

【特許請求の範囲】

【請求項 1】

- ⅢⅢⅢ族窒化物半導体レーザ素子であって、
六方晶系ⅢⅢⅢ族窒化物半導体からなり半極性主面を有する支持基体、及び前記支持基体の前記半極性主面上に設けられた半導体領域を含むレーザ構造体と、
前記レーザ構造体の前記半導体領域上に設けられた電極とを備え、
前記半導体領域は、第1導電型の窒化ガリウム系半導体からなる第1のクラッド層と、第2導電型の窒化ガリウム系半導体からなる第2のクラッド層と、前記第1のクラッド層と前記第2のクラッド層との間に設けられた活性層とを含み、
前記第1のクラッド層、前記第2のクラッド層及び前記活性層は、前記半極性主面の法線軸に沿って配列されており、
前記活性層は窒化ガリウム系半導体層を含み、
前記支持基体の前記六方晶系ⅢⅢⅢ族窒化物半導体のc軸は、前記六方晶系ⅢⅢⅢ族窒化物半導体のm軸の方向に前記法線軸に対して有限な角度ALPHAで傾斜しており、
前記レーザ構造体は、前記六方晶系ⅢⅢⅢ族窒化物半導体のm軸及び前記法線軸によって規定されるm-n面に交差する第1及び第2の切断面と、前記第1又は第2の切断面と交差する方向に延びている第1の面と、前記第1の面の反対側にあり前記第1の面に沿って延びている第2の面と、前記第1の面と前記第1の切断面とが交差している第1のエッジの両端にそれぞれ設けられた第1及び第2の切欠部とを含み、
当該ⅢⅢⅢ族窒化物半導体レーザ素子のレーザ共振器は前記第1及び第2の切断面を含み、
前記第1の切断面は、前記第1のエッジから前記第2の面のエッジまで延在し、
前記第1の切欠部の側壁面に含まれており前記第1のエッジに接続している第1の部分は、前記第1の面に対し、45度以上85度以下の範囲内にある第1の傾斜角度の勾配で前記第2の面側に傾斜しており、
前記第2の切欠部の側壁面に含まれ前記第1のエッジに接続する第2の部分は、前記第1の面に対し、10度以上30度以下の範囲内にある第2の傾斜角度の勾配で前記第2の面側に傾斜しており、
前記第1の切断面は、前記第1のエッジと交差する方向に延びている第2のエッジを有し、
前記第2のエッジは、前記第1の面側にある端部を有し、
前記第1の切欠部の底壁面から、前記底壁面上において前記第1の面に沿って前記第1の面から延びる仮想面までの距離を、前記第1の面から前記第2の面までの距離で割った商は、0.05以上0.4以下の範囲内にあり、
前記第1のエッジの端部から、前記第1のエッジと交差する方向に延びている前記第1の切断面の中心線までの距離は、30μm以上100μm以下の範囲内にある、ことを特徴とするⅢⅢⅢ族窒化物半導体レーザ素子。
- 【請求項 2】
前記角度ALPHAは、45度以上80度以下又は100度以上135度以下の範囲内にある、ことを特徴とする請求項1に記載されたⅢⅢⅢ族窒化物半導体レーザ素子。
- 【請求項 3】
前記角度ALPHAは、63度以上80度以下又は100度以上117度以下の範囲内にある、ことを特徴とする請求項1又は請求項2に記載されたⅢⅢⅢ族窒化物半導体レーザ素子。
- 【請求項 4】
前記支持基体の厚さは400μm以下である、ことを特徴とする請求項1～請求項3のいずれか一項に記載されたⅢⅢⅢ族窒化物半導体レーザ素子。
- 【請求項 5】
前記支持基体の厚さは、50μm以上100μm以下の範囲内にある、ことを特徴とする請求項1～請求項4のいずれか一項に記載されたⅢⅢⅢ族窒化物半導体レーザ素子。

【請求項 6】

前記半極性主面は、{ 2 0 - 2 1 } 面、{ 1 0 - 1 1 } 面、{ 2 0 - 2 - 1 } 面、及び { 1 0 - 1 - 1 } 面のいずれかの面から - 4 度以上 + 4 度以下の範囲でオフした微傾斜面である、ことを特徴とする請求項 1 ~ 請求項 5 のいずれか一項に記載された I I I 族窒化物半導体レーザ素子。

【請求項 7】

前記支持基体の積層欠陥密度は $1 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ 以下である、ことを特徴とする請求項 1 ~ 請求項 6 のいずれか一項に記載された I I I 族窒化物半導体レーザ素子。

【請求項 8】

前記支持基体は、Ga N、Al Ga N、Al N、In Ga N 及び In Al Ga N のいずれかからなる、ことを特徴とする請求項 1 ~ 請求項 7 のいずれか一項に記載された I I I 族窒化物半導体レーザ素子。

10

【請求項 9】

前記第 1 及び第 2 の切断面の少なくともいずれか一方に設けられた誘電体多層膜を更に備える、ことを特徴とする請求項 1 ~ 請求項 8 のいずれか一項に記載された I I I 族窒化物半導体レーザ素子。

【請求項 10】

前記活性層は、360 nm 以上 600 nm 以下の範囲内にある波長の光を発生するように設けられた発光領域を含む、ことを特徴とする請求項 1 ~ 請求項 9 のいずれか一項に記載された I I I 族窒化物半導体レーザ素子。

20

【請求項 11】

前記活性層は、430 nm 以上 550 nm 以下の範囲内の光を発生するように設けられた量子井戸構造を含む、ことを特徴とする請求項 1 ~ 請求項 10 のいずれか一項に記載された I I I 族窒化物半導体レーザ素子。

【請求項 12】

I I I 族窒化物半導体レーザ素子を作製する方法であって、
六方晶系 I I I 族窒化物半導体からなり半極性主面を有する基板を準備する工程と、
前記半極性主面上に形成された半導体領域と前記基板とを含むレーザ構造体、アノード電極、及びカソード電極を有する基板生産物を形成する工程と、
前記六方晶系 I I I 族窒化物半導体の a 軸の方向に前記基板生産物の第 1 の面を部分的にスクライプすることによって、複数のスクライプ溝を前記第 1 の面に設ける工程と、
前記基板生産物の第 2 の面への押圧により前記基板生産物の分離を行って、別の基板生産物及びレーザバーを形成する工程と、
前記レーザバーの端面を加工した後に、前記六方晶系 I I I 族窒化物半導体の a 軸に交差する方向に延びており前記複数のスクライプ溝のそれぞれを通る切断面に沿って前記加工後のレーザバーを切断して、この加工後のレーザバーから複数の前記 I I I 族窒化物半導体レーザ素子の分離を行う工程と

30

を備え、

前記第 1 の面は前記第 2 の面の反対側の面であり、

前記半導体領域は前記第 1 の面と前記基板との間に位置し、

40

前記レーザバーは、前記第 1 の面から前記第 2 の面にまで延在し前記分離により形成された第 1 及び第 2 の端面を有し、

前記第 1 及び第 2 の端面は当該 I I I 族窒化物半導体レーザ素子のレーザ共振器を構成し、

前記アノード電極及びカソード電極は、前記レーザ構造体上に形成され、

前記半導体領域は、第 1 導電型の窒化ガリウム系半導体からなる第 1 のクラッド層と、第 2 導電型の窒化ガリウム系半導体からなる第 2 のクラッド層と、前記第 1 のクラッド層と前記第 2 のクラッド層との間に設けられた活性層とを含み、

前記第 1 のクラッド層、前記第 2 のクラッド層及び前記活性層は、前記半極性主面の法線軸に沿って配列されており、

50

前記活性層は窒化ガリウム系半導体層を含み、

前記基板の前記六方晶系ⅢⅢⅢ族窒化物半導体のc軸は、前記六方晶系ⅢⅢⅢ族窒化物半導体のm軸の方向に前記法線軸に対して有限な角度ALPHAで傾斜しており、

前記第1及び第2の端面は、前記六方晶系ⅢⅢⅢ族窒化物半導体のm軸及び前記法線軸によって規定されるm-n面に交差しており、

前記スクライブは、レーザスクライバを用いて行われ、

前記スクライブにより複数のスクライブ溝が前記第1の面に形成され、

前記スクライブ溝の側壁面に含まれており前記スクライブ溝の一の端部において前記第1の面に接続する第1の部分は、前記第1の面に対し45度以上85度以下の範囲内にある第1の傾斜角度の勾配で傾斜し、当該側壁面に含まれており当該スクライブ溝の他の端部において前記第1の面に接続する第2の部分は、前記第1の面に対し10度以上30度以下の範囲内にある第2の傾斜角度の勾配で傾斜しており、

10

前記スクライブ溝の前記一の端部から前記他の端部に向かう方向は、前記六方晶系ⅢⅢⅢ族窒化物半導体のc軸を前記半極性主面に投影した方向と交差する方向であり、

前記別の基板生産物及びレーザバーを形成する工程では、前記スクライブ溝の前記一の端部から前記他の端部に向かう方向に、前記レーザバーの分離が進行され、

前記スクライブ溝の底壁面から、前記底壁面上において前記第1の面に沿って前記第1の面から延びる仮想面までの距離を、前記第1の面から前記第2の面までの距離で割った商は、0.05以上0.4以下の範囲内にあり、

隣り合う並列する二つの前記切断面の間にある前記スクライブ溝の前記一の端部又は前記他の端部から、当該二つの切断面の間の中心面までの距離は、30μm以上100μm以下の範囲内にある、ことを特徴とする方法。

20

【請求項13】

前記角度ALPHAは、45度以上80度以下又は100度以上135度以下の範囲内にある、ことを特徴とする請求項12に記載された方法。

【請求項14】

前記角度ALPHAは、63度以上80度以下又は100度以上117度以下の範囲内にある、ことを特徴とする請求項12又は請求項13に記載された方法。

【請求項15】

前記基板生産物を形成する前記工程において、前記基板は、前記基板の厚さが400μm以下になるようにスライス又は研削といった加工が施され、

30

前記第2の面は前記加工により形成された加工面、又は前記加工面上に形成された電極を含む面である、ことを特徴とする請求項12～請求項14のいずれか一項に記載された方法。

【請求項16】

前記基板生産物を形成する前記工程において、前記基板は、前記基板の厚さが50μm以上100μm以下になるように研磨され、

前記第2の面は前記研磨により形成された研磨面、又は前記研磨面上に形成された電極を含む面である、ことを特徴とする請求項12～請求項15のいずれか一項に記載された方法。

40

【請求項17】

前記半極性主面は、{20-21}面、{10-11}面、{20-2-1}面、及び{10-1-1}面のいずれかである、ことを特徴とする請求項12～請求項16のいずれか一項に記載された方法。

【請求項18】

前記基板は、GaN、AlGaN、AlN、InGaN及びInAlGaNのいずれかからなる、ことを特徴とする請求項12～請求項17のいずれか一項に記載された方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

50

本発明は、Ⅲ族窒化物半導体レーザ素子、及びⅢ族窒化物半導体レーザ素子を作製する方法に関する。

【背景技術】

【0002】

特許文献1には、半導体基板上に設けられた半導体素子構造に、第1の補助溝を形成する工程と、半導体素子構造に第2の補助溝を形成する工程と、第1の補助溝及び第2の補助溝に沿う分割方向に、半導体基板及び前記半導体素子構造を分割する工程と、を備えた半導体素子の製造方法が開示されている。この製造方法では、分割方向において、第2の補助溝が分離して複数設けられ、複数の第2の補助溝のうち、少なくとも一組の隣接する第2の補助溝間に、少なくとも二つの第1の補助溝が互いに離間されて設けられる。そして、上記分割する工程において、二つの第1の補助溝の離間領域を分割する。非特許文献1には、低い積層欠陥密度であって半極性面(10-11)を有する六方晶系GaN基板とこの半極性面上に設けられたレーザ構造体とを有する半導体レーザ素子が開示されている。導波路は、六方晶系GaN基板のc軸のオフ方向に延在し、半導体レーザのミラーは反応性イオンエッチング(RIE)によって形成される。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】特開2009-117494号公報

【非特許文献】

20

【0004】

【非特許文献1】Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 46, (2007) L444

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

c軸がm軸の方向に傾斜した半極性面の支持基体を用いるⅢ族窒化物半導体レーザ素子では、c軸及びm軸によって規定される面に沿ってレーザ導波路を延在させるとき、しきい値電流を下げる可以考虑している。しかしながら、このレーザ導波路の向きでは、共振器ミラーとなる適当な結晶面が存在しないので、劈開を利用した先行技術では良好な共振器ミラーを形成することが困難となる。共振器ミラーの作製に反応性イオンエッチング(RIE)を用いる場合があるが、RIE法で形成された共振器ミラーは、レーザ導波路に対する垂直性又はドライエッチング面の平坦性の点で、改善が望まれている。発明者が知る限りにおいて、これまで、上記の半極性面上に形成された同一のⅢ族窒化物半導体レーザ素子において、c軸の傾斜方向(オフ方向)に延在するレーザ導波路とドライエッチングを用いずに形成された共振器ミラー用端面との両方が達成されていない。本発明は、このような事情を鑑みて為されたものである。本発明の目的は、六方晶系Ⅲ族窒化物のc軸からm軸の方向に傾斜した支持基体の半極性主面上において、低いしきい値電流を可能にするレーザ共振器を有するⅢ族窒化物半導体レーザ素子と、このⅢ族窒化物半導体レーザ素子を安定して作製する方法とを提供することである。

30

【課題を解決するための手段】

40

【0006】

本発明の一側面に係るⅢ族窒化物半導体レーザ素子は、六方晶系Ⅲ族窒化物半導体からなり半極性主面を有する支持基体、及び前記支持基体の前記半極性主面上に設けられた半導体領域を含むレーザ構造体と、前記レーザ構造体の前記半導体領域上に設けられた電極とを備える。前記半導体領域は、第1導電型の窒化ガリウム系半導体からなる第1のクラッド層と、第2導電型の窒化ガリウム系半導体からなる第2のクラッド層と、前記第1のクラッド層と前記第2のクラッド層との間に設けられた活性層とを含み、前記第1のクラッド層、前記第2のクラッド層及び前記活性層は、前記半極性主面の法線軸に沿って配列されており、前記活性層は窒化ガリウム系半導体層を含み、前記支持基体の前記六方晶系Ⅲ族窒化物半導体のc軸は、前記六方晶系Ⅲ族窒化物半導体のm軸の方

50

向に前記法線軸に対して有限な角度 ALPHA で傾斜しており、前記レーザ構造体は、前記六方晶系 III-III 族窒化物半導体の m 軸及び前記法線軸によって規定される $m-n$ 面に交差する第 1 及び第 2 の割断面と、前記第 1 又は第 2 の割断面と交差する方向に延びている第 1 の面と、前記第 1 の面の反対側にあり前記第 1 の面に沿って延びている第 2 の面と、前記第 1 の面と前記第 1 の割断面とが交差している第 1 のエッジの両端にそれぞれ設けられた第 1 及び第 2 の切欠部とを含み、当該 III-III 族窒化物半導体レーザ素子のレーザ共振器は前記第 1 及び第 2 の割断面を含み、前記第 1 の割断面は、前記第 1 のエッジから前記第 2 の面のエッジまで延在し、前記第 1 の切欠部の側壁面に含まれており前記第 1 のエッジに接続している第 1 の部分は、前記第 1 の面に対し、 45° 以上 85° 以下の範囲内にある第 1 の傾斜角度の勾配で前記第 2 の面側に傾斜しており、前記第 2 の切欠部の側壁面に含まれ前記第 1 のエッジに接続する第 2 の部分は、前記第 1 の面に対し、 10° 以上 30° 以下の範囲内にある第 2 の傾斜角度の勾配で前記第 2 の面側に傾斜しており、前記第 1 の割断面は、前記第 1 のエッジと交差する方向に延びている第 2 のエッジを有し、前記第 2 のエッジは、前記第 1 の面側にある端部を有し、前記第 1 の切欠部の底壁面から、前記底壁面上において前記第 1 の面に沿って前記第 1 の面から延びる仮想面までの距離を、前記第 1 の面から前記第 2 の面までの距離で割った商は、 0.05 以上 0.4 以下の範囲内にあり、前記第 1 のエッジの端部から、前記第 1 のエッジと交差する方向に延びている前記第 1 の割断面の中心線までの距離は、 $30\text{ }\mu\text{m}$ 以上 $100\text{ }\mu\text{m}$ 以下の範囲内にある、ことを特徴とする。

10

20

【0007】

この III-III 族窒化物半導体レーザ素子によれば、レーザ共振器となる第 1 及び第 2 の割断面が、六方晶系 III-III 族窒化物半導体の m 軸及び法線軸によって規定される $m-n$ 面に交差するので、 $m-n$ 面と半極性面との交差線の方に延在するレーザ導波路を設けることができる。これ故に、低しきい値電流を可能にするレーザ共振器を有する III-III 族窒化物半導体レーザ素子を提供できる。

【0008】

本発明に係る III-III 族窒化物半導体レーザ素子では、前記角度 ALPHA は、 45° 以上 80° 以下又は 100° 以上 135° 以下の範囲内にあることが好ましい。この III-III 族窒化物半導体レーザ素子では、 45° 未満及び 135° を越える角度では、押圧により形成される端面が m 面からなる可能性が高くなる。また、 80° を越え 100° 未満の角度では、所望の平坦性及び垂直性が得られないおそれがある。

