

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第4843122号  
(P4843122)

(45) 発行日 平成23年12月21日 (2011.12.21)

(24) 登録日 平成23年10月14日 (2011.10.14)

|                          |                      |
|--------------------------|----------------------|
| (51) Int. Cl.            | F I                  |
| HO 1 L 33/40 (2010.01)   | HO 1 L 33/00 2 2 O   |
| HO 1 L 33/32 (2010.01)   | HO 1 L 33/00 1 8 6   |
| HO 1 S 5/042 (2006.01)   | HO 1 S 5/042 6 1 2   |
| HO 1 S 5/323 (2006.01)   | HO 1 S 5/323 6 1 O   |
| HO 1 L 21/28 (2006.01)   | HO 1 L 21/28 3 O 1 B |
| 請求項の数 34 (全 36 頁) 最終頁に続く |                      |

|               |                              |           |                  |
|---------------|------------------------------|-----------|------------------|
| (21) 出願番号     | 特願2011-520266 (P2011-520266) | (73) 特許権者 | 000005821        |
| (86) (22) 出願日 | 平成22年12月21日 (2010.12.21)     |           | パナソニック株式会社       |
| (86) 国際出願番号   | PCT/JP2010/007400            |           | 大阪府門真市大字門真1006番地 |
| (87) 国際公開番号   | W02011/077704                | (74) 代理人  | 100101683        |
| (87) 国際公開日    | 平成23年6月30日 (2011.6.30)       |           | 弁理士 奥田 誠司        |
| 審査請求日         | 平成23年5月11日 (2011.5.11)       | (74) 代理人  | 100155000        |
| (31) 優先権主張番号  | 特願2009-294617 (P2009-294617) |           | 弁理士 喜多 修市        |
| (32) 優先日      | 平成21年12月25日 (2009.12.25)     | (74) 代理人  | 100135703        |
| (33) 優先権主張国   | 日本国 (JP)                     |           | 弁理士 岡部 英隆        |
| 早期審査対象出願      |                              | (74) 代理人  | 100125922        |
|               |                              |           | 弁理士 三宅 章子        |
|               |                              | (74) 代理人  | 100152663        |
|               |                              |           | 弁理士 山口 美里        |

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 窒化物系半導体素子およびその製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

p 型半導体領域を有する窒化物系半導体積層構造と、  
 前記 p 型半導体領域上に設けられた電極とを備え、  
 前記 p 型半導体領域は、 $Al_xIn_yGa_zN$  ( $x + y + z = 1$ ,  $x \geq 0$ ,  $y \geq 0$ ,  $z \geq 0$ ) 半導体から形成され、  
 前記 p 型半導体領域は、m 面から  $1^\circ$  以上の角度で傾斜している半導体層であり、前記 p 型半導体領域における主面の法線と m 面の法線とが形成する角度が  $1^\circ$  以上  $5^\circ$  以下であり、  
 前記電極は、前記 p 型半導体領域の前記主面に接触した Mg 層と、前記 Mg 層の上に形成された金属層とを含み、  
 前記金属層は、Pt、Mo および Pd からなる群から選択される少なくとも 1 種の金属から形成されている、窒化物系半導体素子。

【請求項 2】

前記 Mg 層と前記金属層との間には、Pt、Mo および Pd からなる群から選択される少なくとも 1 種類の金属と Mg とを含む合金層が存在する、請求項 1 に記載の窒化物系半導体素子。

【請求項 3】

前記 Mg 層は、前記 p 型半導体領域の前記主面上に存在する膜から構成されている、請求項 1 または 2 に記載の窒化物系半導体素子。

10

20

## 【請求項 4】

前記Mg層は、前記p型半導体領域の前記主面上にアイランド状に存在する複数のMgから構成されている、請求項1から3の何れか一つに記載の窒化物系半導体素子。

## 【請求項 5】

前記窒化物系半導体積層構造は、

$Al_aIn_bGa_cN$ 層 ( $a + b + c = 1$ ,  $a \geq 0$ ,  $b \geq 0$ ,  $c \geq 0$ ) を含む活性層を有し、前記活性層は光を発する、請求項1から4の何れか一つに記載の窒化物系半導体素子。

## 【請求項 6】

前記Mg層の厚さは2nm以上45nm以下である、請求項1から5の何れか一つに記載の窒化物系半導体素子。 10

## 【請求項 7】

前記Mg層の厚さは2nm以上15nm以下である、請求項6に記載の窒化物系半導体素子。

## 【請求項 8】

前記Mg層の厚さは前記金属層の厚さ以下である、請求項1から7の何れか一つに記載の窒化物系半導体素子。

## 【請求項 9】

前記Mg層中のGa濃度は前記Mg層中の窒素濃度よりも高い、請求項1から8の何れか一つに記載の窒化物系半導体素子。 20

## 【請求項 10】

前記Ga濃度は前記窒素濃度の10倍以上である、請求項9に記載の窒化物系半導体素子。

## 【請求項 11】

前記窒化物系半導体積層構造を支持する半導体基板を有している、請求項1から10の何れか一つに記載の窒化物系半導体素子。

## 【請求項 12】

窒化物系半導体発光素子と、

前記窒化物系半導体発光素子から放射された光の波長を変換する蛍光物質を含む波長変換部とを備える光源であって、 30

前記窒化物系半導体発光素子は、

p型半導体領域を有する窒化物系半導体積層構造と、

前記p型半導体領域上に設けられた電極とを備え、

前記p型半導体領域は、 $Al_xIn_yGa_zN$  ( $x + y + z = 1$ ,  $x \geq 0$ ,  $y \geq 0$ ,  $z \geq 0$ ) 半導体からなり、

前記p型半導体領域は、m面から1°以上の角度で傾斜している半導体層であり、前記p型半導体領域における主面の法線とm面の法線とが形成する角度が1°以上5°以下であり、

前記電極は、前記p型半導体領域の前記主面に接触したMg層と、前記Mg層の上に形成された金属層とを含み、 40

前記金属層は、Pt、MoおよびPdからなる群から選択される少なくとも1種の金属から形成されている、光源。

## 【請求項 13】

基板を用意する工程(a)と、

$Al_xIn_yGa_zN$  ( $x + y + z = 1$ ,  $x \geq 0$ ,  $y \geq 0$ ,  $z \geq 0$ ) 半導体からなり、前記半導体の主面の法線とm面の法線とが形成する角度が1°以上5°以下であるp型半導体領域を有する窒化物系半導体積層構造を前記基板上に形成する工程(b)と、

前記窒化物系半導体積層構造の前記p型半導体領域の前記主面上に電極を形成する工程(c)とを含み、

前記工程(c)は、 50

前記 p 型半導体領域の前記主面上に、Mg 層を形成する工程と、前記 Mg 層を形成した後に、Pt、Mo および Pd からなる群から選択される少なくとも 1 種の金属から形成される金属層を形成する工程を含む、窒化物系半導体素子の製造方法。

【請求項 14】

前記工程 (c) において、

前記金属層を形成した後に、前記 Mg 層を加熱処理する工程を実行する、請求項 13 に記載の窒化物系半導体素子の製造方法。

【請求項 15】

前記加熱処理は、500℃以上700℃以下の温度で実行される、請求項 14 に記載の窒化物系半導体素子の製造方法。

【請求項 16】

前記加熱処理は、550℃以上650℃以下の温度で実行される、請求項 15 に記載の窒化物系半導体素子の製造方法。

【請求項 17】

前記 Mg 層を形成する工程は、パルス的に電子ビームを照射することによって Mg を前記 p 型半導体領域の前記主面の上に蒸着させることを実行する、請求項 13 から 16 の何れか一つに記載の窒化物系半導体素子の製造方法。

【請求項 18】

前記加熱処理後における前記 Mg 層の厚さを 2 nm 以上 45 nm 以下にする、請求項 14 から 16 の何れか一つに記載の窒化物系半導体素子の製造方法。

【請求項 19】

前記工程 (b) において、 $Al_xIn_yGa_zN$  ( $x + y + z = 1$ ,  $x \geq 0$ ,  $y \geq 0$ ,  $z \geq 0$ ) 半導体の層を形成する工程を実行する、請求項 13 から 18 の何れか一つに記載の窒化物系半導体素子の製造方法。

【請求項 20】

前記工程 (b) を実行した後において、前記基板を除去する工程を含む、請求項 13 から 19 の何れか一つに記載の窒化物系半導体素子の製造方法。

【請求項 21】

前記 Mg 層中の Ga 濃度は前記 Mg 層中の窒素濃度よりも高い、請求項 13 から 20 の何れか一つに記載の窒化物系半導体素子の製造方法。

【請求項 22】

前記 Ga 濃度は前記窒素濃度の 10 倍以上である、請求項 21 に記載の窒化物系半導体素子の製造方法。

【請求項 23】

Mg にパルス状の電子ビームを照射することによって前記 Mg を蒸発させ、p 型半導体領域の上に Mg 薄膜を形成した後に、Pt、Mo、および Pd からなる群から選択される少なくとも 1 種の金属からなる金属層を前記 Mg 薄膜の上に形成し、

前記 p 型半導体領域は、m 面から 1° 以上の角度で傾斜している半導体層であり、前記 p 型半導体領域における主面の法線と m 面の法線とが形成する角度が 1° 以上 5° 以下である、半導体デバイス用電極の形成方法。

【請求項 24】

前記 Mg 薄膜が形成される支持体を加熱せずに前記 Mg 薄膜を形成する請求項 23 に記載の半導体デバイス用電極の形成方法。

【請求項 25】

p 型半導体領域を有する窒化物系半導体積層構造と、

前記 p 型半導体領域上に設けられた電極とを備え、

前記 p 型半導体領域は、 $Al_xIn_yGa_zN$  ( $x + y + z = 1$ ,  $x \geq 0$ ,  $y \geq 0$ ,  $z \geq 0$ ) 半導体から形成され、

前記 p 型半導体領域は、m 面から 1° 以上の角度で傾斜している半導体層であり、前記 p 型半導体領域における主面の法線と m 面の法線とが形成する角度が 1° 以上 5° 以下で

10

20

30

40

50

あり、

前記電極は、Mg層と、前記Mg層の上に形成された合金層とを含み、

前記合金層は、Pt、MoおよびPdからなる群から選択される少なくとも1種の金属とMgとを含む合金からなる、窒化物系半導体素子。

【請求項26】

p型半導体領域を有する窒化物系半導体積層構造と、

前記p型半導体領域上に設けられた電極とを備え、

前記p型半導体領域は、 $Al_xIn_yGa_zN$  ( $x+y+z=1$ ,  $x \geq 0$ ,  $y \geq 0$ ,  $z \geq 0$ ) 半導体から形成され、

前記p型半導体領域は、m面から $1^\circ$ 以上の角度で傾斜している半導体層であり、前記p型半導体領域における主面の法線とm面の法線とが形成する角度が $1^\circ$ 以上 $5^\circ$ 以下であり、

10

前記電極は、前記p型半導体領域の前記主面に接触したMg層と、前記Mg層の上に形成された金属層とを含み、

前記金属層は、Auと比較してMgと合金を形成し難い金属から形成されている、窒化物系半導体素子。

【請求項27】

前記p型半導体領域は、GaN系半導体から形成される、請求項1から11、25および26のいずれかに記載の窒化物系半導体素子。

【請求項28】

20

前記p型半導体領域は、GaNである、請求項27に記載の窒化物系半導体素子。

【請求項29】

窒化物系半導体発光素子と、

前記窒化物系半導体発光素子から放射された光の波長を変換する蛍光物質を含む波長変換部とを備える光源であって、

前記窒化物系半導体発光素子は、

p型半導体領域を有する窒化物系半導体積層構造と、

前記p型半導体領域上に設けられた電極とを備え、

前記p型半導体領域は、 $Al_xIn_yGa_zN$  ( $x+y+z=1$ ,  $x \geq 0$ ,  $y \geq 0$ ,  $z \geq 0$ ) 半導体からなり、

30

前記p型半導体領域は、m面から $1^\circ$ 以上の角度で傾斜している半導体層であり、前記p型半導体領域における主面の法線とm面の法線とが形成する角度が $1^\circ$ 以上 $5^\circ$ 以下であり、

前記電極は、前記p型半導体領域の前記主面に接触したMg層と、前記Mg層の上に形成された金属層とを含み、

前記金属層は、Auと比較してMgと合金を形成し難い金属から形成されている、光源。

【請求項30】

前記p型半導体領域は、GaN系半導体から形成される請求項12または29に記載の光源。

40

【請求項31】

前記p型半導体領域は、GaNである請求項30に記載の光源。

【請求項32】

基板を用意する工程(a)と、

$Al_xIn_yGa_zN$  ( $x+y+z=1$ ,  $x \geq 0$ ,  $y \geq 0$ ,  $z \geq 0$ ) 半導体からなり、前記半導体の主面の法線とm面の法線とが形成する角度が $1^\circ$ 以上 $5^\circ$ 以下であるp型半導体領域を有する窒化物系半導体積層構造を前記基板上に形成する工程(b)と、

前記窒化物系半導体積層構造の前記p型半導体領域の前記主面上に電極を形成する工程(c)とを含み、

前記工程(c)は、

50

前記 p 型半導体領域の前記主面上に、Mg 層を形成する工程と、  
前記 Mg 層を形成した後に、Au と比較して Mg と合金を形成し難い金属からなる金属層を形成する工程とを含む、窒化物系半導体素子の製造方法。

【請求項 33】

前記 p 型半導体領域は、GaN 系半導体から形成される請求項 13 から 22 および 32 のいずれかに記載の窒化物系半導体素子の製造方法。

【請求項 34】

前記 p 型半導体領域は、GaN である請求項 33 に記載の窒化物系半導体素子の製造方法。

【発明の詳細な説明】

10

【技術分野】

【0001】

本発明は、窒化物系半導体素子およびその製造方法に関する。特に、本発明は、紫外から青色、緑色、オレンジ色および白色などの可視域全般の波長域における発光ダイオード、レーザダイオード等の GaN 系半導体発光素子に関する。このような発光素子は、表示、照明および光情報処理分野等への応用が期待されている。また、本発明は、窒化物系半導体素子に用いる電極の製造方法にも関する。

【背景技術】

【0002】

V 族元素として窒素 (N) を有する窒化物半導体は、そのバンドギャップの大きさから、短波長発光素子の材料として有望視されている。そのなかでも、窒化ガリウム系化合物半導体 (GaN 系半導体:  $Al_xGa_yIn_zN$  ( $0 \leq x, y, z \leq 1, x + y + z = 1$ )) の研究は盛んに行われ、青色発光ダイオード (LED)、緑色 LED、ならびに、GaN 系半導体を材料とする半導体レーザも実用化されている (例えば、特許文献 1、2 参照)。

20

【0003】

GaN 系半導体は、ウルツ鉱型結晶構造を有している。図 1 は、GaN の単位格子を模式的に示している。 $Al_xGa_yIn_zN$  ( $0 \leq x, y, z \leq 1, x + y + z = 1$ ) 半導体の結晶では、図 1 に示す Ga の一部が Al および / または In に置換され得る。

【0004】

30

図 2 は、ウルツ鉱型結晶構造の面を 4 指数表記 (六方晶指数) で表すために一般的に用いられている 4 つの基本ベクトル  $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、 $c$  を示している。基本ベクトル  $c$  は、[0001] 方向に延びており、この方向は「c 軸」と呼ばれる。c 軸に垂直な面 (plane) は「c 面」または「(0001) 面」と呼ばれている。なお、「c 軸」および「c 面」は、それぞれ、「C 軸」および「C 面」と表記される場合もある。添付図面では、見易さのため大文字の表記を使用している。

【0005】

GaN 系半導体を用いて半導体素子を作製する場合、GaN 系半導体結晶を成長させる基板として、c 面基板すなわち (0001) 面を表面に有する基板が使用される。しかしながら、c 面においては Ga の原子層と窒素の原子層の位置が c 軸方向に僅かにずれているため、分極 (Electrical Polarization) が形成される。このため、「c 面」は「極性面」とも呼ばれている。分極の結果、活性層における InGaIn の量子井戸には c 軸方向に沿ってピエゾ電界が発生する。このようなピエゾ電界が活性層に発生すると、キャリアの量子閉じ込めシュタルク効果により活性層内における電子およびホール分布に位置ずれが生じるため、内部量子効率が低下する。このため、半導体レーザであれば、しきい値電流の増大が引き起こされる。LED であれば、消費電力の増大や発光効率の低下が引き起こされる。また、注入キャリア密度の上昇と共にピエゾ電界のスクリーニングが起り、発光波長の変化も生じる。

