

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B1)

(11) 特許番号

特許第4820465号  
(P4820465)

(45) 発行日 平成23年11月24日(2011.11.24)

(24) 登録日 平成23年9月9日(2011.9.9)

(51) Int.Cl. F I  
H O 1 L 33/40 (2010.01) H O 1 L 33/00 2 2 0

請求項の数 30 (全 28 頁)

(21) 出願番号	特願2011-526156 (P2011-526156)	(73) 特許権者	000005821
(86) (22) 出願日	平成23年3月25日 (2011. 3. 25)		パナソニック株式会社
(86) 国際出願番号	PCT/JP2011/001764		大阪府門真市大字門真1006番地
審査請求日	平成23年6月16日 (2011. 6. 16)	(74) 代理人	100101683
(31) 優先権主張番号	特願2010-85983 (P2010-85983)		弁理士 奥田 誠司
(32) 優先日	平成22年4月2日 (2010. 4. 2)	(74) 代理人	100155000
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)		弁理士 喜多 修市
早期審査対象出願		(74) 代理人	100135703
			弁理士 岡部 英隆
		(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 G a N 系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 G a N 系半導体領域の主面上に形成された電極と  
を備え、  
前記 p 型 G a N 系半導体領域における前記主面の法線と 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 G a N 系半導体領域の前記主面に接触した Z n 層と、前記 Z n 層  
の上に形成された A g 層とを含む、窒化物系半導体素子。

【請求項 2】

前記 p 型 G a N 系半導体領域は、 $A l_x I n_y G a_z N$  ( $x + y + z = 1$ ,  $x \geq 0$ ,  $y \geq 0$ ,  $z \geq 0$ ) 半導体から形成される、請求項 1 に記載の窒化物系半導体素子。

【請求項 3】

前記 A g 層は、A g とは異なる金属からなる保護電極で覆われている、請求項 1 または  
2 に記載の窒化物系半導体素子。

【請求項 4】

前記 A g 層は、誘電体からなる保護層で覆われている、請求項 1、2 または 3 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、

10

20

$Al_aIn_bGa_cN$ 層 ( $a + b + c = 1$ ,  $a > 0$ ,  $b > 0$ ,  $c > 0$ ) 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 p 型 GaN 系半導体領域は、p 型コンタクト層である、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。

【請求項 7】

前記 Zn 層の厚さは前記 Ag 層の厚さ以下である、請求項 1 から 6 の何れか一つに記載の窒化物系半導体素子。

【請求項 8】

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 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 Zn 層中の N 濃度は Ga 濃度よりも低い、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。

【請求項 10】

前記 p 型 GaN 系半導体領域は GaN である、請求項 1 から 9 の何れか一つに記載の窒化物系半導体素子。

【請求項 11】

前記 Zn 層および前記 Ag 層の少なくとも一部が合金化している、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】

前記 Zn 層はアイランド状である請求項 1 から 11 の何れか一つに記載の窒化物系半導体素子。

【請求項 13】

前記 Zn 層は、Zn-Ag 合金から形成されている、請求項 1 から 12 に記載の窒化物系半導体素子。

【請求項 14】

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 GaN 系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 GaN 系半導体領域の主面上に形成された電極と

を備え、

前記 p 型 GaN 系半導体領域における前記主面の法線と 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 GaN 系半導体領域の前記主面に接触した Zn 層と、前記 Zn 層の上に形成された Ag 層とを含む、光源。

【請求項 15】

前記 p 型 GaN 系半導体領域は、 $Al_xIn_yGa_zN$  ( $x + y + z = 1$ ,  $x > 0$ ,  $y > 0$ ,  $z > 0$ ) 半導体からなる、請求項 14 に記載の光源。

【請求項 16】

前記 p 型 GaN 系半導体領域は GaN である、請求項 14 または 15 に記載の光源。

【請求項 17】

前記 Zn 層および前記 Ag 層の少なくとも一部が合金化している、請求項 14、15 または 16 に記載の光源。

【請求項 18】

基板を用意する工程 (a) と、

10

20

30

40

50

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GaN系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GaN系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GaN系半導体領域の前記主面上に、Zn層を形成する工程と、前記Zn層の上にAg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19】

前記p型GaN系半導体領域は、 $Al_xIn_yGa_zN$  ( $x + y + z = 1$ ,  $x \geq 0$ ,  $y \geq 0$ ,  $z \geq 0$ )半導体からなる、請求項18に記載の窒化物系半導体素子の製造方法。

10

【請求項20】

前記工程(c)において、前記Zn層を加熱処理する工程を実行する、請求項18または19に記載の窒化物系半導体素子の製造方法。

【請求項21】

前記加熱処理は、 $400^\circ$ 以上 $700^\circ$ 以下の温度で実行される、請求項20に記載の窒化物系半導体素子の製造方法。

【請求項22】

前記加熱処理は、 $500^\circ$ 以上 $600^\circ$ 以下の温度で実行される、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】

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18から22の何れか一つに記載の窒化物系半導体素子の製造方法。

20

【請求項24】

前記p型GaN系半導体領域はGaNである、請求項18から23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25】

前記Zn層中のN濃度はGa濃度よりも低い、請求項18から24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26】

前記Zn層および前記Ag層の少なくとも一部が合金化している、請求項18から25の何れか一つに記載の窒化物系半導体素子の製造方法。

30

【請求項27】

p型GaN系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GaN系半導体領域上に設けられた電極と  
を備え、

前記p型GaN系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GaN系半導体領域の前記主面に接触した合金層のみから構成され、

前記合金層は、ZnおよびAgから形成されている、窒化物系半導体素子。

40

【請求項28】

前記p型GaN系半導体領域は、 $Al_xIn_yGa_zN$  ( $x + y + z = 1$ ,  $x \geq 0$ ,  $y \geq 0$ ,  $z \geq 0$ )半導体から形成される、請求項27に記載の窒化物系半導体素子。

【請求項29】

前記合金層は、前記p型GaN系半導体領域の前記主面に接触するZn層と、前記Zn層の上に位置するAg層とを形成した後、熱処理を行うことにより形成された層である、請求項27または28に記載の窒化物系半導体素子。

【請求項30】

前記合金層は、ZnとAgとの混合物または化合物を、前記p型GaN系半導体領域の前記主面上に蒸着した後、加熱処理を行うことにより形成された層である、請求項27、

50

28または29に記載の窒化物系半導体素子。

【発明の詳細な説明】

【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】

10

【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： $Al_xGa_yIn_zN$  ( $0 < x, y, z < 1, x + y + z = 1$ ))の研究は盛んに行なわれ、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。

【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。 $Al_xGa_yIn_zN$  ( $0 < x, y, z < 1, x + y + z = 1$ )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。

20

【0004】

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、 $[0001]$ 方向に伸びており、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。

【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InGaN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、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、キャリアの量子閉じ込めシュタルク効果により、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。

30

【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、 $m$ 面と呼ばれる $(10-10)$ 面を表面に有する基板( $m$ 面GaN系基板)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、 $m$ 面に垂直な方向に窒化物系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。 $m$ 面は、 $(10-10)$ 面、 $(-1010)$ 面、 $(1-100)$ 面、 $(-1100)$ 面、 $(01-10)$ 面、 $(0-110)$ 面の総称である。

40

【0007】

なお、本明細書では、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

50

キシャル成長が生じることを「X面成長」と表現する。X面成長において、X面を「成長面」と称し、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。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0008】

【特許文献1】特開2006-24750号公報

【特許文献2】特許第3821128号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

10

【0009】

上述のように、m面基板上で成長させたGa<sub>n</sub>N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Ga<sub>n</sub>N系半導体素子は、c面基板上で成長させたものよりもp型電極のコンタクト抵抗が高く、それが、m面基板上で成長させたGa<sub>n</sub>N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】

さらに、特に発光素子の電極においては、コンタクト抵抗の低減に加えて、電極部での光吸収損失を低減させることにより外部量子効率を向上させることも要求される。Ga<sub>n</sub>N系半導体発光素子のp型電極として通常用いられている仕事関数の大きい金属(Pd、Au、Ptなど)は光吸収が非常に大きく、これらの金属を電極として用いたのでは高い外部量子効率を実現することは不可能である。なお、外部量子効率とは、発光素子への注入キャリア数に対する発光素子外部への放射光子数の割合である。

20

【0011】

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Ga<sub>n</sub>N系半導体素子が持つコンタクト抵抗が高いという課題、および、電極部における光吸収損失が高いという課題を同時に解決すべく、鋭意検討した結果、コンタクト抵抗を低くするとともに高い外部量子効率を実現することができる手段を見出した。

【0012】

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Ga<sub>n</sub>N系半導体素子におけるコンタクト抵抗を低減し、さらには電極部での光吸収損失を低減して高い外部量子効率を実現することができるp型電極の構造および製造方法を提供することにある。

30

【課題を解決するための手段】

【0013】

本発明の窒化物系半導体素子は、p型Ga<sub>n</sub>N系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Ga<sub>n</sub>N系半導体領域の主面上に形成された電極とを備え、前記p型Ga<sub>n</sub>N系半導体領域における前記主面の法線と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Ga<sub>n</sub>N系半導体領域の前記主面に接触したZn層と、前記Zn層の上に形成されたAg層とを含む。

40

【0014】

ある実施形態において、前記p型Ga<sub>n</sub>N系半導体領域は、Al<sub>x</sub>In<sub>y</sub>Ga<sub>z</sub>N(x+y+z=1, x>0, y>0, z>0)半導体から形成される。

【0015】

ある実施形態において、前記Ag層は、Agとは異なる金属からなる保護電極で覆われている。

【0016】

ある実施形態において、前記Ag層は、誘電体からなる保護層で覆われている。

【0017】

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<sub>a</sub>In<sub>b</sub>Ga<sub>c</sub>N層(a+