30

【0009】

本発明に係る III-III 族窒化物半導体レーザ素子では、前記角度 ALPHA は、 63° 以上 80° 以下又は 100° 以上 117° 以下の範囲内にあることができる。この III-III 族窒化物半導体レーザ素子では、 63° 以上 80° 以下又は 100° 以上 117° 以下の範囲では、押圧により形成される端面が、基板主面に垂直に近い面が得られる可能性が高くなる。また、 80° を越え 100° 未満の角度では、所望の平坦性及び垂直性が得られないおそれがある。

【0010】

本発明に係る III-III 族窒化物半導体レーザ素子では、前記支持基体の厚さは $400\text{ }\mu\text{m}$ 以下であることができる。この III-III 族窒化物半導体レーザ素子では、レーザ共振器のための良質な割断面を得るために好適である。

40

【0011】

本発明に係る III-III 族窒化物半導体レーザ素子では、前記支持基体の厚さは、 $50\text{ }\mu\text{m}$ 以上 $100\text{ }\mu\text{m}$ 以下の範囲内にあることができる。厚さ $50\text{ }\mu\text{m}$ 以上であれば、ハンドリングが容易になり、生産歩留まりが向上する。 $100\text{ }\mu\text{m}$ 以下であれば、レーザ共振器のための良質な割断面を得るために更に好適である。

【0012】

本発明に係る III-III 族窒化物半導体レーザ素子では、前記半極性主面は、 $\{20-21\}$ 面、 $\{10-11\}$ 面、 $\{20-2-1\}$ 面、及び $\{10-1-1\}$ 面のいずれかの面

50

から - 4 度以上 + 4 度以下の範囲でオフした微傾斜面であることができる。この III 族窒化物半導体レーザ素子によれば、これら典型的な半極性面において、当該 III 族窒化物半導体レーザ素子のレーザ共振器を構成できる程度の十分な平坦性及び垂直性の第 1 及び第 2 の端面（割断面）を提供できる。

【0013】

本発明に係る III 族窒化物半導体レーザ素子では、前記支持基体の積層欠陥密度は $1 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ 以下であることができる。この III 族窒化物半導体レーザ素子によれば、積層欠陥密度が $1 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ 以下であるので、偶発的な事情により割断面の平坦性及び / 又は垂直性が乱れる可能性が低い。

【0014】

本発明に係る III 族窒化物半導体レーザ素子では、前記支持基体は、GaN、AlGaN、AlN、InGaN 及び InAlGaN のいずれかからなることができる。この III 族窒化物半導体レーザ素子によれば、これらの窒化ガリウム系半導体からなる基板を用いるとき、共振器として利用可能な第 1 及び第 2 の端面（割断面）を得ることができる。AlN 基板又は AlGaN 基板を用いるとき、偏光度を大きくでき、また低屈折率により光閉じ込めを強化できる。InGaN 基板を用いるとき、基板と発光層との格子不整合率を小さくでき、結晶品質を向上できる。

【0015】

本発明に係る III 族窒化物半導体レーザ素子では、前記第 1 及び第 2 の割断面の少なくともいずれか一方に設けられた誘電体多層膜を更に備えることができる。この III 族窒化物半導体レーザ素子においても、破断面にも端面コートを適用できる。端面コートにより反射率を調整できる。

【0016】

本発明に係る III 族窒化物半導体レーザ素子では、前記活性層は、360 nm 以上 600 nm 以下の範囲内にある波長の光を発生するように設けられた発光領域を含むことができる。この III 族窒化物半導体レーザ素子は、半極性面の利用により、LED モードの偏光を有効に利用した III 族窒化物半導体レーザ素子を得ることができ、低しきい値電流を得ることができる。

【0017】

本発明に係る III 族窒化物半導体レーザ素子では、前記活性層は、430 nm 以上 550 nm 以下の範囲内の光を発生するように設けられた量子井戸構造を含むことができる。この III 族窒化物半導体レーザ素子は、半極性面の利用により、ピエゾ電界の低減と発光層領域の結晶品質向上によって量子効率を向上させることが可能となり、波長 430 nm 以上 550 nm 以下の光の発生に好適である。

【0018】

本発明の別の側面は、III 族窒化物半導体レーザ素子を作成する方法に係る。この方法は、六方晶系 III 族窒化物半導体からなり半極性主面を有する基板を準備する工程と、前記半極性主面上に形成された半導体領域と前記基板とを含むレーザ構造体、アノード電極、及びカソード電極を有する基板生産物を形成する工程と、前記六方晶系 III 族窒化物半導体の a 軸の方向に前記基板生産物の第 1 の面を部分的にスクライブすることによって、複数のスクライブ溝を前記第 1 の面に設ける工程と、前記基板生産物の第 2 の面への押圧により前記基板生産物の分離を行って、別の基板生産物及びレーザバーを形成する工程と、前記レーザバーの端面を加工した後に、前記六方晶系 III 族窒化物半導体の a 軸に交差する方向に延びており前記複数のスクライブ溝のそれぞれを通る切断面に沿って前記加工後のレーザバーを切断して、この加工後のレーザバーから複数の前記 III 族窒化物半導体レーザ素子の分離を行う工程とを備える。前記第 1 の面は前記第 2 の面の反対側の面であり、前記半導体領域は前記第 1 の面と前記基板との間に位置し、前記レーザバーは、前記第 1 の面から前記第 2 の面にまで延在し前記分離により形成された第 1 及び第 2 の端面を有し、前記第 1 及び第 2 の端面は当該 III 族窒化物半導体レーザ素子のレーザ共振器を構成し、前記アノード電極及びカソード電極は、前記レーザ構造体上に形成さ

10

20

30

40

50

れ、前記半導体領域は、第1導電型の窒化ガリウム系半導体からなる第1のクラッド層と、第2導電型の窒化ガリウム系半導体からなる第2のクラッド層と、前記第1のクラッド層と前記第2のクラッド層との間に設けられた活性層とを含み、前記第1のクラッド層、前記第2のクラッド層及び前記活性層は、前記半極性主面の法線軸に沿って配列されており、前記活性層は窒化ガリウム系半導体層を含み、前記基板の前記六方晶系ⅢⅢⅢ族窒化物半導体のc軸は、前記六方晶系ⅢⅢⅢ族窒化物半導体のm軸の方向に前記法線軸に対して有限な角度 α で傾斜しており、前記第1及び第2の端面は、前記六方晶系ⅢⅢⅢ族窒化物半導体のm軸及び前記法線軸によって規定されるm-n面に交差しており、前記スクライプは、レーザスクライバを用いて行われ、前記スクライプにより複数のスクライプ溝が前記第1の面に形成され、前記スクライプ溝の側壁面に含まれており前記スクライプ溝の一の端部において前記第1の面に接続する第1の部分は、前記第1の面に対し45度以上85度以下の範囲内にある第1の傾斜角度の勾配で傾斜し、当該側壁面に含まれており当該スクライプ溝の他の端部において前記第1の面に接続する第2の部分は、前記第1の面に対し10度以上30度以下の範囲内にある第2の傾斜角度の勾配で傾斜しており、前記スクライプ溝の前記一の端部から前記他の端部に向かう方向は、前記六方晶系ⅢⅢⅢ族窒化物半導体のc軸を前記半極性主面に投影した方向と交差する方向であり、前記別の基板生産物及びレーザバーを形成する工程では、前記スクライプ溝の前記一の端部から前記他の端部に向かう方向に、前記レーザバーの分離が進行され、前記スクライプ溝の底壁面から、前記底壁面上において前記第1の面に沿って前記第1の面から延びる仮想面までの距離を、前記第1の面から前記第2の面までの距離で割った商は、0.05以上0.4以下の範囲内にあり、隣り合って並列する二つの前記切断面の間にある前記スクライプ溝の前記一の端部又は前記他の端部から、当該二つの切断面の間の中心面までの距離は、30 μ m以上100 μ m以下の範囲内にある、ことを特徴とする。

【0019】

この方法によれば、六方晶系ⅢⅢⅢ族窒化物半導体のa軸の方向に基板生産物の第1の面をスクライプした後に、基板生産物の第2の面への押圧により基板生産物の分離を行って、別の基板生産物及びレーザバーを形成する。これ故に、六方晶系ⅢⅢⅢ族窒化物半導体のm軸と法線軸とによって規定されるm-n面に交差するように、レーザバーに第1及び第2の端面が形成される。この端面形成によれば、第1及び第2の端面に当該ⅢⅢⅢ族窒化物半導体レーザ素子のレーザ共振器を構成できる程度の十分な平坦性、垂直性又はイオンダメージの無い共振ミラー面が提供される。また、この方法では、レーザ導波路は、六方晶系ⅢⅢⅢ族窒化物のc軸の傾斜の方向に延在しており、このレーザ導波路を提供できる共振器ミラー端面をドライエッチング面を用いずに形成している。また、レーザスクライバによって、スクライプ溝の形状や配置が好適に制御されるので、レーザ共振器を構成できる程度の十分な平坦性、垂直性又はイオンダメージの無い共振ミラー面を有する複数の同質の素子が容易に安定して（平坦性や垂直性のバラつきを低減できるように）形成可能となる。

【0020】

本発明に係る方法では、前記角度 α は、45度以上80度以下又は100度以上135度以下の範囲内にあることができる。45度未満及び135度を越える角度では、押圧により形成される端面がm面からなる可能性が高くなる。また、80度を越え100度未満の角度では、所望の平坦性及び垂直性が得られない。

【0021】

本発明に係る方法では、前記角度 α は、63度以上80度以下又は100度以上117度以下の範囲内にあることができる。63度未満及び117度を越える角度では、押圧により形成される端面の一部に、m面が出現する可能性がある。また、80度を越え100度未満の角度では、所望の平坦性及び垂直性が得られない。

【0022】

本発明に係る方法では、前記基板生産物を形成する前記工程において、前記基板は、前記基板の厚さが400 μ m以下になるようにスライス又は研削といった加工が施され、前

記第2の面は前記加工により形成された加工面、又は前記加工面に上に形成された電極を含む面であることができるし、前記基板生産物を形成する前記工程において、前記基板は、前記基板の厚さが $50\mu\text{m}$ 以上 $100\mu\text{m}$ 以下になるように研磨され、前記第2の面は前記研磨により形成された研磨面、又は前記研磨面に上に形成された電極を含む面であることができる。このような厚さの基板では、当該III族窒化物半導体レーザ素子のレーザ共振器を構成できる程度の十分な平坦性、垂直性又はイオンダメージの無い第1及び第2の端面を歩留まりよく形成できる。

【0023】

本発明に係る方法では、前記半極性主面は、 $\{20-21\}$ 面、 $\{10-11\}$ 面、 $\{20-2-1\}$ 面、及び $\{10-1-1\}$ 面のいずれかであることができる。これら典型的な半極性面においても、当該III族窒化物半導体レーザ素子のレーザ共振器を構成できる程度の十分な平坦性、垂直性又はイオンダメージの無い第1及び第2の端面を提供できる。

10

【0024】

本発明に係る方法では、前記基板は、 GaN 、 AlGaN 、 AlN 、 InGaN 及び InAlGaN のいずれかからなることができる。この方法によれば、これらの窒化ガリウム系半導体からなる基板を用いるとき、共振器として利用可能な第1及び第2の端面を得ることができる。

【0025】

本発明の上記の目的および他の目的、特徴、並びに利点は、添付図面を参照して進められる本発明の好適な実施の形態の以下の詳細な記述から、より容易に明らかになる。

20

【発明の効果】

【0026】

以上説明したように、本発明によれば、六方晶系III族窒化物の半極性主面上において、低しきい値電流を可能にするレーザ共振器を有するIII族窒化物半導体レーザ素子と、このIII族窒化物半導体レーザ素子を安定して作製する方法とを提供できる

【図面の簡単な説明】

【0027】

【図1】図1は、本実施の形態に係るIII族窒化物半導体レーザ素子の構造を概略的に示す図面である。

30

【図2】図2は、III族窒化物半導体レーザ素子における活性層におけるバンド構造を示す図面である。

【図3】図3は、III族窒化物半導体レーザ素子の活性層における発光の偏光を示す図面である。

【図4】図4は、III族窒化物半導体レーザ素子の端面と活性層のm面との関係を示す図面である。

【図5】図5は、本実施の形態に係るIII族窒化物半導体レーザ素子を作製する方法の主要な工程を示す工程フロー図である。

【図6】図6は、本実施の形態に係るIII族窒化物半導体レーザ素子を作製する方法の主要な工程を模式的に示す図面である。

40

【図7】図7は、結晶格子における $\{20-21\}$ 面を示すと共に、共振器端面の走査型電子顕微鏡像を示す図面である。

【図8】図8は、実施例1に示されたレーザダイオードの構造を示す図面である。

【図9】図9は、求めた偏光度としきい値電流密度の関係を示す図面である。

【図10】図10は、 GaN 基板のm軸方向へのc軸の傾斜角と発振歩留まりとの関係を示す図面である。

【図11】図11は、積層欠陥密度と発振歩留まりとの関係を示す図面である。

【図12】図12は、基板厚みと発振歩留まりとの関係を示す図面である。

【図13】図13は、 $(20-21)$ 面と他の面方位(指数)との成す角度を示す図面である。

50

【図 1 4】図 1 4 は、(2 0 - 2 1) 面と (- 1 0 1 - 6) 面及び (- 1 0 1 6) 面における原子配置を示す図面である。

【図 1 5】図 1 5 は、(2 0 - 2 1) 面と (- 1 0 1 - 7) 面及び (- 1 0 1 7) 面における原子配置を示す図面である。

【図 1 6】図 1 6 は、(2 0 - 2 1) 面と (- 1 0 1 - 8) 面及び (- 1 0 1 8) 面における原子配置を示す図面である。

【図 1 7】図 1 7 は、本実施の形態に係る I I I 族窒化物半導体レーザ素子の一の切欠部の概観を示す図面である。

【図 1 8】図 1 8 は、本実施の形態に係る I I I 族窒化物半導体レーザ素子の他の切欠部の概観を示す図面である。

【図 1 9】図 1 9 は、本実施の形態に係る I I I 族窒化物半導体レーザ素子の製造過程で生産される基板表面の構造を示す図面である。

【図 2 0】図 2 0 は、本実施の形態に係る I I I 族窒化物半導体レーザ素子の製造過程で生産されるレーザバーの端面側の構成を示す図面である。

【図 2 1】図 2 1 は、従来の製造方法による断面と本実施の形態に係る製造方法による断面とを比較するための図面である。

【図 2 2】図 2 2 は、本実施の形態に係る製造方法によって生産されたレーザバーの端面側の様子を示す図面である。

【図 2 3】図 2 3 は、切欠部の深さとレーザ素子の厚みとの比と、発振歩留まりとの関係を示す図面である。

【図 2 4】図 2 4 は、切欠部の端部の位置と、発振歩留まりとの関係を示す図面である。

【図 2 5】図 2 5 は、切欠部の一の端部の傾斜角度と、発振歩留まりとの関係を示す図面である。

【図 2 6】図 2 6 は、切欠部の他の端部の傾斜角度と、発振歩留まりとの関係を示す図面である。

【発明を実施するための形態】

【0028】

本発明の知見は、例示として示された添付図面を参照して以下の詳細な記述を考慮することによって容易に理解できる。引き続いて、添付図面を参照しながら、本発明の I I I 族窒化物半導体レーザ素子、及び I I I 族窒化物半導体レーザ素子を作製する方法に係る実施の形態を説明する。可能な場合には、同一の部分には同一の符号を付する。

【0029】

図 1 は、本実施の形態に係る I I I 族窒化物半導体レーザ素子の構造を概略的に示す図面である。I I I 族窒化物半導体レーザ素子 1 1 は、利得ガイド型の構造を有するけれども、本発明の実施の形態は、利得ガイド型の構造に限定されるものではない。I I I 族窒化物半導体レーザ素子 1 1 は、レーザ構造体 1 3 及び電極 1 5 を備える。レーザ構造体 1 3 は、支持基体 1 7、半導体領域 1 9 及び絶縁膜 3 1 を含む。支持基体 1 7 は、六方晶系 I I I 族窒化物半導体からなり、また半極性主面 1 7 a 及び裏面 1 7 b を有する。半導体領域 1 9 は、支持基体 1 7 の半極性主面 1 7 a 上に設けられている。電極 1 5 は、レーザ構造体 1 3 の半導体領域 1 9 上に設けられる。半導体領域 1 9 は、第 1 のクラッド層 2 1 と、第 2 のクラッド層 2 3 と、活性層 2 5 とを含む。第 1 のクラッド層 2 1 は、第 1 導電型の窒化ガリウム系半導体からなり、例えば n 型 A l G a N、n 型 I n A l G a N 等からなる。第 2 のクラッド層 2 3 は、第 2 導電型の窒化ガリウム系半導体からなり、例えば p 型 A l G a N、p 型 I n A l G a N 等からなる。活性層 2 5 は、第 1 のクラッド層 2 1 と第 2 のクラッド層 2 3 との間に設けられる。活性層 2 5 は窒化ガリウム系半導体層を含み、この窒化ガリウム系半導体層は例えば井戸層 2 5 a である。活性層 2 5 は窒化ガリウム系半導体からなる障壁層 2 5 b を含み、井戸層 2 5 a 及び障壁層 2 5 b は交互に配列されている。井戸層 2 5 a は、例えば I n G a N 等からなり、障壁層 2 5 b は例えば G a N、I n G a N 等からなる。活性層 2 5 は、波長 3 6 0 n m 以上 6 0 0 n m 以下の光を発生す