40

【0006】

そこで、これらの課題を解決するため、非極性面、例えば [10-10] 方向に垂直な

50

、m面と呼ばれる $(10-10)$ 面を表面に有する基板を使用することが検討されている。ここで、ミラー指数を表すカッコ内の数字の左に付された「-」は、「バー」を意味する。m面は、図2に示されるように、c軸（基本ベクトルc）に平行な面であり、c面と直交している。m面においてはGa原子と窒素原子は同一原子面上に存在するため、m面に垂直な方向に分極は発生しない。その結果、m面に垂直な方向に半導体積層構造を形成すれば、活性層にピエゾ電界も発生しないため、上記課題を解決することができる。

#### 【0007】

m面は、 $(10-10)$ 面、 $(-1010)$ 面、 $(1-100)$ 面、 $(-1100)$ 面、 $(01-10)$ 面、 $(0-110)$ 面の総称である。なお、本明細書において、「X面成長」とは、六方晶ウルツ鉱構造のX面（ $X=c$ 、m）に垂直な方向にエピタキシャル成長が生じることを意味するものとする。X面成長において、X面を「成長面」と称する場合がある。また、X面成長によって形成された半導体の層を「X面半導体層」と称する場合がある。

10

#### 【先行技術文献】

#### 【特許文献】

#### 【0008】

【特許文献1】特開2001-308462号公報

【特許文献2】特開2003-332697号公報

【特許文献3】特開平8-64871号公報

【特許文献4】特開平11-40846号公報

20

#### 【発明の概要】

#### 【発明が解決しようとする課題】

#### 【0009】

上述のように、m面基板上で成長させたGaN系半導体素子は、c面基板上で成長させたものと比較して顕著な効果を発揮し得るが、次のような問題がある。すなわち、m面基板上で成長させたGaN系半導体素子は、c面基板上で成長させたものよりもコンタクト抵抗が高く、それが、m面基板上で成長させたGaN系半導体素子を使用する上で大きな技術的な障害となっている。

#### 【0010】

そのような状況の中、本願発明者は、非極性面であるm面上に成長させたGaN系半導体素子が持つコンタクト抵抗が高いという課題を解決すべく検討した結果、コンタクト抵抗を低くすることができる手段を見出した。

30

#### 【0011】

本発明はかかる点に鑑みてなされたものであり、その主な目的は、m面基板上で結晶成長させたGaN系半導体素子におけるコンタクト抵抗を低減できる構造および製造方法を提供することにある。

#### 【課題を解決するための手段】

#### 【0012】

本発明の窒化物系半導体素子は、p型半導体領域を有する窒化物系半導体積層構造と、前記p型半導体領域上に設けられた電極とを備え、前記p型半導体領域は、 $Al_xIn_yGa_zN$ （ $x+y+z=1$ ， $x\geq 0$ ， $y\geq 0$ ， $z\geq 0$ ）半導体から形成され、前記p型半導体領域は、m面から $1^\circ$ 以上の角度で傾斜している半導体層であり、前記p型半導体領域における主面の法線とm面の法線とが形成する角度が $1^\circ$ 以上 $5^\circ$ 以下であり、前記電極は、前記p型半導体領域の前記主面に接触したMg層と、前記Mg層の上に形成された金属層とを含み、前記金属層は、Pt、MoおよびPdからなる群から選択される少なくとも1種の金属から形成されている。

40

#### 【0013】

ある実施形態において、前記Mg層と前記金属層との間には、Pt、MoおよびPdからなる群から選択される少なくとも1種類の金属とMgとを含む合金層が存在する。

#### 【0014】

50

ある実施形態において、前記Mg層は、前記p型半導体領域の前記主面上に存在する膜から構成されている。

【0015】

ある実施形態において、前記Mg層は、前記p型半導体領域の前記主面上にアイランド状に存在する複数のMgから構成されている。

【0016】

ある実施形態において、前記窒化物系半導体積層構造は、 $Al_aIn_bGa_cN$ 層 ( $a + b + c = 1$ ,  $a \geq 0$ ,  $b \geq 0$ ,  $c \geq 0$ ) を含む活性層を有し、前記活性層は光を発する。

【0017】

10

ある実施形態において、前記Mg層の厚さは2nm以上45nm以下である。

【0018】

ある実施形態において、前記Mg層の厚さは2nm以上15nm以下である。

【0019】

ある実施形態において、前記Mg層の厚さは前記金属層の厚さ以下である。

【0020】

ある実施形態において、前記Mg層中のGa濃度は前記Mg層中の窒素濃度よりも高い。

【0021】

ある実施形態において、前記Ga濃度は前記窒素濃度の10倍以上である。

20

【0022】

ある実施形態において、前記窒化物系半導体積層構造を支持する半導体基板を有している。

【0023】

本発明の光源は、窒化物系半導体発光素子と、前記窒化物系半導体発光素子から放射された光の波長を変換する蛍光物質を含む波長変換部とを備える光源であって、前記窒化物系半導体発光素子は、p型半導体領域を有する窒化物系半導体積層構造と、前記p型半導体領域上に設けられた電極とを備え、前記p型半導体領域は、 $Al_xIn_yGa_zN$  ( $x + y + z = 1$ ,  $x \geq 0$ ,  $y \geq 0$ ,  $z \geq 0$ ) 半導体からなり、前記p型半導体領域は、m面から1°以上の角度で傾斜している半導体層であり、前記p型半導体領域における主面の法線とm面の法線とが形成する角度が1°以上5°以下であり、前記電極は、前記p型半導体領域の前記主面に接触したMg層と、前記Mg層の上に形成された金属層とを含み、前記金属層は、Pt、MoおよびPdからなる群から選択される少なくとも1種の金属から形成されている。

30

【0024】

本発明の窒化物系半導体素子の製造方法は、基板を用意する工程(a)と、 $Al_xIn_yGa_zN$  ( $x + y + z = 1$ ,  $x \geq 0$ ,  $y \geq 0$ ,  $z \geq 0$ ) 半導体からなり、前記半導体の主面の法線とm面の法線とが形成する角度が1°以上5°以下であるp型半導体領域を有する窒化物系半導体積層構造を前記基板上に形成する工程(b)と、前記窒化物系半導体積層構造の前記p型半導体領域の前記主面上に電極を形成する工程(c)とを含み、前記工程(c)は、前記p型半導体領域の前記主面上に、Mg層を形成する工程と、前記Mg層を形成した後に、Pt、MoおよびPdからなる群から選択される少なくとも1種の金属から形成される金属層を形成する工程を含む。

40

【0025】

ある実施形態では、前記工程(c)において、前記金属層を形成した後に、前記Mg層を加熱処理する工程を実行する。

【0026】

ある実施形態では、前記加熱処理は、500℃以上700℃以下の温度で実行される。

【0027】

ある実施形態では、前記加熱処理は、550℃以上650℃以下の温度で実行される。

50

## 【0028】

ある実施形態では、前記Mg層を形成する工程は、パルス的に電子ビームを照射することによってMgを前記p型半導体領域の前記主面の上に蒸着させることを実行する。

## 【0029】

ある実施形態では、前記加熱処理後における前記Mg層の厚さを2nm以上45nm以下にする。

## 【0030】

ある実施形態では、前記工程(b)において、 $Al_xIn_yGa_zN$  ( $x+y+z=1$ ,  $x \geq 0$ ,  $y \geq 0$ ,  $z \geq 0$ ) 半導体の層を形成する工程を実行する。

## 【0031】

ある実施形態では、前記工程(b)を実行した後において、前記基板を除去する工程を含む。

## 【0032】

ある実施形態では、前記Mg層中のGa濃度は前記Mg層中の窒素濃度よりも高い。

## 【0033】

ある実施形態では、前記Ga濃度は前記窒素濃度の10倍以上である。

## 【0034】

本発明の半導体デバイス用電極の形成方法では、Mgにパルス状の電子ビームを照射することによって前記Mgを蒸発させ、p型半導体領域の上にMg薄膜を形成した後に、Pt、Mo、およびPdからなる群から選択される少なくとも1種の金属からなる金属層を前記Mg薄膜の上に形成し、前記p型半導体領域は、m面から1°以上の角度で傾斜している半導体層であり、前記p型半導体領域における主面の法線とm面の法線とが形成する角度が1°以上5°以下である。

## 【0035】

ある実施形態では、前記Mg薄膜が形成される支持体を加熱せずに前記Mg薄膜を形成する。

## 【0036】

本発明の他の窒化物系半導体素子は、p型半導体領域を有する窒化物系半導体積層構造と、前記p型半導体領域上に設けられた電極とを備え、前記p型半導体領域は、 $Al_xIn_yGa_zN$  ( $x+y+z=1$ ,  $x \geq 0$ ,  $y \geq 0$ ,  $z \geq 0$ ) 半導体から形成され、前記p型半導体領域は、m面から1°以上の角度で傾斜している半導体層であり、前記p型半導体領域における主面の法線とm面の法線とが形成する角度が1°以上5°以下であり、前記電極は、前記Mg層と、前記Mg層の上に形成された合金層とを含み、前記合金層は、Pt、MoおよびPdからなる群から選択される少なくとも1種の金属とMgとを含む合金からなる。

## 【0037】

本発明の他の窒化物系半導体素子は、p型半導体領域を有する窒化物系半導体積層構造と、前記p型半導体領域上に設けられた電極とを備え、前記p型半導体領域は、 $Al_xIn_yGa_zN$  ( $x+y+z=1$ ,  $x \geq 0$ ,  $y \geq 0$ ,  $z \geq 0$ ) 半導体から形成され、前記p型半導体領域は、m面から1°以上の角度で傾斜している半導体層であり、前記p型半導体領域における主面の法線とm面の法線とが形成する角度が1°以上5°以下であり、前記電極は、前記p型半導体領域の前記主面に接触したMg層と、前記Mg層の上に形成された金属層とを含み、前記金属層は、Auと比較してMgと合金を形成し難い金属から形成されている。

## 【0038】

ある実施形態において、前記p型半導体領域は、GaN系半導体から形成される。

## 【0039】

ある実施形態において、前記p型半導体領域は、GaNである。

## 【0040】

本発明の他の光源は、窒化物系半導体発光素子と、前記窒化物系半導体発光素子から放

10

20

30

40

50

射された光の波長を変換する蛍光物質を含む波長変換部とを備える光源であって、前記窒化物系半導体発光素子は、p型半導体領域を有する窒化物系半導体積層構造と、前記p型半導体領域上に設けられた電極とを備え、前記p型半導体領域は、 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_z\text{N}$  ( $x+y+z=1$ ,  $x \geq 0$ ,  $y \geq 0$ ,  $z \geq 0$ ) 半導体からなり、前記p型半導体領域は、m面から $1^\circ$ 以上の角度で傾斜している半導体層であり、前記p型半導体領域における主面の法線とm面の法線とが形成する角度が $1^\circ$ 以上 $5^\circ$ 以下であり、前記電極は、前記p型半導体領域の前記主面に接触したMg層と、前記Mg層の上に形成された金属層とを含み、前記金属層は、Auと比較してMgと合金を形成し難い金属から形成されている。

#### 【0041】

ある実施形態において、前記p型半導体領域は、GaN系半導体から形成される。

10

#### 【0042】

ある実施形態において、前記p型半導体領域は、GaNである。

#### 【0043】

本発明の他の窒化物系半導体素子の製造方法は、基板を用意する工程(a)と、 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_z\text{N}$  ( $x+y+z=1$ ,  $x \geq 0$ ,  $y \geq 0$ ,  $z \geq 0$ ) 半導体からなり、前記半導体の主面の法線とm面の法線とが形成する角度が $1^\circ$ 以上 $5^\circ$ 以下であるp型半導体領域を有する窒化物系半導体積層構造を前記基板上に形成する工程(b)と、前記窒化物系半導体積層構造の前記p型半導体領域の前記主面上に電極を形成する工程(c)とを含み、前記工程(c)は、前記p型半導体領域の前記主面上に、Mg層を形成する工程と、前記Mg層を形成した後に、Auと比較してMgと合金を形成し難い金属からなる金属層を形成する工程を含む。

20

#### 【0044】

ある実施形態において、前記p型半導体領域は、GaN系半導体から形成される。

#### 【0045】

ある実施形態において、前記p型半導体領域は、GaNである。

#### 【発明の効果】

#### 【0046】

本発明の窒化物系半導体素子によれば、半導体積層構造上の電極がMg層を含み、そのMg層がp型半導体領域の主面(m面)に接触していることにより、コンタクト抵抗を低減することができる。本発明では、m面から $1^\circ$ 以上 $5^\circ$ 以下の角度で傾斜した面を主面とするp型半導体領域を用いた場合であっても、m面からの傾斜が $1^\circ$ 未満の面を主面とするp型半導体領域を用いた場合と同様の効果を奏する。

30

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【0047】

【図1】GaNの単位格子を模式的に示す斜視図

【図2】ウルツ鉱型結晶構造の基本ベクトル $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 、cを示す斜視図

【図3】(a)は、本発明の実施形態に係る窒化物系半導体発光素子100の断面模式図、(b)はm面の結晶構造を表す図、(c)はc面の結晶構造を表す図

【図4】(a)から(c)は、GaNに接する金属の仕事関数(eV)と固有コンタクト抵抗( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )との関係を示すグラフ

40

【図5】(a)は、Mg/Pt電極におけるMg層厚(熱処理後の値)と固有コンタクト抵抗との関係を示すグラフ、(b)は、Pd/Pt電極の固有コンタクト抵抗を示すグラフ

【図6】(a)～(c)は、それぞれ、Mg層厚が2nm、15nm、45nmにおける熱処理後の電極の表面状態を示す写真

【図7】Mg/Pt電極およびPd/Pt電極の各々コンタクト抵抗について、接触面がm面の場合とc面の場合のコンタクト抵抗を示すグラフ

【図8】コンタクト抵抗について熱処理温度の依存性を示すグラフ

【図9】各温度で熱処理を行った後の電極の表面状態を示す光学顕微鏡の図面代用写真

【図10】(a)および(b)は、それぞれ、 $800^\circ\text{C}$ および $900^\circ\text{C}$ で熱処理した場合

50

のGaN層のフォトルミネッセンス測定結果を示すグラフ

【図11】(a)および(b)は、SIMS分析による電極構造(Mg/Pt)におけるMgの深さ方向のプロファイル図

【図12】(a)および(b)は、SIMS分析による電極構造(Mg/Pt)におけるGaの深さ方向のプロファイル図

【図13】(a)および(b)は、SIMS分析による電極構造(Mg/Pt)におけるNの深さ方向のプロファイル図

【図14】(a)および(b)は、m面GaN層上にMg層を形成した電極構造(Mg/Pt)の断面透過電子顕微鏡(TEM)の図面代用写真

【図15】(a)および(b)は、SIMS分析による電極構造(Mg/Pt)におけるPtの深さ方向のプロファイル図

10

【図16】(a)は、m面GaN層上にMg層を形成した熱処理前の電極構造(Mg/Pt)の断面を示す図、(b)は、熱処理後における電極構造(Mg/Pt)の断面を示す図

【図17】(a)はMg/Pt層からなる電極を用いた発光ダイオードの電流-電圧特性を示すグラフ、(b)は発光ダイオードのコンタクト抵抗の値を示すグラフ

【図18】(a)は、Au層、および、Mg/Au層からなる電極を用いた場合のコンタクト抵抗を示すグラフ、(b)および(c)はそれぞれMg/Au層およびAu層の電極の表面を示す光学顕微鏡の図面代用写真

【図19】(a)および(b)は、それぞれ、c面およびm面のGaN基板の硬度マッピングを示すグラフ

20

【図20】白色光源の実施形態を示す断面図

【図21】本発明の他の実施形態に係る窒化ガリウム系化合物半導体発光素子100aを示す断面図

【図22】(a)は、GaN系化合物半導体の結晶構造(ウルツ鉱型結晶構造)を模式的に示す図であり、(b)は、m面の法線と、+c軸方向およびa軸方向との関係を示す斜視図

【図23】(a)および(b)は、それぞれ、GaN系化合物半導体層の主面とm面との配置関係を示す断面図

【図24】(a)および(b)は、それぞれ、p型GaN系化合物半導体層の主面とその近傍領域を模式的に示す断面図

30

【図25】m面から-c軸方向に1°傾斜したp型半導体領域の断面TEM写真

【図26】m面から-c軸方向に0°、2°、または5°傾斜したp型半導体領域の上にMg/Pt層の電極を形成し、そのコンタクト抵抗( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )を測定した結果を示すグラフ

【発明を実施するための形態】

【0048】

以下、図面を参照しながら、本発明の実施の形態を説明する。以下の図面においては、説明の簡潔化のため、実質的に同一の機能を有する構成要素を同一の参照符号で示す。なお、本発明は以下の実施形態に限定されない。

40

【0049】

図3(a)は、本発明の実施形態に係る窒化物系半導体発光素子100の断面構成を模式的に示している。図3(a)に示した窒化物系半導体発光素子100は、GaN系半導体からなる半導体デバイスであり、窒化物系半導体積層構造を有している。

