでは、クラッド層の A 1 混晶比 (平均組成) が異なる構造であり、クラッド層の A 1 混晶比 (平均組成) を 0 . 0 5 以上とすることで、長波長域において、優れた導波路構造が形成されたことにより特性向上が得られたと考えられ、この時クラッド層の A 1 混晶比 (平均組成) の上限としては、結晶性を考慮して、0 . 5 以下とすることであり、多層膜のクラッド層とする場合には、A 1 を含む窒化物半導体層 (第 1 の層) と、第 1 の層より A 1 混晶比の小さい A 1 を含む窒化物半導体層 (第 2 の層) とが少なくとも交互に積層された多層膜構造とすること、が好ましく、第 1 の層の A 1 混晶比 $\times 1$ は、第 2 の層の A 1 混晶比 $\times 2$ より大きく、 $\times 1 > \times 2$ ($\times 2 > 0$) とすることが長波長域のレーザ素子、端面発光素子において優れた素子特性が得られることがわかる。また、実施例 5 において、発振波長 4 6 5 , 4 7 0 における素子寿命は、実施例 5 と同等な条件において、1 万時間、3 千時間に達するレーザ素子が得られる。

【 0 1 1 6 】

【発明の効果】

本発明の窒化物半導体素子は、長波長域において、閾値電流を低く抑えたレーザ素子、および素子特性に優れる端面発光素子が得られる。特に、図 9 に示すように、ガイド層に I n を含む窒化物半導体を用いた参考例の構造に比べて、本発明のように導波路内の構造を非対称な構造とすることで、4 4 0 n m の長波長域で優れた素子特性の窒化物半導体素子が得られる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明の一実施形態を説明する模式断面図。

【図 2】本発明の一実施形態を説明する模式断面図。

【図 3】本発明の一実施形態を説明する模式断面図。

【図 4】本発明の一実施形態を説明する模式図。

【図 5】本発明の一実施形態に係る積層構造 2 0 と、その積層構造に対応するバンド構造 2 1 を説明する模式図。

【図 6】本発明の一実施形態に係る積層構造 2 0 と、その積層構造に対応するバンド構造 2 1 を説明する模式図。

【図 7】本発明の一実施形態に係る積層構造 2 0 と、その積層構造に対応するバンド構造 2 1 を説明する模式図。

【図 8】本発明の一実施形態に係る積層構造 2 0 と、その積層構造に対応するバンド構造 2 1 を説明する模式図。

【図 9】本発明の一実施形態と参考例 1 の実施形態における閾値電流密度の波長依存性を示す図。

【図 1 0】本発明の一実施形態に係る積層構造 2 0 と、その積層構造に対応するバンド構造 2 1、A 1 組成比 4 1、I n 組成比 4 2 とを説明する模式図。

【図 1 1】本発明の一実施形態に係る図 1 0 の積層構造 2 0 に対応する不純物濃度変化 (5 1 , 5 2) を説明する模式図。

【図 1 2】本発明の各実施形態 (実施例 1 , 5 , 6) における閾値電流の波長依存性を示す図。

【符号の簡単な説明】

1 . . . 井戸層、 2 (2 b) . . . 障壁層、 2 a . . . n 側障壁層、 2 c . . . p 側障壁層、 1 1 . . . n 型窒化物半導体層、 1 2 . . . 活性層、 1 3 . . . p 型窒化物半導体層、 2 0 . . . 積層構造、 1 0 1 . . . 基板 (G a N 基板) 1 0 2 . . . バッファ層、 1 0 3 . . . n 型コンタクト層、 1 0 4 . . . クラック防止層、 1 0 5 , 2 5 , 2 2 5 . . . n 型クラッド層 (下部クラッド層) 、 1 0 6 , 2 6 , 2 2 6 . . . n 型光ガイド層 (下部光ガイド層) 、 1 0 7 , 2 7 , 2 2 7 . . . 活性層、 1 0 8 , 2 8 , 2 2 8 . . . p 側電子閉込め層、 1 0 9 , 2 9 , 2 2 9 . . . p 型光ガイド層 (上部光ガイド層) 、 1 1 0 , 3 0 , 2 3 0 . . .

