



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103650263 A

(43) 申请公布日 2014. 03. 19

(21) 申请号 201280032130. 2

(22) 申请日 2012. 06. 29

(30) 优先权数据

2011-144664 2011. 06. 29 JP

2012-111478 2012. 05. 15 JP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2013. 12. 27

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/JP2012/066769 2012. 06. 29

(87) PCT国际申请的公布数据

W02013/002389 JA 2013. 01. 03

(71) 申请人 住友电气工业株式会社

地址 日本大阪府大阪市

申请人 索尼株式会社

(72) 发明人 盐谷阳平 善积祐介 京野孝史

住友隆道 上野昌纪 梁岛克典
田才邦彦 中岛博

(74) 专利代理机构 中原信达知识产权代理有限
责任公司 11219

代理人 权太白 谢丽娜

(51) Int. Cl.

H01S 5/042(2006. 01)

H01S 5/343(2006. 01)

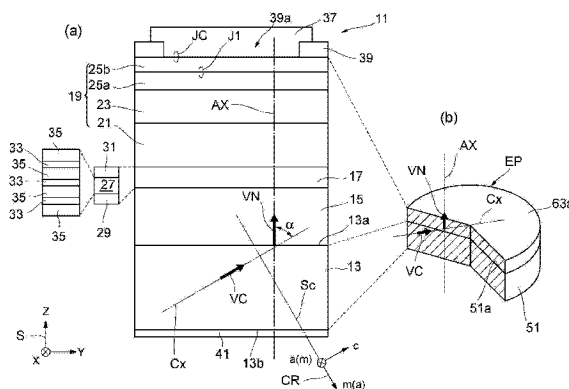
权利要求书3页 说明书19页 附图15页

(54) 发明名称

III 族氮化物半导体元件及 III 族氮化物半
导体元件的制造方法

(57) 摘要

本发明提供一种包含无损结晶性而具有比较小的接触电阻及比较高的载流子浓度的 p 型接触层的 III 族氮化物半导体元件及其制造方法。该 III 族氮化物半导体元件包括：接触层 (25a)，设置于发光层 (17) 上；接触层 (25b)，设置于接触层 (25a) 上，与接触层 (25a) 直接接触；及电极 (37)，设置于接触层 (25b) 上，与接触层 (25b) 直接接触。接触层 (25a) 及接触层 (25b) 由 p 型的相同氮化镓系半导体构成，接触层 (25a) 的 p 型掺杂剂的浓度低于接触层 (25b) 的 p 型掺杂剂的浓度，接触层 (25a) 与接触层 (25b) 的界面 J1 自与沿 c 轴延伸的基准轴 (Cx) 正交的面 (Sc) 以 50 度以上且小于 130 度的角度倾斜，接触层 (25b) 的膜厚为 20nm 以下。