【0050】

本実施形態の窒化物系半導体発光素子100は、m面を表面12とするGaN系基板10と、GaN系基板10の上に形成された半導体積層構造20と、半導体積層構造20の上に形成された電極30とを備えている。本実施形態では、半導体積層構造20は、m面成長によって形成されたm面半導体積層構造であり、その表面はm面である。なお、r面サファイア基板にはa面GaNが成長するという事例もあることから、成長条件によっ

50

ては必ずしもGa<sub>a</sub>N系基板10の表面がm面であることが必須とならない。本発明の構成においては、少なくとも半導体積層構造20のうち、電極と接触するp型半導体領域の表面がm面であればよい。

#### 【0051】

本実施形態の窒化物系半導体発光素子100は、半導体積層構造20を支持するGa<sub>a</sub>N基板10を備えているが、Ga<sub>a</sub>N基板10に代えて他の基板を備えていても良いし、基板が取り除かれた状態で使用されることも可能である。

#### 【0052】

図3(b)は、表面がm面である窒化物系半導体の断面(基板表面に垂直な断面)における結晶構造を模式的に示している。Ga原子と窒素原子は、m面に平行な同一原子面上に存在するため、m面に垂直な方向に分極は発生しない。すなわち、m面は非極性面であり、m面に垂直な方向に成長した活性層内ではピエゾ電界が発生しない。なお、添加されたInおよびAlは、Gaのサイトに位置し、Gaを置換する。Gaの少なくとも一部がInやAlで置換されていても、m面に垂直な方向に分極は発生しない。

#### 【0053】

m面を表面に有するGa<sub>a</sub>N系基板は、本明細書では「m面Ga<sub>a</sub>N系基板」と称される。m面に垂直な方向に成長したm面窒化物系半導体積層構造を得るには、典型的には、m面Ga<sub>a</sub>N基板を用い、その基板のm面上に半導体を成長させればよい。Ga<sub>a</sub>N系基板の表面の面方位が、半導体積層構造の面方位に反映されるからである。しかし、前述したように、基板の表面がm面である必要は必ずしもなく、また、最終的なデバイスに基板が残っている必要も無い。

#### 【0054】

参考のために、図3(c)に、表面がc面である窒化物系半導体の断面(基板表面に垂直な断面)における結晶構造を模式的に示す。Ga原子と窒素原子は、c面に平行な同一原子面上に存在しない。その結果、c面に垂直な方向に分極が発生する。c面を表面に有するGa<sub>a</sub>N系基板を、本明細書では「c面Ga<sub>a</sub>N系基板」と称する。

#### 【0055】

c面Ga<sub>a</sub>N系基板は、Ga<sub>a</sub>N系半導体結晶を成長させるための一般的な基板である。c面に平行なGaの原子層と窒素の原子層の位置がc軸方向に僅かにずれているため、c軸方向に沿って分極が形成される。

#### 【0056】

再び、図3(a)を参照する。m面Ga<sub>a</sub>N系基板10の表面(m面)12の上には、半導体積層構造20が形成されている。半導体積層構造20は、Al<sub>a</sub>In<sub>b</sub>Ga<sub>c</sub>N層(a + b + c = 1, a ≥ 0, b ≥ 0, c ≥ 0)を含む活性層24と、Al<sub>d</sub>Ga<sub>e</sub>N層(d + e = 1, d ≥ 0, e ≥ 0)26とを含んでいる。Al<sub>d</sub>Ga<sub>e</sub>N層26は、活性層24を基準にしてm面12の側とは反対の側に位置している。ここで、活性層24は、窒化物系半導体発光素子100における電子注入領域である。

#### 【0057】

本実施形態の半導体積層構造20には、他の層も含まれており、活性層24と基板10との間には、Al<sub>u</sub>Ga<sub>v</sub>In<sub>w</sub>N層(u + v + w = 1, u ≥ 0, v ≥ 0, w ≥ 0)22が形成されている。本実施形態のAl<sub>u</sub>Ga<sub>v</sub>In<sub>w</sub>N層22は、第1導電型(n型)のAl<sub>u</sub>Ga<sub>v</sub>In<sub>w</sub>N層22である。また、活性層24とAl<sub>d</sub>Ga<sub>e</sub>N層26との間に、アンドープのGa<sub>a</sub>N層を設けてもよい。

#### 【0058】

Al<sub>d</sub>Ga<sub>e</sub>N層26において、Alの組成比率dは、厚さ方向に一様である必要は無い。Al<sub>d</sub>Ga<sub>e</sub>N層26において、Alの組成比率dが厚さ方向に連続的または段階的に変化していても良い。すなわち、Al<sub>d</sub>Ga<sub>e</sub>N層26は、Alの組成比率dが異なる複数の層が積層された多層構造を有していても良いし、ドーパントの濃度も厚さ方向に変化していてもよい。なお、コンタクト抵抗低減の観点から、Al<sub>d</sub>Ga<sub>e</sub>N層26の最上部(半導体積層構造20の上面部分)は、Alの組成比率dがゼロである層(GaN層)から構成

10

20

30

40

50

されていることが好ましい。このとき、後述するMg層32はGaN層と接することになる。また、Al組成dはゼロでなくてもよい。Al組成dを0.05程度とした、 $Al_{0.05}Ga_{0.95}N$ を用いることもできる。このとき、後述するMg層32は、この $Al_{0.05}Ga_{0.95}N$ 層と接することになる。

#### 【0059】

半導体積層構造20の上には、電極30が形成されている。本実施形態の電極30は、MgからなるMg層32を含む電極であり、Mg層32の上には、PtからなるPt層が形成されている。電極30におけるMg層32は、半導体積層構造20のp型半導体領域に接触しており、p型電極（p側電極）の一部として機能する。本実施形態では、Mg層32は、第2導電型（p型）のドーパントがドーピングされた $Al_dGa_eN$ 層26に接触して

10

#### 【0060】

Mg層32の表面に接触する金属層34としては、例えば、Pt層の他、Auに比べるとMgと合金を形成し難い金属の層を用いることができる。逆に、Mg層32と接触する金属層34として、Mgと合金を形成し易いAu（金）は好ましく無い。Mg層32は、金属層34を構成するPt等の金属との間で合金化していない。なお、「Pt等の金属との間で合金化していない」とは、%オーダー（例えば1%）未満の濃度でMg中にPt等の金属が混和している状態も含まれる。換言すれば、「Pt等の金属との間で合金化」とは、%オーダー（例えば1%）以上の濃度でPt等の金属がMg中に混和している状態を

20

#### 【0061】

なお、Mg層32と金属層34との間にMgを含む合金層が形成されていても良い。Pt、Mo、Pdは、Auに比べるとMgとの間で合金化しにくい金属であるが、後述する熱処理により、Mg層32の一部と反応して合金層が形成され得る。

#### 【0062】

なお、Mg層32の上に比較的薄い金属層を堆積した場合、熱処理後には、薄い金属層の全てがMg層におけるMgの一部と合金化する場合がある。この場合には、Mg層の上には合金層のみが存在することになる。

30

#### 【0063】

上記の各電極の上には、上述の金属層34または合金層とは別に、これらの金属以外の金属または合金からなる電極層や配線層が形成されていても良い。

#### 【0064】

本実施形態の電極30の厚さは、例えば、10～200nmである。電極30におけるMg層32の厚さは、例えば、2nm～45nmである。なお、ここでのMg層32の厚さは、熱処理後のMg層の厚さである。

#### 【0065】

また、Mg層32の上に位置する金属層34（Pt、MoおよびPdからなる群から選択される少なくとも1種類の金属からなる層）の厚さは、例えば、200nm以下（または、10nm～200nm）である。なお、Mg層32の厚さは、金属層34の厚さよりも薄いことが好ましい。Mg層32と金属層34との歪みのバランスが崩れることによるMg層32と $Al_dGa_eN$ 層26との間での剥離が生じないようにするためである。

40

#### 【0066】

また、m面の表面12を有するGaN系基板10の厚さは、例えば、100～400μmである。これはおよそ100μm以上の基板厚であればウエハのハンドリングに支障が生じないためである。なお、本実施形態の基板10は、GaN系材料からなるm面の表面12を有していれば、積層構造を有していても構わない。すなわち、本実施形態のGaN系基板10は、少なくとも表面12にm面が存在している基板も含み、したがって、基板全体がGaN系であってもよいし、他の材料との組み合わせであっても構わない。

50

## 【0067】

本実施形態の構成では、基板10の上に、n型の $\text{Al}_u\text{Ga}_v\text{In}_w\text{N}$ 層（例えば、厚さ $0.2 \sim 2 \mu\text{m}$ ）22の一部に、電極40（n型電極）が形成されている。図示した例では、半導体積層構造20のうち電極40が形成される領域は、n型の $\text{Al}_u\text{Ga}_v\text{In}_w\text{N}$ 層22の一部が露出するように凹部42が形成されている。その凹部42にて露出したn型の $\text{Al}_u\text{Ga}_v\text{In}_w\text{N}$ 層22の表面に電極40が設けられている。電極40は、例えば、Ti層とAl層とPt層との積層構造から構成されており、電極40の厚さは、例えば、 $100 \sim 200 \text{ nm}$ である。

## 【0068】

本実施形態の活性層24は、 $\text{Ga}_{0.9}\text{In}_{0.1}\text{N}$ 井戸層（例えば、厚さ $9 \text{ nm}$ ）とGaNバリア層（例えば、厚さ $9 \text{ nm}$ ）とが交互に積層されたGaInN/GaN多重量子井戸（MQW）構造（例えば、厚さ $81 \text{ nm}$ ）を有している。

10

## 【0069】

活性層24の上には、p型の $\text{Al}_d\text{Ga}_e\text{N}$ 層26が設けられている。p型の $\text{Al}_d\text{Ga}_e\text{N}$ 層26の厚さは、例えば、 $0.2 \sim 2 \mu\text{m}$ である。なお、上述したように、活性層24と $\text{Al}_d\text{Ga}_e\text{N}$ 層26との間には、アンドープのGaN層を設けてもよい。

## 【0070】

加えて、 $\text{Al}_d\text{Ga}_e\text{N}$ 層26の上に、第2導電型（例えば、p型）のGaN層を形成することも可能である。そして、そのGaN層の上に、 $\text{p}^+\text{-GaN}$ からなるコンタクト層を形成し、さらに、 $\text{p}^+\text{-GaN}$ からなるコンタクト層上に、Mg層32を形成すること

20

## 【0071】

次に、図4から図15を参照しながら、本実施形態の特徴を更に詳細に説明する。

## 【0072】

まず、図4（a）及び（b）は、m面GaNに接する金属の仕事関数（eV）と固有コンタクト抵抗（ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ）との関係を示すグラフである。さらに説明すると、図4（a）及び（b）は、Mgをドーピングしたp型GaN層（Mg濃度：約 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ）上に各種金属層（Mg層の厚さ： $2 \text{ nm}$ 、それ以外の金属層の厚さ： $200 \text{ nm}$ ）を形成し、そのコンタクト抵抗をTLM（Transmission Line Method）法を用いて評価した結果を示している。なお、縦軸に示した「 $1.0 \text{ E}-01$ 」は「 $1.0 \times 10^{-1}$ 」を意味し、「 $1.0 \text{ E}-02$ 」は「 $1.0 \times 10^{-2}$ 」を意味し、すなわち、「 $1.0 \text{ E}+X$ 」は、「 $1.0 \times 10^X$ 」の意味である。

30

## 【0073】

コンタクト抵抗は、一般に、コンタクトの面積 $S$ （ $\text{cm}^2$ ）に反比例する。ここで、コンタクト抵抗を $R$ （ $\Omega$ ）とすると、 $R = R_c / S$ の関係が成立する。比例定数の $R_c$ は、固有コンタクト抵抗と称され、コンタクト面積 $S$ が $1 \text{ cm}^2$ の場合のコンタクト抵抗 $R$ に相当する。すなわち、固有コンタクト抵抗の大きさは、コンタクト面積 $S$ に依存せず、コンタクト特性を評価するための指標となる。以下、「固有コンタクト抵抗」を「コンタクト抵抗」と略記する場合がある。

40

## 【0074】

図4（a）は、金属形成後、熱処理を行わない場合（as-depo）を示している。一方、図4（b）は、Mgでは $600^\circ\text{C}$ で10分間、窒素雰囲気中で熱処理を行った場合を示し、そして、Al、Au、Pd、Ni、Ptでは $500^\circ\text{C}$ で10分間、窒素雰囲気中で熱処理を行った場合の結果を示している。なお、この温度の違いは、最適熱処理温度が異なることにより、Mg以外の金属においては $500^\circ\text{C}$ で最もコンタクト抵抗が低下することに基づいている。

## 【0075】

図4（a）から理解できるとおり、各種金属の仕事関数が増加すると共に、コンタクト抵抗が低減することが見られる。これは、c面基板上にGaN系半導体素子を作製する場

50

合に、一般に、仕事関数の大きな金属（例えば、Au）がp型電極として用いられる点と一致する。

#### 【0076】

加熱処理後の結果においては、図4（b）からわかるように、Al、Au、Pd、Ni、Ptでは、各種金属の仕事関数が増加すると共に、コンタクト抵抗が低減することが見られる。しかしながら、Mgは仕事関数が小さい金属であるにもかかわらず、急激なコンタクト抵抗の低下が見られることが分かった。なお、図4（b）のグラフに、Mg以外の各種金属の傾向を示す点線を追加したものを図4（c）に示す。従来の技術的常識によれば、熱処理を行なわない場合においてMgは評価を行った金属の中では最も仕事関数が小さな金属であるため、コンタクト抵抗は大きくなることが推測されるが、逆にMgは熱処理によって急激なコンタクト抵抗の減少を示すことが分かった。

10

#### 【0077】

図5（a）は、Mg/Pt電極（Mg上にPtを形成）におけるMg層厚と固有コンタクト抵抗との関係を示すグラフである。ここで、Pt層の厚さ（熱処理前）は75nmに固定されている。図5（b）は、比較のため、Pd/Pt電極（Pd厚さ40nm、Pt厚さ：35nm）の固有コンタクト抵抗を示すグラフである。グラフの横軸は熱処理温度である。Mg層以外の金属層の厚さは、いずれも、熱処理前の厚さである。

#### 【0078】

図5（a）に示すデータは、パルス蒸着法を用いてMg層を堆積したサンプルから得たものである。パルス蒸着法については後述する。図5（b）に示すデータは、通常の電子ビーム蒸着法を用いてPd、Pt層を堆積したサンプルから得たものである。本願明細書における本発明の実施例では、いずれも、Mg層をパルス蒸着法によって堆積している。なお、本願明細書では、c面GaN層上のMg層もパルス蒸着法によって堆積しているが、Mg以外の金属（Pd、Pt、Au）は、いずれも、通常の電子ビーム蒸着法によって堆積したものである。

20

#### 【0079】

Mg/Pt電極、およびPd/Pt電極は、Mgがドーピングされたm面GaN層に接触している。これらの電極が接触するm面GaN層では、表面から深さ20nmの領域（厚さ20nmの最表面領域）に $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ のMgがドーピングされている。また、m面GaN層の表面からの深さが20nmを超える領域には、 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ のMgがドーピングされている。このように、p型電極が接触するGaN層の最表面領域においてp型不純物の濃度を局所的に高めると、コンタクト抵抗を最も低くすることができる。また、このような不純物ドーピングを行なうことにより、電流-電圧特性の面内ばらつきも低減するため、駆動電圧のチップ間ばらつきを低減できるという利点も得られる。このため、本願に開示している実験例では、いずれも、電極が接触するp型GaN層の表面から深さ20nmの領域に $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ のMgをドーピングし、それよりも深い領域には $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ のMgをドーピングしている。なお、図4（b）に示すMgのコンタクト抵抗が、図5（a）に示すMgのコンタクト抵抗よりも高くなっている理由は、図4（b）の例では、Mgドーピング量を表面で局所的に高めるといった処理を行っていないためである。

30

#### 【0080】

図5（a）のグラフにおける横軸は、熱処理後のMg層の厚さを示す。後述するように、透過電子顕微鏡の評価によると、熱処理後におけるMg層の厚さは熱処理前に比べて減少する。熱処理（600℃、10分）前のMg層の厚さが7nmの場合、熱処理後におけるMg層の厚さは2nmとなっていた。同様に、熱処理（600℃、10分）前のMg層の厚さが50nm、20nmの場合、熱処理後におけるMg層の厚さは、各々45nm、15nmとなっていた。

40

#### 【0081】

図5（a）のグラフには、600℃、10分の熱処理を行ったサンプルについて、コンタクト抵抗の測定値とMg厚さとの関係を示す実験結果が記載されている。他の熱処理条件のもとでも、コンタクト抵抗のMg層厚依存性は同様の傾向にあることを実験で確認し

