

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局



(43) 国際公開日
2011 年 10 月 13 日(13.10.2011)

PCT

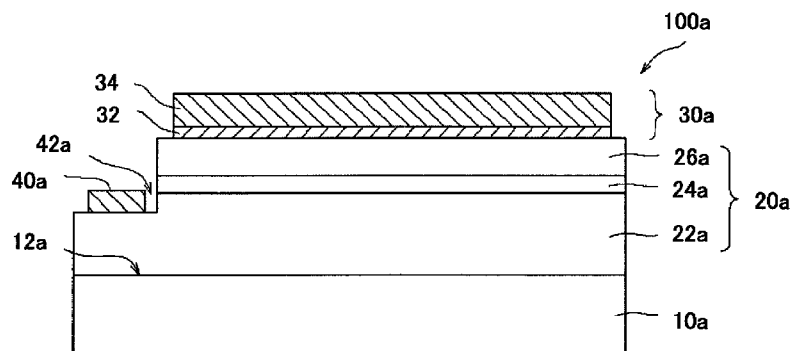
(10) 国際公開番号
WO 2011/125289 A1

- (51) 国際特許分類:
H01L 33/32 (2010.01) H01S 5/042 (2006.01)
H01L 33/40 (2010.01) H01S 5/343 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2011/001516
- (22) 国際出願日: 2011 年 3 月 15 日(15.03.2011)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2010-085222 2010 年 4 月 1 日(01.04.2010) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): パナソニック株式会社(PANASONIC CORPORATION) [JP/JP]; 〒5718501 大阪府門真市大字門真 1 0 0 6 番地 Osaka (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 横川 俊哉 (YOKOGAWA, Toshiya). 大屋 満明(OYA, Mitsunaki). 山田 篤志(YAMADA, Atsushi). 磯崎 瑛宏 (ISOZAKI, Akihiro).
- (74) 代理人: 奥田 誠司(OKUDA, Seiji); 〒5410041 大阪府大阪市中央区北浜一丁目 8 番 1 6 号 大阪証券取引所ビル 1 0 階 奥田国際特許事務所 Osaka (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).
- 添付公開書類:
— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

(54) Title: NITRIDE SEMICONDUCTOR ELEMENT AND MANUFACTURING METHOD THEREFOR

(54) 発明の名称: 窒化物系半導体素子およびその製造方法

[図9]



(57) Abstract: The disclosed nitride semiconductor element is provided with: a layered semiconductor structure (20) that has a p-type semiconductor region, the surface (12) of which is inclined at an angle between 1° and 5° with an m-plane; and an electrode (30) provided on top of the p-type semiconductor region. The p-type semiconductor region is formed from an $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_z\text{N}$ ($x+y+z=1, x \geq 0, y \geq 0, z \geq 0$) layer (26). The electrode (30) contains a zinc layer (32), which is in contact with the surface of the p-type semiconductor region in the layered semiconductor structure (20).

(57) 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、 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_z\text{N}$ ($x+y+z=1, x \geq 0, y \geq 0, z \geq 0$) 層 26 から形成されている。電極 30 は、Zn 層 32 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に接触している。

WO 2011/125289 A1

明 細 書

発明の名称：窒化物系半導体素子およびその製造方法

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。

[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] 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。

[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し、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、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こり、発光波長の変化も生じる。

[0006] そこで、これらの課題を解決するため、非極性面、例えば $[10\bar{1}0]$ 方向に垂直な、 m 面と呼ばれる $(10\bar{1}0)$ 面を表面に有する基板 (m 面Ga₂N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「 $\bar{}$ 」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。 m 面は、 $(10\bar{1}0)$ 面、 $(\bar{1}010)$ 面、 $(1\bar{1}00)$ 面、 $(\bar{1}100)$ 面、 $(01\bar{1}0)$ 面、 $(0\bar{1}10)$ 面の総称である。

[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2001-308462号公報

特許文献2：特開2003-332697号公報

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系半導体素子を持つコンタクト抵抗が高いという課題を解決すべく、鋭意検討した結果、コンタクト抵抗を低くすることができる手段を見出した。

[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層を含む。

[0013] ある実施形態において、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。

[0014] ある実施形態において、前記電極は、前記Zn層と、前記Zn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種の金属からなる。

[0015] 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。

[0016] 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。

[0017] ある実施形態において、前記Zn層の厚さは前記金属層の厚さ以下である。

[0018] 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。

[0019] ある実施形態において、前記Zn層の少なくとも一部が合金化している。

[0020] ある実施形態において、前記Zn層はアイランド状である。

[0021] ある実施形態において、前記Zn層は、Znと、Pt、MoおよびPdからなる群から選択される少なくとも1種の金属との合金から形成されている。

[0022] ある実施形態において、前記電極は、前記Zn層のみから構成され、前記Zn層は、Znと、Pt、MoおよびPdからなる群から選択される少なくとも1種の金属との合金から形成されている。

[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層を含む。

[0024] ある実施形態において、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。

- [0025] ある実施形態において、前記Zn層の少なくとも一部が合金化している。
- [0026] 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、 $\text{Al}_x\text{In}_y\text{Ga}_z\text{N}$ （ $x + y + z = 1$ ， $x \geq 0$ ， $y \geq 0$ ， $z \geq 0$ ）半導体からなる。
- [0028] ある実施形態において、前記工程（c）は、前記Zn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種の金属からなる金属層を形成する工程を含む。
- [0029] 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。
- [0030] ある実施形態において、前記加熱処理は、 400°C 以上 650°C 以下の温度で実行される。
- [0031] ある実施形態において、前記加熱処理は、 450°C 以上 600°C 以下の温度で実行される。
- [0032] ある実施形態は、前記工程（b）を実行した後に、前記基板を除去する工程を含む。
- [0033] ある実施形態において、前記Zn層の少なくとも一部が合金化している。

発明の効果

- [0034] 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におけるp型GaN系半導体領域の表面（m面）上の電極がZn層を含み、そのZn層がp型GaN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。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GaN系半導体領域を用

いた場合であっても、 m 面 GaN 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 GaN 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

- [0035] [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、電極における Zn および Pt の分布を模式的に示す図
- [図5] Pd/Pt 層からなる電極および Zn/Pt 層からなる電極の固有コンタクト抵抗 ($\Omega \cdot cm^2$) の値を示すグラフ
- [図6] 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7] Zn/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、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8] 白色光源の実施形態を示す断面図
- [図9] 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10] (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11] (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12] (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13] 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14] 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

[0036] 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。

[0037] 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。

[0038] 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(GaN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。

[0039] 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GaN系基板10を備えているが、GaN系基板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。

[0040] 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。

[0041] m 面を表面に有する GaN 系基板は、本明細書では「 m 面 GaN 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 GaN 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。

[0042] 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 GaN 系基板を、本明細書では「 c 面 GaN 系基板」と称する。

[0043] c 面 GaN 系基板は、 GaN 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 （又は In ）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。

[0044] 再び、図 3 (a) を参照する。 m 面 GaN 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、 $\text{Al}_a\text{In}_b\text{Ga}_c\text{N}$ 層（ $a+b+c=1$, $a \geq 0$, $b \geq 0$, $c \geq 0$ ）を含む活性層 24 と、 $\text{Al}_d\text{Ga}_e\text{N}$ 層（ $d+e=1$, $d \geq 0$, $e \geq 0$ ）26 とを含んでいる。 $\text{Al}_d\text{Ga}_e\text{N}$ 層 26 は、活性層 24 を基準にして表面 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。

[0045] 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 GaN 系基板 10 との間には、 $\text{Al}_u\text{Ga}_v\text{In}_w\text{N}$ 層（ $u+v+w=1$, $u \geq 0$, $v \geq 0$, $w \geq 0$ ）22 が形成されている。本実施形態の $\text{Al}_u\text{Ga}_v\text{In}_w\text{N}$ 層 22 は、第 1 導電型（ n 型）の $\text{Al}_u\text{Ga}_v\text{In}_w\text{N}$ 層 22 である。また、活性層 24 と $\text{Al}_d\text{Ga}_e\text{N}$ 層 26 との間に、アンドープの GaN 層を設けてもよ

い。

[0046] $\text{Al}_d\text{Ga}_e\text{N}$ 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ない。 $\text{Al}_d\text{Ga}_e\text{N}$ 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、 $\text{Al}_d\text{Ga}_e\text{N}$ 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、 $\text{Al}_d\text{Ga}_e\text{N}$ 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（ Ga_eN 層）から構成されていることが好ましい。

[0047] 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 Zn 層32を含む電極であり、 Zn 層32の上には、 Pt からなる金属層34が形成されている。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。 Zn 層32の少なくとも一部は合金化されていてもよい。すなわち、 Zn 層32のうち金属層34との境界に位置する部分のみが合金化されていてもよいし、 Zn 層32の全体が合金化されていてもよい。

[0048] 図4（a）から（c）は、 Zn 層32の合金化を説明するための図である。図4（a）は、 Zn 層32の一部（上部）が合金化した状態を示している。電極30Aは、 $\text{Al}_d\text{Ga}_e\text{N}$ 層26に接する Zn 層32と、 Zn 層32の上に存在する金属層34とから構成されている。 Zn 層32の上部は、 Zn-Pt 合金層61Aから構成されている。