50

b + c = 1 , a = 0 , b = 0 , c = 0 ) を含む活性層を有し、前記活性層は光を発する。

【0018】

ある実施形態において、前記 p 型 GaN 系半導体領域は、p 型コンタクト層である。

【0019】

ある実施形態において、前記 Zn 層の厚さは前記 Ag 層の厚さ以下である。

【0020】

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。

【0021】

ある実施形態において、前記 Zn 層中の N 濃度は Ga 濃度よりも低い。

10

【0022】

ある実施形態において、前記 p 型 GaN 系半導体領域は GaN である。

【0023】

ある実施形態において、前記 Zn 層および前記 Ag 層の少なくとも一部が合金化している。

【0024】

ある実施形態において、前記 Zn 層はアイランド状である。

【0025】

ある実施形態において、前記 Zn 層は、Zn-Ag 合金から形成されている。

【0026】

20

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 GaN 系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 GaN 系半導体領域の主面上に形成された電極とを備え、前記 p 型 GaN 系半導体領域における前記主面の法線と 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 GaN 系半導体領域の前記主面に接触した Zn 層と、前記 Zn 層の上に形成された Ag 層とを含む。

【0027】

ある実施形態において、前記 p 型 GaN 系半導体領域は、 $Al_x In_y Ga_z N$  ( $x + y + z = 1$ ,  $x = 0$ ,  $y = 0$ ,  $z = 0$ ) 半導体からなる。

30

【0028】

ある実施形態において、前記 p 型 GaN 系半導体領域は GaN である。

【0029】

ある実施形態において、前記 Zn 層および前記 Ag 層の少なくとも一部が合金化している。

【0030】

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、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 GaN 系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 GaN 系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 GaN 系半導体領域の前記主面上に、Zn 層を形成する工程と、前記 Zn 層の上に Ag 層を形成する工程とを含む。

40

【0031】

ある実施形態において、前記 p 型 GaN 系半導体領域は、 $Al_x In_y Ga_z N$  ( $x + y + z = 1$ ,  $x = 0$ ,  $y = 0$ ,  $z = 0$ ) 半導体からなる。

【0032】

ある実施形態の前記工程 (c) において、前記 Zn 層を加熱処理する工程を実行する。

【0033】

ある実施形態において、前記加熱処理は、400 以上 700 以下の温度で実行される。

50

## 【0034】

前記加熱処理は、500 以上600 以下の温度で実行される。

## 【0035】

ある実施形態は、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。

## 【0036】

ある実施形態において、前記 p 型 Ga N 系半導体領域は Ga N である。

## 【0037】

ある実施形態において、前記 Zn 層中の N 濃度は Ga 濃度よりも低い。

## 【0038】

ある実施形態において、前記 Zn 層および前記 Ag 層の少なくとも一部が合金化している。

10

## 【0039】

本発明の他の窒化物系半導体素子は、p 型 Ga N 系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 Ga N 系半導体領域上に設けられた電極とを備え、前記 p 型 Ga N 系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 Ga N 系半導体領域の前記主面に接触した合金層のみから構成され、前記合金層は、Zn および Ag から形成されている。

## 【0040】

ある実施形態において、前記 p 型 Ga N 系半導体領域は、 $Al_x In_y Ga_z N$  ( $x + y + z = 1$ ,  $x \geq 0$ ,  $y \geq 0$ ,  $z \geq 0$ ) 半導体から形成される。

20

## 【0041】

ある実施形態において、前記合金層は、前記 p 型 Ga N 系半導体領域の前記主面に接触する Zn 層と、前記 Zn 層の上に位置する Ag 層とを形成した後、熱処理を行うことにより形成された層である。

## 【0042】

ある実施形態において、前記合金層は、Zn と Ag との混合物または化合物を、前記 p 型 Ga N 系半導体領域の前記主面上に蒸着した後、加熱処理を行うことにより形成された層である。

## 【発明の効果】

30

## 【0043】

本発明の窒化物系半導体発光素子によれば、窒化物系半導体積層構造上の電極が Zn 層を含み、その Zn 層が p 型 Ga N 系半導体領域の表面 ( m 面 ) に接触していることにより、そのコンタクト抵抗を低減することができる。さらに、Zn 層の上に設けられた Ag 層によって光を反射させることにより、高い光外部量子効率を実現することができる。本発明では、m 面から 1 ° 以上 5 ° 以下の角度で傾斜した面を主面とする p 型 Ga N 系半導体領域を用いた場合であっても、m 面 p 型 Ga N 系半導体領域 ( m 面からの傾斜が 1 ° 未満の面を主面とする p 型 Ga N 系半導体領域 ) を用いた場合と同様の効果を奏する。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0044】

40

【図1】 Ga N 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、電極における Zn および Ag の分布を模式的に示す図

【図5A】 2 つの Pd / Pt 電極を p 型 Ga N 層に接触させて最適温度で熱処理を行なった場合の電流 - 電圧特性を示すグラフ

【図5B】 2 つの Zn / Ag 電極を p 型 Ga N 層に接触させて最適温度で熱処理を行なった場合の電流 - 電圧特性を示すグラフ

【図5C】 Pd / Pt 層からなる電極および Zn / Ag 層からなる電極の、各々最適温度

50

にて熱処理を行なった場合における固有コンタクト抵抗 ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ) の値を示すグラフ  
 【図5D】半導体層において電極と接する面(接触面)がm面の半導体素子のコンタクト抵抗(測定値)と、接触面がc面の半導体素子のコンタクト抵抗(測定値)とを示すグラフ

【図5E】Pd/Pt層からなる電極およびZn/Ag層からなる電極の固有コンタクト抵抗値の熱処理温度依存性を示すグラフ

【図5F】TLM電極のパターン図

【図6】各温度で熱処理を行な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7A】m面GaNの上にZn/Ag電極が配置された構造におけるGa原子の深さ方向のプロファイルを、SIMS(Secondary Ion-microprobe Mass Spectrometer)を用いて測定した結果を示すグラフ

10

【図7B】m面GaNの上にZn/Ag電極が配置された構造における窒素原子の深さ方向のプロファイルを、SIMSを用いて測定した結果を示すグラフ

【図8】Zn/Ag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、および、従来のPd/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

【図9】(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の電極30の表面に保護電極50が形成された構成を示す断面図、(b)は本発明の実施形態に係る窒化物系半導体発光素子100の電極30の上に保護層51が形成された構成を示す断面図

【図10】白色光源の実施形態を示す断面図

20

【図11】本発明の他の実施形態に係る窒化物系半導体発光素子100aを示す断面図

【図12】(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13】(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14】(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

【図15】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16】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

30

【発明を実施するための形態】

【0045】

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。

【0046】

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。

40

【0047】

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。ただし、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、成長条件によっては必ずしもGaN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、電極と接触する半導体領域の表面がm面であればよい。

50



## 【 0 0 4 8 】

本実施形態の窒化物系半導体発光素子 1 0 0 は、半導体積層構造 2 0 を支持する G a N 系基板 1 0 を備えているが、G a N 系基板 1 0 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。

## 【 0 0 4 9 】

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。G a 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 I n および A l は、G a のサイトに位置し、G a を置換する。G a の少なくとも一部が I n や A l 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。

10

## 【 0 0 5 0 】

m 面を表面に有する G a N 系基板は、本明細書では「m 面 G a N 系基板」と称される。m 面に垂直な方向に成長した窒化物系半導体積層構造を得るには、典型的には、m 面 G a 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。しかし、前述したように、基板の表面が m 面である必要は無く、また、最終的なデバイスに基板が残っている必要もない。

## 【 0 0 5 1 】

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。G a 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 G a N 系基板を、本明細書では「c 面 G a N 系基板」と称する。

20

## 【 0 0 5 2 】

c 面 G a N 系基板は、G a 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 G a ( 又は I n ) 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。

## 【 0 0 5 3 】

再び、図 3 ( a ) を参照する。G a N 系基板 1 0 の表面 ( m 面 ) 1 2 の上には、半導体積層構造 2 0 が形成されている。半導体積層構造 2 0 は、 $A l_a I n_b G a_c N$  層 (  $a + b + c = 1$  ,  $a \geq 0$  ,  $b \geq 0$  ,  $c \geq 0$  ) を含む活性層 2 4 と、 $A l_d G a_e N$  層 (  $d + e = 1$  ,  $d \geq 0$  ,  $e \geq 0$  ) 2 6 とを含んでいる。 $A l_d G a_e N$  層 2 6 は、活性層 2 4 を基準にして表面 ( m 面 ) 1 2 の側とは反対の側に位置している。ここで、活性層 2 4 は、窒化物系半導体発光素子 1 0 0 における電子注入領域である。

30

## 【 0 0 5 4 】

本実施形態の半導体積層構造 2 0 には、他の層も含まれており、活性層 2 4 と G a N 系基板 1 0 との間には、 $A l_u G a_v I n_w N$  層 (  $u + v + w = 1$  ,  $u \geq 0$  ,  $v \geq 0$  ,  $w \geq 0$  ) 2 2 が形成されている。本実施形態の  $A l_u G a_v I n_w N$  層 2 2 は、第 1 導電型 ( n 型 ) の  $A l_u G a_v I n_w N$  層 2 2 である。また、活性層 2 4 と  $A l_d G a_e N$  層 2 6 との間に、アンドープの G a N 層を設けてもよい。

## 【 0 0 5 5 】

$A l_d G a_e N$  層 2 6 において、A l の組成比率 d は、厚さ方向に一様である必要はない。  $A l_d G a_e N$  層 2 6 において、A l 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、 $A l_d G a_e N$  層 2 6 は、A l 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、 $A l_d G a_e N$  層 2 6 の最上部 ( 半導体積層構造 2 0 の上面部分 ) は、A l の組成比率 d がゼロである層 ( G a N 層 ) から構成されていることが好ましい。

40

## 【 0 0 5 6 】

半導体積層構造 2 0 の上には、電極 3 0 が形成されている。本実施形態の電極 3 0 は、Z n 層 3 2 と、Z n 層 3 2 の上に形成された A g 層 3 4 とを含んでいる。Z n 層 3 2 およ