50

た。

【0082】

本発明者の実験によると、Mg層厚が45nmを超えて厚くなると、m面GaN層に対するMg/Pt電極のコンタクト抵抗は、m面GaN層に対するPd/Pt電極のコンタクト抵抗（図5（b）に示されている）とほぼ同程度の大きさとなるため、従来例に対する優位性が見られなかった。一方、図5（a）に示すように、Mg層厚が45nm以下になると、m面GaN上のPd/Pt電極よりもコンタクト抵抗が低くなり、本発明の優位性が確認された。

【0083】

Mg層厚が45nm以下の範囲においては、Mg層厚が減少するほど、コンタクト抵抗も減少することが観測された。Mg層厚が15nm付近から層厚の減少と共に急激なコンタクト抵抗の減少が観測された。Mg層厚が2nm付近で最も低いコンタクト抵抗が得られた。

10

【0084】

以上のことから、熱処理を含む全ての製造工程を経て最終的に得られる半導体素子におけるMg層32の厚さは、45nm以下であることが好ましく、2nm～15nmの範囲内にあることが更に好ましい。

【0085】

図6（a）～（c）は、それぞれ、Mg層厚が2nm、15nm、および45nmにおける熱処理後の電極の表面状態を示す写真である。ここで、Mg層厚は、600℃10分の熱処理後における値である。

20

【0086】

図6（c）に示すように、Mg層厚が45nmのサンプルでは、電極表面荒れ（凹凸）が観測された。電極表面荒れは、Mg層厚が45nmを超えて大きくなるとコンタクト抵抗が増加することの要因になっていると考えられる。また、Mg層厚が45nmを超えると、部分的にMg層が浮き上がる現象も見られた。透過電子顕微鏡の観察から、Mg層とGaN層との界面で空隙が生じていることも確認された。これは、Mg層厚が45nmを超えて大きくなると、Mg層の歪が増大し、MgとGaNとの界面でMg層の剥離が生じたものと考えられる。以上のことから、Mg層の厚さは45nm以下に設定することが好ましい。

30

【0087】

なお、Mg層厚が約15nm以下になると、電極表面の平坦性は極めて良くなる。このため、Mg層厚は15nm以下であることがより好ましい。

【0088】

図7はMg/Pt電極およびPd/Pt電極の各々コンタクト抵抗について、接触面がm面の場合とc面の場合のコンタクト抵抗（測定値）を比較して示すグラフである。いずれのサンプルでも、電極はp型GaN層に接触している。このp型GaN層には、前述した濃度分布を有するMgがドーピングされている。

【0089】

熱処理前における各層の厚さは、以下の表1に示す通りである。

40

【0090】

【表 1】

| 面方位 | p 型電極     | 厚さ (熱処理前)         |
|-----|-----------|-------------------|
| m 面 | M g / P t | 7 n m / 7 5 n m   |
| m 面 | P d / P t | 4 0 n m / 3 5 n m |
| c 面 | M g / P t | 7 n m / 7 5 n m   |
| c 面 | P d / P t | 4 0 n m / 3 5 n m |

10

【0091】

また、熱処理温度および熱処理時間は以下の表 2 に示す通りである。

【0092】

【表 2】

| 面方位 | p 型電極     | 熱処理温度と時間        |
|-----|-----------|-----------------|
| m 面 | M g / P t | 6 0 0 ° C 1 0 分 |
| m 面 | P d / P t | 5 0 0 ° C 1 0 分 |
| c 面 | M g / P t | 6 0 0 ° C 1 0 分 |
| c 面 | P d / P t | 5 0 0 ° C 1 0 分 |

20

【0093】

図 7 から明らかなように、M g / P t 電極によれば、接触面が c 面の場合でも、P d / P t 電極に比べてコンタクト抵抗の若干の低減が観測された。しかし、m 面の場合、M g / P t 電極のコンタクト抵抗は、顕著に低下していることが判明した。

【0094】

30

次に、図 8 を参照しながら、コンタクト抵抗について熱処理温度の依存性を説明する。図 8 は、p 型の G a N 層の m 面（以下、「m 面 G a N」と表記する）上に、M g 層、その上に P t 層を形成した場合（すなわち、m 面 G a N (M g / P t)）の結果を示している。また、対比として、p 型の m 面 G a N 層上に P d 層、その上に P t 層を形成した場合（m 面 G a N (P d / P t)）、そして、p 型の G a N 層の c 面（以下、「c 面 G a N」と表記する）上に P d 層、その上に P t 層を形成した場合（c 面 G a N (P d / P t)）の結果も示している。p 型 G a N 層には、いずれも、前述した濃度分布を有するように M g がドーピングされている。

【0095】

熱処理前における各層の厚さは、以下の表 3 に示す通りである。

40

【0096】

【表 3】

| 面方位 | p 型電極     | 厚さ                |
|-----|-----------|-------------------|
| m 面 | M g / P t | 7 n m / 7 5 n m   |
| m 面 | P d / P t | 4 0 n m / 3 5 n m |
| c 面 | P d / P t | 4 0 n m / 3 5 n m |

50

## 【0097】

まず、Pd/Pt層の電極の場合、m面GaNのコンタクト抵抗は、c面GaNのコンタクト抵抗と比較して高い値となる。そして、m面およびc面GaNのいずれも500℃を超える熱処理温度においては、コンタクト抵抗の上昇が見られる。

## 【0098】

一方、m面GaN (Mg/Pt) の電極は、熱処理を行なわないときは、Pd/Ptの電極と比較してコンタクト抵抗は高い。これは、仕事関数が小さい金属の方がコンタクト抵抗が高いという技術常識と合致する。しかしながら、m面GaN (Mg/Pt) の電極の場合、熱処理温度を上げると共に、コンタクト抵抗が小さくなり、500℃の熱処理温度の場合には、m面GaN (Mg/Pt) のコンタクト抵抗は、m面GaN (Pd/Pt) のコンタクト抵抗と同等またはそれ以下となる。

10

## 【0099】

加えて、500℃を超えた温度（例えば、600℃）になると、m面GaN (Mg/Pt) のコンタクト抵抗は更に低下して、c面GaN (Mg/Pt) のコンタクト抵抗と同等となり、さらにはそれ以下になる。図8に示したグラフでは、おおよそ550℃以上になると、m面GaN (Mg/Pt) のコンタクト抵抗は、c面GaN (Mg/Pt) のコンタクト抵抗の値以下（またはそれ未満）になる。

## 【0100】

600℃の温度では、m面GaN (Mg/Pt) のコンタクト抵抗は、600℃の温度でのm面およびc面GaN (Mg/Pt) のいずれのコンタクト抵抗よりも低くなり、具体的には、約 $1.0 \times 10^{-2} \Omega \text{cm}^{-2}$ 又はその周辺まで低下する。また、700℃の温度では、m面GaN (Mg/Pt) のコンタクト抵抗は、600℃の温度の場合よりも上昇するものの、700℃の温度でのm面およびc面GaN (Mg/Pt) のいずれのコンタクト抵抗よりも低くなる。

20

## 【0101】

したがって、m面GaN (Mg/Pt) の熱処理温度としては、例えば、500℃以上が好ましい。700℃を超えて所定温度（例えば800℃）以上になると、電極やGaN層の膜質の劣化が進むため、上限は700℃以下が好ましい。そして、600℃近傍（例えば、600℃ $\pm$ 50℃）がより好適な熱処理温度である。

## 【0102】

次に、各温度で熱処理を行った後の電極の表面状態を示す写真を図9に示す。図9では、As-depo（熱処理を行なわない場合）、熱処理温度500℃、600℃、700℃の結果を示している。

30

## 【0103】

図9からわかるように、p型のc面GaN層の上にPd層、その上にPt層を形成した場合（C-GaN (Pd/Pt) の場合）は、500℃、600℃、700℃のどの熱処理においても金属表面の劣化は見られない。AFM測定による表面の算術平均粗さ（Ra）は500℃で約2nm、600℃で約2nm、700℃で約4nmとなった。

## 【0104】

一方、p型のm面GaN層の上にPd層、その上にPt層を形成した場合（M-GaN (Pd/Pt) の場合）は、600℃、700℃の熱処理において金属表面の荒れが見られ、劣化が認められる。AFM測定によるRaは600℃で約30nm、700℃で約77nmとなった。すなわち、熱処理による電極の劣化が、m面GaNの電極に特有な課題であることがわかる。

40

## 【0105】

そして、p型のm面GaN層の上にMg層、その上にPt層を形成した場合（M-GaN (Mg/Pt) の場合）は、700℃の熱処理温度では僅かに凹凸は見られるものの、500℃、600℃、700℃の全ての熱処理温度において電極が劣化しないことが確認された。AFM測定による表面のRaは500℃で約1.5nm、600℃で約1.5nm、700℃で約4.5nmとなり、良好な表面状態が得られた。そして、本実施形態の

50

構成において、電極の表面のRaは、約4.5nm以下であることが好ましく、約1.5nm以下であることがさらに好ましい。

#### 【0106】

さらに、GaN層上にMg層(30nm)を形成し、800℃および900℃で10分間熱処理した場合のGaN層のフォトルミネッセンス測定結果を図10に示す。図10(a)は、800℃で熱処理した結果を示し、そして、図10(b)は、900℃で熱処理した結果を示している。図10(a)及び(b)中の縦軸のPL強度は、フォトルミネッセンス強度の意味である。図10(a)および(b)のグラフには、それぞれ、熱処理前に得られたPL強度(「Ref」と表記する曲線)が示されている。

#### 【0107】

まず、本願発明者の実験によると、700℃以下の熱処理では、熱処理前と後でフォトルミネッセンスのスペクトルの変化は見られなかった。一方、図10(a)に示すように、800℃の場合では、530nm付近にイエローバンドと呼ばれる、空孔欠陥に起因すると考えられる発光が見られるようになる。さらに熱処理温度を上げると、図10(b)に示すように、530nm付近の発光は強度を増し、空孔欠陥の密度の増加を示す。これよりMg層を用いた電極における熱処理温度は、GaNの品質の保持という観点から、700℃以下にすることが望ましい。

#### 【0108】

次に、図11に、電極構造(Mg/Pt)においてMg原子の深さ方向のプロファイルを、SIMS(Secondary Ion-microprobe Mass Spectrometer)を用いて得た結果を示す。図11(a)は、Mg層をGaN層上に形成した構成(Mg/Pt電極)において、熱処理を行わない場合(as-depo)の結果を示し、一方、図11(b)は、熱処理後の結果を示している。なお、熱処理の温度および時間は、c面GaNの場合に600℃で10分、m面GaNの場合に600℃で10分および630℃で10分である。

#### 【0109】

いずれの電極においても、熱処理前におけるMg層厚は7nmであり、Pt層厚は75nmである。

#### 【0110】

図11(a)、図11(b)のグラフの縦軸は、Mg濃度であり、横軸は、深さ方向の距離である。横軸の数値が「-」の領域は電極側であり、「+」の領域はp型GaN側である。横軸の原点(0μm)は、Mgのピーク位置であり、p型GaN層とMg層との界面の位置にほぼ相当する。これらの事項は、後に説明する図12、図13、図15のグラフでも同様である。

#### 【0111】

図11(a)、(b)のグラフにおいて、「◆」は、c面GaN上に形成した熱処理温度が600℃のサンプルに関するデータを示している。また、グラフ中の「△」は、m面GaN上に形成した熱処理温度が600℃のサンプルに関するデータを示し、「○」は、m面GaN上に形成した熱処理温度が630℃のサンプルに関するデータを示している。後述する図12、図13、図15のグラフにおいても、同様である。なお、熱処理前のp型GaN層には、いずれも、前述した通り、電極が接触するp型GaN層の表面から深さ20nmの領域に $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ のMgがドーピングされ、それよりも深い領域には $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ のMgがドーピングされている。

#### 【0112】

図11(a)に示すように、as-depoの場合は、m面GaNにおいても、c面GaNにおいてもMgのプロファイルに変化は無い。一方、図11(b)に示すように、GaN層の上にMg層を形成後に熱処理を行った場合には、それぞれ、Mgのプロファイルは大きく異なるものとなった。

#### 【0113】

熱処理を行った場合には、図11(b)に示すように、c面GaN上のMgは、p型G

10

20

30

40

50

a N層にかなりの濃度で拡散していることが見られる。また、P t層にもM gが拡散していることが見られる。一方、m面G a N上のM gは、p型G a N層にも、P t層にも拡散はほとんどしていないことが確認される。さらに詳述すると、c面G a Nの場合、熱処理後にはM gがP t層に奥深く拡散し、そして、G a N側にも奥深く拡散している。一方、m面G a Nの場合、熱処理後にはM gがP t層側に僅かに拡散するものの、G a N側には殆ど拡散しないものであった。これは、600℃であっても630℃であってもほとんど差異が無かった。このように、熱処理の前と後で、c面G a N上のM gの拡散と、m面G a N上のM gの拡散との間に顕著な差が生じる。その理由は未だ不明であるが、c面とm面との最表面原子の配列、極性の違いや原子の緻密さに起因するものと推測される。

#### 【0114】

10

図12は、電極構造(M g/P t)においてG a原子の深さ方向のプロファイルを、S I M Sを用いて得た結果を示す。熱処理前におけるM g層厚は7nmであり、P t層厚は75nmである。グラフの縦軸は原子濃度と比例関係にある、S I M Sの検出器の信号強度を示す。図12における横軸の距離0μmはp型G a N層とM g層との界面の位置にほぼ相当する。なお、横軸の原点(0μm)は、M gピークの位置に合わせた。横軸の数値が「-」の領域は電極側であり、「+」の領域はp型G a N側である。縦軸は、a s - d e p oのG a N結晶中のG a濃度を1として規格化している。また母体の原子密度から算定すると、縦軸の強度の $1 \times 10^{-3}$ は濃度として $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ にほぼ相当する。

#### 【0115】

図12(a)は、M g層をG a N層上に形成した構成(M g/P t電極)において、熱処理を行わない場合(a s - d e p o)の結果を示し、一方、図12(b)は、熱処理後の結果を示している。なお、図12(b)では、熱処理温度が600℃と630℃との2種類の結果を示している。熱処理の温度および時間は、c面G a Nの場合に600℃で10分、m面G a Nの場合に600℃で10分および630℃で10分である。

20

#### 【0116】

図12(a)に示すように、a s - d e p oの場合は、m面G a Nにおいても、c面G a NにおいてもG aのプロファイルに変化は無い。一方、図12(b)に示すように、G a N層の上にM g層を形成後に熱処理を行った場合には、G aのプロファイルは異なるものとなった。

#### 【0117】

30

具体的には、図12(b)に示すように、熱処理を行った場合はM g層中にG aが拡散していることが確認された。m面G a N上にM g層を形成して600℃で熱処理を行った試料では、M g層中にG aの拡散が認められ、コンタクト抵抗も低くなる。その原因の詳細は不詳ではあるが、M g層中のG a拡散量とコンタクト抵抗との間の相関があることが確認された。

#### 【0118】

さらに詳述すると、c面G a Nの場合は、G aがM g層およびP t層中に拡散し、G a N結晶中の奥からもG aが電極中に移動している。換言すると、c面G a Nの場合、G aは全体的にG a N層から電極中に顕著に拡散している。一方、m面G a Nでは、熱処理温度が600℃の場合、c面G a Nとは異なり、界面近傍のみでG a原子が移動しているようである。c面と比べてm面では原子が動きにくい状況にあると推測される。ただし、m面G a Nの場合でも、熱処理温度が630℃の場合は、G aがM g層およびP t層の全体に拡散している。なお、m面コンタクト抵抗は熱処理温度が600℃の場合の方が630℃の場合よりも低い。これは、熱処理温度が600℃の場合、後述するようにm面では窒素が拡散しにくく、その結果、G aの空孔がアクセプターとして機能するのに対し、熱処理温度が630℃の場合は、600℃の場合に比べ、より多くの窒素原子が電極側へ拡散するためではないかと考えられる。

40

#### 【0119】

図13(a)は、熱処理前のM g/P t電極における窒素原子の深さ方向プロファイルを示すグラフであり、図13(b)は、熱処理後におけるM g/P t電極における窒素原

50

子の深さ方向プロファイルを示すグラフである。熱処理前におけるMg層厚は7nmであり、Pt層厚は75nmである。図13(a)、図13(b)のグラフの縦軸は、N強度であり、横軸は、深さ方向の距離である。 $1 \times 10^{-3}$ のN強度は $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ のN濃度にほぼ相当する。横軸の数値が「-」の領域は電極側であり、「+」の領域はp型GaN側である。横軸の原点(0μm)は、p型GaN層とMg層との界面の位置にほぼ相当する。電極の構造およびp型GaNのドーピング条件は、図11を参照して説明したサンプルにおけるものと同様である。