[0049] 図4（b）は、 Zn と Pt との合金化が $\text{Al}_d\text{Ga}_e\text{N}$ 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 $\text{Al}_d\text{Ga}_e\text{N}$ 層26と接触する部分）は、 Zn-Pt 合金から形成されている。図4（b）に示す電極30Bの例では、 Zn 層32の上には、金属層34が存在している。

[0050] 図4（c）に、 Zn 層および Pt 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-Pt 合金層61Cのみから

構成されている。

[0051] 図4(a)から(c)に示すZn-Pt合金は、ZnおよびPtから構成されている(主成分がZnおよびPtである)。図4(a)から(c)に示す構造は、Zn層の上に金属層を形成した後に、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、金属層34を構成する金属とZn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。

[0052] 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ピングされたAl_dGa_eN層26に接触している。Al_dGa_eN層26には、例えば、ドーパントとしてMgがドーピングされている。Mg以外のp型ドーパントとして、例えばZn、Beなどがドーピングされていてもよい。

[0053] Zn層32の表面に接触する金属層34としては、Pt層の他、Auに比べるとZnと合金を形成し難い金属(例えば、MoやPd)を用いることができる。すなわち、Pt、MoおよびPdからなる群から選択される少なくとも1種の金属を用いればよい。逆に、Zn層32と接触する金属層34として、Znと合金を形成し易いAu(金)は好ましくない。

[0054] 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、互いに間隔を置いて形成されていてもよい。このとき、金属層34を構成するPtは各アイランド状Znの間に入り込んでいる。金属層34の少なくとも一部がアイランド状に凝集していてもよい。

[0055] 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、金属層34の厚さよりも薄い層であり、Zn層32の厚さは、例えば、2nm以上50nm以下である。なお、ここでのZn層32の厚さは、熱処理後のZn層の厚さである。Zn層32の厚さが50nm以下であれば、発光素子を作製するためのプロセスにおける電極剥がれを防止することができる。

[0056] 金属層(例えば、Pt層)34の厚さは、例えば10nm以上200nm

以下である。Zn層32が金属層34の厚さよりも薄い層であるのは、Zn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Zn層32とAlGaIn層26との間での剥離が生じないようにするものである。

[0057] また、m面の表面12を有するGaN系基板10の厚さは、例えば、100~400 μ mである。これはおよそ100 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GaN系基板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。

[0058] 本実施形態の構成では、GaN系基板10の上に位置するn型のAlGaInN層（例えば、厚さ0.2~2 μ 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AlGaInN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AlGaInN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、100~200nmである。

[0059] また、本実施形態の活性層24は、Ga_{0.9}In_{0.1}N井戸層（例えば、厚さ9nm）とGaNバリア層（例えば、厚さ9nm）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81nm）を有している。

[0060] 活性層24の上には、p型のAlGaInN層26が設けられている。p型のAlGaInN層26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24とAlGaInN層26の間には、アンドープのGaN層を設けてもよい。

[0061] 加えて、AlGaInN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Ga_aN層の上に、p⁺-Ga_aNからなるコンタクト層を形成し、さらに、p⁺-Ga_aNからなるコンタクト層上に、Zn層32を形成することも可能である。なお、Ga_aNからなるコンタクト層を、Al_dGa_eN層26とは別の層であると考えた代わりに、Al_dGa_eN層26の一部であると考えすることもできる。

[0062] 次に、図5および図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。

[0063] 図5は、Pd/Pt電極、およびZn/Pt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電極としては、p型のm面Ga_aN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うことによって形成した電極 (m面Ga_aN (Pd/Pt)) を用いた。Zn/Pt電極としては、p型のm面Ga_aN層上に厚さ7nmのZn層と、厚さ75nm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Ga_aN (Zn/Pt)) 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Pt層を通常の電子ビーム蒸着法によって堆積した。

[0064] Zn/Pt電極、およびPd/Pt電極は、Mgがドーピングされたm面Ga_aN層に接触している。これらの電極が接触するm面Ga_aN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Ga_aN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Ga_aN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Ga_aN層の表面から深さ20nmの領域に $7 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ のMgをド

ープし、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。

[0065] 固有コンタクト抵抗は TLM (Transmission Line Method) 法を用いて評価した。なお、縦軸に示した「 $1.0\text{E}-01$ 」は「 1.0×10^{-1} 」を意味し、「 $1.0\text{E}-02$ 」は「 1.0×10^{-2} 」を意味し、すなわち、「 $1.0\text{E}+X$ 」は、「 1.0×10^X 」の意味である。

[0066] コンタクト抵抗 R は、一般に、コンタクト面積 S (cm^2) に反比例する。ここで、コンタクト抵抗を R (Ω) 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 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。

[0067] 図5に示すように、Pd/Pt電極のコンタクト抵抗よりも、Zn/Pt電極の固有コンタクト抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$) のほうが一桁近くも低くなっている。

[0068] なお、国際公開第2010/113406号には、Znを含む電極をc面p型GaN層と接触させた場合には、Pd/Pt電極をc面GaN層と接触させた場合と同等または若干高いコンタクト抵抗が得られることが開示されている。一方、接触面がm面の場合には、Znを含む電極は、Pd/Pt電極より顕著に低いコンタクト抵抗を示すことが開示されている。この結果から、Zn/Pt電極を用いた本発明でも同様の傾向を示すと推測される。

[0069] また、本願発明者の検討によると、従来の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）であったが、Zn/Pt電極の電流-電圧特性からはショットキー電圧が現れておらず、Zn/Pt電極はp型のm面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った。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。

[0070] 一般に、c面GaN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＝5.1 eV）やPt（仕事関数＝5.6 eV）を用いることが技術常識である。Znの仕事関数（4.3 eV）は他のコンタクト電極材料の仕事関数に比べて小さい。

[0071] 本願発明者は、比較のため、p型のc面GaN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200 nmで堆積されたZn層に、窒素雰囲気中、500℃で10分間の熱処理を行ったものを用いた。その結果、c面GaN層上に形成されたZn層のコンタクト抵抗は、約 $3.0 \times 10^{-1} \Omega \cdot \text{cm}^2$ という非常に高い値となった。

[0072] 以上に述べた理由から、Zn層をm面GaNのp型コンタクト電極に使用しても、決して好ましいコンタクト特性を実現することはできないと予想される。本願発明者は、敢えてp型GaNのm面にZn層を接触させ、熱処理を行ったところ、適切な熱処理を行うことにより、コンタクト抵抗を大幅に低減できる現象を見出し、本発明を完成するに至った。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GaN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。

[0073] なお、本願発明者は、m面GaN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GaNの場合にも、仕事関数が高い金属（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号）。

[0074] 次に、好ましい熱処理条件について述べる。図6は、Pd/Pt電極およびZn/Pt電極の固有コンタクト抵抗の熱処理温度依存性を示すグラフである。Pd/Pt電極としては、p型のm面GaN層上に厚さ40 nmのPd層と、厚さ35 nmのPt層とを堆積した後、窒素雰囲気中でそれぞれの温度の熱処理を行うことによって形成した電極（m面GaN（Pd/Pt））を用いた。Zn/Pt電極としては、p型のm面GaN層上に厚さ7 nmのZn層と、厚さ75 nmのPt層とを堆積した後、窒素雰囲気中でそれぞれ

れの温度の熱処理を行なうことによって形成した電極（m面Ga_{0.9}N_{0.1}（Zn/Pt））を用いた。

[0075] 図6に示すように、m面Ga_{0.9}N_{0.1}（Pd/Pt）電極の場合、m面Ga_{0.9}N_{0.1}のコンタクト抵抗は、500℃の熱処理の前後で、ほとんど変化しなかった。さらに、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た。

[0076] 一方、m面Ga_{0.9}N_{0.1}（Zn/Pt）電極の場合は、400℃を超えた温度になると、コンタクト抵抗は急に低下した。そして、500℃の温度ではさらにコンタクト抵抗は低下した。さらに昇温して600℃の温度では、コンタクト抵抗は500℃の温度のときよりも上昇するものの、従来のm面Ga_{0.9}N_{0.1}（Pd/Pt）の電極の場合のコンタクト抵抗よりは小さかった。

[0077] したがって、m面Ga_{0.9}N_{0.1}（Zn/Pt）の熱処理温度としては、例えば、400℃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Ga_{0.9}N_{0.1}層の膜質の劣化が進むため、上限は700℃以下が好ましく、そして、400℃以上650℃以下の温度範囲であることがさらに好ましい。450℃以上600℃以下がより好適な熱処理温度である。

[0078] 本実施の形態における電極構造（Zn/Pt）をm面Ga_{0.9}N_{0.1}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_{0.9}N_{0.1}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と推測される。

[0079] p型Ga_{0.9}N_{0.1}においてGaが電極側に拡散すると、p型Ga_{0.9}N_{0.1}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_{0.9}N_{0.1}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_{0.9}N_{0.1}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と考えられる。

[0080] 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_{0.9}N_{0.1}

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_aN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_aN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_aN層と電極との間のコンタクト抵抗は高い。

[0081] なお、このような各元素（Ga、N）の挙動は、Zn層が接触するGa_aN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層が接触するGa_aN系半導体層中にドーパントとしてMg以外の元素がドーピングされている場合でも同様であると推定される。