50

びAg層34の少なくとも一部が合金化していてもよい。すなわち、Zn層32とAg層34との境界部分のみが合金化されていてもよいし、電極30の全体が合金化されていてもよい。

【0057】

図4(a)から(c)は、Zn層32とAg層34との間の合金化を説明するための図である。図4(a)は、Zn層32およびAg層34の一部が合金化した状態を示している。この場合、図4(a)に示すように、電極30Aは、Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N層26に接するZn層32と、Zn層32の上に存在するZn-Ag合金層61Aと、Zn-Ag合金層61Aの上に存在するAg層34とから構成されている。

【0058】

図4(b)は、ZnとAgとの合金化がAl<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N層26に接する部分まで進行した状態を示している。図4(b)に示す状態において、電極30BにおけるZn層32(電極30BのうちAl<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N層26と接触する部分)は、Zn-Ag合金から形成されている。

【0059】

図4(b)に示す電極30Bの例では、Zn層32の上には、Ag層34が存在している。

【0060】

図4(c)に、Zn層およびAg層の全体が合金化されている状態の電極30Cを示す。この場合、電極30Cは、Zn-Ag合金層61Cのみから構成されている。

【0061】

図4(a)から(c)に示すZn-Ag合金は、ZnおよびAgから構成されている(主成分がZnおよびAgである)。図4(a)から(c)に示す構造は、Zn層32の上にAg層34を形成した後に、熱処理を行うことによって形成することができる。なお、図4(c)に示す構造は、ZnとAgとの混合物または化合物を蒸着源として蒸着を行った後に熱処理を行うことによって形成してもよい。

【0062】

Ag層34は、Agを主成分として微量の他の金属(例えば、Cu、Au、Pd、Nd、Sm、Sn、In、Bi等)を一種以上添加して合金化したものであってもよい。これらの金属によって合金化したAg層34は、Agと比較して耐熱性や信頼性等において優れている。

【0063】

Ag層は、光に対して高い反射率を有している。例えば青色光の反射率で比較した場合、Agは約97%、Ptは約55%、Auは約40%である。

【0064】

電極30におけるZn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型電極の一部として機能する。本実施形態では、Zn層32は、第2導電型(p型)のドーパントがドーブされたAl<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N層26に接触している。Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N層26には、例えば、ドーパントとしてMgがドーブされている。Mg以外のp型ドーパントとして、例えばZn、Beなどがドーブされていてもよい。

【0065】

なお、Zn層32の少なくとも一部は、積層後の熱処理によってアイランド状(島状)に凝集を起こし、Al<sub>0.5</sub>Ga<sub>0.5</sub>N層26の表面上に、互いに間隔を置いて形成されていてもよい。このとき、Ag層34を構成するAgは各アイランド状Znの間に入り込んでいる。Ag層34の少なくとも一部がアイランド状に凝集されていてもよい。

【0066】

本実施形態の電極30の厚さは、例えば、10nm以上200nm以下である。電極30におけるZn層32は、Ag層34の厚さよりも薄い層であり、Zn層32の好適な厚さは、例えば、0.5nm以上10nm以下である。なお、ここでのZn層32の厚さとは熱処理後のZn層の厚さを意味する。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 6 7 】

Z n 層 3 2 の厚さが 1 0 n m 以下であれば、半導体積層構造 2 0 の活性層 2 4 から放射された光が Z n 層 3 2 にはほとんど吸収されず A g 層 3 4 まで到達する。そのため、より多くの光が A g 層 3 4 において反射する。Z n 層 3 2 の厚さは小さいほうがよく、例えば 1 n m 以上 2 n m 以下であることが好ましい。A g 層 3 4 による光の反射を期待しないのであれば Z n 層 3 2 の厚さは必ずしも 1 0 n m 以下である必要はない。Z n 層 3 2 の厚さが 4 5 n m 以上である場合のコンタクト抵抗は従来の P d 系電極を用いた場合と比較してほとんど変わらず、さらに電極剥がれの問題も生じるため、Z n 層 3 2 の厚さは 4 5 n m 以下とすることが望ましい。

## 【 0 0 6 8 】

A g 層 3 4 の厚さは、例えば 1 0 n m 以上 2 0 0 n m 以下である。A g 層 3 4 における光（例えば青色領域の波長の光）の侵入長は約 1 0 n m であるので、A g 層の厚さが侵入長の 1 0 n m 以上であれば、光を十分反射させることができる。また、Z n 層 3 2 が A g 層 3 4 の厚さよりも薄い層であるのは、Z n 層 3 2 と A g 層 3 4 との歪みのバランスが崩れることによる Z n 層 3 2 と A l<sub>d</sub>G a<sub>e</sub>N 層 2 6 との間での剥離が生じないようにするものである。

## 【 0 0 6 9 】

また、m 面の表面 1 2 を有する G a N 系基板 1 0 の厚さは、例えば、1 0 0 ~ 4 0 0 μ m である。これはおよそ 1 0 0 μ m 以上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 G a N 系基板 1 0 は、G a N 系材料からなる m 面の表面 1 2 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 G a N 系基板 1 0 は、少なくとも表面 1 2 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 G a N 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。

## 【 0 0 7 0 】

本実施形態の構成では、G a N 系基板 1 0 の上に位置する n 型の A l<sub>u</sub>G a<sub>v</sub>I n<sub>w</sub>N 層（例えば、厚さ 0 . 2 ~ 2 μ m）2 2 の一部に、電極 4 0（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 2 0 のうち電極 4 0 が形成される領域は、n 型の A l<sub>u</sub>G a<sub>v</sub>I n<sub>w</sub>N 層 2 2 の一部が露出するように凹部 4 2 が形成されている。その凹部 4 2 にて露出した n 型の A l<sub>u</sub>G a<sub>v</sub>I n<sub>w</sub>N 層 2 2 の表面に電極 4 0 が設けられている。電極 4 0 は、例えば、T i 層と A l 層と P t 層との積層構造から構成されており、電極 4 0 の厚さは、例えば、1 0 0 ~ 2 0 0 n m である。

## 【 0 0 7 1 】

また、本実施形態の活性層 2 4 は、G a<sub>0.9</sub>I n<sub>0.1</sub>N 井戸層（例えば、厚さ 9 n m）と G a N バリア層（例えば、厚さ 9 n m）とが交互に積層された G a I n N / G a N 多重量子井戸（MQW）構造（例えば、厚さ 8 1 n m）を有している。

## 【 0 0 7 2 】

活性層 2 4 の上には、p 型の A l<sub>d</sub>G a<sub>e</sub>N 層 2 6 が設けられている。p 型の A l<sub>d</sub>G a<sub>e</sub>N 層 2 6 の厚さは、例えば、0 . 2 ~ 2 μ m である。なお、上述したように、活性層 2 4 と A l<sub>d</sub>G a<sub>e</sub>N 層 2 6 との間には、アンドープの G a N 層を設けてもよい。

## 【 0 0 7 3 】

加えて、A l<sub>d</sub>G a<sub>e</sub>N 層 2 6 の上に、第 2 導電型（例えば、p 型）の G a N 層を形成することも可能である。そして、その G a N 層の上に、p<sup>+</sup>-G a N からなるコンタクト層を形成し、さらに、p<sup>+</sup>-G a N からなるコンタクト層上に、Z n 層 3 2 を形成することも可能である。なお、G a N からなるコンタクト層を、A l<sub>d</sub>G a<sub>e</sub>N 層 2 6 とは別の層であると考えた代わりに、A l<sub>d</sub>G a<sub>e</sub>N 層 2 6 の一部であると考えられることもできる。

## 【 0 0 7 4 】

次に、図 5 A から図 6 を参照しながら、本実施形態の特徴あるいは特異性を更に詳細に説明する。

## 【 0 0 7 5 】

図 5 A は、2 つの P d / P t 電極を p 型 G a N 層に接触させた場合の電流 - 電圧特性を

10

20

30

40

50

、図5Bは、2つのZn/Ag電極をp型GaN層に接触させた場合の電流 - 電圧特性を示す。Pd/Pt電極としては、p型のm面GaN層上に厚さ40nmのPd層と、厚さ35nmのPt層とを堆積した後、500℃で10分間、窒素雰囲気中で熱処理を行なうことによって形成した電極(m面GaN(Pd/Pt))を用いた。Zn/Ag電極としては、p型のm面GaN層上に厚さ7nmのZn層と、厚さ75nmのAg層とを堆積した後、600℃で10分間、窒素雰囲気中で熱処理を行なうことによって形成した電極(m面GaN(Zn/Ag))を用いた。本願に開示している全ての実験例では、Zn層およびAg層を通常の電子ビーム蒸着法によって堆積した。

【0076】

Zn/Ag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。

【0077】

図5A、図5Bに示す電流 - 電圧特性の各曲線は、図5Fに示すTLM(Transmission Line Method)電極パターンの電極間距離に対応したものである。図5Fは、 $100 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ の複数の電極が、 $8 \mu\text{m}$ 、 $12 \mu\text{m}$ 、 $16 \mu\text{m}$ 、 $20 \mu\text{m}$ だけ間隔を空けて配置された状態を示している。

【0078】

Pdはp型電極として従来用いられてきた仕事関数の大きな金属である。Pd/Pt電極ではPd層がp型GaN層に接触している。図5Aのグラフ(Pd/Pt電極の電流 - 電圧特性)は、ショットキー型の非オーミック特性(ショットキー電圧: 約2V)を示している。一方、図5Bのグラフ(Zn/Ag電極の電流 - 電圧特性)にはショットキー電圧が現れておらず、このZn/Ag電極は、p型GaN層とほぼオーミックコンタクトを形成することがわかる。ショットキー電圧の消失は、発光ダイオードやレーザダイオード等のデバイス動作電圧を低減する上で非常に重要である。

