

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2013-33930
(P2013-33930A)

(43) 公開日 平成25年2月14日(2013.2.14)

(51) Int.Cl.

HO 1 S 5/343 (2006.01)

F 1

HO 1 S 5/343 610

テーマコード（参考）

特開2013-33930
(P2013-33930A)

審査請求 未請求 請求項の数 34 O.L. (全 30 頁)

(21) 出願番号 特願2012-111478 (P2012-111478)
 (22) 出願日 平成24年5月15日 (2012. 5. 15)
 (31) 優先権主張番号 特願2011-144664 (P2011-144664)
 (32) 優先日 平成23年6月29日 (2011. 6. 29)
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(71) 出願人 000002130
住友電気工業株式会社
大阪府大阪市中央区北浜四丁目5番33号

(71) 出願人 000002185
ソニー株式会社
東京都港区港南1丁目7番1号

(74) 代理人 100088155
弁理士 長谷川 芳樹

(74) 代理人 100113435
弁理士 黒木 義樹

(74) 代理人 100108257
弁理士 近藤 伊知良

(72) 発明者 塩谷 陽平
兵庫県伊丹市昆陽北一丁目1番1号 住友
電気工業株式会社伊丹製作所内

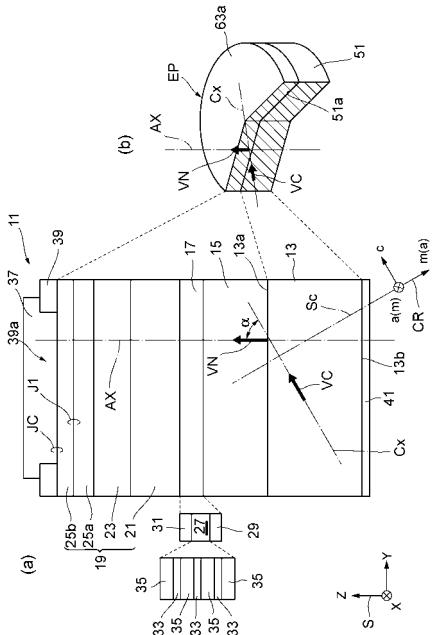
(54) 【発明の名称】 111族窒化物半導体素子、及び、111族窒化物半導体素子の製造方法

(57) 【要約】

【課題】結晶性が損なわれることなく比較的小さい接触抵抗と比較的高いキャリア濃度とを有するp型のコンタクト層を有するIII族窒化物半導体素子及びその製造方法を提供する。

【解決手段】発光層17の上に設けられたコンタクト層25aとコンタクト層25aの上に設けられコンタクト層25aに直接接するコンタクト層25bとコンタクト層25bの上に設けられコンタクト層25bに直接接する電極37とを備える。コンタクト層25a及びコンタクト層25bはp型の同一の窒化ガリウム系半導体から成り、コンタクト層25aのp型ドーパントの濃度はコンタクト層25bのp型ドーパントの濃度よりも低く、コンタクト層25aとコンタクト層25bとの界面J1はc軸に沿って延びる基準軸Cxに直交する面Scから50度以上130未満の角度で傾斜しており、コンタクト層25bの膜厚は20nm以下である。

【選択図】 図 1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

I II 族窒化物半導体素子であって、
 窒化ガリウム系半導体の発光層と、
 前記発光層の上に設けられた第1のコンタクト層と、
 前記第1のコンタクト層の上に設けられ前記第1のコンタクト層に直接接する第2のコンタクト層と、
 前記第2のコンタクト層の上に設けられ前記第2のコンタクト層に直接接する金属電極と、
 を備え、
 前記第1のコンタクト層及び前記第2のコンタクト層は、p型の同一の窒化ガリウム系半導体から成り、
 前記第1のコンタクト層のp型ドーパントの濃度は、前記第2のコンタクト層のp型ドーパントの濃度よりも低く、
 前記第1のコンタクト層と前記第2のコンタクト層との界面は、c軸に沿って延びる基準軸に直交する面から50度以上130未満の角度で傾斜しており、
 前記発光層の発光波長は480nm以上600nm以下であり、
 前記第2のコンタクト層の膜厚は1nm以上50nm以下である、
 ことを特徴とするI II 族窒化物半導体素子。

【請求項 2】

前記第2のコンタクト層の膜厚は1nm以上20nm以下である、ことを特徴とする請求項1に記載のI II 族窒化物半導体素子。

【請求項 3】

p型の窒化ガリウム系半導体のクラッド層を更に備え、
 前記クラッド層は、前記発光層と前記第1のコンタクト層との間に設けられ、
 前記クラッド層のバンドギャップは前記第1のコンタクト層のバンドギャップより大きく、
 前記第1のコンタクト層は、前記クラッド層に直接接している、ことを特徴とする請求項1又は請求項2に記載のI II 族窒化物半導体素子。

【請求項 4】

窒化ガリウム系半導体からなる基板を更に備え、
 前記基板の正面の上に、前記発光層、前記クラッド層、前記第1及び第2のコンタクト層及び前記金属電極が順に設けられており、
 前記正面は、前記基準軸に直交する面から50度以上130未満の角度で傾斜している、ことを特徴とする請求項3に記載のI II 族窒化物半導体素子。

【請求項 5】

前記第1のコンタクト層のp型ドーパントの濃度は、 $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以下である、ことを特徴とする請求項1～請求項4の何れか一項に記載のI II 族窒化物半導体素子。

【請求項 6】

前記第2のコンタクト層のp型ドーパントの濃度は、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 以下である、ことを特徴とする請求項1～請求項5の何れか一項に記載のI II 族窒化物半導体素子。

【請求項 7】

前記第1のコンタクト層のp型ドーパントの濃度は、 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以下である、ことを特徴とする請求項1～請求項6の何れか一項に記載のI II 族窒化物半導体素子。

【請求項 8】

前記p型ドーパントはマグネシウムである、ことを特徴とする請求項5～請求項7の何れか一項に記載のI II 族窒化物半導体素子。

10

20

30

40

50

【請求項 9】

前記第1及び第2のコンタクト層は窒化ガリウムからなる、ことを特徴とする請求項1～請求項8の何れか一項に記載のIII族窒化物半導体素子。

【請求項 10】

前記第1及び第2のコンタクト層は、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}N(0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, 0 \leq x+y \leq 1)$ である、ことを特徴とする請求項1～請求項8の何れか一項に記載のIII族窒化物半導体素子。

【請求項 11】

前記発光層は、 $In_xGa_{1-x}N(0.15 \leq x < 0.50)$ である、ことを特徴とする請求項1～請求項10の何れか一項に記載のIII族窒化物半導体素子。 10

【請求項 12】

前記金属電極は、Pd、Au、又は、Ni及びAu、からなる、ことを特徴とする請求項1～請求項11の何れか一項に記載のIII族窒化物半導体素子。

【請求項 13】

III族窒化物半導体素子の製造方法であって、
窒化ガリウム系半導体からなる発光層を形成する工程と、
前記発光層の上にp型の窒化ガリウム系半導体の第1のコンタクト層を形成する工程と、

前記第1のコンタクト層の形成時に供給されたp型ドーパントの供給量を切り替えた後に前記第1のコンタクト層の上にp型の窒化ガリウム系半導体の第2のコンタクト層を形成する工程と、 20

前記第2のコンタクト層の上に金属電極を形成する工程と、
を備え、

前記第1のコンタクト層及び前記第2のコンタクト層は、p型の同一の窒化ガリウム系半導体から成り、

前記第1のコンタクト層を形成する工程及び前記第2のコンタクト層を形成する工程において成長炉に供給されるp型ドーパントの供給量は、前記第2のコンタクト層を形成する工程で供給される量のほうが前記第1のコンタクト層を形成する工程で供給される量よりも多く、

前記第1及び第2のコンタクト層の成長温度は、前記発光層に含まれている活性層の成長温度よりも高く、 30

前記第1及び第2のコンタクト層の成長温度と前記活性層の成長温度との差は、摂氏100度以上摂氏350度以下であり、

前記第2のコンタクト層は前記金属電極に直接接し、

前記第1のコンタクト層は前記第2のコンタクト層に直接接し、
前記第1のコンタクト層と前記第2のコンタクト層との界面は、c軸に沿って延びる基準軸に直交する面から50度以上130未満の角度で傾斜しており、

前記発光層の発光波長は480nm以上600nm以下であり、

前記第2のコンタクト層の膜厚は1nm以上50nm以下である、

ことを特徴とするIII族窒化物半導体素子の製造方法。 40

【請求項 14】

前記第2のコンタクト層の膜厚は1nm以上20nm以下である、ことを特徴とする請求項13に記載のIII族窒化物半導体素子の製造方法。

【請求項 15】

p型の窒化ガリウム系半導体のクラッド層を形成する工程を更に備え、
前記クラッド層は、前記発光層が形成された後に形成され、

前記第1及び第2のコンタクト層は、前記クラッド層が形成された後に形成され、

前記クラッド層は、前記発光層と前記第1のコンタクト層との間に設けられ、

前記クラッド層のバンドギャップは前記第1のコンタクト層のバンドギャップより大きく、 50

前記第1のコンタクト層は前記クラッド層に直接接している、ことを特徴とする請求項13又は請求項14に記載のIII族窒化物半導体素子の製造方法。

【請求項16】

窒化ガリウム系半導体からなる基板を準備する工程を更に備え、

前記クラッド層は、前記基板の上に形成され、

前記基板の正面の上に、前記発光層、前記クラッド層、前記第1及び第2のコンタクト層及び前記金属電極が順に設けられ、

前記正面は、前記基準軸に直交する面から50度以上130未満の角度で傾斜している、ことを特徴とする請求項15に記載のIII族窒化物半導体素子の製造方法。

【請求項17】

前記第1のコンタクト層のp型ドーパントの濃度は、 $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以下である、ことを特徴とする請求項13～請求項16の何れか一項に記載のIII族窒化物半導体素子の製造方法。

【請求項18】

前記第2のコンタクト層のp型ドーパントの濃度は、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 以下である、ことを特徴とする請求項13～請求項17の何れか一項に記載のIII族窒化物半導体素子の製造方法。

【請求項19】

前記第1のコンタクト層のp型ドーパントの濃度は、 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以下である、ことを特徴とする請求項13～請求項18の何れか一項に記載のIII族窒化物半導体素子の製造方法。

【請求項20】

前記p型ドーパントはマグネシウムである、ことを特徴とする請求項17～請求項19の何れか一項に記載のIII族窒化物半導体素子の製造方法。

【請求項21】

前記第1及び第2のコンタクト層は窒化ガリウムからなる、ことを特徴とする請求項13～請求項20の何れか一項に記載のIII族窒化物半導体素子の製造方法。

【請求項22】

前記第1及び第2のコンタクト層は、 $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ (0.0≤x≤1.0, 0.0≤y≤1.0, 1-x-y)である、ことを特徴とする請求項13～請求項20の何れか一項に記載のIII族窒化物半導体素子の製造方法。

【請求項23】

前記発光層は、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (0.15<x<0.50)である、ことを特徴とする請求項13～請求項22の何れか一項に記載のIII族窒化物半導体素子の製造方法。

【請求項24】

前記金属電極は、Pd、Au、又は、Ni及びAu、からなる、ことを特徴とする請求項13～請求項23の何れか一項に記載のIII族窒化物半導体素子の製造方法。

【請求項25】

前記第1のコンタクト層中の炭素不純物濃度は $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以下である、ことを特徴とする請求項1～12の何れか一項に記載のIII族窒化物半導体素子。

【請求項26】

前記基板の前記正面は、前記基準軸に直交する面から70度以上80度未満の角度で傾斜している、ことを特徴とする請求項4に記載のIII族窒化物半導体素子。

【請求項27】

前記基板の前記正面は、前記基準軸に直交する面から100度以上110度未満の角度で傾斜している、ことを特徴とする請求項4に記載のIII族窒化物半導体素子。

【請求項28】

前記第1のコンタクト層の成長速度は、 $1 \mu\text{m/hour}$ 以下であり、前記第2のコンタクト層の成長速度は、 $0.1 \mu\text{m/hour}$ 以下であり、

10

20

30

40

50

前記第2のコンタクト層の成長速度は、前記第1のコンタクト層の成長速度よりも遅い、ことを特徴とする請求項13～24の何れか一項に記載のIII族窒化物半導体素子の製造方法。

【請求項29】

前記第1及び第2のコンタクト層は、水素を20%以上含む雰囲気下で成長される、ことを特徴とする請求項13～24, 28の何れか一項に記載のIII族窒化物半導体素子の製造方法。

【請求項30】

前記第1のコンタクト層中の炭素不純物濃度は、 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以下である、ことを特徴とする請求項13～24, 28, 29の何れか一項に記載のIII族窒化物半導体素子の製造方法。

10

【請求項31】

前記第1及び第2のコンタクト層の成長温度と前記活性層の成長温度との差は、摂氏100度以上摂氏250度以下である、ことを特徴とする請求項13～24, 28～30の何れか一項に記載のIII族窒化物半導体素子の製造方法。

【請求項32】

前記基板の前記主面は、前記基準軸に直交する面から70度以上80度未満の角度で傾斜している、ことを特徴とする請求項16に記載のIII族窒化物半導体素子の製造方法。

20

【請求項33】

前記基板の前記主面は、前記基準軸に直交する面から100度以上110度未満の角度で傾斜している、ことを特徴とする請求項16に記載のIII族窒化物半導体素子の製造方法。

【請求項34】

前記活性層の成長温度は摂氏650度以上摂氏800度未満である、ことを特徴とする請求項13～24, 28～33の何れか一項に記載のIII族窒化物半導体素子の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