[0082] 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。

[0083] 図3（a）に示すように、本実施形態の発光素子100では、m面Ga_aN系基板10と、Ga_aN系基板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Ga_aN系基板10は、n型Ga_aN基板（例えば、厚さ100μm）であり、Al_uGa_vIn_wN層22は、n型Ga_aN層（例えば、厚さ2μm）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Ga_aN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。

[0084] 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_aN井戸層とGa_aN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_aN層で厚さは0.2μm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、M

g がドーピングされている。ここで Mg は、 $AlGaIn$ 層 26 に対して、例えば、 10^{18} cm^{-3} 程度ドーピングされている。またこの例では、活性層 24 と $AlGaIn$ 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。

[0085] さらに、この例においては、 $AlGaIn$ 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、その上に金属層 34 が形成されている。この Zn 層 32 と金属層 34 の積層構造が電極（ p 型電極）30 となる。

[0086] なお、半導体積層構造 20 には、 $AlGaIn$ 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 $AlGaIn$ 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） $20 \mu\text{m}$ であり、深さは $1 \mu\text{m}$ 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、 5 nm 、 100 nm 、 10 nm ）の積層構造から成る電極である。

[0087] 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 2.0 V 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。

[0088] 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。

[0089] まず、 m 面 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。

[0090] 例えば、まず c 面サファイア基板上に数 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。

- [0091] 基板としては、Ga_{0.9}N基板の他、例えば、酸化ガリウム、SiC基板、Si₃N₄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_{0.9}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面サファイア基板上にはa面Ga_{0.9}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、Ga_{0.9}N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。
- [0092] 次に、m面Ga_{0.9}N系基板10の上に、Al_{0.1}Ga_{0.9}In_{0.1}N層22を形成する。Al_{0.1}Ga_{0.9}In_{0.1}N層22として、例えば、厚さ3 μmのAlGa_{0.9}Nを形成する。Ga_{0.9}Nを形成する場合には、m面Ga_{0.9}N系基板10の上に、1100℃でTMG (Ga (CH₃)₃)、TMA (Al (CH₃)₃) およびNH₃を供給することによってGa_{0.9}N層を堆積する。
- [0093] 次に、Al_{0.1}Ga_{0.9}In_{0.1}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9 nmのGa_{0.9}In_{0.1}N井戸層と、厚さ9 nmのGa_{0.9}Nバリア層が交互に積層された厚さ81 nmのGa_{0.9}In_{0.1}N/Ga_{0.9}N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の取り込みを行うために、成長温度を800℃に下げることが好ましい。
- [0094] 次に、活性層24の上に、例えば厚さ30 nmのアンドープGa_{0.9}N層を堆積する。次いで、アンドープGa_{0.9}N層の上に、Al_{0.1}Ga_{0.9}N層26を形成する。Al_{0.1}Ga_{0.9}N層26として、例えば、TMG、NH₃、TMA、TMI およびp型不純物としてCp₂Mg (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70 nmのp-Al_{0.14}Ga_{0.86}Nを形成する。
- [0095] 次に、Al_{0.1}Ga_{0.9}N層26の上に、例えば厚さ0.5 μmのp-Ga_{0.9}Nコンタクト層を堆積する。p-Ga_{0.9}N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。

[0096] 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、 $\text{Al}_d\text{Ga}_e\text{N}$ 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、 $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_z\text{N}$ 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、電極40として、 Ti/Pt 層を形成する。

[0097] さらに、 p-GaN コンタクト層の上には、通常の真空蒸着法（抵抗加熱法、電子ビーム蒸着法など）を行なうことによって Zn 層32を形成し、さらに Zn 層32上に金属層34を形成する。これにより、電極30を形成する。 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。

[0098] 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、 $\text{Al}_u\text{Ga}_v\text{In}_w\text{N}$ 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 $\text{Al}_u\text{Ga}_v\text{In}_w\text{N}$ 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、 $\text{Al}_u\text{Ga}_v\text{In}_w\text{N}$ 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。

[0099] 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。

[0100] ここで、図7に、 Zn/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/Pt 電極における Zn 層が7nm、 Pt 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。 Zn/Pt 電極に対しては500℃で10分間の熱

処理を行ない、Pd/Pt電極に対しては500℃で10分間の熱処理を行った。

[0101] 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3.7Vである。これに対し、Zn/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2.7Vとなり、立ち上がり電圧の大幅な低減が見られる。電流値20mAでの動作電圧で比較すると、Zn/Pt層からなる電極を用いた発光ダイオードでは、Pd/Pt層からなる電極よりも2.0V以上小さくなっていることがわかる。

[0102] 本実施形態では、p型電極の材料として、Pdよりも地球上に豊富に存在するZnを用いている。Znは、Mgと比較して酸化されにくい性質を有し、Zn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GaN層とZn層との間の密着性は良好であることを確認した。

[0103] 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。

[0104] 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。

[0105] 図8は、このような白色光源の一例を示す模式図である。図8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100と、この窒化物系半導体発光素子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。窒化物系半導体発光素子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上には窒化物系半導体発光素子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、窒化物系半導体発光素子100を覆うように形成されている。

[0106] 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。

[0107] 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° 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° 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。

[0108] [他の実施形態]

図9は、本実施形態の窒化物系半導体発光素子100aを示す断面図である。m面から 1° 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100aは、m面から 1° 以上の角度で傾斜した面を主面とするGaN系基板10aを用いている。主面がm面から 1° 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10a上に、半導体積層構造20aを形成する。図9に示すAl_uGa_vIn_wN層22a、活性層24aおよびAl_dGa_eN層26aは主面がm面から 1° 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。また、本実施形態の構成においては、半導体積層構造20aのうち、少なくとも電極30aと接触するp型半導体領域の表面が m 面から 1° 以上の角度で傾斜していればよい。

[0109] 次に、図10～図14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。

[0110] 図10(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° 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。

[0111] 図10(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10(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10(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。

[0112] GaN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ことは、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。

[0113] 次に、図11を参照する。図11(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11には、 $+c$ 軸方向を示す矢印が示されている。図11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。

[0114] 図 1 1 (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 1 1 (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 1 (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 θ ）を正の値にとり、後者の場合における傾斜角度 θ 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。

[0115] 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 $\pm 1^\circ$ 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 1 2 を参照しながら、この理由を説明する。図 1 2 (a) および (b) は、それぞれ、図 1 1 (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 θ が 5° 以下の場合には、図 1 2 (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。

[0116] 図 1 3 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 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° 以上 5° 以下の範囲にあれば同様であると考えられる。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° 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。

[0117] 図 14 は、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） θ 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 14 の結果から分かるように、傾斜角度 θ が 5° 以下であれば、コンタクト抵抗は、ほぼ一定の値となる。Zn 層の電極を用いた場合にも、m 面からの傾斜角度 θ が 5° 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。

[0118] 以上から、p 型半導体領域の表面の傾斜角度 θ が 5° 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。

[0119] なお、傾斜角度 θ の絶対値が 5° 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 θ の絶対値を 5° 以下に制限する。しかし、傾斜角度 θ を例えば 5° 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 θ は 5° 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。

産業上の利用可能性

[0120] 本発明の窒化物系半導体素子は、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るため、発光ダイオード（LED）として特に好適に利用される。

符号の説明

[0121]	10、10a	基板（GaN系基板）
	12、12a	基板の表面（m面）
	20、20a	半導体積層構造
	22、22a	Al _u Ga _v In _w N層
	24、24a	活性層
	26、26a	Al _d Ga _e N層
	30、30A、30B、30C	p型電極
	32	Zn層
	34	金属層（Pt層）
	40、40a	n型電極
	42、42a	凹部
	61A、61C	Zn-Pt合金層
	100、100a	窒化物系半導体発光素子
	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

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] 前記電極は、前記 Z n 層と、前記 Z n 層の上に形成された金属層と
を含み、
前記金属層は、P t、M o および P d 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、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] 前記窒化物系半導体積層構造は、
 $A l_a I n_b G a_c N$ 層 ($a + b + c = 1$, $a \geq 0$, $b \geq 0$, $c \geq 0$)
を含む活性層を有し、前記活性層は光を発する、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 p 型 G a N 系半導体領域は、p 型コンタクト層である、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 Z n 層の厚さは前記金属層の厚さ以下である、請求項 3 に記載
の窒化物系半導体素子。
- [請求項7] 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 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 Z n 層の少なくとも一部が合金化している、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層はアイランド状である請求項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Zn層は、Znと、Pt、MoおよびPdからなる群から選択される少なくとも1種の金属との合金から形成されている、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] 前記電極は、前記Zn層のみから構成され、
前記Zn層は、Znと、Pt、MoおよびPdからなる群から選択される少なくとも1種の金属との合金から形成されている、請求項10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、
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層を含む、光源。
- [請求項13] 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12に記載の光源。
- [請求項14] 前記Zn層の少なくとも一部が合金化している、請求項12または13に記載の光源。
- [請求項15] 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 G a N 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 G a N 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 G a N 系半導体領域の前記主面上に、Z n 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16] 前記 p 型 G a N 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 15 に記載の窒化物系半導体素子の製造方法。

[請求項17] 前記工程 (c) は、
前記 Z n 層を形成した後に、P t、M o および P d 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形成する工程を含む、請求項 15 または 16 に記載の窒化物系半導体素子の製造方法。

[請求項18] 前記工程 (c) において、前記 Z n 層を加熱処理する工程を実行する、請求項 15、16 または 17 に記載の窒化物系半導体素子の製造方法。

