

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5142371号  
(P5142371)

(45) 発行日 平成25年2月13日(2013.2.13)

(24) 登録日 平成24年11月30日(2012.11.30)

(51) Int.Cl. F1  
H01S 5/343 (2006.01) H01S 5/343 610

請求項の数 16 (全 36 頁)

(21) 出願番号	特願2007-297191 (P2007-297191)	(73) 特許権者	504157024 国立大学法人東北大学 宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号
(22) 出願日	平成19年11月15日(2007.11.15)	(74) 代理人	100083806 弁理士 三好 秀和
(65) 公開番号	特開2009-123969 (P2009-123969A)	(74) 代理人	100100712 弁理士 岩▲崎▼ 幸邦
(43) 公開日	平成21年6月4日(2009.6.4)	(74) 代理人	100095500 弁理士 伊藤 正和
審査請求日	平成22年11月5日(2010.11.5)	(74) 代理人	100101247 弁理士 高橋 俊一
		(74) 代理人	100098327 弁理士 高松 俊雄

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 紫外線窒化物半導体発光素子およびその製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

非極性面基板と半極性面基板とのうち、いずれか1つの基板と、  
前記基板上に配置され、n型不純物をドーブされたAlGa<sub>1-x</sub>N層と、  
前記AlGa<sub>1-x</sub>N層上に配置され、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N(0 < x < 1)障壁層とAl<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N(0 < x < 1)井戸層からなる量子井戸構造を有するAl<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N活性層と、  
前記Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N活性層上に配置され、p型不純物をドーブされたAlGa<sub>1-x</sub>N層とを備え、  
c軸が結晶成長の主面の法線方向から40°~90°の範囲内で傾いた面を結晶成長の主面とし、光の電界成分Eが主にc軸と平行(E//c)なる偏光特性を示し、前記結晶成長面で結晶成長した前記活性層内に形成されるレーザ共振器の端面がa面で形成され、前記c軸が前記活性層の量子井戸面内にあり、前記活性層の前記井戸数を3以下とすることを特徴とする紫外線窒化物半導体発光素子。

【請求項2】

前記結晶成長の主面には、前記非極性面基板を選択した場合、非極性面が含まれ、前記半極性面基板を選択した場合、半極性面が含まれ、前記半極性面の選択範囲は、前記c軸とのなす角が40°~90°の範囲で連続的に任意に変化させられることを特徴とする請求項1に記載の紫外線窒化物半導体発光素子。

【請求項3】

前記非極性面には、前記非極性面基板としてm面基板を選択した場合、m面が含まれ、前記非極性面基板としてa面基板を選択した場合、a面が含まれることを特徴とする請求項2に記載の紫外線窒化物半導体発光素子。

【請求項4】

前記半極性面基板を選択した場合、前記半極性面には、{10-11}面、{10-12}面、或いは{11-22}面の内、いずれか1つが含まれることを特徴とする請求項2に記載の紫外線窒化物半導体発光素子。

【請求項5】

結晶成長の主面としてm面、{10-11}面、或いは{10-12}面の内、いずれか1つの面を選択した場合、a面を共振器の反射鏡として用いることを特徴とする請求項1に記載の紫外線窒化物半導体発光素子。

10

【請求項6】

前記a面は、へき開面であることを特徴とする請求項5に記載の紫外線窒化物半導体発光素子。

【請求項7】

前記活性層は、単一井戸ないしは多重量子井戸構造を備え、前記 $Al_xGa_{1-x}N$ 井戸層の $AlN$ モル分率は30%以上60%以下であり、かつ、前記 $Al_xGa_{1-x}N$ 障壁層の $AlN$ モル分率と前記 $Al_xGa_{1-x}N$ 井戸層の $AlN$ モル分率の比は0.7以上であることを特徴とする請求項1に記載の紫外線窒化物半導体発光素子。

【請求項8】

20

m面基板と、  
前記m面基板上に配置され、n型不純物をドーブされた $AlInN$ 層と、  
前記 $AlInN$ 層上に配置された $Al_{1-x}In_xN$ 障壁層と $Al_{1-x}In_xN$ 井戸層からなる量子井戸構造を有する $Al_{1-x}In_xN/Al_{1-x}In_xN$ 活性層と、  
前記 $Al_{1-x}In_xN/Al_{1-x}In_xN$ 活性層上に配置され、p型不純物をドーブされた $AlInN$ 層とを備え、

c軸が結晶成長の主面の法線方向から $40^\circ \sim 90^\circ$ の範囲内で傾いた面を結晶成長の主面とし、光の電界成分Eが主にc軸と平行( $E//c$ )なる偏光特性を示し、前記結晶成長面で結晶成長した前記活性層内に形成されるレーザ共振器の端面がa面で形成され、前記c軸が前記活性層の量子井戸面内にあり、前記活性層の前記井戸数を3以下とすることを特徴とする紫外線窒化物半導体発光素子。

30

【請求項9】

前記活性層は、単一井戸ないしは多重量子井戸構造を備え、 $InN$ モル分率が5%以下であることを特徴とする請求項8に記載の紫外線窒化物半導体発光素子。

【請求項10】

m面基板を準備する工程と、  
c軸が結晶成長の主面の法線方向から $40^\circ \sim 90^\circ$ の範囲内で傾いた面を結晶成長の主面とし、前記m面基板上にn型不純物をドーブされた $AlGaIn$ 層を形成する工程と、  
前記 $AlGaIn$ 層上に $Al_xGa_{1-x}N$ 障壁層と $Al_xGa_{1-x}N$ 井戸層からなる量子井戸構造を有し、前記活性層の前記井戸数を3以下とするように $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層を形成する工程と、

40

前記 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層上にp型不純物をドーブされた $AlGaIn$ 層を形成する工程と、

a面に沿ってレーザ共振器の反射面を形成する工程と  
を有することを特徴とする紫外線窒化物半導体発光素子の製造方法。

【請求項11】

前記a面に沿ってレーザ共振器の反射面を形成する工程は、へき開を有することを特徴とする請求項10に記載の紫外線窒化物半導体発光素子の製造方法。

【請求項12】

前記n型不純物はSiであり、前記p型不純物はMgであることを特徴とする請求項1

50

0に記載の紫外線窒化物半導体発光素子の製造方法。

【請求項13】

前記c軸が前記活性層の量子井戸面内に存在することを特徴とする請求項1または8に記載の紫外線窒化物半導体発光素子。

【請求項14】

前記c軸が前記活性層の量子井戸面内に存在することを特徴とする請求項10に記載の紫外線窒化物半導体発光素子の製造方法。

【請求項15】

前記活性層の前記井戸数を2以下とすることを特徴とする請求項1または8に記載の紫外線窒化物半導体発光素子。

10

【請求項16】

前記活性層の前記井戸数を2以下とすることを特徴とする請求項10に記載の紫外線窒化物半導体発光素子の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、紫外線窒化物半導体発光素子およびその製造方法に関し、特に、深紫外線波長のレーザ光を発生する低しきい値電流密度の紫外線窒化物半導体発光素子および製造方法に関する。

【背景技術】

20

【0002】

波長300nm以下の短波長光は、照明、殺菌・浄水、医療分野、生化学産業など幅広い分野で必須の光源として用いられている。特に、深紫外線レーザは波長の短いコヒーレント光源であることから、半導体製造工程において、リソグラフィー用の光源として用いられている。通常はエキシマランプ乃至はレーザがリソグラフィー光源として用いられるが、リソグラフィー装置には多数の光学部品が用いられるため、装置全体としては大型化してしまう。

【0003】

また、ネオジウム(Nd)ドープYAGレーザから発振させた波長1064nmの赤外線光を、非線形光学結晶を通して第4高調波(266nm)を発生させ、深紫外線レーザ光を得る手法も用いられるが、変換効率が0.1%以下と低く、低消費電力化は不可能である。これを深紫外線半導体レーザダイオード(LD: Laser Diode)に置き換えることができれば、装置の小型化が図れる。また、市販の青色発光ダイオード(LED: Light Emitting Diode)において実現された50%程度の発光効率を得ることが出来れば、低消費電力化が可能となる。

30

【0004】

現在までのところ、波長300nm以下の短波長光が得られる材料としては、c面サファイア基板上にエピタキシャル成長させた、窒化アルミニウム(AlN)モル分率xが0.3以上の窒化アルミニウムガリウム( $Al_xGa_{1-x}N$ )混晶や、その量子井戸(QW: Quantum Well)が専ら用いられている。例えば、波長250nmに迫るAlGaIn/AlGaIn多重量子井戸(MQW: Multi-Quantum Well)発光ダイオード(LED)が開示されている(例えば、非特許文献1参照。)

40

【0005】

しかし、サファイア基板上のAlGaInエピタキシャル成長層には、市販の青色LEDに含まれる貫通転位(密度:  $10^8 \text{ cm}^{-2}$ 程度)に比べ、2~3桁程度高い密度の貫通転位が含まれる。その上、窒化物半導体結晶がc軸に沿った反転対称性を持たないこと、III族原子と窒素原子のサイズが異なることにより生じる「自発分極」と、更に井戸層と障壁層の格子定数の差により生じる「圧電分極」によって、c面内にシート状に発生するヘテロ界面電荷のため、井戸内には1MV/cmを越える強い内部電場が発生してしまう。このため、発光効率は0.1%に満たない。

50

## 【0006】

また、同波長領域のLDの開発に関しては、光励起による誘導放出に関する報告はあるものの、転位・欠陥密度の低減、p型層の最適化、光の導波方向の選定など多くの課題が残り実用化の目処は立っていない(例えば、非特許文献2参照。)

## 【0007】

特に、窒化ガリウム(GaN)とAlNは価電子帯におけるバンドオーダリング(ある対称性を持つバンドのエネルギーの並び順)が異なるため、AlNモル分率xの増加に従い $Al_xGa_{1-x}N$ 混晶の偏光方向は、光の電界成分Eがc軸に対して垂直な方向から平行な方向へと変化する。このため、 $Al_xGa_{1-x}N$ 系のLDでは、光を効率良く導波させるために、市販の窒化インジウムガリウム(InGaN)系のLDとは異なる構造が必要となる。

10

## 【0008】

これまでに、内部電界を低減させる技術として非極性面(a面、m面)または半極性面成長を行ったInGaN/GaN MQWがLEDやLDの活性層へ利用され、市販の青紫色LEDの外部量子効率(約50%)に迫る効率(38.9%)を示すm面LEDが報告されている(例えば、非特許文献3参照。)。また、室温で連続発振する波長400nmの青紫色m面LDも報告されている(例えば、非特許文献4参照。)

## 【0009】

従来の紫外線(波長約300nm以下)発光LDは、GaN結晶(六方晶系)のc軸(極性面)面上またはc軸からやや傾斜させた結晶成長面で構成されている(例えば、特許文献1参照。)。このため、歪みにより発生する圧電分極に起因する内部電界効果を十分に低減できなかった。また、紫外線の偏光特性も電界ベクトルEとc軸が垂直のもので、発光効率が低いという問題があった。

20

## 【0010】

また、c軸配向した基板の上に、少なくともn型窒化物半導体層、発光層およびp型窒化物半導体層を積層して成るLEDにおいて、MQW構造のAlGaN混晶で、Alモル分率を30%以下乃至60%以上のものも既に開示されている(例えば、特許文献2参照。)

## 【0011】

しかしながら、MQW構造のAlGaN混晶で、Alモル分率を30%~60%の範囲のものはいまだ開示されていない。

30

## 【0012】

また、特許文献1に開示されているように、c軸またはc軸近傍で傾斜させた例は存在するが、c軸から、例えば、 $40^\circ \sim 90^\circ$ と大幅に活性層の軸方位を傾斜させた紫外線の技術は、未だ開示されていない。

【特許文献1】特開2007-201019号公報

【特許文献2】特開2007-165405号公報

【非特許文献1】エム・アシフカーン、エム・シャタロフ、エイチ・ピー・マルスカ、およびイー・クオクティス(M. Asif Khan, M. Shatalov, H. P. Maruska, H. M. Wang, and E. Kuokstis)著、“ジャパニーズ・ジャーナル・オブ・アプライド・フィジックス(Jpn. J. Appl. Phys.)”、第44巻、第7191ページ(2005年)

40

【非特許文献2】例えば、ティー・タカノ、ワイ・ナリタ、エイ・ホリウチ、およびエイチ・カワニシ(For example see, T. Takano, Y. Narita, A. Horiuchi, and H. Kawanishi)著、“アプライド・フィジックス・レターズ(Appl. Phys. Lett.)”、第84巻、第3567ページ(2004年)

【非特許文献3】エム・シー・シュミット、ケイ・シー・キム、エイチ・サトー、エヌ・フェローズ、エイチ・マスイ、エス・ナカムラ、エス・ピー・デンバース、およびジェイ・エス・スペック(M. C. Schmidt, K.-C. Kim, H. Sato, N. Fellows, H. Masui, S. Nakamura, S. P. DenBaars, and J. S. Speck)著、“ジャパニーズ・ジャーナル・オブ・アプライド・フィジックス(Jpn. J. Appl. Phys.)”、第46巻、第126ページ(2

50

007年)

【非特許文献4】ケイ・オカモト、エイチ・オオタ、エス・エフ・チチブ、ジェイ・イチハラ、およびエイチ・タカス (K. Okamoto, H. Ohta, S. F. Chichibu, J. Ichihara, and H. Takasu) 著、“ジャパニーズ・ジャーナル・オブ・アプライド・フィジックス (Jpn. J. Appl. Phys.) ”、第46巻、第187ページ (2007年)

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0013】

歪みm面InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>MQWからの発光は、その電界成分Eが主にa軸に平行な偏光方向を示すため、共振器ミラー面をc面に沿って形成せねばならない。c面はa面に比べてへき開性が良好ではなく、歩留まり低下の要因となっている。

10

【0014】

本発明の目的は、深紫外線レーザの大型化、低効率といった課題を解決すべく、しきい値電流密度の低い紫外線窒化物半導体発光素子を提供することにある。

【0015】

本発明の目的は、六方晶系の非極性面(a面、m面)または半極性面で結晶成長させたAlGa<sub>N</sub>混晶と、活性層に用いたAlGa<sub>N</sub>結晶のAlとGaのモル分率を最適化させた量子井戸構造により、発光効率を向上させ、低しきい値電流密度化を実現し、深紫外線波長のレーザ光を発生する紫外線窒化物半導体発光素子およびその製造方法を提供することにある。