#### 【0120】

蒸着後、熱処理を行なわないサンプルでは、図13(a)に示すように、c面GaNに対する電極およびm面GaNに対する電極の両方において、いずれも窒素原子が電極側に拡散していないことがわかる。

10

#### 【0121】

一方、熱処理後におけるc面GaNに対する電極では、図13(b)に示すように、窒素原子が電極側に拡散していることが確認された。しかし、熱処理後におけるm面GaNに対する電極では、窒素原子は電極側にほとんど拡散していない。すなわち、m面GaNでは、Ga原子のみが電極側に拡散し、窒素原子は拡散していない。これに対し、c面GaNでは、Ga原子も窒素原子も電極側に拡散している。p型GaNにおいてGaが電極側に拡散すると、p型GaNの最表面でGa原子が不足する状態、すなわちGa空孔が形成される。Ga空孔はアクセプター的な性質を有するため、電極とp型GaNとの界面の近傍でGa空孔が増加すると、この界面のショットキー障壁を正孔がトンネリングによって通過しやすくなる。しかし、Ga原子とともに窒素原子も電極側に拡散すると、p型GaNの最表面に窒素の不足する状態、すなわち窒素空孔も形成される。窒素空孔はドナー的な性質を有し、Ga空孔との間で電荷補償を起こす。このため、c面GaNのようにGaのみならず窒素も電極側に拡散すると、コンタクト抵抗の低下は特に生じなくなる。

20

#### 【0122】

次に、Mg層におけるN(窒素)濃度とGa濃度との関係について詳述する。図12(b)に示すように、600℃にて熱処理を行った場合、m面GaN層上のMg層におけるGaのSIMS検出濃度は $4 \times 1.0 \text{ E}-02$ となった。SIMSの検出強度はその原子濃度に比例する。従って、GaN層の母体のGa濃度が $1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ 程度と仮定した場合、Mg層中に $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 程度のGaが存在しているものと考えられる。630℃にて熱処理を行った場合は、SIMSの検出強度は $3 \times 1.0 \text{ E}-02$ となった。同様の仮定により、m面GaN層上のMg層中には $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 程度のGaが存在するものと考えられる。

30

#### 【0123】

一方、図13(b)に示すように、600℃及び630℃で熱処理を行った場合のどちらも、m面GaN層上のMg層におけるN(窒素)のSIMS検出濃度は、検出感度の限界である $1 \times 1.0 \text{ E}-03$ となった。同様の仮定により、m面GaN層上のMg層中に含まれるN(窒素)は $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以下と考えられる。以上より、m面GaN層上のMg層中のGa原子濃度は、N原子濃度より1桁(10倍)以上大きい。

#### 【0124】

40

これに対し、c面GaN層上のMg層では、Ga及びNは、SIMS検出強度はいずれも $1 \text{ E}-2$ であり、いずれも $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 程度存在するものと考えられる。すなわち、c面GaN層上のMg層中におけるGa原子とN原子の濃度はほぼ同程度である。

#### 【0125】

なお、このような各元素(Mg、Ga、N、Pt)の挙動は、Mg層が接触するGaN層において、Gaの一部がAlやInで置換されていても同様に生じると推定される。また、Mg層が接触するGaN系半導体層中にドーパントとしてMg以外の元素がドーブされている場合でも同様であると推定される。

#### 【0126】

次に、図14に、m面GaN層上にMg層を形成した電極構造(Mg/Pt)の断面透

50

過電子顕微鏡 (TEM) 写真を示す。図 14 (a) は、熱処理を行わない場合 (as-depo) の結果を示している。図 14 (b) は、600℃で10分間の熱処理後の結果を示している。

#### 【0127】

この例では、図 14 (a) に示すように、7 nm 厚の Mg 層を GaN 結晶上に形成した。図 14 (b) に示すように、熱処理後は Pt 層が Mg 層に浸食し、Mg 層の厚さが 2 nm となった。

#### 【0128】

図 14 (b) からわかるように、Mg 層 (図 3 (a) 中の層 32) の厚さは薄い (例えば、2 nm) とはいえ、Pt 層 (図 3 (a) 中の層 34) によって合金化ないしは吸収されていない Mg からなる Mg 層 (図 3 (a) 中の層 32) の存在が確認された。この薄層の Mg 層 (32) の存在が、従来技術では非常にコンタクト抵抗が大きかった m 面 GaN のコンタクト抵抗を低減できる主要な要因の一つと推測される。

#### 【0129】

次に、図 15 に、電極構造 (Mg/Pt) において Pt の深さ方向のプロファイルを、SIMS を用いて得た結果を示す。図 15 (a) および (b) は、上述の SIMS と同様に、それぞれ、熱処理を行わない場合 (as-depo)、および、熱処理後の結果である。熱処理前における Mg 層厚は 7 nm であり、Pt 層厚は 75 nm である。図 15 (a)、(b) のグラフの縦軸は、Pt 強度であり、横軸は、深さ方向の距離である。 $1 \times 10^{-3}$  の Pt 強度は  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  の Pt 濃度にほぼ相当する。横軸の数値が「-」の領域は電極側であり、「+」の領域は p 型 GaN 側である。横軸の原点 (0  $\mu\text{m}$ ) は、p 型 GaN 層と Mg 層との界面の位置にほぼ相当する。電極の構造および p 型 GaN のドーピング条件は、図 11 を参照して説明したサンプルにおけるものと同様である。

#### 【0130】

図 15 (a) に示すように、as-depo の場合は、m 面 GaN においても、c 面 GaN においても Pt のプロファイルに変化は無い。一方、図 15 (b) に示すように、熱処理後は、c 面 GaN において Pt は GaN 側に拡散していることがわかる。しかしながら、m 面 GaN においては Pt プロファイルに変化はほとんど無く、GaN 層中に Pt が拡散していないことが確認された。より詳述すると、c 面 GaN の場合、熱処理後において Pt は Mg 層側に大きく拡散する。一方、m 面 GaN の場合、熱処理後において Pt は Mg 層側に僅かに拡散しただけであった (c 面 GaN の 1/10 程度)。熱処理温度が 600℃であっても 630℃でもほとんど差異が無かった。

#### 【0131】

このことは、本実施形態の構成 (Mg/Pt) においては、GaN 層と接触する領域においては Mg との合金化が Au の場合と比較して顕著には起こっていないことを意味している。

#### 【0132】

m 面 GaN 上に厚さ 2 nm の Mg 層を形成した後、600℃で10分間の熱処理を行った試料を作製した。この試料の断面について、透過電子顕微鏡 (TEM) による観察を行った。図 16 (a) は、熱処理前における Mg/Pt 電極構造を示す模式図である。図 16 (b) は、熱処理前における Mg/Pt 電極構造を示す模式図である。いずれの図面も、断面 TEM に基づいて作成した。

#### 【0133】

Mg 層の堆積時の厚さが 5 nm を超える場合、600℃で10分間の熱処理によって Mg 層の厚さは減少するが、熱処理の後でも Mg 層は実質的に連続した膜として存在する。しかし、Mg 層の堆積時の厚さが 2 nm 程度になると、600℃で10分間の熱処理の後、図 16 (b) に示すように、Mg と Pt との合金形成に消費されなかった Mg がアイランド状に存在する場合のことが確認された。堆積直後の Mg 層の厚さが 2 nm 程度になると、行なう熱処理の条件によって、最終的に得られる Mg 層のモフォロジーは多様であり得る。

10

20

30

40

50

## 【0134】

なお、本明細書における「Mg層」とは、p型半導体領域の表面に存在する多数のアイランド状（島状）Mgの集まりをも含むものとする。また、この「Mg層」は、複数の開口部が存在する膜（例えばポーラスな膜）から構成されていても良い。このように、Ptに浸食されないMgがp型半導体領域の表面（m面）と接触していれば、コンタクト抵抗低減効果を十分に得ることができる。

## 【0135】

なお、Pt層の代わりに、Mo層またはPd層をMg層上に堆積した場合も、ほぼ同様の結果（コンタクト抵抗低減効果）が得られると考えられる。コンタクト抵抗低減効果を得るといふ観点から重要な点は、Mg層とGaN系半導体とが接触することと、Mg層上の金属がAuと比較してMgと合金を形成し難い材料から形成されていることにある。

10

## 【0136】

次に、再び図3（a）を参照しながら、本実施形態の構成をさらに詳述する。

## 【0137】

図3（a）に示すように、本実施形態の発光素子100では、m面GaN基板10と、基板10上に形成された $Al_uGa_vIn_wN$ 層（ $u+v+w=1$ ， $u \geq 0$ ， $v \geq 0$ ， $w \geq 0$ ）22とが形成されている。この例では、m面GaN基板10は、n型GaN基板（例えば、厚さ、100 $\mu m$ ）であり、 $Al_uGa_vIn_wN$ 層22は、n型GaN層（例えば、厚さ2 $\mu m$ ）である。 $Al_uGa_vIn_wN$ 層22の上には活性層24が形成されている。言い換えると、m面GaN基板10の上には、少なくとも活性層24を含む半導体積層構造20が形成されている。

20

## 【0138】

半導体積層構造20において、 $Al_xGa_yIn_zN$ 層22の上には、 $Al_aIn_bGa_cN$ 層（ $a+b+c=1$ ， $a \geq 0$ ， $b \geq 0$ ， $c \geq 0$ ）を含む活性層24が形成されている。活性層24は、例えば、In組成比が約25%のInGa<sub>0.75</sub>N井戸層とGaNバリア層で構成され、井戸層の厚さは9nm、バリア層の厚さは9nm、井戸層周期は3周期である。活性層24の上には、第2導電型（p型）の $Al_dGa_eN$ 層（ $d+e=1$ ， $d \geq 0$ ， $e \geq 0$ ）26が形成されている。第2導電型（p型）の $Al_dGa_eN$ 層（ $d+e=1$ ， $d \geq 0$ ， $e \geq 0$ ）26は例えば、Al組成比が10%のAlGa<sub>0.9</sub>N層で厚さは0.2 $\mu m$ である。本実施形態の $Al_dGa_eN$ 層26には、p型のドーパントとして、Mgがドーパされている。ここでMgは、 $Al_dGa_eN$ 層26に対して、例えば、 $10^{18} cm^{-3}$ 程度ドーパされている。またこの例では、活性層24と $Al_dGa_eN$ 層26との間に、アンドープのGaN層（不図示）が形成されている。

30

## 【0139】

さらに、この例においては、 $Al_dGa_eN$ 層26の上には、第2導電型（例えば、p型）のGaN層（不図示）が形成されている。さらに、 $p^+$ -GaNからなるコンタクト層上には、Mg層32が形成されており、その上にPt層34が形成されている。このMg層32とPt層34の積層構造が電極（p型電極）30となる。

## 【0140】

なお、半導体積層構造20には、 $Al_uGa_vIn_wN$ 層22の表面を露出させる凹部（リセス）42が形成されており、凹部42の底面に位置する $Al_uGa_vIn_wN$ 層22には、電極（n型電極）40が形成されている。凹部42の大きさは、例えば、幅（または径）20 $\mu m$ であり、深さは1 $\mu m$ である。電極40は、例えば、Ti層とAl層とPt層（例えば、厚さはそれぞれ、5nm、100nm、10nm）の積層構造から成る電極である。

40

## 【0141】

本実施形態の窒化物系半導体発光素子100によれば、動作電圧（ $V_{op}$ ）を、従来のPd/Pt電極を用いたm面LEDの場合よりも約1.5V低減させることができ、その結果、消費電力を低減できることがわかった。

## 【0142】

50

次に、引き続き図3(a)を参照しながら、本実施形態の窒化物系半導体発光素子10の製造方法を説明する。

【0143】

まず、m面基板10を用意する。本実施形態では、基板10として、Ga<sub>0.9</sub>N基板を用いる。本実施形態のGa<sub>0.9</sub>N基板は、HVPE(Hydride Vapor Phase Epitaxy)法を用いて得られる。

【0144】

例えば、まずc面サファイア基板の上に数mmオーダの厚膜Ga<sub>0.9</sub>Nを成長する。その後、厚膜Ga<sub>0.9</sub>Nをc面に垂直方向、m面で切り出すことによりm面Ga<sub>0.9</sub>N基板が得られる。Ga<sub>0.9</sub>N基板の作製方法は、上記に限らず、例えばナトリウムフラックス法などの液相成長やアモノサーマル法などの融液成長方法を用いてバルクGa<sub>0.9</sub>Nのインゴットを作製し、それをm面で切り出す方法でも良い。

【0145】

基板10としては、Ga<sub>0.9</sub>N基板の他、例えば、酸化ガリウム、SiC基板、Si基板、サファイア基板などを用いることができる。基板上にm面から成るGa<sub>0.9</sub>N系半導体をエピタキシャル成長するためには、SiCやサファイア基板の面方位もm面である方が良い。ただし、r面サファイア基板の上にはa面Ga<sub>0.9</sub>Nが成長するという事例もあることから、成長条件によっては必ずしも成長用表面がm面であることが必須とならない場合もあり得る。少なくとも半導体積層構造20の表面がm面であれば良い。本実施形態では、基板10の上に、MOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)法により結晶層を順次形成していく。

【0146】

次に、m面Ga<sub>0.9</sub>N基板10の上に、Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N層22を形成する。Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N層22として、例えば、厚さ3μmのAlGa<sub>0.9</sub>Nを形成する。Ga<sub>0.9</sub>Nを形成する場合には、m面Ga<sub>0.9</sub>N基板10の上に、1100℃でTMG(Ga(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>)、TMA(Al(CH<sub>3</sub>)<sub>3</sub>)およびNH<sub>3</sub>を供給することによってGa<sub>0.9</sub>N層を堆積する。

【0147】

次に、Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N層22の上に、活性層24を形成する。この例では、活性層24は、厚さ9nmのGa<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N井戸層と、厚さ9nmのGa<sub>0.9</sub>Nバリア層が交互に積層された厚さ81nmのGaInN/Ga<sub>0.9</sub>N多重量子井戸(MQW)構造を有している。Ga<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N井戸層を形成する際には、Inの取り込みを行なうために、成長温度を800℃に下げることが好ましい。

【0148】

次に、活性層24の上に、例えば厚さ30nmのアンドープGa<sub>0.9</sub>N層を堆積する。次いで、アンドープGa<sub>0.9</sub>N層の上に、Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N層26を形成する。Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N層26として、例えば、TMG、NH<sub>3</sub>、TMA、TMIおよびp型不純物としてCp<sub>2</sub>Mg(シクロペンタジエニルマグネシウム)を供給することにより、厚さ70nmのp-Al<sub>0.14</sub>Ga<sub>0.86</sub>Nを形成する。

【0149】

次に、Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N層26の上に、例えば厚さ0.5μmのp-Ga<sub>0.9</sub>Nコンタクト層を堆積する。p-Ga<sub>0.9</sub>Nコンタクト層を形成する際には、p型不純物としてCp<sub>2</sub>Mgを供給する。

【0150】

その後、塩素系ドライエッチングを行なうことにより、p-Ga<sub>0.9</sub>Nコンタクト層、Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>N層26、アンドープGa<sub>0.9</sub>N層および活性層24の一部を除去して凹部42を形成し、Al<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>In<sub>0.1</sub>N層22のn型電極形成領域を露出させる。次いで、凹部42の底部に位置するn型電極形成領域の上に、n型電極40として、Ti/Pt層を形成する。

【0151】

さらに、p-Ga<sub>0.9</sub>Nコンタクト層の上には、Mg層32を形成し、さらにMg層32上にPt層34を形成する。これにより、p型電極40を形成する。本実施形態では、Mg