10

20

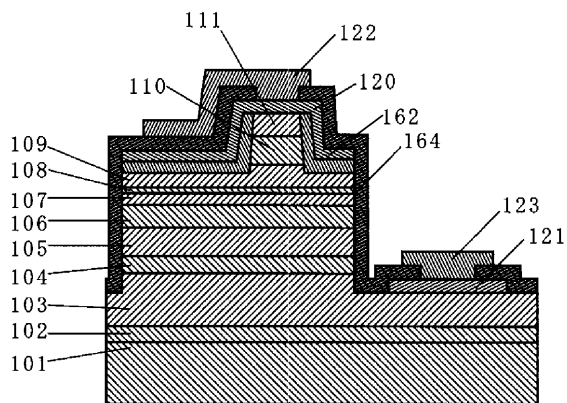
30

40

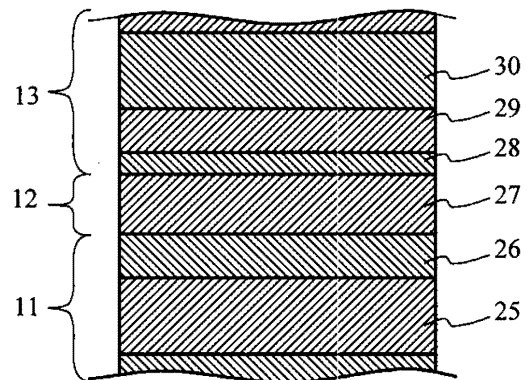
50

p型クラッド層（上部クラッド層）、 111・・・p型コンタクト層、 120・
 ・・p電極、 121・・・n電極、 122・・・pパッド電極、123・・・n
 パッド電極、 131, 31, 231・・・第1の窒化物半導体層、 32, 232
 ・・・第2の窒化物半導体層、 163・・・第3の保護膜、 164・・・絶縁膜