20

【課題を解決するための手段】

【0016】

上記目的を達成するための本発明の一態様によれば、非極性面基板と半極性面基板とのうち、いずれか1つの基板と、前記基板上に配置され、n型不純物をドーブされたAlGa<sub>N</sub>層と、前記AlGa<sub>N</sub>層上に配置され、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N(0<x<1)障壁層とAl<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N(0<x<1)井戸層からなる量子井戸構造を有するAl<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N活性層と、前記Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N活性層上に配置され、p型不純物をドーブされたAlGa<sub>N</sub>層とを備え、c軸が結晶成長の主面の法線方向から40°~90°の範囲内で傾いた面を結晶成長の主面とし、光の電界成分Eが主にc軸と平行(E//c)なる偏光特性を示し、前記結晶成長面で結晶成長した前記活性層内に形成されるレーザ共振器の端面がa面で形成され、前記活性層の前記井戸数を3以下とする紫外線窒化物半導体発光素子が提供される。

30

【0017】

前記結晶成長の主面には、非極性面または半極性面が含まれる。

【0018】

前記非極性面には、m面またはa面が含まれる。

【0019】

前記半極性面には、{10-11}面、{10-12}面、或いは{11-22}面の内、いずれか1つが含まれる。

【0020】

結晶成長の主面としてm面、{10-11}面、或いは{10-12}面の内、いずれか1つの面を選択した場合、a面をレーザ共振器の反射鏡として用いる。

40

【0021】

前記a面は、へき開面である。

【0022】

前記活性層は、単一井戸ないしは多重量子井戸構造を備え、前記Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N井戸層のAl<sub>N</sub>モル分率は30%以上60%以下であり、かつ、前記Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N障壁層のAl<sub>N</sub>モル分率と前記Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N井戸層のAl<sub>N</sub>モル分率の比は0.7以上である。

【0023】

本発明の他の態様によれば、m面基板と、前記m面基板上に配置され、n型不純物をド

50

ープされた  $AlInN$  層と、前記  $AlInN$  層上に配置された  $Al_{1-x}In_xN$  障壁層と  $Al_{1-x}In_xN$  井戸層からなる量子井戸構造を有する  $Al_{1-x}In_xN/Al_{1-x}In_xN$  活性層と、前記  $Al_{1-x}In_xN/Al_{1-x}In_xN$  活性層上に配置され、 $p$  型不純物をドーブされた  $AlInN$  層とを備え、 $c$  軸が結晶成長の主面の法線方向から  $40^\circ \sim 90^\circ$  の範囲内で傾いた面を結晶成長の主面とし、光の電界成分  $E$  が主に  $c$  軸と平行 ( $E // c$ ) なる偏光特性を示し、前記結晶成長面で結晶成長した前記活性層内に形成されるレーザ共振器の端面が  $a$  面で形成され、前記活性層の前記井戸数を 3 以下とする紫外線窒化物半導体発光素子が提供される。

## 【0024】

前記活性層は、単一井戸ないしは多重量子井戸構造を備え、 $InN$  モル分率が 5% 以下である。

10

## 【0025】

本発明の他の態様によれば、 $m$  面基板を準備する工程と、 $c$  軸が結晶成長の主面の法線方向から  $40^\circ \sim 90^\circ$  の範囲内で傾いた面を結晶成長の主面とし、前記  $m$  面基板上に  $n$  型不純物をドーブされた  $AlGaN$  層を形成する工程と、前記  $AlGaN$  層上に  $Al_xGa_{1-x}N$  障壁層と  $Al_xGa_{1-x}N$  井戸層からなる量子井戸構造を有し前記活性層の前記井戸数を 3 以下とするように  $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$  活性層を形成する工程と、前記  $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$  活性層上に  $p$  型不純物をドーブされた  $AlGaN$  層を形成する工程と、 $a$  面に沿ってレーザ共振器の反射面を形成する工程とを有する紫外線窒化物半導体発光素子の製造方法が提供される。

20

## 【0026】

前記  $a$  面に沿ってレーザ共振器の反射面を形成する工程は、へき開を有する。

## 【0027】

前記  $n$  型不純物は  $Si$  であり、前記  $p$  型不純物は  $Mg$  である。

## 【発明の効果】

## 【0028】

本発明によれば、六方晶系の非極性面 ( $a$  面、 $m$  面) または半極性面で結晶成長させた  $AlGaN$  混晶と、活性層に用いた  $AlGaN$  結晶の  $Al$  と  $Ga$  のモル分率を最適化させた量子井戸構造により、発光効率を向上させ、低しきい値電流密度で深紫外線波長のレーザ光を発生する、紫外線窒化物半導体発光素子およびその製造方法を提供することができる。

30

## 【発明を実施するための最良の形態】

## 【0029】

次に、図面を参照して、本発明の実施の形態を説明する。以下の図面の記載において、同一または類似の部分には同一または類似の符号を付している。ただし、図面は模式的なものであり、現実のものとは異なることに留意すべきである。また、図面相互間においても互いの寸法の関係や比率が異なる部分が含まれていることはもちろんである。

## 【0030】

また、以下に示す実施の形態は、この発明の技術的思想を具体化するための装置や方法を例示するものであって、この発明の技術的思想は、各構成部品の配置などを下記のものに特定するものでない。この発明の技術的思想は、特許請求の範囲において、種々の変更を加えることができる。

40

## 【0031】

## [第1の実施の形態]

図1は、本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子に適用する  $GaN$  層および  $AlN$  層のバンドダイヤグラムの比較であって、図1(a)は、 $GaN$  の点におけるバンドダイヤグラム、図1(b)は、 $AlN$  の点におけるバンドダイヤグラムを示す。

## 【0032】

III族窒化物半導体は、安定相として六方晶系のウルツ鉱型構造をとる。このため、価電

50

子帯は、スピン - 軌道分裂 (so) に加え、結晶場分裂 (cr) を生じる。その結果、無歪 GaN の価電子帯は、図 1 (a) に示すように、高エネルギー側から順に  $\Gamma_{9V}$ 、 $\Gamma_{7V}$ 、 $\Gamma_{7V}$  の対称性を持つこととなる。

【0033】

各々のバンドから伝導帯 ( $\Gamma_C$ ) への遷移は、順に A 遷移、B 遷移、C 遷移と呼ばれ、A、B 遷移は光の電界ベクトル E と結晶の光学軸である c 軸が垂直 ( $E \perp c$ ) の時に、C 遷移は E と c 軸が平行 ( $E // c$ ) の時に、主に許容される。

【0034】

これに対し、無歪 AlN では、結晶場分裂 cr が負のため、図 1 (b) に示すように、バンドオーダリングは高エネルギー側から順に  $\Gamma_{7V}$ 、 $\Gamma_{9V}$ 、 $\Gamma_{7V}$  となる。この場合、A 遷移は電界ベクトル E と c 軸が平行 ( $E // c$ )、B、C 遷移は電界ベクトル E と c 軸が垂直 ( $E \perp c$ ) の時に主に許容となる。

【0035】

これまでに、GaN のバンド端近傍の光学的特性に関する報告は数多くされており、例えば、励起子遷移エネルギーの歪依存性や、so や cr などのバンドパラメータの実験値も報告されている (S. Chichibu, A. Shikanai, T. Azuhata, T. Sota, A. Kuramata, K. Horino, and S. Nakamura, Appl. Phys. Lett. 68, 3766 (1996)、および A. Shikanai, T. Azuhata, T. Sota, S. Chichibu, A. Kuramata, K. Horino, and S. Nakamura, J. Appl. Phys. 81, 417 (1996))。その一方で、AlN に対しては同様な報告はこれまでに

【0036】

本発明者らは、c 面サファイア基板に成長した AlN における励起子遷移エネルギーの歪依存性を実験データとして集め、それらの理論フィッティングから AlN のバンドパラメータを初めて定量化した。それを基にして、GaN と AlN のデータの線形補間をすることによって  $Al_xGa_{1-x}N$  混晶のバンドパラメータを導き出し、価電子帯のバンドオーダリングの AlN モル分率 x の依存性を得た。

【0037】

図 2 は、本発明の第 1 の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子に適用する  $Al_xGa_{1-x}N$  混晶の特性であって、図 2 (a) は、無歪み  $Al_xGa_{1-x}N$  混晶の価電子帯頂上のバンドオーダリングの AlN モル分率 x 依存性、図 2 (b) は、無歪み GaN 基板上で面内に伸張歪みを受けた  $Al_xGa_{1-x}N$  混晶の c 軸方向の歪み  $\epsilon_{zz}$  (%) の AlN モル分率 x 依存性を示す。

【0038】

図 2 において、 $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  は価電子帯頂上から伝導帯への遷移エネルギーを表している。GaN の場合、 $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  は A、B、C 遷移エネルギーに相当する。また、 $a$  は、 $AlGa$  N 混晶の面内格子定数 a の非線形項の係数を表す。

【0039】

図 2 に示すように、無歪みの  $Al_xGa_{1-x}N$  混晶では、AlN モル分率  $x = 0.095$ 、GaN 上に成長した面内に伸張歪みを受けた  $Al_xGa_{1-x}N$  混晶では、 $x = 0.032 \sim 0.048$  を越えると、バンドオーダリングは  $\Gamma_{9V}$ 、 $\Gamma_{7V}$ 、 $\Gamma_{7V}$  から  $\Gamma_{7V}$ 、 $\Gamma_{9V}$ 、 $\Gamma_{7V}$  へと入れ替わる。

【0040】

図 2 (a) より明らかなように、基準線である  $E_1(\Gamma_9)$  線と  $E_2(\Gamma_7) - E_1(\Gamma_9)$  線の交点 ( $x = 0.095$ ) において、 $\Gamma_{9V}$  と  $\Gamma_{7V}$  が入れ替わる。

【0041】

また、図 2 (b) において、 $a = 0$  ( ) の線は、混晶の面内格子定数 a へ非線形効果を考慮しない場合の結果を表す。また、 $a = -0.04$  ( ) の線は非線形効果を考慮した場合の結果を表す (B. T. Liou, S. H. Yen, and Y. K. Kuo, Appl. Phys. A 81, 1459 (2005))。

【0042】

10

20

30

40

50

これらに対し、 $E_2(\gamma) = E_1(\gamma)$ 線は、価電子帯頂上のバンドオーダリングが入れ替わる境界を表す。 $E_2(\gamma) = E_1(\gamma)$ 線の上部は $\gamma_{9V}$ 、 $\gamma_{7V}$ 、 $\gamma_{17V}$ 、下部は $\gamma_{7V}$ 、 $\gamma_{9V}$ 、 $\gamma_{17V}$ となる。それぞれ、 $x = 0.032$ 、 $x = 0.048$ で、 $\gamma_{9V}$ と $\gamma_{7V}$ が入れ替わる。

#### 【0043】

そのため、AlNモル分率 $x$ が0.1以上の $Al_xGa_{1-x}N$ 混晶及びその量子井戸をLDの活性層に用いた場合、その発光は、電界ベクトル $E$ と $c$ 軸が平行( $E // c$ )の偏光特性を示す。

#### 【0044】

(基本素子構造)

図3は、本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子に適用する非極性面および半極性面について説明するための模式図である。

#### 【0045】

図3(a)は、III族窒化物半導体の結晶構造を示す模式図、図3(b)は、非極性面である $m$ 面 $\{1-100\}$ および $a$ 面 $\{11-20\}$ を説明するための模式図、図3(c)は、半極性面 $\{10-11\}$ を説明するための模式図、図3(d)は、半極性面 $\{10-12\}$ を説明するための模式図、図3(e)は、半極性面 $\{11-22\}$ を説明するための模式図をそれぞれ示す。

#### 【0046】

図3(b)から明らかなように、 $m$ 面に垂直な $m$ 軸方向 $\langle 10-10 \rangle$ は、 $c$ 軸方向 $\langle 0001 \rangle$ に対して角度 $\theta = 90^\circ$ をなす。また、 $a$ 面 $\{11-20\}$ と $c$ 軸は平行であり、 $a$ 面 $\{11-20\}$ に垂直な $a$ 軸方向 $\langle 11-20 \rangle$ は、 $c$ 軸方向 $\langle 0001 \rangle$ に対して $90^\circ$ をなす。

#### 【0047】

図3(c)から明らかなように、半極性面 $\{10-11\}$ に垂直な $\langle 10-11 \rangle$ 方向は、 $c$ 軸方向 $\langle 0001 \rangle$ に対して角度 $\theta = 62^\circ$ をなす。

#### 【0048】

図3(d)から明らかなように、半極性面 $\{10-12\}$ に垂直な $\langle 10-12 \rangle$ 方向は、 $c$ 軸方向 $\langle 0001 \rangle$ に対して角度 $\theta = 43^\circ$ をなす。

#### 【0049】

図3(e)から明らかなように、半極性面 $\{11-22\}$ に垂直な $\langle 11-22 \rangle$ 方向は、 $c$ 軸方向 $\langle 0001 \rangle$ に対して角度 $\theta = 58^\circ$ をなす。

#### 【0050】

図4は、本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子の模式的鳥瞰図であって、同時に $m$ 面GaN基板10上へMQW構成の $AlGaIn/AlGaIn$ 活性層16を形成したLDの概念図を示す。

#### 【0051】

本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子は、図4に示すように、 $m$ 面基板10と、 $m$ 面基板10上に配置され、 $n$ 型不純物をドーパされた $AlGaIn$ 層(12, 14)と、 $AlGaIn$ 層(12, 14)上に配置され、 $Al_xGa_{1-x}N$ 障壁層と $Al_xGa_{1-x}N$ 井戸層からなる量子井戸構造を有する $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16と、 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16上に配置され、 $p$ 型不純物をドーパされた $AlGaIn$ 層(18, 20)とを備え、図3(b)乃至図3(e)に示すように、 $c$ 軸が結晶成長の主面の法線方向から $40^\circ \sim 90^\circ$ の範囲内で傾いた面を結晶成長の主面とし、光の電界成分 $E$ が主に $c$ 軸と平行( $E // c$ )なる偏光特性を示すことを特徴とする。

#### 【0052】

ここで、図3(d)の例では、半極性面 $\{10-12\}$ に垂直な $\langle 10-12 \rangle$ 方向は、 $c$ 軸方向 $\langle 0001 \rangle$ に対して角度 $\theta = 43^\circ$ をなすが、実際に結晶成長面を構成する場合には、プラス/マイナス約 $3^\circ$ 程度のオフ角面を適用して所望の結晶成長速度と表面

10

20

30

40

50

モフォロジーを確保している。

【0053】

従って、本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、c軸が結晶成長の主面の法線方向から $40^\circ \sim 90^\circ$ の範囲内で傾いた面を結晶成長の主面としている。

【0054】

また、本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、図3(b)乃至図3(e)に示すように、結晶成長の主面には、非極性面または半極性面が含まれることを特徴とする。

【0055】

また、本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、図3(b)に示すように、非極性面には、m面またはa面が含まれることを特徴とする。

【0056】

また、本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、図3(c)乃至図3(e)に示すように、半極性面には、 $\{10-11\}$ 面、 $\{10-12\}$ 面、或いは $\{11-22\}$ 面の内、いずれか1つが含まれることを特徴とする。

【0057】

また、本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、結晶成長の主面としてm面、 $\{10-11\}$ 面、或いは $\{10-12\}$ 面の内、いずれか1つの面を選択した場合、a面を共振器の反射鏡として用いることを特徴とする。

【0058】

すなわち、図3(b)乃至図3(e)に示すように、結晶成長の主面としてm面、 $\{10-11\}$ 面、或いは $\{10-12\}$ 面のいずれの面を選択した場合においても、図4に示すストライプ構造からなるレーザ共振器の端面は、a面となる。

【0059】

本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、m面基板10を使用し、c軸が結晶成長の主面の法線方向から $40^\circ \sim 90^\circ$ の範囲内で傾いた面を結晶成長の主面として用いた場合、いずれの面を結晶成長の主面として選択した場合においても、図4に示すストライプ構造からなるレーザ共振器の端面は、a面となる。

【0060】

また、本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、a面は、へき開面であることを特徴とする。

【0061】

また、本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、活性層は、単一井戸ないしは多重量子井戸構造を備え、 $Al_xGa_{1-x}N$ 井戸層のAlNモル分率は30%以上60%以下であり、かつ、 $Al_xGa_{1-x}N$ 障壁層のAlNモル分率と $Al_xGa_{1-x}N$ 井戸層のAlNモル分率の比は0.7以上であることを特徴とする。

【0062】

(詳細素子構造)

本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子は、図4に示すように、m面GaN基板10と、m面GaN基板10上に配置され、n型不純物をドーブされたAlGaNクラッド層12と、AlGaNクラッド層12上に配置され、n型不純物をドーブされたAlGaN導波層14と、AlGaN導波層14上に配置され、 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16と、 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16上に配置され、p型不純物をドーブされたAlGaN導波層18と、AlGaN導波層18上に配置され、p型不純物をドーブされたAlGaNクラッド層20と、AlGaNクラッド層20に配置され、p型不純物をドーブされたAlGaNコンタクト層22と、AlGaNコンタクト層22上に配置されAlGaNコンタクト層22とオーミック接触するp側電極26と、p側電極26と対向してm面GaN基板10上に配置され、m面GaN基板10とオーミック接触するn側電極24とを備え、c軸が結晶成長の主面の法線方向から $40^\circ$

10

20

30

40

50

~ 90° の範囲内で傾いた面を結晶成長の主面とし、光の電界成分 E が主に c 軸と平行 ( E // c ) なる偏光特性を示すことを特徴とする。

【 0 0 6 3 】

結晶成長の主面には、非極性面または半極性面が含まれる。

【 0 0 6 4 】

非極性面には、m 面または a 面が含まれる。

【 0 0 6 5 】

半極性面には、{ 1 0 - 1 1 } 面、{ 1 0 - 1 2 } 面、或いは { 1 1 - 2 2 } 面の内、いずれか 1 つが含まれる。

【 0 0 6 6 】

結晶成長の主面として m 面、{ 1 0 - 1 1 } 面、或いは { 1 0 - 1 2 } 面の内、いずれか 1 つの面を選択した場合、a 面を共振器の反射鏡として用いる。

【 0 0 6 7 】

a 面は、へき開面であることを特徴とする。

【 0 0 6 8 】

活性層 1 6 は、単一井戸ないしは多重量子井戸構造を備え、 $A l_x G a_{1-x} N$  井戸層の  $A l N$  モル分率は 30% 以上 60% 以下であり、かつ、 $A l_x G a_{1-x} N$  障壁層の  $A l N$  モル分率と  $A l_x G a_{1-x} N$  井戸層の  $A l N$  モル分率の比は 0.7 以上である。

【 0 0 6 9 】

図 4 においては、 $A l G a N$  コンタクト層 2 2 および  $A l G a N$  クラッド層 2 0 の一部分をストライプ形状に反応性イオンエッチング ( R I E : Reactive Ion Etching ) などのエッチング技術を用いて除去し、リッジストライプ構造を形成している。すなわち、p 型  $A l G a N$  クラッド層 2 0 の一部および p 型  $A l G a N$  コンタクト層 2 2 には、横モード制御のため、ドライエッチングにより、a 軸に沿ってリッジ構造が形成される。このようなリッジストライプ構造を有する  $A l G a N$  コンタクト層 2 2 上には、p 側電極 2 6 が配置されて、分離閉じ込め型の構造となっている。

【 0 0 7 0 】

p 側電極 2 6 は、a 軸に沿うストライプ状の領域に形成され、ストライプ方向に沿って共振器が形成されており、端面は a 面になっている。

【 0 0 7 1 】

$G a N$  の a 面は良好なへき開性を示すため、本発明の第 1 の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体レーザダイオードにおいては、端面における反射ロスを低減し、しきい値電流密度を低減させることができる。

【 0 0 7 2 】

図 4 に示す LD は、n 型導電性を示す自立 m 面  $G a N$  を基板として使い、裏面に n 側電極を形成している。m 面  $S i C$  や r 面サファイアなどの絶縁性基板を用いた場合は、m 面基板 1 0 と n 型  $A l G a N$  クラッド層 1 2 の間に n 型  $A l G a N$  コンタクト層を挿入し、メサ構造を作製した後に、n 型  $A l G a N$  コンタクト層上に n 側電極 2 4 を形成しても良い。

【 0 0 7 3 】

また、 $G a N$  m 面基板 1 0 での紫外線光の吸収を回避するため、自立  $A l N$  や  $A l G a N$  基板を用いてもよい。自立 m 面  $G a N$  基板のオフ角は、例えば、約プラス/マイナス 1° 以内とする。

【 0 0 7 4 】

p 型  $A l G a N$  コンタクト層 2 2 は、p 側電極 2 6 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。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、例えば、約  $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  程度) することによって p 型  $A l G a N$  コンタクト層 2 2 を形成することができる。

【 0 0 7 5 】

n 型  $A l G a N$  クラッド層 1 2 および p 型  $A l G a N$  クラッド層 2 0 は、 $A l G a N / A$

10

20

30

40

50

AlGaIn活性層16からの光を閉じ込めるための層である。

【0076】

厚さは、例えば、約1 $\mu$ m程度とし、n型ドーパントとしてはSi（ドーピング濃度は、例えば、約 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ）、p型ドーパントとしてはMg（ドーピング濃度は、例えば、約 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ）をドーピングすることによって、n型AlGaInクラッド層12およびp型AlGaInクラッド層20を形成することができる。

【0077】

n型AlGaInクラッド層12およびp型AlGaInクラッド層20は、AlGaIn導波層14よりもバンドギャップエネルギーを大きくすることにより、良好な光閉じ込めを行うことができる。

10

【0078】

n型AlGaIn導波層14およびp型AlGaIn導波層18は、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 活性層16にキャリア（電子および正孔）を閉じ込めるための層である。n型AlGaIn導波層14およびp型AlGaIn導波層18の厚さは、例えば、約0.1 $\mu$ m程度とし、n型ドーパントとしてはSi（ドーピング濃度は、例えば、約 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 程度）、p型ドーパントとしてはMg（ドーピング濃度は、例えば、約 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 程度）をドーピングすることによって、n型AlGaInクラッド層12およびp型AlGaInクラッド層20を形成することができる。

【0079】

$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 活性層16は、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 井戸層（例えば3nm厚）と $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 障壁層（例えば、9nm厚）を複数周期積層して構成される。活性層体積を減らし、しきい値電流密度低減を図るため井戸数は3以下とする。

20

【0080】

p側電極26と、p側電極26と対向してm面GaN基板10上に配置されるn側電極24との間に順方向バイアス電圧を印加し、順方向電流を導通することで、AlGaIn/AlGaIn活性層16に電流が注入されて、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 活性層16内にレーザ共振器が形成される。レーザ共振器の端面は、へき開で形成されたa面で構成され、レーザ共振器の長手方向はリッジストライプ形状に沿って形成される。このように、p側電極26と、p側電極26と対向してm面GaN基板10上に配置されるn側電極24との間の $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 活性層16内に形成されるレーザ共振器が

30

ゲイン構造を構成している。

【0081】

AlGaInクラッド層12およびAlGaInクラッド層20は、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 活性層16へのキャリアの閉じ込め効果を備える。

【0082】

また、AlGaIn導波層14およびAlGaIn導波層18は、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 活性層16への光の閉じ込め効果を備える。

【0083】

本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子から出射されるレーザ光は、図4中の実線で示すように、電界ベクトル成分Eがc軸[0001]に平行なE//cの偏光特性を有するTEモードの偏波特性を示す。通常、へき開共振器LDでは、TEモードを導波させるため、本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、効率的な導波性能を示し、しきい値電流密度を低下させることができる。この結果、発光効率を向上させ、低しきい値電流密度で深紫外線波長のレーザ光を発生することができる。

40

【0084】

（比較例）

図5は、本発明の比較例に係る紫外線窒化物半導体発光素子の模式的鳥瞰図であって、c面GaN基板100上へMQW構成のAlGaIn/AlGaIn活性層160を形成したLDの概念図を示す。図5は、波長405nmの青紫色LDの構造に対応している。

50

## 【0085】

本発明の比較例に係る紫外線窒化物半導体発光素子は、図5に示すように、c面GaN基板100と、c面GaN基板100上に配置され、n型不純物をドーブされたAlGaNクラッド層120と、AlGaNクラッド層120上に配置され、n型不純物をドーブされたAlGaN導波層140と、AlGaN導波層140上に配置され、MQW構成のAlGaN/AlGaN活性層160と、AlGaN/AlGaN活性層160上に配置され、p型不純物をドーブされたAlGaN導波層180と、AlGaN導波層180上に配置され、p型不純物をドーブされたAlGaNクラッド層200と、AlGaNクラッド層200上に配置され、p型不純物をドーブされたAlGaNコンタクト層220と、AlGaNコンタクト層220上に配置され、AlGaNコンタクト層220とオーミック接触するp側電極260と、p側電極260と対向してc面GaN基板100上配置され、c面GaN基板100とオーミック接触するn側電極240とを備える。

10

## 【0086】

図5においても、リッジストライプ構造を形成している。

## 【0087】

p側電極260と、p側電極260と対向してc面GaN基板100上に配置されるn側電極240との間に順方向バイアス電圧を印加し、順方向電流を導通することで、AlGaN/AlGaN活性層160に電流が注入されて、AlGaN/AlGaN活性層160内にレーザ共振器が形成される。レーザ共振器の端面は、m面で構成され、レーザ共振器の長手方向はリッジストライプ形状に沿ってm軸方向に形成される。このように、p側電極260と、p側電極260と対向してm面GaN基板100上に配置されるn側電極240との間のAlGaN/AlGaN活性層160内に形成されるレーザ共振器がゲイン構造を構成している。

20

## 【0088】

本発明の比較例に係る紫外線窒化物半導体発光素子から出射されるレーザ光は、図5中の点線で示すように、電界ベクトル成分Eがc軸に平行なE//cの偏光特性を有する発光は、TMモードの偏波特性を備える。通常、へき開共振器LDでは、TEモードを導波させるため、それが許容されるバンドまでキャリアを満たさないと発振に至らないので、本発明の比較例に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、しきい値電流密度の増加は避けられない。

30

## 【0089】

(共振器ミラー面と導波モード)

図6(a)は、c面を共振器ミラー面28a, 28bとして用いた場合の導波モードを表す図であり、図6(b)は、a面を共振器ミラー面30a, 30bとして用いた場合の導波モードを表す図である。図6(a)の例では、図6(a)中の実線で示されるように、電界ベクトル成分Eがc軸に垂直なE⊥cの偏光特性を有する光がTEモードの導波特性を示す。これに対して、図6(b)の例では、図6(b)中の実線で示されるように、電界ベクトル成分Eがc軸に平行なE//cの偏光特性を有する光がTEモードの導波特性を示す。

40

## 【0090】

図6(b)に示すように、共振器ミラー面28a, 28bをa面で形成すると、E//cの偏光特性をもつ光は導波路に対してTEモードの偏波特性を示すため、効率的な光導波が可能となる。同様に、共振器ミラー面28a, 28bをm面で形成すると、E//cの偏光特性をもつ光は導波路に対してTEモードの偏波特性を示すため、効率的な光導波が可能となる。

## 【0091】

そこで、本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子では、非極性面(a面、m面)または半極性面成長を行ったAlGaN/AlGaN MQWを活性層として採用する。これにより、図6(b)に示すように、共振器ミラー面30a, 30bをa面あるいはm面で形成すると、E//cの偏光特性をもつ光は導波路に対してTEモードの偏

50

波特性を示すため、効率的な光導波が可能となる。

【0092】

これに加えて、図4および図6(b)に示すように、分極の生じる方向であるc軸が量子井戸面内にあるため、量子井戸の上下の界面に固定電荷が発生せず、内部電界効果を低減することができる。

【0093】

さらに、GaNはa面でへき開され易いため、m面成長を行ってa面を反射鏡として共振器を設ける方が歩留まり向上の観点から有利である。

【0094】

以上の三つの理由によって、本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、しきい値電流密度の低減化を図ることができる。

10

【0095】

図4では、m面成長させるために自立m面GaNを基板として用いているが、m面SiCや、(100)面LiAlO<sub>2</sub>などを異種基板として用いてもよい。また、a面成長させるためにr面サファイアなどを基板として用いてもよい。

【0096】

半極性面とは、図3(c)乃至図3(e)に示すように、c面と非極性面(a面、m面)の間の傾斜した面を意味する。この面を利用する場合は、E//cの偏光特性をもつ光が優先的にTEモードの偏波特性をもつように、c軸が、量子井戸面の法線方向に対してm軸(またはa軸)方向に例えば、約40°~90°の範囲内で傾いた面を選択する。例えば、{10-11}面、{10-12}面、{11-22}面などである。

20

【0097】

(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N井戸層のAlNモル分率)

図18(a)は、本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子におけるレーザ光の発振波長とAlNモル分率xとの関係を示す。また、図18(b)は、本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子におけるバンドギャップエネルギーとAl<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N井戸層のAlNモル分率xとの関係を示す。ここで、バンドギャップエネルギーE<sub>g</sub>(x)は、次式で表すことができる(T. Onuma, S. F. Chichibu et al., JAP 95, 2495(2004))。

【0098】

$$E_g(x) = 6.04x + 3.412(1-x) - 0.82x(1-x) \quad (1)$$

波長300nmで発光させる場合は、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N井戸層のAlNモル分率xを0.3、波長285nmで発光させる場合はAl<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N井戸層のAlNモル分率xを0.4、波長270nmで発光させる場合はAl<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N井戸層のAlNモル分率xを0.5とする。

30

【0099】

(Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N障壁層のAlNモル分率)

これらに対し、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N障壁層のAlNモル分率xは、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N井戸層への過大な圧縮歪みを回避するべく、以下の手順で設計する。

【0100】

図7は、無歪みAl<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N障壁層の上に積層したAl<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N井戸層に発生するc軸方向の歪み $\epsilon_{zz}$ (%)の、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N障壁層のAlNモル分率x依存性を示す。

40

【0101】

結果は、図2で得られた結果を基に導き出したものである。図7中において交差する直線は、価電子帯頂上のバンドオーダリングが入れ替わる境界を表す。

【0102】

図7中において交差する直線の上部は、 $\epsilon_{9V}$ 、 $\epsilon_{7V}^u$ 、 $\epsilon_{7V}^l$ 、下部は、 $\epsilon_{7V}^u$ 、 $\epsilon_{9V}$ 、 $\epsilon_{7V}^l$ となる。例えば、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N井戸層がx=0.4の時、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N障壁層がx>0.56で面内への圧縮歪みにより、 $\epsilon_{7V}^u$ 、 $\epsilon_{9V}$ 、 $\epsilon_{7V}^l$ であったバンドオーダリングが $\epsilon_{7V}^u$ 、 $\epsilon_{9V}$ 、 $\epsilon_{7V}^l$ から $\epsilon_{9V}$ 、 $\epsilon_{7V}^u$ 、 $\epsilon_{7V}^l$ へ入れ替わる。

50

## 【0103】

このため、発光の電界成分  $E$  は  $a$  軸に平行な偏光方向となり、本発明の第 1 の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子において得られる  $E // c$  の偏光特性をもつ発光が得られなくなってしまう。

## 【0104】

以上の理由から、 $Al_xGa_{1-x}N$  井戸層の  $AlN$  モル分率  $x$  を 0.3、0.4、0.5 とする場合は、 $Al_xGa_{1-x}N$  障壁層の  $AlN$  モル分率を 0.41、0.56、0.71 以下とする。

## 【0105】

$n$  側電極 24 は、例えば、 $Ti/Al$  合金からなり、 $p$  側電極 26 は、例えば、 $Al$  金属、 $Pd/Au$  合金からなり、それぞれ  $n$  型  $GaN$  基板 10、 $p$  型  $AlGaN$  コンタクト層 22 にオーミック接触される。

10

## 【0106】

(MQWの井戸数)

図 19 は、 $GaN/InGaN$  青紫 LD の一構造を例とする正孔密度と距離の関係を示す図であって、MQW 活性層への不均一な正孔分布を説明する図である (K. Domen et al., MRS Internet J. Nitride Semicond. Res. 3, 2(1988))。また、図 20 は、 $GaN/InGaN$  青紫 LD の別の構造を例とする正孔密度と距離の関係を示す図であって、MQW 活性層への不均一な正孔分布を説明する図である (J. Y. Chang et al., JAP 93, 4992(2003))。また、図 21 は、 $GaN/InGaN$  青紫 LD における閾値電流密度  $J$  ( $kA/cm^2$ ) と  $InGaN$  井戸数の関係を示す図である (S. Nakamura et al., JJAP 37, L1020 (1998))。

20

## 【0107】

図 19 乃至図 20 に示すように、MQW 活性層の各井戸へ注入される正孔密度は不均一であることがわかる。MQW の周期数を増加すると最上層の量子井戸の結晶性は向上するが、下部の井戸は正孔が十分に注入されないため、自己吸収層として働いてしまう。また、図 21 に示すように、MQW の周期数が 2 の時に、閾値電流密度が最も小さくなる。

## 【0108】

本発明の第 1 の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においても MQW の周期数には最適な数が存在する。本発明の第 1 の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においても  $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$  活性層 16 の MQW の周期数の最適な数は、3 以下である。 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$  活性層 16 の MQW の周期数を増加しても最上層の量子井戸の結晶性は向上するが、下部の井戸は正孔が十分に注入されないため、自己吸収層として働いてしまうことから、極最上層の 2 ペア ~ 3 ペアが有効な MQW の周期数となるからである。

30

## 【0109】

(製造装置)

MOVPE 装置

図 16 は、本発明の第 1 の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子の製造方法に適用される MOVPE 装置の模式的構成を示す。

40

## 【0110】

本発明の第 1 の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子の製造方法に適用される MOVPE 装置は、図 16 に示すように、反応槽 60 内にサセプタ 56 と、サセプタ 56 上に配置された基板 52 を備え、反応槽 60 の外部には、加熱機構を備える。反応槽 60 の外部の入力側には、水素 (または窒素またはこれらの両方) キャリアガス供給槽 40 と、水素 (または窒素またはこれらの両方) キャリアガス供給槽 40 に連結されるアルミニウム ( $Al$ ) 供給槽 42、ガリウム ( $Ga$ ) 供給槽 44、インジウム ( $In$ ) 供給槽 45、マグネシウム ( $Mg$ ) 供給槽 47、およびジメチルヒドラジン ( $DMHy$ ) 供給槽 46 と、水素 (または窒素またはこれらの両方) キャリアガス供給槽 40 とは独立して反応槽 60 に連結されるアンモニア ( $NH_3$ ) ガスポンペ 48 とシリコン ( $Si$ ) 供給用ガスボ

50

ンベ49とを備える。また、反応槽60の外部の出力側には、排気口が連結される。なお、図16の構成例においては、反応槽60への原料供給ガスを、アンモニア、ジメチルヒドラジンとIII族元素を分離しているが、このような構成に限定されるものではない。

【0111】

加熱機構は、ヒータ、赤外線（IR）ランプ、高周波誘導などで構成する。加熱機構により過熱されるサセプタの温度は、例えば約1050 以上である。

【0112】

アルミニウム（Al）供給槽42には、例えば、トリメチルアルミニウム（TMA1）、トリエチルアルミニウム（TEAl）、或いはトリイソブチルアルミニウム（TIBA1）などを適用する。

10

【0113】

ガリウム（Ga）供給槽44には、例えば、トリメチルガリウム（TMG）、トリエチルガリウム（TEG）、或いはトリプロピルガリウム（TPG）などを適用する。

【0114】

インジウム（In）供給槽45には、例えば、トリメチルインジウム（TMI n）或いはトリエチルインジウム（TEIn）などを適用する。

【0115】

マグネシウム（Mg）供給槽47には、例えば、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム（Cp<sub>2</sub>Mg）或いはビスエチルシクロペンタジエニルマグネシウム（EtCp<sub>2</sub>Mg）などを適用する。

20

【0116】

シリコン原料には、例えば、シラン（SiH<sub>4</sub>）或いはモノメチルシラン（CH<sub>3</sub>SiH<sub>3</sub>）を適用する。原料は、水素なしいは窒素で1～100,000ppmに希釈されている。

【0117】

Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N層の結晶成長温度は、例えば、約1050 以上であり、1050 ~ 1300、望ましくは、例えば約1260 ~ 1270 である。場合によっては、1400 以上であっても良い。

【0118】

Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N層の結晶成長における反応槽60の圧力は、例えば、約0.02気圧（atm）～0.3気圧程度であり、望ましくは約0.1気圧程度である。

30

【0119】

MBE装置

図17は、本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子の製造方法に適用されるMBE装置の模式的構成を示す。

【0120】

本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子の製造方法に適用されるMBE装置は、図17に示すように、反応槽内に基板ヒータ74、基板ホルダ72および基板52を備える。

40

【0121】

反応槽の内壁部は、液体窒素シュラウド76で形成され、反応槽の外部には、電子ビーム源70、Gaセル62、Alセル64、Inセル67、Siセル65、Mgセル63、アンモニア（NH<sub>3</sub>）または窒素（N<sub>2</sub>）ガスボンベ48に連結されたアンモニア（NH<sub>3</sub>）セルまたはRFプラズマソース66、RHEEDスクリーン68が配置される。

【0122】

さらに、基板52に対して、電子ビーム源70から電子ビーム70aが照射され、回折された電子ビーム70bは、RHEEDスクリーン68に導かれる。

【0123】

さらに、反応槽の外部の出力側には、排気バルブ78を介して排気口54が連結される

50

## 【0124】

(製造方法)

本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子の製造方法は、図4に示すように、m面GaN基板10を準備する工程と、c軸が結晶成長の主面の法線方向から $40^\circ \sim 90^\circ$ の範囲内で傾いた面を結晶成長の主面とし、m面GaN基板10上にn型不純物をドーブされたAlGaNクラッド層12を形成する工程と、AlGaNクラッド層12上にn型不純物をドーブされたAlGaN導波層14を形成する工程と、AlGaN導波層14上に $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16を形成する工程と、 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16上にp型不純物をドーブされたAlGaN導波層18を形成する工程と、AlGaN導波層18上にp型不純物をドーブされたAlGaNクラッド層20を形成する工程と、AlGaNクラッド層20上にp型不純物をドーブされたAlGaNコンタクト層22を形成する工程と、AlGaNコンタクト層22上にオーミック接触するp側電極26を形成する工程と、p側電極26と対向してm面GaN基板10上にオーミック接触するn側電極24を形成する工程と、a面に沿って共振器の反射面を形成する工程とを有する。

10

## 【0125】

本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子の製造方法を以下に詳述する。

## 【0126】

MOVPEによる製造方法

(a) 基板52ウェハをサセプタに保持させる。この状態で、反応管へキャリアガスおよび窒素原料ガス(アンモニアガスまたはジメチルヒドラジン)を供給する。キャリアガスには水素もしくは窒素またはこれらの両方を用いる。さらに加熱機構50によりウェハを昇温させる。ただし、サファイア、SiC、LiAlO<sub>2</sub>、MgAl<sub>12</sub>O<sub>4</sub>基板を用いる場合は、基板52表面の窒化を避けるため、窒素原料ガスを供給せずに昇温する。

20

## 【0127】

(b) 基板52ウェハ温度が、例えば約1050℃以上に達するまで待機した後、アルミニウム原料、ガリウム原料、窒素原料ガス、及びシリコン原料を反応管へ供給し、ウェハ表面に、シリコンが添加されたn型AlGaNクラッド層12およびn型AlGaN導波層14を成長させる。

30

## 【0128】

(c) AlGaN/AlGaN活性層16の成長を行う。井戸層成長時と障壁層成長時で、アルミニウム原料とガリウム原料の供給流量比を変化させる。これを例えば3回に渡って繰り返す。この成長中は、シリコン原料の供給を停止してもよい。

## 【0129】

(d) 次いで、マグネシウム原料を反応管へ供給し、マグネシウムが添加されたp型AlGaN導波層18、p型AlGaNクラッド層20、及びp型AlGaNコンタクト層22を成長させる。

40

## 【0130】

(e) 成長後、AlGaNコンタクト層22およびAlGaNクラッド層20の一部を、RIE、或いは収束イオンビーム(FIB: Focused Ion Beam)などのエッチング技術を用いてストライプ形状に加工し、例えばc軸に沿ったリッジストライプ構造を形成する。

## 【0131】

(f) リッジストライプ構造を有するAlGaNコンタクト層22上へ、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例えば、Au/Ni金属、或いはPt/Au/Pd金属などを積層させたp側電極26を配置させ、分離閉じ込め型の構造を形成する。また、同様に、基板10ウェハの裏面へ例えばTi/Al金属などを積層させたn側電極24を形成する。

50

## 【0132】

(g) 上記のストライプ方向に沿って共振器を形成する。この時、端面はa面とする。

## 【0133】

以上の工程により紫外線窒化物半導体レーザーダイオードを作製する。

## 【0134】

MBEによる製造方法

アルミニウム原料、ガリウム原料、インジウム原料、シリコン原料、マグネシウム原料は、クヌーセンセルのるつぼ内に配置し、ヒータ加熱によって蒸発させ原子ビームとして供給する。シリコン原料に関しては、電子線や通電加熱により蒸発させ供給してもよい。また、これらの原料の代替えとしてMOVPE法に記載の有機金属原料を用いてもよい。

10

## 【0135】

(a) 基板52ウェハを基板ホルダ72に保持させる。超高真空中での熱伝導性をよくするため、基板52裏面に熱伝導のよい金属等を蒸着してもよい。この状態で、基板52へ窒素原料ガス(例えばアンモニアガスや窒素プラズマソース)を供給する。加熱機構(基板ヒータ74)によりウェハを昇温させる。ただし、サファイア、SiC、LiAlO<sub>2</sub>、MgAl<sub>12</sub>O<sub>4</sub>基板を用いる場合は、基板表面の窒化を避けるため、窒素原料ガスを供給せずに昇温する。

## 【0136】

(b) ウェハ温度が例えば800~1000以上に達するまで待機した後、アルミニウム原料、ガリウム原料、窒素原料ガス、及びシリコン原料を基板52へ供給し、ウェハ表面に、シリコンが添加されたn型AlGaNクラッド層12およびn型AlGaN導波層14を成長させる。成長時の表面形態は、RHEED像により観察する。

20

## 【0137】

(c) AlGaN/AlGaN活性層16の成長を行う。井戸層成長時と障壁層成長時で、アルミニウム原料とガリウム原料の供給流量比を変化させる。これを例えば3回に渡って繰り返す。この成長中は、シリコン原料の供給を停止してもよい。

## 【0138】

(d) 次に、マグネシウム原料を基板へ供給し、マグネシウムが添加されたp型AlGaN導波層18、p型AlGaNクラッド層20、及びp型AlGaNコンタクト層22を成長させる。

30

## 【0139】

(e) 成長後、AlGaNコンタクト層22およびAlGaNクラッド層20の一部を、RIE、或いは収束イオンビーム(FIB: Focused Ion Beam)などのエッチング技術を用いてストライプ形状に加工し、例えばc軸に沿ったリッジストライプ構造を形成する。

## 【0140】

(f) リッジストライプ構造を有するAlGaNコンタクト層22上へ、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例えば、Au/Ni金属、或いはPt/Au/Pd金属などを積層させたp側電極26を配置させ、分離閉じ込め型の構造を形成する。また、同様に、基板10ウェハの裏面へ例えばTi/Al金属などを積層させたn側電極24を形成する。

40

## 【0141】

(g) 上記のストライプ方向に沿って共振器を形成する。この時、端面はa面とする。

## 【0142】

以上の工程により紫外線窒化物半導体レーザーダイオードを作製する。

## 【0143】

AlGaN系LDの効率改善のためには、転位を縦方向に伝播させない横方向成長技術(LOG: Lateral Overgrowth)あるいはAlGaN成長の初期に界面で転位の発生しにくいAlN基板等の導入によって転位・欠陥を低減させることが必須である。

## 【0144】

50

本発明の紫外線窒化物半導体発光素子によれば、転位・欠陥低減化と並行して進めるべき、効率的な光導波を実現でき、分極による内部電場効果を低減でき、非極性面（a面、m面）または半極性面成長を行った $Al_xGa_{1-x}N$ 混晶や、その量子井戸を活性層に用いたLDの構造により、低しきい値電流密度化を図ることができる。

【0145】

本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子および製造方法によれば、波長300nm以下の紫外光を発光させるために、結晶成長面をc軸（極性面）から約 $40^\circ \sim 90^\circ$ 程度に傾斜させて分極による内部電界効果を低減するとともに、発光層に $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 多重量子井戸（MQW）構造を用い、井戸層のAlモル分率を、30%以上60%以下とし、さらに井戸層のAlモル分率と障壁層のAlモル分率とのモル分率比を0.7以上とすることにより、井戸層の面内圧縮歪みを低減し、光の電界ベクトルEとc軸を平行ならしめることができる。

10

【0146】

これによって、紫外線窒化物半導体発光素子（LD）の閾値電流密度が低減し、発光効率を向上させることができる。

【0147】

[第2の実施の形態]

本発明の第2の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子は、図8に示すように、m面基板10と、m面基板10上に配置され、n型不純物をドーブされたAlGaIn層13と、AlGaIn層13上に配置され、 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16と、 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16上に配置され、p型不純物をドーブされたAlGaIn層17と、AlGaIn層17上に配置され、p型不純物をドーブされたAlGaInコンタクト層22と、AlGaInコンタクト層22上に配置され、AlGaInコンタクト層22とオーミック接触するp側電極26と、p側電極26と対向してm面基板10上配置され、m面基板10とオーミック接触するn側電極24とを備え、c軸が結晶成長の主面の法線方向から $40^\circ \sim 90^\circ$ の範囲内で傾いた面を結晶成長の主面とし、光の電界成分Eが主にc軸と平行（ $E // c$ ）なる偏光特性を示すことを特徴とする。

20

【0148】

本発明の第2の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、結晶成長の主面には、非極性面または半極性面が含まれる。

30

【0149】

本発明の第2の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、非極性面には、m面またはa面が含まれる。

【0150】

本発明の第2の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、半極性面には、{10-11}面、{10-12}面、或いは{11-22}面の内、いずれか1つが含まれる。

【0151】

本発明の第2の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、結晶成長の主面としてm面、{10-11}面、或いは{10-12}面の内、いずれか1つの面を選択した場合、a面を共振器の反射鏡として用いる。

40

【0152】

本発明の第2の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、a面は、へき開面であることを特徴とする。

【0153】

本発明の第2の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、活性層は、単一井戸ないしは多重量子井戸構造を備え、 $Al_xGa_{1-x}N$ 井戸層のAlNモル分率は30%以上60%以下であり、かつ、 $Al_xGa_{1-x}N$ 障壁層のAlNモル分率と $Al_xGa_{1-x}N$ 井戸層のAlNモル分率の比は0.7以上である。

【0154】

50

m面基板10は、導電性を備えており、例えば、Ga<sub>x</sub>N基板、Al<sub>x</sub>N基板、或いはAl<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N基板で構成することができる。

【0155】

本発明の第2の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子は、非極性面を結晶成長面とし、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N活性層16のストライプ方向のへき開面をa面とすることによって、水平横モードは利得・偏光導波性能を備え、一方垂直横モードは、相対的に厚いAl<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N活性層16（例えば、MQWの井戸数を3以下として、全体の厚さ約30nm程度）を利用することによって、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N活性層16への光閉じ込め効果による導波の利用が可能となる。その結果、第1の実施の形態に較べ、クラッド層、リッジストライプ構造、および導波層を不要とし、もっとも簡単な構成を実現することができる。

10

【0156】

[第3の実施の形態]

本発明の第3の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子は、図9に示すように、m面基板10と、m面基板10上に配置され、n型不純物をドーブされたAlGa<sub>x</sub>Nコンタクト層11と、AlGa<sub>x</sub>Nコンタクト層11上に配置され、n型不純物をドーブされたAlGa<sub>x</sub>N層13と、AlGa<sub>x</sub>N層13上に配置され、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N活性層16と、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N活性層16上に配置され、p型不純物をドーブされたAlGa<sub>x</sub>N層17と、AlGa<sub>x</sub>N層17上に配置され、p型不純物をドーブされたAlGa<sub>x</sub>Nコンタクト層22と、AlGa<sub>x</sub>Nコンタクト層22上に配置され、AlGa<sub>x</sub>Nコンタクト層22とオーミック接触するp側電極26と、m面基板10面に対して、p側電極26と同一表面側に配置され、AlGa<sub>x</sub>Nコンタクト層22の表面からエッチングにより露出されたAlGa<sub>x</sub>Nコンタクト層11上に配置され、AlGa<sub>x</sub>Nコンタクト層11とオーミック接触するn側電極24とを備え、c軸が結晶成長の主面の法線方向から40°~90°の範囲内で傾いた面を結晶成長の主面とし、光の電界成分Eが主にc軸と平行(E//c)なる偏光特性を示すことを特徴とする。

20

【0157】

本発明の第3の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、結晶成長の主面には、非極性面または半極性面が含まれる。

【0158】

本発明の第3の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、非極性面には、m面またはa面が含まれる。

30

【0159】

本発明の第3の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、半極性面には、{10-11}面、{10-12}面、或いは{11-22}面の内、いずれか1つが含まれる。

【0160】

本発明の第3の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、結晶成長の主面としてm面、{10-11}面、或いは{10-12}面の内、いずれか1つの面を選択した場合、a面を共振器の反射鏡として用いる。

40

【0161】

本発明の第3の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、a面は、へき開面であることを特徴とする。

【0162】

本発明の第3の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、活性層は、単一井戸ないしは多重量子井戸構造を備え、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N井戸層のAl<sub>x</sub>Nモル分率は30%以上60%以下であり、かつ、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N障壁層のAl<sub>x</sub>Nモル分率とAl<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N井戸層のAl<sub>x</sub>Nモル分率の比は0.7以上である。

【0163】

m面基板10は、例えば、絶縁性m面SiC基板、絶縁性m面Al<sub>x</sub>N基板、絶縁性m面

50

AlGa<sub>x</sub>N基板、r面若しくはm面サファイア基板、(001)MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>基板で構成することができる。

【0164】

本発明の第3の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子は、非極性面を結晶成長面とし、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N活性層16のストライプ方向のへき開面をa面とすることによって、水平横モードは利得・偏光導波性能を備え、一方垂直横モードは、相対的に厚いAl<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N活性層16（例えば、MQWの井戸数を3以下として、全体の厚さ約30nm程度）を利用することによって、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N活性層16への光閉じ込め効果による導波の利用が可能となる。

【0165】

その結果、第1の実施の形態に較べ、クラッド層、リッジストライプ構造、および導波層を不要とし、簡単な構成を実現することができる。

【0166】

しかもp側電極26およびn側電極24を同一表面側から取り出すことができ、実装も容易となる。

【0167】

[第4の実施の形態]

本発明の第4の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子は、図10に示すように、m面基板10と、m面基板10上に配置され、n型不純物をドーブされたAlGa<sub>x</sub>N導波層14と、AlGa<sub>x</sub>N導波層14上に配置され、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N活性層16と、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N活性層16上に配置され、p型不純物をドーブされたAlGa<sub>x</sub>N導波層18と、AlGa<sub>x</sub>N導波層18上に配置され、p型不純物をドーブされたAlGa<sub>x</sub>Nコンタクト層22と、AlGa<sub>x</sub>Nコンタクト層22上に配置され、AlGa<sub>x</sub>Nコンタクト層22とオーミック接触するp側電極26と、p側電極26と対向してm面基板10上に配置され、m面基板10とオーミック接触するn側電極24とを備え、c軸が結晶成長の主面の法線方向から40°~90°の範囲内で傾いた面を結晶成長の主面とし、光の電界成分Eが主にc軸と平行(E//c)なる偏光特性を示すことを特徴とする。

【0168】

本発明の第4の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、結晶成長の主面には、非極性面または半極性面が含まれる。

【0169】

本発明の第4の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、非極性面には、m面またはa面が含まれる。

【0170】

本発明の第4の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、半極性面には、{10-11}面、{10-12}面、或いは{11-22}面の内、いずれか1つが含まれる。

【0171】

本発明の第4の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、結晶成長の主面としてm面、{10-11}面、或いは{10-12}面の内、いずれか1つの面を選択した場合、a面を共振器の反射鏡として用いる。

【0172】

本発明の第4の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、a面は、へき開面であることを特徴とする。

【0173】

本発明の第4の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、活性層は、単一井戸ないしは多重量子井戸構造を備え、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N井戸層のAlNモル分率は30%以上60%以下であり、かつ、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N障壁層のAlNモル分率とAl<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N井戸層のAlNモル分率の比は0.7以上である。

10

20

30

40

50

## 【0174】

m面基板10は、導電性を備えており、例えば、GaN基板、AlN基板、或いはAlGaN基板で構成することができる。

## 【0175】

本発明の第4の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子は、非極性面を結晶成長面とし、 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16のストライプ方向のへき開面をa面とすることによって、水平横モードは利得・偏光導波性能を備え、一方垂直横モードは、n型AlGaN導波層14およびp型AlGaN導波層18に挟まれ、相対的に厚い $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16（例えば、MQWの井戸数を3以下として、全体の厚さ約30nm程度）を利用することによって、 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16への光閉じ込め効果による導波の利用が可能となる。

10

## 【0176】

その結果、第1の実施の形態に較べ、クラッド層、およびリッジストライプ構造を不要とし、相対的に簡単な構成を実現することができる。

## 【0177】

[第5の実施の形態]

本発明の第5の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子は、図11に示すように、基板10と、基板10上に配置され、n型不純物をドーブされたAlGaNコンタクト層11と、AlGaNコンタクト層11上に配置され、n型不純物をドーブされたAlGaN導波層14と、AlGaN導波層14上に配置され、 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16と、 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16上に配置され、p型不純物をドーブされたAlGaN導波層18と、AlGaN導波層18上に配置され、p型不純物をドーブされたAlGaNコンタクト層22と、AlGaNコンタクト層22上に配置され、AlGaNコンタクト層22とオーミック接触するp側電極26と、基板10面に対して、p側電極26と同一表面側に配置され、AlGaNコンタクト層22の表面からエッチングにより露出されたAlGaNコンタクト層11上に配置され、AlGaNコンタクト層11とオーミック接触するn側電極24とを備え、c軸が結晶成長の主面の法線方向から $40^\circ \sim 90^\circ$ の範囲内で傾いた面を結晶成長の主面とし、光の電界成分Eが主にc軸と平行( $E // c$ )なる偏光特性を示すことを特徴とする。

20

## 【0178】

本発明の第5の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、結晶成長の主面には、非極性面または半極性面が含まれる。

30

## 【0179】

本発明の第5の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、非極性面には、m面またはa面が含まれる。

## 【0180】

本発明の第5の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、半極性面には、 $\{10-11\}$ 面、 $\{10-12\}$ 面、或いは $\{11-22\}$ 面の内、いずれか1つが含まれる。

## 【0181】

本発明の第5の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、結晶成長の主面としてm面、 $\{10-11\}$ 面、或いは $\{10-12\}$ 面の内、いずれか1つの面を選択した場合、a面を共振器の反射鏡として用いる。

40

## 【0182】

本発明の第5の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、a面は、へき開面であることを特徴とする。

## 【0183】

本発明の第5の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、活性層は、単一井戸ないしは多重量子井戸構造を備え、 $Al_xGa_{1-x}N$ 井戸層のAlNモル分率は30%以上60%以下であり、かつ、 $Al_xGa_{1-x}N$ 障壁層のAlNモル分率と $Al_xGa_{1-x}N$

50

$1-x$  N 井戸層の AlN モル分率の比は 0.7 以上である。

【0184】

基板 10 は、例えば、絶縁性 m 面 SiC 基板、絶縁性 m 面 AlN 基板、絶縁性 m 面 AlGaIn 基板、r 面若しくは m 面 サファイア 基板、(001) 面 MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 基板で構成することができる。

【0185】

本発明の第 5 の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子は、非極性面を結晶成長面とし、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 活性層 16 のストライプ方向のへき開面を a 面として利用することによって、水平横モードは利得・偏光導波性能を備え、一方垂直横モードは、n 型 AlGaIn 導波層 14 および p 型 AlGaIn 導波層 18 に挟まれ、相対的に厚い Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 活性層 16 (例えば、MQW の井戸数を 3 以下として、全体の厚さ約 30 nm 程度) を利用することによって、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 活性層 16 への光閉じ込め効果による導波の利用が可能となる。

【0186】

その結果、第 1 の実施の形態に較べ、クラッド層、およびリッジストライプ構造を不要とし、相対的に簡単な構成を実現することができる。

【0187】

しかも p 側電極 26 および n 側電極 24 を同一表面側から取り出すことができ、実装も容易となる。

【0188】

[第 6 の実施の形態]

本発明の第 6 の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子は、図 12 に示すように、m 面基板 10 と、m 面基板 10 上に配置され、n 型不純物をドーピングされた AlGaIn クラッド層 12 と、AlGaIn クラッド層 12 上に配置され、n 型不純物をドーピングされた AlGaIn 導波層 14 と、AlGaIn 導波層 14 上に配置され、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 活性層 16 と、Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N 活性層 16 上に配置され、p 型不純物をドーピングされた AlGaIn 導波層 18 と、AlGaIn 導波層 18 上に配置され、p 型不純物をドーピングされた AlGaIn クラッド層 20 と、AlGaIn クラッド層 20 に配置され、p 型不純物をドーピングされた AlGaIn コンタクト層 22 と、AlGaIn コンタクト層 22 上に配置され AlGaIn コンタクト層 22 とオーミック接触する p 側電極 26 と、p 側電極 26 と対向して m 面基板 10 上に配置され、m 面基板 10 とオーミック接触する n 側電極 24 とを備え、c 軸が結晶成長の主面の法線方向から 40° ~ 90° の範囲内で傾いた面を結晶成長の主面とし、光の電界成分 E が主に c 軸と平行 (E // c) なる偏光特性を示すことを特徴とする。

【0189】

本発明の第 6 の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、結晶成長の主面には、非極性面または半極性面が含まれる。

【0190】

本発明の第 6 の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、非極性面には、m 面または a 面が含まれる。

【0191】

本発明の第 6 の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、半極性面には、{10-11} 面、{10-12} 面、或いは {11-22} 面の内、いずれか 1 つが含まれる。

【0192】

本発明の第 6 の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、結晶成長の主面として m 面、{10-11} 面、或いは {10-12} 面の内、いずれか 1 つの面を選択した場合、a 面を共振器の反射鏡として用いる。

【0193】

本発明の第 6 の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、a 面は、へ

き開面であることを特徴とする。

【0194】

本発明の第6の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、活性層は、単一井戸ないしは多重量子井戸構造を備え、 $Al_xGa_{1-x}N$ 井戸層の $AlN$ モル分率は30%以上60%以下であり、かつ、 $Al_xGa_{1-x}N$ 障壁層の $AlN$ モル分率と $Al_xGa_{1-x}N$ 井戸層の $AlN$ モル分率の比は0.7以上である。

【0195】

m面基板10は、導電性を備えており、例えば、 $GaN$ 基板、 $AlN$ 基板、或いは $AlGaN$ 基板で構成することができる。

【0196】

本発明の第6の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子は、非極性面を結晶成長面とし、 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16のストライプ方向のへき開面をa面として利用することによって、水平横モードは利得・偏光導波性能を備え、一方垂直横モードは、相対的に厚い $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16（例えば、MQWの井戸数を3以下として、全体の厚さ約30nm程度）を利用することによって、 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16への光閉じ込め効果による導波の利用が可能となる。

【0197】

その結果、第1の実施の形態に較べ、リッジストライプ構造を不要とし、簡単な構成を実現することができる。

【0198】

[第7の実施の形態]

本発明の第7の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子は、図13に示すように、基板10と、基板10上に配置され、n型不純物をドーピングされた $AlGaN$ コンタクト層11と、 $AlGaN$ コンタクト層11上に配置され、n型不純物をドーピングされた $AlGaN$ クラッド層12と、 $AlGaN$ クラッド層12上に配置され、n型不純物をドーピングされた $AlGaN$ 導波層14と、 $AlGaN$ 導波層14上に配置され、 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16と、 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16上に配置され、p型不純物をドーピングされた $AlGaN$ 導波層18と、 $AlGaN$ 導波層18上に配置され、p型不純物をドーピングされた $AlGaN$ クラッド層20と、 $AlGaN$ クラッド層20上に配置され、p型不純物をドーピングされた $AlGaN$ コンタクト層22と、 $AlGaN$ コンタクト層22上に配置され、 $AlGaN$ コンタクト層22とオーミック接触するp側電極26と、基板10面に対して、p側電極26と同一表面側に配置され、 $AlGaN$ コンタクト層22の表面からエッチングにより露出された $AlGaN$ コンタクト層11上に配置され、 $AlGaN$ コンタクト層11とオーミック接触するn側電極24とを備え、c軸が結晶成長の主面の法線方向から $40^\circ \sim 90^\circ$ の範囲内で傾いた面を結晶成長の主面とし、光の電界成分Eが主にc軸と平行( $E // c$ )なる偏光特性を示すことを特徴とする。

【0199】

本発明の第7の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、結晶成長の主面には、非極性面または半極性面が含まれる。

【0200】

本発明の第7の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、非極性面には、m面またはa面が含まれる。

【0201】

本発明の第7の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、半極性面には、 $\{10-11\}$ 面、 $\{10-12\}$ 面、或いは $\{11-22\}$ 面の内、いずれか1つが含まれる。

【0202】

本発明の第7の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、結晶成長の主面としてm面、 $\{10-11\}$ 面、或いは $\{10-12\}$ 面の内、いずれか1つの面を選択した場合、a面を共振器の反射鏡として用いる。

10

20

30

40

50

## 【0203】

本発明の第7の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、a面は、へき開面であることを特徴とする。

## 【0204】

本発明の第7の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、活性層は、単一井戸ないしは多重量子井戸構造を備え、 $Al_xGa_{1-x}N$ 井戸層のAlNモル分率は30%以上60%以下であり、かつ、 $Al_xGa_{1-x}N$ 障壁層のAlNモル分率と $Al_xGa_{1-x}N$ 井戸層のAlNモル分率の比は0.7以上である。

## 【0205】

基板10は、例えば、絶縁性m面SiC基板、絶縁性m面AlN基板、絶縁性m面AlGaN基板、r面若しくはm面サファイア基板、(001)面 $MgAl_2O_4$ 基板で構成することができる。

10

## 【0206】

本発明の第7の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子は、非極性面を結晶成長面とし、 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16のストライプ方向のへき開面をa面として利用することによって、水平横モードは利得・偏光導波性能を備え、一方垂直横モードは、相対的に厚い $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16(例えば、MQWの井戸数を3以下として、全体の厚さ約30nm程度)を利用することによって、 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16への光閉じ込め効果による導波の利用が可能となる。

## 【0207】

その結果、第1の実施の形態に較べ、リッジストライプ構造を不要とし、相対的に簡単な構成を実現することができる。

20

## 【0208】

しかもp側電極26およびn側電極24を同一表面側から取り出すことができ、実装も容易となる。

## 【0209】

## [第8の実施の形態]

本発明の第8の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子は、図14に示すように、m面GaN基板10と、m面GaN基板10上に配置され、n型不純物をドーブされたAlGaNクラッド層12と、AlGaNクラッド層12上に配置され、n型不純物をドーブされたAlGaN導波層14と、AlGaN導波層14上に配置され、 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16と、 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16上に配置され、p型不純物をドーブされたAlGaN導波層18と、AlGaN導波層18上に配置され、p型不純物をドーブされたAlGaNクラッド層20と、AlGaNクラッド層20に配置され、リッジストライプ構造を備え、p型不純物をドーブされたAlGaNコンタクト層22と、AlGaNコンタクト層22上に配置されAlGaNコンタクト層22とオーミック接触するp側電極26と、p側電極26と対向してm面GaN基板10上に配置され、m面GaN基板10とオーミック接触するn側電極24とを備え、c軸が結晶成長の主面の法線方向から $40^\circ \sim 90^\circ$ の範囲内で傾いた面を結晶成長の主面とし、光の電界成分Eが主にc軸と平行( $E // c$ )なる偏光特性を示すことを特徴とする。

30

40

## 【0210】

本発明の第8の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、結晶成長の主面には、非極性面または半極性面が含まれる。

## 【0211】

本発明の第8の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、非極性面には、m面またはa面が含まれる。

## 【0212】

本発明の第8の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、半極性面には、 $\{10-11\}$ 面、 $\{10-12\}$ 面、或いは $\{11-22\}$ 面の内、いずれか1つが含まれる。

50

## 【0213】

本発明の第8の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、結晶成長の主面として $m$ 面、 $\{10-11\}$ 面、或いは $\{10-12\}$ 面の内、いずれか1つの面を選択した場合、 $a$ 面を共振器の反射鏡として用いる。

## 【0214】

本発明の第8の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、 $a$ 面は、へき開面であることを特徴とする。

## 【0215】

本発明の第8の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、活性層は、単一井戸ないしは多重量子井戸構造を備え、 $Al_xGa_{1-x}N$ 井戸層の $AlN$ モル分率は30%以上60%以下であり、かつ、 $Al_xGa_{1-x}N$ 障壁層の $AlN$ モル分率と $Al_xGa_{1-x}N$ 井戸層の $AlN$ モル分率の比は0.7以上である。

## 【0216】

$m$ 面基板10は、導電性を備えており、例えば、 $GaN$ 基板、 $AlN$ 基板、或いは $AlGaN$ 基板で構成することができる。

## 【0217】

本発明の第8の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子は、非極性面を結晶成長面とし、ストライプ方向のへき開面を $a$ 面として利用することによって、水平横モードは利得・偏光導波性能を備え、一方垂直横モードは、 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16（例えば、MQWの井戸数を3以下として、全体の厚さ約30nm程度）を利用することによって、 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16への光閉じ込め効果による導波の利用が可能となる。

## 【0218】

[第9の実施の形態]

本発明の第9の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子は、図15に示すように、基板10と、基板10上に配置され、 $n$ 型不純物をドーブされた $AlGaN$ コンタクト層11と、 $AlGaN$ コンタクト層11上に配置され、 $n$ 型不純物をドーブされた $AlGaN$ クラッド層12と、 $AlGaN$ クラッド層12上に配置され、 $n$ 型不純物をドーブされた $AlGaN$ 導波層14と、 $AlGaN$ 導波層14上に配置され、 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16と、 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16上に配置され、 $p$ 型不純物をドーブされた $AlGaN$ 導波層18と、 $AlGaN$ 導波層18上に配置され、 $p$ 型不純物をドーブされた $AlGaN$ クラッド層20と、 $AlGaN$ クラッド層20上に配置され、リッジストライプ構造を備え、 $p$ 型不純物をドーブされた $AlGaN$ コンタクト層22と、 $AlGaN$ コンタクト層22上に配置され、 $AlGaN$ コンタクト層22とオーミック接触する $p$ 側電極26と、基板10面に対して、 $p$ 側電極26と同一表面側に配置され、 $AlGaN$ コンタクト層22の表面からエッチングにより露出された $AlGaN$ コンタクト層11上に配置され、 $AlGaN$ コンタクト層11とオーミック接触する $n$ 側電極24とを備え、 $c$ 軸が結晶成長の主面の法線方向から $40^\circ \sim 90^\circ$ の範囲内で傾いた面を結晶成長の主面とし、光の電界成分 $E$ が主に $c$ 軸と平行( $E // c$ )なる偏光特性を示すことを特徴とする。

## 【0219】

本発明の第9の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、結晶成長の主面には、非極性面または半極性面が含まれる。

## 【0220】

本発明の第9の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、非極性面には、 $m$ 面または $a$ 面が含まれる。

## 【0221】

本発明の第9の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、半極性面には、 $\{10-11\}$ 面、 $\{10-12\}$ 面、或いは $\{11-22\}$ 面の内、いずれか1つが含まれる。

10

20

30

40

50

## 【0222】

本発明の第9の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、結晶成長の主面としてm面、 $\{10-11\}$ 面、或いは $\{10-12\}$ 面の内、いずれか1つの面を選択した場合、a面を共振器の反射鏡として用いる。

## 【0223】

本発明の第9の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、a面は、へき開面であることを特徴とする。

## 【0224】

本発明の第9の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、活性層は、単一井戸ないしは多重量子井戸構造を備え、 $Al_xGa_{1-x}N$ 井戸層のAlNモル分率は30%以上60%以下であり、かつ、 $Al_xGa_{1-x}N$ 障壁層のAlNモル分率と $Al_xGa_{1-x}N$ 井戸層のAlNモル分率の比は0.7以上である。

10

## 【0225】

基板10は、例えば、絶縁性m面SiC基板、絶縁性m面AlN基板、絶縁性m面AlGaInN基板、r面若しくはm面サファイア基板、 $(001)$ 面MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>基板で構成することができる。

## 【0226】

本発明の第9の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子は、非極性面を結晶成長面とし、ストライプ方向のへき開面をa面として利用することによって、水平横モードは利得・偏光導波性能を備え、一方垂直横モードは、 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16（例えば、MQWの井戸数を3以下として、全体の厚さ約30nm程度）を利用することによって、 $Al_xGa_{1-x}N/Al_xGa_{1-x}N$ 活性層16への光閉じ込め効果による導波の利用が可能となる。

20

## 【0227】

しかもp側電極26およびn側電極24を同一表面側から取り出すことができ、実装も容易となる。

## 【0228】

[第10の実施の形態]

図22(a)は、本発明の第10の実施の形態に係る $Al_{1-x}In_xN/Al_{1-x}In_xN$ 活性層を備える紫外線窒化物半導体発光素子におけるレーザ光の発振波長とInNモル分率xとの関係を示す。また、図22(b)は、本発明の第10の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子におけるバンドギャップエネルギーとInNモル分率xとの関係を示す。

30

## 【0229】

図23は、本発明の第10の実施の形態に係る $Al_{1-x}In_xN/Al_{1-x}In_xN$ 活性層を備える紫外線窒化物半導体発光素子におけるバンドギャップエネルギーとa軸の格子定数の関係、および発光波長とa軸の格子定数の関係を示す。

## 【0230】

本発明の第10の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子の構成において、AlGaInNの代わりにAlInNを適用した点に特徴を有する。

40

## 【0231】

本発明の第10の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子は、m面基板と、m面基板上に配置され、n型不純物をドーブされたAlInN層と、AlInN層上に配置された $Al_{1-x}In_xN$ 障壁層と $Al_{1-x}In_xN$ 井戸層からなる量子井戸構造を有する $Al_{1-x}In_xN/Al_{1-x}In_xN$ 活性層と、 $Al_{1-x}In_xN/Al_{1-x}In_xN$ 活性層上に配置され、p型不純物をドーブされたAlInN層とを備え、c軸が結晶成長の主面の法線方向から $40^\circ \sim 90^\circ$ の範囲内で傾いた面を結晶成長の主面とし、光の電界成分Eが主にc軸と平行( $E//c$ )なる偏光特性を示すことを特徴とする。

## 【0232】

50

本発明の第10の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、結晶成長の主面には、非極性面または半極性面が含まれる。

【0233】

本発明の第10の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、非極性面には、m面またはa面が含まれる。

【0234】

本発明の第10の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、半極性面には、{10-11}面、{10-12}面、或いは{11-22}面の内、いずれか1つが含まれる。

【0235】

本発明の第10の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、結晶成長の主面としてm面、{10-11}面、或いは{10-12}面の内、いずれか1つの面を選択した場合、a面を共振器の反射鏡として用いる。

【0236】

本発明の第10の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、a面は、へき開面であることを特徴とする。

【0237】

本発明の第10の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、活性層は、単一井戸ないしは多重量子井戸構造を備え、InNモル分率が5%以下であることを特徴とする。

【0238】

基板10は、例えば、絶縁性m面SiC基板、絶縁性m面AlN基板、絶縁性m面AlGaN基板、r面若しくはm面サファイア基板、(001)面MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>基板で構成することができる。

【0239】

本発明の第10の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子は、非極性面を結晶成長面とし、ストライプ方向のへき開面をa面とすることによって、水平横モードは利得・偏光導波性能を備え、一方垂直横モードは、Al<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N/Al<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N活性層(例えば、MQWの井戸数を3以下として、全体の厚さ約30nm程度)を利用することによって、Al<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N/Al<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N活性層への光閉じ込め効果による導波の利用が可能となる。

【0240】

本発明の第10の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子においては、第1の実施の形態のみならず第2乃至第9の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子の構成において、AlGaNの代わりにAlInNを適用した構成とすることも可能である。

【0241】

本発明の紫外線窒化物半導体発光素子によれば、効率的な光導波を実現でき、分極による内部電場効果を低減でき、非極性面(a面、m面)または半極性面成長を行ったAl<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N混晶や、その量子井戸を活性層に用いたLDの構造により、低しきい値電流密度化を図ることができる。

【0242】

本発明の第10の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子によれば、波長300nm以下の紫外光を発光させるために、結晶成長面をc軸(極性面)から約40°~90°程度に傾斜させて分極による内部電界効果を低減するとともに、発光層にAl<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N/Al<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N MQW構造を用い、InNモル分率が5%以下とすることによって、井戸層の面内圧縮歪みを低減し、光の電界ベクトルEとc軸を平行ならしめることができる。

【0243】

これによって、紫外線窒化物半導体発光素子(LD)の閾値電流密度が低減し、発光効率を向上させることができる。

10

20

30

40

50

## 【 0 2 4 4 】

## [その他の実施の形態]

以上、本発明を第 1 乃至第 10 の実施形態について説明したが、この開示の一部をなす論述および図面はこの発明を限定するものではない。この開示から当業者には様々な代替実施の形態、実施例および運用技術が明らかとなろう。

## 【 0 2 4 5 】

本発明の実施の形態においては、主として半導体レーザダイオードについて説明したが、発光ダイオードにも適用できることは明らかである。

## 【 0 2 4 6 】

上記のように、本発明は第 1 乃至第 10 の実施の形態によって記載したが、このように、本発明はここでは記載していない様々な実施の形態などを含むことは勿論である。したがって、本発明の技術的範囲は上記の説明から妥当な特許請求の範囲に係る発明特定事項によってのみ定められるものである。

## 【産業上の利用可能性】

## 【 0 2 4 7 】

本発明の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子およびその製造方法によれば、II族窒化物半導体からなる深紫外線波長のレーザ光を発生する窒化物半導体レーザダイオードの低しきい値電流密度化を実現することができることから、殺菌・浄水、医療機器、生化学産業、半導体リソグラフィなどの幅広い分野で必須の光源を提供する。

## 【図面の簡単な説明】

## 【 0 2 4 8 】

【図 1】本発明の第 1 の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子に適用する GaN 層および AlN 層のバンドダイヤグラムの比較であって、(a) GaN の点におけるバンドダイヤグラム、(b) AlN の点におけるバンドダイヤグラム。

【図 2】(a) 無歪み  $Al_xGa_{1-x}N$  混晶の価電子帯頂上のバンドオーダリングの AlN モル分率  $x$  依存性、(b) 無歪み GaN 基板上で面内に伸張歪みを受けた  $Al_xGa_{1-x}N$  混晶の  $c$  軸方向の歪み  $\epsilon_{zz}(\%)$  の AlN モル分率  $x$  依存性。

【図 3】本発明の第 1 の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子に適用する非極性面および半極性面について説明するための模式図であって、(a) III族窒化物半導体の結晶構造を示す模式図、(b) 非極性面である  $m$  面  $\{1-100\}$  および  $a$  面  $\{11-20\}$  を説明するための模式図、(c) 半極性面  $\{10-11\}$  を説明するための模式図、(d) 半極性面  $\{10-12\}$  を説明するための模式図、(e) 半極性面  $\{11-22\}$  を説明するための模式図。

【図 4】本発明の第 1 の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子の模式的鳥瞰図であって、 $m$  面 GaN 基板 10 上へ MQW 構成の AlGaIn/AlGaIn 活性層 16 を形成した LD の概念図。

【図 5】本発明の比較例に係る紫外線窒化物半導体発光素子の模式的鳥瞰図であって、 $c$  面 GaN 基板 100 上へ MQW 構成の AlGaIn/AlGaIn 活性層 160 を形成した LD の概念図。

【図 6】(a)  $c$  面を共振器ミラー面 28a, 28b として用いた場合の導波モード ( $E_{//c}$ : TE モード) を表す図、(b)  $a$  面を共振器ミラー面 30a, 30b として用いた場合の導波モード ( $E_{//c}$ : TE モード) を表す図。

【図 7】無歪み  $Al_xGa_{1-x}N$  障壁層の上に積層した  $Al_yGa_{1-y}N$  井戸層に発生する  $c$  軸方向の歪み  $\epsilon_{zz}(\%)$  の、 $Al_xGa_{1-x}N$  障壁層の AlN モル分率  $x$  依存性。

【図 8】本発明の第 2 の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子の模式的断面構造図。

【図 9】本発明の第 3 の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子の模式的断面構造図。

【図 10】本発明の第 4 の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子の模式的断面構造図。

10

20

30

40

50

【図11】本発明の第5の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子の模式的断面構造図。

【図12】本発明の第6の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子の模式的断面構造図。

【図13】本発明の第7の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子の模式的断面構造図。

【図14】本発明の第8の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子の模式的断面構造図。

【図15】本発明の第9の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子の模式的断面構造図。

10

【図16】本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子の製造方法に適用されるMOVPE装置の模式的構成図。

【図17】本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子の製造方法に適用されるMBE装置の模式的構成図。

【図18】(a)は、本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子におけるレーザ光の発振波長とAlNモル分率xとの関係を示す図、(b)本発明の第1の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子におけるバンドギャップエネルギーとAlNモル分率xとの関係を示す図。

【図19】GaN/InGaN青紫LDの一構造を例とする正孔密度と距離の関係を示す図であって、MQW活性層への不均一な正孔分布を説明する図。

20

【図20】GaN/InGaN青紫LDの別の構造を例とする正孔密度と距離の関係を示す図であって、MQW活性層への不均一な正孔分布を説明する図。

【図21】GaN/InGaN青紫LDにおける閾値電流密度J(kA/cm<sup>2</sup>)とInGaN井戸数の関係を示す図。

【図22】(a)本発明の第10の実施の形態に係るAl<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N/Al<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N活性層を備える紫外線窒化物半導体発光素子におけるレーザ光の発振波長とInNモル分率xとの関係を示す図、(b)本発明の第10の実施の形態に係る紫外線窒化物半導体発光素子におけるバンドギャップエネルギーとInNモル分率xとの関係を示す図。

【図23】本発明の第10の実施の形態に係るAl<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N/Al<sub>1-x</sub>In<sub>x</sub>N活性層を備える紫外線窒化物半導体発光素子におけるバンドギャップエネルギーとa軸の格子定数の関係、および発光波長とa軸の格子定数の関係を示す図。

30

【符号の説明】

【0249】

10...基板

11...AlGaNコンタクト層

12, 20...AlGaNクラッド層

13, 17...AlGaN層

14, 18...AlGaN導波層

16...AlGaN/AlGaN活性層

22...AlGaNコンタクト層

40

24...n側電極

26...p側電極

28a, 28b, 30a, 30b...共振ミラー面

40...水素キャリアガス槽

42...アルミニウム(Al)供給槽

44...ガリウム(Ga)供給槽

45...インジウム(In)供給槽

46...ジメチルヒドラジン(DMH<sub>y</sub>)供給槽

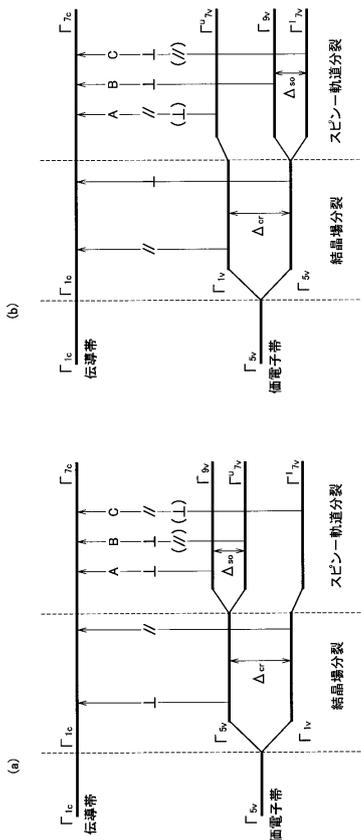
47...マグネシウム(Mg)供給槽

48...アンモニア(NH<sub>3</sub>)または窒素(N<sub>2</sub>)ガスボンベ

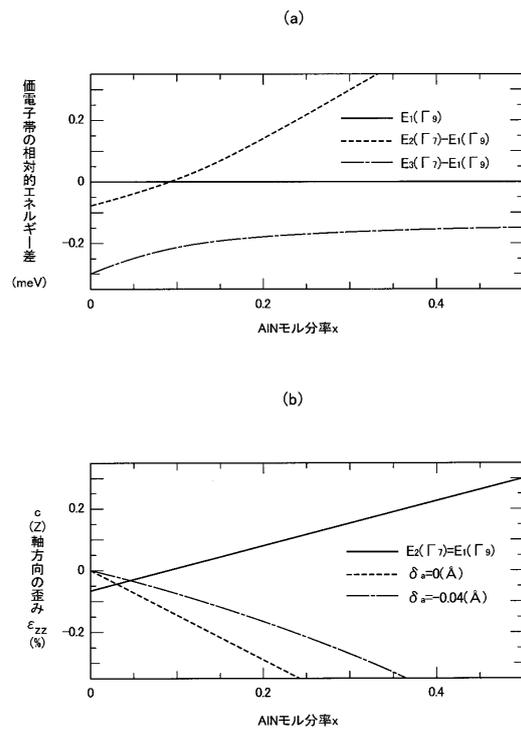
50

- 4 9 ... シリコン ( S i ) 供給用ガスポンペ
- 5 0 ... 加熱機構
- 5 2 ... 基板
- 5 4 ... 排気口
- 5 6 ... サセプタ
- 6 0 ... 反応槽
- 6 2 ... G a セル
- 6 3 ... M g セル
- 6 4 ... A l セル
- 6 5 ... S i セル
- 6 6 ... N H <sub>3</sub> セルまたは R F プラズマソース
- 6 7 ... I n セル
- 6 8 ... R H E E D スクリーン
- 7 0 ... 電子ビーム源
- 7 0 a , 7 0 b ... 電子ビーム
- 7 2 ... 基板ホルダ
- 7 4 ... 基板ヒータ
- 7 6 ... 液体窒素シュラウド
- 7 8 ... 排気バルブ

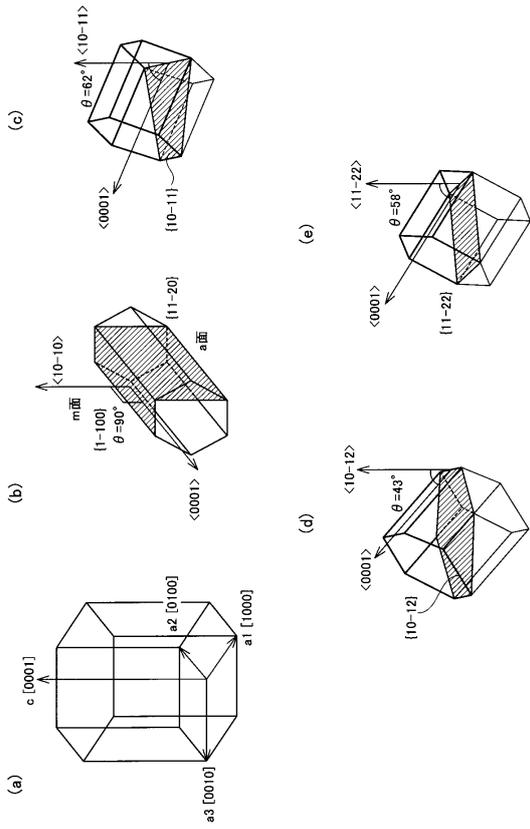
【 図 1 】



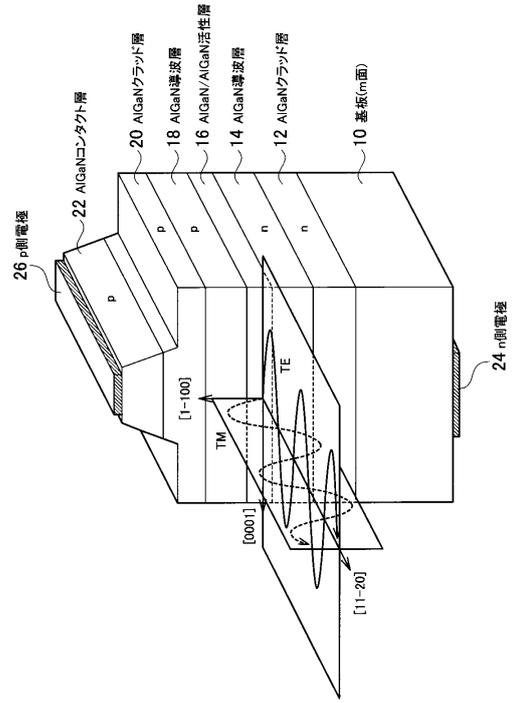
【 図 2 】



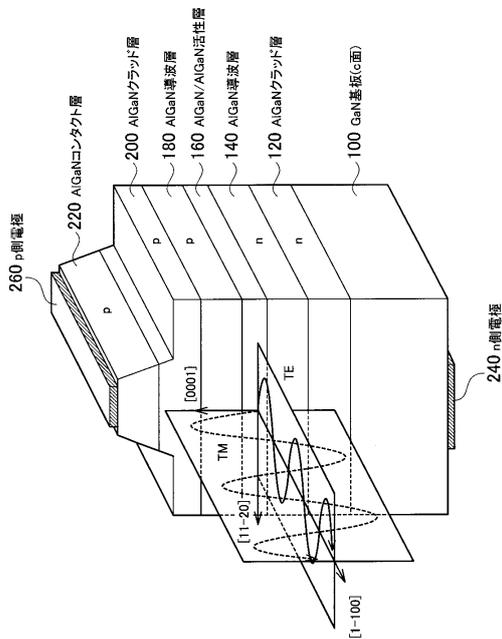
【図3】



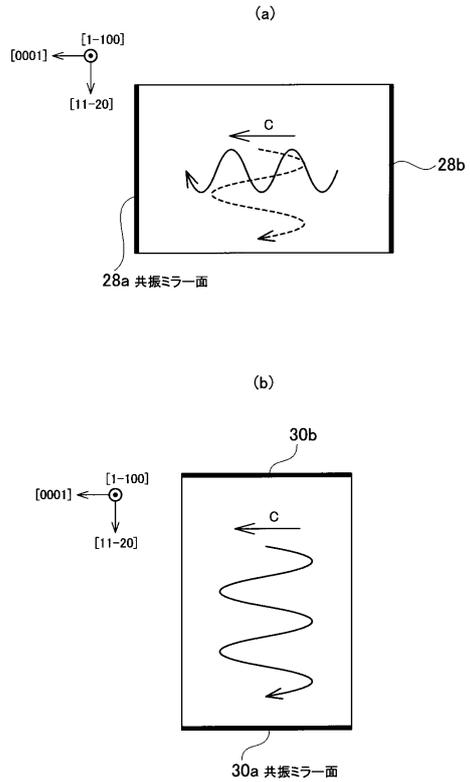
【図4】



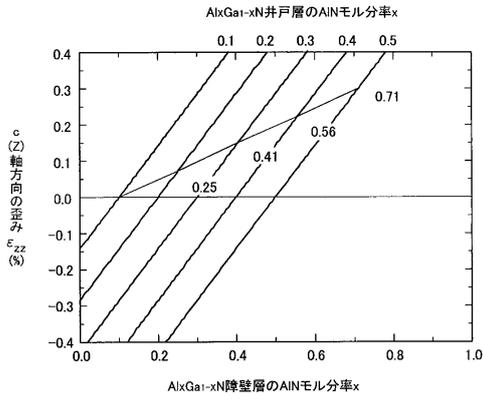
【図5】



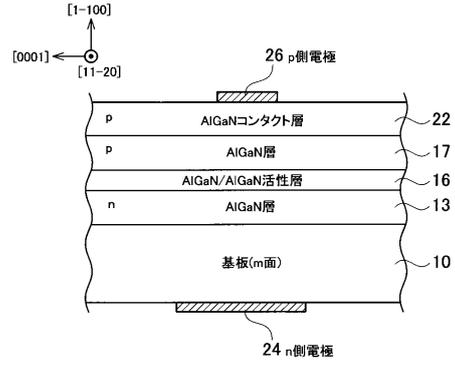
【図6】



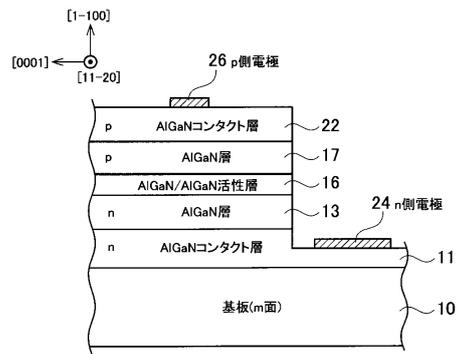
【図7】



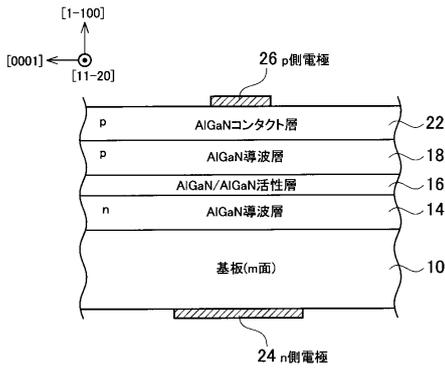
【図8】



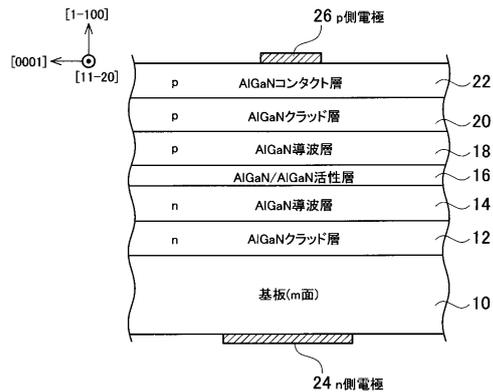
【図9】



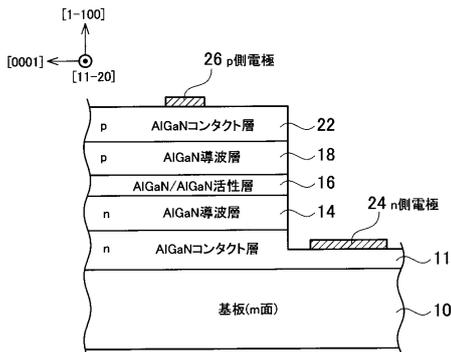
【図10】



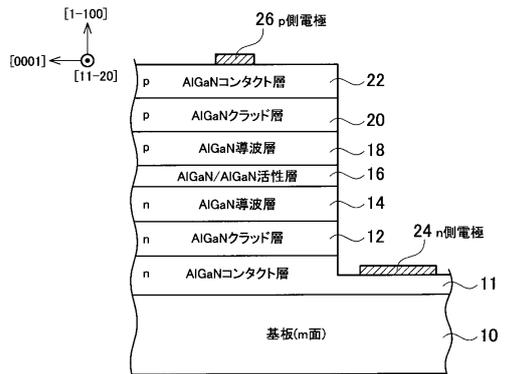
【図12】



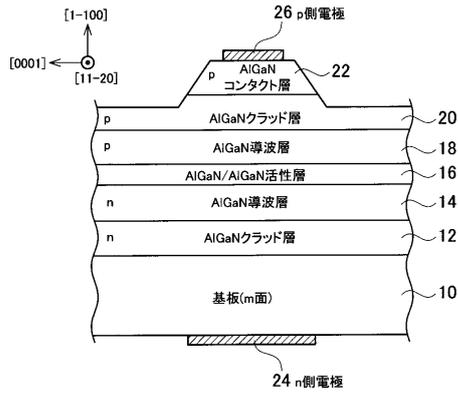
【図11】



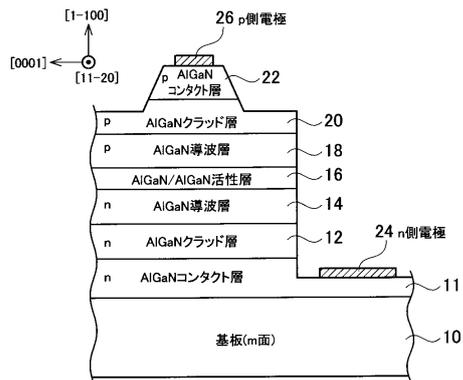
【図13】



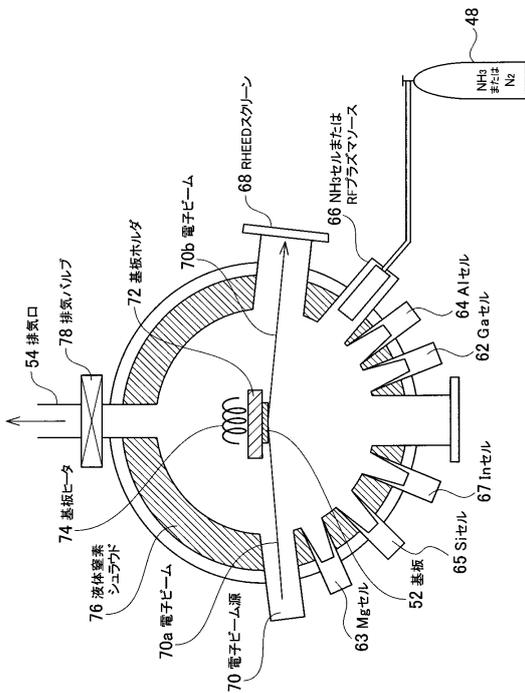
【図14】



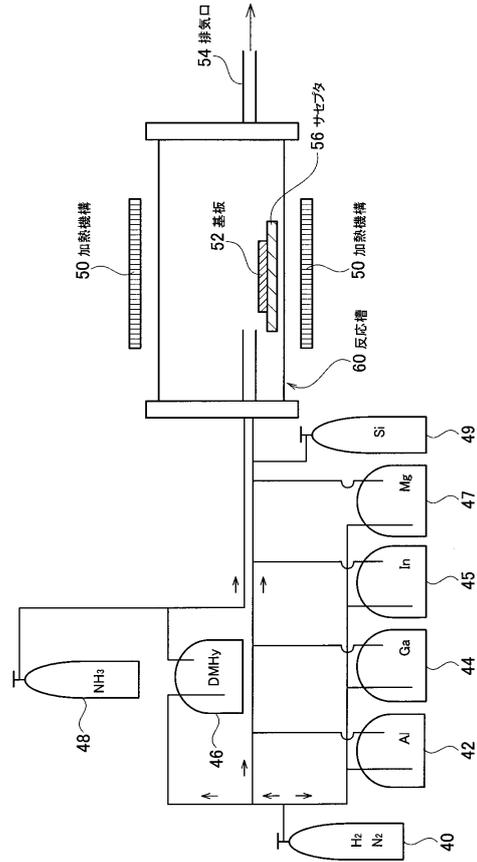
【図15】



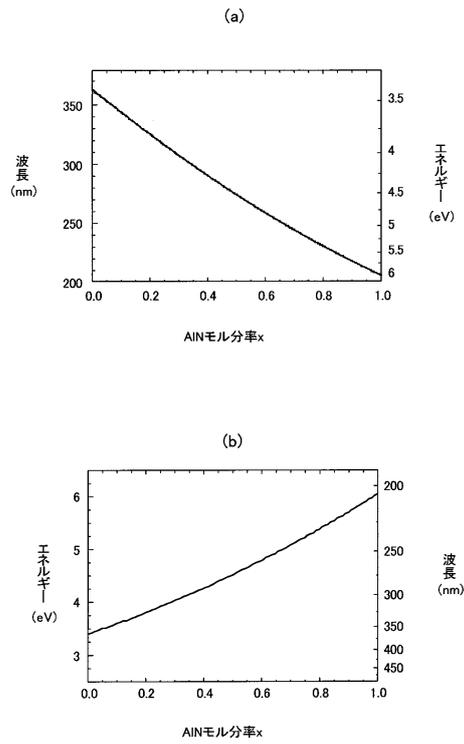
【図17】



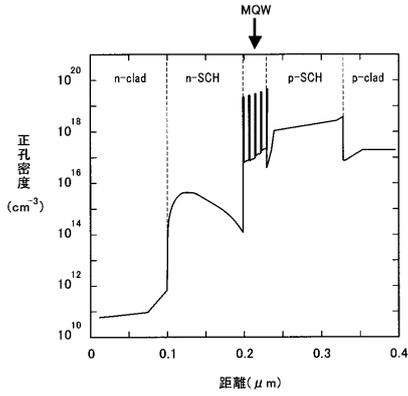
【図16】



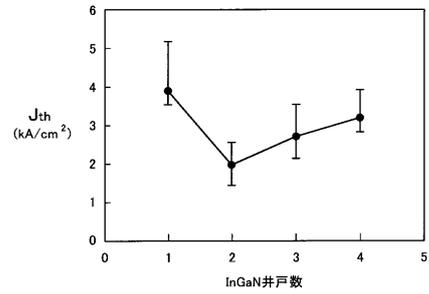
【図18】



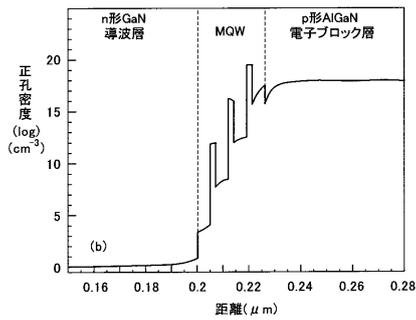
【図19】



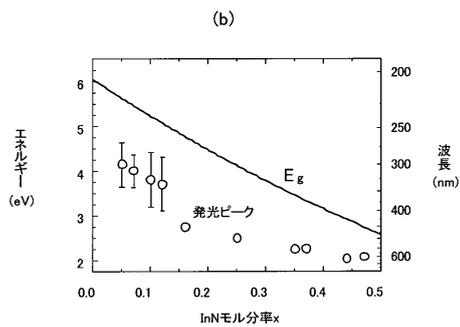
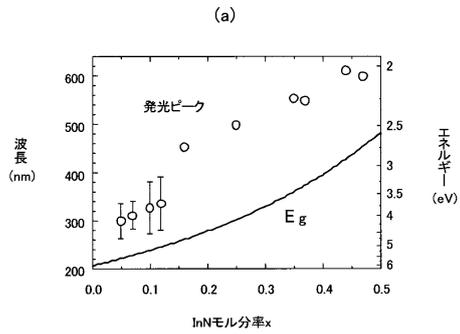
【図21】



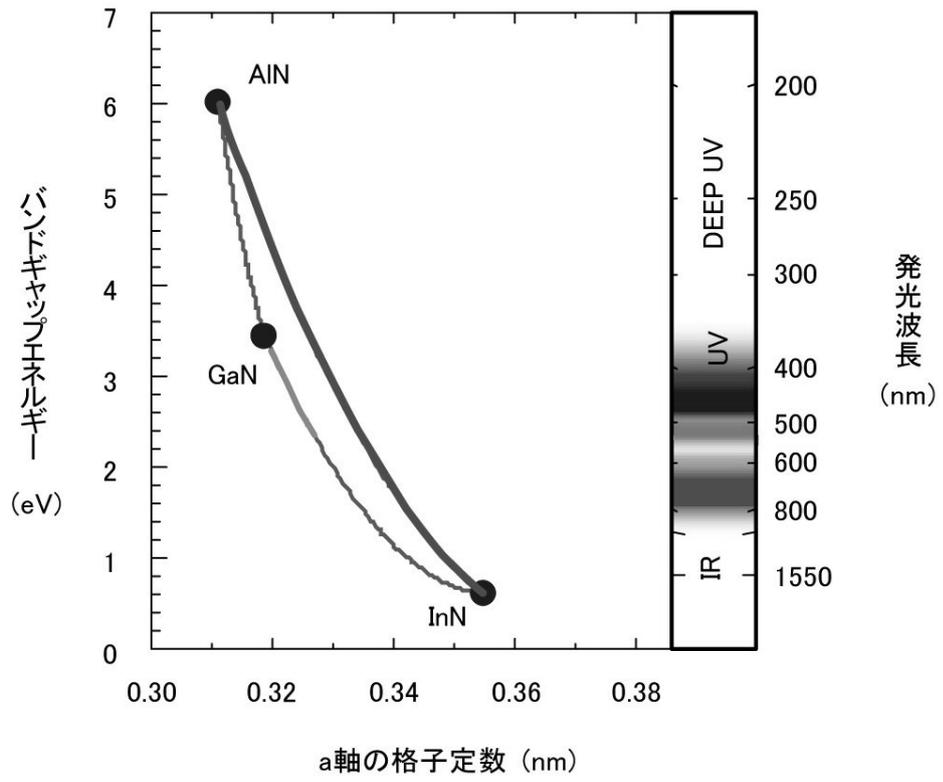
【図20】



【図22】



【 図 2 3 】



## フロントページの続き

- (72)発明者 秩父 重英  
宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号 国立大学法人東北大学内
- (72)発明者 尾沼 猛儀  
宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号 国立大学法人東北大学内
- (72)発明者 小山 享宏  
宮城県仙台市若林区舟町50 アネックス51 405号室
- (72)発明者 宗田 孝之  
東京都新宿区大久保三丁目4番1号 学校法人早稲田大学理工学術院内
- (72)発明者 池田 大勝  
東京都新宿区大久保三丁目4番1号 学校法人早稲田大学理工学術院内

審査官 日夏 貴史

- (56)参考文献 特開平10-135576(JP,A)  
H.TEISSEYRE et al., Applied Physics Letters, 2007年 2月21日, p.81104  
川西英雄 et al., 電子情報通信学会技術研究報告, 2007年10月 4日, Vol.107 No.253(LQE2007-57-79), p.39-42
- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)  
H01S 5/00 - 5/50