30

本発明は、III族窒化物半導体素子、及び、III族窒化物半導体素子の製造方法に関する。

【背景技術】

【0002】

特許文献1には、駆動電圧の低下を目的とする発光素子に係る技術が開示されている。サファイア基板の上に、500オングストロームのAlNのバッファ層と、膜厚約2.0マイクロメートル、電子濃度 $2 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ のSiドープGaNの高キャリア濃度n⁺層と、膜厚約2.0μm、電子濃度 $2 \times 10^{18} / \text{cm}^3$ のSiドープの(A_{1-x₂}Ga_{1-x₂})_{y₂}In_{1-y₂}Nの高キャリア濃度n⁺層と、膜厚約0.5μm、Mg、Zn及びSiドープの(A_{1-x₁}Ga_{1-x₁})_{y₁}In_{1-y₁}Nのp伝導型の発光層と、膜厚約1.0μm、ホール濃度 $2 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ のMgドープの(A_{1-x₂}Ga_{1-x₂})_{y₂}In_{1-y₂}Nのp層と、膜厚約0.2μm、ホール濃度 $5 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ 、Mg濃度 $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ のMgドープのGaNから成る第2コンタクト層と、膜厚約500オングストローム、ホール濃度 $2 \times 10^{17} / \text{cm}^3$ 、Mg濃度 $2 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ のMgドープのGaNから成る第1コンタクト層と、が形成されている。更に、p層と高キャリア濃度n⁺層とに、それぞれ、接続するニッケルで形成された二つの電極が形成されている。

40

【0003】

特許文献1に記載の発光素子は、特に、サファイア基板のc面の上の最表面に設けられた高Mg濃度のp型の第1コンタクト層と、この第1コンタクト層の下に設けられた低M

50

Mg 濃度の p 型の第2コンタクト層とを有する。第1コンタクト層の Mg 濃度は 1×10^{-2} cm^{-3} 以上 1×10^{-1} cm^{-3} 以下であり、第2コンタクト層の Mg 濃度は 1×10^{-1} cm^{-3} 以上 5×10^{-2} cm^{-3} 以下である。第1及び第2のコンタクト層の膜厚については、 $50nm$ と $200nm$ とが開示されている。また、非特許文献1及び2には、ピエゾ電界の計算について記載されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開平08-97471号公報

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献1】Japanese Journal of Applied Physics, Vol.39 (2000) pp.413

【非特許文献2】Journal of Applied Physics, Vol.91 No.12 (2002) pp.9904

10

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

Mg がドープされた p 型の窒化ガリウムのコンタクト層の接触抵抗は、 Mg 濃度によって増減する。接触抵抗の値は、 Mg 濃度が 1×10^{-2} cm^{-3} 程度の場合に比較的小さい。しかし、 Mg 濃度がこのように高い場合、結晶性が低下して p 型キャリア濃度の低下を招く。従って、接触抵抗、結晶性及びキャリア濃度の何れもが好適な p 型コンタクト層を有する III 族窒化物半導体素子の開発が望まれている。そこで、本発明の目的は、上記の事項を鑑みてなされたものであり、結晶性が損なわれることなく比較的小さい接触抵抗と比較的高いキャリア濃度とを有する p 型のコンタクト層を有する III 族窒化物半導体素子及び III 族窒化物半導体素子の製造方法を提供することである。

20

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明に係る III 族窒化物半導体素子は、窒化ガリウム系半導体の発光層と、前記発光層の上に設けられた第1のコンタクト層と、前記第1のコンタクト層の上に設けられ前記第1のコンタクト層に直接接する第2のコンタクト層と、前記第2のコンタクト層の上に設けられ前記第2のコンタクト層に直接接する金属電極と、を備え、前記第1のコンタクト層及び前記第2のコンタクト層は、 p 型の同一の窒化ガリウム系半導体から成り、前記第1のコンタクト層の p 型ドーパントの濃度は、前記第2のコンタクト層の p 型ドーパントの濃度よりも低く、前記第1のコンタクト層と前記第2のコンタクト層との界面は、 c 軸に沿って延びる基準軸に直交する面から 50 度以上 130 未満の角度で傾斜しており、前記発光層の発光波長は $480nm$ 以上 $600nm$ 以下であり、前記第2のコンタクト層の膜厚は $1nm$ 以上 $50nm$ 以下である、ことを特徴とし、前記第2のコンタクト層の膜厚は $1nm$ 以上 $20nm$ 以下であることができる。

30

【0008】

第2のコンタクト層において、 p 型ドーパントが比較的高いので金属電極との接触抵抗は低下し、膜厚が比較的小さいので結晶性は比較的良好となる。第1のコンタクト層において、 p 型ドーパント濃度が比較的低いので結晶性は比較的良好であり、キャリア濃度も比較的高い。従って、結晶性が損なわれることなく、第2のコンタクト層と金属電極との接触抵抗の向上、及び、キャリア濃度の向上、が実現される。更に、第1のコンタクト層と第2のコンタクト層との界面の傾斜が 50 度未満又は 130 度以上の場合に比較して、ピエゾ電界が逆向きで比較的小さいか又はゼロとなる。従って、傾斜が 50 度未満又は 130 度以上の場合に比較して発光層の外部量子効率等が良好となる。

40

【0009】

本発明に係る III 族窒化物半導体素子では、 p 型の窒化ガリウム系半導体のクラッド層を更に備え、前記クラッド層は、前記発光層と前記第1のコンタクト層との間に設けられ、前記クラッド層のバンドギャップは前記第1のコンタクト層のバンドギャップより大

50

きく、前記第1のコンタクト層は、前記クラッド層に直接接していることが好ましい。

【0010】

本発明に係るⅢⅢ族窒化物半導体素子では、窒化ガリウム系半導体からなる基板を更に備え、前記基板の正面の上に、前記発光層、前記クラッド層、前記第1及び第2のコンタクト層及び前記金属電極が順に設けられており、前記正面は、前記基準軸に直交する面から50度以上130未満の角度で傾斜していることが好ましい。従って、窒化ガリウム系半導体からなる基板を用いることができるので、基準軸に直交する面から50度以上130未満の角度で傾斜している正面の上に、窒化ガリウム系半導体層を成長させることによって、第1のコンタクト層と第2のコンタクト層との界面にも正面と同様の傾斜が実現できる。

10

【0011】

本発明に係るⅢⅢ族窒化物半導体素子では、前記第1のコンタクト層のp型ドーパントの濃度は、 $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以下であることが好ましく、前記第2のコンタクト層のp型ドーパントの濃度は、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 以下であることが好ましい。金属電極に直接接している第2のコンタクト層のp型ドーパントの濃度が比較的高いので、金属電極との接触抵抗は低下する。

【0012】

本発明に係るⅢⅢ族窒化物半導体素子では、前記第1のコンタクト層のp型ドーパントの濃度は、 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以下であることが好ましい。金属電極に直接接していない第1のコンタクト層のp型ドーパントの濃度が比較的低いので、結晶性が比較的良好であり、よってキャリア濃度も比較的高い。

20

【0013】

本発明に係るⅢⅢ族窒化物半導体素子では、前記p型ドーパントはマグネシウムであることが好ましい。従って、p型ドーパントの供給が良好に行える。Mgは窒化物半導体中で比較的浅いアクセプタ準位を形成し、そのためドーパント濃度に対する正孔濃度の活性化率が高く、比較的小さいドーパント濃度で比較的高い正孔濃度が得られる。

【0014】

本発明に係るⅢⅢ族窒化物半導体素子では、前記第1及び第2のコンタクト層は窒化ガリウムからなることが好ましい。GaNは、二元化合物である窒化ガリウム系半導体であるので、第1及び第2のコンタクト層がGaNからなる場合には、良好な結晶品質を提供できる。

30

【0015】

本発明に係るⅢⅢ族窒化物半導体素子では、前記第1及び第2のコンタクト層は、 $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ ($0 < x < 1, 0 < y < 1 - x - y$)であることが好ましい。従って、第1及び第2のコンタクト層の材料に、窒化ガリウム以外の他の窒化ガリウム系半導体を用いることができる。これにより基板との格子不整合度が変わり、コンタクト層に内包される歪み量が変化するために、第1コンタクト層のキャリア濃度を高めたり、第2コンタクト層と金属電極との接触抵抗を低減させることができる。

【0016】

本発明に係るⅢⅢ族窒化物半導体素子では、前記発光層は、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x < 0.50$)であることが好ましい。従って、480nm以上600nm以下の発光波長の発光が実現できる。このIn組成領域では発光層に内包される歪みが大きく、基板正面の傾斜角を前記範囲に取ったときに抑制できるピエゾ電界が大きい。従って本発明を用いれば当該In組成領域でも良好な外部量子効率を有する発光素子を作製することができる。

40

【0017】

本発明に係るⅢⅢ族窒化物半導体素子では、前記金属電極は、Pd、Au、又は、Ni及びAu、からなることが好ましい。このような材料の金属電極によって、第2のコンタクト層と良好な接触が実現される。これらの金属を用いることにより良好なオーム接合が実現される。

50

【0018】

本発明に係るIII族窒化物半導体素子の製造方法は、窒化ガリウム系半導体からなる発光層を形成する工程と、前記発光層の上にp型の窒化ガリウム系半導体の第1のコンタクト層を形成する工程と、前記第1のコンタクト層の形成時に供給されたp型ドーパントの供給量を切り替えた後に前記第1のコンタクト層の上にp型の窒化ガリウム系半導体の第2のコンタクト層を形成する工程と、前記第2のコンタクト層の上に金属電極を形成する工程と、を備え、前記第1のコンタクト層及び前記第2のコンタクト層は、p型の同一の窒化ガリウム系半導体から成り、前記第1のコンタクト層を形成する工程及び前記第2のコンタクト層を形成する工程において成長炉に供給されるp型ドーパントの供給量は、前記第2のコンタクト層を形成する工程で供給される量のほうが前記第1のコンタクト層を形成する工程で供給される量よりも多く、前記第1及び第2のコンタクト層の成長温度は、前記発光層に含まれている活性層の成長温度よりも高く、前記第1及び第2のコンタクト層の成長温度と前記活性層の成長温度との差は、摂氏100度以上摂氏350度以下であり、前記第2のコンタクト層は前記金属電極に直接接し、前記第1のコンタクト層は前記第2のコンタクト層に直接接し、前記第1のコンタクト層と前記第2のコンタクト層との界面は、c軸に沿って延びる基準軸に直交する面から50度以上130未満の角度で傾斜しており、前記発光層の発光波長は480nm以上600nm以下であり、前記第2のコンタクト層の膜厚は1nm以上50nm以下である、ことを特徴とし、前記第2のコンタクト層の膜厚は1nm以上20nm以下であることができる。

10

【0019】

第2のコンタクト層において、p型ドーパントが比較的高いので金属電極との接触抵抗は低下し、膜厚が比較的小さいので結晶性は比較的良好となる。第1のコンタクト層において、p型ドーパント濃度が比較的低いので結晶性は比較的良好であり、キャリア濃度も比較的高い。従って、結晶性が損なわれることなく、第2のコンタクト層と金属電極との接触抵抗の向上、及び、キャリア濃度の向上、が実現される。更に、第1のコンタクト層と第2のコンタクト層との界面の傾斜が50度未満又は130度以上の場合に比較して、ピエゾ電界が逆向きで比較的小さいか又はゼロとなる。従って、傾斜が50度未満又は130度以上の場合に比較して発光層の外部量子効率等が良好となる。また、第1及び第2のコンタクト層の成長温度は発光層の成長温度よりも高く、第1及び第2のコンタクト層の成長温度と発光層の成長温度との差は、摂氏150度以上摂氏300度以下である。成長温度の差が当該差よりも小さいと、第1及び第2のコンタクト層の成長温度が低くなるために電気特性が低下する。成長温度の差が当該差よりも大きいと、活性層が受ける熱ダメージが増加するので発光効率が低下する。

20

【0020】

本発明に係る方法では、p型の窒化ガリウム系半導体のクラッド層を形成する工程を更に備え、前記クラッド層は、前記発光層が形成された後に形成され、前記第1及び第2のコンタクト層は、前記クラッド層が形成された後に形成され、前記クラッド層は、前記発光層と前記第1のコンタクト層との間に設けられ、前記クラッド層のバンドギャップは前記第1のコンタクト層のバンドギャップより大きく、前記第1のコンタクト層は前記クラッド層に直接接していることが好ましい。

30

【0021】

本発明に係る方法では、窒化ガリウム系半導体からなる基板を準備する工程を更に備え、前記クラッド層は、前記基板の上に形成され、前記基板の正面の上に、前記発光層、前記クラッド層、前記第1及び第2のコンタクト層及び前記金属電極が順に設けられ、前記正面は、前記基準軸に直交する面から50度以上130未満の角度で傾斜していることが好ましい。従って、窒化ガリウム系半導体からなる基板を用いることができるので、基準軸に直交する面から50度以上130未満の角度で傾斜している正面の上に、窒化ガリウム系半導体層を成長させることによって、第1のコンタクト層と第2のコンタクト層との界面にも正面と同様の傾斜が実現できる。

40

【0022】

50

本発明に係る方法では、前記第1のコンタクト層のp型ドーパントの濃度は、 $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以下であることが好ましく、前記第2のコンタクト層のp型ドーパントの濃度は、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 以下であることが好ましい。金属電極に直接接している第2のコンタクト層のp型ドーパントの濃度が比較的高いので、金属電極との接触抵抗は低下する。

【0023】

本発明に係る方法では、前記第1のコンタクト層のp型ドーパントの濃度は、 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以下であることが好ましい。金属電極に直接接していない第1のコンタクト層のp型ドーパントの濃度が比較的低いので、結晶性が比較的良好であり、よってキャリア濃度も比較的高い。

10

【0024】

本発明に係る方法では、前記p型ドーパントはマグネシウムであることが好ましい。従って、p型ドーパントの供給が良好に行える。Mgは窒化物半導体中で比較的浅いアクセプタ準位を形成し、そのためドーパント濃度に対する正孔濃度の活性化率が高く、比較的小さいドーパント濃度で比較的高い正孔濃度が得られる。