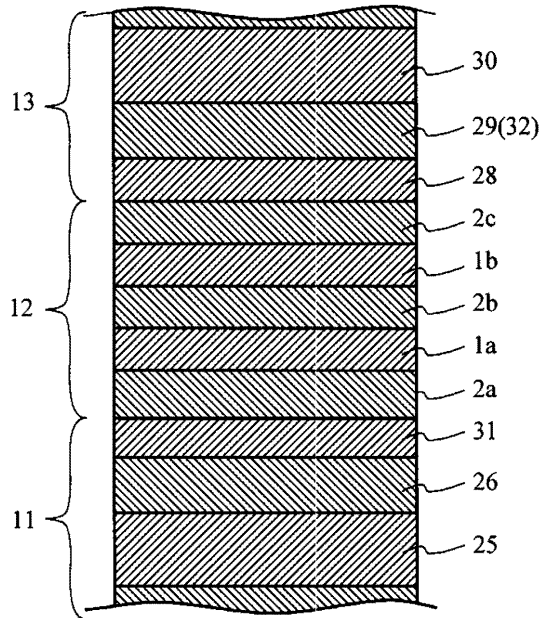
【図1】



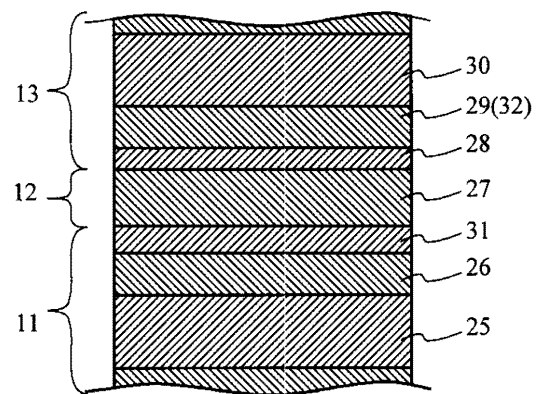
【図2】



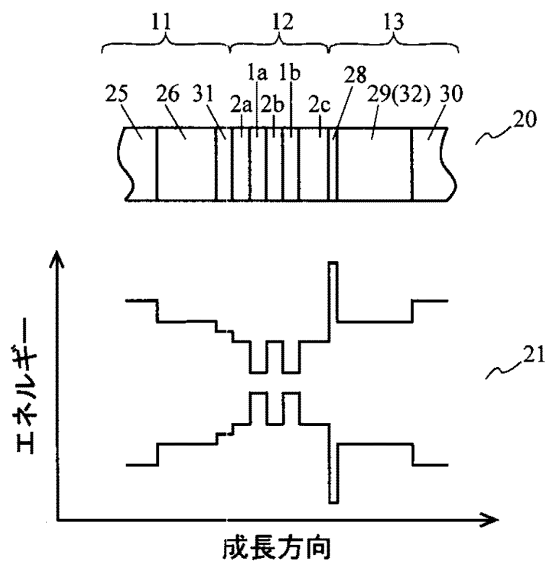
【図 3】



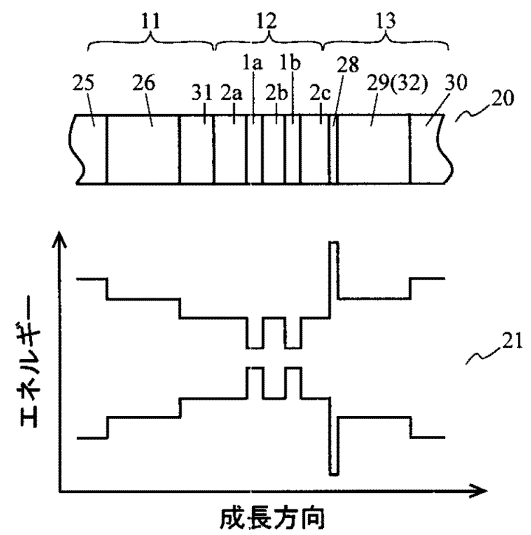
【図 4】



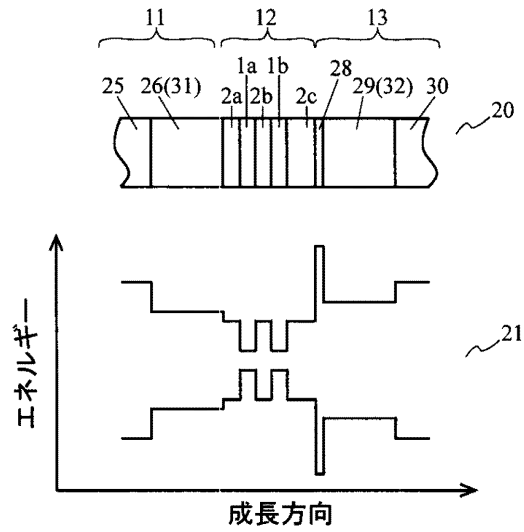
【図 5】



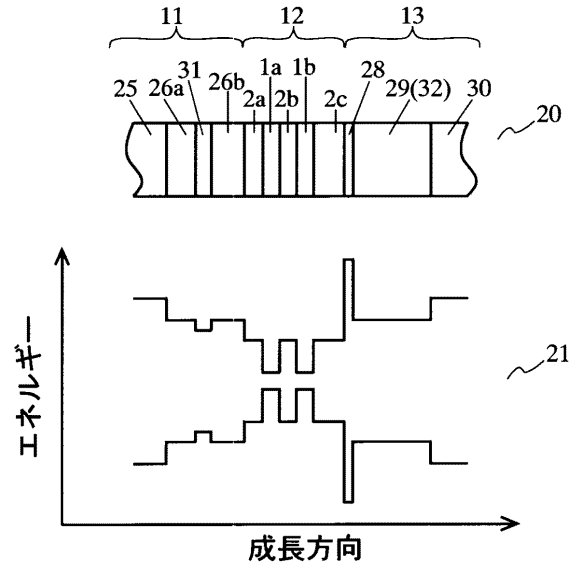
【図 6】



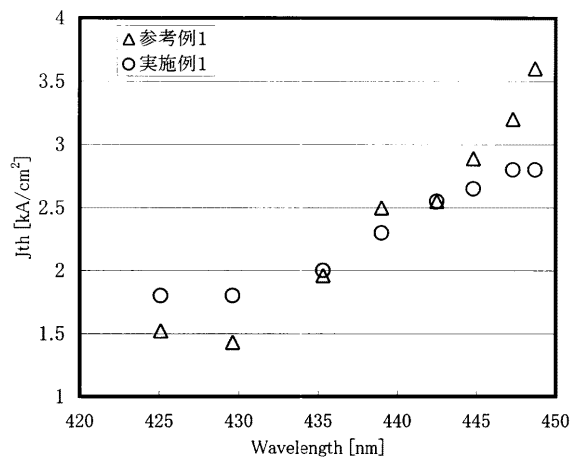
【図 7】



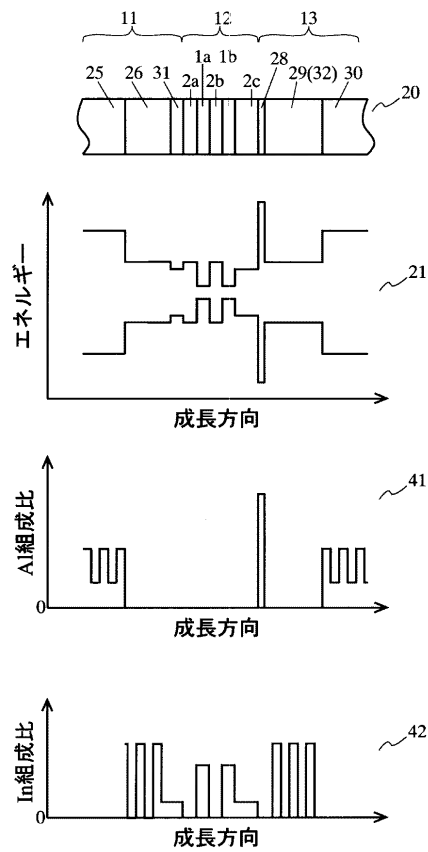
【図 8】



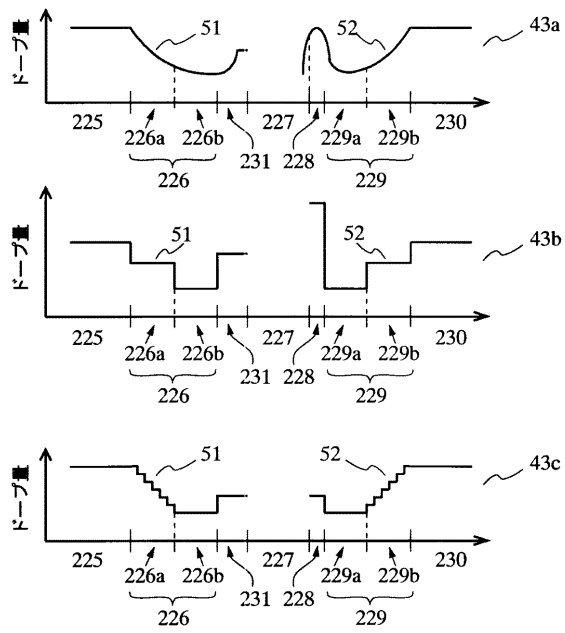