【0079】

図5Cは、上述のPd/Pt電極、およびZn/Ag電極の固有コンタクト抵抗( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )を示すグラフである。Pd/Pt電極は500℃、Zn/Ag電極は600℃で熱処理されている。図5Cの固有コンタクト抵抗を測定した試料の熱処理前の各層の厚さは、Zn/Ag電極におけるZn層が7nm、Ag層が75nmであり、Pd/Pt電極におけるPd層が40nm、Pt層が35nmである。

【0080】

コンタクト抵抗はTLM法を用いて評価した。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。

【0081】

コンタクト抵抗Rは、一般に、コンタクト面積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Rcは、固有コンタクト抵抗と称され、コンタクト面積Sが $1 \text{ cm}^2$ のときのコンタクト抵抗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。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 8 2 】

図 5 C に示すように、P d / P t 電極よりも Z n / A g 電極のほうが一桁近くも低い固有コンタクト抵抗 ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ) を示す。

## 【 0 0 8 3 】

図 5 D は、半導体層において電極と接する面 (接触面) が m 面の半導体素子のコンタクト抵抗 (測定値) と、接触面が c 面の半導体素子のコンタクト抵抗 (測定値) とを示すグラフである。この測定には、Z n / A g 電極および P d / P t 電極のいずれかを p 型 G a N 層に接触させたサンプルを用いた。いずれのサンプルにおいても、電極が接触する p 型 G a N 層の表面から深さ 2 0 n m の領域に  $7 \times 1 0^{19} \text{ cm}^{-3}$  の M g をドーピングし、それよりも深い領域には  $1 \times 1 0^{19} \text{ cm}^{-3}$  の M g をドーピングした。

10

## 【 0 0 8 4 】

図 5 D から明らかなように、接触面が c 面の場合には、P d / P t 電極より Z n / A g 電極のほうが若干高いコンタクト抵抗を示す。しかしながら、接触面が m 面の場合には、Z n / A g 電極のコンタクト抵抗は、P d / P t 電極のコンタクト抵抗と比較して顕著に低い値である。

## 【 0 0 8 5 】

次に、コンタクト抵抗の熱処理温度依存性を説明する。従来の P d / P t 電極と、本実施形態の Z n / A g 電極のそれぞれについて述べる。図 5 E は、P d / P t 電極および Z n / A g 電極の固有コンタクト抵抗値の熱処理温度依存性を示すグラフである。図 5 E の固有コンタクト抵抗を測定した試料の熱処理前における各層の厚さは、Z n / A g 電極における Z n 層が 7 n m、A g 層が 7 5 n m であり、P d / P t 電極における P d 層が 4 0 n m、P t 層が 3 5 n m である。

20

## 【 0 0 8 6 】

図 5 E に示すように、m 面 G a N ( P d / P t ) 電極の場合、m 面 G a N のコンタクト抵抗は、5 0 0  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  の熱処理の前後で、ほとんど変化しなかった。さらに、5 0 0  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  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た。

## 【 0 0 8 7 】

一方、m 面 G a N ( Z n / A g ) 電極の場合は、4 0 0  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  においてコンタクト抵抗が低下している。熱処理温度が 6 0 0  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  のときには、コンタクト抵抗はさらに低下している。さらに、7 0 0  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  の温度では、コンタクト抵抗は 6 0 0  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  の温度のときよりも上昇するものの、従来の m 面 G a N ( P d / P t ) 電極のコンタクト抵抗よりは小さい。

30

## 【 0 0 8 8 】

したがって、m 面 G a N ( Z n / A g ) 電極の熱処理温度としては、例えば、4 0 0  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  以上が好ましい。7 0 0  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  を超えて所定温度 (例えば 8 0 0  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ) 以上になると、電極や G a N 層の膜質の劣化が進むため、上限は 7 0 0  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  以下が好ましい。

## 【 0 0 8 9 】

次に、各温度で熱処理を行なった後の電極の表面状態を示す写真を図 6 に示す。図 6 では、a s - d e p o (熱処理を行なわない場合)、熱処理温度 4 0 0  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 、5 0 0  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 、6 0 0  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 、7 0 0  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  の結果を示している。

## 【 0 0 9 0 】

図 6 からわかるように、p 型の m 面 G a N 層の上に P d 層および P t 層を形成した場合 (m 面 G a N ( P d / P t ) 電極) は、6 0 0  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 、7 0 0  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  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。なお、c 面 G a N 層の上に P d / P t 電極を形成して 6 0 0  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  から 7 0 0  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  の温度で熱処理を行なっても金属表面の荒れは見られないことが本願発明者の実験からわかっている。これらの結果から、熱処理による電極の劣化が、m 面 G a N の電極に特有な課題であることがわかる。

40

## 【 0 0 9 1 】

一方、p 型の m 面 G a N 層の上に Z n 層および A g 層を形成した場合 (本実施形態の構成である m 面 G a N ( Z n / A g ) 電極) の場合は、7 0 0  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  の熱処理温度ではわずかに凹凸は見られるものの、4 0 0  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 、6 0 0  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 、7 0 0  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  のすべての熱処理温度において電

50

極に大幅な劣化がないことを確認した。

【0092】

図5Eに示すコンタクト抵抗の測定結果から、m面Ga<sub>0.9</sub>N<sub>0.1</sub>(Zn/Ag)電極の場合には、熱処理温度が600℃近傍のときに、コンタクト抵抗が最も低くなることがわかる。一方、図6に示す結果から、m面Ga<sub>0.9</sub>N<sub>0.1</sub>(Zn/Ag)電極では、熱処理温度が700℃まで高くなっても表面の劣化は少ないものの、熱処理温度が低いほうが電極の表面がより良好な状態に保たれることがわかる。Ag層の表面が劣化すると光反射率が低下するため、電極の表面は良好な状態に保たれることが好ましい。コンタクト抵抗の値と電極表面の状態との兼ね合いから、500℃以上600℃以下の温度で熱処理を行なうのが特に好適であると考えられる。

10

【0093】

一般に、c面Ga<sub>0.9</sub>N<sub>0.1</sub>に対してコンタクト抵抗の低い良好なp型電極を作製するには、仕事関数の大きい金属、例えばPd(仕事関数=5.1eV)やPt(仕事関数=5.6eV)を用いることが技術常識である。Znの仕事関数(4.3eV)は他のコンタクト電極材料の仕事関数に比べて小さく、Zn層はp型コンタクト電極の材料として好ましくないとされている。

【0094】

本願発明者は、比較のため、p型のc面Ga<sub>0.9</sub>N<sub>0.1</sub>層上にp型電極としてZn層を形成して、TLM法を用いてコンタクト抵抗を評価した。評価対象のZn層としては、厚さ200nmで堆積されたZn層に、窒素雰囲気中、500℃で10分間の熱処理を行なったものを用いた。その結果、c面Ga<sub>0.9</sub>N<sub>0.1</sub>層上に形成されたZn層のコンタクト抵抗は、約 $3.0 \times 10^{-1} \text{ } \Omega \cdot \text{cm}^2$ という非常に高い値となった。

20

【0095】

コンタクト抵抗が減少する理由の詳細は不明であるが、後述するように、m面Ga<sub>0.9</sub>N<sub>0.1</sub>の表面近傍におけるGa原子およびN原子の特異な挙動に起因すると推定される。

【0096】

なお、本願発明者は、m面Ga<sub>0.9</sub>N<sub>0.1</sub>の電極材料としてAl、Ni、Au、Pd、Ptなどの仕事関数の異なるさまざまな金属を用いて、コンタクト抵抗を測定した。その結果、m面Ga<sub>0.9</sub>N<sub>0.1</sub>の場合にも、仕事関数が大きい金属(PdやPt)ほどコンタクト抵抗が低くなることを実験的に示した(国際公開第2010/052810)。

30

【0097】

本実施の形態における電極構造(Zn/Ag)をm面Ga<sub>0.9</sub>N<sub>0.1</sub>上に配置させた場合にコンタクト抵抗が飛躍的に下がるのは、熱処理によって、Ga原子のみが電極側に拡散し、N原子は電極側に拡散していないためと推測される。Ga<sub>0.9</sub>N<sub>0.1</sub>のうちGaのみが電極側に拡散するため、Zn層では、N濃度がGa濃度よりも低くなっている。

【0098】

p型Ga<sub>0.9</sub>N<sub>0.1</sub>においてGaが電極側に拡散すると、p型Ga<sub>0.9</sub>N<sub>0.1</sub>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性質を有するため、電極とp型Ga<sub>0.9</sub>N<sub>0.1</sub>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。これにより、m面を表面とするp型Ga<sub>0.9</sub>N<sub>0.1</sub>層と接するようにZn層を形成した場合には、コンタクト抵抗が低減されることが考えられる。

40

【0099】

これに対し、Ga原子とともにN原子も電極側に拡散すると、p型Ga<sub>0.9</sub>N<sub>0.1</sub>の最表面にNが不足する状態、すなわちN空孔も形成される。N空孔はドナー的性質を有するため、p型Ga<sub>0.9</sub>N<sub>0.1</sub>の最表面では、Ga空孔とN空孔との間で電荷補償が起こる。また、N原子が抜けることによってGa<sub>0.9</sub>N<sub>0.1</sub>結晶の結晶性は悪化すると考えられる。そのため、Ga原子とともにN原子も電極側に拡散した場合には、p型Ga<sub>0.9</sub>N<sub>0.1</sub>層と電極との間のコンタクト抵抗は高い。

【0100】

50

図7Aに、m面Ga<sub>2</sub>N<sub>3</sub>の上にZn/Ag電極が配置された構造におけるGa原子の深さ方向のプロファイルを、SIMSを用いて測定した結果を示す。図7Aには、熱処理前(a s - d e p o)のプロファイルと、熱処理後(600 熱処理後)のプロファイルとを示す。グラフの縦軸は強度(Ga濃度に相当)を示し、横軸は深さ方向の距離を示す。縦軸の $1 \times 10^1$ の強度は、 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ のGa濃度に相当する。横軸の数値が「-」の領域は電極側であり、「+」の領域はp型Ga<sub>2</sub>N<sub>3</sub>側である。横軸の原点(0 μm)は、Znのピーク位置であり、p型Ga<sub>2</sub>N<sub>3</sub>層とZn層との界面の位置にほぼ相当する。