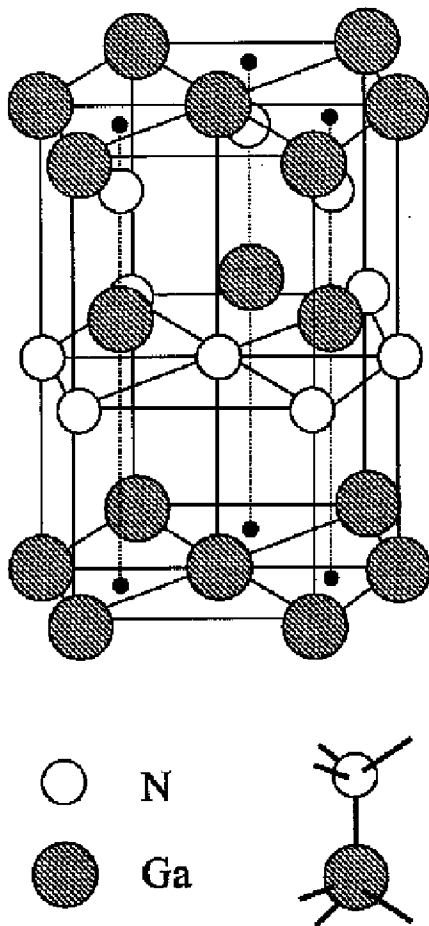
[請求項19] 前記加熱処理は、400℃以上650℃以下の温度で実行される、請求項 18 に記載の窒化物系半導体素子の製造方法。

[請求項20] 前記加熱処理は、450℃以上600℃以下の温度で実行される、請求項 19 に記載の窒化物系半導体素子の製造方法。

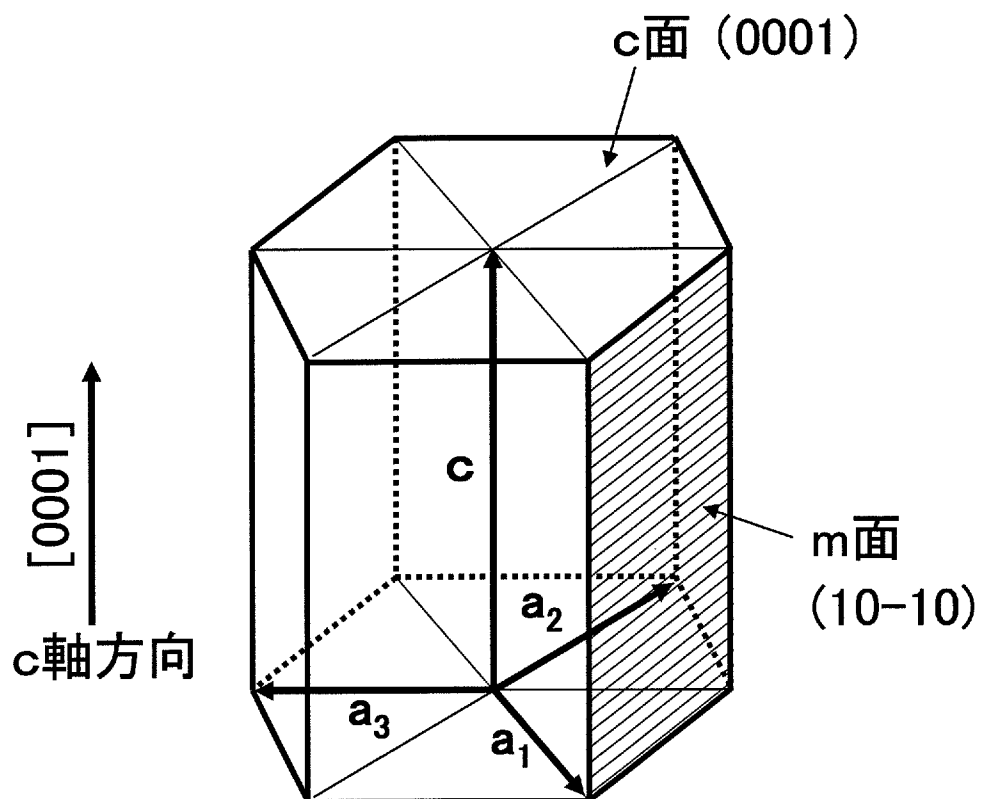
[請求項21] 前記工程 (b) を実行した後において、前記基板を除去する工程を含む、請求項 15 から 20 の何れか一つに記載の窒化物系半導体素子の製造方法。

[請求項22] 前記 Z n 層の少なくとも一部が合金化している、請求項 15 から 21 の何れか一つに記載の窒化物系半導体素子の製造方法。

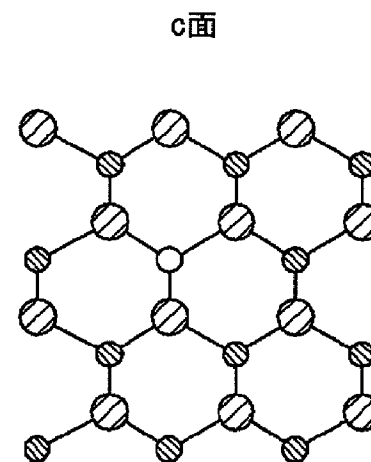
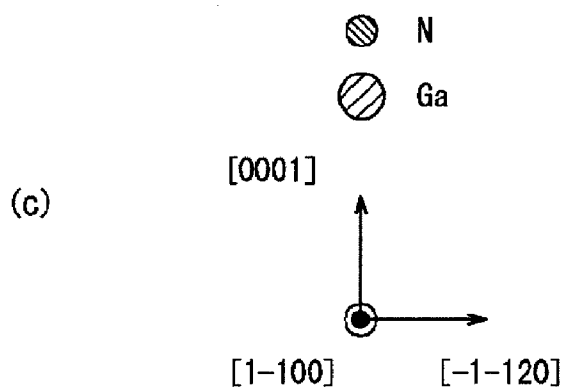
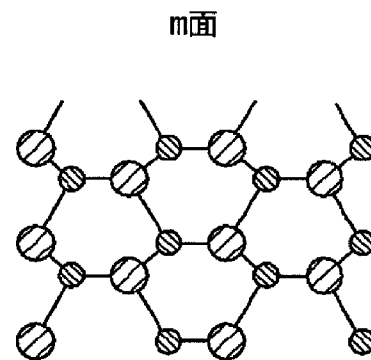
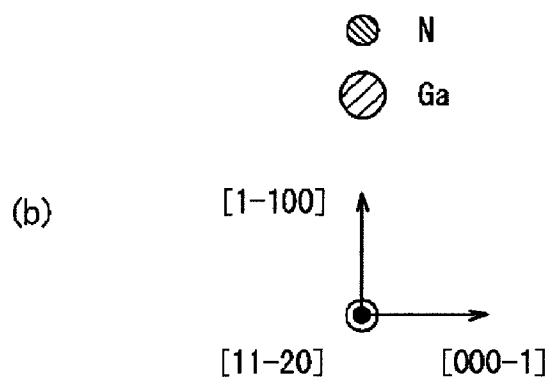
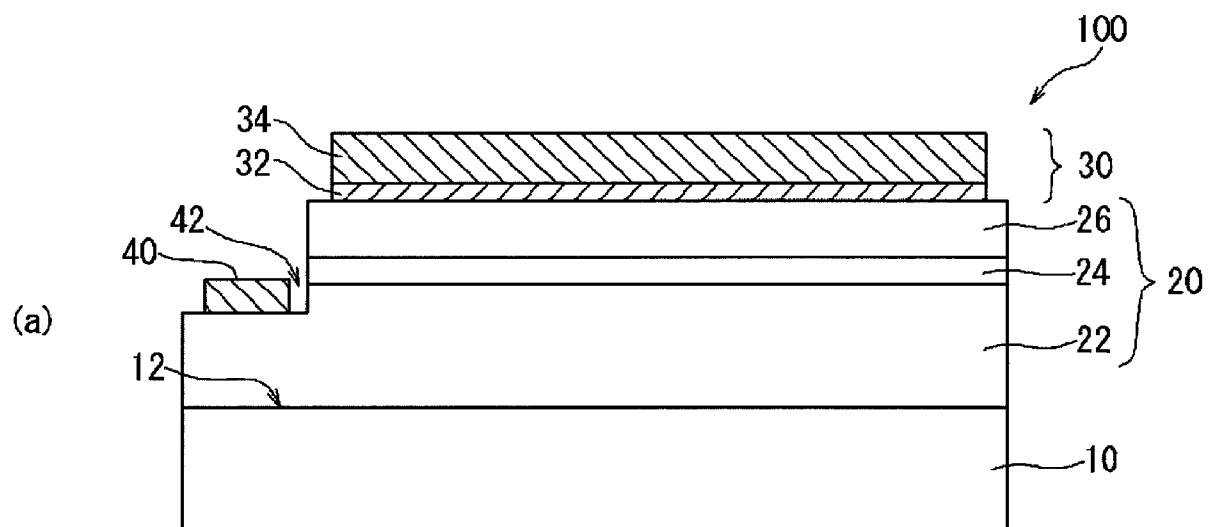
[図1]



[図2]