【図 9】



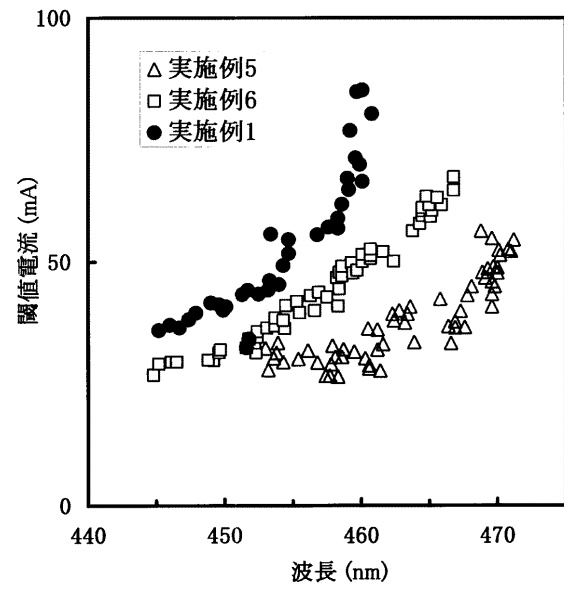
【図 10】



【図 1 1】



【図 1 2】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開2001-332815(JP,A)
特開2000-340839(JP,A)
特公昭55-3834(JP,B2)
特開2000-286509(JP,A)
特開2000-269548(JP,A)
特開平11-274644(JP,A)
特開2000-208875(JP,A)
特開2000-183462(JP,A)
特開2000-332291(JP,A)
特開平10-335757(JP,A)
特開平11-004039(JP,A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H01S 5/30