10

20

30

40

50

るように設けられた量子井戸構造を含むことができる。半極性面の利用により、波長 430 nm 以上 550 nm 以下の光の発生に好適である。第 1 のクラッド層 21、第 2 のクラッド層 23 及び活性層 25 は、半極性主面 17a の法線軸 NX に沿って配列されている。III 族窒化物半導体レーザ素子 11 では、レーザ構造体 13 は、六方晶系 III 族窒化物半導体の m 軸及び法線軸 NX によって規定される m - n 面に交差する第 1 の切断面 27 及び第 2 の切断面 29 を含む。

【0030】

図 1 を参照すると、直交座標系 S 及び結晶座標系 CR が描かれている。法線軸 NX は、直交座標系 S の Z 軸の方向に向く。半極性主面 17a は、直交座標系 S の X 軸及び Y 軸により規定される所定の平面に平行に延在する。また、図 1 には、代表的な c 面 Sc が描かれている。支持基体 17 の六方晶系 III 族窒化物半導体の c 軸は、六方晶系 III 族窒化物半導体の m 軸の方向に法線軸 NX に対して有限な角度 ALPHA で傾斜している。

10

【0031】

絶縁膜 31 はレーザ構造体 13 の半導体領域 19 の表面 19a を覆っており、半導体領域 19 は絶縁膜 31 と支持基体 17 との間に位置する。支持基体 17 は六方晶系 III 族窒化物半導体からなる。絶縁膜 31 は開口 31a を有し、開口 31a は半導体領域 19 の表面 19a と上記の m - n 面との交差線 LIX の方向に延在し、例えばストライプ形状を成す。電極 15 は、開口 31a を介して半導体領域 19 の表面 19a (例えば第 2 導電型のコンタクト層 33) に接触を成しており、上記の交差線 LIX の方向に延在する。レーザ構造体 13 は、更に、導波路 111 を含む。導波路 111 は、第 1 のクラッド層 21、第 2 のクラッド層 23 及び活性層 25 を含み、また上記の交差線 LIX の方向に電極 15 に沿って延在する。導波路 111 は、六方晶系 III 族窒化物半導体の c 軸を半極性主面 17a に投影した方向 (六方晶系 III 族窒化物半導体の a 軸と交差する方向) に沿って第 1 の切断面 27 から第 2 の切断面 29 まで延在する。

20

【0032】

III 族窒化物半導体レーザ素子 11 では、第 1 の切断面 27 及び第 2 の切断面 29 は、六方晶系 III 族窒化物半導体の m 軸及び法線軸 NX によって規定される m - n 面に交差する。III 族窒化物半導体レーザ素子 11 のレーザ共振器は第 1 及び第 2 の切断面 27、29 を含み、第 1 の切断面 27 及び第 2 の切断面 29 の一方から他方に、レーザ導波路が延在している。レーザ構造体 13 は、第 1 の切断面 27 又は第 2 の切断面 29 と交差する方向に延びている第 1 の面 13a と、第 1 の面 13a の反対側にあり第 1 の面 13a に沿って延びている第 2 の面 13b とを有する。第 1 の面 13a は絶縁膜 31 の表面であり、第 2 の面 13b は、支持基体 17 に含まれ電極 41 に接合している面である。第 1 及び第 2 の切断面 27、29 は、第 1 の面 13a のエッジ 13c から第 2 の面 13b のエッジ 13d まで延在する。第 1 及び第 2 の切断面 27、29 は、c 面、m 面又は a 面といったこれまでのへき開面とは異なる。

30

【0033】

この III 族窒化物半導体レーザ素子 11 によれば、レーザ共振器を構成する第 1 及び第 2 の切断面 27、29 が m - n 面に交差する。これ故に、m - n 面と半極性面 17a との交差線の方向に延在するレーザ導波路を設けることができる。これ故に、III 族窒化物半導体レーザ素子 11 は、低しきい値電流を可能にするレーザ共振器を有することになる。

40

【0034】

III 族窒化物半導体レーザ素子 11 は、n 側光ガイド層 35 及び p 側光ガイド層 37 を含む。n 側光ガイド層 35 は、第 1 の部分 35a 及び第 2 の部分 35b を含み、n 側光ガイド層 35 は例えば GaN、InGaIn 等からなる。p 側光ガイド層 37 は、第 1 の部分 37a 及び第 2 の部分 37b を含み、p 側光ガイド層 37 は例えば GaN、InGaIn 等からなる。キャリアブロック層 39 は、例えば第 1 の部分 37a と第 2 の部分 37b との間に設けられる。支持基体 17 の裏面 17b には別の電極 41 が設けられ、電極 41 は例えば支持基体 17 の裏面 17b を覆っている。

50

【 0 0 3 5 】

図 2 は、ⅢⅢⅢ族窒化物半導体レーザ素子における活性層におけるバンド構造を示す図面である。図 3 は、ⅢⅢⅢ族窒化物半導体レーザ素子 1 1 の活性層 2 5 における発光の偏光を示す図面である。図 4 は、c 軸及び m 軸によって規定される断面を模式的に示す図面である。図 2 (a) を参照すると、バンド構造 B A N D の点近傍では、伝導帯と価電子帯との間の可能な遷移は、3 つある。A バンド及び B バンドは比較的小さいエネルギー差である。伝導帯と A バンドとの遷移 E a による発光は a 軸方向に偏光しており、伝導帯と B バンドとの遷移 E b による発光は c 軸を主面に投影した方向に偏光している。レーザ発振に関して、遷移 E a のしきい値は遷移 E b のしきい値よりも小さい。

【 0 0 3 6 】

図 2 (b) を参照すると、ⅢⅢⅢ族窒化物半導体レーザ素子 1 1 における L E D モードにおける光のスペクトルが示されている。L E D モードにおける光は、六方晶系ⅢⅢⅢ族窒化物半導体の a 軸の方向の偏光成分 I 2 と、六方晶系ⅢⅢⅢ族窒化物半導体の c 軸を主面に投影した方向の偏光成分 I 1 を含み、偏光成分 I 1 は偏光成分 I 2 よりも大きい。偏光度は $(I_1 - I_2) / (I_1 + I_2)$ によって規定される。このⅢⅢⅢ族窒化物半導体レーザ素子 1 1 のレーザ共振器を用いて、L E D モードにおいて大きな発光強度のモードの光をレーザ発振させることができる。

【 0 0 3 7 】

図 3 に示されるように、第 1 及び第 2 の割断面 2 7、2 9 の少なくとも一方、又はそれぞれに設けられた誘電体多層膜 4 3 a、4 3 b を更に備えることができる。割断面 2 7、2 9 にも端面コートを適用できる。端面コートにより反射率を調整できる。

【 0 0 3 8 】

図 3 (b) に示されるように、活性層 2 5 からのレーザ光 L は六方晶系ⅢⅢⅢ族窒化物半導体の a 軸の方向に偏光している。このⅢⅢⅢ族窒化物半導体レーザ素子 1 1 において、低しきい値電流を実現できるバンド遷移は偏光性を有する。レーザ共振器のための第 1 及び第 2 の割断面 2 7、2 9 は、c 面、m 面又は a 面といったこれまでのへき開面とは異なる。しかしながら、第 1 及び第 2 の割断面 2 7、2 9 は共振器のためのミラーとしての平坦性、垂直性を有する。これ故に、第 1 及び第 2 の割断面 2 7、2 9 とこれらの割断面 2 7、2 9 間に延在するレーザ導波路とを用いて、図 3 (b) に示されるように、c 軸を主面に投影した方向に偏光する遷移 E b の発光よりも強い遷移 E a の発光を利用して低しきい値のレーザ発振が可能になる。

【 0 0 3 9 】

ⅢⅢⅢ族窒化物半導体レーザ素子 1 1 では、第 1 及び第 2 の割断面 2 7、2 9 の各々には、支持基体 1 7 の端面 1 7 c 及び半導体領域 1 9 の端面 1 9 c が現れており、端面 1 7 c 及び端面 1 9 c は誘電体多層膜 4 3 a で覆われている。支持基体 1 7 の端面 1 7 c 及び活性層 2 5 における端面 2 5 c の法線ベクトル N A と活性層 2 5 の m 軸ベクトル M A との成す角度 B E T A は、ⅢⅢⅢ族窒化物半導体の c 軸及び m 軸によって規定される第 1 平面 S 1 において規定される成分 $(B E T A)_1$ と、第 1 平面 S 1 (理解を容易にするために図示しないが「S 1」として参照する) 及び法線軸 N X に直交する第 2 平面 S 2 (理解を容易にするために図示しないが「S 2」として参照する) において規定される成分 $(B E T A)_2$ とによって規定される。成分 $(B E T A)_1$ は、ⅢⅢⅢ族窒化物半導体の c 軸及び m 軸によって規定される第 1 平面 S 1 において (A L P H A - 5) 度以上 (A L P H A + 5) 度以下の範囲であることが好ましい。この角度範囲は、図 4 において、代表的な m 面 S M と参照面 F A との成す角度として示されている。代表的な m 面 S M が、理解を容易にするために、図 4 において、レーザ構造体の内側から外側にわたって描かれている。参照面 F A は、活性層 2 5 の端面 2 5 c に沿って延在する。このⅢⅢⅢ族窒化物半導体レーザ素子 1 1 は、c 軸及び m 軸の一方から他方へ取られる角度 B E T A に関して、上記の垂直性を満たす端面を有する。また、成分 $(B E T A)_2$ は第 2 平面 S 2 において - 5 度以上 + 5 度以下の範囲であることが好ましい。ここで、 $B E T A^2 = (B E T A)_1^2 + (B E T A)_2^2$ である。このとき、ⅢⅢⅢ族窒化物半導体レーザ素子 1 1 の端面 2 7、2

10

20

30

40

50

9は、半極性面17aの法線軸NXに垂直な面において規定される角度に関して上記の垂直性を満たす。

【0040】

再び図1を参照すると、III族窒化物半導体レーザ素子11では、支持基体17の厚さDSUBは400μm以下であることが好ましい。このIII族窒化物半導体レーザ素子では、レーザ共振器のための良質な割断面を得るために好適である。III族窒化物半導体レーザ素子11では、支持基体17の厚さDSUBは50μm以上100μm以下であることが更に好ましい。このIII族窒化物半導体レーザ素子11では、レーザ共振器のための良質な割断面を得るために更に好適である。また、ハンドリングが容易になり、生産歩留まりを向上させることができる。

10

【0041】

III族窒化物半導体レーザ素子11では、法線軸NXと六方晶系III族窒化物半導体のc軸との成す角度ALPHAは45度以上であることが好ましく、また80度以下であることが好ましい。また、角度ALPHAは100度以上であることが好ましく、また135度以下であることが好ましい。45度未満及び135度を越える角度では、押圧により形成される端面がm面からなる可能性が高くなる。また、80度を越え100度未満の角度では、所望の平坦性及び垂直性が得られないおそれがある。

【0042】

III族窒化物半導体レーザ素子11では、更に好ましくは、法線軸NXと六方晶系III族窒化物半導体のc軸との成す角度ALPHAは63度以上であることが好ましく、また80度以下であることが好ましい。また、角度ALPHAは100度以上であることが好ましく、また117度以下であることが好ましい。63度未満及び117度を越える角度では、押圧により形成される端面の一部に、m面が出現する可能性がある。また、80度を越え100度未満の角度では、所望の平坦性及び垂直性が得られないおそれがある。

20

【0043】

半極性主面17aは、{20-21}面、{10-11}面、{20-2-1}面、及び{10-1-1}面のいずれかであることができる。更に、これらの面から-4度以上+4度以下の範囲で微傾斜した面も前記主面として好適である。これら典型的な半極性面17aにおいて、当該III族窒化物半導体レーザ素子11のレーザ共振器を構成できる程度の十分な平坦性及び垂直性の第1及び第2の割断面27、29を提供できる。また、これらの典型的な面方位にわたる角度の範囲において、十分な平坦性及び垂直性を示す端面が得られる。

30

【0044】

III族窒化物半導体レーザ素子11では、支持基体17の積層欠陥密度は $1 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ 以下であることができる。積層欠陥密度が $1 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ 以下であるので、偶発的な事情により割断面の平坦性及び/又は垂直性が乱れる可能性が低い。また、支持基体17は、GaN、AlN、AlGaN、InGaN及びInAlGaNのいずれかからなることができる。これらの窒化ガリウム系半導体からなる基板を用いるとき、共振器として利用可能な第1及び第2の割断面27、29を得ることができる。AlN又はAlGaN基板を用いるとき、偏光度を大きくでき、また低屈折率により光閉じ込めを強化できる。InGaN基板を用いるとき、基板と発光層との格子不整合率を小さくでき、結晶品質を向上できる。

40

【0045】

レーザ構造体13は、更に、切欠部113a、切欠部113b、切欠部113c及び切欠部113dを有する。切欠部113aは、第1の面13aと第1の割断面27とが交差しているエッジ13cの一端に設けられており、切欠部113bは、エッジ13cの他端に設けられている。なお、切欠部113cは切欠部113aと同様の構成をしており、切欠部113dは切欠部113bと同様の構成をしているので、以下、切欠部113c及び切欠部113dの説明は、説明簡略化のために省略されている。切欠部113a及び切欠

50

部 1 1 3 b 等の切欠部は、I I I 族窒化物半導体レーザ素子 1 1 の製造過程においてレーザスクライバ 1 0 a によって設けられたスクライブ溝の一部である。切欠部 1 1 3 a ~ 切欠部 1 1 3 d は、このように切欠部ということができるが、レーザ構造体 1 3 において第 1 の面 1 3 a の四隅（又はエッジ 1 3 c 等のエッジの両端）に設けられた窪み部ということもでき、また、レーザ構造体 1 3 において第 1 の面 1 3 a の四隅（又はエッジ 1 3 c 等のエッジの両端）に設けられた凹部ということもできる。図 1 7 には切欠部 1 1 3 a の構成が示されており、図 1 8 には切欠部 1 1 3 b の構成が示されている。

【0046】

まず、図 1 7 を参照して切欠部 1 1 3 a について説明する。切欠部 1 1 3 a の側壁面に含まれておりエッジ 1 3 c に接続する部分 1 1 5 a は、第 1 の面 1 3 a に対し、45 度以上 85 度以下の範囲内にある傾斜角度 $BETA_1$ の勾配で、第 2 の面 1 3 b 側に傾斜している。傾斜角 $BETA_1$ は、より具体的には、切欠部 1 1 3 a の側壁面の部分 1 1 5 a と第 1 の割断面 2 7 とが交差してなるエッジの接線 DF_1 （エッジ 1 3 c との交点における接線）と、エッジ 1 3 c との間の角度である。第 1 の割断面 2 7 は、エッジ 1 3 e を有しており、エッジ 1 3 e は、エッジ 1 3 c と交差する方向に延びている。エッジ 1 3 e は、第 1 の面 1 3 a 側にある端部 1 1 7 a を有する。切欠部 1 1 3 a の底壁面から、この底壁面上において第 1 の面 1 3 a に沿って第 1 の面 1 3 a から延びる仮想面 1 2 3 a までの距離（ $LENGTH_1$ ）を、第 1 の面 1 3 a から第 2 の面 1 3 b までの距離（ $THICKNESS_1$ ）で割った商（ $LENGTH_1 / THICKNESS_1$ ）は、0.05 以上 0.4 以下の範囲内にある。なお、仮想面 1 2 3 a から切欠部 1 1 3 a の底壁面までの距離のうち、例えば最も大きい値を距離 $LENGTH_1$ に用いることができる。また、第 1 の面 1 3 a から第 2 の面 1 3 b までの距離のうち、例えば最も大きい値を距離 $THICKNESS_1$ に用いることができる。距離 $LENGTH_1$ に替えて、エッジ 1 3 e の端部 1 1 7 a から仮想面 1 2 3 a までエッジ 1 3 e に沿って延びる仮想線分 1 2 1 a の長さを用いることができる。切欠部 1 1 3 a の底壁面と仮想面 1 2 3 a とを平行にできる。

【0047】

次に、図 1 8 を参照して切欠部 1 1 3 b について説明する。切欠部 1 1 3 b の側壁面に含まれておりエッジ 1 3 c に接続する部分 1 1 5 b は、第 1 の面 1 3 a に対し、10 度以上 30 度以下の範囲内にある傾斜角度 $BETA_2$ の勾配で、第 2 の面 1 3 b 側に傾斜している。傾斜角 $BETA_2$ は、より具体的には、切欠部 1 1 3 b の側壁面の部分 1 1 5 b と第 1 の割断面 2 7 とが交差してなるエッジの接線 DF_2 （エッジ 1 3 c との交点における接線）と、エッジ 1 3 c との間の角度である。傾斜角度 $BETA_1$ は傾斜角度 $BETA_2$ よりも大きい。第 1 の割断面 2 7 は、エッジ 1 3 f を有しており、エッジ 1 3 f は、エッジ 1 3 c と交差する方向に延びている。エッジ 1 3 f は、第 1 の面 1 3 a 側にある端部 1 1 7 b を有する。切欠部 1 1 3 b の底壁面から、この底壁面上において第 1 の面 1 3 a に沿って第 1 の面 1 3 a から延びる仮想面 1 2 3 b までの距離（ $LENGTH_2$ ）を、第 1 の面 1 3 a から第 2 の面 1 3 b までの距離（ $THICKNESS_1$ ）で割った商（ $LENGTH_2 / THICKNESS_1$ ）は、0.05 以上 0.4 以下の範囲内にある。なお、仮想面 1 2 3 b から切欠部 1 1 3 b の底壁面までの距離のうち、例えば最も大きい値を距離 $LENGTH_2$ に用いることができる。また、第 1 の面 1 3 a から第 2 の面 1 3 b までの距離のうち、例えば最も大きい値を距離 $THICKNESS_1$ に用いることができる。距離 $LENGTH_2$ に替えて、エッジ 1 3 f の端部 1 1 7 b から仮想面 1 2 3 b までエッジ 1 3 f に沿って延びる仮想線分 1 2 1 b の長さを用いることができる。切欠部 1 1 3 b の底壁面と仮想面 1 2 3 b とを平行にできる。