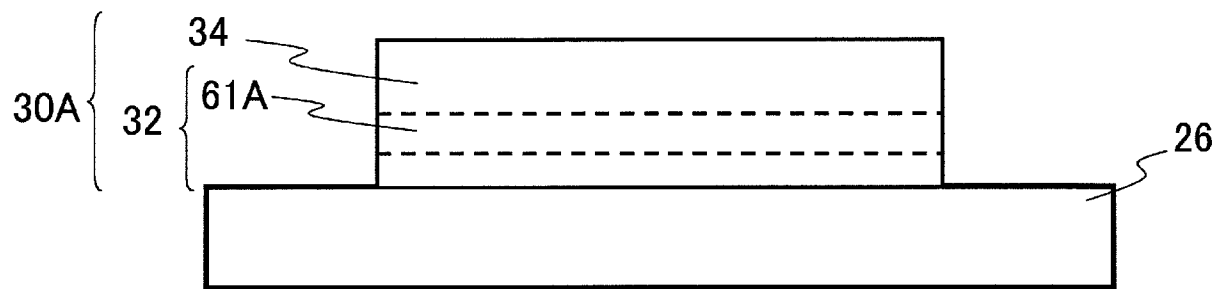


[図3]

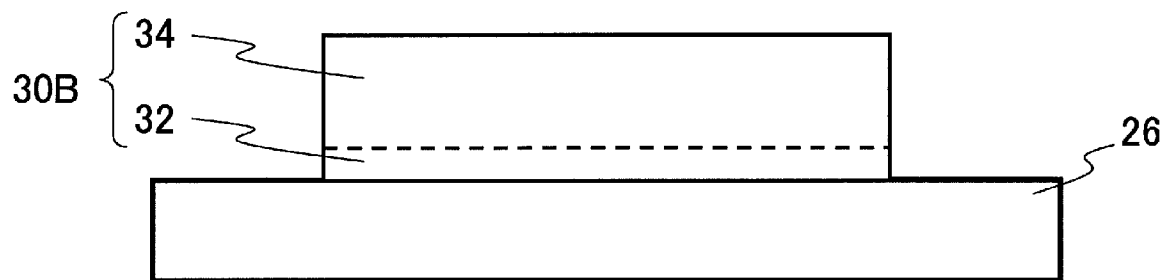


[図4]

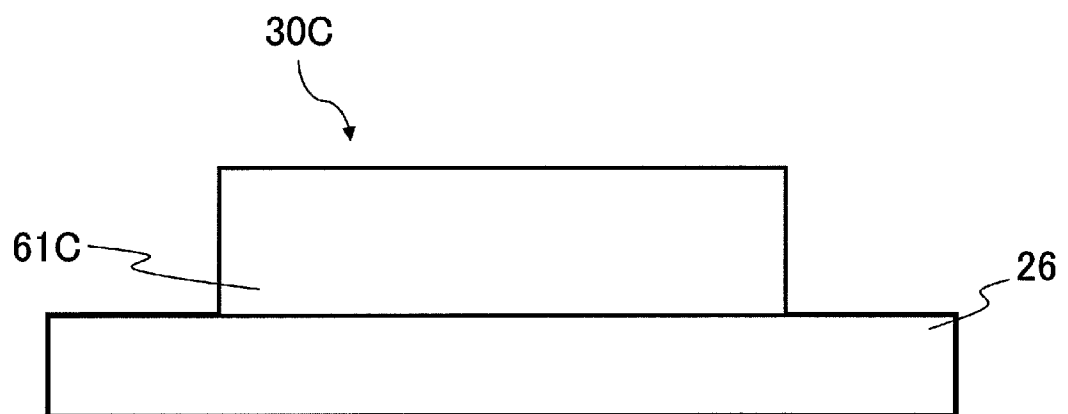
(a)



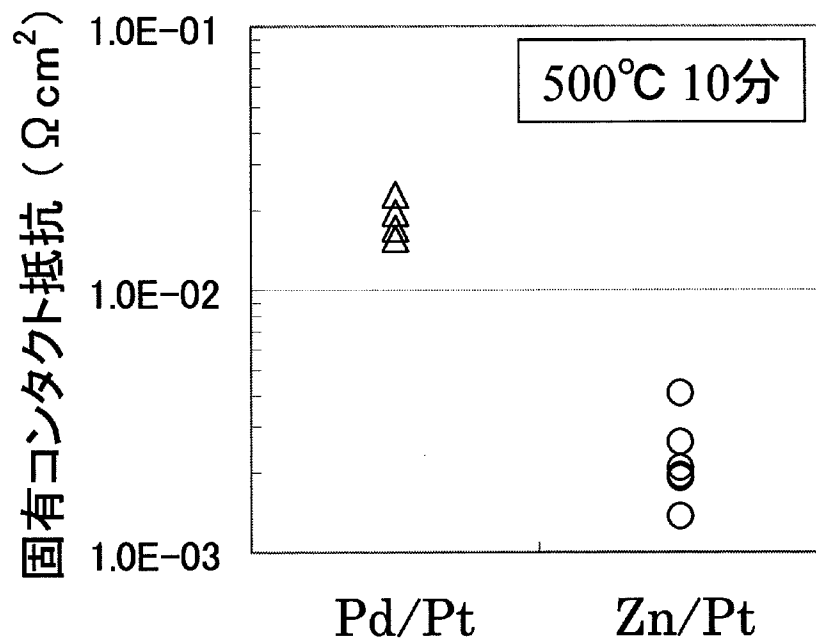
(b)



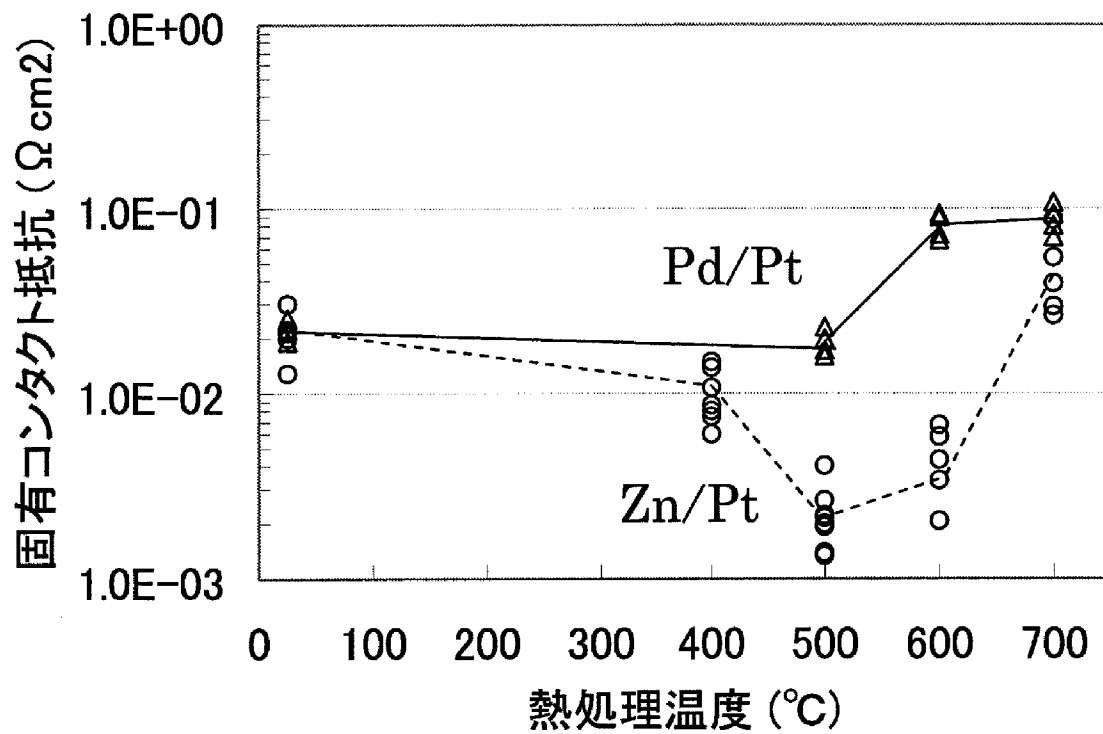
(c)