#### 【0101】

測定に用いた試料の熱処理は、600 の温度で10分間行った。熱処理前のZn層の厚さは7nmであり、Ag層の厚さは75nmであった。いずれの試料においても、熱処理前に、電極が接触するp型Ga<sub>2</sub>N<sub>3</sub>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をドーピングした。

10

#### 【0102】

図7Aに示すように、a s - d e p oの状態では、表面側(-側)に近づくにつれて、Ga濃度が単調に減少している。図7Aには表れていないが、a s - d e p oの状態のGa濃度は、横軸の値が-0.05 μm付近のときに検出限界以下となる。この結果から、a s - d e p oの状態では、Gaが金属側にほとんど拡散していないことがわかる。一方、熱処理を行った後には、熱処理前と比較して、0.01 μmから0 μmまで、および-0.01 μmから-0.04 μmまでの領域においてGa濃度が高くなっている。この結果は、熱処理後の状態では、熱処理前と比較して、電極中にGaが拡散していることを示す。

20

#### 【0103】

次に、窒素の挙動を説明する。図7Bは、m面Ga<sub>2</sub>N<sub>3</sub>の上にZn/Ag電極が配置された構造における窒素原子の深さ方向のプロファイルを、SIMSを用いて測定した結果を示すグラフである。グラフの縦軸は強度(N濃度に相当)であり、横軸は深さ方向の距離である。縦軸の $1 \times 10^1$ の強度は $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 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Ga<sub>2</sub>N<sub>3</sub>側である。横軸の原点(0 μm)は、Znのピーク位置であり、p型Ga<sub>2</sub>N<sub>3</sub>層とZn層との界面の位置にほぼ相当する。

30

#### 【0104】

測定に用いた試料の熱処理は、600 の温度で10分間行った。熱処理前のZn層の厚さは7nmであり、Ag層の厚さは75nmであった。電極の構造およびp型Ga<sub>2</sub>N<sub>3</sub>のドーピング条件は、図7Aに示す測定結果が得られたサンプルにおけるものと同様である。

#### 【0105】

図7Bに示すように、熱処理前(a s - d e p o)と熱処理後(600 熱処理後)とを同じ横軸の値(0から-0.02)で比較すると、熱処理後のほうが熱処理前よりも電極内の窒素濃度が低下しているように見える。しかしながら、これは、2つのプロファイルの深さ方向の位置がずれて観測された測定誤差に起因するものであると考えられる。熱処理前(a s - d e p o)および熱処理後(600 熱処理後)のいずれのプロファイルも、窒素濃度がほぼ一定の領域(p型Ga<sub>2</sub>N<sub>3</sub>側)と、電極の表面側に近づくにつれて単調に窒素濃度が低下する領域(電極側)とを有し、類似した挙動を示す。この結果から、熱処理によって窒素がほとんど拡散していないことがわかる。

40

#### 【0106】

図7A、7Bに示す結果から、m面Ga<sub>2</sub>N<sub>3</sub>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とがわかる。

#### 【0107】

なお、このような各元素(Ga、N)の挙動は、Zn層が接触するGa<sub>2</sub>N<sub>3</sub>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、Zn層が

50

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。

【0108】

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。

【0109】

図3(a)に示すように、本実施形態の窒化物系半導体発光素子100では、m面を表面に有するGaN系基板10と、GaN系基板10上に形成された $Al_uGa_vIn_wN$ 層( $u+v+w=1, u>0, v>0, w>0$ )22とが形成されている。この例では、GaN系基板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、GaN系基板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。

10

【0110】

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( $a+b+c=1, a>0, b>0, c>0$ )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InGaIn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( $d+e=1, d>0, e>0$ )26が形成されている。第2導電型(p型)の $Al_dGa_eN$ 層( $d+e=1, d>0, e>0$ )26は例えば、Al組成比が10%のAlGaIn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がドーブされている。ここでMgは、 $Al_dGa_eN$ 層26に対して、例えば、 $10^{18}cm^{-3}$ 程度ドーブされている。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。

20

【0111】

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、Zn層32が形成されており、その上にAg層34が形成されている。このZn層32とAg層34の積層構造が電極(p型電極)30となる。

【0112】

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。

30

【0113】

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2.0V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。

40

【0114】

さらに、Ag層34による光の反射効果により、従来のPd/Pt電極を用いたm面LEDの場合よりも外部量子効率大幅に向上することを確認した。

【0115】

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100の製造方法を説明する。

【0116】

まず、GaN系基板10を用意する。本実施形態では、GaN系基板10として、GaN基板を用いる。本実施形態のGaN基板は、HVPE(Hydride Vapor Phase Epitaxy)法を用いて得られる。

50



## 【0117】

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GaNを成長する。その後、厚膜GaNをc面に垂直方向、m面で切り出すことによりm面GaN基板が得られる。GaN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GaN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。

## 【0118】

GaN系基板10としては、GaN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GaN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、GaN系基板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。

10

## 【0119】

次に、GaN系基板10の上に、 $Al_uGa_vIn_wN$ 層22を形成する。 $Al_uGa_vIn_wN$ 層22として、例えば、厚さ $3\mu m$ のAlGaNを形成する。GaNを形成する場合には、GaN系基板10の上に、1100でTMG( $Ga(CH_3)_3$ )、TMA( $Al(CH_3)_3$ )および $NH_3$ を供給することによってGaN層を堆積する。

20

## 【0120】

次に、 $Al_uGa_vIn_wN$ 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 $Ga_{0.9}In_{0.1}N$ 井戸層と、厚さ9nmのGaNバリア層が交互に積層された厚さ81nmのGaInN/GaN多重量子井戸(MQW)構造を有している。 $Ga_{0.9}In_{0.1}N$ 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。

## 【0121】

次に、活性層24の上に、例えば厚さ30nmのアンドープGaN層を堆積する。次いで、アンドープGaN層の上に、 $Al_dGa_eN$ 層26を形成する。 $Al_dGa_eN$ 層26として、例えば、TMG、 $NH_3$ 、TMA、TMIおよびp型不純物として $Cp_2Mg$ (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- $Al_{0.14}Ga_{0.86}N$ を形成する。

30

## 【0122】

次に、 $Al_dGa_eN$ 層26の上に、例えば厚さ $0.5\mu m$ のp-GaNコンタクト層を堆積する。p-GaNコンタクト層を形成する際には、p型不純物として $Cp_2Mg$ を供給する。

## 【0123】

その後、塩素系ドライエッチングを行なうことにより、p-GaNコンタクト層、 $Al_dGa_eN$ 層26、アンドープGaN層および活性層24の一部を除去して凹部42を形成し、 $Al_xGa_yIn_zN$ 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、電極40として、Ti/Al/Pt層を形成する。

40

## 【0124】

さらに、p-GaNコンタクト層の上にZn層32を形成し、さらにZn層32上にAg層34を形成する。その後、熱処理を行なう。これにより、電極(p型電極)30を形成する。Zn層32およびAg層34は、共に、通常の真空蒸着法(抵抗加熱法、電子ビーム蒸着法など)によって形成することができる。Zn層32を形成する方法としては、真空蒸着法のほかに、スパッタリング、熱CVD法や分子線エピタキシ(MBE)を行なってもよい。

## 【0125】

50

なお、その後、レーザーリフトオフ、エッチング、研磨などの方法を用いて、GaN系基板10、 $Al_uGa_vIn_wN$ 層22の一部までを除去してもよい。このとき、GaN系基板10のみを除去してもよいし、GaN系基板10および $Al_uGa_vIn_wN$ 層22の一部だけを選択的に除去してもよい。もちろん、GaN系基板10、 $Al_uGa_vIn_wN$ 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。

#### 【0126】

本実施形態の窒化物系半導体発光素子100において、電極40と電極30との間に電圧を印加すると、電極30から活性層24に向かって正孔が、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。

10

#### 【0127】

ここで、図8に、Zn/Ag層からなる電極(500、550、575、および600で10分間熱処理をしたもの)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が同じで、Pd/Pt層からなる電極を用いた発光ダイオードの特性も示す。熱処理前における各層の厚さは、Zn/Ag電極におけるZn層が7nm、Ag層が75nmであり、Pd/Pt電極におけるPd層が40nm、Pt層が35nmである。

#### 【0128】

この発光ダイオードの構成は、m面GaN基板上に、n型GaN層、InGaN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、Zn/Ag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。

20

#### 【0129】

Pd/Pt層からなる電極を用いた発光ダイオードの立ち上がり電圧は約3.8Vである。これに対し、Zn/Ag層からなる電極を用いた発光ダイオードの立ち上がり電圧は約2.8Vであり、立ち上がり電圧の大幅な低減が見られる。一方、電流値20mAでの動作電圧で比較すると、Zn/Ag層からなる電極を用いた発光ダイオードでは、Pd/Pt層からなる電極を用いた発光ダイオードよりも2.0V以上小さくなっていることがわかる。

30

#### 【0130】

本実施形態では、図9(a)に示すように、Zn層32およびAg層34からなる電極30の表面を、Ag以外の金属(例えばTi、Pt、Mo、Pd、Au、Wなど)からなる保護電極50で覆ってもよい。ただし、これらの金属の光吸収損失はAgの光吸収損失と比較して大きいので、Ag層34の厚みを光の侵入長である10nm以上にすることによって、すべての光をAg層34で反射させて保護電極50まで透過しないようにすることが好ましい。光吸収損失が比較的小さい金属を保護電極50として用いる場合には、この保護電極50が反射膜の効果をも併せ持つことになるため、Ag層34の厚さは10nm以上でなくてもよい。