10

20

30

40

50

層 3 2 の形成に原料金属をパルス的に蒸発させながら蒸着を行なう手法（パルス蒸着法）を用いている。より具体的には、真空中（例えば、 $5 \times 10^{-6}$  Torr）に保持したるつば中の Mg 金属に、パルス的に電子ビームを照射し、パルス的に原料金属を蒸発させる。その原料金属分子または原子が p-GaN コンタクト層に付着し、Mg 層 3 2 が形成される。パルスは例えばパルス幅 0.5 秒、繰り返し 1 Hz である。パルス幅は 0.005 秒以上 5 秒以下、パルス周波数は 0.1 Hz 以上 100 Hz 以下であることが好ましい。このような手法により、Mg 層 3 2 として緻密で良好な品質の膜が形成された。Mg 層が緻密になる理由は、パルスの蒸着を行なうことにより、p-GaN コンタクト層に衝突する Mg 原子または Mg 原子クラスターの運動エネルギーが増加するためであると考えられる。すなわち、電子ビームの照射によって、原料 Mg の一部が瞬間的に高エネルギーを持った Mg 原子となって気化あるいは蒸発する。そして、Mg 原子は p-GaN コンタクト層へ到達する。p-GaN コンタクト層へ到達した Mg 原子はマイグレーションを起こし、原子レベルで緻密で均質な Mg 薄膜を形成する。1 パルスの電子ビームによって、1~20 原子層程度の Mg 薄膜が形成される。パルス状の電子ビームを繰り返し照射することによって Mg 薄膜が p-GaN コンタクト層に積層され、所望の厚さの Mg 層 3 2 が形成される。電子ビームは、Mg 原子が吸着後にマイグレーションを起こすのに必要な運動エネルギーを Mg 原子に供給することができるよう、高いピーク強度を有していることが好ましい。また、電子ビームの 1 パルスあたり、20 原子層（およそ 5 nm）以下の厚さで Mg 薄膜が形成されるように電子銃の駆動パワーを決定することが好ましい。電子ビームの 1 パルスあたりに形成される Mg 薄膜が 20 原子層よりも厚くなると、緻密で均質な Mg 薄膜が得られにくくなる。より好ましい堆積速度は、電子ビームの 1 パルスあたり、5 原子層以下である。これは Mg 原子が多すぎると、Mg 原子がマイグレーション中にぶつかり合い、それにより Mg 原子が持つ運動エネルギーが失われてしまうからである。

#### 【0152】

一般に Mg は水や空気との接触により酸化されやすい元素である。通常の蒸着方法によって支持基板上に形成した Mg 薄膜を大気中に置いた場合、速やかに酸化される。この結果、Mg 薄膜は次第に金属光沢を失い、最終的にはボロボロとなって支持体から剥がれ落ちる。これに対し、本実施形態の形成方法（パルス蒸着）によって作成された Mg 層 3 2 は、原子レベルで緻密で均質であり、エピタキシャル成長させたように非常に原子配列の整った構造を有している。そして、酸化の原因と考えられるピンホールは殆ど存在せず、酸化されにくい。大気中に数ヶ月放置してもきれいな鏡面を保持することができる。

#### 【0153】

また、一般に Mg はその融点を超えると一気に気化してしまう性質を有する。このため、Mg 薄膜の堆積速度を調整することによって、形成する Mg 薄膜の厚さをナノメートルオーダーで正確に制御することが非常に困難である。これに対し、本実施形態の形成方法によって作成された Mg 層 3 2 は、パルス状電子ビームの照射時間等を適宜設定することで、その厚さをナノメートルオーダーで正確に制御できる。

#### 【0154】

なお、本実施形態の形成方法は、Si 基板やガラス基板上に Mg 薄膜を形成する場合にも有効である。よって、本実施形態の形成方法は GaN に限らず、様々な種類の物質上に Mg 薄膜を形成できる。そして、本実施形態の形成方法は、特に半導体分野における電極の形成に好適に用いることができる。また、本実施形態の形成方法は、Mg 蒸着時に Mg 薄膜が形成される基板や支持体を加熱する必要がない。このため、加熱ができない、あるいは、加熱しにくい形状の基板や支持体の上であっても、室温程度で緻密で均質な Mg 薄膜の形成が可能である。

#### 【0155】

また、本実施形態の形成方法によって作成された Mg 層 3 2 は、600℃以上の温度で熱処理を行っても安定である。

#### 【0156】

なお、本実施形態では、原料金属（Mg 金属）をパルス的に蒸発させながら蒸着を行な

う手法を採用しているが、Mg層32を形成できるのであれば、他の手法を採用することも可能である。緻密で良質なMg層を形成する他の手法としては、例えば熱CVD法や分子線エピタキシ(MBE)などを採用することが可能である。

#### 【0157】

なお、その後、レーザリフトオフ、エッチング、研磨などの方法を用いて、基板10、Al<sub>u</sub>Ga<sub>v</sub>In<sub>w</sub>N層22の一部までを除去してもよい。この場合、基板10のみを除去してもよいし、基板10およびAl<sub>u</sub>Ga<sub>v</sub>In<sub>w</sub>N層22の一部だけを選択的に除去してもよい。もちろんx、基板10、Al<sub>u</sub>Ga<sub>v</sub>In<sub>w</sub>N層22を除去せずに残してもよい。以上の工程により、本実施形態の窒化物系半導体発光素子100が形成される。

#### 【0158】

本実施形態の窒化物系半導体発光素子100において、n型電極40とp型電極30との間に電圧を印加すると、p型電極30から活性層24に向かって正孔が、n型電極40から活性層24に向かって電子が注入され、例えば450nm波長の発光が生じる。

#### 【0159】

ここで、図17(a)に、m面GaN上にMg/Pt層からなる電極を用いた発光ダイオードの電流－電圧特性を示す。比較のため、発光ダイオードの窒化物系半導体の構造は同じで、Pd/Pt層からなる電極を用いた発光ダイオードの特性、及びc面GaN上にMg/Pt層からなる電極を用いた発光ダイオードの特性を示す。これら3種類の発光ダイオードにおける電極の構成および熱処理条件は、以下の表4に示す通りである。

#### 【0160】

#### 【表4】

| 面方位 | p型電極  | 厚さ(熱処理前)  | 熱処理温度と時間 |
|-----|-------|-----------|----------|
| m面  | Mg/Pt | 7nm/75nm  | 600℃ 10分 |
| m面  | Pd/Pt | 40nm/35nm | 500℃ 10分 |
| c面  | Mg/Pt | 7nm/75nm  | 600℃ 10分 |

#### 【0161】

この発光ダイオードの構成は、m面またはc面GaN基板上に、n型GaN層、InGa<sub>u</sub>N<sub>v</sub>井戸層(3層)とGaNバリア層(2層)とが交互に積層された活性層、p型GaN層が積層されたものである。さらにp型GaN層上にはp型電極として、Mg/Pt電極またはPd/Pt電極を設けている。n型電極は、p型GaN層、活性層をエッチングし、n型GaN層を露出させ、n型GaN層上に形成している。

#### 【0162】

図17(a)から明らかなように、電流が0ボルトから増加しても、電流値がほぼゼロの状態が続くが、印加電圧があるレベル(立ち上がり電圧)を超えると、電流値は電圧の増加に伴って増加する。立ち上がり電圧は、Pd/Pt層からなる電極(m面GaN上)の場合、約3.1Vである。これに対し、Mg/Pt層からなる電極(m面GaN上)の場合の立ち上がり電圧は、約2.5Vとなり、低減が見られる。縦軸の電流値が20mAとなる動作電圧は、Mg/Pt層からなる電極ではPd/Pt層からなる電極と比較し、1.5V以上低減していることが確認される。

#### 【0163】

次に、m面GaN上Mg/Pt層からなる電極を用いた発光ダイオード(m面発光ダイオード)とc面GaN上Mg/Pt層からなる電極を用いた発光ダイオード(c面発光ダイオード)との比較を行う。m面発光ダイオードにおいては、立ち上がり電圧がc面発光ダイオードと比較し低く、コンタクト抵抗の低減効果が確認される。例えば、m面発光ダイオードにおいては駆動電圧3.2Vにおいて電流値は20mAが得られる。一方、c面発光ダイオードにおいては同じ駆動電圧では4.8mAの電流値となる。発光ダイオードの光出力は電流値に依存することから、駆動電圧3.2Vにおいてm面発光ダイオードにおいては、c面発光ダイオードの4倍近くの光出力が得られることが分かる。

## 【0164】

また、電流値－電圧特性を示す曲線の傾きは、Pd/Pt電極を有する素子に比べ、Mg/Pt電極を有する素子の方が急である。発光ダイオードは、内部にp－n接合を有するダイオードであり、p－n接合ダイオードの電流－電圧特性を示す曲線は、一般に以下の式で近似される。

$$I = I_0 \exp(V/n \cdot KT)$$

ここで、Iはp－n接合ダイオードを流れる電流値、 $I_0$ は電流定数、Vは印加電圧、Kはボルツマン定数、Tは温度、nはダイオードの理想度合いを示すn値である。実験は室温で行ったため、 $KT = 0.025$  (V) である。

## 【0165】

p－n接合ダイオードのn値は、電流－電圧特性を示す曲線の傾きから決定される。理想的なp－n接合ダイオードの場合、 $n = 1$ であるが、現実のp－n接合ダイオードでは、n値は1から異なっている。n値は1に近いほど好ましい。本実験によれば、Mg/Pt電極を有する素子の場合、 $n = 1.4$ となり、Pd/Pt電極を有する素子の場合、 $n = 2.2$ であった。このことからわかるように、Mg/Pt電極を用いることにより、優れたダイオード特性を実現できる。

## 【0166】

図17(b)に示すように、この発光ダイオードのコンタクト抵抗の値は、Mg/Pt層からなる電極では $3.8 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}^2$ の値が得られた。このような10のマイナス4乗位のコンタクト抵抗の値は、p型のm面GaNにおいては、はじめての例であり、これは驚異的な結果である。これによって消費電力を低減できることがわかった。加えて、m面GaN素子において、極めて大きな技術的意義を提供できることが見出された。なお、Pd/Pt層からなる電極では、約 $1 \times 10^{-2} \Omega \text{ cm}^2$ の値であった。

## 【0167】

次に、図18を参照しながら、Au層、および、Mg/Au層からなる電極を用いた例（比較例）について説明する。図18(a)は、m面のGaN層の上に、Au層、または、Mg/Au層の電極を形成し、その固有コンタクト抵抗( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )を測定した結果を示している。なお、この固有コンタクト抵抗は、電極を形成して熱処理を行った後の固有コンタクト抵抗の値である。

## 【0168】

図18(a)の結果からわかるように、Au層の電極に比べ、Mg/Au層の電極を用いた場合の方が固有コンタクト抵抗の特性は悪化する。この点、本実施形態の電極（例えば、Mg/Pt層）の構成における特性向上の結果と顕著に相違する。なお、上述したように、Mgは水や空気との接触により酸化されやすい元素であるので、Mg層の単独での電極では無くAu層の積層体(Mg/Au層)として使用される構成は検討候補の一つに成り得る。しかしながら、実際には、Au層と比較してMg/Au層のコンタクト抵抗は増加するがゆえに、コンタクト特性は悪い。換言すると、本実施形態の構成（例えば、Mg/Pt層）のコンタクト抵抗の特性が優れていることは、Mg層にAu層を積層した場合の結果が悪かったことに鑑みると、当業者にとって予見できない効果を有していたと思われる。

## 【0169】

また、図18(b)は、熱処理後のMg/Au層の電極の表面を示す図面代用写真であり、一方、図18(c)は、熱処理後のAu層の電極の表面を示す図面代用写真である。両者を比べると、Mg/Au層の電極の方の膜質が悪いことがわかった。

## 【0170】

次に、図19を参照する。図19は、Conicalチップによる硬度マッピング(5 mN、 $1 \mu\text{m conical}$ )を表している。図19(a)はc面GaN基板(C-GaN)の結果を示し、そして、図19(b)はm面GaN基板(M-GaN)の結果を示している。両者を比較すると、m面GaN基板の方が、硬度が低いことがわかった。なお、このようなm面GaN基板とc面GaN基板との物性の違いが、本実施形態の電極構成

10

20

30

40

50

(例えば、Mg層/Pt層)の特性に影響を与えている可能性もあり得る。

【0171】

以上、本発明を好適な実施形態により説明してきたが、こうした記述は限定事項ではなく、勿論、種々の改変が可能である。

【0172】

なお、本発明の実施形態と本質的に構成を異にするものであるが、関連する構造が特許文献3、4に開示されている。しかしながら、特許文献3および4には、窒化ガリウム系半導体層の結晶面がm面であることの記載は一切無く、したがって、これらの文献の開示はc面の窒化ガリウム系半導体層の上に電極を形成した技術に関するものである。特に、特許文献3は、Mg層の上にAu層を積層した構成に関するものであり、その積層構造の電極を仮にm面上に形成したとしても、本実施形態の電極の効果が得られるものではない。また、特許文献4は、Ni、Cr、Mgからなる金属層に言及しているが、開示されている実施例はNi層を下層にした電極構造を有しているもののみである。特許文献3、4とも、c面の窒化ガリウム系半導体層の上に形成された電極構造に関するものであり、m面の窒化ガリウム系半導体層に対するコンタクト抵抗に関する問題も解決策も教示されていない。

【0173】

本発明に係る上記の発光素子は、そのまま光源として使用されても良い。しかし、本発明に係る発光素子は、波長変換のための蛍光物質を備える樹脂などと組み合わせれば、波長帯域の拡大した光源(例えば白色光源)として好適に使用され得る。

【0174】

図20は、このような白色光源の一例を示す模式図である。図20の光源は、図3(a)に示す構成を有する発光素子100と、この発光素子100から放射された光の波長を、より長い波長に変換する蛍光体(例えばYAG:Yttrium Aluminum Garnet)が分散された樹脂層200とを備えている。発光素子100は、表面に配線パターンが形成された支持部材220上に搭載されており、支持部材220上には発光素子100を取り囲むように反射部材240が配置されている。樹脂層200は、発光素子100を覆うように形成されている。

【0175】

なお、Mg層32と接触するp型半導体領域がGaN、もしくはAlGaNから構成される場合について説明したが、Inを含む層、例えばInGaNであってもよい。この場合、Inの組成を例えば0.2とした「 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 」を、電極30と接するコンタクト層に用いることができる。GaNにInを含ませることにより、 $\text{Al}_a\text{Ga}_b\text{N}$  ( $a+b=1$ ,  $a \geq 0$ ,  $b > 0$ ) のバンドギャップをGaNのバンドギャップよりも小さくできるため、コンタクト抵抗を低減することができる。以上のことから、Mg層が接するp型半導体領域は、 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_z\text{N}$  ( $x+y+z=1$ ,  $x \geq 0$ ,  $y \geq 0$ ,  $z \geq 0$ ) 半導体から形成されていればよい。

【0176】

コンタクト抵抗低減の効果は、当然に、LED以外の発光素子(半導体レーザー)や、発光素子以外のデバイス(例えばトランジスタや受光素子)においても得ることが可能である。

【0177】

実際のm面半導体層の表面(主面)は、m面に対して完全に平行な面である必要は無く、m面から僅かな角度(0度より大きく $\pm 1^\circ$ 未満)で傾斜していても良い。表面がm面に対して完全に平行な表面を有する基板や半導体層を形成することは、製造技術の観点から困難である。このため、現在の製造技術によってm面基板やm面半導体層を形成した場合、現実の表面は理想的なm面から傾斜してしまう。傾斜の角度および方位は、製造工程によってばらつくため、表面の傾斜角度および傾斜方位を正確に制御することは難しい。なお、基板や半導体の表面(主面)をm面から $1^\circ$ 以上の角度で傾斜させることを意図的に行う場合がある。以下に説明する実施形態における窒化ガリウム系化合物半導体発光素

子は、m面から $1^\circ$ 以上の角度で傾斜した面を主面とするp型半導体領域を備えている。

#### 【0178】

(他の実施形態)

図21は、本実施形態の窒化ガリウム系化合物半導体発光素子100aを示す断面図である。m面から $1^\circ$ 以上の角度で傾斜した面を主面とするp型半導体領域を形成するため、本実施形態に係る窒化ガリウム系化合物半導体発光素子100aは、m面から $1^\circ$ 以上の角度で傾斜した面を主面とするGaN基板10aを用いている。主面がm面から $1^\circ$ 以上の角度で傾斜している基板は、一般に「オフ基板」と称される。オフ基板は、単結晶インゴットから基板をスライスし、基板の表面を研磨する工程で、意図的にm面から特定方向に傾斜した面を主面とするように作製され得る。このGaN基板10a上に、半導体積層構造20aを形成する。図21に示す半導体層22a、24a、26aは主面がm面から $1^\circ$ 以上の角度で傾斜している。これは傾斜した基板の主面上に、各種半導体層が積層されると、これらの半導体層の表面（主面）もm面から傾斜するからである。GaN基板10aの代わりに、例えば、m面から特定方向に傾斜した面を表面とするサファイア基板やSiC基板を用いてもよい。

#### 【0179】

次に、図22～図26を参照しながら、本実施形態におけるp型半導体領域の傾斜について詳細を説明する。

#### 【0180】

図22(a)は、GaN系化合物半導体の結晶構造（ウルツ鉱型結晶構造）を模式的に示す図であり、図2の結晶構造の向きを $90^\circ$ 回転させた構造を示している。GaN結晶のc面には、+c面および-c面が存在する。+c面はGa原子が表面に現れた(0001)面であり、「Ga面」と称される。一方、-c面はN（窒素）原子が表面に現れた(000-1)面であり、「N面」と称される。+c面と-c面とは平行な関係にあり、いずれも、m面に対して垂直である。c面は、極性を有するため、このように、c面を+c面と-c面に分けることができるが、非極性面であるa面を、+a面と-a面に区別する意義はない。