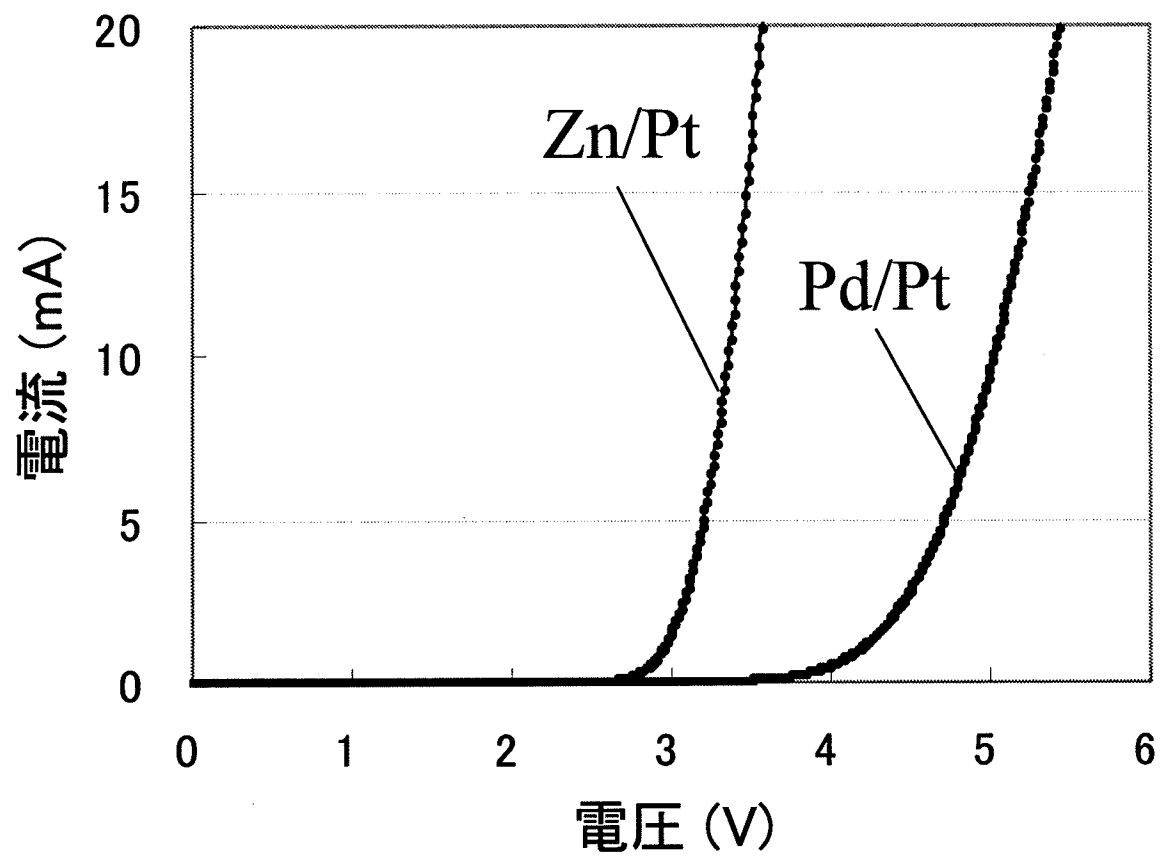
[図5]



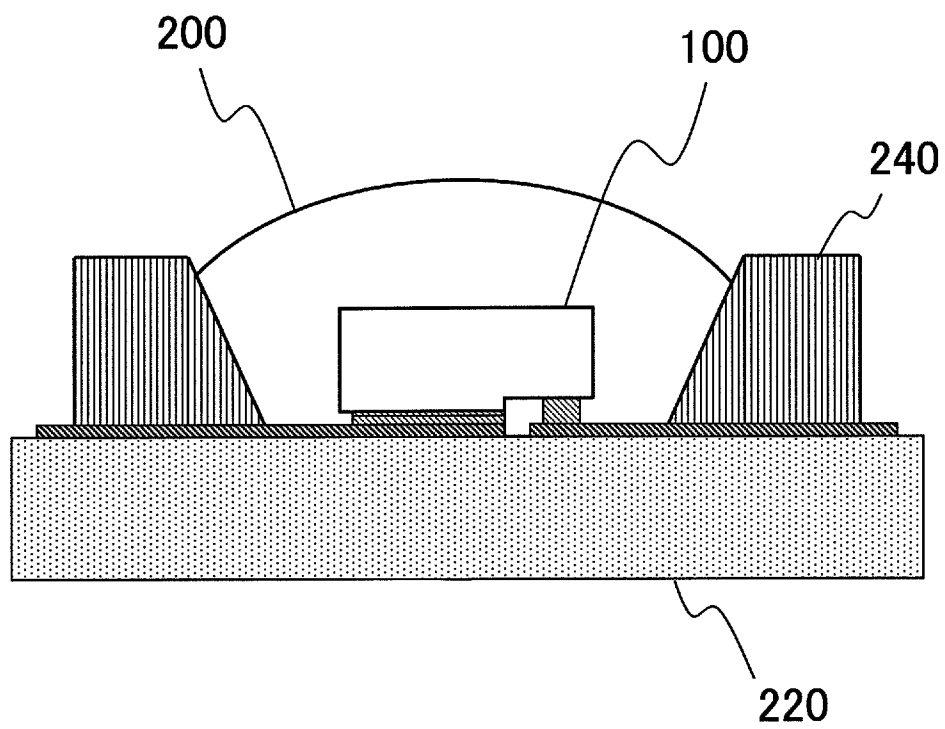
[図6]



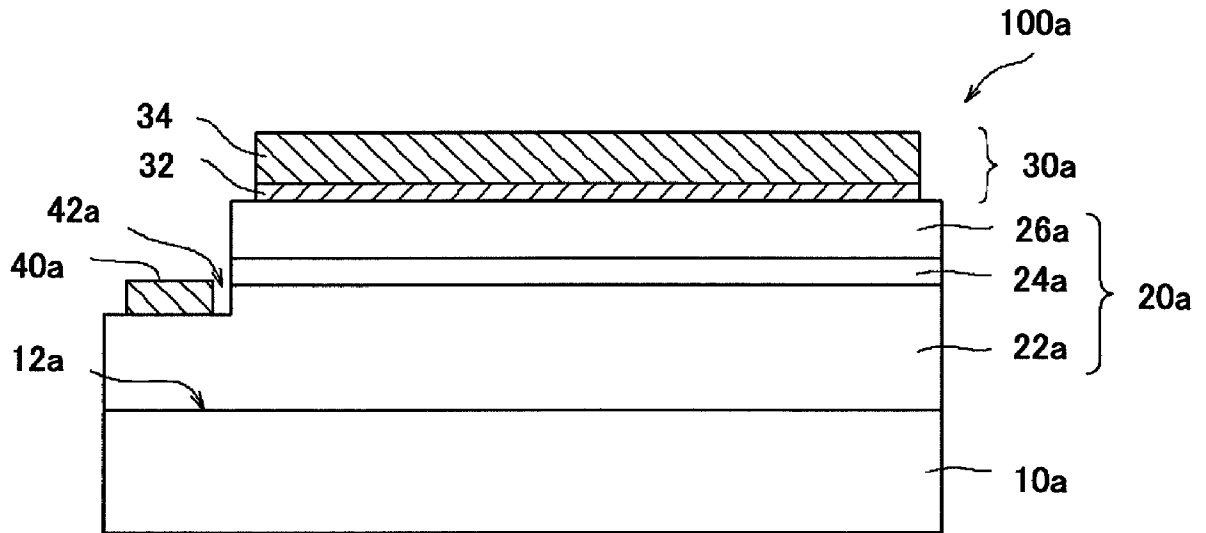
[図7]



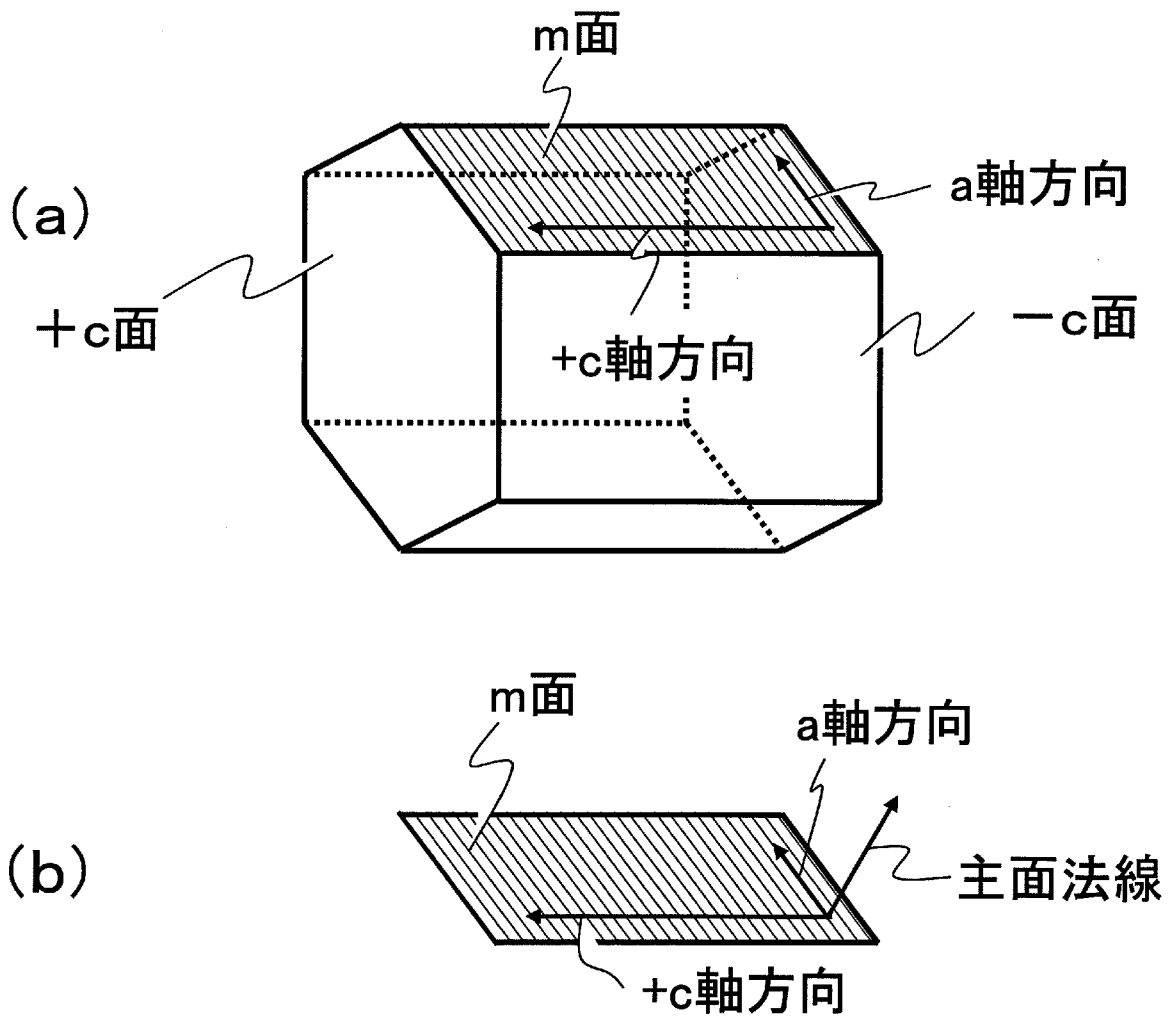
[図8]