#### 【0131】

保護電極50は、電極30の全体を覆ってもよいし、一部のみを覆ってもよい。保護電極50は金属であるため、保護電極50によって電極30の全体を覆う場合でも、保護電極50上にリード線(図示せず)をボンディングすれば、電極30とリード線とが導通される。ただし、保護電極50を構成する金属の抵抗が大きい場合には、保護電極50の一部に開口を設け、電極30におけるAg層34に直接リード線をボンディングすることが好ましい。

40

#### 【0132】

また、図9(b)に示すように、電極30を保護するために、誘電体(例えば $SiO_2$ やSiNなど)からなる保護層51を形成してもよい。このとき、電極30の全体を保護層51によって覆うと、電極30と外部とを導通させることができないため、保護層51

50

の一部に開口 5 2 を設け、電極 3 0 における A g 層 3 4 に直接リード線（図示せず）をボンディングする必要がある。S i O<sub>2</sub> や S i N などの誘電体は屈折率が低い性質を有するため、保護層 5 1 を形成した場合には、光の反射率をさらに高くすることができる。

【 0 1 3 3 】

図 9 ( a ) に示す保護電極 5 0 または図 9 ( b ) に示す保護層 5 1 を形成することによって、マイグレーションしやすい性質を有する A g が拡散するのを防止することができる。また、A g 層 3 4 の表面を保護することによって、A g 層 3 4 が大気中の硫黄や酸素に接触しにくくなるため、A g 層 3 4 の硫化および酸化を防止することができる。なお、図 9 ( a )、( b ) では、図 3 ( a ) に示す窒化物系半導体発光素子 1 0 0 のうち、A l<sub>1</sub> G a<sub>9</sub> N 層 2 6、Z n 層 3 2 および A g 層 3 4 以外の構成要素の図示を省略している。

10

【 0 1 3 4 】

なお、前述の保護電極 5 0 または保護層 5 1 の上に、配線用の金属（A u、A u S n など）を形成してもよい。

【 0 1 3 5 】

本実施形態では、p 型電極の材料として、P d よりも地球上に豊富に存在する Z n を用いている。Z n は、M g と比較して酸化されにくい性質を有し、Z n 層は通常の蒸着法によって形成することができるという利点がある。また、m 面 G a N 層と Z n 層との間の密着性は良好であることを確認した。

【 0 1 3 6 】

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。

20

【 0 1 3 7 】

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 1、2 に開示されている。しかしながら、特許文献 1 及び 2 とともに、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と考えられる。特に、特許文献 1 は、p 型 G a N 層の上に薄膜金属層を堆積した後に A g 合金層を堆積する構成を開示しているが、薄膜金属層に用いる金属として開示されているのは、P t、C o、N i、P d のみである。これらは仕事関数の大きい金属であり、特許文献 1 では、仕事関数の大きい金属を p 型電極として用いることが好ましいという技術常識に基づいてこれらの金属が使用されていると考えられる。m 面 G a N の p 型電極の場合には、前述したように、単に仕事関数の大きい金属（P d、N i、P t 等）を用いても、これらの電極と m 面 G a N とはオーミックコンタクトを形成しないことが本願発明者によって確認されている。一方、特許文献 2 は、A g、A g - N i 合金、A g - P d 合金、A g - R h 合金、A g - P t 合金からなる電極構造を開示している。特許文献 2 の電極構造では、仕事関数の大きい金属と A g との合金が形成されており、この発想も技術常識に基づくものである。

30

【 0 1 3 8 】

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。

40

【 0 1 3 9 】

図 1 0 は、このような白色光源の一例を示す模式図である。図 1 0 の光源は、図 3 ( a ) に示す構成を有する窒化物系半導体発光素子 1 0 0 と、この窒化物系半導体発光素子 1 0 0 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 Y A G : Y t t r i u m A l u m n i u m

G a r n e t）が分散された樹脂層 2 0 0 とを備えている。窒化物系半導体発光素子 1 0 0 は、表面に配線パターンが形成された支持部材 2 2 0 上に搭載されており、支持部材 2 2 0 上には窒化物系半導体発光素子 1 0 0 を取り囲むように反射部材 2 4 0 が配置されている。樹脂層 2 0 0 は、窒化物系半導体発光素子 1 0 0 を覆うように形成されている。

50

## 【 0 1 4 0 】

図 1 0 に示す窒化物系半導体発光素子 1 0 0 において、Zn / Ag 電極である電極 3 0 は、半導体積層構造 2 0 よりも支持部材 2 2 0 側に配置されている。半導体積層構造 2 0 における活性層 2 4 において発生した光は、活性層 2 4 から放射状に出射する。活性層 2 4 から出射した光のうち光取り出し面 1 1 を通過した光や反射部材 2 4 0 で反射された光は、樹脂層 2 0 0 中を進んで窒化物系半導体発光素子 1 0 0 の外部に取り出される。このとき、光の一部は樹脂層 2 0 0 に含まれる蛍光体によってより長波長の光に変換される。一方、活性層 2 4 から出射した光のうち電極 3 0 に向かって進む光は、電極 3 0 における Ag 層で反射される。このとき、Ag は光に対して高い反射率を有するため、Ag 層に入射した光の多くが Ag 層によって吸収されずに反射される。Ag 層で反射された光は、半導体積層構造 2 0 および樹脂層 2 0 0 中を進んで外部に取り出される。その結果、白色光源から取り出される光は増加する。このように、本実施形態では、外部量子効率を高めることができる。

10

## 【 0 1 4 1 】

なお、本発明におけるコンタクト構造は、Zn 層と接触する p 型半導体領域が GaN 系半導体、すなわち  $Al_xIn_yGa_zN$  ( $x + y + z = 1, x \geq 0, y \geq 0, z \geq 0$ ) 半導体からなる場合に前述の優れた効果を発揮する。このような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）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。Ag 層による光の反射効果を利用しないとしても、Zn / Ag 電極を用いることにより、m 面 GaN に対してコンタクト抵抗の大幅な低減を得ることができる。

20

## 【 0 1 4 2 】

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。

30

## 【 0 1 4 3 】

## [他の実施形態]

図 1 1 は、本実施形態の窒化物系半導体発光素子 1 0 0 a 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物系半導体発光素子 1 0 0 a 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 系基板 1 0 a 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 面から特定方位に傾斜した面を主面とするように作製され得る。この GaN 系基板 1 0 a 上に、半導体積層構造 2 0 a を形成する。図 1 1 に示す  $Al_uGa_vIn_wN$  層 2 2 a、活性層 2 4 a および  $Al_dGa_eN$  層 2 6 a 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 系基板 1 0 a 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。本実施形態の構成においては、半導体積層構造 2 0 a のうち、少なくとも電極 3 0 a と接触する p 型半導体領域の表面が m 面から  $1^\circ$  以上の角度で傾斜していればよい。

40

## 【 0 1 4 4 】

次に、図 1 2 ~ 図 1 6 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。

50

## 【 0 1 4 5 】

図 1 2 ( a ) は、G a N 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 9 0 ° 回転させた構造を示している。G a N 結晶の c 面には、+ c 面および - c 面が存在する。+ c 面は G a 原子が表面に現れた ( 0 0 0 1 ) 面であり、「G a 面」と称される。一方、- c 面は N (窒素) 原子が表面に現れた ( 0 0 0 - 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。

## 【 0 1 4 6 】

図 1 2 ( a ) に示す + c 軸方向は、- c 面から + c 面に垂直に伸びる方向である。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 [ - 1 2 - 1 0 ] 方向を向いている。図 1 2 ( 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、[ 1 0 - 1 0 ] 方向に平行であり、図 1 2 ( 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。

## 【 0 1 4 7 】

G a N 系化合物半導体層の主面が m 面から 1 ° 以上の角度で傾斜するという事は、この半導体層の主面の法線が m 面の法線から 1 ° 以上の角度で傾斜することを意味する。

## 【 0 1 4 8 】

次に、図 1 3 を参照する。図 1 3 ( a ) および ( b ) は、それぞれ、G a N 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 1 3 には、+ c 軸方向を示す矢印が示されている。図 1 3 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。

## 【 0 1 4 9 】

図 1 3 ( a ) および ( b ) に示す例では、G a N 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 1 3 ( 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 1 3 ( 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）を正の値にとり、後者の場合における傾斜角度を負の値にとりにする。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。

## 【 0 1 5 0 】

本実施形態では、p 型半導体領域の傾斜角度が 1 ° 以上 5 ° 以下の範囲、および、傾斜角度が - 5 ° 以上 - 1 ° 以下の範囲にあるので、p 型半導体領域の傾斜角度が 0 ° より大きく ± 1 ° 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 1 4 を参照しながら、この理由を説明する。図 1 4 ( a ) および ( b ) は、それぞれ、図 1 3 ( 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。傾斜角度が 5 ° 以下の場合には、図 1 4 ( 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 ) を有し、ほぼ等間隔 ( 3 0 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。

## 【 0 1 5 1 】

図 1 5 は、m 面から - c 軸方向に 1 ° 傾斜した p 型半導体領域の断面 T E M 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 G a N 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、

10

20

30

40

50

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。

【0152】

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）が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。

【0153】

図16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）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16の結果から分かるように、傾斜角度が $5^\circ$ 以下であれば、コンタクト抵抗は、ほぼ一定の値となる。Zn/Ag層の電極を用いた場合にも、m面からの傾斜角度が $5^\circ$ 以下であれば、コンタクト抵抗は、ほぼ一定の値となると考えられる。

10

【0154】

以上から、p型半導体領域の表面の傾斜角度が $5^\circ$ 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考えられる。

【0155】

なお、傾斜角度の絶対値が $5^\circ$ より大きくなると、ピエゾ電界によって内部量子効率が低下する。このため、ピエゾ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、傾斜角度の絶対値を $5^\circ$ 以下に制限する。しかし、傾斜角度を例えば $5^\circ$ 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。

20

【産業上の利用可能性】

【0156】

本発明によれば、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型半導体領域とp型電極との間のコンタクト抵抗を低減することができ、かつp型電極における光吸収損失を少なくすることができるため、発光ダイオード（LED）として特に好適に利用される。