【0025】

本発明に係る方法では、前記第1及び第2のコンタクト層は窒化ガリウムからなることが好ましい。GaNは、二元化合物である窒化ガリウム系半導体であるので、第1及び第2のコンタクト層がGaNからなる場合には、良好な結晶品質を提供できる。

20

【0026】

本発明に係る方法では、前記第1及び第2のコンタクト層は、 $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ ($0 < x, y < 1$, $0 < 1 - x - y$)であることが好ましい。従って、第1及び第2のコンタクト層の材料に、窒化ガリウム以外の他の窒化ガリウム系半導体を用いることができる。これにより基板との格子不整合度が変わり、コンタクト層に内包される歪み量が変化するために、第1コンタクト層のキャリア濃度を高めたり、第2コンタクト層と金属電極との接触抵抗を低減させることができる。

【0027】

本発明に係る方法では、前記発光層は、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0 < x < 0.50$)であることが好ましい。従って、480nm以上600nm以下の発光波長の発光が実現できる。このIn組成領域では発光層に内包される歪みが大きく、基板正面の傾斜角を前記範囲に取ったときに抑制できるピエゾ電界が大きい。従って本発明を用いれば当該In組成領域でも良好な外部量子効率を有する発光素子を作製することができる。

30

【0028】

本発明に係るII族窒化物半導体素子では、前記第1のコンタクト層中の炭素不純物濃度は $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以下である。このように、炭素不純物濃度が比較的に低いので、接触抵抗、及び、素子の動作電圧、が向上される。

【0029】

本発明に係るII族窒化物半導体素子では、前記基板の前記正面は、前記基準軸に直交する面から70度以上80度未満の角度で傾斜している。当該角度範囲の基板を用いると、前記発光層中のIn組成の揺らぎを低減させることができ、良好な外部量子効率を有する発光素子を作製することができる。

40

【0030】

本発明に係るII族窒化物半導体素子では、前記基板の前記正面は、前記基準軸に直交する面から100度以上110度未満の角度で傾斜している。当該角度範囲の基板を用いると、前記発光層中のIn組成揺らぎを低減させることができ、良好な外部量子効率を有する発光素子を作製することができる。

【0031】

本発明に係るII族窒化物半導体素子の製造方法では、前記第1のコンタクト層の成長速度は、 $1 \mu\text{m/hour}$ 以下であり、前記第2のコンタクト層の成長速度は、 $0.1 \mu\text{m/hour}$ 以下であり、前記第2のコンタクト層の成長速度は、前記第1のコンタク

50

ト層の成長速度よりも遅く、前記第1及び第2のコンタクト層は、水素を20%以上含む雰囲気下で成長される。このように、第1及び第2のコンタクト層の成長時の雰囲気ガスに水素を用い、第1及び第2のコンタクト層の成長速度も比較的に遅いので、第1及び第2のコンタクト層の成長時のV族原子数/I_{II}I族原子数の比を比較的に高くできる。従って、第1及び第2のコンタクト層における炭素不純物濃度を比較的に低くでき、よって、電極との接触抵抗、及び、素子の動作電圧が良好となる。

【0032】

本発明に係る方法では、前記第1のコンタクト層中の炭素不純物濃度は、 1×10^{-3} 以下である。このように、炭素不純物濃度が比較的に低いので、接触抵抗、及び、素子の動作電圧、が向上される。10

【0033】

本発明に係る方法では、前記第1及び第2のコンタクト層の成長温度と前記活性層の成長温度との差は、摂氏100度以上摂氏250度以下である。よって、コンタクト層の結晶性を向上できる一方で、コンタクト層の成長時に活性層が受けるダメージを抑制できる。20

【0034】

本発明に係る方法では、前記基板の前記主面は、前記基準軸に直交する面から70度以上80度未満の角度で傾斜している。当該角度範囲の基板を用いると、前記発光層中のIn組成の揺らぎを低減させることができ、良好な外部量子効率を有する発光素子を作製することができる。20

【0035】

本発明に係る方法では、前記基板の前記主面は、前記基準軸に直交する面から100度以上110度未満の角度で傾斜している。当該角度範囲の基板を用いると、前記発光層中のIn組成の揺らぎを低減させることができ、良好な外部量子効率を有する発光素子を作製することができる。

【0036】

本発明に係る方法では、前記活性層の成長温度は摂氏650度以上摂氏800度未満である。よって、前記波長範囲(480nm以上600nm以下)の発光波長を有する活性層を作製することができる。30

【0037】

本発明に係る方法では、前記金属電極は、Pd、Au、又は、Ni及びAu、からなることが好ましい。このような材料の金属電極によって、第2のコンタクト層と良好な接触が実現される。これらの金属を用いることにより良好なオーミック接合が実現される。

【発明の効果】

【0038】

本発明によれば、結晶性が損なわれることなく比較的小さい接触抵抗と比較的高いキャリア濃度とを有するp型のコンタクト層を有するI_{II}I族窒化物半導体素子及びI_{II}I族窒化物半導体素子の製造方法を提供できる。

【図面の簡単な説明】

【0039】

【図1】図1は、実施形態に係るI_{II}I族窒化物半導体素子の構成を示す図である。40

【図2】図2は、実施形態に係るI_{II}I族窒化物半導体素子の製造方法の主要な工程を示す図である。

【図3】図3は、実施形態に係るI_{II}I族窒化物半導体素子の製造方法の主要な工程における生産物を模式的に示す図である。

【図4】図4は、実施例1のレーザダイオードの素子構造及び成長温度を示す図である。

【図5】図5は、実施例2のレーザダイオードの素子構造及び成長温度を示す図である。

【図6】図6は、発光波長と外部量子効率との関係、及び、視感度曲線、を示す図である。50

【図7】図7は、ピエゾ電界と主面のオフ角との関係を示す図である。

【図 8】図 8 は、マグネシウム濃度とキャリア濃度との関係を示す図である。

【図 9】図 9 は、マグネシウム濃度と接触抵抗との関係を示す図である。

【図 10】図 10 は、本実施形態の効果を説明するための図である。

【図 11】図 11 は、エピタキシャル積層の構造を表面側から分析した S I M S 結果を示す図である。

【図 12】図 12 は、実施例 6 のレーザダイオードの素子構造及び成長温度を示す図である。

【図 13】図 13 は、主に実施例 6 のエピタキシャル積層の構造を、表面側から分析した S I M S 結果の一部を示す図である。

【図 14】図 14 は、主に実施例 6 のエピタキシャル積層の構造を、表面側から分析した S I M S 結果の一部を示す図である。 10

【図 15】図 15 は、主に実施例 6 のエピタキシャル積層の構造を、表面側から分析した S I M S 結果の一部を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0040】

以下、図面を参照して、本発明に係る好適な実施形態について詳細に説明する。なお、図面の説明において、可能な場合には、同一要素には同一符号を付し、重複する説明を省略する。図 1 は、本実施の形態に係る I I I 族窒化物半導体素子の構造及び I I I 族窒化物半導体素子のためのエピタキシャル基板の構造を概略的に示す図面である。I I I 族窒化物半導体素子 11 としては、例えば発光ダイオード、レーザダイオード等の発光素子を説明するが、本実施の形態は、p 型 I I I 族窒化物半導体を含む I I I 族窒化物半導体素子に適用可能である。 20

【0041】

図 1 の (a) 部に I I I 族窒化物半導体素子 11 が示され、図 1 の (b) 部に I I I 族窒化物半導体素子 11 のためのエピタキシャル基板 E P が示される。

エピタキシャル基板 E P は、I I I 族窒化物半導体素子 11 と同様のエピタキシャル層構造を有する。引き続く説明では、I I I 族窒化物半導体素子 11 を構成する半導体層を説明する。エピタキシャル基板 E P は、これらの I I I 族窒化物半導体素子 11 を構成する半導体層に対応する半導体層（半導体膜）を含み、対応する半導体層には、I I I 族窒化物半導体素子 11 のための説明が適用される。 30

【0042】

図 1 を参照すると、座標系 S 及び結晶座標系 C R が示されている。基板 13 の正面 13 a は、Z 軸の方向を向いており、X 方向及び Y 方向に延びている。X 軸は a 軸の方向に向いている。図 1 の (a) 部に示されるように、I I I 族窒化物半導体素子 11 は、基板 13 と、n 型 I I I 族窒化物半導体領域 15 と、発光層 17 と、p 型 I I I 族窒化物半導体領域 19 とを備える。n 型 I I I 族窒化物半導体領域 15 、発光層 17 及び p 型 I I I 族窒化物半導体領域 19 は、基板 13 の上においてエピタキシャル成長によって形成されている。

【0043】

基板 13 の c 面は、図 1 に示された面 S c に沿って延びている。面 S c の上では、六方晶系窒化ガリウム系半導体の結晶軸を示すための結晶座標系 C R (c 軸, a 軸, m 軸) が示されている。基板 13 の正面 13 a は、基準軸 C x に直交する面 S c を基準にして、基板 13 の窒化ガリウム系半導体の m 軸又は a 軸の方向に、傾斜角 θ で傾斜している。傾斜角 θ は、基板 13 の正面 13 a の法線ベクトル V N と基準軸 C x を示す c 軸ベクトル V C との成す角度によって規定される。正面 13 a の上において、発光層 17 は、n 型 I I I 族窒化物半導体領域 15 と p 型 I I I 族窒化物半導体領域 19 との間に設けられている。正面 13 a の上において、n 型窒化ガリウム系半導体領域 15 、活性層 17 及び p 型窒化ガリウム系半導体領域 19 は、法線ベクトル V N の向き (Z 軸方向) に順に配列されている。正面 13 a の上において、発光層 17 に含まれている n 側光ガイド層 29 、活性層 27 及び p 側光ガイド層 31 が法線ベクトル V N の向き (Z 軸方向) に順に配列されている。 40

10

20

30

40

50

。主面 13a の上において、p 型 I II 族窒化物半導体領域 19 に含まれている p 型窒化ガリウム系半導体層 21、p 型クラッド層 23、コンタクト層 25a 及びコンタクト層 25b が、法線ベクトル VN の向き (Z 軸方向) に順に配列されている。

【0044】

基板 13 は、導電性を有する窒化ガリウム系半導体からなる主面 13a を有する。基板 13 の主面 13a は、窒化ガリウム系半導体の c 軸に沿って延びる基準軸 Cx に直交する面 Sc から 50 度以上 130 度未満の範囲の角度で傾斜する。基板 13 は、主面 13a を含めて、窒化ガリウム系半導体からなることができる。基板 13 の窒化ガリウム系半導体は、例えば GaN (窒化ガリウム)、InGaN (In : インジウム)、AlGaN 等であることができる。GaN は、二元化合物である窒化ガリウム系半導体であるので、良好な結晶品質と安定した基板主面とを提供できる。また、基板 13 は、例えば AlN 等であることもできる。

10

【0045】

n 型 I II 族窒化物半導体領域 15 は、n 型の窒化ガリウム系半導体からなる。n 型 I II 族窒化物半導体領域 15 は、基板 13 の上に設けられる。n 型 I II 族窒化物半導体領域 15 は、基板 13 の主面 13a に直接接している。n 型 I II 族窒化物半導体領域 15 は、一又は複数の n 型窒化ガリウム系半導体層を含む。この一又は複数の n 型の窒化ガリウム系半導体層は、主面 13a の上に設けられる。n 型 I II 族窒化物半導体領域 15 は、例えば n 型バッファ層、n 型クラッド層、n 型光ガイド層を含むことができる。n 型 I II 族窒化物半導体領域 15 は、例えば、n 型の GaN、InGaN、AlGaN 又は InAlGaN 等からなることができる。

20

【0046】

発光層 17 は、例えば、インジウム (In) を含む窒化ガリウム系半導体からなる。発光層 17 は、基板 13 及び n 型 I II 族窒化物半導体領域 15 の上に設けられる。発光層 17 は、n 型 I II 族窒化物半導体領域 15 に直接接している。発光層 17 は、活性層 27 を含み、必要な場合には n 側光ガイド層 29 及び p 側光ガイド層 31 を含むことができる。活性層 27 は、一又は複数の井戸層 33 と、複数の障壁層 35 とを含む。障壁層 35 は、井戸層 33 のバンドギャップより大きいバンドギャップを有する。活性層 27 は、单一又は多重の量子井戸構造を有することができる。井戸層 33 及び障壁層 35 は、何れも、n 型 I II 族窒化物半導体領域 15 及び n 側光ガイド層 29 の上に設けられている。井戸層 33 及び障壁層 35 は、何れも、例えば、AlGaN、GaN、InGaN 又は InAlGaN 等からなる。発光層 17 (活性層 27) の発光波長は、例えば 480 nm 以上 600 nm 以下である。この発光波長範囲の光を発生する発光素子において、p 型窒化ガリウム系半導体の電気的特性を向上できる。更に、長波長における発光を提供する発光素子において、p 型窒化ガリウム系半導体の特性を向上できる。

30

【0047】

発光層 17 がインジウム (In) を含む窒化ガリウム系半導体からなり、発光層 17 のインジウム (In) の組成は、15% 以上 50% 未満となっている。従って、480 nm 以上 600 nm 以下の発光波長の発光が実現できる。例えば、発光層 17 は、In_xGa_{1-x}N (0.15 < x < 0.50) であることができる。

40

【0048】

p 型 I II 族窒化物半導体領域 19 は、p 型の窒化ガリウム系半導体からなる。p 型 I II 族窒化物半導体領域 19 の p 型ドーパントはマグネシウム (Mg) である。従って、p 型ドーパントの供給が良好に行える。なお、亜鉛 (Zn) 等も p 型ドーパントに用いることができる。p 型 I II 族窒化物半導体領域 19 は、基板 13、n 型 I II 族窒化物半導体領域 15 及び発光層 17 の上に設けられる。p 型 I II 族窒化物半導体領域 19 は、発光層 17 に直接接している。p 型 I II 族窒化物半導体領域 19 は、一又は複数の p 型窒化ガリウム系半導体層を含む。p 型 I II 族窒化物半導体領域 19 は、例えば p 型窒化ガリウム系半導体層 21 を含むことができる。p 型窒化ガリウム系半導体層 21 は、発光層 17 の上に設けられ、発光層 17 に直接接している。p 型窒化ガリウム系半導体層 21

50

は、p型電子ブロック層及びp型光ガイド層を含むことができる。p型III族窒化物半導体領域19は、例えば、更に、p型クラッド層23を含むことができる。p型クラッド層23は、p型窒化ガリウム系半導体層21の上に設けられ、p型窒化ガリウム系半導体層21に直接接している。p型窒化ガリウム系半導体層21及びp型クラッド層23のそれぞれは、例えば、p型のGaN、InGaN、AlGaN又はInAlGaN等からなることができる。

【0049】

p型III族窒化物半導体領域19は、例えば、更に、コンタクト層25a(第1のコンタクト層)を含むことができる。コンタクト層25aは、p型クラッド層23の上に設けられ、p型クラッド層23に直接接している。p型III族窒化物半導体領域19は、例えば、更に、コンタクト層25b(第2のコンタクト層)を含むことができる。コンタクト層25bは、コンタクト層25aの上に設けられ、コンタクト層25aに直接接している。

10

【0050】

コンタクト層25aとコンタクト層25bとの間には界面J1が形成されている。コンタクト層25aとコンタクト層25bとは、p型の同一の窒化ガリウム系半導体からなり、例えば、p型のGaNからなることができる。GaNは、二元化合物である窒化ガリウム系半導体であるので、コンタクト層25a及びコンタクト層25bがGaNからなる場合には、良好な結晶品質を提供できる。

20

【0051】

コンタクト層25aのp型ドーパントの濃度は、コンタクト層25bのp型ドーパントの濃度よりも小さい。コンタクト層25aのp型ドーパントの濃度は、 $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以下である。例えば、コンタクト層25aのp型ドーパントの濃度は、 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 以下であることができる。電極37に直接接していないコンタクト層25aのp型ドーパントの濃度が比較的低いので、結晶性が比較的良好であり、よってキャリア濃度も比較的高い。コンタクト層25bのp型ドーパントの濃度は、 $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 以下であることができる。電極37に直接接しているコンタクト層25bのp型ドーパントの濃度が比較的高いので、電極37との接触JCにおける接触抵抗は低下する。

30

【0052】

コンタクト層25aとコンタクト層25bとの界面J1は、c軸に沿って延びる基準軸Cxに直交する面Scから50度以上130度未満の角度で傾斜している。コンタクト層25bの膜厚は1nm以上50nm以下である。例えば、コンタクト層25bの膜厚は1nm以上20nm以下であることができる。コンタクト層25aのバンドギャップはp型クラッド層23のバンドギャップよりも小さい。

30

【0053】

以上説明した構成を有するIII族窒化物半導体素子11では、コンタクト層25bにおいて、p型ドーパントが比較的高いので電極37との接触抵抗は低下し、膜厚が比較的小さいので結晶性は比較的良好となる。コンタクト層25aにおいて、p型ドーパント濃度が比較的低いので結晶性は比較的良好であり、キャリア濃度も比較的高い。従って、結晶性が損なわれることなく、コンタクト層25bと電極37との接触抵抗の向上、及び、キャリア濃度の向上、が実現される。更に、コンタクト層25aとコンタクト層25bとの界面J1の傾斜が50度未満又は130度以上の場合に比較して、ピエゾ電界が逆向きで比較的小さいか又はゼロとなる。従って、傾斜が50度未満又は130度以上の場合に比較して発光層17の外部量子効率等が良好となる。

40

【0054】

また、III族窒化物半導体素子11は、窒化ガリウム系半導体からなる基板13を備えており、基板13の正面13aの上に、n型III族窒化物半導体領域15、発光層17及びp型III族窒化物半導体領域19といった窒化ガリウム系半導体層が順に設けられており、正面13aは、基準軸Cxに直交する面Scから50度以上130度未満の角度

50

で傾斜している。従って、窒化ガリウム系半導体からなる基板 13 を用いることができる。基準軸 C x に直交する面 S c から 50 度以上 130 度未満の角度で傾斜している主面 13 a の上に、p 型 III 族窒化物半導体領域 19 等の窒化ガリウム系半導体層を成長させることによって、コンタクト層 25 a とコンタクト層 25 b との界面 J 1 にも主面 13 a と同様の傾斜が実現できる。

【0055】

また、コンタクト層 25 a 及びコンタクト層 25 b の同一の窒化ガリウム系半導体は、p 型の $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$ ($0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, 0 \leq x+y \leq 1$) であることができる。従って、コンタクト層 25 a 及びコンタクト層 25 b の材料に、GaN 以外の他の窒化ガリウム系半導体を用いることができる。

10

【0056】

III 族窒化物半導体素子 11 は、電極 37 及び絶縁膜 39 を更に備える。基板 13、n 型 III 族窒化物半導体領域 15、発光層 17 及び p 型 III 族窒化物半導体領域 19 の上には、電極 37 (例えは、アノード) と、コンタクト層 25 b を覆う絶縁膜 39 とが設けられている。電極 37 は、コンタクト層 25 b の上に設けられ、絶縁膜 39 の開口 39 a を介してコンタクト層 25 b に直接接している。コンタクト層 25 b と電極 37 とは、開口 39 a を介して接触 JC を成す。電極 37 は、例えは、Pd、Au、又は、Ni / Au (Ni 及び Au) 等からなる。従って、このような材料の電極 37 によって、コンタクト層 25 b と良好な接触が実現される。また、III 族窒化物半導体素子 11 は、電極 41 (例えは、カソード) を備える。電極 41 は、基板 13 の裏面 13 b の上に設けられ、裏面 13 b に直接接している。電極 41 は、例えは、Pd、Ti / Al 等からなる。

20

【0057】

図 1 の (b) 部に示すように、III 族窒化物半導体素子 11 のエピタキシャル基板 EP は、III 族窒化物半導体素子 11 の上記の各半導体層に対応する半導体層 (半導体膜) を含み、対応する半導体層には、III 族窒化物半導体素子 11 のための説明が当てはまる。エピタキシャル基板 EP の表面粗さは、 $10 \mu m$ 角の範囲で $1 nm$ 以下の算術平均粗さを有する。図 2 は、本実施形態に係る III 族窒化物半導体素子の製造方法の主要な工程を示す図面である。図 3 は、本実施形態に係る III 族窒化物半導体素子の製造方法の主要な工程における生産物を模式的に示す図面である。

30

【0058】

図 2 に示される工程フローに従って、有機金属気相成長法により、発光素子の構造のエピタキシャル基板 EP と III 族窒化物半導体素子 11 とを作製した。エピタキシャル成長のための原料として、トリメチルガリウム (TMG) 、トリメチルインジウム (TMI) 、トリメチルアルミニウム (TMA) 、アンモニア (NH₃) 、シラン (SiH₄) 、及び、ビスシクロペンタジエニルマグネシウム (Cp₂Mg) を用いた。

40

【0059】

工程 S101 では、窒化ガリウム系半導体からなる主面を有する基板 (図 3 の (a) 部に示される基板 51) を準備する。この基板 51 (基板 13 に対応) の主面 51 a (主面 13 a に対応) の法線軸は、窒化ガリウム系半導体の c 軸に対して 50 度以上 130 度未満の角度範囲内の傾斜角を有する。基板 51 の主面 51 a は、例えは、六方晶系 GaN における m 軸方向に c 面から 75 度の角度で傾斜した { 20 - 21 } 面であることができる。主面 51 a は鏡面研磨されている。

40

【0060】

次に、基板 51 の上に以下の条件でエピタキシャル成長を行う。まず、工程 S102 では、基板 51 を成長炉 10 内に設置する。成長炉 10 内には、例えは石英フローチャネル等の石英製の治具が配置されている。必要な場合には、摂氏 1050 度程度の温度及び 27 kPa 程度の炉内圧力において、NH₃ と H₂ を含む熱処理ガスを成長炉 10 に供給しながら、10 分間程度、熱処理を行う。この熱処理により、主面 51 a 等において表面改質が生じる。

【0061】

50

この熱処理の後に、工程 S 103 では、基板 51 の上に III 族窒化物半導体層を成長してエピタキシャル基板 EP を形成する。雰囲気ガスは、キャリアガス及びサブフローガスを含む。雰囲気ガスは、例えば窒素及び / 又は水素を含むことができる。工程 S 103 は、下記工程 S 104、工程 S 105 及び工程 S 110 を含む。

【0062】

工程 S 104 では、III 族構成元素及び V 族構成元素のための原料、及び n 型ドーパントを含む原料ガス並びに雰囲気ガスを成長炉 10 に供給して、n 型 III 族窒化物半導体領域 53 (n 型 III 族窒化物半導体領域 15 に対応) をエピタキシャルに成長して形成する。n 型 III 族窒化物半導体領域 53 の正面 53a の傾斜角は、基板 51 の正面 51a の傾斜角に対応している。n 型 III 族窒化物半導体領域 53 は、一又は複数の III 族窒化物半導体層を含むことができる。本実施形態では、例えば、以下の III 族窒化物半導体層が成長される。摂氏 950 度程度において、TMG、NH₃、SiH₄、並びに、窒素及び / 又は水素、を成長炉 10 に供給して、Si ドープ GaN 層 55a を成長して形成する。次いで、摂氏 870 度程度の基板温度で、TMG、TMI、TMA、NH₃、SiH₄ 及び窒素を成長炉 10 に供給して、Si ドープ InAlGaN 層 55b を成長して形成する。この後に、摂氏 1050 度程度において、TMG、NH₃、SiH₄、並びに、窒素及び / 又は水素、を成長炉 10 に供給して、Si ドープ GaN 層 55c を成長して形成する。還元性を有する水素雰囲気では成長炉 10 内の治具や治具の付着物から酸素が脱離されやすくなる。

10

【0063】

工程 S 105 では、発光層 57 (発光層 17 に対応) を成長して形成する。工程 S 105 は、下記工程 S 106 ~ 工程 S 109 を含む。工程 S 106 では、摂氏 840 度程度の基板温度で、TMG、TMI、NH₃ 及び窒素を成長炉 10 に供給して、n 側の InGaN 光ガイド層 59a を成長して形成する。InGaN 光ガイド層 59a の一部又は全部は、アンドープ又は n 型導電性であることができる。

20

【0064】

次いで、工程 S 107 及び工程 S 108 において、活性層 59b (活性層 27 に対応) を成長して形成する。工程 S 107 では、TMG、TMI、NH₃ 及び雰囲気ガスの窒素を成長炉 10 に供給して、アンドープ InGaN 障壁層 61a を成長して形成する。アンドープ InGaN 障壁層 61a の厚さは、15 nm 程度である。アンドープ InGaN 障壁層 61a の成長後に、成長を中断して、障壁層の成長温度から井戸層の成長温度に基板温度を変更する。基板温度の変更後の工程 S 108 では、TMG、TMI、NH₃ 及び雰囲気ガスの窒素を成長炉 10 に供給して、アンドープ InGaN 井戸層 61b を成長して形成する。InGaN 井戸層 61b の厚さは、3 nm 程度である。必要な場合には、障壁層の成長、温度変更、井戸層の成長を繰り返すことができる。本実施形態において、活性層 59b の量子井戸構造は、3 層のアンドープ InGaN 井戸層 61b を含む。

30

【0065】

工程 S 109 では、摂氏 840 度程度の基板温度で、TMG、TMI、NH₃ 及び雰囲気ガスの窒素を成長炉 10 に供給して、p 側の InGaN 光ガイド層 59c を成長して形成する。InGaN 光ガイド層 59c の一部又は全部は、アンドープ又は p 型導電性であることができる。発光層 57 の正面 57a 及び活性層 59b の正面 59b-1 の傾斜角は、基板 51 の正面 51a の傾斜角に対応している。

40

【0066】

工程 S 110 では、III 族原料、V 族原料、及び p 型ドーパントを含む原料ガス並びに雰囲気ガスを成長炉 10 に供給して、p 型 III 族窒化物半導体領域 63 (p 型 III 族窒化物半導体領域 19 に対応) をエピタキシャルに成長して形成する。p 型 III 族窒化物半導体領域 63 の正面 63a の傾斜角は、基板 51 の正面 51a の傾斜角に対応している。p 型 III 族窒化物半導体領域 63 は、一又は複数の III 族窒化物半導体層を含むことができる。本実施例では、以下の III 族窒化物半導体層が成長される。例えば、発光層 57 の成長後に、TMG の供給を停止して、基板温度を上昇する。TMG、NH₃

50

、 Cp_2Mg 及び雰囲気ガスを成長炉 10 に供給して、摂氏 900 度程度の基板温度で p 型 GaN 電子ブロック層 65a を成長して形成する。p 型 GaN 電子ブロック層 65a の成長において、雰囲気ガスの窒素が供給されることが好ましい。次いで、TMG、TMI、 NH_3 、 Cp_2Mg 及び窒素を成長炉 10 に供給して、摂氏 840 度程度の基板温度で Mg ドープ InGaN 光ガイド層 65b を成長して形成する。この後に、摂氏 900 度程度において、TMG、 NH_3 、 Cp_2Mg 及び雰囲気ガスを成長炉 10 に供給して、Mg ドープ GaN 光ガイド層 65c を成長して形成する。Mg ドープ GaN 光ガイド層 65c の成長において、雰囲気ガスとして窒素が供給されることが好ましい。そして、摂氏 870 度程度の基板温度で、TMG、TMI、TMA、 NH_3 、 Cp_2Mg 及び窒素を成長炉 10 に供給して、Mg ドープ InAlGaN クラッド層 65d (p 型クラッド層 23 に対応) を成長して形成する。

10

【0067】

Mg ドープ InAlGaN クラッド層 65d の成長の後、低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65e (コンタクト層 25a に対応) 及び高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65f (コンタクト層 25b に対応) を成長して形成する。まず、工程 S110a にて、摂氏 900 度程度において、TMG、 NH_3 、 Cp_2Mg 及び雰囲気ガスを成長炉 10 に供給して、低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65e を成長して形成する。低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65e の厚みは、40 nm 程度である。低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65e の Mg 濃度は、 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 程度である。低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65e の成長が終了すると、工程 S110b にて、低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65e の形成時 (工程 S110a) において供給された p 型ドーパント (Mg) の供給量を切り替えた後に (p 型ドーパント (Mg) の供給量を、例えば、1 sccm から 500 sccm に変更。ただし流量制御装置の制御範囲の制限がある場合には、低濃度 Mg ドープ GaN 層と高濃度 Mg ドープ GaN 層の成長速度も変更して設計の Mg 濃度を得ることができる。)、摂氏 900 度程度において、TMG、 NH_3 、 Cp_2Mg 及び雰囲気ガスを成長炉 10 に供給して、高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65f を成長して形成する。高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65f の膜厚は、10 nm 程度である。高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65f の Mg 濃度は、 $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 程度である。

20

【0068】

低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65e と高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65f とは、p 型の同一の窒化ガリウム系半導体、例えば、 $In_xAl_yGa_{1-x-y}$ ($0 < x, y < 1$, $0 < 1 - x - y$) であるが、特に、GaN 等からなる。高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65f の成長時に供給される Mg の供給量は、低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65e の成長時に供給される Mg の供給量より多い。よって、p 型ドーパント (Mg) の濃度は、低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65e よりも高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65f のほうが高い。低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65e 及び高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65f の成長において、雰囲気ガスとして窒素が供給されることが好ましい。低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65e と高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65f との間には界面 (界面 J1 に対応) が形成される。

30

【0069】

低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65e 及び高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65f の成長温度は、摂氏 1000 度程度の同一温度であってもよい。低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65e 及び高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65f の成長温度は、活性層 59b の成長温度よりも高い。低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65e 及び高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65f の成長温度と活性層 59b の成長温度との差は、摂氏 100 度以上摂氏 350 度以下の範囲内にあるが、例えば、摂氏 150 度以上摂氏 300 度以下の範囲内にあることができる。成長温度の差が当該差よりも小さいと、低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65e 及び高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65f

40

50

f の成長温度が低くなるために電気特性が低下する。成長温度の差が当該差よりも大きいと、活性層 59b が受ける熱ダメージが増加するので発光効率が低下する。以上説明した工程 S101～工程 S110 の後に、エピタキシャル基板 EP1 が形成される。

【0070】

工程 S111 では、エピタキシャル基板 EP1 の上に（特に、高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65f の上に）電極を形成する。電極の形成は以下のように行われる。例えば、高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65f の上に Ni / Au 又は Pd 等の金属の電極（電極 37 に対応）を形成すると共に、エピタキシャル基板 EP1 の裏面に Ti / Al 等の金属の電極（電極 41 に対応）を形成する。電極の形成に先立って、エピタキシャル基板 EP1 を加工してリッジ構造を形成することができる。工程 S111 によって、エピタキシャル基板 EP が形成される。そして、へき開によってエピタキシャル基板 EP からレーザバーを形成し、このレーザバーの共振器端面に、誘電体多層膜（例えば SiO₂ / TiO₂）からなる反射膜を成膜した後に、III族窒化物半導体素子 11 に分離する。

【0071】

窒化ガリウム系半導体の発光素子の発光波長を長くするには、発光層の品質向上が不可欠である。発光層の品質に影響を及ぼす要因としては、ピエゾ電界による影響と、発光層である InGaN の組成の不均一性による影響と、がある。InGaN の組成の不均一性は、結晶中で In が偏析し、In 組成が高い結晶域と In 組成が低い結晶域が形成され、結晶中に局所的な歪みが内包されること等によって生じ、この不均一性によって結晶欠陥が形成され、発光効率が低下する。まず、図 6 を参照する。図 6 は、InGaN 井戸層の発光素子及び AlGaInP 井戸層の発光素子における外部量子効率と人間の視感度曲線とを示す。図 6 の横軸は発光素子の発光波長 (nm) を示し、図 6 の縦軸は外部量子効率 (%) を示す。図 6 に示すように、視感度が比較的高い 480 nm 以上 600 nm 以下の発光波長を含む領域では、InGaN 井戸層の発光素子及び AlGaInP 井戸層の発光素子の外部量子効率が比較的低い。更に、図 7 を参照する。図 7 は、非特許文献 1 及び非特許文献 2 に示された計算結果を示す。図 7 の横軸は GaN 層の正面のオフ角 (度) を示し、図 7 の縦軸は GaN 層内に生じる縦ピエゾ電界 (MV/cm) を示す。図 7 に示すように、発光層やコンタクト層等を含んでおり窒化ガリウム系半導体のエピタキシャル層が設けられた窒化ガリウム系半導体の基板正面のオフ角は、50 度以上 130 度未満の半極性又は無極性の場合に、縦ピエゾ電界は、基板正面が c 面の場合の縦ピエゾ電界と逆向きの比較的小さい電界となるか、又は、ゼロとなる。従って、基板正面のオフ角が 50 度以上 130 度未満の場合には、縦ピエゾ電界が、c 面を正面とする場合の電界と逆向き又はゼロとなるので、発光層の外部量子効率が良好となる。さらにオフ角が 63 度以上 80 度未満である場合には、その結晶表面状態に起因して発光層の In 組成が均一となり、In 偏析が抑制され、外部量子効率が良好となる。よって、本実施形態に係る III 族窒化物半導体素子 11 の発光層の品質は向上されている。

【0072】

また、図 8 は、p 型 GaN 層の Mg 濃度とキャリア濃度との関係を示す図である。図 8 の横軸は p 型 GaN 層内の Mg 濃度 (cm⁻³) を示し、図 8 の縦軸は p 型 GaN 層内にキャリア濃度 (cm⁻³) を示す。図 8 に示すように、Mg 濃度が 1×10^{19} cm⁻³ までは Mg 濃度の増加に伴ってキャリア濃度が増加し、Mg 濃度が 1×10^{19} cm⁻³ の場合にキャリア濃度が最大となる。Mg 濃度が 1×10^{19} cm⁻³ を超えると、結晶性の低下によってキャリア補償が顕著となり、よって、キャリア濃度が低下する。Mg 濃度が増加するほど GaN 層の結晶性は低下する。キャリア濃度は、Mg 濃度が 5×10^{18} cm⁻³ 以上 5×10^{19} cm⁻³ 以下の範囲で最も高い。更に、図 9 は、p 型 GaN 層の Mg 濃度と接触抵抗との関係を示す図である。図 9 の横軸は p 型 GaN 層内の Mg 濃度 (cm⁻³) を示し、図 9 の縦軸は p 型 GaN 層と金属電極との接触抵抗 (cm²) を示す。図 9 に示すように、Mg 濃度が 1×10^{20} cm⁻³ までは、Mg 濃度の増加に伴って接触抵抗の値が急激に減少し、Mg 濃度が 1×10^{20} cm⁻³ から 1×10^{21} cm⁻³ に至るまでの区間は、増加率は低下するが Mg 濃度の増加に伴って接触抵抗の値

10

20

30

40

50

はなお減少する。しかし、Mg濃度が $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ を超えると、Mg濃度の増加に伴って接触抵抗の値が急激な増加に転じる。よって、接触抵抗の値は、 $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以上 $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 以下の範囲内のMg濃度の場合に比較的小さい。Mg濃度が高いと、金属電極とp型GaN層との界面の障壁は図10に示すように低下するが、Mg濃度が $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ を超える程度に高いと、結晶性の低下が顕著となりキャリア濃度が低下する。このように、Mg濃度が比較的高いと、金属電極とp型GaN層との界面の障壁が低くなっているにもかかわらず、接触抵抗の増加という結果を招く場合がある。

【0073】

図10は、p型GaN層に金属電極が設けられた場合のエネルギーバンド図である。図10の(a)部は、50nmの厚みと $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ のMg濃度を有するp型GaN層に金属電極が設けられた場合のエネルギーバンドを示している。図10の(b)部は、50nmの厚みと $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ のMg濃度を有するp型GaN層に金属電極が設けられた場合のエネルギーバンドを示している。図10の(c)部は、50nmの厚みと $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ のMg濃度を有するp型GaN層に金属電極が設けられた場合のエネルギーバンドを示している。図10に示す符号E_fはフェルミエネルギーレベルを示す。

【0074】

図10の(a)部に示すようにMg濃度が比較的低いと、p型GaN層のバルク部分のキャリア濃度は増加するが、金属電極との界面のバンドの曲がりが比較的大きく、このため、障壁が比較的高く、よって、接触抵抗の値は比較的大きい。図10の(c)部に示すようにMg濃度が比較的高いと、金属電極との界面のバンドの曲がりが比較的小小さく、このため、障壁が比較的低くなるが、p型GaN層のバルク部分のキャリア濃度が減少し、よって、接触抵抗の値は比較的大きい。また、図10の(b)部に示すように、Mg濃度が図10の(a)部及び図10の(c)部にそれぞれ示すMg濃度の中間の値となっている場合には、図10の(a)部及び図10の(c)部に示す場合に比較して接触抵抗の値は小さいが、50nmの厚みによって結晶性は比較的低いままであり、キャリア濃度は十分ではない。結晶性を維持するために厚みを減らすことも考えられるが、単に厚みを減らすだけでは、バルク容積が減少するので、キャリア濃度を改善させるのは困難である。

【0075】

そこで、図10の(d)部に示すように、本実施形態に係るIII族窒化物半導体素子11のコンタクト層25a及びコンタクト層25bを用いれば、結晶性が維持されつつも、接触抵抗が低下し、キャリア濃度が増加される。電極37に直接接觸するコンタクト層25bの場合、Mg濃度は $5 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 程度で比較的高いが、厚みが10nm程度で比較的小さい。従って、電極37に直接接觸するコンタクト層25bは、比較的高いMg濃度によって、更に、厚みが比較的小さいので良好な結晶性を有することによって、十分に低い接触抵抗を有する。更に、コンタクト層25bには、コンタクト層25aが直接接觸して設けられている。コンタクト層25aの場合、Mg濃度は $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 程度と比較的低いが、厚みが40nm程度で比較的大きい。コンタクト層25aは、比較的低いMg濃度によって良好な結晶性を有し、また、良好な結晶性を有することによって、更に、厚みが比較的大きいことによって、比較的高いキャリア濃度を有する。従って、コンタクト層25aとコンタクト層25bとからなるIII族窒化物半導体素子11のp型のコンタクト層は、結晶性が低下されることなく、比較的低い接触抵抗と、比較的高いキャリア濃度とを有する。

【0076】

なお、図7～図10に示す物性は、p型ドーパントとしてMgに替えて、例えばZn等を用いても、同様であり、更に、GaN層に替えて他の窒化ガリウム系半導体、具体的には、In_xAl_yGa_{1-x-y}N(0 < x + y < 1)、を用いても、同様である。いずれの場合もドーパントの量と結晶性、キャリア濃度の関係は同様であり、最適なドーピング濃度はドーパントの種類によって変わりうるが、本実施形態

10

20

30

40

50

の通り二層のコンタクト層を用いることで、比較的低い接触抵抗と、比較的高いキャリア濃度とが両立される。

【0077】

(実施例1) 図4の(a)部に示される素子構造のレーザダイオード(III族窒化物半導体素子11に対応)を作製する。図4の(b)部には、エピタキシャル構造の構成層の成長温度が示される。p-GaN層(コンタクト層25aに対応)は、40nm程度の厚みと 1×10^{-9} cm⁻³程度のMg濃度とを有する。p⁺GaN層(コンタクト層25bに対応)は、10nm程度の厚みと 5×10^{-20} cm⁻³程度のMg濃度とを有する。p-GaN層及びp⁺GaN層の成長温度は、摂氏900度程度の同一の温度である。 $\{20-21\}$ 面GaN基板を準備する。このGaN基板の上に、有機金属気相成長法で、エピタキシャル積層を形成する。p型ドーパントはMgである。図11に、このエピタキシャル積層の構造を表面側から分析したSIMS結果を示す。図11の横軸は、このエピタキシャル積層の表面からの深さを示す。図11には、エピタキシャル積層の表面から深さ100nm程度までの分析結果が示されている。図11の左縦軸は、Mg濃度を示す。図11に示すSIMS結果によれば、p⁺-GaN層においては、 2×10^{-20} cm⁻³程度のMg濃度が確認され、p-GaN層においては、 2×10^{-19} cm⁻³程度のMg濃度が確認される(なお、図11には、例えば、 1×10^{-21} が“1E+21”と表され、 1×10^{-6} が“1E+06”と表されている)。図11に示すSIMS結果には、マーカーとしてアルミニウム(A1)及びインジウム(In)に対する分析結果も含まれている。図11を参照すれば、アルミニウム(A1)濃度及びインジウム(In)濃度の立ち上がり部分は、p-GaN層と、この層の下のp-InAlGaNクラッド層との界面である。再び、図4に戻って説明する。p型窒化ガリウム系半導体層の成長において、インジウム(In)を含まない窒化ガリウム系半導体層の成長は、雰囲気ガスとして水素のみを供給して形成された水素雰囲気中で成長する。また、インジウム(In)を含む窒化ガリウム系半導体層の成長は、雰囲気ガスとして窒素のみを供給して形成された窒素雰囲気中で成長する。エピタキシャル積層の上には、幅10μm程度のストライプ窓を有する絶縁膜(例えばSiO₂膜)をウェットエッチングにより形成する。Pdからなるアノード電極(p側の電極)及びパッド電極を蒸着により形成する。この後に、裏面には、Pdからなるカソード電極(n側の電極)及びパッド電極を蒸着により形成する。このように作製された基板生産物を、600μm程度の間隔で、へき開を行って分離して、レーザバーを作製する。へき開面は、 $\{20-21\}$ 面及び $\{11-20\}$ 面に対して垂直な面である。レーザバーの共振器端面に、誘電体多層膜からなる反射膜を成膜する。誘電体多層膜は、例えばSiO₂/TiO₂からなる。前端面の反射率は80%程度であり、後端面の反射率は95%程度である。525nm程度の波長、及び、3kA/cm²程度のしきい値電流で発振し、50mW出力時の動作電圧は6.5ボルト程度である。アノード電極の接触抵抗の測定結果は、 1×10^{-3} cm²程度であった。

【0078】

(実施例2) 実施例1と実施例2の相違点は、p-GaN層及びp⁺GaN層の成長温度だけである。図5の(a)部に示される素子構造のレーザダイオード(III族窒化物半導体素子11に対応)を作製する。図5の(b)部には、エピタキシャル構造の構成層の成長温度が示される。実施例2の場合のp-GaN層及びp⁺GaN層の成長温度は、摂氏1000度程度の同一の温度である。実施例2の場合のアノード電極の接触抵抗の測定結果は、 1×10^{-4} cm²程度であり、実施例1に比較して向上されている。50mW出力時の動作電圧は5.5ボルトであり、実施例1に比較して向上されている。素子寿命は、10000時間を超えた。以上の実施例1及び実施例2の結果から、Mg濃度が大きいp⁺GaN層の成長温度は、活性層(und-InGaN層(3nm))にダメージを与えない範囲で高めに設定することがよい。

【0079】

(実施例3～実施例5)他の実施例3～実施例5は、実施例1及び実施例2のp-GaN層及びp⁺GaN層に替えて、単一のp⁺GaN層を備え、実施例3～実施例5の

10

20

30

40

50

単一の p⁺ GaN 層の成長温度は摂氏 900 度程度である。このような p⁺ GaN 層の構成及び成長温度を除けば、実施例 3 ~ 実施例 5 と実施例 1 及び実施例 2 とは同様である。実施例 3 の場合、p⁺ GaN 層の厚みは 50 nm 程度であり、Mg 濃度は $1 \times 10^{-19} \text{ cm}^{-3}$ 程度であり、アノード電極の接触抵抗の測定結果は $1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2$ 程度であり、50 mW 出力時の動作電圧は 8.5 ボルト程度である。実施例 4 の場合、p⁺ GaN 層の厚みは 50 nm 程度であり、Mg 濃度は $1 \times 10^{-20} \text{ cm}^{-3}$ 程度であり、アノード電極の接触抵抗の測定結果は $1 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ 程度であり、50 mW 出力時の動作電圧は 7.5 ボルト程度である。実施例 5 の場合、p⁺ GaN 層の厚みは 50 nm 程度であり、Mg 濃度は $1 \times 10^{-21} \text{ cm}^{-3}$ 程度であり、アノード電極の接触抵抗の測定結果は $1 \times 10^{-1} \text{ cm}^2$ 程度であり、50 mW 出力時の動作電圧は 8.5 ボルト程度である。従って、実施例 1 及び実施例 2 は、実施例 3 ~ 実施例 5 に比較して、少なくともアノード電極の接触抵抗及び動作電圧は向上している（接触抵抗及び動作電圧の各値は小さい）。

【0080】

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

【0081】

（他の実施形態）緑色帯の長波長領域に発光波長を有する GaN 系半導体発光素子を作製するにあたって、半極性面及び無極性面の何れかを主面とする基板を利用することは、発光層に印加されるピエゾ電界を低減できること、インジウム（In）偏析が低減された高品質な InGaN 発光層を作製できること、等の理由から、非常に有利である。

【0082】

しかしながら、発明者は、半極性面及び無極性面の何れかを利用する際に障害となり得る課題が少なくとも二つあると考えた。第一の課題としては、p 側電極との間の接触抵抗が比較的に高い、ということがある。典型的には、c 面を主面とする基板上における接触抵抗は $5 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ 程度であるのに対し、半極性面及び無極性面の何れかを主面とする基板上における接触抵抗は $2 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ 程度であって約 2 衍近くも接触抵抗が増加する。この接触抵抗の増加は、縦方向に電流を流した際には約 2 V 程度の電圧上昇に相当する。

【0083】

第二の課題としては、長波長で発光するインジウム（In）組成の高い InGaN 発光層は熱耐性が弱く、そのため p 型層の成長温度を（典型的には摂氏 1100 度程度から摂氏 900 度程度まで）下げる必要があるが、この場合、p 型層の結晶品質が低下する、ということがある。p 型層の結晶品質の低下は接触抵抗の悪化を招き、典型的には c 面を主面とする基板上における接触抵抗は $5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ 程度であり、半極性面及び無極性面の何れかを主面とする基板上における接触抵抗は $5 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ 程度であって、基板の主面の面方位に関わらず、接触抵抗が悪化する。

【0084】

そこで、発明者は、半極性面及び無極性面の何れかを主面とする基板上において p 型層を低温で成長しても、良好な接触抵抗を有する GaN 系半導体発光素子の製造が可能となる製造方法を、見出した。水素雰囲気のもとで、発光層の保護のために p 型層を比較的に低温（摂氏 900 度程度）で成長すると、成長速度が $1 \mu\text{m/hour}$ 以上の場合に、 $1 \times 10^{-17} \text{ cm}^{-3}$ を超えて $1 \times 10^{-18} \text{ cm}^{-3}$ 程度の炭素不純物が p 型層に導入される。このような炭素不純物濃度は、p 型層の抵抗値を増加し、よって、p 型層と電極との接触抵抗の悪化を招く。これに対し、発明者は、p 型層の炭素不純物濃度を低下させる方法として、成長速度を下げるこによって V 族原子数 / III 族原子数の比を上げることが有効である、ことを見出し、実際に接触抵抗を低減できた。この場合の成長速度は、p

側の電極に接触する表面を有しており Mg ドープ量の多いコンタクト層（高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65f に対応する p⁺-GaN 層）の場合には 0.1 μm/hour 以下であり、このコンタクト層に接してあり比較的 Mg ドープ量の小さいコンタクト層（低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65e に対応する p-GaN 層）の場合には 1 μm/hour 以下である。

【0085】

なお、発明者は、炭素不純物濃度を低減させる方法として、窒素雰囲気下で p 型層を成長させることができることも見出しあが、この場合、接触抵抗の大幅な改善は認められなかった。発明者は、この現象（窒素雰囲気下で p 型層を成長させた場合、炭素不純物濃度を低減できても接触抵抗の大幅な改善は認められない、という現象）の原因を次のように考えた。すなわち、マグネシウム（Mg）原子は、GaN 中のガリウム（Ga）を置換してアクセプタとして働く、という点と、水素雰囲気では、マグネシウム（Mg）原子は、ガリウム（Ga）原子を効率よく置換するのに対し、窒素雰囲気では、Mg 原子は、ガリウム（Ga）原子を効率よく置換せず、格子間などに入り込む、という点とを鑑みれば、上記のような現象（窒素雰囲気下で p 型層を成長させた場合、炭素不純物濃度を低減できても接触抵抗の大幅な改善は認められない、という現象）が、水素雰囲気と窒素雰囲気とでは SIMS 分析上では同程度の濃度のマグネシウム（Mg）原子がドープされても、窒素雰囲気の場合にはマグネシウム（Mg）原子が有効なアクセプタとして働いていないことが起因して生じた、と発明者は考えた。

【0086】

以上の知見から、発明者は、水素雰囲気において成長速度を下げ、V 族原子数 / III 族原子数の比を高めて成長することによって、半極性面及び無極性面の何れかを正面とする基板上において p 型層を低温で成長しても、良好な接触抵抗を有する GaN 系半導体発光素子と、GaN 系半導体発光素子を作製する方法とを見出すことに成功した。このような、半極性面及び無極性面の何れかを正面とする基板上に p 型層を低温で成長しても良好な接触抵抗を有する GaN 系半導体発光素子の製造が可能となる製造方法と、この製造方法によって製造される GaN 系半導体発光素子とは、図 3 に示すエピタキシャル基板 EP 1 の構成と、エピタキシャル基板 EP 1 の製造方法とに対して、以下のような変更を加えることによって、実現できる。以下、変更後のエピタキシャル基板を、エピタキシャル基板 EP 11 という。

【0087】

まず、エピタキシャル基板 EP 11 の構成及び製造方法が、エピタキシャル基板 EP 1 と異なっている点（変更点）を、下記に列記する。エピタキシャル基板 EP 11 の場合、Si ドープ GaN 層 55a と低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65e と高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65f との成長時の雰囲気ガスに水素が用いられる点。エピタキシャル基板 EP 11 の場合、エピタキシャル基板 EP 11 のその他の層の成長時の雰囲気ガスに窒素が用いられる点が異なっており、これらは良好な接触抵抗を有する GaN 系半導体発光素子、及びその製造方法を構成する上で重要な要素である。その他にもエピタキシャル基板 EP 11 の場合、p 型 III 族窒化物半導体領域 63 の成長時に p 型 GaN 電子プロック層 65a が設けられていない点。エピタキシャル基板 EP 11 の場合、Si ドープ GaN 層 55c の成長温度が摂氏 840 度程度に設定される点。エピタキシャル基板 EP 11 の場合、低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65e 及び高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65f の成長温度が共に摂氏 870 度程度に設定される点。エピタキシャル基板 EP 11 の場合、図中符号 65d に示す位置に形成される層には、Mg ドープ InAlGaN クラッド層ではなく Mg ドープ AlGaN クラッド層が形成される点等が異なるが、これらは良好な接触抵抗を有する GaN 系半導体発光素子、及びその製造方法を構成する上では関係のない変更点である。また以上の点を除けば、エピタキシャル基板 EP 11 の構成及び製造方法は、エピタキシャル基板 EP 1 の構成及び製造方法と、同様である。

【0088】

10

20

30

40

50

また、エピタキシャル基板 E P 1 1 の場合、低濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 e の炭素不純物濃度は、 $1 \times 10^{-17} \text{ cm}^{-3}$ 以下である。炭素不純物濃度が比較的に低いので、接触抵抗、及び、素子の動作電圧、が向上される。

【 0 0 8 9 】

更に、エピタキシャル基板 E P 1 1 の場合、基板 5 1 の正面 5 1 a は、窒化ガリウム系半導体の c 軸に沿って延びる基準軸（基準軸 C x ）に直交する面（面 S c ）から 70 度以上 80 度未満の角度で傾斜している場合、及び、窒化ガリウム系半導体の c 軸に沿って延びる基準軸（基準軸 C x ）に直交する面（面 S c ）から 100 度以上 110 度未満の角度で傾斜している場合、が可能である。当該角度範囲の基板を用いると、発光層中の In 組成の揺らぎを低減させることができ、良好な外部量子効率を有する発光素子を作製することができる。10

【 0 0 9 0 】

エピタキシャル基板 E P 1 1 の製造方法の場合、低濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 e の成長速度は、 $1 \mu\text{m/hour}$ 以下であり、高濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 f の成長速度は、 $0.1 \mu\text{m/hour}$ 以下であり、高濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 f の成長速度は、低濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 e の成長速度よりも遅く、低濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 e 及び高濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 f は、水素を 20 % 以上含む雰囲気下で成長される。このように、低濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 e 及び高濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 f の成長時の雰囲気ガスに水素を用い、低濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 e 及び高濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 f の成長速度も比較的に遅いので、低濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 e 及び高濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 f の成長時の V 族原子数 / III 族原子数の比を比較的に高くできる。従って、低濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 e 及び高濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 f における炭素不純物濃度を比較的に低くでき、よって、電極との接触抵抗、及び、素子の動作電圧が良好となる。なお、低濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 e 及び高濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 f の炭素不純物を減らすには、低濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 e 及び高濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 f を窒素雰囲気で成長させる方法があるが、窒素雰囲気では高濃度のマグネシウム (Mg) をドープした結晶の成長が困難なため、低濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 e 及び高濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 f の結晶性が低下し、よって、電極との接触抵抗、及び、素子の動作電圧が共に高くなる。低濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 e 及び高濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 f の炭素不純物を減らすには、低濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 e 及び高濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 f の成長温度を上げる方法があるが、比較的に長波長の場合には活性層の成長温度は低くその後の p 層の成長中の熱耐性が低下するので、活性層 59 b がダメージを受ける場合がある。よって、水素雰囲気において成長速度を下げ、V 族原子数 / III 族原子数の比を高めて成長することによって、半極性面及び無極性面の何れかを正面とする基板上で、比較的長波長の光を発する発光層を保護する目的で p 型層を低温で成長しても、良好な接触抵抗を有する Ga N 系半導体発光素子を作製することができる。20

【 0 0 9 1 】

エピタキシャル基板 E P 1 1 の製造方法の場合、活性層 59 b の成長温度は、摂氏 65 度以上摂氏 800 度未満の範囲にある。更に、エピタキシャル基板 E P 1 1 の製造方法の場合、低濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 e 及び高濃度 Mg ドープ Ga N コンタクト層 65 f のそれぞれの成長温度と、活性層 59 b の成長温度との差は、摂氏 100 度以上摂氏 250 度以下の範囲にある。よって、活性層 59 b が p 型層成長中に受けるダメージを抑制できる。30

【 0 0 9 2 】

（実施例 6 ）

次に、エピタキシャル基板 E P 1 1 の実施例 6 を説明する。実施例 6 は、図 12 の (a)

10

20

30

40

50

)部に示す素子構造を有するレーザダイオードである。図12の(b)部には、図12の(a)部に示す素子構造のエピタキシャル積層の成長温度が示されている。

【0093】

図4と図12とを参照すると、実施例6は、実施例1とは、以下の点で相違するが、その他の点では、実施例1と同様であることがわかる。実施例6は、下記の七つの相違点において、実施例1と相違していた。すなわち、SiドープGaN層55aに対応するn-GaN層と、低濃度MgドープGaNコンタクト層65eに対応するp-GaN層と、高濃度MgドープGaNコンタクト層65fに対応するp⁺-GaN層との成長時の雰囲気ガスには水素を用いた点、その他の層の成長時の雰囲気ガスには窒素を用いた点、低濃度MgドープGaNコンタクト層65eに対応するp-GaN層の成長速度を0.43μm/hourに設定し、高濃度MgドープGaNコンタクト層65fに対応するp⁺-GaN層の成長速度を0.07μm/hourに設定した点が異なっており、これらは良好な接触抵抗を有するGaN系半導体発光素子、及びその製造方法を構成する上で重要な要素である。その他にも、低濃度MgドープGaNコンタクト層65eに対応するp-GaN層の成長温度と高濃度MgドープGaNコンタクト層65fに対応するp⁺-GaN層の成長温度とを共に摂氏870度程度に設定した点、InGaN光ガイド層59aに対応するn-InGaN層は、0.145μm程度の厚みと0.05程度のインジウム(In)の組成比とを有していた点、InGaN光ガイド層59cに対応するud-InGaN層上には、p型GaN電子プロック層65aに対応するp-GaN層を形成せずに、MgドープInGaN光ガイド層65bに対応し0.040μm程度の厚みを有するp-InGaN層を形成した点、MgドープGaN光ガイド層65cに対応するp-GaN層と低濃度MgドープGaNコンタクト層65eに対応するp-GaN層との間には、MgドープInAlGaNクラッド層65dに対応するInAlGaN層ではなく、0.40μm程度の厚みと0.05のアルミニウム(Al)の組成比とを有するp-AlGaN層を形成した点、等が異なるが、これらは良好な接触抵抗を有するGaN系半導体発光素子、及びその製造方法を構成する上では関係のない変更点である。

【0094】

実施例6の構成では、525nm程度の波長、及び、3kA/cm²程度のしきい値電流で発振し、50mW出力時の動作電圧は5.5ボルト程度であった。実施例6の構成に対し、TLM法(Transmission Line Method)を用いて、高濃度MgドープGaNコンタクト層65fに対応するp⁺-GaN層と金属電極(パラジウム(Pd)の電極)との接触抵抗を測定した。このTLM法による測定結果によれば、p⁺-GaN層と金属電極(パラジウム(Pd)の電極)との接触抵抗が、p⁺-GaN層の全面において、5×10⁻⁴cm²以下の範囲にあった。

【0095】

実施例6では、低濃度MgドープGaNコンタクト層65eに対応するp-GaN層の成長温度と高濃度MgドープGaNコンタクト層65fに対応するp⁺-GaN層の成長温度とを、共に、比較的低温(少なくとも実施例1,2の場合に比較して低温)の摂氏870度程度に設定した。このように、コンタクト層(p-GaN層及びp⁺-GaN層)の成長温度を下げることによって、コンタクト層の成長中における活性層の熱劣化を抑制できる。

【0096】

図13～図15に、エピタキシャル積層の構造を、表面側から分析したSIMS結果を示す。なお、この分析に用いたエピタキシャル積層構造は、コンタクト層の原子濃度を正確に測るために、アンドープGaNキャップ層を高濃度MgドープGaNコンタクト層65fの上に積層した構造である。各図の横軸は、このエピタキシャル積層の表面(p側の表面)からの深さを示す。各図には、エピタキシャル積層の表面(p側の表面)から200nm程度までの分析結果が示されている。図13～図15に示すSIMS結果には、マーカーとしてマグネシウム(Mg)、アルミニウム(Al)、インジウム(In)に対する分析結果も含まれている。なお、各図の左縦軸は、各原子の濃度を示し、各図の左縦軸

10

20

30

40

50

は、炭素 (C)、マグネシウム (Mg) の濃度を示す。各図の曲線 G C 1, G C 2, G C 3 は、炭素 (C) に対する測定結果を示す。各図の曲線 G M g 1, G M g 2, G M g 3 は、マグネシウム (Mg) に対する測定結果を示す。図 13 は、実施例 6 と同様に、p - GaN 層 (低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 e) と p⁺ - GaN 層 (高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 f に対応)との成長時の雰囲気ガスに水素を用い、p - GaN 層 (低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 e) の成長速度を 0.43 μm / hour の程度とし、p⁺ - GaN 層 (高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 f に対応) の成長速度を 0.07 μm / hour の程度として形成したエピタキシャル積層に対する測定結果を示す。この場合のエピタキシャル積層の p 側の表面と Pd 電極との接触抵抗は、 $5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ の程度であった。曲線 G C 1 に示す炭素 (C) の濃度は、p - GaN 層 (低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 e) においては、 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ の程度であり、p⁺ - GaN 層 (高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 f に対応) においては、 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ の程度であった。曲線 G O 1 に示す酸素 (O) の濃度は、p - GaN 層 (低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 e) においては、 $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の程度であり、p⁺ - GaN 層 (高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 f に対応) においては、 $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の程度であった。曲線 G M g 1 に示すマグネシウム (Mg) の濃度は、p - GaN 層 (低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 e) においては、 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の程度であり、p⁺ - GaN 層 (高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 f に対応) においては、 $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の程度であった。

【0097】

図 14 は、p - GaN 層 (低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 e) と p⁺ - GaN 層 (高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 f に対応) との成長時の雰囲気ガスに水素を用い、p - GaN 層 (低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 e) の成長速度を、曲線 G M g 1 に示す場合に比較して速い成長速度 ($3.5 \mu\text{m} / \text{hour}$ 程度であるが、p⁺ - GaN 層の場合には $0.21 \mu\text{m} / \text{hour}$ 程度) で形成したエピタキシャル積層に対する測定結果を示す。この場合のエピタキシャル積層の p 側の表面と Pd 電極との接触抵抗は、 $2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ の程度であった。曲線 G C 2 に示す炭素 (C) の濃度は、p - GaN 層 (低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 e) においては、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の程度であり、p⁺ - GaN 層 (高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 f に対応) においては、 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の程度であった。曲線 G O 2 に示す酸素 (O) の濃度は、p - GaN 層 (低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 e) においては、 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の程度であり、p⁺ - GaN 層 (高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 f に対応) においては、 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の程度であった。曲線 G M g 2 に示すマグネシウム (Mg) の濃度は、p - GaN 層 (低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 e) においては、 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の程度であり、p⁺ - GaN 層 (高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 f に対応) においては、 $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の程度であった。

【0098】

図 15 は、p - GaN 層 (低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 e) と p⁺ - GaN 層 (高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 f に対応) との成長時の雰囲気ガスに窒素を用い、p - GaN 層 (低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 e) の成長速度を、曲線 G M g 1 に示す場合と同様の成長速度で形成したエピタキシャル積層に対する測定結果を示す。この場合のエピタキシャル積層の p 側の表面と Pd 電極との接触抵抗は、 $2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ の程度であった。曲線 G C 3 に示す炭素 (C) の濃度は、p - GaN 層 (低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 e) においては、 $4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ の程度であり、p⁺ - GaN 層 (高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 f に対応) においては、 $4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ の程度であった。曲線 G O 3 に示す酸素 (O) の濃度は、p - GaN 層 (低濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 e) においては、 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の程度であり、p⁺ - GaN 層 (高濃度 Mg ドープ GaN コンタクト層 65 f に対応) においては、 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の程度であった。曲線 G M g 3 に示すマグネシウム

10

20

30

40

50

(Mg)の濃度は、p-GaN層(低濃度MgドープGaNコンタクト層65e)においては、 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ の程度であり、p⁺-GaN層(高濃度MgドープGaNコンタクト層65fに対応)においては、 $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の程度であった。

【0099】

図12に示す結果からは、曲線GC1に示すように、コンタクト層(p-GaN層及びp⁺-GaN層)の成長時の雰囲気ガスに水素が用いられ成長速度が比較的に遅い場合には、炭素(C)の濃度が $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ の程度であって比較的に低いことがわかる。これに対し、曲線GC2に示すように、コンタクト層(p-GaN層及びp⁺-GaN層)の成長時の雰囲気ガスに水素が用いられていても成長速度が曲線GC1の状況に比較して速い場合には、炭素(C)の濃度が $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の程度であって比較的に高いことがわかる。なお、曲線GC3に示すように、コンタクト層(p-GaN層及びp⁺-GaN層)の成長時の雰囲気ガスに窒素が用いられた場合には、炭素(C)の濃度が $4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ の程度であって比較的に低いが、結晶性が比較的に低いことがわかる。更に、曲線GC1, GO1, GMg1に示す測定結果が得られた状況、すなわち、コンタクト層(p-GaN層及びp⁺-GaN層)の成長時の雰囲気ガスに水素が用いられ成長速度が比較的に遅い場合には、エピタキシャル積層のp側の表面とPd電極との接触抵抗が $5 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ の程度であって比較的に低かった。

10

【符号の説明】

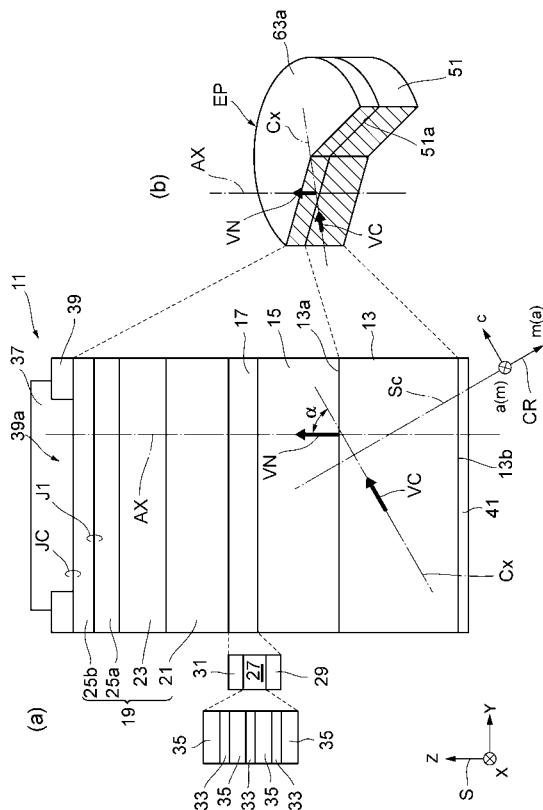
【0100】

10 ... 成長炉、11 ... III族窒化物半導体素子、13, 51 ... 基板、13a, 51a, 53a, 57a, 59b-1, 63a ... 主面、13b ... 裏面、15, 53 ... n型III族窒化物半導体領域、17, 57 ... 発光層、19, 63 ... p型III族窒化物半導体領域、21 ... p型窒化ガリウム系半導体層、23 ... p型クラッド層、25a, 25b ... コンタクト層、27, 59b ... 活性層、29 ... n側光ガイド層、31 ... p側光ガイド層、33 ... 井戸層、35 ... 障壁層、37, 41 ... 電極、39 ... 絶縁膜、39a ... 開口、55a ... SiドープGaN層、55b ... SiドープInAlGaN層、55c ... SiドープGaN層、59a ... InGaN光ガイド層、59c ... InGaN光ガイド層、61a ... アンドープInGaN障壁層、61b ... アンドープInGaN井戸層、65a ... p型GaN電子プロック層、65b ... MgドープInGaN光ガイド層、65c ... MgドープGaN光ガイド層、65d ... MgドープInAlGaNクラッド層、65e ... 低濃度MgドープGaNコンタクト層、65f ... 高濃度MgドープGaNコンタクト層、Ax ... 法線軸、CR ... 結晶座標系、Cx ... 基準軸、EP, EP1, EP11 ... エピタキシャル基板、J1 ... 界面、JC ... 接触、S ... 座標系、Sc ... 面、VC ... c軸ベクトル、VN ... 法線ベクトル。

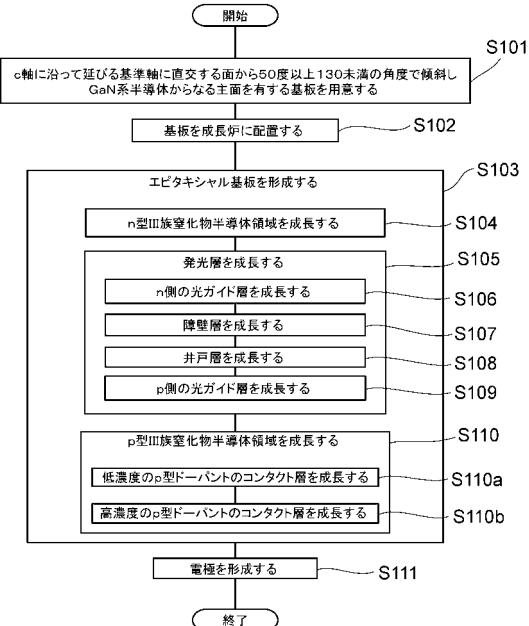
20

30

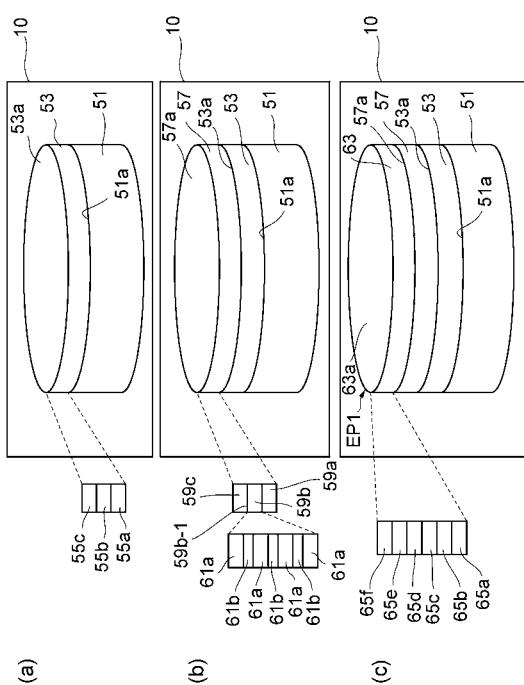
【 図 1 】



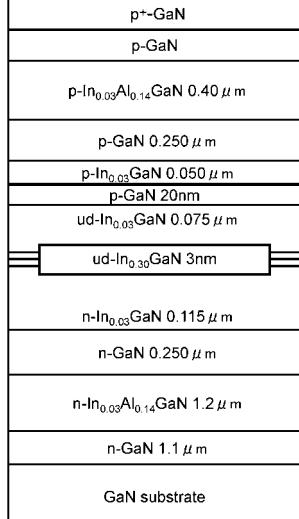
【 図 2 】



(3)

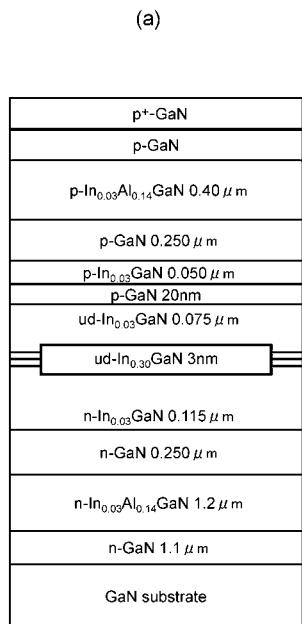


(4)

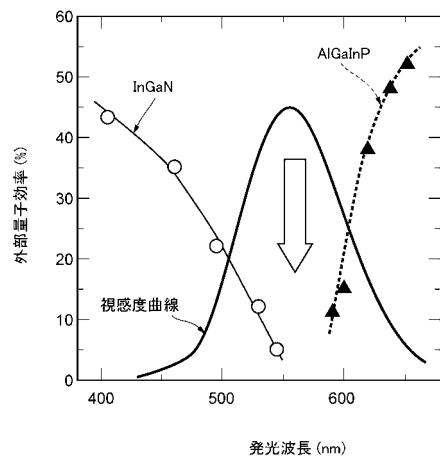


Layer	Tc
p+-GaN	900°C
p-GaN	900°C
p-InAlGaN	870°C
p-GaN	900°C
p-InGaN	840°C
p-GaN	900°C
ud-InGaN	840°C
ud-InGaN	720°C
n-InGaN	840°C
n-GaN	1050°C
n-InAlGaN	870°C
n-GaN	950°C
熱処理	1050°C

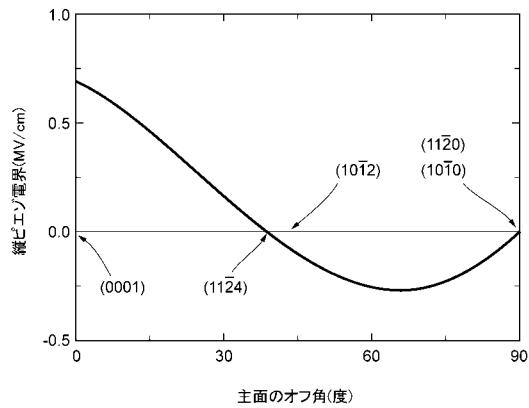
【図5】



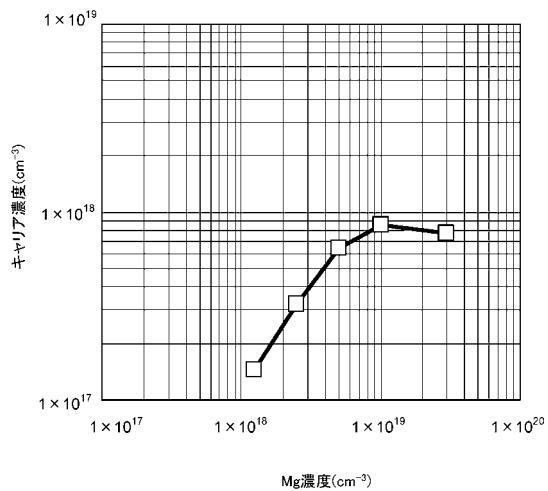
【図6】



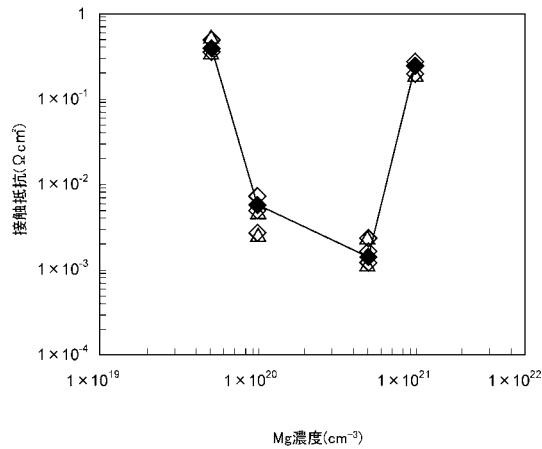
【図7】



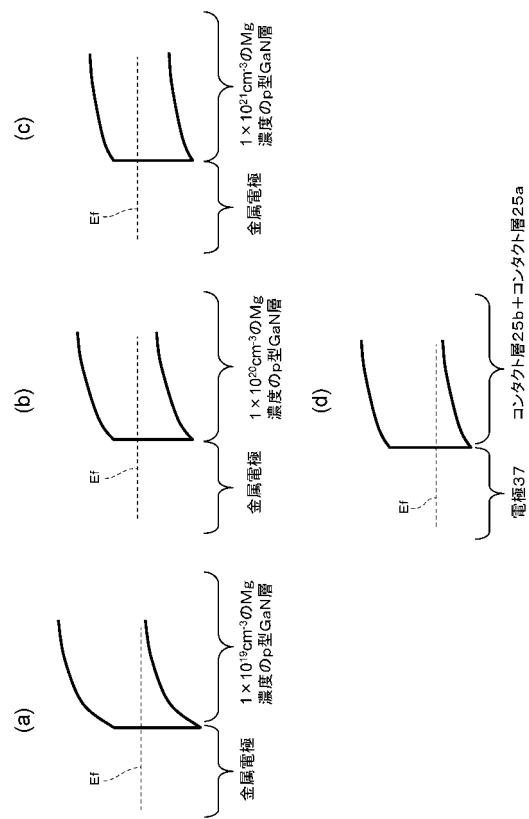
【図8】



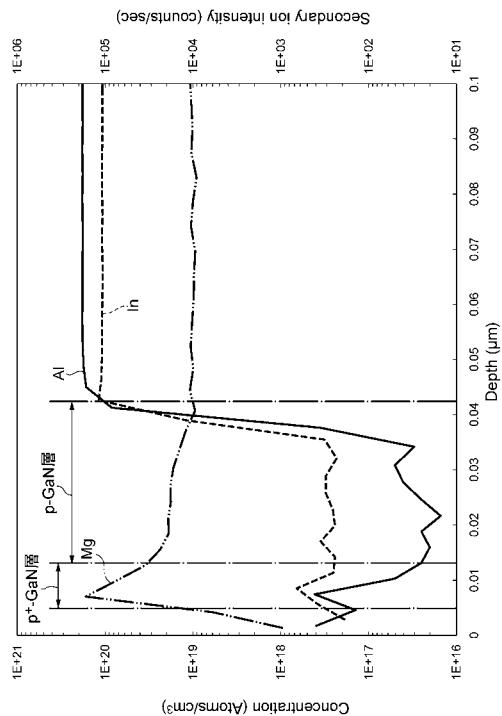
【図 9】



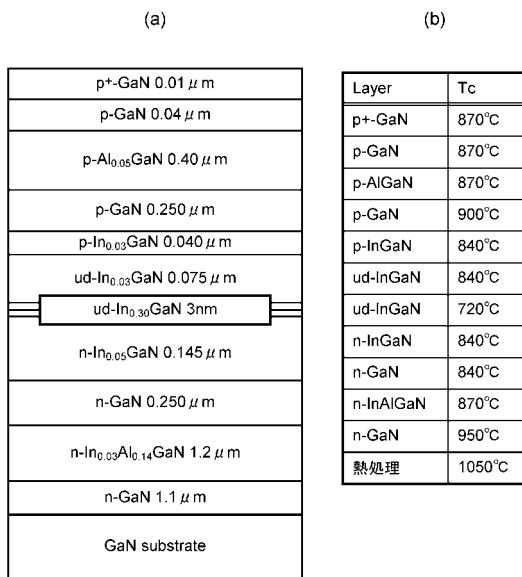
【図 10】



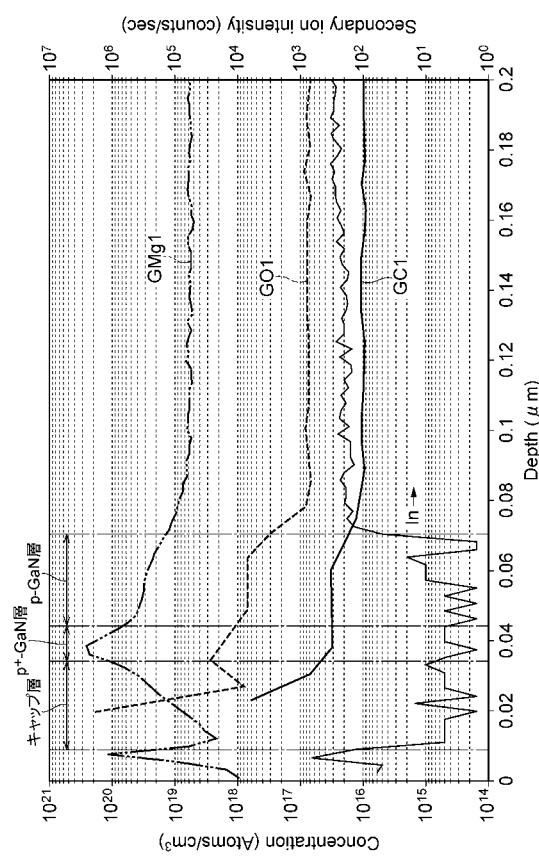
【図 11】



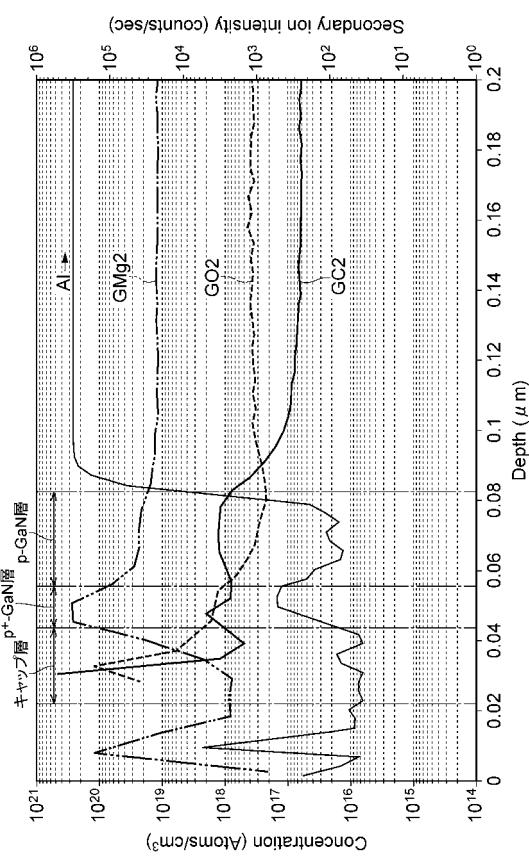
【図 12】



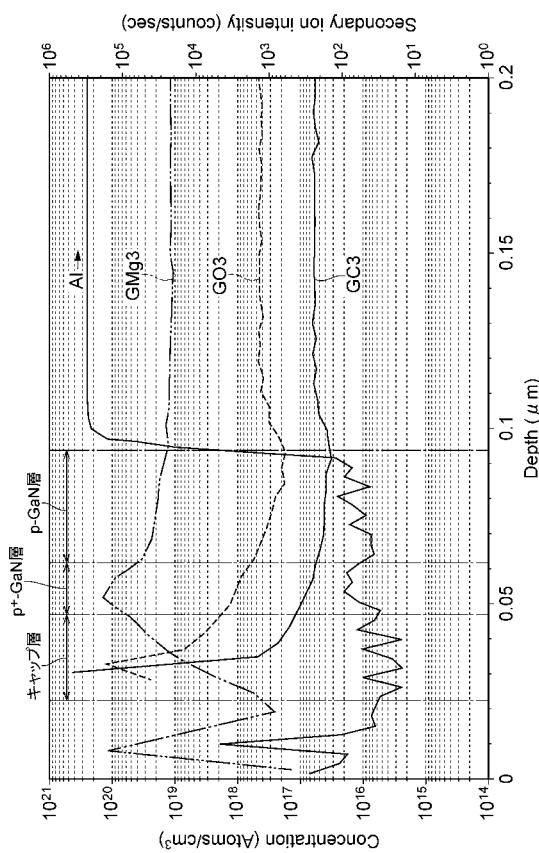
【図 1 3】



【図 1 4】



【図 1 5】



フロントページの続き

(72)発明者 善積 祐介

兵庫県伊丹市昆陽北一丁目1番1号 住友電気工業株式会社伊丹製作所内

(72)発明者 京野 孝史

大阪府大阪市此花区島屋一丁目1番3号 住友電気工業株式会社大阪製作所内

(72)発明者 住友 隆道

兵庫県伊丹市昆陽北一丁目1番1号 住友電気工業株式会社伊丹製作所内

(72)発明者 上野 昌紀

兵庫県伊丹市昆陽北一丁目1番1号 住友電気工業株式会社伊丹製作所内

(72)発明者 築嶋 克典

東京都港区港南1丁目7番1号 ソニー株式会社内

(72)発明者 田才 邦彦

東京都港区港南1丁目7番1号 ソニー株式会社内

(72)発明者 中島 博

東京都港区港南1丁目7番1号 ソニー株式会社内

F ターム(参考) 5F173 AA16 AF78 AH22 AJ04 AK04 AP05 AP24 AP32 AP84 AQ12

AQ13 AQ20 AR64 AR81