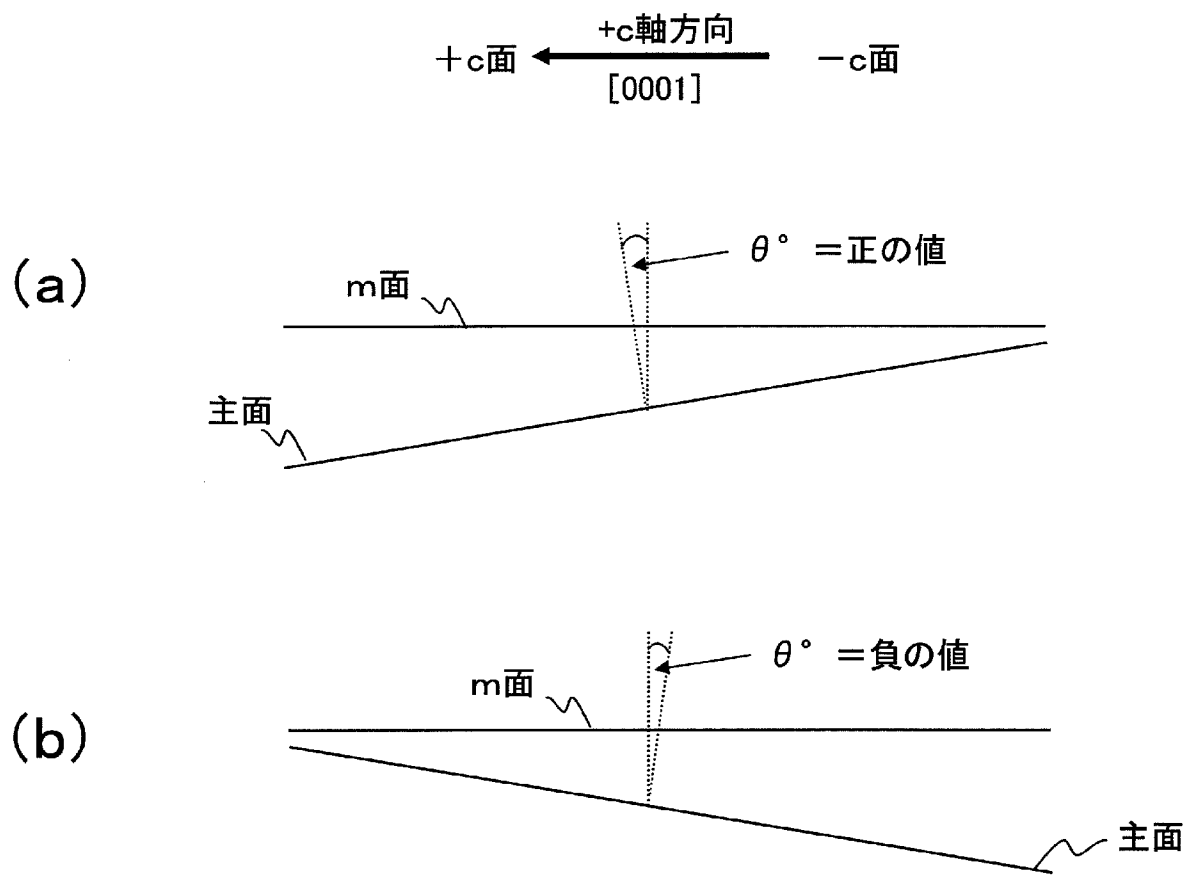
[図9]



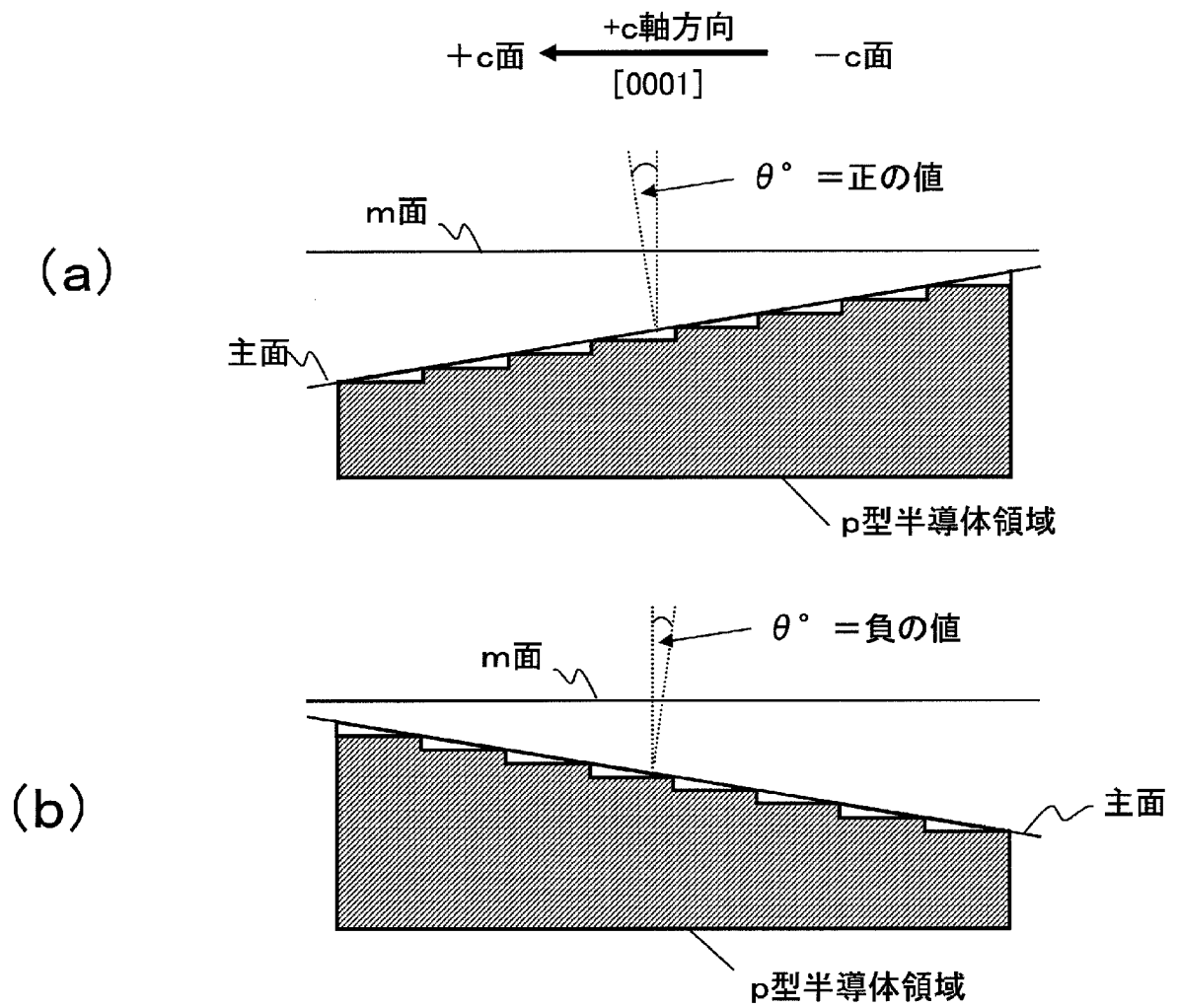
[図10]