#### 【0181】

図22(a)に示す+c軸方向は、-c面から+c面に垂直に延びる方向である。一方、a軸方向は、図2の単位ベクトル $a_2$ に対応し、m面に平行な $[-12-10]$ 方向を向いている。図22(b)は、m面の法線、+c軸方向、およびa軸方向の相互関係を示す斜視図である。m面の法線は、 $[10-10]$ 方向に平行であり、図22(b)に示されるように、+c軸方向およびa軸方向の両方に垂直である。

#### 【0182】

GaN系化合物半導体層の主面がm面から $1^\circ$ 以上の角度で傾斜するということは、この半導体層の主面の法線がm面の法線から $1^\circ$ 以上の角度で傾斜することを意味する。

#### 【0183】

次に、図23を参照する。図23(a)および(b)は、それぞれ、GaN系化合物半導体層の主面およびm面の関係を示す断面図である。この図は、m面およびc面の両方に垂直な断面図である。図23には、+c軸方向を示す矢印が示されている。図23に示したように、m面は+c軸方向に対して平行である。従って、m面の法線ベクトルは、+c軸方向に対して垂直である。

#### 【0184】

図23(a)および(b)に示す例では、GaN系化合物半導体層における主面の法線ベクトルが、m面の法線ベクトルからc軸方向に傾斜している。より詳細に述べれば、図23(a)の例では、主面の法線ベクトルは+c面の側に傾斜しているが、図23(b)の例では、主面の法線ベクトルは-c面の側に傾斜している。本明細書では、前者の場合におけるm面の法線ベクトルに対する主面の法線ベクトルの傾斜角度（傾斜角度 $\theta$ ）を正の値にとり、後者の場合における傾斜角度 $\theta$ を負の値にとることにする。いずれの場合でも、「主面はc軸方向に傾斜している」といえる。

## 【0185】

本実施形態では、p型半導体領域の傾斜角度が $1^{\circ}$ 以上 $5^{\circ}$ 以下の範囲、および、傾斜角度が $-5^{\circ}$ 以上 $-1^{\circ}$ 以下の範囲にあるので、p型半導体領域の傾斜角度が $0^{\circ}$ より大きく $\pm 1^{\circ}$ 未満の場合と同様に本発明の効果を奏することができる。以下、図24を参照しながら、この理由を説明する。図24(a)および(b)は、それぞれ、図23(a)および(b)に対応する断面図であり、m面からc軸方向に傾斜したp型半導体領域における主面の近傍領域を示している。傾斜角度 $\theta$ が $5^{\circ}$ 以下の場合には、図24(a)および(b)に示すように、p型半導体領域の主面に複数のステップが形成される。各ステップは、単原子層分の高さ( $2.7 \text{ \AA}$ )を有し、ほぼ等間隔( $30 \text{ \AA}$ 以上)で平行に並んでいる。このようなステップの配列により、全体としてm面から傾斜した主面が形成されるが、微視的には多数のm面領域が露出していると考えられる。

10

## 【0186】

図25は、m面から-c軸方向に $1^{\circ}$ 傾斜したp型半導体領域の断面TEM写真である。p型半導体領域の表面には、m面が明確に表出しており、傾斜は原子ステップによって形成されていることが確認される。主面がm面から傾斜したGaN系化合物半導体層の表面がこのような構造となるのは、m面がもともと結晶面として非常に安定だからである。同様の現象は、主面の法線ベクトルの傾斜方向が+c面および-c面以外の面方位を向いていても生じると考えられる。主面の法線ベクトルが例えばa軸方向に傾斜していても、傾斜角度が $1^{\circ}$ 以上 $5^{\circ}$ 以下の範囲にあれば同様であると考えられる。

20

## 【0187】

以上より、p型窒化ガリウム系化合物半導体層の表面(主面)をm面から $1^{\circ}$ 以上の角度で傾斜している場合であっても、p型電極に接触する面は多数のm面領域が露出しているため、コンタクト抵抗は傾斜角に依存しないものと考えられる。

## 【0188】

図26は、m面から-c軸方向に $0^{\circ}$ 、 $2^{\circ}$ 、または $5^{\circ}$ 傾斜したp型半導体領域の上にMg/Pt層の電極を形成し、そのコンタクト抵抗( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )を測定した結果を示すグラフである。グラフの縦軸は固有コンタクト抵抗、横軸は傾斜角度(m面の法線とp型半導体領域における表面の法線とが形成する角度) $\theta$ である。なお、この固有コンタクト抵抗は、電極を形成して熱処理を行った後の固有コンタクト抵抗の値である。図26の結果から分かるように、傾斜角度 $\theta$ が $5^{\circ}$ 以下であれば、コンタクト抵抗は、ほぼ一定の値となる。

30

## 【0189】

以上から、p型半導体領域の表面の傾斜角度 $\theta$ が $5^{\circ}$ 以下であれば、本発明の構成によりコンタクト抵抗は低減されることが確認された。

## 【0190】

なお、傾斜角度 $\theta$ の絶対値が $5^{\circ}$ より大きくなると、piezo電界によって内部量子効率が低下する。このため、piezo電界が顕著に発生するのであれば、m面成長により半導体発光素子を実現することの意義が小さくなる。したがって、本発明では、傾斜角度 $\theta$ の絶対値を $5^{\circ}$ 以下に制限する。しかし、傾斜角度 $\theta$ を例えば $5^{\circ}$ に設定した場合でも、製造ばらつきにより、現実の傾斜角度 $\theta$ は $5^{\circ}$ から $\pm 1^{\circ}$ 程度ずれる可能性がある。このような製造ばらつきを完全に排除することは困難であり、また、この程度の微小な角度ずれは、本発明の効果を妨げるものでもない。

40

## 【0191】

本実施の形態における半導体発光素子においても、蛍光物質を備える樹脂と組み合わせて、波長帯域の拡大した光源(例えば白色光源)として好適に使用され得る。

## 【産業上の利用可能性】

## 【0192】

本発明によれば、m面基板上で結晶成長させたGaN系半導体素子、または、m面を表面とするGaN系半導体積層構造体において、そのコンタクト抵抗を低減することができる。したがって、従来、コンタクト抵抗の特性の悪さから積極的な利用が困難であった、

50

m面基板上で結晶成長させたGaN系半導体素子（または、m面を表面とするGaN系半導体積層構造体）の産業上の利用可能性が向上する。

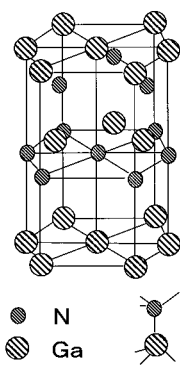
【符号の説明】

【0193】

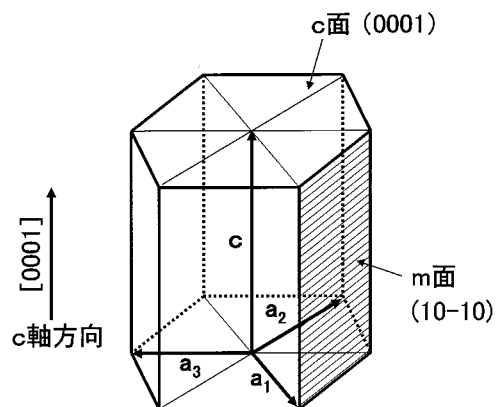
- 10 基板（GaN系基板）
- 12 基板の表面（m面）
- 20 半導体積層構造
- 22  $\text{Al}_u\text{Ga}_v\text{In}_w\text{N}$ 層
- 24 活性層
- 26  $\text{Al}_d\text{Ga}_e\text{N}$ 層
- 30 p型電極
- 32 Mg層
- 34 金属層（Pt層）
- 40 n型電極
- 42 凹部
- 100 窒化物系半導体発光素子
- 200 樹脂層
- 220 支持部材
- 240 反射部材