【0048】

また、端部 1 1 9 a から第 1 の割断面 2 7 の中心線 CE_1 （図 1 を参照）までの距離は 30 μm 以上 100 μm 以下の範囲内にあり、端部 1 1 9 b から第 1 の割断面 2 7 の中心線 CE_1 までの距離も 30 μm 以上 100 μm 以下の範囲内にある。中心線 CE_1 は、第 1 の割断面 2 7 においてエッジ 1 3 e とエッジ 1 3 f との間にあってエッジ 1 3 c と交差する方向に延びている。中心線 CE_1 は、エッジ 1 3 e 又はエッジ 1 3 f と平行に延びる

10

20

30

40

50

。中心線 C E 1 からエッジ 1 3 e までの距離と中心線 C E 1 からエッジ 1 3 f までの距離との差は微小であり、両距離は略同一といえることができる。

【 0 0 4 9 】

図 5 は、本実施の形態に係る I I I 族窒化物半導体レーザ素子を作製する方法の主要な工程を示す図面である。図 6 (a) を参照すると、基板 5 1 が示されている。工程 S 1 0 1 では、I I I 族窒化物半導体レーザ素子の作製のための基板 5 1 を準備する。基板 5 1 の六方晶系 I I I 族窒化物半導体の c 軸 (ベクトル V C) は、六方晶系 I I I 族窒化物半導体の m 軸方向 (ベクトル V M) に法線軸 N X に対して有限な角度 A L P H A で傾斜している。これ故に、基板 5 1 は、六方晶系 I I I 族窒化物半導体からなる半極性主面 5 1 a を有する。

10

【 0 0 5 0 】

工程 S 1 0 2 では、基板生産物 S P を形成する。図 6 (a) では、基板生産物 S P はほぼ円板形の部材として描かれているけれども、基板生産物 S P の形状はこれに限定されるものではない。基板生産物 S P を得るために、まず、工程 S 1 0 3 では、レーザ構造体 5 5 を形成する。レーザ構造体 5 5 は、半導体領域 5 3 及び絶縁膜 5 4 とを含んでおり、工程 S 1 0 3 では、半導体領域 5 3 は半極性主面 5 1 a 上に形成される。半導体領域 5 3 を形成するために、半極性主面 5 1 a 上に、第 1 導電型の窒化ガリウム系半導体領域 5 7、発光層 5 9、及び第 2 導電型の窒化ガリウム系半導体領域 6 1 を順に成長する。窒化ガリウム系半導体領域 5 7 は例えば n 型クラッド層を含み、窒化ガリウム系半導体領域 6 1 は例えば p 型クラッド層を含むことができる。発光層 5 9 は窒化ガリウム系半導体領域 5 7 と窒化ガリウム系半導体領域 6 1 との間に設けられ、また活性層、光ガイド層及び電子ブロック層等を含むことができる。窒化ガリウム系半導体領域 5 7、発光層 5 9、及び第 2 導電型の窒化ガリウム系半導体領域 6 1 は、半極性主面 5 1 a の法線軸 N X に沿って配列されている。これらの半導体層はエピタキシャル成長される。半導体領域 5 3 上は、絶縁膜 5 4 で覆われている。絶縁膜 5 4 は例えばシリコン酸化物からなる。絶縁膜 5 4 の開口 5 4 a を有する。開口 5 4 a は例えばストライプ形状を成す。

20

【 0 0 5 1 】

工程 S 1 0 4 では、レーザ構造体 5 5 上に、アノード電極 5 8 a 及びカソード電極 5 8 b が形成される。また、基板 5 1 の裏面に電極を形成する前に、結晶成長に用いた基板の裏面を研磨して、所望の厚さ D S U B の基板生産物 S P を形成する。電極の形成では、例えばアノード電極 5 8 a が半導体領域 5 3 上に形成されると共に、カソード電極 5 8 b が基板 5 1 の裏面 (研磨面) 5 1 b 上に形成される。アノード電極 5 8 a は X 軸方向に延在し、カソード電極 5 8 b は裏面 5 1 b の全面を覆っている。これらの工程により、基板生産物 S P が形成される。基板生産物 S P は、第 1 の面 6 3 a と、これに反対側に位置する第 2 の面 6 3 b とを含む。半導体領域 5 3 は第 1 の面 6 3 a と基板 5 1 との間に位置する。

30

【 0 0 5 2 】

工程 S 1 0 5 では、図 6 (b) に示されるように、基板生産物 S P の第 1 の面 6 3 a をスクライプする。このスクライプは、レーザスクライバ 1 0 a を用いて行われる。スクライプにより複数のスクライプ溝 6 5 a が形成される。図 6 (b) では、5 つのスクライプ溝が既に形成されており、レーザビーム L B を用いてスクライプ溝 6 5 b の形成が進められている。スクライプ溝 6 5 a の長さは、六方晶系 I I I 族窒化物半導体の a 軸及び法線軸 N X によって規定される a - n 面と第 1 の面 6 3 a との交差線 A I S の長さよりも短く、交差線 A I S の一部分にレーザビーム L B の照射が行われる。レーザビーム L B の照射により、特定の方向に延在し半導体領域に到達する溝が第 1 の面 6 3 a に形成される。スクライプ溝 6 5 a は例えば基板生産物 S P の一エッジに形成されることができる。

40

【 0 0 5 3 】

基板生産物 S P の第 1 の面 6 3 a の構成を具体的に説明する。基板生産物 S P の第 1 の面 6 3 a の構成の一例を図 1 9 に示す。図 1 9 には、第 1 の面 6 3 a に含まれる領域 E 1 内の構成が例示されている。図 1 9 に例示する領域 E 1 内の構成は、第 1 の面 6 3 a 全体

50

における構成であり、特定の領域に限定されるものではない。図 19 に示すように、第 1 の面 63a には、複数のアノード電極 58a が例えば並列に設けられており、隣接する二つのアノード電極 58a 間には複数のスクライプ溝 65a が例えば等間隔に設けられている。基板生産物 SP は複数の導波路（導波路 111 に対応）を含み、それぞれの導波路は半導体領域 53 内においてアノード電極 58a に沿って延びている。アノード電極 58a の延びている方向は、六方晶系 III 族窒化物半導体の c 軸を半極性主面 51a（又は第 1 の面 63a）に投影した方向であり、六方晶系 III 族窒化物半導体の a 軸と交差する方向である。複数のスクライプ溝 65a は、アノード電極 58a の延びている方向と交差する方向（六方晶系 III 族窒化物半導体の a 軸の延びている方向）に間隔 P1（例えば、300 μm 以上 500 μm 以下の範囲内の間隔であり、400 μm 程度が好ましい）に配置され、また、アノード電極 58a の延びている方向に沿って間隔 P2（例えば、400 μm 以上 800 μm 以下の範囲内の間隔であり、600 μm 程度が好ましい）で配置されている。このように、レーザスクライバ 10a によってスクライプ溝 65a が基板生産物 SP の第 1 の表面 63a 上に規則的に正確に形成されるので、基板生産物 SP から分離されるレーザバー LB1 等（更には III 族窒化物半導体レーザ素子 11）の形状のバラつきが低減される。

10

20

30

40

50

【0054】

図 6 に戻って説明する。工程 S106 では、図 6(c) に示されるように、基板生産物 SP の第 2 の面 63b への押圧により基板生産物 SP の分離を行って、基板生産物 SP1 及びレーザバー LB1 を形成する。押圧は、例えばブレード 69 といったブレイキング装置を用いて行われる。ブレード 69 は、一方向に延在するエッジ 69a と、エッジ 69a を規定する少なくとも 2 つのブレード面 69b、69c を含む。また、基板生産物 SP1 の押圧は支持装置 71 上において行われる。支持装置 71 は、支持面 71a と凹部 71b とを含み、凹部 71b は一方向に延在する。凹部 71b は、支持面 71a に形成されている。基板生産物 SP1 のスクライプ溝 65a の向き及び位置を支持装置 71 の凹部 71b の延在方向に合わせて、基板生産物 SP1 を支持装置 71 上において凹部 71b に位置決めする。凹部 71b の延在方向にブレイキング装置のエッジの向きを合わせて、第 2 の面 63b に交差する方向からブレイキング装置のエッジを基板生産物 SP1 に押し当てる。交差方向は好ましくは第 2 の面 63b にほぼ垂直方向である。これによって、基板生産物 SP の分離を行って、基板生産物 SP1 及びレーザバー LB1 を形成する。押し当てにより、第 1 及び第 2 の端面 67a、67b を有するレーザバー LB1 が形成され、これらの端面 67a、67b は少なくとも発光層の一部は半導体レーザの共振ミラーに適用可能な程度の垂直性及び平坦性を有する。

【0055】

形成されたレーザバー LB1 は、上記の分離により形成された端面 67a、67b を有し、端面 67a、67b の各々は、第 1 の面 63a から第 2 の面 63b にまで延在する。これ故に、端面 67a、67b は、当該 III 族窒化物半導体レーザ素子のレーザ共振器を構成し、XZ 面に交差する。この XZ 面は、六方晶系 III 族窒化物半導体の m 軸及び法線軸 NX によって規定される m-n 面に対応する。

【0056】

この方法によれば、六方晶系 III 族窒化物半導体の a 軸の方向に基板生産物 SP の第 1 の面 63a をスクライプした後に、基板生産物 SP の第 2 の面 63b への押圧により基板生産物 SP の分離を行って、新たな基板生産物 SP1 及びレーザバー LB1 を形成する。これ故に、m-n 面に交差するように、レーザバー LB1 に端面 67a、67b が形成される。この端面形成によれば、端面 67a、67b に当該 III 族窒化物半導体レーザ素子のレーザ共振器を構成できる程度の十分な平坦性及び垂直性が提供される。

【0057】

また、この方法では、形成されたレーザ導波路は、六方晶系 III 族窒化物の c 軸の傾斜の方向に延在している。ドライエッチング面を用いずに、このレーザ導波路を提供できる共振器ミラー端面を形成している。

【 0 0 5 8 】

この方法によれば、基板生産物 S P 1 の割断により、新たな基板生産物 S P 1 及びレーザバー L B 1 が形成される。工程 S 1 0 7 では、押圧による分離を繰り返して、多数のレーザバーを作製する。この割断は、レーザバー L B 1 の割断線 B R E A K に比べて短いスクライプ溝 6 5 a を用いて引き起こされる。

【 0 0 5 9 】

図 2 0 に、レーザバー L B 1 の端面 6 7 a の構成を例示する。切欠部 D E 1 は、レーザバー L B 1 等のレーザバーの形成時（以下、ブレイキングという場合がある）に（基板生産物 S P 等からレーザバー L B 1 等を分離する処理が工程 S 1 0 6 及び工程 S 1 0 7 で行われることによって）スクライプ溝 6 5 a から形成されたものであり、レーザバーの形成前にはスクライプ溝 6 5 a を構成していた部分である。従って、以下では、切欠部 D E 1 をスクライプ溝 6 5 a と読み替えることができる。なお、以下において、切欠部 D E 1 をスクライプ溝 6 5 a に置き換えた記載は、切欠部 D E 1 の記載と同様なので、説明簡略化のため、省略されている。

【 0 0 6 0 】

切欠部 D E 1 とアノード電極 5 8 a とが、アノード電極 5 8 a の延びている方向と交差する方向 D I R 1（六方晶系 I I I 族窒化物半導体の c 軸を前記半極性主面 5 1 a に投影した方向と交差する方向であり、六方晶系 I I I 族窒化物半導体の a 軸の延びている方向ということもできる）に交互に配置されている。レーザバー L B 1 等のレーザバーの分離は、工程 S 1 0 6 及び工程 S 1 0 7 に於て、方向 D I R 1 に沿って、図中符号 U に示す側から図中符号 D に示す側に向かって進行される。スクライプ溝 6 5 a の一の端部（図中符号 U に示す側の端部）から他の端部（図中符号 D に示す側の端部）に向かう方向 D I R 1 は、六方晶系 I I I 族窒化物半導体の c 軸を半極性主面 5 1 a に投影した方向と交差する方向である（六方晶系 I I I 族窒化物半導体の a 軸の延びている方向ということもできる）。

【 0 0 6 1 】

切欠部 D E 1 は、切欠部 D E 1 の側壁面に含まれており切欠部 D E 1 の一の端部（図中符号 U に示す側の端部）において第 1 の面 6 3 a に接続する第 1 の部分（端部 1 1 9 a に対応し、以下 U 側部分という）と、切欠部 D E 1 の側壁面に含まれており切欠部 D E 1 の他の端部（図中符号 D に示す側の端部）において第 1 の面 6 3 a に接続する（端部 1 1 9 b に対応し、以下 D 側部分という）とを有する。切欠部 D E 1 の側壁面の U 側部分は、第 1 の面 6 3 a に対し、4 5 度以上 8 5 度以下の範囲内にある傾斜角度 B E T A 3（傾斜角度 B E T A 1 に対応）の勾配で傾斜している。切欠部 D E 1 の側壁面の D 側部分は、第 1 の面 6 3 a に対し、1 0 度以上 3 0 度以下の範囲内にある傾斜角度 B E T A 4（傾斜角度 B E T A 2 に対応）の勾配で傾斜している。傾斜角度 B E T A 3 は傾斜角度 B E T A 4 よりも大きい。切欠部 D E 1 の底壁面から、この底壁面上において第 1 の面 6 3 a に沿って第 1 の面 6 3 a から延びる仮想面 1 2 3 c までの距離（L E N G T H 3）を、第 1 の面 6 3 a から第 2 の面 6 3 b までの距離（T H I C K N E S S 2）で割った商（L E N G T H 3 / T H I C K N E S S 2）は、0 . 0 5 以上 0 . 4 以下の範囲内にある。

【 0 0 6 2 】

レーザバー L B 1 等のレーザバーは、後述する工程 S 1 0 8 において加工された後に、後述する工程 S 1 0 9 において、六方晶系 I I I 族窒化物半導体の a 軸に交差する方向に延びており複数のスクライプ溝 6 5 a のそれぞれを通る切断面 L 1 に沿って切断され、複数の I I I 族窒化物半導体レーザ素子 1 1 に分離される。切断面 L 1 は、例えば間隔 P 1 で例えば等間隔に並列される。隣り合って並列する二つの切断面 L 1 の間にあるスクライプ溝 6 5 a の U 側部分から、当該二つの切断面 L 1 の間の中心面 C E 2 までの距離 L E 1 は、3 0 μ m 以上 1 0 0 μ m 以下の範囲内にある。隣り合って並列する二つの切断面 L 1 の間にあるスクライプ溝 6 5 a の D 側部分から、当該二つの切断面 L 1 の間の中心面 C E 2 までの距離 L E 2 も、3 0 μ m 以上 1 0 0 μ m 以下の範囲内にある。中心面 C E 2 は、隣接し並列する二つの切断面 L 1 の間の中心面であって、六方晶系 I I I 族窒化物半導体

の a 軸に交差する方向に延びている。中心線 C E 2 と端面 6 7 a との交線は、上記の中心線 C E 1 に対応している。切欠部 D E 1 が切断面 L 1 で切断されることによって、切欠部 1 1 3 a 及び切欠部 1 1 3 b が形成される。

【0063】

従って、レーザスクライバ 1 0 a によって、スクライプ溝 6 5 a の形状や配置が好適に制御されるので、レーザ共振器を構成できる程度の十分な平坦性、垂直性又はイオンダメージの無い共振ミラー面を有する複数の同質の素子が容易に安定して（平坦性や垂直性のバラつきを低減できるように）形成可能となる。なお、スクライプ溝 6 5 a の形状は、概略的にみれば、平坦な底面の船体の形状であるということもできる。図中符号 D に示す側の端部が船首に対応し、図中符号 U に示す側の端部が船尾に対応している、ということもできる。

10

【0064】

工程 S 1 0 8 では、レーザバー L B 1 の端面 6 7 a、6 7 b に誘電体多層膜を形成して、レーザバー生産物を形成する。工程 S 1 0 9 では、このレーザバー生産物を個々の半導体レーザのチップに分離する。より具体的には、工程 S 1 0 9 において、切断面 L 1 に沿ってレーザバー生産物を切断して、このレーザバー生産物から複数の I I I 族窒化物半導体レーザ素子 1 1 の分離を行う。