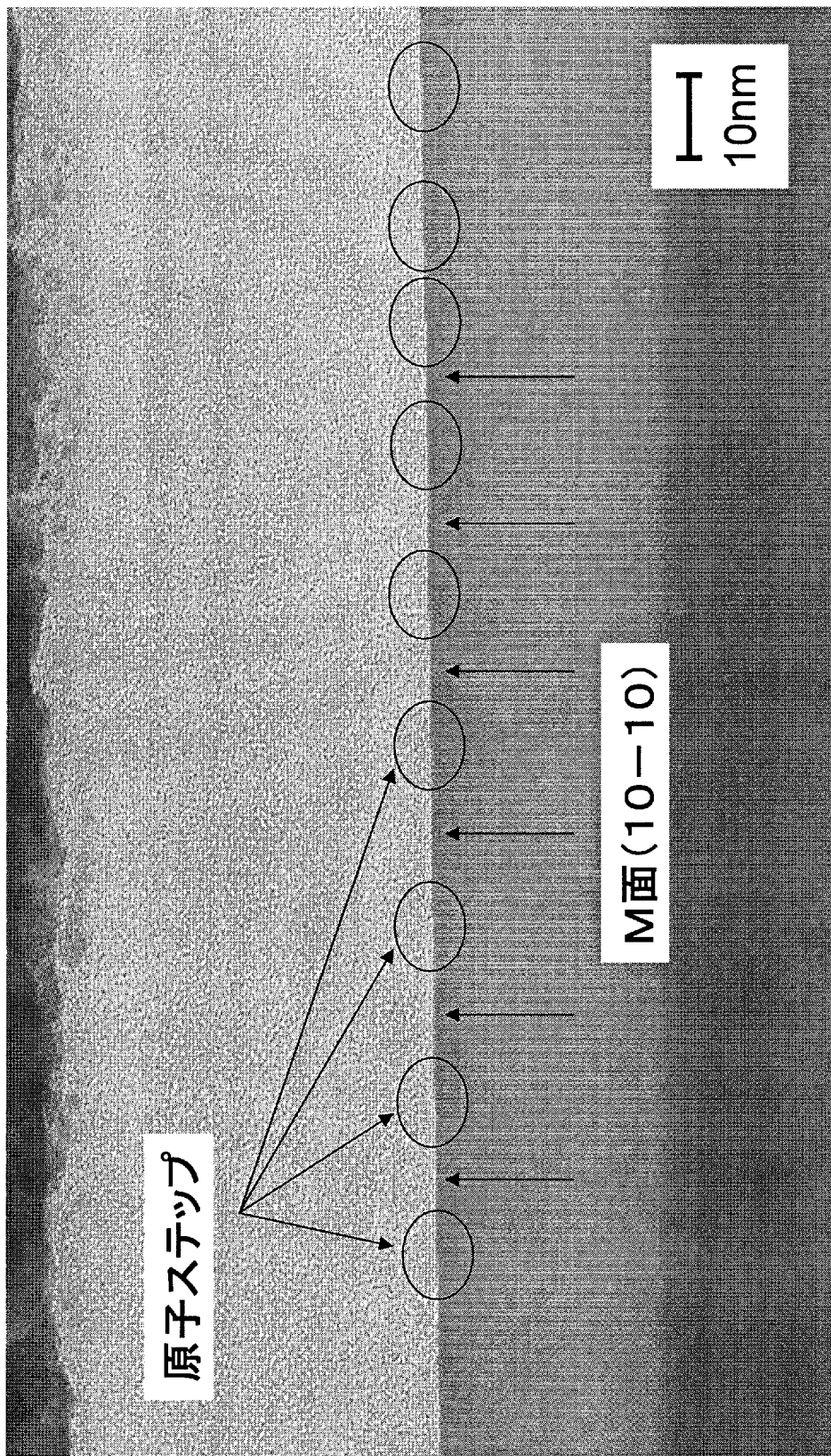
[図11]



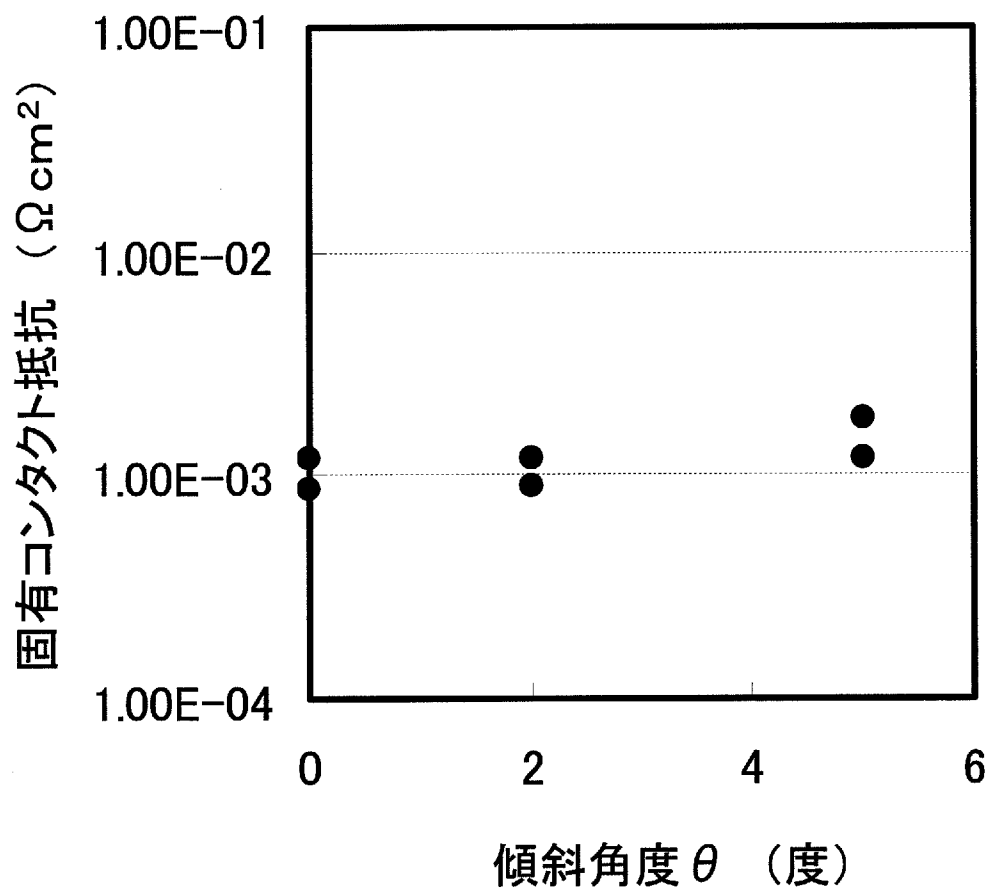
[図12]



[図13]



[図14]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2011/001516

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01L33/32(2010.01)i, H01L33/40(2010.01)i, H01S5/042(2006.01)i, H01S5/343(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01L33/32, H01L33/40, H01S5/042, H01S5/343

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2011
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2011	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2011

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2007-200932 A (Rohm Co., Ltd.), 09 August 2007 (09.08.2007), paragraphs [0056], [0057]; fig. 4 (Family: none)	1-7, 9, 12, 13, 15-21
Y	JP 2010-62460 A (Sharp Corp.), 18 March 2010 (18.03.2010), paragraph [0030] & WO 2010/027016 A1	1-7, 9, 12, 13, 15-21
Y	JP 2009-65196 A (Showa Denko Kabushiki Kaisha), 26 March 2009 (26.03.2009), paragraph [0058]; fig. 2 & US 2009/0184329 A1 & WO 2006/011672 A1 & KR 10-2007-0041506 A & CN 1993837 A & TW 275190 B	3, 6, 17

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
04 April, 2011 (04.04.11)

Date of mailing of the international search report
12 April, 2011 (12.04.11)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2011/001516

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2009-146980 A (Showa Denko Kabushiki Kaisha), 02 July 2009 (02.07.2009), paragraph [0047] & US 2010/0258826 A & WO 2009/075183 A1	9
Y	JP 2008-91354 A (Sharp Corp.), 17 April 2008 (17.04.2008), paragraph [0131]; fig. 1, 2 (Family: none)	12, 13
Y	JP 2000-101139 A (Toshiba Corp.), 07 April 2000 (07.04.2000), paragraph [0033]; fig. 4 & US 6303405 B1	21
P, A	WO 2010/113399 A1 (Panasonic Corp.), 07 October 2010 (07.10.2010), claim 1 (Family: none)	1-22

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (I P C))

Int.Cl. H01L33/32 (2010.01) i, H01L33/40 (2010.01) i, H01S5/042 (2006.01) i, H01S5/343 (2006.01) i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (I P C))

Int.Cl. H01L33/32, H01L33/40, H01S5/042, H01S5/343

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 1 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 1 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 1 年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	JP 2007-200932 A (ローム株式会社) 2007.08.09, 段落 0056, 0057, 図 4 ファミリーなし	1-7, 9, 12, 13, 15-21
Y	JP 2010-62460 A (シャープ株式会社) 2010.03.18, 段落 0030 & WO 2010/027016 A1	1-7, 9, 12, 13, 15-21

☒ C 欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)

「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の 1 以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

0 4 . 0 4 . 2 0 1 1

国際調査報告の発送日

1 2 . 0 4 . 2 0 1 1

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (I S A / J P)

郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5

東京都千代田区霞が関三丁目 4 番 3 号

特許庁審査官 (権限のある職員)

角地 雅信

2 K

3 9 1 2

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 2 5 5

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	JP 2009-65196 A (昭和電工株式会社) 2009. 03. 26, 段落 0058, 図 2 & US 2009/0184329 A1 & WO 2006/011672 A1 & KR 10-2007-0041506 A & CN 1993837 A & TW 275190 B	3, 6, 17
Y	JP 2009-146980 A (昭和電工株式会社) 2009. 07. 02, 段落 0047 & US 2010/0258826 A & WO 2009/075183 A1	9
Y	JP 2008-91354 A (シャープ株式会社) 2008. 04. 17, 段落 0131, 図 1, 図 2 ファミリーなし	12, 13
Y	JP 2000-101139 A (株式会社東芝) 2000. 04. 07, 段落 0033, 図 4 & US 6303405 B1	21
P, A	WO 2010/113399 A1 (パナソニック株式会社) 2010. 10. 07, 請求項 1 ファミリーなし	1-22