30

【符号の説明】

【0157】

- 10、10a 基板（GaN系基板）
- 11 光取り出し面
- 12、12a 基板の表面（m面）
- 20、20a 半導体積層構造
- 22、22a  $\text{Al}_u\text{Ga}_v\text{In}_w\text{N}$ 層
- 24、24a 活性層
- 26、26a  $\text{Al}_d\text{Ga}_e\text{N}$ 層
- 30、30A、30B、30C p型電極
- 32 Zn層
- 34 Ag層
- 40、40a n型電極
- 42、42a 凹部
- 50 保護電極
- 51 保護層
- 52 開口
- 61A、61C Zn-Ag合金層
- 100、100a 窒化物系半導体発光素子

40

50

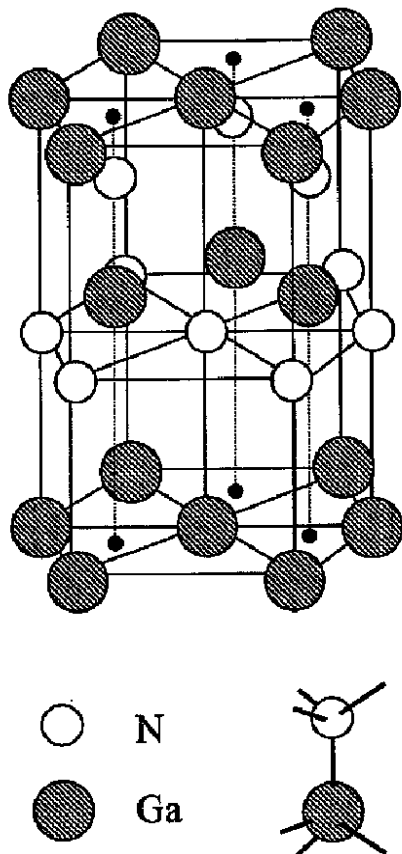
- 200 波長を変換する蛍光体が分散された樹脂層
- 220 支持部材
- 240 反射部材

【要約】

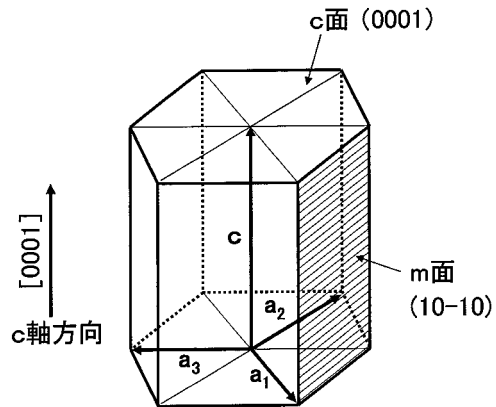
本発明の窒化物系半導体素子は、表面12がm面から1°以上5°以下の角度で傾斜したp型半導体領域を有する半導体積層構造20と、p型半導体領域上に設けられた電極30とを備える。p型半導体領域は、 $Al_xIn_yGa_zN$  ( $x + y + z = 1, x \geq 0, y \geq 0, z \geq 0$ ) 層26から形成されている。電極30は、Zn層32と、Zn層32の上に形成されたAg層34を含み、Zn層32は、半導体積層構造20におけるp型半導体領域の表面12に接触している。

【選択図】図11

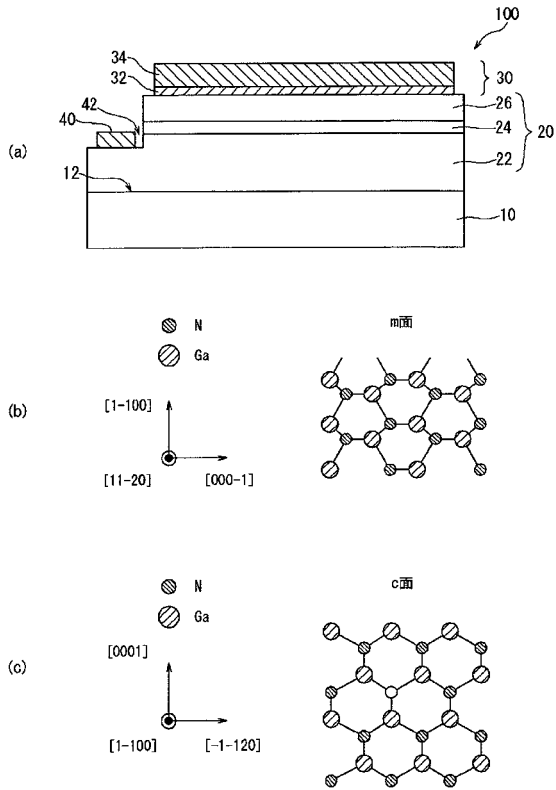
【図1】



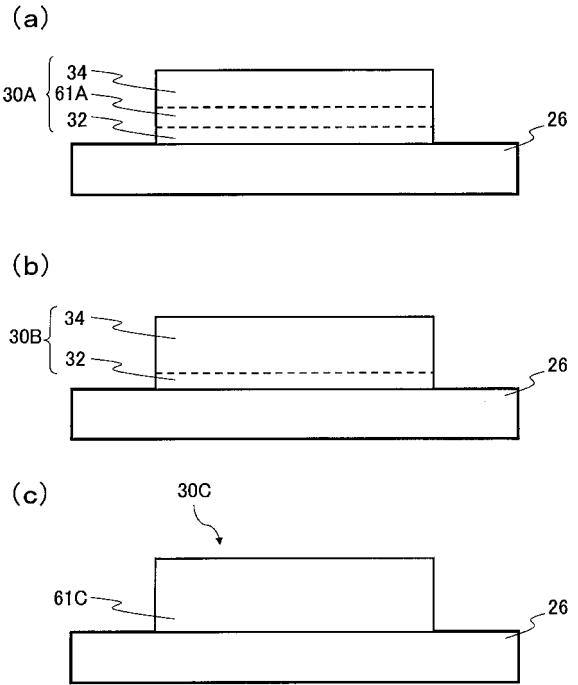
【図2】



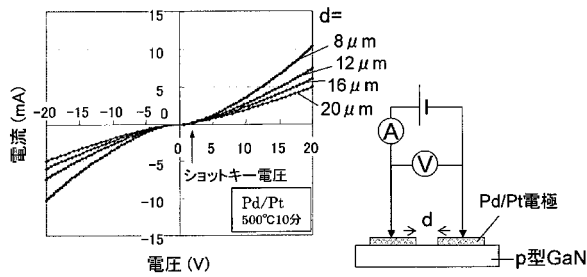
【図3】



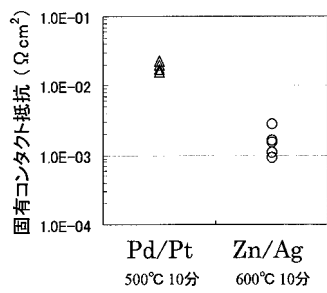
【図4】



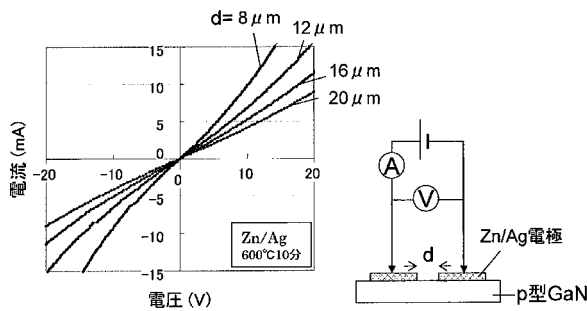
【図5A】



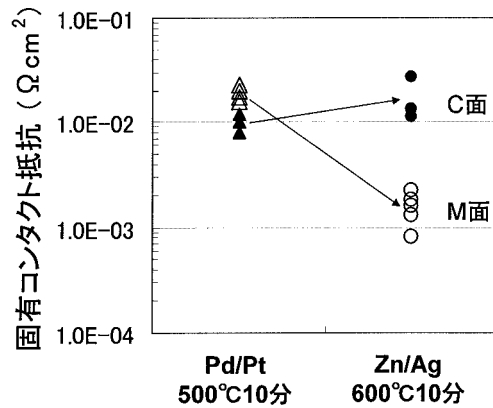
【図5C】



【図5B】

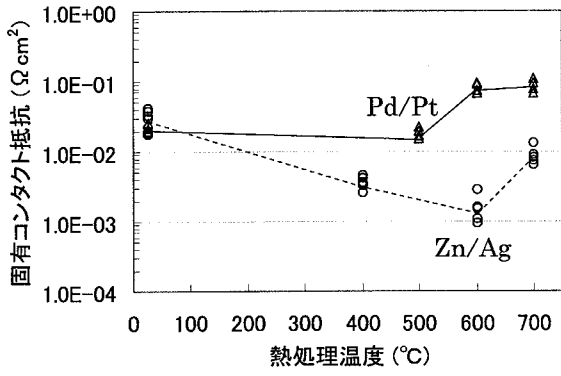


【図5D】

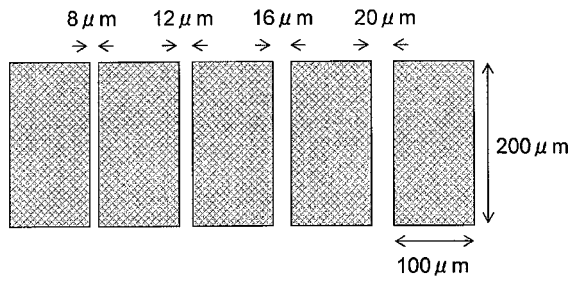




【 図 5 E 】



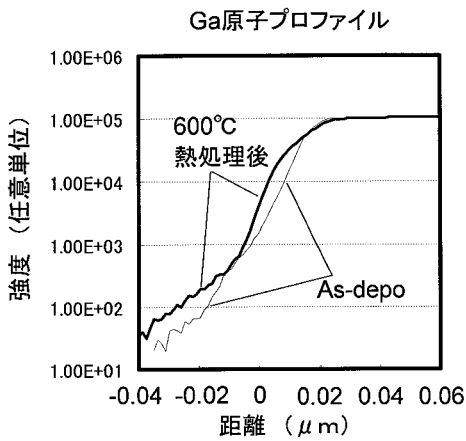
【 図 5 F 】



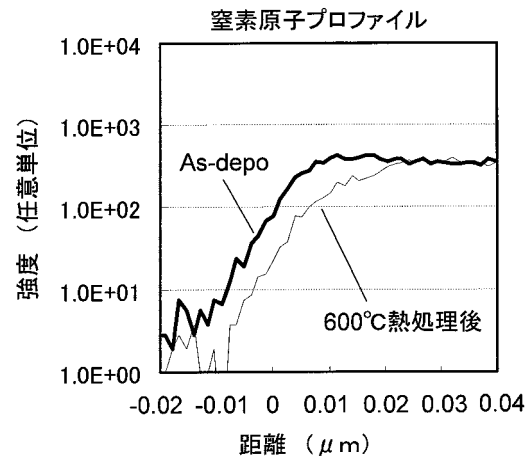
【 図 6 】

	m面GaN (Pd/Pt)	m面GaN (Zn/Ag)
as-depo		
400 $^{\circ}\text{C}$		
500 $^{\circ}\text{C}$		
600 $^{\circ}\text{C}$		
700 $^{\circ}\text{C}$		

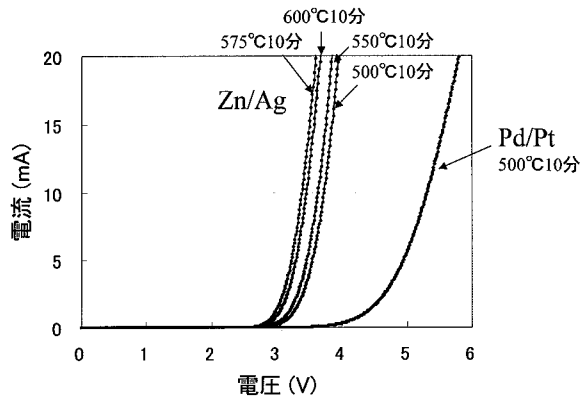
【 図 7 A 】



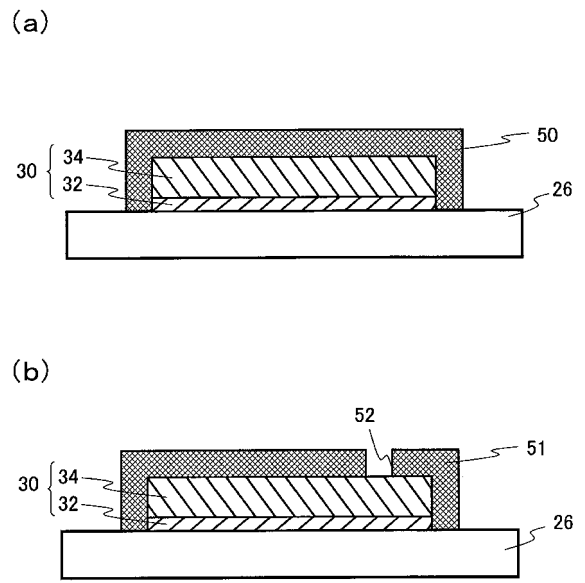
【 図 7 B 】



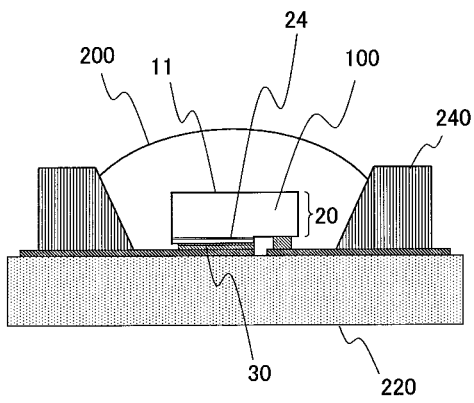
【 図 8 】



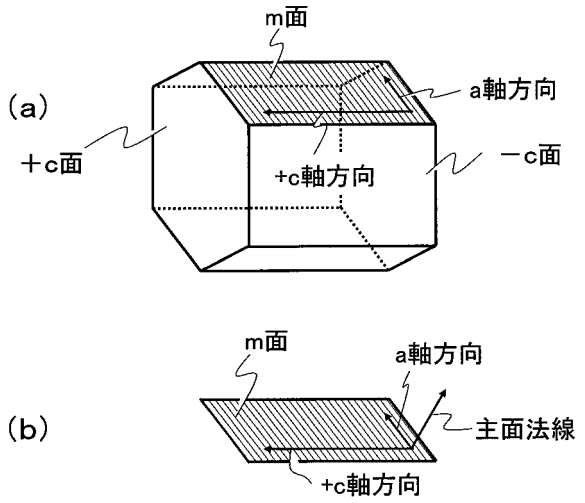
【 図 9 】



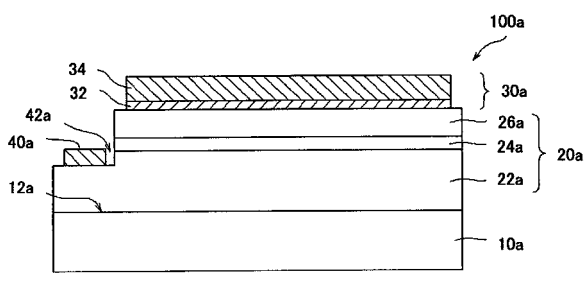
【 図 10 】



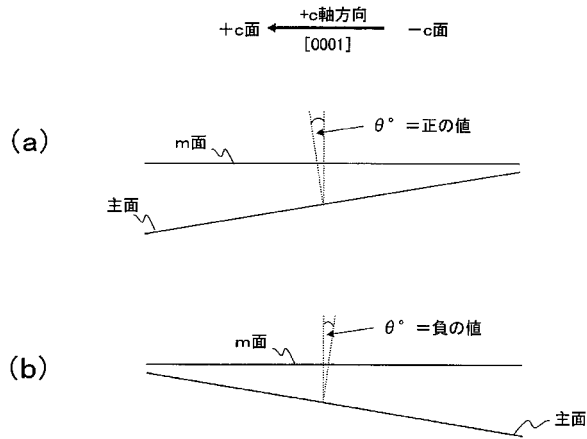
【 図 12 】



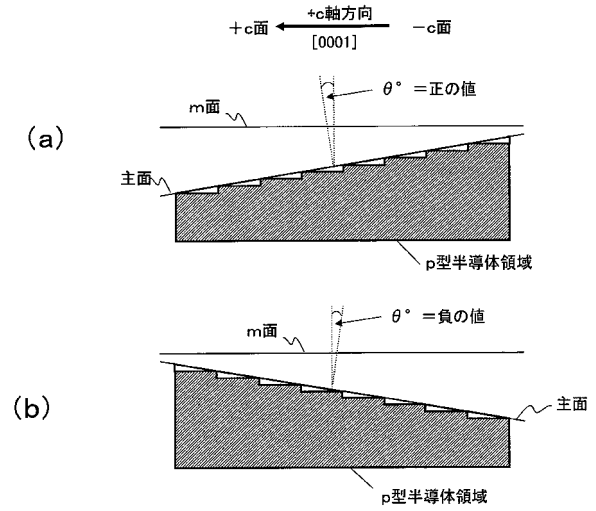
【 図 11 】



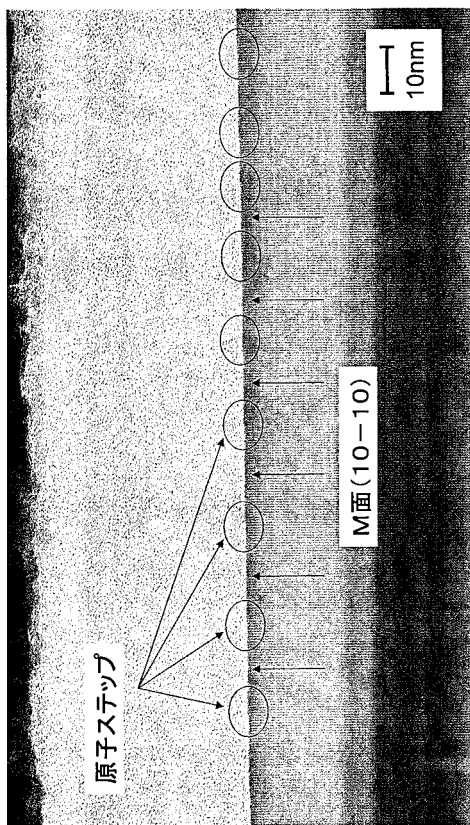
【図 13】



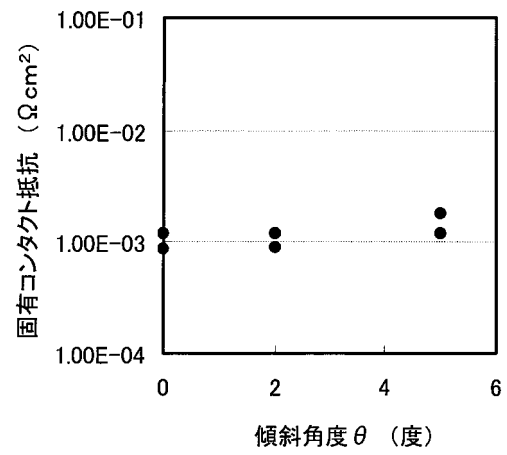
【図 14】



【図 15】



【図 16】



---

フロントページの続き

- (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 磯崎 瑛宏  
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 岡田 吉美

- (56)参考文献 特許第4568380(JP, B1)  
特開2007-180504(JP, A)  
特開2008-277323(JP, A)  
特開2008-258503(JP, A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)  
H01L 33/00 - 33/64