【0065】

本実施の形態に係る製造方法では、角度 A L P H A は、45 度以上 80 度以下及び 100 度以上 135 度以下の範囲であることができる。45 度未満及び 135 度を越える角度では、押圧により形成される端面が m 面からなる可能性が高くなる。また、80 度を越え 100 度未満の角度では、所望の平坦性及び垂直性が得られないおそれがある。更に好ましくは、角度 A L P H A は、63 度以上 80 度以下及び 100 度以上 117 度以下の範囲であることができる。45 度未満及び 135 度を越える角度では、押圧により形成される端面の一部に、m 面が出現する可能性がある。また、80 度を越え 100 度未満の角度では、所望の平坦性及び垂直性が得られないおそれがある。半極性主面 5 1 a は、{ 20 - 21 } 面、{ 10 - 11 } 面、{ 20 - 2 - 1 } 面、及び { 10 - 1 - 1 } 面のいずれかであることができる。更に、これらの面から - 4 度以上 + 4 度以下の範囲で微傾斜した面も前記主面として好適である。これら典型的な半極性面において、当該 I I I 族窒化物半導体レーザ素子のレーザ共振器を構成できる程度の十分な平坦性及び垂直性でレーザ共振器のための端面を提供できる。

20

30

【0066】

また、基板 5 1 は、Ga N、Al N、Al Ga N、In Ga N 及び In Al Ga N のいずれかからなることができる。これらの窒化ガリウム系半導体からなる基板を用いるとき、レーザ共振器として利用可能な端面を得ることができる。基板 5 1 は好ましくは Ga N からなる。

【0067】

基板生産物 S P を形成する工程 S 1 0 4 において、結晶成長に使用された半導体基板は、基板厚が 400 μ m 以下になるようにスライス又は研削といった加工が施され、第 2 の面 6 3 b が研磨により形成された加工面であることができる。この基板厚では、当該 I I I 族窒化物半導体レーザ素子のレーザ共振器を構成できる程度の十分な平坦性、垂直性又はイオンダメージの無い端面 6 7 a、6 7 b を歩留まりよく形成できる。第 2 の面 6 3 b が研磨により形成された研磨面であり、研磨されて基板厚が 100 μ m 以下であれば更に好ましい。また、基板生産物 S P を比較的容易に取り扱うためには、基板厚が 50 μ m 以上であることが好ましい。

40

【0068】

本実施の形態に係るレーザ端面の製造方法では、レーザバー L B 1 においても、図 3 を参照しながら説明された角度 B E T A が規定される。レーザバー L B 1 では、角度 B E T A の成分 (B E T A) 1 は、I I I 族窒化物半導体の c 軸及び m 軸によって規定される第 1 平面 (図 3 を参照した説明における第 1 平面 S 1 に対応する面) において (A L P H A

50

- 5) 度以上 ($ALPHA + 5$) 度以下の範囲であることが好ましい。レーザバー LB 1 の端面 67 a、67 b は、c 軸及び m 軸の一方から他方に取りられる角度 BETA の角度成分に関して上記の垂直性を満たす。また、角度 BETA の成分 (BETA) 2 は、第 2 平面 (図 3 に示された第 2 平面 S 2 に対応する面) において - 5 度以上 + 5 度以下の範囲であることが好ましい。このとき、レーザバー LB 1 の端面 67 a、67 b は、半極性面 51 a の法線軸 NX に垂直な面において規定される角度 BETA の角度成分に関して上記の垂直性を満たす。

【 0069 】

端面 67 a、67 b は、半極性面 51 a 上にエピタキシャルに成長された複数の窒化ガリウム系半導体層への押圧によるブレイクによって形成される。半極性面 51 a 上へのエピタキシャル膜であるが故に、端面 67 a、67 b は、これまで共振器ミラーとして用いられてきた c 面、m 面、又は a 面といった低面指数のへき開面ではない。しかしながら、半極性面 51 a 上へのエピタキシャル膜の積層のブレイクにおいて、端面 67 a、67 b は、共振器ミラーとして適用可能な平坦性及び垂直性を有する。

10

【 0070 】

(実施例 1)

以下の通り、半極性面 GaN 基板を準備し、切断面の垂直性を観察した。基板には、HVPE 法で厚く成長した (0001) GaN インゴットから m 軸方向に 75 度の角度で切り出した { 20 - 21 } 面 GaN 基板を用いた。GaN 基板の主面は鏡面仕上げであり、裏面は研削仕上げされた梨地状態であった。基板の厚さは 370 μ m であった。

20

【 0071 】

梨地状態の裏面側に、ダイヤモンドペンを用いて、c 軸を基板主面に投影した方向と垂直にスクライブ溝を形成した後、押圧して基板を切断した。得られた切断面の垂直性を観察するため、走査型電子顕微鏡を用いて a 面方向から基板を観察した。

【 0072 】

図 7 (a) は、切断面を a 面方向から観察した走査型電子顕微鏡像であり、右側の端面が切断面である。切断面は半極性主面に対して、平坦性及び垂直性を有することがわかる。

【 0073 】

(実施例 2)

実施例 1 では、半極性 { 20 - 21 } 面を有する GaN 基板において、c 軸を基板主面に投影した方向と垂直にスクライブ溝を設けて押圧して得た切断面は、基板主面に対して平坦性及び垂直性を有することがわかった。そこでこの切断面をレーザの共振器としての有用性を調べるため、以下の通り、図 8 に示されるレーザダイオードを有機金属気相成長法により成長した。原料にはトリメチルガリウム (TMGa)、トリメチルアルミニウム (TMAI)、トリメチルインジウム (TMI n)、アンモニア (NH3)、シラン (SiH4) を用いた。基板 71 を準備した。基板 71 には、HVPE 法で厚く成長した (0001) GaN インゴットから m 軸方向に 0 度から 90 度の範囲の角度でウェハスライス装置を用いて切り出し、m 軸方向への c 軸の傾斜角度 ALPHA が、0 度から 90 度の範囲の所望のオフ角を有する GaN 基板を作製した。例えば、75 度の角度で切り出したとき、{ 20 - 21 } 面 GaN 基板が得られ、図 7 (b) に示される六方晶系の結晶格子において参照符号 71 a によって示されている。

30

40

【 0074 】

成長前に、基板の積層欠陥密度を調べるため、カソードルミネッセンス法によって、基板を観察した。カソードルミネッセンスでは、電子線によって励起されたキャリアの発光過程を観察するが、積層欠陥が存在すると、その近傍ではキャリアが非発光再結合するので、暗線状に観察される。その暗線の単位長さあたりの密度 (線密度) を求め、積層欠陥密度と定義した。ここでは、積層欠陥密度を調べるために、非破壊測定のカソードルミネッセンス法を用いたが、破壊測定 of 透過型電子顕微鏡を用いてもよい。透過型電子顕微鏡では、a 軸方向から試料断面を観察したとき、基板から試料表面に向かって m 軸方向に伸

50

びる欠陥が、支持基体に含まれる積層欠陥であり、カソードルミネッセンス法の場合と同様に、積層欠陥の線密度を求めることができる。

【0075】

この基板71を反応炉内のサセプタ上に配置した後に、以下の成長手順でエピタキシャル層を成長した。まず、厚さ1000nmのn型GaN72を成長した。次に、厚さ1200nmのn型InAlGaNクラッド層73を成長した。引き続き、厚さ200nmのn型GaNガイド層74a及び厚さ65nmのアンドープInGaNガイド層74bを成長した後に、GaN厚さ15nm/InGaN厚さ3nmから構成される3周期MQW75を成長した。続いて、厚さ65nmのアンドープInGaNガイド層76a、厚さ20nmのp型AlGaNブロック層77及び厚さ200nmのp型GaNガイド層76bを成長した。次に、厚さ400nmのp型InAlGaNクラッド層77を成長した。最後に、厚さ50nmのp型GaNコンタクト層78を成長した。

10

【0076】

SiO₂の絶縁膜79をコンタクト層78上に成膜した後に、フォトリソグラフィを用いて幅10μmのストライプ窓をウェットエッチングにより形成した。ここで、以下の2通りにストライプ方向のコンタクト窓を形成した。レーザストライプが(1)M方向(コンタクト窓がc軸及びm軸によって規定される所定の面に沿った方向)のものと、(2)A方向:<11-20>方向、のものである。

【0077】

ストライプ窓を形成した後に、Ni/Auから成るp側電極80aとTi/Alから成るパッド電極を蒸着した。次いで、GaN基板(GaNウエハ)の裏面をダイヤモンドスラリーを用いて研磨し、裏面がミラー状態の基板生産物を作製した。このとき、接触式膜厚計を用いて基板生産物の厚みを測定した。厚みの測定には、試料断面からの顕微鏡によっても行っても良い。顕微鏡には、光学顕微鏡や、走査型電子顕微鏡を用いることができる。GaN基板(GaNウエハ)の裏面(研磨面)にはTi/Al/Ti/Auから成るn側電極80bを蒸着により形成した。

20

【0078】

これら2種類のレーザストライプに対する共振器ミラーの作製には、波長355nmのYAGレーザを用いるレーザスクライバを用いた。レーザスクライバを用いてブレイクした場合には、ダイヤモンドスクライバを用いた場合と比較して、発振チップ歩留まりを向上させることが可能である。スクライプ溝の形成条件として以下のものを用いた：レーザ光出力100mW；走査速度は5mm/s。形成されたスクライプ溝は、例えば、長さ30μm、幅10μm、深さ40μmの溝であった。400μmピッチで基板の絶縁膜開口箇所を通してエピ表面に直接レーザ光を照射することによって、スクライプ溝を形成した。共振器長は600μmとした。

30

【0079】

ブレードを用いて、共振ミラーを割断により作製した。基板裏側に押圧によりブレイクすることによって、レーザバーを作製した。より具体的に、{20-21}面のGaN基板について、結晶方位と割断面との関係を示したものが、図7(b)と図7(c)である。図7(b)はレーザストライプを(1)M方向に設けた場合であり、半極性面71aと共にレーザ共振器のための端面81a、81bが示される。端面81a、81bは半極性面71aにほぼ直交しているが、従来のc面、m面又はa面等のこれまでのへき開面とは異なる。図7(c)はレーザストライプを(2)<11-20>方向に設けた場合であり、半極性面71aと共にレーザ共振器のための端面81c、81dが示される。端面81c、81dは半極性面71aにほぼ直交しており、a面から構成される。

40

【0080】

ブレイクによって形成された割断面を走査型電子顕微鏡で観察した結果、(1)および(2)のそれぞれにおいて、顕著な凹凸は観察されなかった。このことから、割断面の平坦性(凹凸の大きさ)は、20nm以下と推定される。更に、割断面の試料表面に対する垂直性は、±5度の範囲内であった。

50

【 0 0 8 1 】

レーザバーの端面に真空蒸着法によって誘電体多層膜をコーティングした。誘電体多層膜は、 SiO_2 と TiO_2 を交互に積層して構成した。膜厚はそれぞれ、50nm以上100nm以下の範囲内で調整して、反射率の中心波長が500nm以上530nm以下の範囲内になるように設計した。片側の反射面を10周期とし、反射率の設計値を約95%に設計し、もう片側の反射面を6周期とし、反射率の設計値を約80%とした。

【 0 0 8 2 】

通電による評価を室温にて行った。電源には、パルス幅500ns、デューティ比0.1%のパルス電源を用い、表面電極に針を落として通電した。光出力測定の際には、レーザバー端面からの発光をフォトダイオードによって検出して、電流 - 光出力特性 (I - L 特性) を調べた。発光波長を測定する際には、レーザバー端面からの発光を光ファイバに通し、検出器にスペクトルアナライザを用いてスペクトル測定を行った。偏光状態を調べる際には、レーザバーからの発光に偏光板を通して回転させることで、偏光状態を調べた。LEDモード光を観測する際には、光ファイバをレーザバー表面側に配置することで、表面から放出される光を測定した。

【 0 0 8 3 】

全てのレーザで発振後の偏光状態を確認した結果、a軸方向に偏光していることがわかった。発振波長は500nm以上530nm以下の範囲内であった。

【 0 0 8 4 】

全てのレーザでLEDモード (自然放出光) の偏光状態を測定した。a軸の方向の偏光成分をI₂、m軸を主面に投影した方向の偏光成分をI₁とし、 $(I_1 - I_2) / (I_1 + I_2)$ を偏光度と定義した。こうして、求めた偏光度としきい値電流密度の最小値の関係を調べた結果、図9が得られた。図9から、偏光度が正の場合に、(1)レーザストライプM方向のレーザでは、しきい値電流密度が大きく低下することがわかる。すなわち、偏光度が正 ($I_1 > I_2$) で、かつオフ方向に導波路を設けた場合に、しきい値電流密度が大幅に低下することがわかる。図9に示されたデータは以下のものである。

	しきい値電流	しきい値電流
偏光度、(M方向ストライプ)、(< 11 - 20 > ストライプ)		
0.08	64	20
0.05	18	42
0.15	9	48
0.276	7	52
0.4	6	

【 0 0 8 5 】

GaN基板のm軸方向へのc軸の傾斜角と発振歩留まりとの関係を調べた結果、図10が得られた。本実施例では、発振歩留まりについては、(発振チップ数) / (測定チップ数)と定義した。また、図10は、基板の積層欠陥密度が 1×10^4 (cm⁻¹)以下の基板であり、かつレーザストライプが(1)M方向のレーザにおいて、プロットしたものである。図10から、オフ角が45度以下では、発振歩留まりが極めて低いことがわかる。端面状態を光学顕微鏡で観察した結果、45度より小さい角度では、ほとんどのチップでm面が出現し、垂直性が得られないことがわかった。また、オフ角が63度以上80度以下の範囲では、垂直性が向上し、発振歩留まりが50%以上に増加することがわかる。これらの事実から、GaN基板のオフ角度の範囲は、63度以上80度以下が最適である。なお、この結晶的に等価な端面を有することになる角度範囲である、100度以上117度以下の範囲でも、同様の結果が得られる。図10に示されたデータは以下のものである。

傾斜角、歩留まり

10	0.1
43	0.2
58	50

63	65
66	80
71	85
75	80
79	75
85	45
90	35

【 0 0 8 6 】

積層欠陥密度と発振歩留まりとの関係を調べた結果、図 1 1 が得られた。発振歩留まりの定義については、上記と同様である。図 1 1 から、積層欠陥密度が 1×10^4 (cm^{-1}) を超えると急激に発振歩留まりが低下することがわかる。また、端面状態を光学顕微鏡で観察した結果、発振歩留まりが低下したサンプルでは、端面の凹凸が激しく平坦な断面が得られていないことがわかった。積層欠陥の存在によって、割れ易さに違いが出たことが原因と考えられる。このことから、基板に含まれる積層欠陥密度が 1×10^4 (cm^{-1}) 以下である必要がある。図 1 1 に示されたデータは以下のものである。

積層欠陥密度 (cm^{-1})、歩留まり

500	80
1000	75
4000	70
8000	65
10000	20
50000	2

【 0 0 8 7 】

基板厚みと発振歩留まりとの関係を調べた結果、図 1 2 が得られた。発振歩留まりの定義については、上記と同様である。また、図 1 2 では、基板の積層欠陥密度 1×10^4 (cm^{-1}) 以下であり、かつレーザストライプが (1) M 方向のレーザにおいて、プロットした。図 1 2 から、基板厚みが $100 \mu\text{m}$ よりも薄く $50 \mu\text{m}$ よりも厚いときに、発振歩留まりが高い。これは、基板厚みが $100 \mu\text{m}$ よりも厚いと、断面の垂直性が悪化することによる。また、 $50 \mu\text{m}$ よりも薄いと、ハンドリングが困難で、チップが破壊され易くなることによる。これらのことから、基板の厚みは、 $50 \mu\text{m}$ 以上 $100 \mu\text{m}$ 以下が最適である。図 1 2 に示されたデータは以下のものである。

基板厚、歩留まり

48	10
80	65
90	70
110	45
150	48
200	30
400	20

【 0 0 8 8 】

(実施例 3)

実施例 2 では、{ 2 0 - 2 1 } 面を有する G a N 基板上に、半導体レーザのための複数のエピタキシャル膜を成長した。上記のように、スクライプ溝の形成と押圧とによって光共振器用の端面が形成された。これらの端面の候補を見いだすために、(2 0 - 2 1) 面に 90 度近傍の角度を成し、a 面とは異なる面方位を計算により求めた。図 1 3 を参照すると、以下の角度及び面方位が、(2 0 - 2 1) 面に対して 90 度近傍の角度を有する。

具体的な面指数、{ 2 0 - 2 1 } 面に対する角度

- (- 1 0 1 6) : 92.46 度 ;
- (- 1 0 1 7) : 90.10 度 ;
- (- 1 0 1 8) : 88.29 度。

【 0 0 8 9 】

図 1 4 は、(2 0 - 2 1) 面と (- 1 0 1 - 6) 面及び (- 1 0 1 6) 面における原子配置を示す図面である。図 1 5 は、(2 0 - 2 1) 面と (- 1 0 1 - 7) 面及び (- 1 0 1 7) 面における原子配置を示す図面である。図 1 6 は、(2 0 - 2 1) 面と (- 1 0 1 - 8) 面及び (- 1 0 1 8) 面における原子配置を示す図面である。図 1 4 ~ 図 1 6 に示されるように、矢印によって示される局所的な原子配置は電荷的に中性な原子の配列を示し、電気的中性の原子配置が周期的に出現している。成長面に対し、比較的垂直な面が得られる理由は、この電荷的に中性な原子配列が周期的に現れることで、割断面の生成が比較的安定となっていることが考えられる可能性がある。

【 0 0 9 0 】

上記の実施例 1 ~ 3 を含めた様々な実験によって、角度 A L P H A は、4 5 度以上 8 0 度以下及び 1 0 0 度以上 1 3 5 度以下の範囲であることができる。発振チップ歩留を向上させるためには、角度 A L P H A は、6 3 度以上 8 0 度以下及び 1 0 0 度以上 1 1 7 度以下の範囲であることができる。典型的な半極性主面、{ 2 0 - 2 1 } 面、{ 1 0 - 1 1 } 面、{ 2 0 - 2 - 1 } 面、及び { 1 0 - 1 - 1 } 面のいずれかであることができる。更に、これらの半極性主面からの微傾斜面であることができる。例えば、半極性主面は、{ 2 0 - 2 1 } 面、{ 1 0 - 1 1 } 面、{ 2 0 - 2 - 1 } 面、及び { 1 0 - 1 - 1 } 面のいずれかの面から、m 面方向に - 4 度以上 + 4 度以下の範囲でオフした微傾斜面であることができる。

【 0 0 9 1 】

(実施例 4)

図 2 1 (a) 及び図 2 1 (b) は、(2 0 - 2 1) G a N 基板を含む基板生産物の表面に、c 軸を基板主面に投影した方向 D I R 2 と垂直な方向 D I R 1 にスクライプ溝を形成し、ブレードを用いてブレイキングした後のレーザバーを主面側 (スクライプ溝が形成された面側) から光学顕微鏡を用いて観察した結果である。図 2 1 (a) には、本実施形態に係るブレイキング方法を用いない従来のブレイキング方法によって形成されたレーザバー L B C 1 が示されており、図 2 1 (b) には本実施形態に係るブレイキング方法によって形成されたレーザバー L B C 2 (例えばレーザバー L B 1 に対応) が示されている。ブレイキングは、図中に示す方向 D I R 1 の向きに行われた。方向 D I R 2 は、スクライプ溝が形成された面に六方晶系 I I I 族窒化物半導体の c 軸を投影した方向である。

【 0 0 9 2 】

図 2 1 (a) によれば、ブレイキングによってスクライプ溝が切欠部 D E 2 となり、図 2 1 (b) によれば、ブレイキングによってスクライプ溝が切欠部 D E 3 となった。切欠部 D E 3 は切欠部 D E 1 に対応する。図 2 1 (a) によれば、切欠部 D E 2 の側壁面 S F 1 から、方向 D I R 1 にブレイキングが進んで端面 S F 2 が形成され、この端面 S F 2 が隣接する切欠部 D E 2 の端部に到達するが、このブレイキングによって形成された端面 S F 2 は、側壁面 S F 1 に対し比較的大きく傾いていた。すなわち、側壁面 S F 1 及び端面 S F 2 を含む共振器ミラーに、傾きの異なる部分が形成されたことがわかる。このように、共振器ミラーは基板に平行な面内において傾きの異なる部分を含むので、反射率が低下し、これに伴ってレーザの発振しきい値が増大する可能性が高い。一方、図 2 1 (b) によれば、切欠部 D E 3 の側壁面 S F 3 から、方向 D I R 1 にブレイキングが進んで端面 S F 4 が形成され、この端面 S F 4 が隣接する切欠部 D E 3 の端部に到達するが、このブレイキングによって形成された端面 S F 4 は、側壁面 S F 3 と略平行となっていた。すなわち、図 2 1 (b) の場合は、図 2 1 (a) の場合と異なり、共振器ミラーに傾きの異なる部分を確認することはできなかった。すなわち、本実施形態に係るブレイキング方法を用いれば、形成される共振器ミラーは十分な平坦性及び垂直性を有するので、一定のしきい値電流以下での発振歩留まりの高い I I I 族窒化物半導体レーザ素子を作製することが可能となる。図 2 2 には、図 2 1 (b) に示すレーザバー L B C 2 を端面側から光学顕微鏡を用いて観察した結果が示されている。なお、図 2 2 に記載されている方向 D I R 1 は、図 2 1 に示す方向 D I R 1 と逆向きに表されている。

【 0 0 9 3 】

(実施例 5)

LENGTH 1 (LENGTH 2 , 3 も同様であり、以下、単に LENGTH という) と THICKNESS 1 (THICKNESS 2 も同様であり、以下、単に THICKNESS という) の比 LENGTH / THICKNESS と、発振歩留まりとの関係調べた結果、図 2 3 が得られた。THICKNESS を、60 μm 、100 μm の 2 種類とした。本実施例では、発振歩留まりについては、(しきい値電流 1000 mA 以下での発振チップ数) / (測定チップ数) とした。図 2 3 に示す結果は、積層欠陥密度が 1×10^{-4} (cm^{-1}) 以下の基板を用い、LE 1 及び LE 2 を何れも 50 μm とし (LE 1 = LE 2 であり、以下、LE 1 及び LE 2 を、単に、LE という)、傾斜角度 BETA 1 (傾斜角度 BETA 3) 及び傾斜角度 BETA 2 (傾斜角度 BETA 4) を何れも 30 度として得られたものである。図 2 3 から、LENGTH / THICKNESS の値が 0 . 4 を超えると、発振歩留まりが半減することが分かる。これは、LENGTH / THICKNESS の値を小さくすると、スクライプ溝先端の応力集中が増大し、平坦な断面が容易に得られることに因ると考えられる。また、LENGTH / THICKNESS の値が 0 . 05 よりも小さくなると急激に発振歩留まりが低下することが分かる。これは、スクライプ溝が浅すぎたために、切断をガイドする役割を果たせなかったことに因る。以上の結果から、LENGTH / THICKNESS の値は 0 . 05 以上 0 . 4 以下の範囲内が好適であることがわかる。図 2 3 に示されたデータは以下のものである (ここでは、特に、LENGTH / THICKNESS を “ R ” と記し、THICKNESS を “ T ” と記す)

R、 T=60 μm の T=100 μm の
発振歩留まり、 発振歩留まり

0.03	53	39
0.05	69	54
0.1	81	70
0.15	78	72
0.2	65	54
0.25	53	46
0.3	47	44
0.5	34	36
0.8	39	38

【 0 0 9 4 】

(実施例 6)

LE と発振歩留まりとの関係調べた結果、図 2 4 が得られた。図 2 4 に示す結果は、積層欠陥密度が 1×10^{-4} (cm^{-1}) 以下の基板を用い、THICKNESS を 80 μm とし、LENGTH を 20 μm とし、傾斜角度 BETA 1 (傾斜角度 BETA 3) 及び傾斜角度 BETA 2 (傾斜角度 BETA 4) を何れも 30 度として得られたものである。発振歩留まりの定義については、上記と同様である。図 2 4 から、LE が 30 μm よりも小さくなると急激に発振歩留まりが低下することが分かる。これは、導波路とスクライプ溝を近づけすぎたことにより、導波路下の活性層がレーザ照射によるダメージを受けたことに因る。また、LE が 100 μm を超えると、発振歩留まりが半減することが分かる。これは、長いスクライプ溝のほうが容易に切断をガイドすることに因る。以上のことから、LE は 30 μm 以上 100 μm 以下が好適だとわかる。図 2 4 に示されたデータは以下のものである。

LE、 発振歩留まり

10	10
20	31
30	64
40	66

60	45
80	46
100	37
150	26

【 0 0 9 5 】

(実施例 7)

傾斜角度 B E T A 1 と発振歩留まりとの関係を調べた結果、図 2 5 が得られた。図 2 5 に示す結果は、積層欠陥密度が $1 \times 10^{-4} (\text{cm}^{-1})$ 以下の基板を用い、T H I C K N E S S を $80 \mu\text{m}$ とし、L E N G T H を $20 \mu\text{m}$ とし、L E を $50 \mu\text{m}$ とし、傾斜角度 B E T A 2 を 30 度として得られたものである。発振歩留まりの定義については、上記と同様である。図 2 5 から、傾斜角度 B E T A 1 が 45 度以上 85 度以下の時に発振歩留まりが高いことが分かる。また、傾斜角度 B E T A 2 と発振歩留まりとの関係を調べた結果、図 2 6 が得られた。図 2 6 に示す結果は、積層欠陥密度が $1 \times 10^{-4} (\text{cm}^{-1})$ 以下の基板を用い、T H I C K N E S S を $80 \mu\text{m}$ とし、L E N G T H を $20 \mu\text{m}$ とし、L E を $50 \mu\text{m}$ とし、傾斜角度 B E T A 3 を 45 度として得られたものである。発振歩留まりの定義については、上記と同様である。図 2 6 から、傾斜角度 B E T A 2 が 10 度以上 30 度以下の時に発振歩留まりが高いことが分かる。これは、傾斜角度 B E T A 2 < 傾斜角度 B E T A 1 とすることで割断下流側への応力集中が増大し、スクライプ溝と平行に割断線が進展し易くなることに因ると考えられる。以上のことから、傾斜角度 B E T A 1 (傾斜角度 B E T A 3) は 45 度以上 85 度以下、傾斜角度 B E T A 2 (傾斜角度 B E T A 4) は 10 度以上 30 度以下が好適であるとわかる。図 2 5 に示されたデータは以下のものである。

B E T A 1、発振歩留まり

18	42
27	46
45	74
63	78
76	74
84	72

また、図 2 6 に示されたデータは以下のものである。

B E T A 2、発振歩留まり

7	69
14	76
18	78
27	71
45	49
63	39
76	31

【 0 0 9 6 】

以上説明したように、形状を制御した破線スクライプ溝を形成することによって、割断面を利用した共振器ミラーの品質を改善し、ある一定のしきい値電流以下での発振歩留まりの高い半極性上 L D を作製することが可能となる。

【 0 0 9 7 】

好適な実施の形態において本発明の原理を図示し説明してきたが、本発明は、そのような原理から逸脱することなく配置および詳細において変更され得ることは、当業者によって認識される。本発明は、本実施の形態に開示された特定の構成に限定されるものではない。したがって、特許請求の範囲およびその精神の範囲から来る全ての修正および変更権利を請求する。

【 符号の説明 】

【 0 0 9 8 】

10

20

30

40

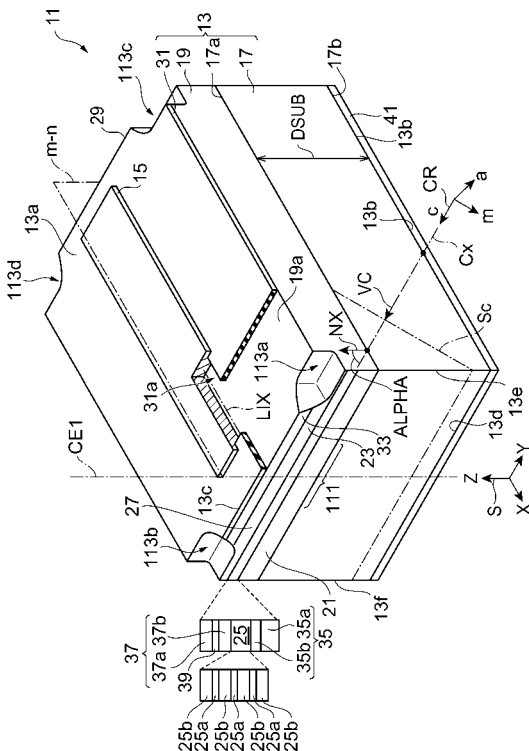
50

11... III族窒化物半導体レーザ素子、13...レーザ構造体、13a...第1の面、13b...第2の面、13c、13d...エッジ、15...電極、17...支持基体、17a...半極性主面、17b...支持基体裏面、17c...支持基体端面、19...半導体領域、19a...半導体領域表面、19c...半導体領域端面、21...第1のクラッド層、23...第2のクラッド層、25...活性層、25a...井戸層、25b...障壁層、27、29...断面、ALPHA...角度、Sc...c面、NX...法線軸、31...絶縁膜、31a...絶縁膜開口、35...n側光ガイド層、37...p側光ガイド層、39...キャリアブロック層、41...電極、43a、43b...誘電体多層膜、MA...m軸ベクトル、BETA...角度、DSUB...支持基体厚さ、51...基板、51a...半極性主面、SP...基板生産物、57...窒化ガリウム系半導体領域、59...発光層、61...窒化ガリウム系半導体領域、53...半導体領域、54...絶縁膜、54a...絶縁膜開口、55...レーザ構造体、58a...アノード電極、58b...カソード電極、63a...第1の面、63b...第2の面、10a...レーザスクライバ、65a...スクライブ溝、65b...スクライブ溝、LB...レーザビーム、SP1...基板生産物、LB1...レーザパー、69...ブレード、69a...エッジ、69b、69c...ブレード面、71...支持装置、71a...支持面、71b...凹部、BETA1、BETA2...角度、111...導波路、113a、113b、113c、113d、DE1、DE2...切欠部、115a、115b...部分、117a、117b、119a、119b...端部、121a、121b...仮想線分、123a、123b、123c...仮想面、13e、13f...エッジ、CE1...中心線、CE2...中心面、DF1、DF2...接線、L1...切断面、LBC1、LBC2...レーザパー、SF1、SF3...側壁面、SF2、SF4...端面。

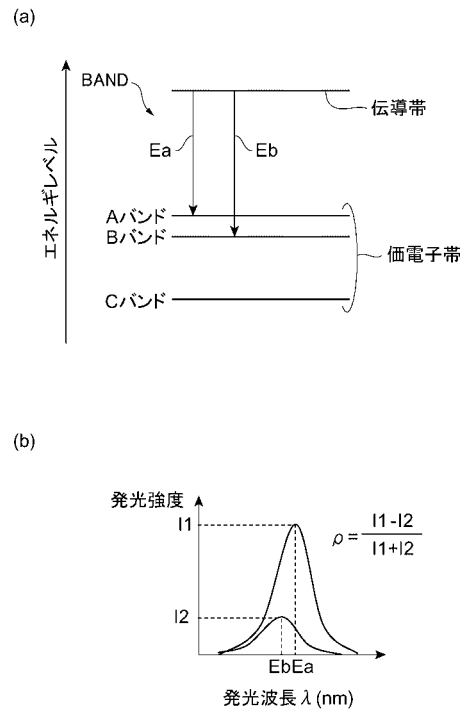
10

20

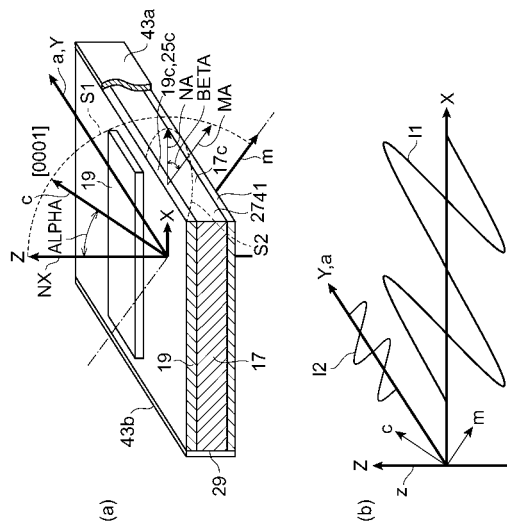
【図1】



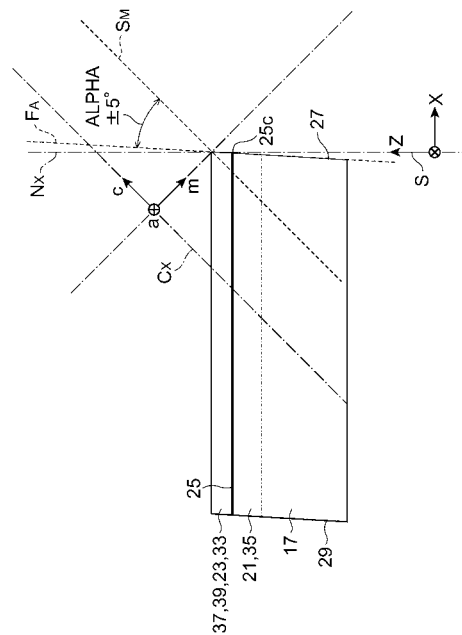
【図2】



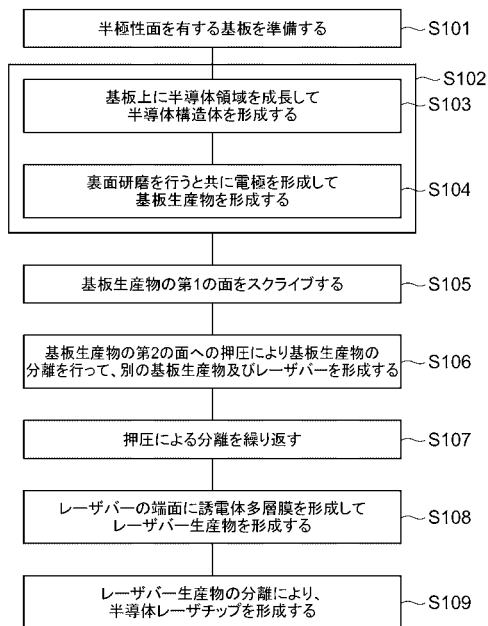
【図 3】



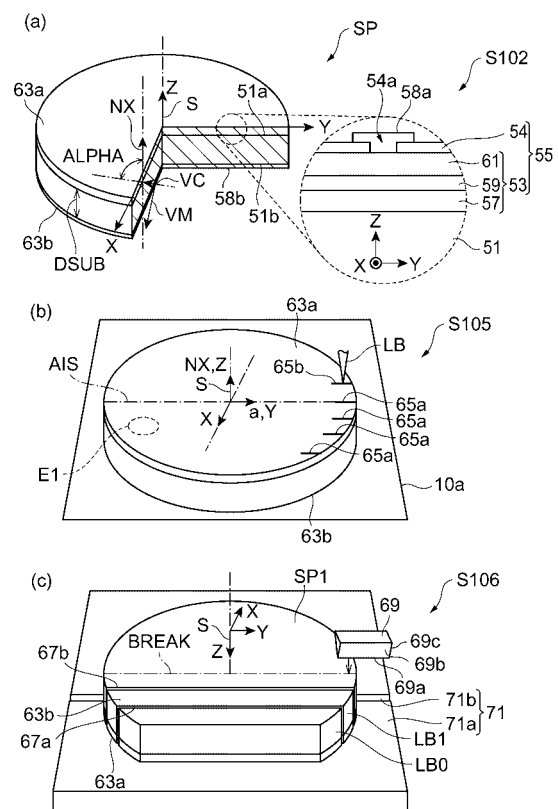
【図 4】



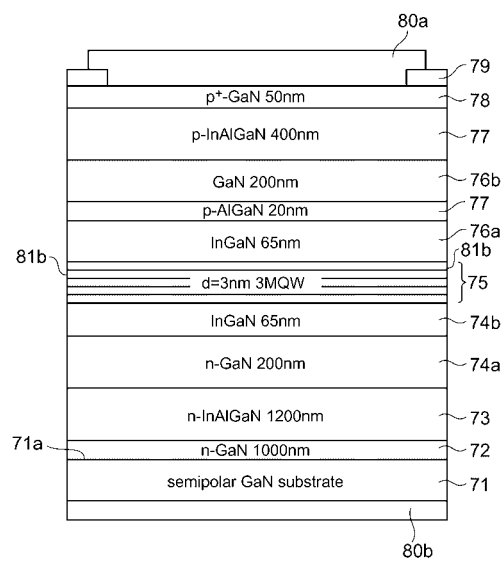
【図 5】



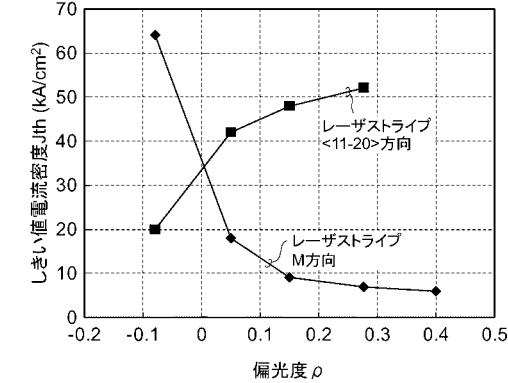
【図 6】



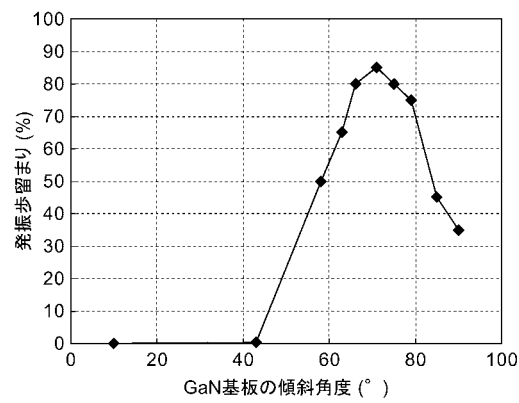
【 図 8 】



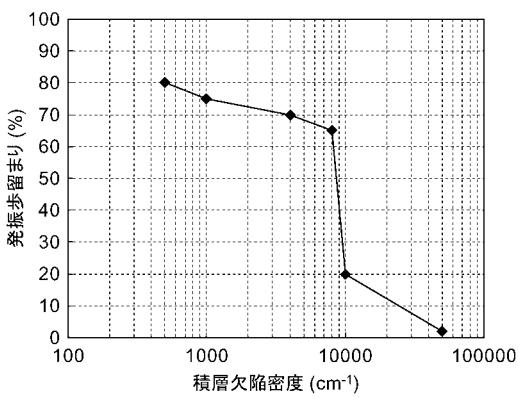
【 図 9 】



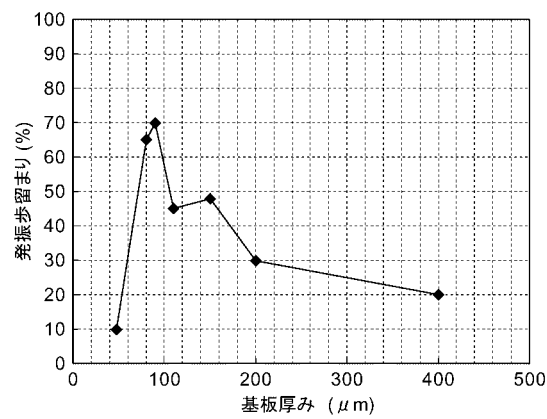
【 図 1 0 】



【 図 1 1 】



【 図 1 2 】



【 図 1 3 】

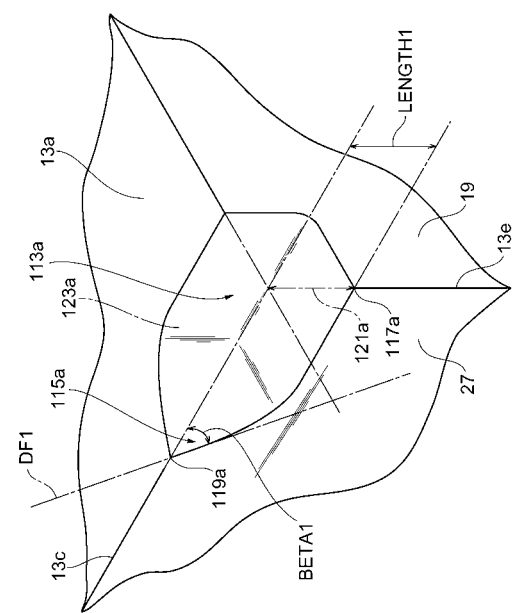
六方晶GaN

a	c	h1	k1	l1	h2	k2	l2	cos θ	Arccos(rad)	(deg)
3.189	5.185	-1	0	1	2	0	1	-0.7	2.4	137.05
3.189	5.185	-1	0	2	2	0	1	-0.5	2.1	118.28
3.189	5.185	-1	0	3	2	0	1	-0.3	1.9	107.13
3.189	5.185	-1	0	4	2	0	1	-0.2	1.7	100.23
3.189	5.185	-1	0	5	2	0	1	-0.1	1.7	95.67
3.189	5.185	-1	0	6	2	0	1	0.0	1.6	92.46
3.189	5.185	-1	0	7	2	0	1	0.0	1.6	90.10
3.189	5.185	-1	0	8	2	0	1	0.0	1.5	88.29
3.189	5.185	-1	0	9	2	0	1	0.1	1.5	86.87
3.189	5.185	-1	0	10	2	0	1	0.1	1.5	85.72
3.189	5.185	-2	0	1	2	0	1	-0.9	2.6	150.17
3.189	5.185	-2	0	2	2	0	1	-0.7	2.4	137.05
3.189	5.185	-2	0	3	2	0	1	-0.6	2.2	126.46
3.189	5.185	-2	0	4	2	0	1	-0.5	2.1	118.28
3.189	5.185	-2	0	5	2	0	1	-0.4	2.0	111.99
3.189	5.185	-2	0	6	2	0	1	-0.3	1.9	107.13
3.189	5.185	-2	0	7	2	0	1	-0.2	1.8	103.30
3.189	5.185	-2	0	8	2	0	1	-0.2	1.7	100.23
3.189	5.185	-2	0	9	2	0	1	-0.1	1.7	97.73
3.189	5.185	-2	0	10	2	0	1	-0.1	1.7	95.67
3.189	5.185	-3	0	1	2	0	1	-0.9	2.7	155.02
3.189	5.185	-3	0	2	2	0	1	-0.8	2.5	145.54
3.189	5.185	-3	0	3	2	0	1	-0.7	2.4	137.05
3.189	5.185	-3	0	4	2	0	1	-0.6	2.3	129.71
3.189	5.185	-3	0	5	2	0	1	-0.6	2.2	123.49
3.189	5.185	-3	0	6	2	0	1	-0.5	2.1	118.28
3.189	5.185	-3	0	7	2	0	1	-0.4	2.0	113.91
3.189	5.185	-3	0	8	2	0	1	-0.3	1.9	110.23
3.189	5.185	-3	0	9	2	0	1	-0.3	1.9	107.13
3.189	5.185	-3	0	10	2	0	1	-0.2	1.8	104.48