10

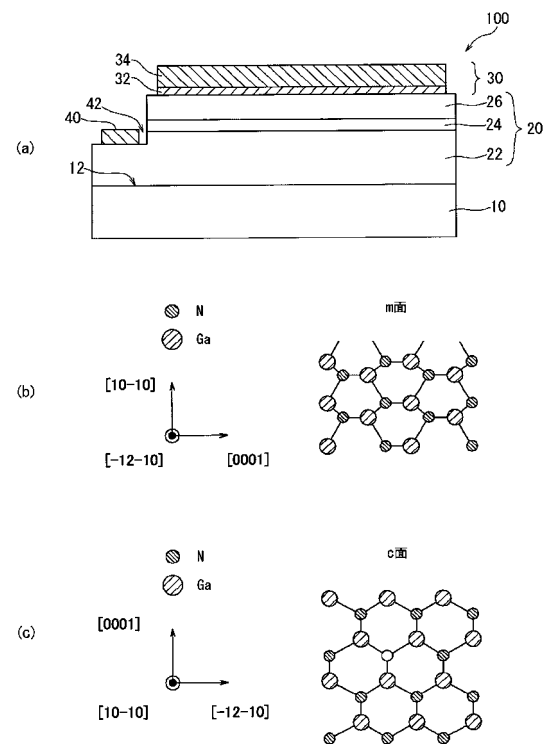
【図1】



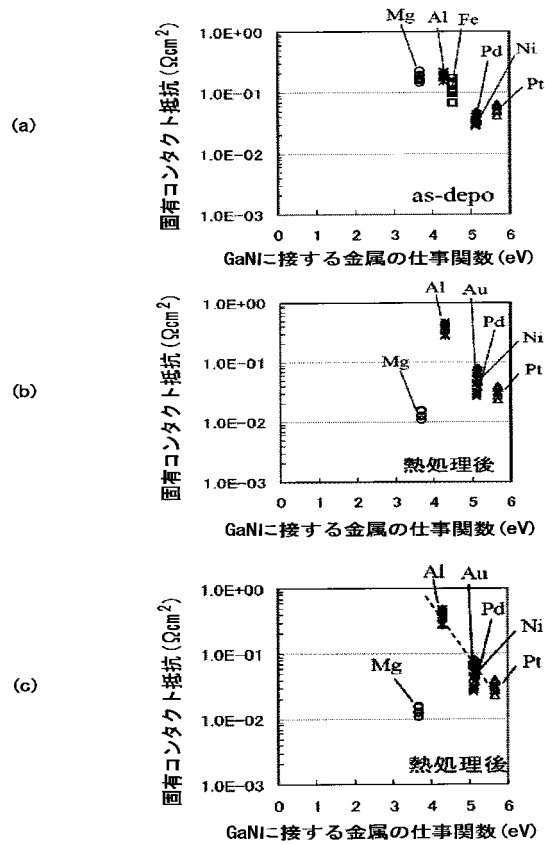
【図2】



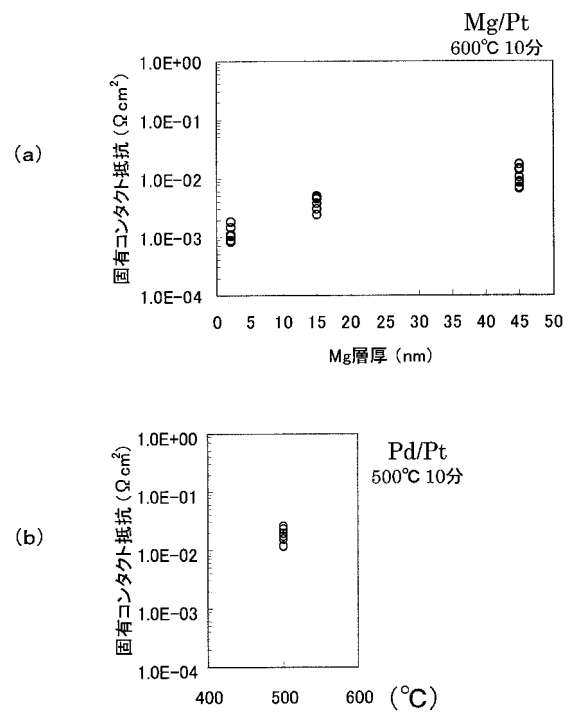
【図3】



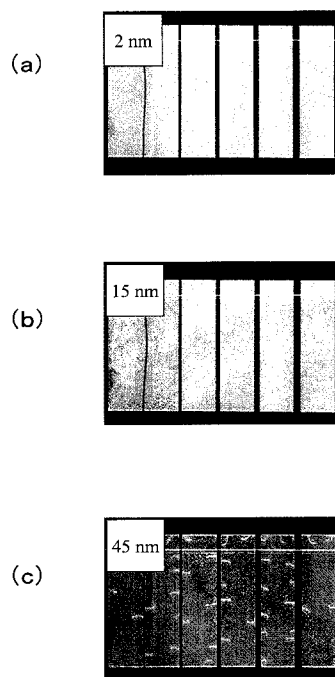
【図 4】



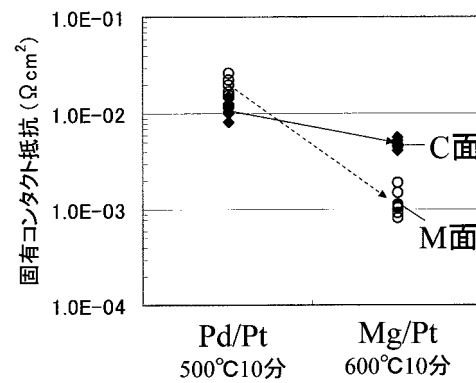
【図 5】



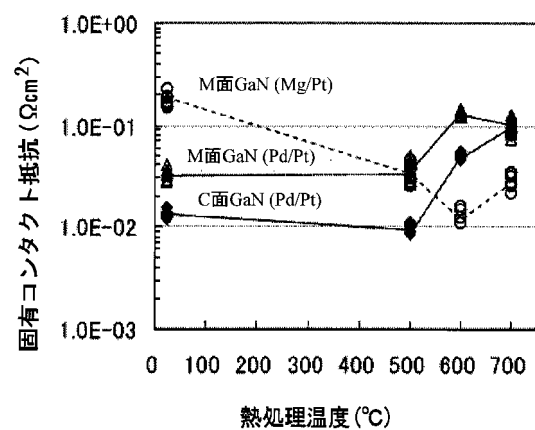
【図 6】



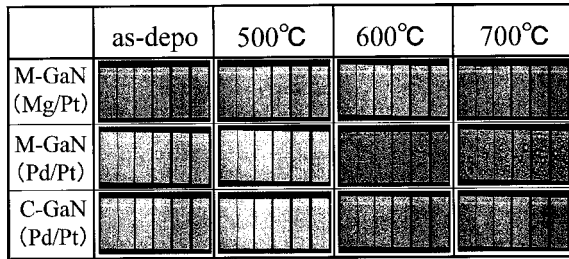
【図 7】



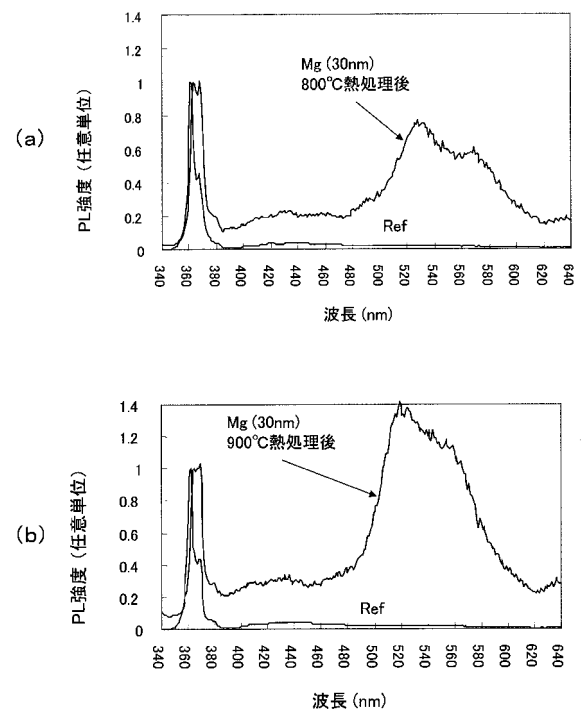
【図 8】



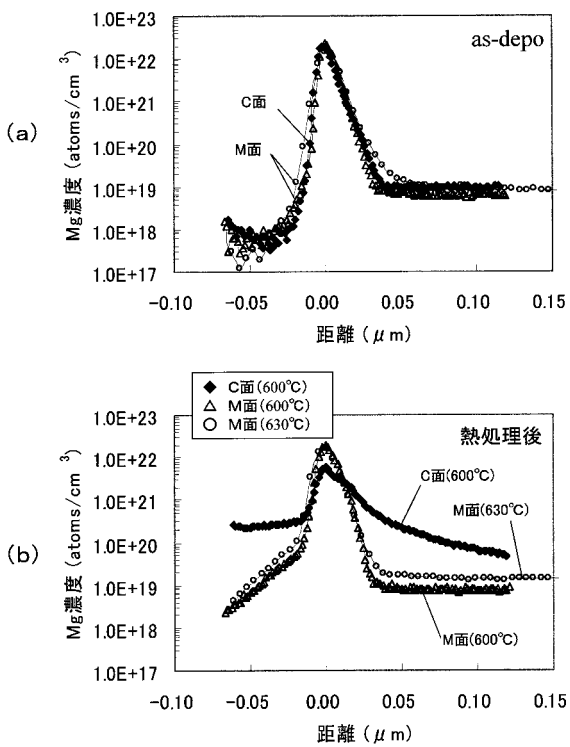
【図 9】



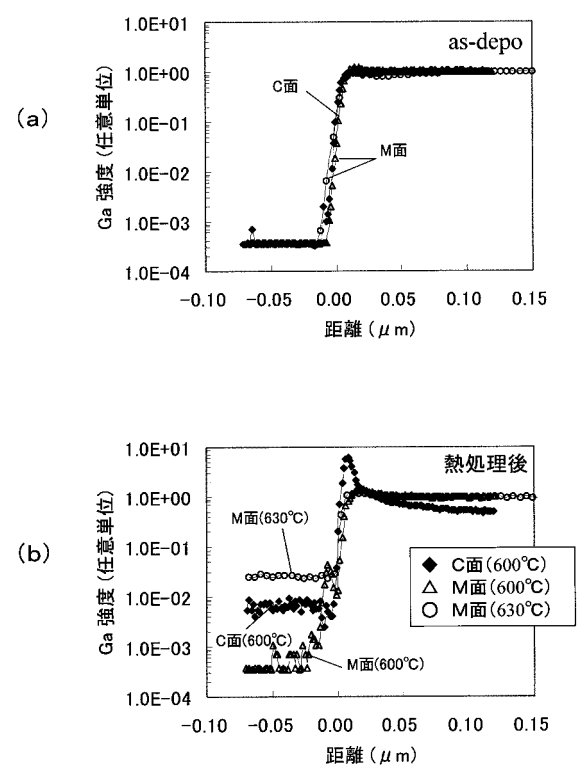
【図 10】



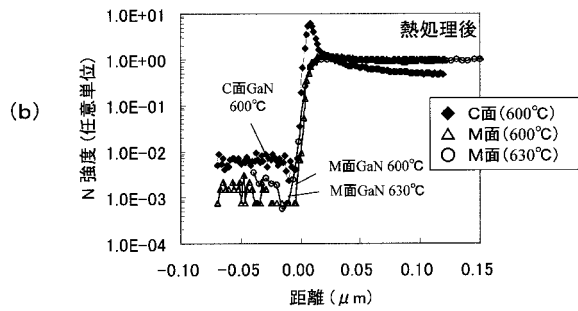
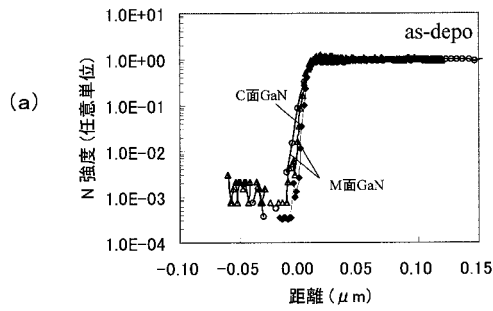
【図 11】



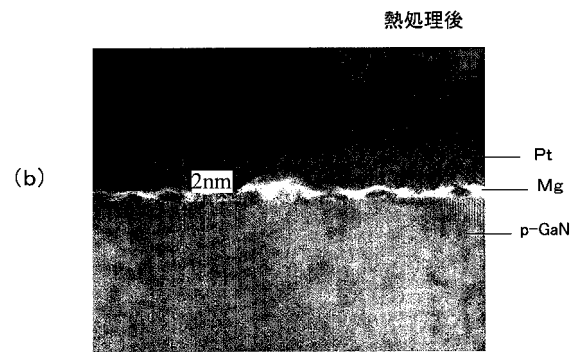
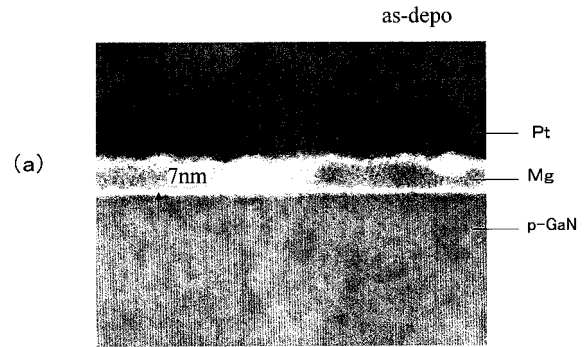
【図 12】



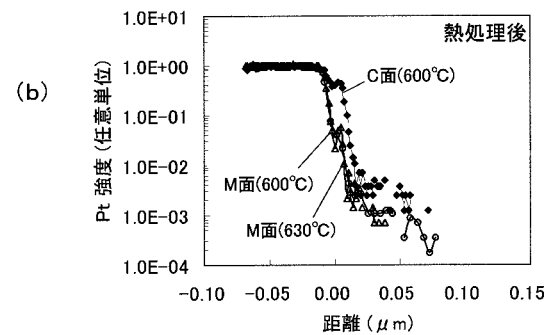
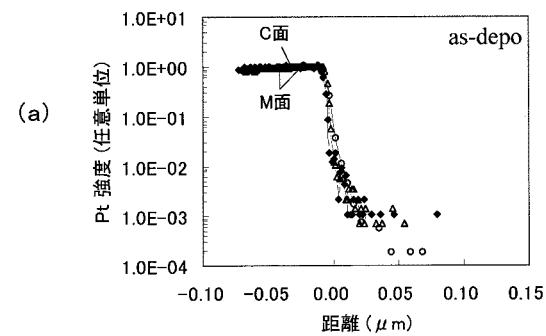
【図 1 3】



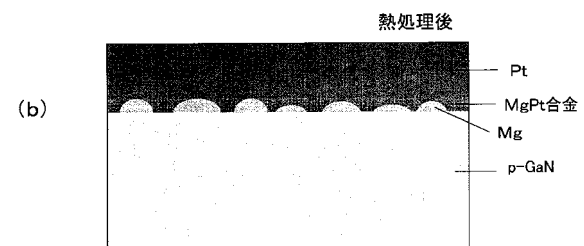
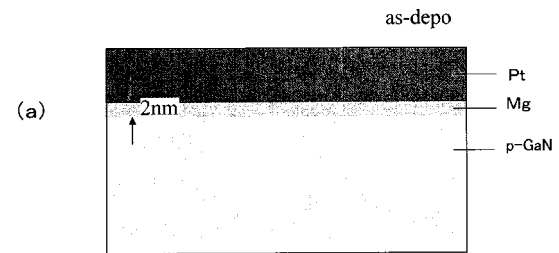
【図 1 4】



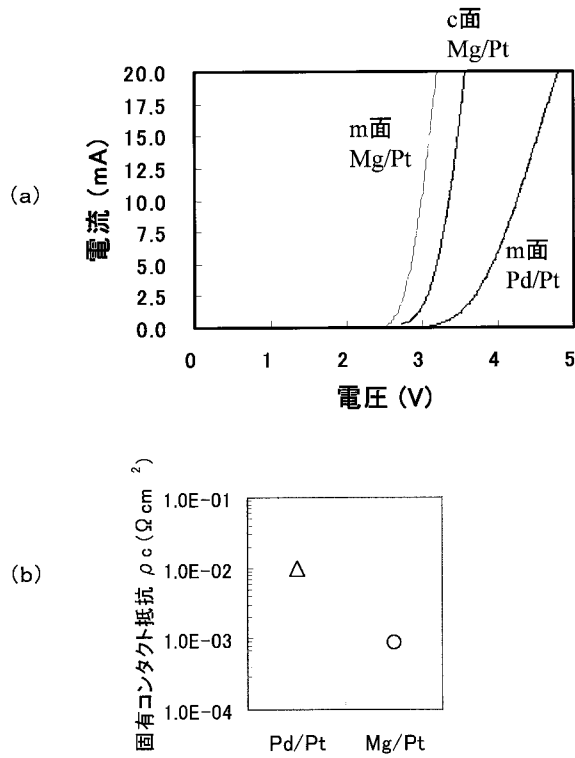
【図 1 5】



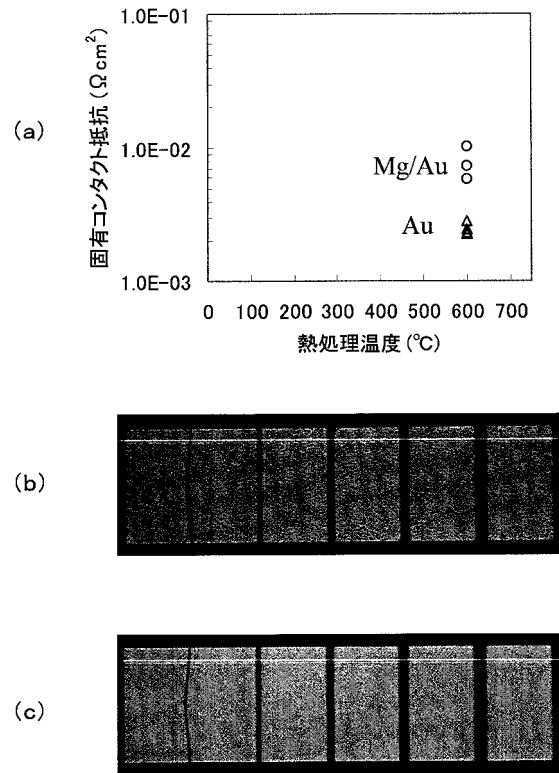
【図 1 6】



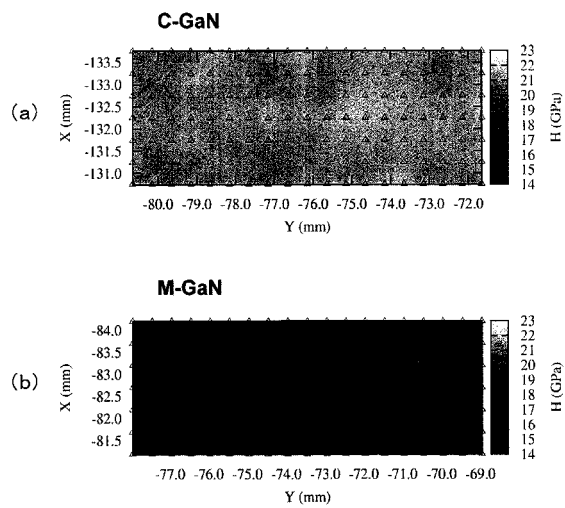
【図 17】



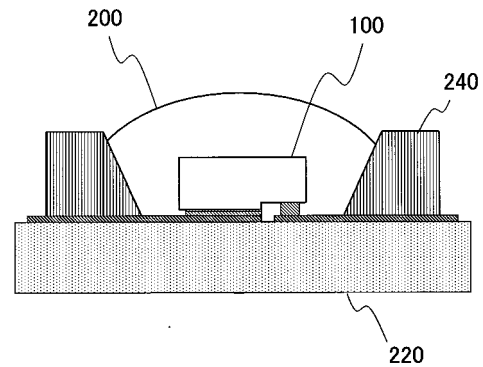
【図 18】



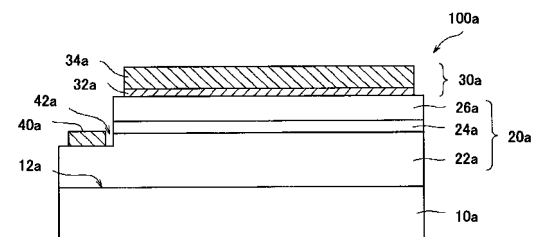
【図 19】



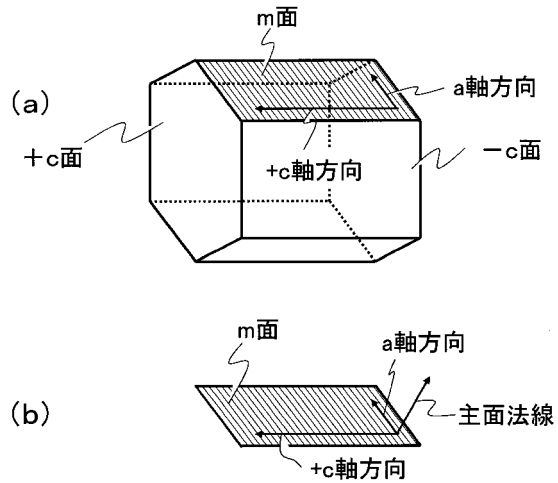
【図 20】



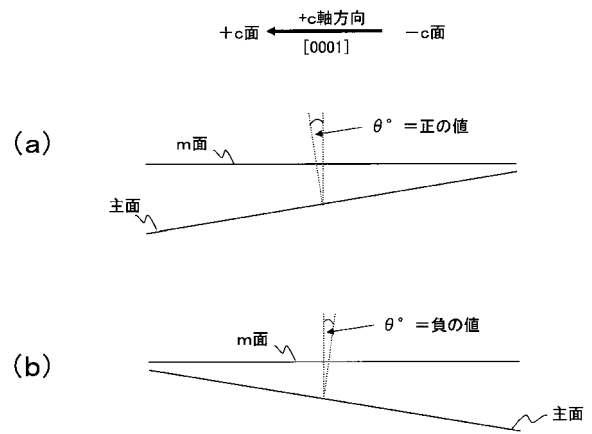
【図 21】



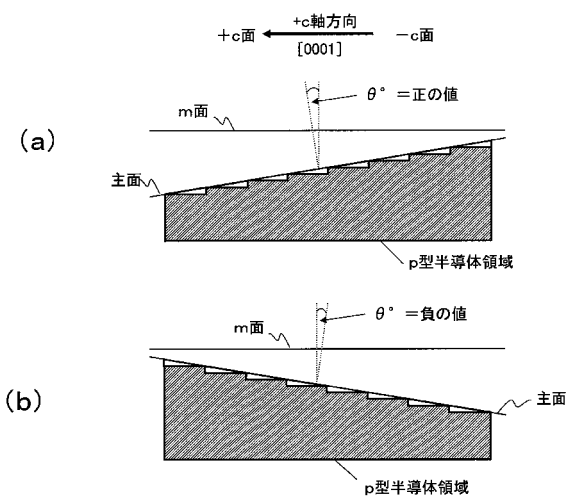
【図 2 2】



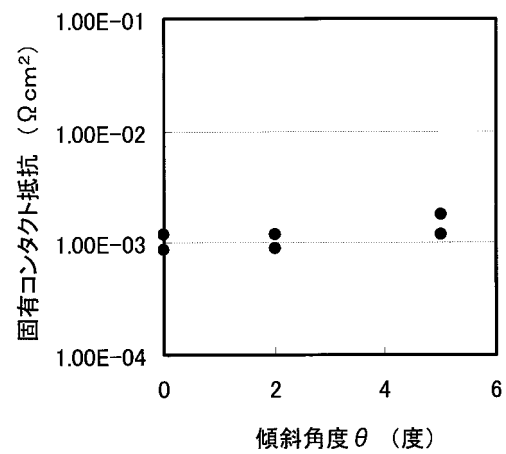
【図 2 3】



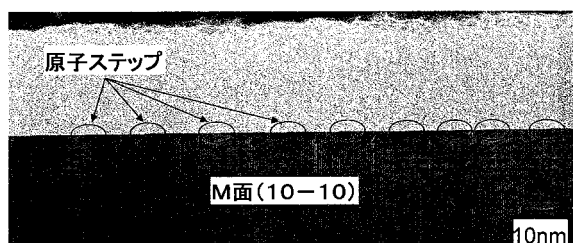
【図 2 4】



【図 2 6】



【図 2 5】



---

フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I  
H 0 1 L 21/28 3 0 1 R

(72)発明者 横川 俊哉  
大阪府門真市大字門真1006番地 パナソニック株式会社内  
(72)発明者 大屋 満明  
大阪府門真市大字門真1006番地 パナソニック株式会社内  
(72)発明者 山田 篤志  
大阪府門真市大字門真1006番地 パナソニック株式会社内  
(72)発明者 加藤 亮  
大阪府門真市大字門真1006番地 パナソニック株式会社内

審査官 松崎 義邦

(56)参考文献 特許第4486701(JP, B2)  
特開平08-064871(JP, A)  
特開平07-011430(JP, A)  
特開平11-274554(JP, A)  
特開2008-153285(JP, A)  
特開2001-160656(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)  
H01L33/00-33/64  
H01S5/00-5/50  
JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamII)