

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5743424号
(P5743424)

(45) 発行日 平成27年7月1日(2015.7.1)

(24) 登録日 平成27年5月15日(2015.5.15)

| | |
|--------------------------|---------------------|
| (51) Int.Cl. | F I |
| H O 1 L 21/205 (2006.01) | H O 1 L 21/205 |
| C 2 3 C 16/34 (2006.01) | C 2 3 C 16/34 |
| C 3 O B 25/18 (2006.01) | C 3 O B 25/18 |
| C 3 O B 29/38 (2006.01) | C 3 O B 29/38 D |
| H O 1 L 33/32 (2010.01) | H O 1 L 33/00 1 8 6 |

請求項の数 3 (全 29 頁)

| | | | |
|--------------|-------------------------------|-----------|---------------------|
| (21) 出願番号 | 特願2010-102784 (P2010-102784) | (73) 特許権者 | 000005049 |
| (22) 出願日 | 平成22年4月28日 (2010.4.28) | | シャープ株式会社 |
| (62) 分割の表示 | 特願2007-15305 (P2007-15305) | | 大阪府大阪市阿倍野区長池町22番22号 |
| 原出願日 | 平成11年7月30日 (1999.7.30) | (72) 発明者 | 津田 有三 |
| (65) 公開番号 | 特開2010-258459 (P2010-258459A) | | 大阪府大阪市阿倍野区長池町22番22号 |
| (43) 公開日 | 平成22年11月11日 (2010.11.11) | | シャープ株式会社内 |
| 審査請求日 | 平成22年5月27日 (2010.5.27) | (72) 発明者 | 湯浅 貴之 |
| 審判番号 | 不服2014-189 (P2014-189/J1) | | 大阪府大阪市阿倍野区長池町22番22号 |
| 審判請求日 | 平成26年1月7日 (2014.1.7) | | シャープ株式会社内 |
| (31) 優先権主張番号 | 特願平10-216639 | 合議体 | |
| (32) 優先日 | 平成10年7月31日 (1998.7.31) | 審判長 | 木村 孔一 |
| (33) 優先権主張国 | 日本国 (JP) | 審判官 | 河本 充雄 |
| | | 審判官 | 小川 進 |

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 窒化物半導体構造とその製造方法および発光素子

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

サファイア基板のC面の全面を加工することにより、平均高低差が3 μm以下、平均周期が13 μm以下の凹凸部が無秩序に形成された成長面を備える基板と、

前記成長面上に形成された窒化物半導体膜とを有し、

前記窒化物半導体膜は、上面が平坦であることを特徴とする窒化物半導体構造。

【請求項2】

請求項1に記載の窒化物半導体構造と、

前記窒化物半導体構造上に形成された窒化物半導体からなる活性層を有する発光素子構造とからなることを特徴とする発光素子。

【請求項3】

サファイア基板のC面の全面を加工することにより、平均高低差が3 μm以下、平均周期が13 μm以下の無秩序な凹凸部を有する成長面を形成する工程と、

前記成長面上に窒化物半導体膜を成長させる工程とを、順次に行うものであり、

前記窒化物半導体膜は、上面が平坦であることを特徴とする窒化物半導体構造の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、窒化物半導体構造に関し、結晶成長用基板と格子定数または熱膨張係数の異なる窒化物半導体を結晶成長用基板上に高品質に成長させた窒化物半導体構造とその製造方法および窒化物半導体構造を用いて形成された発光素子に関する。

【背景技術】

【0002】

従来より、青色発光ダイオード（青色LED）または青色レーザダイオード（青色LD）の形成材料として窒化物半導体を用いられている。窒化物半導体は、有機金属気相成長法（MOCVD法）、ハイドライド気相成長法（HVPE法）または分子線エピタキシャル成長法（MBE法）によって基板上に成長されている。一般に、半導体成長は、結晶成長させるべき半導体と同種の基板もしくは半導体と格子定数および熱膨張係数の近い基板を利用する。

10

【0003】

現行の技術では形成する窒化物半導体と同種の適切な大きさの窒化物半導体基板を作製できないことから、窒化物半導体基板の代用としてサファイア基板、SiC基板、スピネル基板等が使用されている。上記代用基板の1つであるサファイア基板は窒化物半導体との格子定数差または熱膨張係数差が大きいために、サファイア基板直上に結晶成長した窒化物半導体膜内には $10^9 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ の貫通転位が存在することが知られている。従って、代用基板直上に直接結晶成長させて、成長膜内の結晶欠陥または貫通転位密度の少ない良好な窒化物半導体結晶を得ることは困難であった。ここで、本明細書中の貫通転位とは、特に結晶内部もしくは結晶間の界面で発生した転位が基板表面まで到達したものと定義する。

20

【0004】

現在、サファイア基板直上に結晶欠陥または貫通転位密度を低減させるべく窒化物半導体膜製造方法として、マスクパターンを用いた選択成長方法が利用されている。

【0005】

従来技術による窒化物半導体の選択成長を利用した窒化物半導体膜製造方法について説明する。

【0006】

サファイア基板直上に第1層目の窒化物半導体膜を、MOCVD装置を用いて形成する。これを第1工程とする。上記第1工程の後、第1層の窒化物半導体膜直上に化学気相成長（CVD）法を用いて SiO_2 層を蒸着する。これを第2工程とする。続いて、 SiO_2 層に従来のリソグラフィ技術を用いて周期的開口パターンを形成し、これを第3工程とする。上記第3工程を含むサファイア基板をHVPE装置内に搬送し、第4工程となる第2層目の窒化物半導体厚膜層を成長する。上記の成長工程を経過することによって、第4工程で形成した第2層目の窒化物半導体厚膜層内には、結晶品質を低下させる一つの要因である貫通転位密度が約 $6 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 程度にまで低減した（非特許文献1または非特許文献2）。これは、第3工程で形成した SiO_2 マスクパターン上に形成した窒化物半導体結晶の選択成長のためである。即ち、マスクパターン直上に結晶成長した第2層目の窒化物半導体厚膜層は、 SiO_2 層によって形成された部分には成長し難く、開口部には結晶成長し易いという窒化物半導体結晶の選択成長性を有している。

30

40

【0007】

このことにより、第2層目の窒化物半導体厚膜層の初期成長は主に開口部で成長し始め、 SiO_2 層の最表面に達した時点で基板に対して垂直方向の成長と、マスク（ SiO_2 層）を埋めるような横方向への成長（ラテラル成長）とが始まる。このラテラル成長はマスクを下地として成長しているのではなく、開口部で成長した窒化物半導体結晶を核として成長しているため格子定数不整合による影響を受け難い。また、第1層目の窒化物半導体層中に発生した貫通転位はマスクの開口部を通して第2層目の窒化物半導体厚膜層内に浸入するが、上記ラテラル成長のため横方向に進路を変える。よって、最表面に到達する貫通転位は減少し、貫通転位密度の低い結晶が得られる。

【0008】

50

また、非特許文献3の報告例にあるように、サファイア基板直上に直接 SiO_2 のマスクパターンを設けて、MOCVD法によりGaN単結晶膜を選択成長させてもよい。上記報告例の場合、第1工程は省略され、第2工程から第4工程によって形成される。上記手法の結果、サファイア基板直上に形成されたGaN単結晶膜内(SiO_2 マスクの開口部上)の貫通転位密度は $10^9 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ であるのに対し、 SiO_2 直上のそれは $10^5 \sim 10^6 \text{ cm}^{-2}$ に減少していることが報告された。

【0009】

上記窒化物半導体膜製造方法によって窒化物半導体膜内の貫通転位を低減し、窒化物半導体膜直上に形成した窒化物半導体発光素子の発光特性および品質の改善が期待された。

【先行技術文献】

10

【非特許文献】

【0010】

【非特許文献1】第58回応用物理学会学術講演会講演予稿集2p-Q-15、No1(1997)p266

【非特許文献2】Jpn.J.Appl.Phys.Vol.36(1997)pp.L899

【非特許文献3】第58回応用物理学会学術講演会講演予稿集2p-Q-14、No1(1997)p265

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

20

【0011】

上記窒化物半導体膜製造技術によって窒化物半導体膜内の貫通転位を低減することが可能となったが、貫通転位密度の少ない上記手法の窒化物半導体膜を形成するためには少なくとも3工程の成長膜過程を要する。しかも第1工程から第2工程、または第2工程から第4工程へと製造装置を変更する必要がある。特に上記第1工程から第4工程を行う方法では2段階の結晶成長を余儀なくされる。一般に成長中断を伴う再成長の場合、結晶表面の不純物が問題になる。上記の手法では更に第2工程で形成した SiO_2 蒸着層をパターン加工するため、よりいっそう不純物等の混入が懸念される。また、一般に第2層目の窒化物半導体厚膜層として利用されるGaN層は、約1000の成長温度で結晶成長を行うため、第3工程の SiO_2 層によって構成されたマスクパターンは熱的損傷を受ける。熱的損傷を受けたマスクパターンの構成要素であるSiまたは O_2 は窒化物半導体膜に悪影響をもたらすことが発明者らの研究により分かった。

30

【0012】

窒化物半導体膜製造法によって作製された窒化物半導体膜直上に窒化物半導体発光素子構造を作製した場合、上記マスクパターンの熱的損傷により発生した不純物が窒化物半導体発光素子構造の光を発生する活性層内に影響する。この影響は、発光素子の発光効率の低下と個々の発光素子の発光効率のばらつきによる製品の信頼性低下を招くと共に、窒化物半導体発光素子生産の歩留まりを低下させている。

【課題を解決するための手段】

【0013】

40

本発明は、サファイア基板のC面の全面を加工することにより、平均高低差が $3 \mu\text{m}$ 以下、平均周期が $1.3 \mu\text{m}$ 以下の凹凸部が無秩序に形成された成長面を備える基板と、前記成長面上に形成された窒化物半導体膜とを有し、前記窒化物半導体膜は、上面が平坦であることを特徴とする窒化物半導体構造である。

【0015】

本発明は、上記に記載の窒化物半導体構造と、前記窒化物半導体構造上に形成された窒化物半導体からなる活性層を有する発光素子構造とからなることを特徴とする発光素子である。

50

【 0 0 1 6 】

本発明は、サファイア基板のC面の全面を加工することにより、平均高低差が $3\mu\text{m}$ 以下、平均周期が $13\mu\text{m}$ 以下の無秩序な凹凸部を有する成長面を形成する工程と、前記成長面上に窒化物半導体膜を成長させる工程とを、順次に行うものであり、前記窒化物半導体膜は、上面が平坦であることを特徴とする窒化物半導体構造の製造方法である。

【発明の効果】

【 0 0 1 7 】

本発明によれば、窒化物半導体と格子定数または熱膨張係数の異なる基板上に、厚膜の窒化物半導体膜を形成してもクラックがなく、かつ不純物混入の少ない高品質な窒化物半導体をエピタキシャル成長させることが可能となった。

10

【 0 0 1 8 】

また、上記窒化物半導体膜の製法によって成長した高品質の窒化物半導体膜上に発光素子構造を作製した場合、歩留まり率が高く、非常に発光効率の高いLEDまたはLDを作製することができた。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 9 】

【図1】本発明の実施の形態1の窒化物半導体を示す図である。

【図2】本発明の実施の形態1の加工構造基板を示す図である。

【図3】本発明の実施の形態2の加工構造基板を示す図である。

20

【図4】本発明の実施の形態3の加工構造基板を示す図である。

【図5】本発明の実施の形態9の加工構造基板及び窒化物半導体を示す図である。

【図6】本発明の実施の形態10のレーザダイオード素子構造を示す図である。

【図7】本発明の実施の形態11の発光ダイオード素子構造を示す図である。

【図8】本発明における成長方法を説明する図である。

【図9】本発明の実施の形態12の窒化物半導体膜構造を示す図である。

【図10】本発明の実施の形態14の窒化物半導体膜構造を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 2 0 】

以下に、本発明の原理について図8を用いて説明する。

30

【 0 0 2 1 】

図8において、加工構造基板100には溝115の形成された基板であり、溝115の形成により基板表面に現れた凸部（平坦部）114を有する。加工構造基板100上には窒化物半導体膜が形成されている。凸部上の窒化物半導体層123が形成されることはもとより、溝上の窒化物半導体層124にも形成されており、溝115内部には窒化物半導体の形成されない空洞部116を有する。また、溝115の底部にも窒化物半導体125が堆積している。

【 0 0 2 2 】

このように、溝付き基板を用いることによって、溝115と凸部114との段差により、溝115に窒化物半導体125が埋まるよりも先に溝115の両隣り凸部114直上に結晶成長した凸部上の窒化物半導体膜123がラテラル成長して結合する。このため、溝部115の直上にも溝上の窒化物半導体膜124が形成する。このことにより、溝部115上には窒化物半導体膜が成長していない空洞部116が形成される。凸部114からラテラル成長してできた溝上の窒化物半導体膜124は加工構造基板100からの影響（格子定数差または熱膨張係数差による応力歪み）を全く受けず、従って、凸部114に形成された窒化物半導体膜123は窒化物半導体膜124と加工構造基板100との間に生じた格子定数差または熱膨張係数差による応力歪みを、基板からの影響を全く受けていない窒化物半導体膜124によって緩和することができる。横方向への結晶成長を利用したこと、および、このように応力の影響を軽減しつつ結晶成長が行われることにより、基板から結晶表面に向かって縦方向に伸びる貫通転位を単に平坦な表面上に結晶成長する場合よ

40

50

りも減らすことができる。さらには、このような応力の緩和に伴って、厚膜の窒化物半導体膜を形成してもクラックの発生を抑制でき、従来困難であった厚膜の窒化物半導体膜を作製することができた。

【0023】

このような効果を窒化物半導体膜全体に渡って与えるためには、溝の密度がある程度高い必要がある。本発明者らの検討によれば、隣り合う溝の間隔（溝の中心線から隣の溝の中心線までの距離）を $20\mu\text{m}$ 以下にすれば、本発明の効果が得られた。特に、基板と窒化物半導体膜との間の歪みは溝の密度に依存し、溝の密度が増加すればさらに高い歪み緩和効果が得られる。隣り合う溝の間隔を $20\mu\text{m}$ 以上とすると、得られた窒化物半導体膜における貫通転位密度は平坦な基板上に形成したものと変わらなくなった。

10

【0024】

また空洞部116は、凸部114上の窒化物半導体膜123からのラテラル成長が、溝内部からの窒化物半導体125の成長を上回ることによって、形成されるものであるから、溝形状によって大きな影響を受けることになる。本発明者らの検討では、溝幅 b が $10\mu\text{m}$ 以下とし、溝の深さ h を $h = 0.2 \times b$ とすることが好ましいことが分かった。

【0025】

さらには、溝の深さ h を $h = b$ の条件まで十分深くすれば、結晶成長時に溝底部では原料が供給されなくなり、窒化物半導体125の堆積がほとんどなくなるので、結晶成長条件によらず極めて容易に空洞部116が形成でき、また、上記応力歪み低減の効果を更に高めることができる。

20

【0026】

また、溝が窒化物半導体に対して $\langle 1 - 100 \rangle$ 方向に沿って基板表面に形成されることによって、窒化物半導体のラテラル成長速度の大きい方向に対して垂直方向に溝を形成することになる。従って、凸部上の窒化物半導体膜123からのラテラル成長をより促進することができ、本発明の効果を高めることができる。本発明者らの実験的見地によると、窒化物半導体であるGaNは、基板上では窒化物半導体(GaN)の $[11 - 20]$ 方向に伸びて成長（ラテラル成長）することが判明している。

【0027】

また、溝の側壁が基板の劈開面を含むように溝を形成することによって、溝の加工が容易になるので、溝の形状を急峻にすることができ、従って溝115と凸部114の段差を明確にでき、また、溝幅に対して溝の深さの深い溝を容易に形成することができる。

30

【0028】

尚、本明細書において、溝は凹部の特異例であり、溝とは凹部が連続的に線状に並んだもののことを意味する。加工構造基板とは、基板表面に凹凸部あるいは溝部を形成した基板のことを意味する。また、基板の劈開方向とは、基板の劈開面に対して平行な方向を指す。

【0029】

以下に本発明を実施した形態を詳細に説明する。

【0030】

（実施の形態1）図1は、本実施の形態によって作製されたn型GaN膜を積層した窒化物半導体構造の構成図を示している。本実施の形態1の窒化物半導体構造では、サファイア基板のC面上にサファイア基板の $[11 - 20]$ 方向（GaN膜に対しては $[1 - 100]$ 方向）に沿って溝部110を形成した加工構造基板100と、加工構造基板100の凸部114上にGaNバッファ層120を形成し、加工構造基板100全面にn型GaN膜121を $9\mu\text{m}$ 成長させた構造からなる。

40

【0031】

まず、実施の形態1で使用した加工構造基板の作製方法について説明する。成長用基板としてサファイア基板のC面を用いた。図2(a)は加工構造基板100の立体視図を、図2(b)は図2(a)の上面図を示している。図2中の加工構造基板100は以下のようにして作製した。まず、サファイア基板表面にレジストを塗布し、紫外線露光によりレ

50

ジストパターンを形成した。次に、上記露光により硬化した部分のみを残し、それ以外の部分をリフトオフする。これら、一連の操作は周知技術であるフォトリソグラフィ技術によるものである。レジストパターン付きサファイア基板をウェットエッチングした。このとき、サファイア基板表面上に形成された溝部 110 は、幅 $b = 6 \mu\text{m}$ 、深さ $h = 2 \mu\text{m}$ で、溝部と溝部の間隔 (1 周期) $L = 12 \mu\text{m}$ である。溝部 110 の方向はサファイア基板に対して $[11-20]$ 方向に形成した。一般に、サファイア基板の M 面 ($\{1-100\}$ 面) はいくつかある劈開面の内の 1 つとして知られている。従って、サファイア基板の C 面はこの $[11-20]$ 方向に沿って劈開性を持つ。

【0032】

上述した加工構造基板 100 の製造方法は、上記フォトリソグラフィ技術の他に、スクライピング法、ワイヤーソー加工、放電加工、スパッタリング法、レーザ加工、サンドブラスト加工、フォーカスイオンビーム (FIB) 法を用いてサファイア基板表面に溝部 110 を形成しても良い。また、上記ウェットエッチングの代わりにドライエッチングを、露光に電子線またはレーザ光の干渉を利用したホログラフィー技術を使用しても良い。

【0033】

本実施例では、溝の側壁の面が $\{1-100\}$ 面 (M 面) の劈開面 (物理的加工により現れやすい面) であるが、他にも劈開面となる面方位としては、基板が六方晶系 (サファイア基板を含む) の場合には $\{1-100\}$ 面 (M 面)、 $\{01-20\}$ 面 (R 面)、あるいは基板が閃亜鉛鉱型あるいはダイヤモンド構造型の場合には $\{110\}$ 面があり、このような面方位となる方向に溝を作製しても構わない。

【0034】

また、サファイア基板に対する $\{1-100\}$ 面は例えばケミカルエッチングした場合に現れやすい面 (以下、エッチング安定面と記す) でもある。このようなエッチング安定面となる方向に溝を形成することによっても、溝の側面が急峻とすることができる。このようなエッチング安定面となる面方位としては、基板が六方晶系 (サファイア基板を含む) の場合には $\{1-100\}$ 面 (M 面)、 $\{11-20\}$ 面 (A 面)、 $\{0001\}$ 面 (C 面)、 $\{01-12\}$ 面 (R 面)、あるいは基板が立方晶系、特に閃亜鉛鉱型またはダイヤモンド構造型の場合には $\{111\}$ 面、 $\{001\}$ 面があり、このような面方位となる方向に溝を作製しても構わない。

【0035】

次に、加工構造基板 100 上に MOCVD 装置を用いて n 型 GaN 膜を結晶成長させて、窒化物半導体構造を作製する工程について説明する。図 1 (図 2) に示す加工構造基板 100 を有機溶媒で十分に洗浄し、MOCVD 装置内にセッティングした。n 型 GaN 膜 121 の成長前に、 H_2 ガスフロー中、基板温度 1025°C で、加工構造基板 100 を約 10 分間、サーマルクリーニングした。次に、基板温度を 550°C に下げ、III 族原料として TMG (トリメチルガリウム) 10 ccc/min を、V 族原料として NH_3 500 ccc/min を供給し、約 20 nm の GaN バッファ層 120 を成長させた。この手法は、サファイア基板上にエピタキシャル成長させるための公知技術と同一である。

【0036】

次に、基板温度を 1000°C に昇温し、TMG (50 ccc)、 NH_3 (5000 ccc) とドナー不純物である SiH_4 (シラン) を供給し、n 型 GaN 膜 121 を $9 \mu\text{m}$ 成長した。

【0037】

n 型 GaN 膜 121 の厚みが $3 \mu\text{m}$ を越えた辺りから、基板表面に作製した溝部 110 が空洞部 116 を残したまま n 型 GaN 膜 121 で覆われ、平坦化し始めた。さらに成長を続け、n 型 GaN 膜 121 の厚みが $9 \mu\text{m}$ で貫通転位の密度は約 10^7 cm^{-2} 程度になった。

【0038】

また、サファイア基板 C 面上にエピタキシャル成長した窒化物半導体である GaN の配向関係は、 $(0001) \text{ sapphire} // (0001) \text{ GaN}$ 、 $[1-210] \text{ sa}$

10

20

30

40

50

pphire // [- 1 0 1 0] GaNであることが知られており、結局、サファイア基板に対して [1 1 - 2 0] 方向に溝部を形成することは、GaNに関しては [1 - 1 0 0] 方向に溝部 1 1 0 を形成したことになる。従って、本実施の形態 1 の溝部は、基板の劈開方向かつ基板直上に結晶成長した窒化物半導体の < 1 - 1 0 0 > 方向に沿って形成されていることになる。

【 0 0 3 9 】

窒化物半導体 (GaN) はサファイア基板の C 面上内では窒化物半導体 (GaN) の < 1 1 - 2 0 > 方向に伸びてラテラル成長することから、本実施の形態 1 の溝部は、基板の劈開方向及び基板直上に結晶成長した窒化物半導体のラテラル成長の速度の速い方向に対して垂直な方向に沿って形成されている。基板の劈開方向に沿って溝を形成することにより、溝加工が容易になり、側壁の切り立った溝形状とすることによって急峻な段差を実現でき、また、ラテラル成長方向の速い方向に対して垂直な溝が形成されたことによって、空洞が生成されやすくなった。従って、形成された窒化物半導体膜 1 2 1 の応力歪みによる結晶の高品質化及び窒化物半導体膜 1 2 1 内にクラック防止に寄与する。

【 0 0 4 0 】

本実施の形態 1 において加工構造基板上に形成した溝の周期を溝の深さ $h = 0.2 \times$ 溝幅 b を満たすことによって n 型 GaN 膜 1 2 1 はその膜と加工構造基板 1 1 0 との間に生じた格子定数差または熱膨張係数差による応力歪みを緩和することができ、厚膜窒化物半導体膜を形成したことによるクラック発生を防止することができる。溝幅を広くするか、溝の深さを浅くすることによって溝の深さ $h = 0.2 \times$ 溝幅 b の条件を満たさない場合には、成長初期において溝の内部が窒化物半導体膜で埋まり空洞ができず、横方向成長による効果や歪み低減効果を奏しない。また、溝の間隔を長くしても上記で説明したように平坦なサファイア基板上に形成した場合と貫通転位密度が同程度になった。

図 1 の n 型 GaN 膜 1 2 1 の表面に現れた貫通転位密度を見積もるために、表面 TEM (透過型電子顕微鏡) 観察を行った。その結果、成長膜表面に現れた貫通転位密度は約 10^7 cm^{-2} 程度まで低減しており、これまでに報告された従来例とほぼ同程度か若干高い程度である。

【 0 0 4 1 】

また、従来例では選択成長によるマスクパターンが窒化物半導体の成長中に熱的損傷を受け、マスクパターンの構成要素が不純物として窒化物半導体成長膜内に影響をもたらしていた。しかしながら、本実施の形態で作製された成長膜層内には上記の不純物となる構成要素は一切含まれておらず、窒化物半導体成長膜のフォトルミネッセンス (PL) 測定によれば、窒化物半導体成長膜 (GaN 単膜) のバンド端付近の発光強度と不純物によるディープレベルからの発光強度との相対比を比較したところ、本実施の形態で得られた相対強度比はマスクパターンを利用したそれと比べて 1 桁以上改善されていた。これは、本実施の形態で得られた窒化物半導体の成長膜が非常に高品質であることを示している。

【 0 0 4 2 】

上記加工構造基板上に形成した溝の周期長 L は $12 \mu\text{m}$ であったが、その周期長 L をさらに短くすれば溝の密度が増加し、貫通転位密度の低減が可能となる。また、本実施の形態 1 では溝幅 $6 \mu\text{m}$ であったが、さらに溝幅を狭くしても構わない。さらに、本実施の形態では溝の周期を一定としたが、溝の間隔を $20 \mu\text{m}$ 以下にする限り、溝の周期は必ずしも一定である必要はない。

【 0 0 4 3 】

(実施の形態 2) 本実施の形態 2 は、実施の形態 1 の変形例であり、サファイア基板に形成する溝部のパターンを変更した以外は本質的に実施の形態 1 と同一である。図 3 に本実施の形態 2 によって構成された加工構造基板 1 0 0 を示す。

【 0 0 4 4 】

本実施の形態 2 は、サファイア基板の C 面上にサファイア基板の [1 1 - 2 0] と [- 2 1 1 0] 方向に沿って溝部 1 1 1 を形成した加工構造基板 1 0 0 と、加工構造基板 1 0 0 直上に n 型 GaN 膜を $8 \mu\text{m}$ 成長させた構造からなる。以下に、本実施の形態 2 で作製

10

20

30

40

50

した加工構造基板 100 と加工構造基板 100 上に結晶成長した n 型 GaN 膜について説明する。

【0045】

成長用基板としてサファイア基板の C 面を用いた。図 3 の加工構造基板 100 は FIB 技術を使用して作製した。サファイア基板表面上に形成された溝部 111 は、幅 $b = 1 \mu\text{m}$ 、深さ $h = 3 \mu\text{m}$ で、溝の間隔の周期 $L = 3 \mu\text{m}$ である。このときの溝部 111 の方向はサファイア基板に対して $[11-20]$ と $[-2110]$ 方向である。

【0046】

次に、加工構造基板 100 に MOCVD 装置を用いて n 型 GaN 膜を結晶成長した。図 3 の加工構造基板 100 を有機溶媒にて十分に洗浄し、MOCVD 装置内にセッティングした。n 型 GaN 膜成長前に、 H_2 ガスフロー中、基板温度 1025°C で、加工構造基板 100 を約 10 分間、サーマルクリーニングした。次に、基板温度を 500°C に下げ、III 族原料として TMA (トリメチルアルミニウム) 20 cc/min を、V 族原料として NH_3 5000 cc/min を供給し、約 50 nm の AlN パッファ層を成長させた。この手法は、サファイア基板上にエピタキシャル成長させるための公知技術と同一である。

【0047】

次に、基板温度を 1000°C に昇温し、TMG (50 cc)、 NH_3 (5000 cc) とドナー不純物である SiH_4 (シラン) を供給し、n 型 GaN 膜を $8 \mu\text{m}$ 成長した。

【0048】

実施の形態 1 で述べたように n 型 GaN 膜の厚みが $2 \mu\text{m}$ を越えた辺りから、基板表面に作製した溝部 111 が空洞部を残したまま GaN 膜によって覆われ、n 型 GaN 膜が平坦化し始めた。さらに成長を続け、n 型 GaN 膜の厚みが $8 \mu\text{m}$ 程度で貫通転位の密度は約 $10^5 \sim 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 程度になった。窒化物半導体成長膜のバンド端付近からの PL 発光強度は、実施の形態 1 と同じく非常に強く、かつ不純物によるディープレベルからの発光強度は極めて弱かった。このことから、実施の形態 1 と同じく高品質の GaN 単膜が形成された。

【0049】

本実施の形態 2 では溝幅に対する溝の深さの相対的な深さが実施の形態 1 の場合よりも深くなっており、溝幅よりも溝の深さが大きくすることで気相成長時における原料ガスの溝内部への供給が極端に不十分になって、溝内部にほとんど結晶成長が起こらなくなることができた。

【0050】

また、本実施の形態では、溝の方向が複数の方向に形成されている。サファイア基板に対して $\langle 11-20 \rangle$ 方向の溝は、サファイア基板の C 面内に $[11-20]$ 、 $[-2110]$ 、 $[1-210]$ の 3 種存在する。本実施例のように窒化物半導体がサファイア基板に対して C 軸配向で結晶成長する場合、同様に、窒化物半導体の C 面内に 3 種の方向が存在する。本実施の形態 2 で使用した加工構造基板は、3 種の方向の内、2 種を選択してサファイア基板の C 面上に溝部 111 を形成したものである。このことにより、加工構造基板上に結晶成長した GaN は、これら 2 種の方向の各々に対して垂直な方向にラテラル成長を促進させられている。また、本実施の形態 2 の溝の間隔の一周期は、実施の形態 1 の溝の間隔の一周期の半分と短くなっており、溝の密度を増加させている。従って、実施の形態 2 で得られた貫通転位密度は実施の形態 1 のそれと比べて 1 桁程度改善されていた。

【0051】

(実施の形態 3) 本実施の形態 3 は、実施の形態 2 の変形例であり、実施の形態 2 で記述したサファイア基板 $\langle 11-20 \rangle$ の等価な 3 種全ての方向に沿って溝部を形成したものである。従って、窒化物半導体に関して 3 種の $\langle 1-100 \rangle$ 方向全てを選択したことに相当する。尚、本実施の形態 3 はサファイア基板に形成する溝部のパターンを変更した以外は実施の形態 2 と同一である。

【 0 0 5 2 】

図 4 に本実施の形態 3 によって構成された加工構造基板 1 0 0 を示す。本実施の形態 3 は、サファイア基板の C 面上にサファイア基板の $[11-20]$ 、 $[-2110]$ と $[1-210]$ 方向に沿って溝部 1 1 2 を形成した加工構造基板 1 0 0 と、加工構造基板 1 0 0 直上に n 型 GaN 膜を $8\mu\text{m}$ 成長させた構造からなる。以下に、本実施の形態 3 で作製した加工構造基板 1 0 0 について説明する。成長用基板としてサファイア基板の C 面を用いた。図 4 の加工構造基板 1 0 0 は実施形態 2 と同様に FIB 技術を使用して作製した。サファイア基板表面上に形成された溝 1 1 2 は、幅 $b = 1\mu\text{m}$ 、深さ $h = 2\mu\text{m}$ で、溝の間隔の一周期 $L = 4\mu\text{m}$ である。このときの溝 1 1 2 の方向はサファイア基板に対して、 $[11-20]$ 、 $[-2110]$ と $[1-210]$ 方向である。

10

【 0 0 5 3 】

本実施の形態 3 では、結晶成長した GaN が全 3 種の方向の各々に対して垂直な方向にラテラル成長している。また、実施の形態 2 と同様に溝部の深さ h が溝部の幅 b よりも長いことから、基板と窒化物半導体膜との間から生じた応力歪みを受け難くなる。

【 0 0 5 4 】

本実施の形態 3 で得られた貫通転位密度ならびに PL 発光強度による結果は実施の形態 2 のそれとほぼ同等であった。このことから、実施の形態 2 と同じく高品質の GaN 単膜が形成され、また、クラックの発生も同様に抑制された。

【 0 0 5 5 】

(実施の形態 4) 本実施の形態 4 は、実施の形態 1 または実施の形態 2 の変形例であり、サファイア基板の C 面をサファイア基板の M 面に変更し、溝の方向を適宜選択したこと以外は同一である。以下に、本実施の形態 4 で作製した加工構造基板について説明する。

20

【 0 0 5 6 】

サファイア基板 M 面と窒化物半導体である GaN とのエピタキシャル関係は、 $(01-10)\text{sapphire} // (01-13)\text{GaN}$ 、 $[0001]\text{sapphire} // [2-1-10]\text{GaN}$ である。従って、M 面サファイア基板に関して $[0001]$ 方向に $\{1-100\}$ 面を含む溝部を、あるいは $[2-1-10]$ 方向に沿って溝部を形成すると、前者の溝の方向はサファイア基板の劈開面である M 面 ($\{1-100\}$ 面) を含んでおり、後者の溝の方向はサファイア基板 M 面上に結晶成長した GaN のラテラル成長に対して垂直である。これらの方向を片方のみ、または両方をサファイア基板の M 面上に形成し、これを加工構造基板とする。片方向のみに溝部を形成した場合は実施の形態 1 に、両方向に溝部を形成した場合は実施の形態 2 に属する。

30

【 0 0 5 7 】

本実施の形態 4 に即して溝部の幅 $b = 2\mu\text{m}$ 、深さ $h = 3\mu\text{m}$ 、溝の間隔の一周期 $L = 5\mu\text{m}$ で、加工構造基板を作製し、窒化物半導体膜を $10\mu\text{m}$ 成長した。加工構造基板の溝部は片方向のみまたは両方向に形成した 2 種類について試作を行ったが、これらの貫通転位密度は共に $10^6 \sim 10^7 \text{cm}^{-2}$ 程度であった。この貫通転位密度の値は、これまでの従来例で報告されたマスクパターンを利用したそれと比べてほぼ同程度であった。本実施の形態 4 では、上記実施の形態 1 ~ 3 のように、基板の劈開面内の方向と窒化物半導体のラテラル成長に対して垂直方向とが一致していない。実施の形態 2 または 3 に比べてその貫通転位密度が 1 桁程度悪くなった 1 つの要因として上記理由が考えられる。PL 発光強度に関しては上述の実施の形態 1 と同様に、窒化物半導体のバンド端付近の発光による PL 発光強度は非常に強く、不純物に起因したディープレベルからの発光強度は極めて弱かった。また、クラックの発生も同様に抑制された。

40

【 0 0 5 8 】

(実施の形態 5) 本実施の形態 5 は、実施形態 1 ~ 3 の変形例であり、サファイア基板の C 面をサファイア基板の A 面に変更した以外は同一である。以下に、本実施の形態 5 で作製した加工構造基板について説明する。

【 0 0 5 9 】

サファイア基板 A 面上に窒化物半導体である GaN をエピタキシャル成長させた場合、

50

窒化物半導体の結晶成長条件によってサファイア基板A面とGa₂Nとの配向関係に以下の2種が存在する。即ち、(2 - 1 - 1 0) s a p p h i r e / / (0 0 0 1) Ga₂N、[0 0 0 1] s a p p h i r e / / [2 - 1 - 1 0] Ga₂N、[0 1 - 1 0] s a p p h i r e / / [0 1 - 1 0] Ga₂Nと、(2 - 1 - 1 0) s a p p h i r e / / (0 0 0 1) Ga₂N、[0 0 0 1] s a p p h i r e / / [0 1 - 1 0] Ga₂N、[0 1 - 1 0] s a p p h i r e / / [2 - 1 - 1 0] Ga₂Nである。前者の配向関係をエピタキシャル関係1、後者のそれをエピタキシャル関係2とする。

【 0 0 6 0 】

エピタキシャル関係1の場合、サファイア基板A面に関して[0 0 0 1]方向とその[0 0 0 1]方向と32.4°の方向に、あるいは[0 1 - 1 0]方向に沿って溝部を形成する。前者の2つの溝部の方向はサファイア基板の劈開面であるM面({ 1 - 1 0 0 } 面)とR面({ 0 1 - 1 2 } 面)をそれぞれ含んでおり、後者のそれはサファイア基板A面上に結晶成長したGa₂Nのラテラル成長に対して垂直である。これらの方向を各方向のみ、または組み合わせてサファイア基板のA面上に形成し、これを加工構造基板とする。

10

【 0 0 6 1 】

片方向のみに溝部を形成した場合は実施の形態1に、これら溝部を組み合わせて形成した場合は実施の形態2または実施の形態3にそれぞれ属する。本実施の形態5のサファイア基板A面かつエピタキシャル関係1によって得られた効果は実施の形態4と同等であった。また、クラックも同様に抑制された。

【 0 0 6 2 】

20

次に、エピタキシャル関係2の場合、溝部をサファイア基板A面に関して[0 0 0 1]方向に、またはその[0 0 0 1]方向と32.4°の方向に沿って形成する。前者の溝部の方向はサファイア基板の劈開面であるM面({ 1 - 1 0 0 } 面)を含み、かつサファイア基板A面上に結晶成長したGa₂Nのラテラル成長に対して垂直である。従って、サファイア基板のC面を使用した実施の形態1と同じ効果が得られる。次に後者の溝部の方向は、サファイア基板の劈開面であるR面({ 0 1 - 1 2 } 面)を含んでいる。これらの方向の片方を、または両方をサファイア基板のA面上に形成し、これを加工構造基板とする。

【 0 0 6 3 】

片方向のみに溝部を形成した場合は図2の実施の形態1に、これら溝部を組み合わせて形成した場合は実施の形態2または実施の形態3にそれぞれ属する。本実施の形態5のサファイア基板A面かつエピタキシャル関係2によって得られた効果は実施の形態1と同等であった。また、クラックも同様に抑制された。

30

【 0 0 6 4 】

(実施の形態6) 本実施の形態6は、実施形態1の変形例であり、サファイア基板のC面をサファイア基板のR面に変更した以外は上記実施の形態と同一である。以下に、本実施の形態6で作製した加工構造基板について説明する。サファイア基板R面と窒化物半導体であるGa₂Nとのエピタキシャル関係は、(0 1 1 - 2) s a p p h i r e / / (2 - 1 - 1 0) Ga₂N、[2 - 1 - 1 0] s a p p h i r e / / [0 1 - 1 0] Ga₂Nである。従って、サファイア基板R面に関して[2 - 1 - 1 0]方向に{ 1 - 1 0 0 }面を含む溝部を形成する。溝部の方向はサファイア基板の劈開面であるM面({ 1 - 1 0 0 } 面)を含んでいる。上記方向をサファイア基板のR面上に形成し、これを加工構造基板とする。本実施の形態6によって得られた貫通転位密度は約 $10^7 \sim 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 程度で、一般的な従来技術であるマスクパターンを利用して得られたそれと比べて若干悪い程度であった。しかしながら、不純物に起因したPL発光強度は実施の形態1と同等であった。また、クラックも同様に抑制された。

40

【 0 0 6 5 】

(実施の形態7) 本実施の形態7は、実施形態1～3の変形例であり、サファイア基板のC面を6H-SiC基板の(0 0 0 1)面に変更した以外は上記実施の形態と同一である。以下に、本実施の形態7で作製した加工構造基板について説明する。6H-SiC基板の(0 0 0 1)面上に窒化物半導体であるGa₂Nをエピタキシャル成長させた場合、6

50

H - S i C 基板 (0 0 0 1) 面と G a N とのエピタキシャル関係は、(0 0 0 1) 6 H - S i C / / (0 0 0 1) G a N、[2 - 1 - 1 0] 6 H - S i C / / [2 - 1 - 1 0] G a N、[0 1 - 1 0] s a p p h i r e / / [0 1 - 1 0] G a N である。

従って、溝を 6 H - S i C 基板 (0 0 0 1) 面に関して [2 - 1 - 1 0] 方向に、あるいは [0 1 - 1 0] 方向に沿って形成する。前者の溝部の方向は 6 H - S i C 基板 (0 0 0 1) 面の劈開面である { 1 - 1 0 0 } 面を含んでおり、後者のそれは 6 H - S i C 基板 (0 0 0 1) 面上に結晶成長した G a N のラテラル成長に対して垂直である。これらの方向の片方を、または両方を 6 H - S i C 基板 (0 0 0 1) 面上に形成し、これを加工構造基板とする。

【 0 0 6 6 】

10

片方向のみに溝を形成した場合は実施の形態 1 に、これら溝部を組み合わせて形成した場合は実施の形態 2 または実施の形態 3 に属する。本実施の形態 7 で得られた加工構造基板による効果は実施の形態 4 と同等であった。

【 0 0 6 7 】

(実施の形態 8) 本実施の形態 8 は、実施形態 1 から実施の形態 3 の変形例であり、サファイア基板の C 面を M g A l ₂ O ₄ (マグネシアスピネル) 基板の (1 1 1) 面に変更した以外は上記実施の形態と同一である。以下に、本実施の形態 8 で作製した加工構造基板について説明する。

【 0 0 6 8 】

M g A l ₂ O ₄ 基板の (1 1 1) 面上に窒化物半導体である G a N をエピタキシャル成長させた場合、M g A l ₂ O ₄ 基板 (1 1 1) 面と G a N とのエピタキシャル関係は、(1 1 1) M g A l ₂ O ₄ / / (0 0 0 1) G a N、[- 1 1 0] M g A l ₂ O ₄ / / [2 - 1 - 1 0] G a N、[1 1 - 2] M g A l ₂ O ₄ / / [0 1 - 1 0] G a N である。

20

【 0 0 6 9 】

従って、M g A l ₂ O ₄ 基板の (1 1 1) 面上に関して [- 1 1 0] 方向に { 1 0 0 } 面を含む溝部を、あるいは [1 1 - 2] 方向に沿って溝部を形成する。前者の溝部の方向は M g A l ₂ O ₄ 基板 (1 1 1) 面の劈開面である { 1 0 0 } 面を含んでおり、後者のそれは M g A l ₂ O ₄ 基板 (1 1 1) 面上に結晶成長した G a N のラテラル成長に対して垂直である。これらの方向の片方を、または両方を M g A l ₂ O ₄ 基板 (1 1 1) 面上に形成し、これを加工構造基板とする。

30

【 0 0 7 0 】

1 方向のみに溝部を形成した場合は実施の形態 1 に、これら溝部を組み合わせて形成した場合は実施の形態 2 または実施の形態 3 にそれぞれ属する。本実施の形態 8 で得られた加工構造基板による効果は実施の形態 4 と同等であった。

【 0 0 7 1 】

(実施の形態 9) 図 5 (a) は、本実施の形態 9 によって作製された G a N 膜の構成図を示す。図 5 (b) は、本実施の形態 9 で作製する G a N 膜の基板を示す図である。本実施の形態は、サファイア基板の C 面上に無秩序に凹凸部 1 1 3 を形成した加工構造基板 1 0 0 と、加工構造基板直上に G a N 膜 1 2 2 を 3 0 μ m 成長させた構造からなる。以下に、本実施の形態 9 で作製した加工構造基板 1 0 0 について説明すると共に、H V P E 法を用いた G a N 成長厚膜の作製方法について記述する。

40

【 0 0 7 2 】

成長用基板としてサファイア基板の C 面を使用した。図 5 (b) に示してある加工構造基板 1 0 0 は、A r ⁺ イオンミリング法を用いてサファイア基板表面上に無秩序の凹凸部 1 1 3 を形成した。この凹凸部 1 1 3 は、表面荒さ計測で平均高低差が約 3 μ m、凹凸部の平均周期が約 1 3 μ m 程度であった。

【 0 0 7 3 】

次に、上記工程によって作製された凹凸部 1 1 3 を有する加工構造基板 1 0 0 上に G a N 膜 1 2 2 の結晶成長を行う。まず、加工構造基板 1 0 0 を有機溶媒にて十分に洗浄し、H V P E 装置内にセッティングした。G a N 膜 1 2 2 結晶成長前に、H ₂ ガスフロー中、

50

基板温度 1025 で、加工構造基板 100 を約 10 分間、サーマルクリーニングした。次に GaN 膜 122 を結晶成長させるために、V 族ガスとして NH_3 ガスとキャリア H_2 ガスをそれぞれ 2000 cc/min、10000 cc/min で混合したガスを、III 族ガスについては HVPE 装置内に予め約 700 の温度で保持された Ga 金属上に、HCl ガス 100 cc/min を供給して Ga と HCl ガスとの反応生成物である III 族塩化物とキャリア H_2 ガス 1000 cc/min とを混合したガスを、それぞれ加工構造基板 100 がセッティングされている HVPE 成長槽に送り込み、GaN 膜 122 を約 30 μm 成長させた。このようにして図 5 (a) に示す GaN 膜が形成できる。

【0074】

GaN 膜 122 の厚みが 5 μm を越えた辺りから、加工構造基板 100 表面に作製した凹凸部 113 が空洞部を残したまま GaN 膜 122 で覆われ、平坦化し始めた。また、さらに成長を続け、GaN 膜 122 の厚みが 30 μm で貫通転位の密度は約 10^8 cm^{-2} 程度になった。基板表面を光学顕微鏡で観測したところクラックは発生していなかった。本実施の形態 9 で得られた GaN 膜中の貫通転位密度の値は、従来より報告されているマスクパターンを使用しない HVPE 法を用いた厚膜成長方法のそれと同程度であった。しかしながら、直接サファイア基板上に結晶成長させた従来の厚膜成長方法に比べて、本実施の形態 9 の加工構造基板を使用して作製した成長膜には、その初期成長段階において成長膜表面にクラックは発生しておらず、同じ貫通転位密度を有していても成長厚膜の厚みは薄い。

【0075】

以上、各実施の形態においては、形成される窒化物半導体として GaN を例に説明したが、これを他の窒化物半導体、例えば $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{N}$ ($0 < x < 1$, $0 < y < 1$) や、あるいは、 $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{N}$ ($0 < x < 1$, $0 < y < 1$) の構成元素の一部 (組成比 10 % 以下) を B、Cr、V、Ti、Nb、Ta、Zr、Sc、Tl、Gd、La、As、P、Sb などの元素で置換した材料であっても良い。

【0076】

(実施の形態 10) 図 6 は、本実施の形態 10 によって作製された LD 素子構造を示している。本実施の形態では、実施形態 2 で作製された n 型 GaN 膜付き加工構造基板 200 直上に、MOCVD 装置を用いて発光素子構造として LD 素子構造を作製した例である。

【0077】

以下に、本実施の形態の半導体発光素子の製造方法について説明する。

【0078】

まず、実施の形態 2 で説明した方法で作製した窒化物半導体構造 (加工構造基板と加工構造基板上の n 型 GaN 膜) 200 を MOCVD 装置に搬送し、1050 でサーマルクリーニングを行った。MOCVD 装置に装備されている原料ガスの内、V 族原料ガスとして NH_3 ガスを、III 族ガスとして TMG (トリメチルガリウム) とドナー不純物として SiH_4 (シラン) ガスを用い、成長温度 1000 で第 1 の Si ドープ n 型 GaN 層 201 を窒化物半導体構造上に 3 μm 成長させた。

【0079】

続いて、第 2 のクラッド層を作製するために、原料ガスとして NH_3 、TMG と TMA (トリメチルアルミニウム) を、ドナー不純物として SiH_4 ガスを用い、Si ドープ n 型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 層 202 を 0.4 μm 成長させた。

【0080】

次に、第 3 の光ガイド層を作製するために原料ガスとして NH_3 と TMG を、ドナー不純物として SiH_4 ガスを用い、Si ドープ n 型 GaN 層 203 を 0.1 μm 成長させた。

【0081】

次に、第 4 の多重量子井戸活性層を作製するために原料ガスとして NH_3 、TMG と TMI (トリメチルインジウム) を、ドナー不純物として SiH_4 ガスを用い、Si ドープ

10

20

30

40

50

n型の多重量子井戸 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ (2 nm) / $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ (3 nm) 層 204 を 5 周期作製した。続いて、上記量子井戸活性層中の In が活性層直上の窒化物半導体層を成長中に蒸発してしまわないように p 型 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 蒸発防止層 205 を 30 nm 成長させた。

【0082】

次に、第5の光ガイド層を作製するために原料ガスとして NH_3 と TMG を、アクセプタ不純物として EtCp_2Mg (ビスエチルシクロペンタジエニルマグネシウム) を用い、Mg ドープ p 型 GaN 層 206 を 0.1 μm 成長させた。

【0083】

次に、第6のクラッド層を作製するために、原料ガスとして NH_3 、TMG と TMA を、アクセプタ不純物として EtCp_2Mg ガスを用い、Mg ドープ p 型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 層 207 を 0.4 μm 成長させた。

【0084】

最後に第7のコンタクト層を作製するために、原料ガスとして NH_3 、TMG と TMA (トリメチルアルミニウム) を、アクセプタ不純物として EtCp_2Mg ガスを用い、Mg ドープ p 型 GaN 層 208 を 0.5 μm 成長させた。

【0085】

さらに、LD 素子化のために正電極 210、負電極 209 をそれぞれ Mg ドープ p 型 GaN 層 208、Si ドープ n 型 GaN 層 201 上に形成した。上記 LD 素子構造の n 型層と p 型層の積層方法は、先に p 型層を積層して、活性層、n 型層を積層しても良い。

【0086】

また、上記 LD 素子構造は、実施の形態2で作製した表面の平坦な n 型 GaN 膜が付いた加工構造基板 200 を使用したが、実施の形態1、3~9の方法で作製された GaN 膜を使用してもよい。さらには、各実施の形態での GaN 膜の形成と本実施の形態での LD 素子構造の作製を一装置内部で一貫して作製しても構わない。あるいは、各実施の形態により得られた GaN 膜から加工構造基板を除去したものをを用いても構わない。

【0087】

本実施の形態10によって作製された LD 素子を 50 雰囲気下、2 mW 光出力の高温加速試験にかけたところ室温時使用換算で 8000 時間以上の連続発振寿命を確認した。この連続発振寿命は、従来技術によって作製された LD 素子を同様の高温加速試験にかけて得られた寿命の約 20% 以上の向上であった。このような信頼性の高い LD 素子の実現できたのは、上記実施の形態による転位密度の低減および不純物混入防止の効果によるものである。

【0088】

(実施の形態11) 図7は、本実施の形態11によって作製された発光素子構造として LED 素子構造を示す。本実施の形態では、上記実施の形態で作製された窒化物半導体構造上に、MBE 装置を用いて LED 素子構造を作製した例について説明する。

【0089】

実施の形態1で作製された n 型 GaN 膜付き加工構造基板 300 を MBE 装置に搬送し、第1の n 型 GaN 層 301 を 2 μm 成長させた。次に、第2の n 型単一量子井戸 $\text{In}_{0.45}\text{Ga}_{0.55}\text{N}$ 層 302 を 4 nm 作製した。続いて、上記量子井戸活性層中の In が活性層直上の窒化物半導体層を成長中に蒸発してしまわないように p 型 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 蒸発防止層 303 を 100 nm 成長させた。最後に、第3の p 型 GaN コンタクト層 304 を 0.4 μm 成長させた。

【0090】

さらに、LED 素子化のため、正電極 306、負電極 305 をそれぞれ Mg ドープ第3の p 型 GaN コンタクト層 304、第1の n 型 GaN 層 301 上に形成した。本実施の形態11によって作製された LED 素子の電子-光子変換効率を測定したところ、実用上問題ないと見なすことのできる 5% 以上の素子がウエハ全体の約 88% 以上存在し、従来技術による LED 素子歩留まり率を約 13% アップすることができた。また、

同LED素子を1000時間後の信頼試験にかけたところ、試験開始時の97%以上の発光強度を得ることができた。これにより実用上の信頼性も確保された。このような信頼性の高いLED素子の実現できたのは、上記実施の形態による転位密度の低減および不純物混入防止の効果、クラック防止の効果によるものである。

【0091】

また、上記LED素子構造は、実施の形態1で作製したn型GaN膜が付いた加工構造基板300を使用した。実施の形態2～9の方法で作製されたGaN膜を使用してもよい。さらには、各実施の形態でのGaN膜の形成と本実施の形態でのLED素子構造の作製を一装置内部で一貫して作製しても構わない。あるいは、各実施の形態により得られたGaN膜から加工構造基板を除去したものをを用いても構わない。

10

【0092】

(実施の形態12) 図9(a)は、本実施の形態によって作製されたGaN膜405の構成図を示す。また、図9(a)中の破線(GaN層402とGaN膜405との境界線)は図9(c)の溝403の凹凸形状に対応している。本実施の形態12は、サファイア基板400上に結晶成長したGaNバッファ層401、GaN層402、GaN層402上に形成された溝403、上記溝403によって生じた空洞部404とGaN膜405から構成されている。

【0093】

次に、本実施の形態12の作製方法について説明する。成長用基板はサファイア基板のC面を使用した。まず、サファイア基板400をMOCVD装置炉内に搬送し、基板温度1100、 H_2 雰囲気中で10分間サーマルクリーニングを行った。続いて、III族原料としてトリメチルガリウム(TMG)とV族原料としてアンモニア(NH_3)を成長炉内に供給し、成長温度550でGaNバッファ層401を30nm成長した。上記成長は、GaNバッファ層以外にAlNバッファ層を使用しても良い。これらバッファ層の成長は窒化物半導体結晶成長における周知技術である。GaNバッファ層401を成長した後、基板温度を1050まで昇温させて、GaN層402を3 μm 成長させた。次に、GaN層402まで結晶成長した基板(以下、サファイア付きGaN基板と記す。)をMOCVD装置炉から取り出して、GaN層402面上にFIB法を用いてGaN結晶に対して<11-20>方向に溝403を形成した。溝403の側壁面はGaN結晶のへき開面である{1-100}面を含んでいる。このときに形成された溝403の上面図と断面図をそれぞれ図9(b)と図9(c)に示している。図9に示されるように、成長面側にGaN膜が設けられた基板となっている。

20

30

【0094】

溝403は、幅 $b = 5 \mu m$ 、深さ $h = 2 \mu m$ で、溝と溝の間隔(1周期) $L = 10 \mu m$ である。このときの溝の幅 b と溝の深さ h との関係は少なくとも $h = 0.2 \times b$ とする。

【0095】

上記手法によって形成された溝403を含むGaN層402上にGaN膜405をHVPE法を用いて200 μm 成長した。このGaN膜405の作成方法について下記に示す。

【0096】

まず、上記サファイア付きGaN膜基板を有機溶媒にて十分に洗浄し、HVPE装置内に搬送する。次にGaN膜405を結晶成長させるために、V族ガスとして NH_3 ガスとキャリア H_2 ガスをそれぞれ2000cc/min、10000cc/minで混合したガスを、III族ガスについてはHVPE装置内に予め約700の温度で保持されたGa金属上に、HClガス100cc/minを供給してGaとHClガスとの反応生成物であるIII族塩化物とキャリア H_2 ガス1000cc/minとを混合したガスを、それぞれHVPE成長炉に送り込み、GaN膜405を200 μm 成長させた。GaN膜405は溝403を完全に埋没させて平滑に成長した。光学顕微鏡でGaN膜405の表面観察を行ったところ、クラックは発生していなかった。本実施の形態12で得られたGaN膜405の貫通転位密度は約 $10^6 \sim 10^7 \text{ cm}^{-2}$ であった。また、前記実施の形態

40

50

同様にSiO₂等のマスクパターンを使用していないため、不純物の混入を防ぐことができた。

【0097】

溝403の断面形状は矩形であったが、GaN膜405が成長する段階で{1-101}ファセット面が自己形成された(図9(d))。これは{1-101}面がその他の面方位に比べてGaNの結晶成長速度の遅い面であるためである。本実施の形態12で溝403を<11-20>方向に形成したのは、窒化物半導体結晶(特にGaN結晶)に関して、{0001}面に比べて結晶成長速度の遅い{1-101}面を溝403の側壁面として出現させるためである。従って、窒化物半導体結晶の{1-101}面(あるいはファセット面として)が現れる方法であれば、上記溝の<11-20>方向に限るものではない。

10

【0098】

GaN膜405が溝403を埋没させていくプロセスについて観察した結果以下のことがわかった。GaN層402上に形成された溝403は、GaN膜405の成長とともに溝の深さが深くなった。これは、{0001}面での成長が{1-101}面での結晶成長よりも早いために溝が埋まらずに成長軸方向に成長が促進されたため、あたかも溝の深さが深くなったように見えるためである(図9(d))。つまり、{1-101}面が他の面よりもGaNの結晶成長速度が遅いため(表面拡散長距離が長い)、{1-101}面に飛来してきたGa原子がGaNとなって取り込まれる前に{0001}面にGa原子が吐き出されてしまい、{0001}面上でN原子と結合してGaNが成長するものと考えられる。

20

【0099】

GaN膜405の結晶成長が進むにつれて{0001}面の成長面積が減少し、最終的には{1-101}ファセット面で囲まれた三角形の凹凸形状を有する溝が形成される。このときの構成を図9(d)の実線で示す。図9(a)中の破線は図9(c)の溝403に対応している。さらにGaNの結晶成長が進むと吐き出し先となる{0001}面がないために({1-101}ファセット面しかないために)、今度は{1-101}ファセット面が結晶成長し始める。これは、{0001}面の成長が成長軸方向の成長であるのに対して、{1-101}ファセット面の成長は擬似的にラテラル方向(成長軸に対して横方向)への成長である。この{1-101}ファセット面の成長が始まることによって溝部403が埋まり始める。しかしながら、{1-101}ファセット面で溝部が覆われるまで成長軸方向に成長が進んでいたため、溝の深さが溝403を形成したときの深さよりも深くなっていること(原料ガスが入り込みにくくなっている)と、溝部の両隣りからラテラル成長によって結晶成長してきたGaNは溝の中央で会合するが、若干の結晶配向関係の違いにより完全に結合せずに隙間が生じる。この時の構成を図9(e)に示す。図9(e)中の破線及び点線は、それぞれ図9(c)と図9(d)の構成図に対応している。以上の要因が空洞部404を形成するものとなる。

30

【0100】

このようにして形成された空洞部404によって、前記実施例と同様に歪みの緩和が生じるものと考えられる。貫通転位密度の低減に関しては上記空洞部以外に、ラテラル成長によって空洞部404が埋まる際に{1-101}ファセット面を境界面として貫通転位が成長軸方向から横軸方向に折れ曲がるためにGaN膜405最表面に到達する貫通転位密度が低減するものと考えられる。

40

【0101】

窒化物半導体膜上に形成された溝部の深さhが溝部の幅bに対してh > bであるときは、溝部が十分に深く原料ガスが溝部の底部まで到達しないために、溝部が埋没することなく空洞部が形成される。従って、十分に溝の深さが深い場合は本実施の形態12ではなく、例えば実施の形態2または3と同様に空洞部が形成される。

【0102】

(実施の形態13) 本実施の形態13は、実施の形態12の溝方向を窒化物半導体結晶

50

の $\langle 1 - 100 \rangle$ 方向に変更した以外は実施の形態 12 と同様である。

【0103】

従って、実施の形態 12 と同様に、図 9 (a) ~ (c) を用いて、本実施の形態を説明する。

【0104】

図 9 (a) は、サファイア基板 400、GaN バッファ層 401、GaN 層 402、GaN 層 402 上に形成された溝 403、前記溝 403 が形成された GaN 層 402 上に GaN 膜 405 を積層させたとき、GaN 膜 405 によって埋没されずに残った空洞部 404 と、GaN 膜 405 から構成されている。ただし、図 9 (a) 中の破線は、溝 403 の形状を示すために便宜上記載したものであり、GaN 膜 405 を積層することによって、該破線で示す形状は消失する。

10

【0105】

次に、本実施の形態の GaN 膜 405 の製造方法について説明する。成長用基板はサファイア基板の C 面を使用した。まず、サファイア基板 400 を MOCVD 装置炉に搬送し、基板温度 1100、 H_2 雰囲気中で 10 分間サーマルクリーニングを行った。続いて、III 族原料としてトリメチルガリウム (TMG) と V 族原料としてアンモニア (NH_3) を成長炉内に供給し、成長温度 550 で GaN バッファ層 401 を 30 nm 成長した。上記成長は、GaN バッファ層以外に AlN バッファ層を使用しても良い。これらバッファ層の成長は窒化物半導体結晶成長における周知技術である。GaN バッファ層 401 を成長した後、基板温度を 1050 まで昇温させて、GaN 層 402 を 2 μm 成長させた。次に、GaN 層 402 まで結晶成長した基板 (以下、サファイア付き GaN 基板と記す。) を MOCVD 装置炉から取り出して、GaN 層 402 面上に反応性イオンエッチング法を用いて GaN 結晶に対して $\langle 1 - 100 \rangle$ 方向に溝 403 を形成した。溝 403 の側壁面は GaN 結晶の $\{11 - 20\}$ 面を含んでいる。このときに形成された溝 403 の上面図と断面図をそれぞれ図 9 (b) と図 9 (c) に示している。図 9 に示されるように、成長面側に GaN 膜が設けられた基板となっている。

20

【0106】

溝 403 は、幅 $b = 3 \mu m$ 、深さ $h = 1 \mu m$ で、溝と溝の間隔 (1 周期) $L = 7 \mu m$ である。このときの溝の幅 b と溝の深さ h との関係は、 $h = 0.2 \times b$ を満たしている。

【0107】

上記手法によって形成された溝 403 を含む GaN 層 402 上に、実施の形態 12 と同様に、HVPE 法を用いて GaN 膜 405 を 80 μm 成長した。GaN 膜 405 は溝 403 を埋没させて平滑に成長した。光学顕微鏡で GaN 膜 405 の表面観察を行ったところ、クラックは発生していなかった。本実施の形態 13 で得られた GaN 膜 405 の貫通転位密度は約 $10^6 \sim 10^7 \text{ cm}^{-2}$ であった。また、前記実施の形態同様に SiO_2 等のマスクパターンを使用していないため、不純物の混入を防ぐことができた。

30

【0108】

溝 403 の断面形状は矩形であったが、GaN 膜 405 が成長する段階で $\{11 - 2i\}$ ファセット面が自己形成された。ここで、 i は、0 \sim 3 である。 $\{11 - 2i\}$ ファセット面が複数種存在するのは、成長条件によって、自己形成ファセット面が変化するからである。本発明者らによる知見によれば、V 族原料と III 族原料の分圧比に依存し、V 族原料 / III 族原料が比較的高いと $\{11 - 20\}$ ファセット面が形成されやすく、逆に低いと、 $\{11 - 22\}$ 面や $\{11 - 23\}$ 面に類似したファセット面が現れる。

40

【0109】

このような、自己形成ファセット面が出現するのは、 $\{11 - 2i\}$ 面が $\{0001\}$ 面に比べて GaN の結晶成長速度が遅いためである。特に、 $\{11 - 20\}$ ファセット面は、成長面 $\{0001\}$ に対して垂直であり、GaN の結晶成長速度も遅い。

【0110】

本実施の形態 13 で溝 403 を $\langle 1 - 100 \rangle$ 方向に形成したのは、窒化物半導体結晶 (特に GaN 結晶) に関して、 $\{0001\}$ 面に比べて結晶成長速度の遅い $\{11 - 2i\}$

50

面(0 i 3)を溝403の側壁面として出現させるためである。従って、窒化物半導体結晶の{11-2i}面(あるいはファセット面として)が現れる方法であれば、上記溝の<1-100>方向に限るものではない。GaN膜405が溝403を被覆していくプロセスについて観察した結果以下のことがわかった。

【0111】

GaN層402上に形成された溝403は、GaN膜405の成長とともに溝の深さが深くなった。これは、{0001}面での成長が{11-2i}面での結晶成長よりも早いために溝が埋まらずに成長軸方向に成長が促進されたため、あたかも溝の深さが深くなったように見えるためである。つまり、{11-2i}面が{0001}面よりもGaNの結晶成長速度が遅いため(表面拡散長距離が長い)、{11-2i}面に飛来してきたGa原子がGaNとなって取り込まれる前に{0001}面にGa原子が吐き出されてしまい、{0001}面上でN原子と結合してGaNが成長するものと考えられる。さらに詳細に調べたところ、本実施の形態で得られた上記溝の深さは、実施の形態12と比べて多少浅かった。これは、実施の形態12の{1-101}ファセット面と比べると、{11-2i}ファセット面(0 i 3)のGaN結晶成長速度が速いため(表面拡散長距離が短い)、溝が深くなる前に埋まっていく(空洞部404が小さくなる)ためだと考えられる。従って、溝403を<1-100>方向に形成した場合は、空洞部404を形成しにくい恐れがある。前記解決方法として、溝403を<1-100>方向に形成した場合に限り、 $h = 0.2 \times b$ または $h = b$ の関係を満たしていても、溝の底部をサファイア基板まで掘り下げなければ良い。つまり、少なくとも窒化物半導体が溝403の底部に接していることが好ましい。上記理由は定かではないが、このようにすることで、{11-2i}ファセット面に飛来したGa原子が溝の底部とGaN層402表面({0001}面)の両面に吐き出され、{11-2i}ファセット面の成長速度を抑えることができるのではないと思われる。前記溝の底部に吐き出されたGa原子は溝の底部に成長してしまうものの、GaN層402表面に比べて、溝部はガスが入りにくいため、結果的に溝403の深さは深くなるものと考えられる。一方、溝の底部がサファイアの場合、{11-2i}ファセット面から吐き出されたGa原子がサファイア上には付着しにくいことから再び{11-2i}ファセット面に戻りこむため、{11-2i}ファセット面の成長速度を抑えることができず、溝403の深さは前記に比べて非常に浅くなってしまい、空洞部404が殆ど形成されなかった。

【0112】

上述した溝403が形成されたGaN層402上の成長は、GaN膜405の結晶成長が進むにつれて{0001}面の成長面積が減少し、最終的には{11-2i}ファセット面で囲まれた三角形の凹凸形状を有する溝が形成される。ただし、{11-20}ファセット面の場合は、矩形形状を維持したまま成長する。

【0113】

上記ファセット形状のうち、溝の側壁面として{11-2i}ファセット面(0 < i 3)が出現した場合、上記三角形の後、さらにGaNの結晶成長が進むと、吐き出し先となる{0001}面がないために、今度は{11-2i}ファセット面が結晶成長し始める。これは、{0001}面の成長が成長軸方向の成長であるのに対して、{11-2i}ファセット面の成長は擬似的にラテラル方向(成長軸に対して横方向)への成長である。この{11-2i}ファセット面の成長が始まることによって溝部403が埋まり始める。しかしながら、{11-2i}ファセット面で溝部が覆われるまで成長軸方向に成長が進んでいたため、溝の深さが溝403を形成したときの深さよりも深くなっていること(原料ガスが入り込みにくくなっている)と、溝部の両隣りからラテラル成長によって結晶成長してきたGaNは溝の中央で会合するが、若干の結晶配向関係の違いにより完全に結合せずに隙間が生じる。以上の要因が空洞部404を形成するものとなる。

【0114】

一方、溝の側壁面として{11-20}ファセット面が出現した場合、矩形形状のまま結晶成長が進み、{0001}面の成長軸方向の成長と、{11-20}ファセット面の

ラテラル方向（成長軸に対して横方向）への成長が同じに起きる。この{11-20}ファセット面の成長によって溝部403が埋まり始める。しかしながら、{11-20}ファセット面で溝部が覆われるまで成長軸方向の成長が進んでいたため、溝の深さが溝403を形成したときの深さよりも深くなっていること（原料ガスが入り込みにくくなっている）と、溝部の両隣りからラテラル成長によって結晶成長してきたGaNは溝の中央で会合するが、若干の結晶配向関係の違いにより完全に結合せずに隙間が生じる。以上の要因が空洞部404を形成するものとなる。

【0115】

このようにして形成された空洞部404によって、前記実施例と同様に歪みの緩和が生じるものと考えられる。貫通転位密度の低減に関しては上記空洞部以外に、ラテラル成長によって空洞部404が埋まる際に{11-2i}ファセット面を境界面として貫通転位が成長軸方向から横軸方向に折れ曲がるためにGaN膜405最表面に到達する貫通転位密度が低減するものと考えられる。

10

【0116】

窒化物半導体膜上に形成された溝部の深さhが溝部の幅bに対してh > bであるときは、溝部が十分に深く原料ガスが溝部の底部まで到達しないために、溝部が埋没することなく空洞部が形成される。

【0117】

本実施の形態のように溝部の方向を<1-100>方向に形成した場合、実施の形態12で記述した<11-20>方向に形成したときと比べて、上記ラテラル成長速度は速く、GaN膜405の膜厚を厚く積まなくとも、平坦なGaN膜405を得ることができる。また、ラテラル成長速度が速いので溝部の幅を広くすることができ、貫通転位密度をより一層低減することができる。

20

【0118】

本実施の形態の利用方法として、例えば、サファイア基板400を研磨機で剥ぎ取り、GaN膜405を取りだして、GaN基板として使用することもできる。あるいは、本実施の形態で得られたGaN膜405上に、実施の形態10または実施の形態11の発光素子を作製することによって、発光特性の優れた素子を作製することができる。

【0119】

特に、光を発する活性層を有する発光素子構造は、前記溝部の上方に形成した方が良い。例えば、窒化物半導体レーザダイオードの場合、前記溝部の上方に、リッジストライプの方向と前記溝部の方向とが、平行に形成されていることが好ましい。さらに好ましくは、リッジストライプの形成位置が、前記溝部の中央線から少なくとも1μm離れた位置の上方部に、前記溝部の方向に沿って形成することである。上記溝部の中央から1μm離れたのは、溝部の中央部は、ラテラル成長の結果、GaN膜が会合する部分であって、多少貫通転位密度が高く、割れやすいためである。リッジストライプの方向は、レーザダイオードのミラー端面の形成を考慮すると、<1-100>方向が好ましく、従って、溝の形成方向もまた、<1-100>方向であることが好ましい。上記のように溝部より十分上方の位置にリッジストライプを形成することによって、発振寿命が長く、発振閾値電流密度の低いレーザダイオードを製造することができる。もちろん、上記GaN基板上に発光素子を形成しても良いし、発光素子を形成後、サファイア基板400を剥ぎ取っても良い。

30

40

【0120】

本実施の形態で示した溝部の方向は、<1-100>方向から±5°以内であれば本実施の形態と同様の効果が得られる。また、実施の形態12の溝部の方向においても<11-20>方向から±5°以内であれば、実施の形態12と同様の効果が得られる。ただし、溝部の側壁面は、上記実施の形態で述べたファセット面と類似したファセット面が出現する。

【0121】

（実施の形態14）本実施の形態14は、実施の形態12または実施の形態13の、溝

50

部の底部を低温 GaN バッファ層まで掘り下げて形成した以外は、実施の形態 12 または実施の形態 13 と同様である。

【0122】

本実施の形態で作製された GaN 膜 505 の構造を図 10 (a) に示す。図 10 (a) は、サファイア基板 500、低温 GaN バッファ層 501、GaN 層 502、空洞部 504、GaN 膜 505、多結晶 GaN 506 から構成されている。次に、本実施の形態の、GaN 膜 505 の製造方法について説明する。まず、サファイア基板 500 を MOCVD 装置炉に搬送し、基板温度 1100、 H_2 雰囲気中で 10 分間サーマルクリーニングを行った。続いて、III 族原料としてトリメチルガリウム (TMG) と V 族原料としてアンモニア (NH_3) を成長炉内に供給し、成長温度 550 で低温 GaN バッファ層 501 を 30 nm 成長した。上記成長は、低温 GaN バッファ層以外に低温 AlN バッファ層または低温 $Al_xGa_{1-x}N$ バッファ層 ($0 < x < 1$) を使用してもよい。ここで、低温窒化物半導体バッファ層とは、600 以下の成長温度で窒化物半導体を成長した層のことを指すものとする。

10

【0123】

また、前記低温バッファ層の結晶性は、非晶質である。低温 GaN バッファ層 501 を成長した後、基板温度を 1050 まで昇温させて、GaN 層 502 を 4 μm 成長させた。このようにして作製した成長膜積層構造を図 10 (b) に示す。低温 GaN バッファ層 501 は非晶質であったが、GaN 層 502 を積層するために、成長温度を少なくとも 1000 以上に上げるため、非晶質から多結晶に変化する。従って、GaN 層 502 成長後の低温 GaN バッファ層は、その殆どが多結晶化している。

20

【0124】

次に、前記 GaN 層 502 まで結晶成長した基板を反応性イオンエッチング装置にセットし、GaN 層 502 面上に溝 503 を形成した。このときの溝の構成を図 10 (c) に示す。溝 503 は、幅 $b = 8 \mu m$ 、深さ $h = 3.99 \mu m$ で、溝と溝の間隔 (1 周期) $L = 20 \mu m$ である。このように溝 503 の底部が低温 GaN バッファ層 501 に到達するように形成した。溝 503 の方向は実施の形態 12 または実施の形態 13 のように、 $< 11-20 >$ 方向もしくは $< 1-100 >$ 方向に形成するのが好ましい。

【0125】

上記手法によって形成された溝 503 を含む GaN 層 502 上に、実施の形態 12 と同様に、HVPE 法を用いて GaN 膜 505 を 300 μm 成長させた。その結果、GaN 膜 505 は溝 503 を被覆して平滑に成長した。光学顕微鏡で GaN 膜 505 の表面観察を行ったところ、クラックは発生していなかった。本実施の形態 14 で得られた GaN 膜 505 の貫通転位密度は約 $5 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ であった。また、前記実施の形態同様に SiO_2 等のマスクパターンを使用していないため、不純物の混入を防ぐことができた。

30

【0126】

GaN 膜 505 が溝 503 を被覆していくプロセスについて観察した結果以下のことがわかった。GaN 層 502 上に形成された溝 503 は、GaN 膜 505 の成長とともに溝の深さが深くなった。これは、溝 503 の底部の位置が低温 GaN バッファ層まで達していて、該溝 503 の底部は多結晶の GaN から構成されているためである。つまり、前記溝 503 以外の GaN 層 502 の表面 (凸部) には成長軸方向に GaN 単結晶が成長するものの、前記溝部には、多結晶 GaN 506 しか成長されず、あらゆる面方位を有する方向で成長が進み、溝 503 が埋まりにくくなって、結果的に空洞部 504 が形成される。このようにして、溝部が埋まらずに成長軸方向に成長が促進されたため、あたかも溝の深さが深くなったように見える。

40

【0127】

以上のことから、空洞部 504 を形成する要因として以下のことが考えられる。溝 503 以外の GaN 層 502 の表面 (凸部) は、 $\{0001\}$ 面の成長軸方向の成長と、成長軸に対して横方向 (ラテラル成長) への、結晶成長が同じに起きていて、前記ラテラル成長によって溝部 503 が被覆し始める。しかしながら、溝 503 は、多結晶 GaN 506

50

のためになかなか埋まりにくく、その間、成長軸方向の成長が進んでいたため、溝の深さが溝503を形成したときの深さよりも深くなる（原料ガスが入り込みにくくなっている）。さらに、溝部は多結晶であることから、Ga_{0.5}N膜505とは連続的につながって成長することができず、溝503以外のGa_{0.5}N層502の表面（凸部）からのラテラル成長によってのみ溝部は被覆される。

【0128】

また、多結晶Ga_{0.5}N506は互いに異なる結晶方位から構成されているため、粒界状になっていて、微小な隙間が無数にできている。したがって、仮に、空洞部504が多結晶Ga_{0.5}N506で埋まったとしても、多結晶Ga_{0.5}N506の直上のGa_{0.5}N膜505は歪の緩和を受けることになる。

10

【0129】

このようにして形成された空洞部504もしくは多結晶Ga_{0.5}N506によって、前記実施例と同様に歪みの緩和が生じる。貫通転位密度の低減に関しては上記空洞部以外に、ラテラル成長によって空洞部504が埋まる際に、貫通転位が成長軸方向から横軸方向に折れ曲がるためにGa_{0.5}N膜505最表面に到達する貫通転位密度が低減するものと考えられる。

【0130】

本実施の形態の利用方法として、例えば、サファイア基板500を研磨機で剥ぎ取り、300 μmのGa_{0.5}N膜505を取りだして、Ga_{0.5}N基板として使用することができる。

【0131】

あるいは、本実施の形態で得られたGa_{0.5}N膜505上に、実施の形態10または実施の形態11の発光素子を作製することによって、発光特性の優れた素子を作製することができる。

20

【0132】

特に、光を発する活性層を有する素子は、前記溝部の上方に形成した方が良い。例えば、窒化物半導体レーザダイオードの場合、前記溝部の上方に、リッジストライプの方向と前記溝部の方向とが、平行に形成されていることが好ましい。さらに好ましくは、リッジストライプが、前記溝部の中央線から横方向に少なくとも1 μm離れた位置の上方に、前記溝部の方向に沿って形成することである。

【0133】

上記溝部の中央線から1 μm離れたのは、溝部の中央線の位置は、ラテラル成長の結果、Ga_{0.5}N膜が会合する部分であって、多少貫通転位密度が高く、割れやすいためであり、この領域上方にリッジストライプを形成することは好ましくない。リッジストライプの方向は、レーザダイオードのミラー端面の形成を考慮すると、<1-100>方向が好ましく、従って、溝の形成方向もまた、<1-100>方向であることが好ましい。上記位置にリッジストライプを形成することによって、発振寿命が長く、発振閾値電流密度の低いレーザダイオードを製造することができる。もちろん、上記Ga_{0.5}N基板上に発光素子を形成しても良いし、発光素子を形成後、サファイア基板500を剥ぎ取っても良い。

30

【0134】

本実施の形態では、溝部に多結晶Ga_{0.5}N506が成長することによって空洞部504が形成されるため、溝の幅には、基本的に依存しないが、より効率良く空洞部504を形成するためには、溝の幅bと溝の深さhとの関係は、 $h = 0.2 \times b$ 、もしくは $h = b$ であることが好ましい。

40

【0135】

（実施の形態15）本実施の形態15は、実施の形態12の溝方向を窒化物半導体結晶の[11-20]と[-2110]方向の2方向に形成した以外は実施の形態12と同じである。

【0136】

本実施の形態の、Ga_{0.5}N膜の形成方法は、実施の形態12と同様の方法で作製した。ただし、溝の方向は、窒化物半導体の[11-20]方向、[-2110]方向、[1-2

50

1 0] 方向の 3 種ある方向のうち、2 つを選択して溝形成した。

【 0 1 3 7 】

前記溝は、幅 $b = 10 \mu\text{m}$ 、深さ $h = 5 \mu\text{m}$ で、溝と溝の間隔 (1 周期) $L = 15 \mu\text{m}$ である。また、サファイア基板上に成長した GaN 層の厚みは $6 \mu\text{m}$ である。このことにより貫通転位密度が約 $7 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ に低減した。上記溝は、 $h = 0.2 \times b$ の関係を満たしているが、 $h = b$ であってもよい。また、実施の形態 14 のように、溝の底部の位置が、低温バッファ層まで到達するように溝形成しても良い。さらに、互いの溝における、溝幅、溝の深さ、溝と溝との間隔を同一にしくとも良い。

【 0 1 3 8 】

(実施の形態 16) 本実施の形態 16 は、実施の形態 12 の溝方向を窒化物半導体結晶の [1 1 - 2 0]、[- 2 1 1 0]、[1 - 2 1 0] 方向に形成した以外は実施の形態 12 と同じである。

【 0 1 3 9 】

本実施の形態の、GaN 膜の形成方法は、実施の形態 12 と同様の方法で作製した。ただし、溝の方向は、窒化物半導体の [1 1 - 2 0] 方向、[- 2 1 1 0] 方向、[1 - 2 1 0] 方向の 3 種ある方向のうち、全てを選択して溝形成した。

【 0 1 4 0 】

前記溝は、幅 $b = 5 \mu\text{m}$ 、深さ $h = 5.5 \mu\text{m}$ で、溝と溝の間隔 (1 周期) $L = 10 \mu\text{m}$ である。また、サファイア基板上に成長した GaN 層の厚みは $6 \mu\text{m}$ である。このことにより貫通転位密度が約 $2 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ に低減した。上記溝は、 $h = b$ の関係を満たしているが、 $b > h = 0.2 \times b$ であってもよい。また、実施の形態 14 のように、溝の底部の位置が、低温バッファ層まで到達するように溝形成しても良い。さらに、互いの溝における、溝幅、溝の深さ、溝と溝との間隔を同一にしくとも良い。

【 0 1 4 1 】

(実施の形態 17) 本実施の形態 17 は、実施の形態 13 の溝方向を窒化物半導体結晶の [1 - 1 0 0] と [1 0 - 1 0] 方向に形成した以外は実施の形態 13 と同じである。

【 0 1 4 2 】

本実施の形態の、GaN 膜の形成方法は、実施の形態 13 と同様の方法で作製した。ただし、溝の方向は、窒化物半導体の [1 - 1 0 0] 方向、[1 0 - 1 0] 方向、[0 1 - 1 0] 方向の 3 種ある方向のうち、2 つを選択して溝形成した。

【 0 1 4 3 】

前記溝は、幅 $b = 8 \mu\text{m}$ 、深さ $h = 0.99 \mu\text{m}$ で、溝と溝の間隔 (1 周期) $L = 16 \mu\text{m}$ である。また、サファイア基板上に成長した低温 GaN バッファ層と GaN 層の厚みは、それぞれ、 30 nm 、 $1 \mu\text{m}$ である。このことにより貫通転位密度が約 $7 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ に低減した。

【 0 1 4 4 】

上記溝は、溝底部の位置が低温バッファ層まで到達するように溝形成しているが、 $h = 0.2 \times b$ の関係、もしくは $h = b$ の関係を満たしていてもよい。さらに、互いの溝における、溝幅、溝の深さ、溝と溝との間隔を同一にしくとも良い。

【 0 1 4 5 】

(実施の形態 18) 本実施の形態 18 は、実施の形態 13 の溝方向を窒化物半導体結晶の [1 - 1 0 0]、[1 0 - 1 0]、[0 1 - 1 0] 方向に形成した以外は実施の形態 13 と同じである。

【 0 1 4 6 】

本実施の形態の、GaN 膜の形成方法は、実施の形態 13 と同様の方法で作製した。ただし、溝の方向は、窒化物半導体の [1 - 1 0 0] 方向、[1 0 - 1 0] 方向、[0 1 - 1 0] 方向の 3 種ある方向のうち、全てを選択して溝形成した。

【 0 1 4 7 】

前記溝は、幅 $b = 4 \mu\text{m}$ 、深さ $h = 0.98 \mu\text{m}$ で、溝と溝の間隔 (1 周期) $L = 10 \mu\text{m}$ である。また、サファイア基板上に成長した低温 GaN バッファ層と GaN 層の厚み

10

20

30

40

50

は、それぞれ、 30 nm 、 $1\text{ }\mu\text{ m}$ である。このことにより貫通転位密度が約 $2 \times 10^5\text{ cm}^{-2}$ に低減した。

【0148】

上記溝は、溝底部の位置が低温バッファ層まで到達するように溝形成されていて、かつ $h = 0.2 \times b$ の関係を満たしているが、 $h = b$ の関係を満たしていてもよい。さらに、互いの溝における、溝幅、溝の深さ、溝と溝との間隔を同一にしなくとも良い。

【0149】

(実施の形態19) 本実施の形態19は、溝方向を $\langle 11-20 \rangle$ 方向と $\langle 1-100 \rangle$ 方向に形成した以外は、実施の形態12または実施の形態13と同じである。

【0150】

本実施の形態の、GaN膜の形成方法は、実施の形態12または実施の形態13と同様の方法で作製した。ただし、溝の方向は、窒化物半導体の $\langle 11-20 \rangle$ 方向と $\langle 1-100 \rangle$ 方向である。前記溝は、幅 $b = 2\text{ }\mu\text{ m}$ 、深さ $h = 1\text{ }\mu\text{ m}$ で、溝と溝の間隔(1周期) $L = 6\text{ }\mu\text{ m}$ である。また、サファイア基板上に成長したGaN層の厚みは $2\text{ }\mu\text{ m}$ である。このことにより貫通転位密度が約 $5 \times 10^5\text{ cm}^{-2}$ に低減した。

【0151】

上記溝は、 $h = 0.2 \times b$ の関係を満たしているが、 $h = b$ であってもよい。また、実施の形態14のように、溝の底部の位置が、低温バッファ層まで到達するように溝形成しても良い。さらに、互いの溝における、溝幅、溝の深さ、溝と溝との間隔を同一にしなくとも良い。

【符号の説明】

【0152】

- 100 加工構造基板
- 110 溝部
- 111、112、115 溝
- 113 凹凸部
- 114 凸部
- 116 空洞部
- 120 GaNバッファ層
- 121 n型GaN膜
- 122 GaN膜
- 123 凸部上の窒化物半導体膜
- 124 溝上の窒化物半導体膜
- 125 窒化物半導体
- 200、300 窒化物半導体構造
- 201 Siドープn型GaN層
- 202 Siドープn型AlGaN層
- 203 Siドープn型GaN層
- 204 n型InGaN/InGaN多重量子井戸層
- 205 p型AlGaN蒸発防止層
- 206 Mgドープp型GaN層
- 207 Mgドープp型Al_{0.1}Ga_{0.9}N層
- 208 Mgドープp型GaN層
- 209、305 負電極
- 210、306 正電極
- 301 第1のn型GaN層
- 302 第2のn型単一量子井戸InGaN層
- 303 p型AlGaN蒸発防止層
- 304 第3のp型GaNコンタクト層
- 400 サファイア基板

10

20

30

40

50

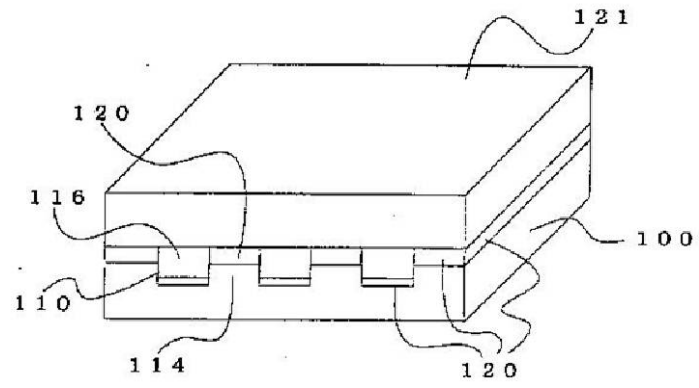
| | | |
|-------------|--------------------|----|
| 4 0 1 | G a N バ ッ フ ァ 層 | |
| 4 0 2 | G a N 層 | |
| 4 0 3 | 溝 | |
| 4 0 4 | 空洞部 | |
| 4 0 5 | G a N 膜 | |
| 5 0 0 | サファイア基板 | |
| 5 0 1 | 低温 G a N バ ッ フ ァ 層 | |
| 5 0 2 | G a N 層 | |
| 5 0 3、5 0 4 | 空洞部 | |
| 5 0 5 | G a N 膜 | 10 |
| 5 0 6 | 多結晶 G a N | |

20

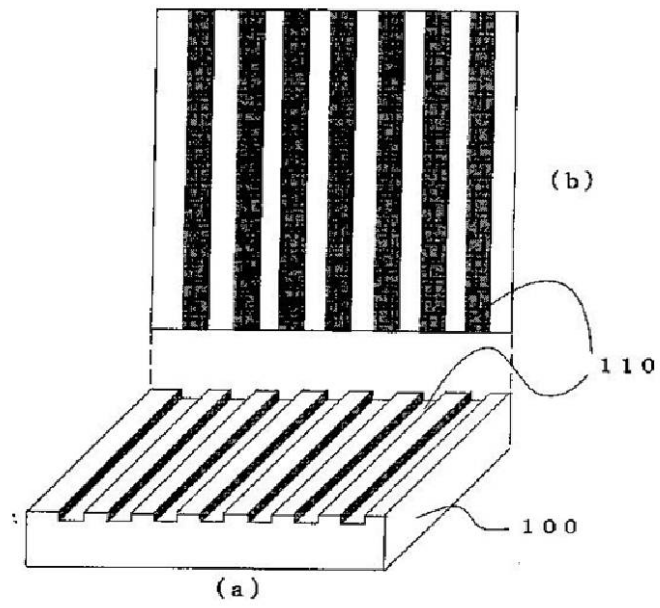
30

40

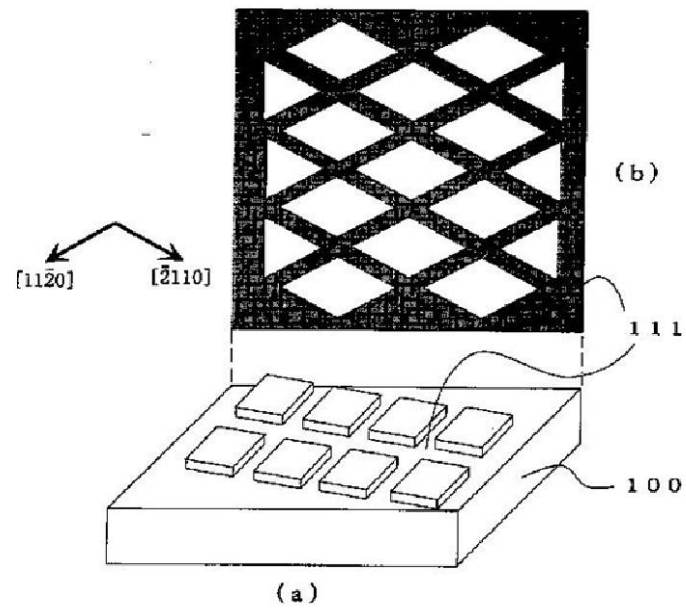
【図1】



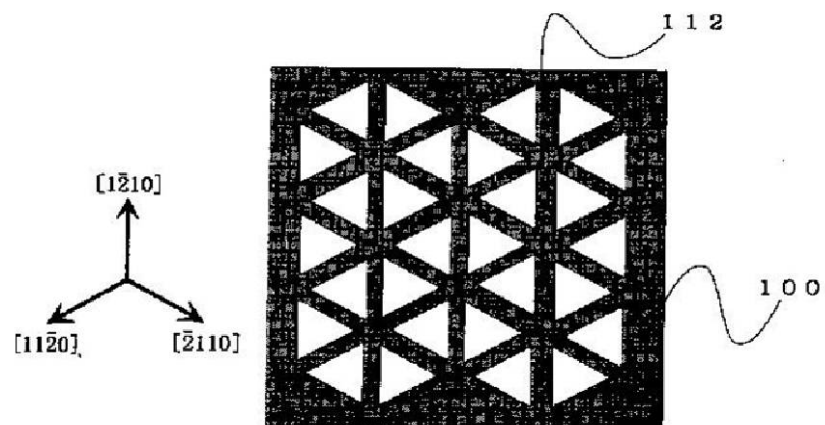
【図2】



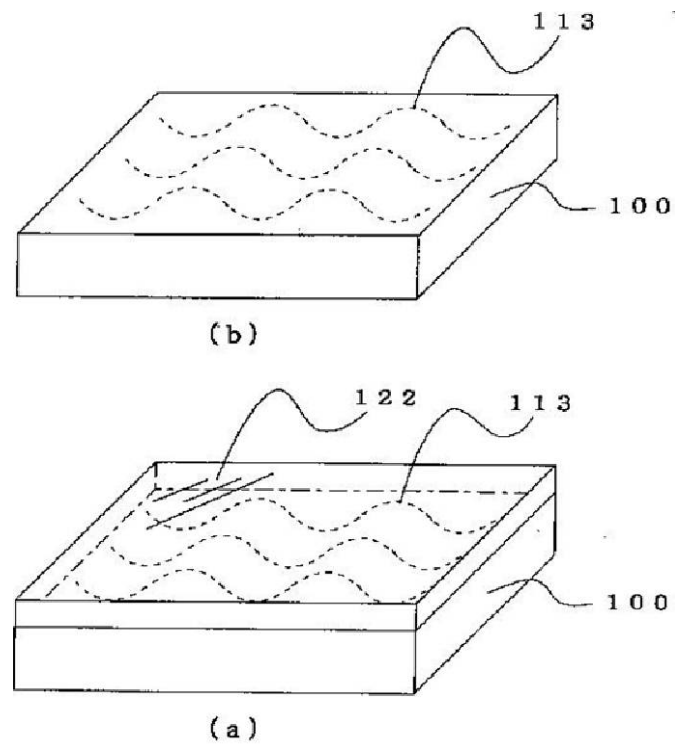
【図 3】



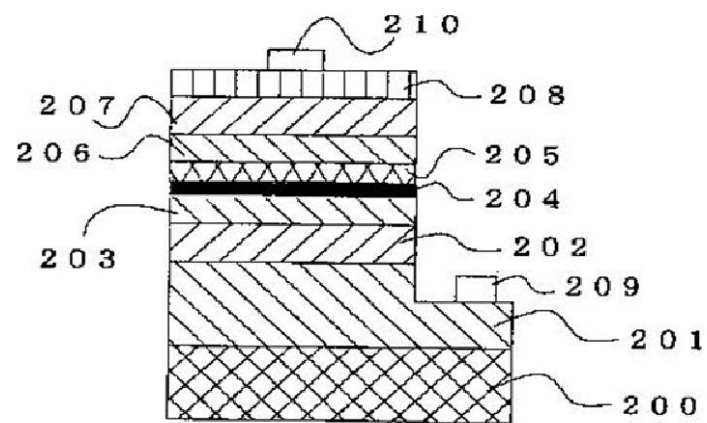
【図 4】



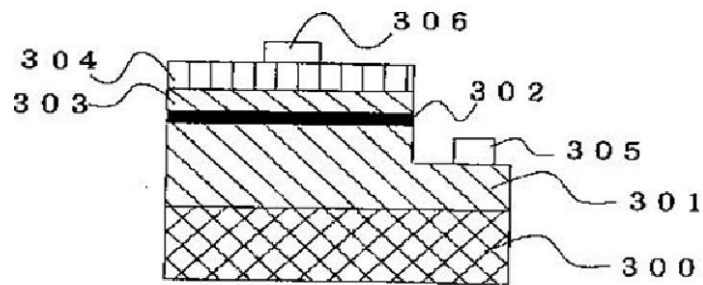
【図5】



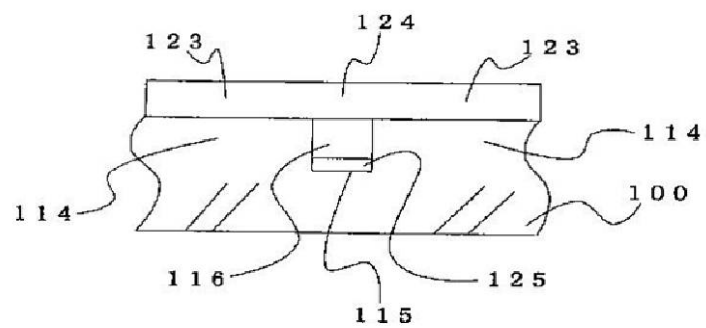
【図6】



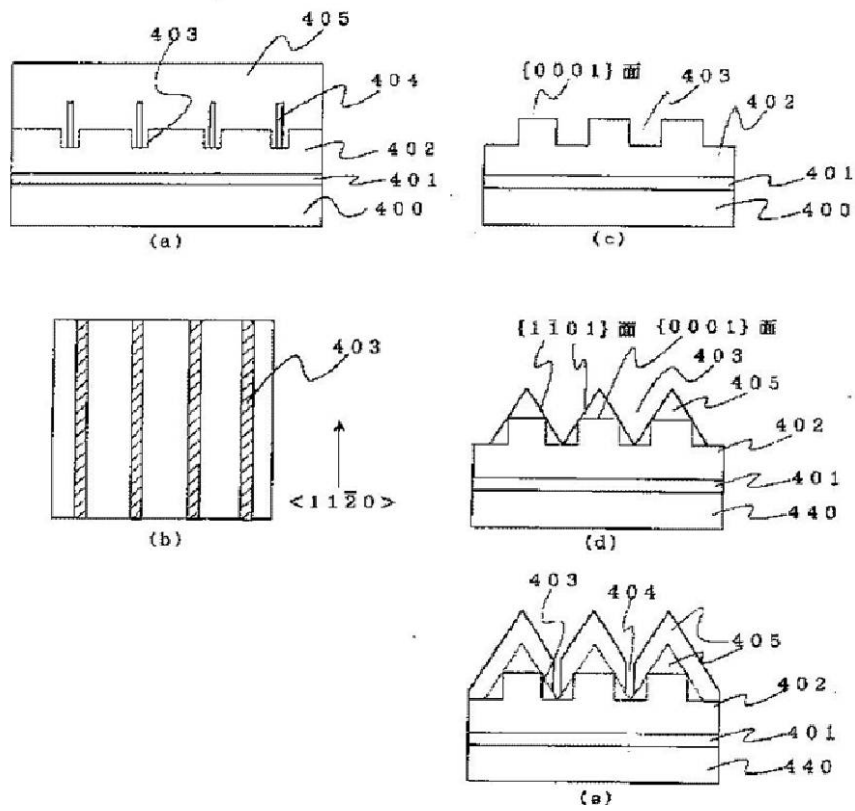
【図7】



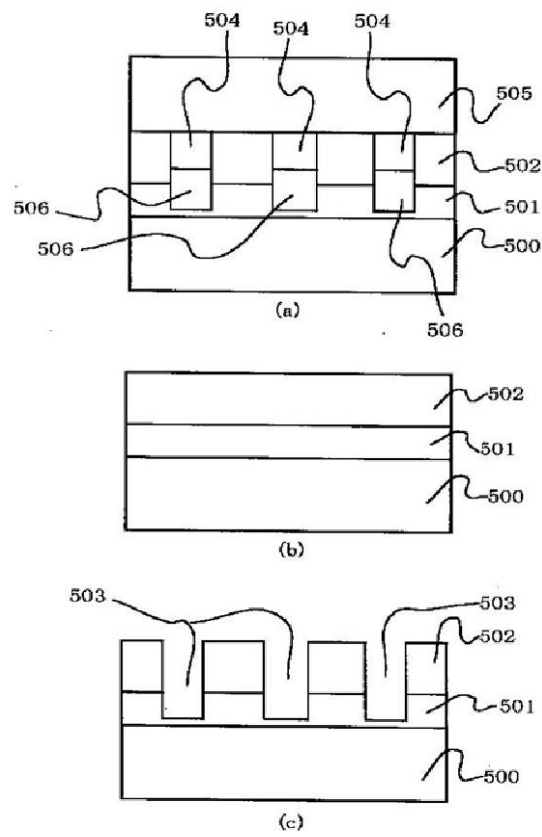
【図8】



【図 9】



【図 10】



フロントページの続き

- (56)参考文献 特開平 10 - 7 0 0 7 6 (J P , A)
特開平 8 - 8 3 8 0 2 (J P , A)
特開平 9 - 1 2 9 6 5 1 (J P , A)
特開平 10 - 1 4 5 0 0 2 (J P , A)
特開平 10 - 1 4 5 0 0 0 (J P , A)

- (58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)
H01L21/205