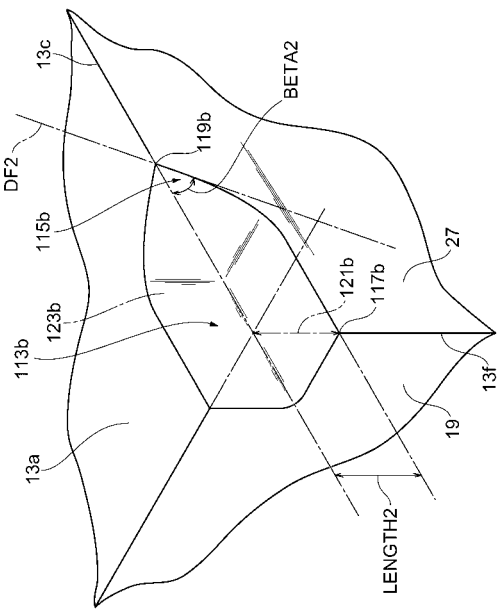
(20-21)に垂直な面の面指数

→(-1016)面
→(-1017)面
→(-1018)面

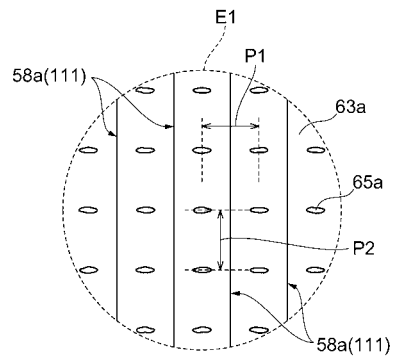
【 図 1 7 】



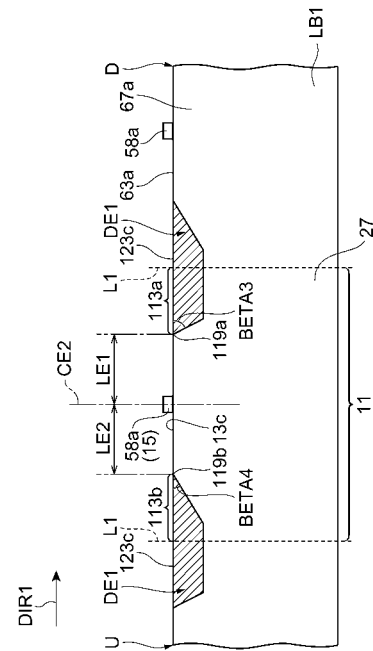
【 図 1 8 】



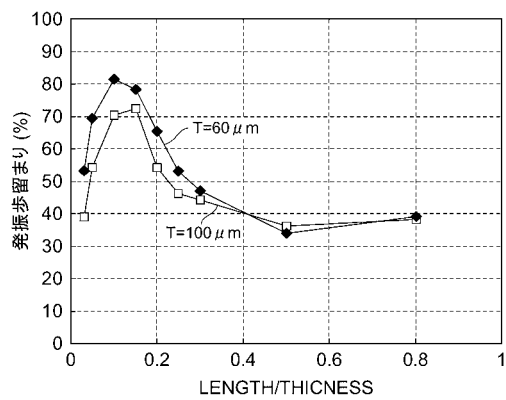
【図 19】



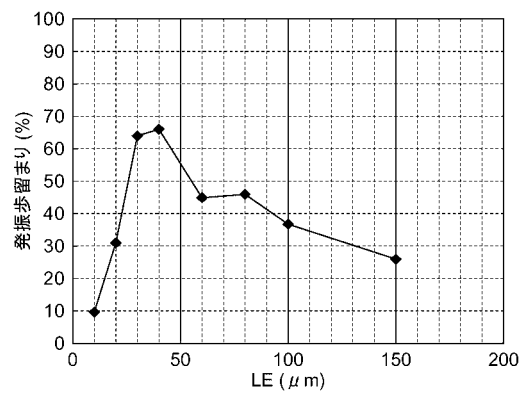
【図 20】



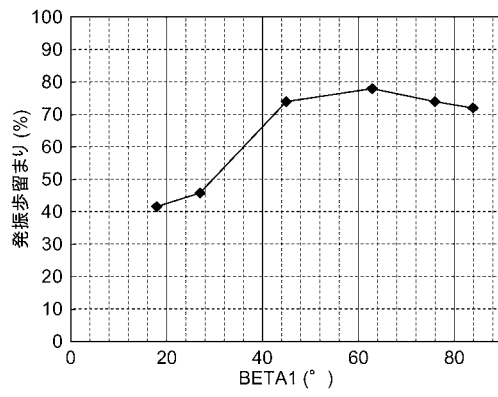
【図 23】



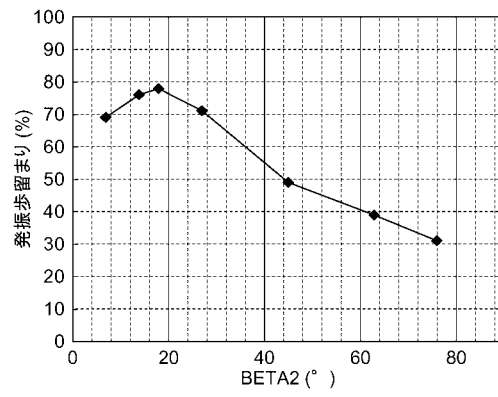
【図 24】



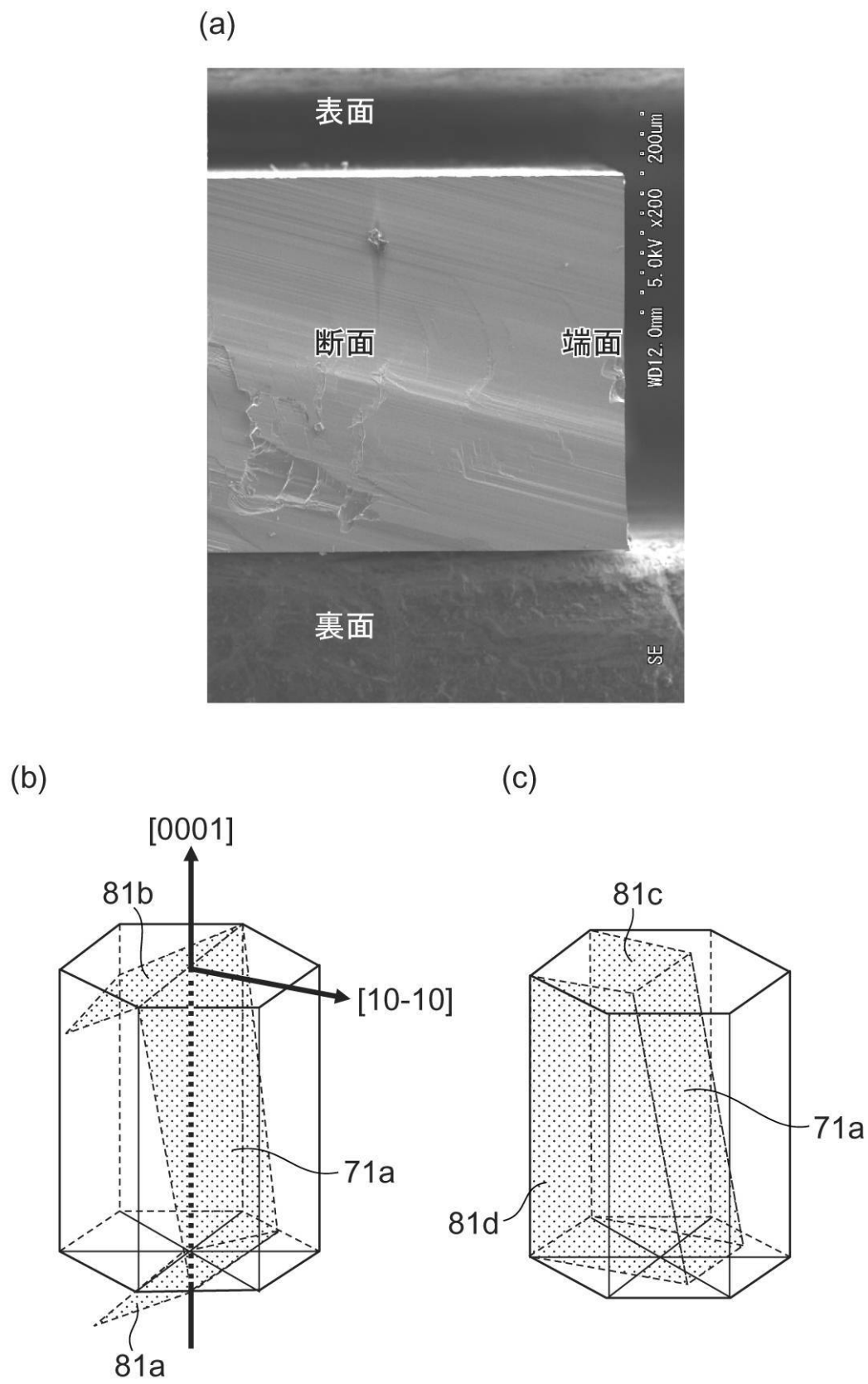
【図 2 5】



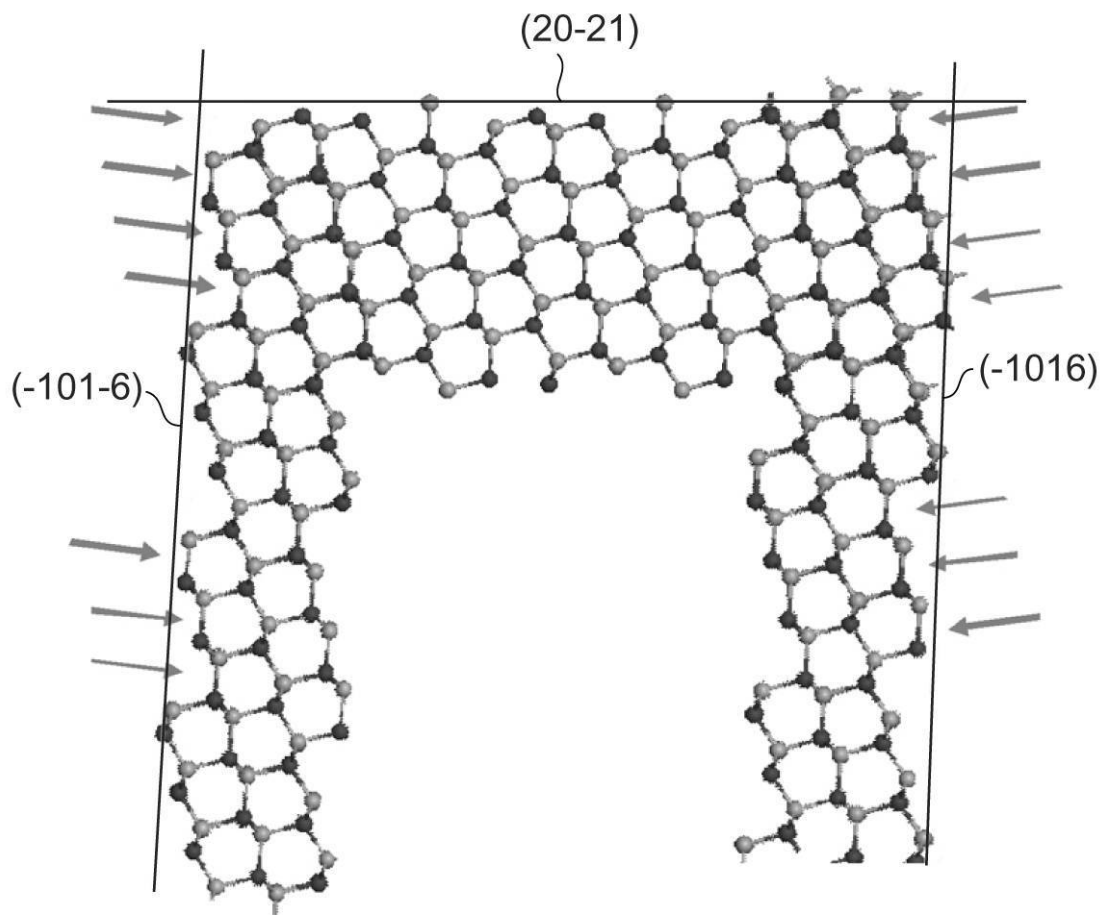
【図 2 6】



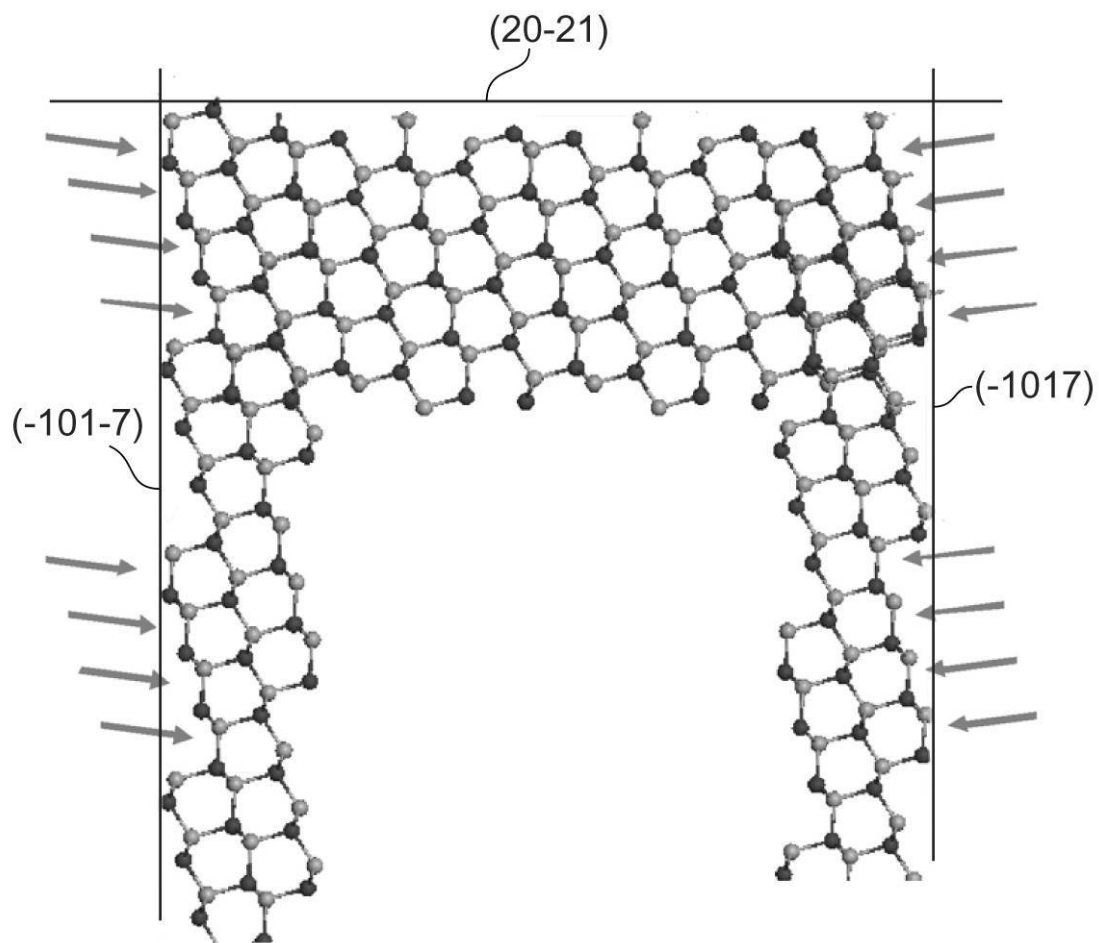
【 図 7 】



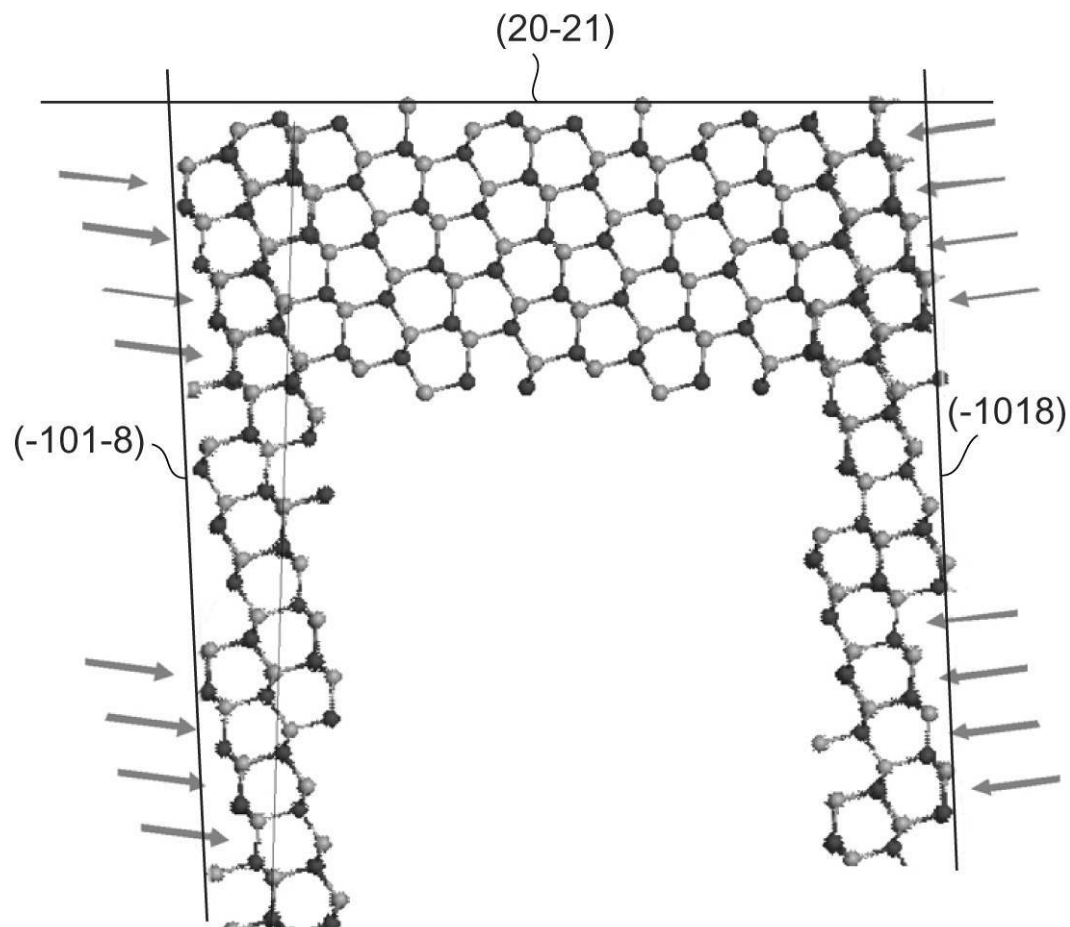
【 図 1 4 】



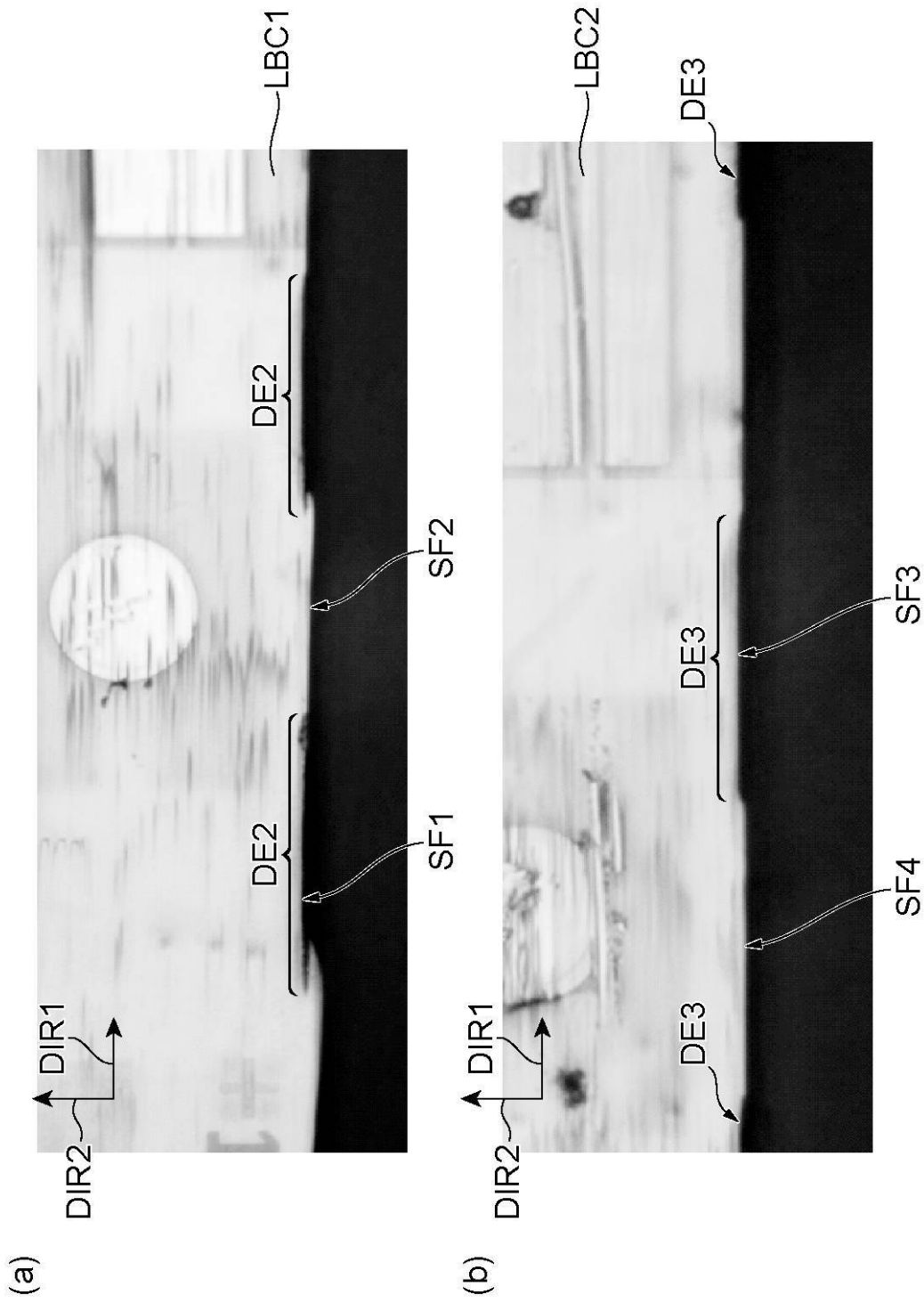
【図 15】



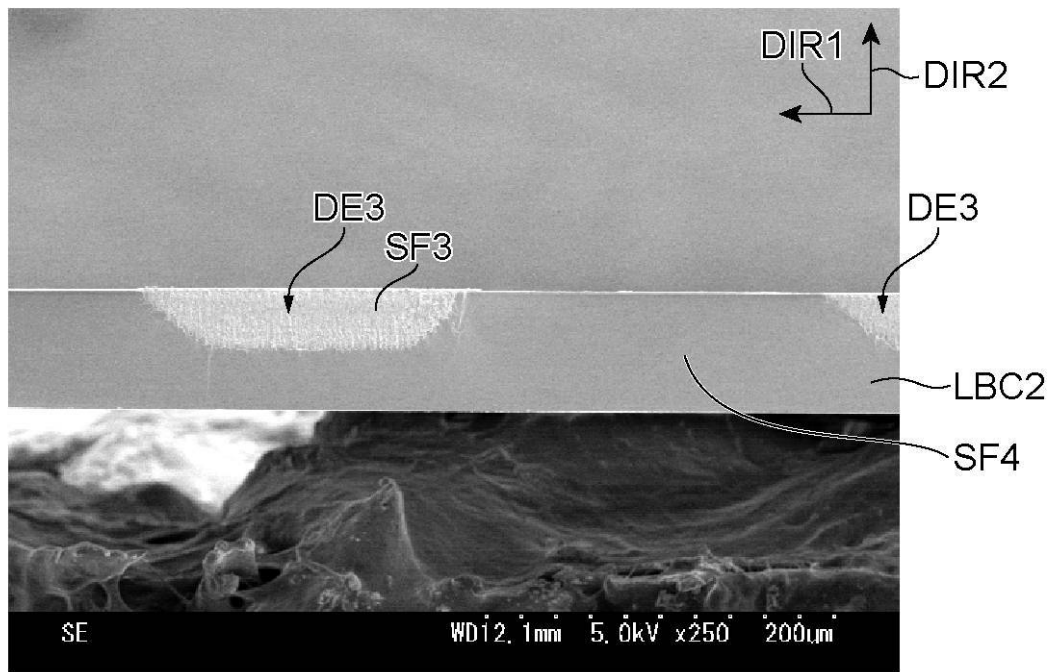
【図 16】



【図 2 1】



【図 22】



フロントページの続き

特許法第30条第1項適用申請有り 刊行物名 APPLIED PHYSICS EXPRESS Vol. 2 No. 8 (2009) 発行日及び掲載日 平成21年7月17日 発行所 The Japan Society of Applied Physics (応用物理学会) 刊行物名 APPLIED PHYSICS EXPRESS Vol. 2 No. 9 (2009) 発行日及び掲載日 平成21年8月21日 発行所 The Japan Society of Applied Physics (応用物理学会) 刊行物名 日刊工業新聞 平成21年8月2

(72)発明者 片山 浩二

大阪府大阪市此花区島屋一丁目1番3号 住友電気工業株式会社大阪製作所内

(72)発明者 上野 昌紀

兵庫県伊丹市昆陽北一丁目1番1号 住友電気工業株式会社伊丹製作所内

(72)発明者 池上 隆俊

兵庫県伊丹市昆陽北一丁目1番1号 住友電気工業株式会社伊丹製作所内

Fターム(参考) 5F173 AH22 AP05 AP24 AP84 AP85 AP93 AQ05 AR23 AR82 AR92