1. 一种 III 族氮化物半导体元件,其特征在于,
包括:氮化镓系半导体的发光层;
第 1 接触层,其设置于上述发光层上;
第 2 接触层,其设置于上述第 1 接触层上,与上述第 1 接触层直接接触;以及
金属电极,其设置于上述第 2 接触层上,与上述第 2 接触层直接接触,
上述第 1 接触层及上述第 2 接触层由 p 型的同一氮化镓系半导体构成,
上述第 1 接触层的 p 型掺杂剂的浓度低于上述第 2 接触层的 p 型掺杂剂的浓度,
上述第 1 接触层与上述第 2 接触层的界面自与沿 c 轴延伸的基准轴正交的面以 50 度以上且小于 130 度的角度倾斜,
上述发光层的发光波长为 480nm 以上 600nm 以下,
上述第 2 接触层的膜厚为 1nm 以上 50nm 以下。
2. 如权利要求 1 所述的 III 族氮化物半导体元件,其特征在于,上述第 2 接触层的膜厚为 1nm 以上 20nm 以下。
3. 如权利要求 1 或 2 所述的 III 族氮化物半导体元件,其特征在于,
还包括 p 型氮化镓系半导体的包覆层,
上述包覆层设置于上述发光层与上述第 1 接触层之间,
上述包覆层的带隙大于上述第 1 接触层的带隙,
上述第 1 接触层与上述包覆层直接接触。
4. 如权利要求 3 所述的 III 族氮化物半导体元件,其特征在于,
还包括由氮化镓系半导体构成的基板,
在上述基板的主面上依次设置有上述发光层、上述包覆层、上述第 1 及第 2 接触层以及上述金属电极,
上述主面自与上述基准轴正交的面以 50 度以上且小于 130 度的角度倾斜。
5. 如权利要求 1 至 4 中任一项所述的 III 族氮化物半导体元件,其特征在于,上述第 1 接触层的 p 型掺杂剂的浓度为 $5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 以下。
6. 如权利要求 1 至 5 中任一项所述的 III 族氮化物半导体元件,其特征在于,上述第 2 接触层的 p 型掺杂剂的浓度为 $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$ 以下。
7. 如权利要求 1 至 6 中任一项所述的 III 族氮化物半导体元件,其特征在于,上述第 1 接触层的 p 型掺杂剂的浓度为 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 以上 $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 以下。
8. 如权利要求 5 至 7 中任一项所述的 III 族氮化物半导体元件,其特征在于,上述 p 型掺杂剂为镁。
9. 如权利要求 1 至 8 中任一项所述的 III 族氮化物半导体元件,其特征在于,上述第 1 及第 2 接触层由氮化镓构成。
10. 如权利要求 1 至 8 中任一项所述的 III 族氮化物半导体元件,其特征在于,上述第 1 及第 2 接触层为 $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$, 其中, $0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, 0 \leq 1-x-y$ 。
11. 如权利要求 1 至 10 中任一项所述的 III 族氮化物半导体元件,其特征在于,上述发光层为 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, 其中, $0.15 \leq x < 0.50$ 。
12. 如权利要求 1 至 11 中任一项所述的 III 族氮化物半导体元件,其特征在于,上述金属电极由 Pd、Au、或者 Ni 及 Au 构成。

13. 一种 III 族氮化物半导体元件的制造方法,其特征在于,
包括如下步骤:
形成由氮化镓系半导体构成的发光层;
在上述发光层上形成 p 型氮化镓系半导体的第 1 接触层;
在改换了在形成上述第 1 接触层时所供给的 p 型掺杂剂的供给量之后,在上述第 1 接触层上形成 p 型氮化镓系半导体的第 2 接触层;以及
在上述第 2 接触层上形成金属电极,
上述第 1 接触层及上述第 2 接触层由 p 型的同一氮化镓系半导体构成,
关于在形成上述第 1 接触层的步骤及形成上述第 2 接触层的步骤中供给至生长炉的 p 型掺杂剂的供给量,在形成上述第 2 接触层的步骤中所供给的量多于在形成上述第 1 接触层的步骤中所供给的量,
上述第 1 及第 2 接触层的生长温度高于上述发光层中所包含的活性层的生长温度,
上述第 1 及第 2 接触层的生长温度与上述活性层的生长温度的差为摄氏 100 度以上摄氏 350 度以下,
上述第 2 接触层与上述金属电极直接接触,
上述第 1 接触层与上述第 2 接触层直接接触,
上述第 1 接触层与上述第 2 接触层的界面自与沿 c 轴延伸的基准轴正交的面以 50 度以上且小于 130 度的角度倾斜,
上述发光层的发光波长为 480nm 以上 600nm 以下,
上述第 2 接触层的膜厚为 1nm 以上 50nm 以下。
14. 如权利要求 13 所述的 III 族氮化物半导体元件的制造方法,其特征在于,上述第 2 接触层的膜厚为 1nm 以上 20nm 以下。
15. 如权利要求 13 或 14 所述的 III 族氮化物半导体元件的制造方法,其特征在于,
还包括形成 p 型氮化镓系半导体的包覆层的步骤;
上述包覆层在形成上述发光层之后形成,
上述第 1 及第 2 接触层在形成上述包覆层之后形成,
上述包覆层设置于上述发光层与上述第 1 接触层之间,
上述包覆层的带隙大于上述第 1 接触层的带隙,
上述第 1 接触层与上述包覆层直接接触。
16. 如权利要求 15 所述的 III 族氮化物半导体元件的制造方法,其特征在于,
还包括准备由氮化镓系半导体构成的基板的步骤,
上述包覆层形成于上述基板上,
在上述基板的主面上依次设置上述发光层、上述包覆层、上述第 1 及第 2 接触层以及上述金属电极,
上述主面自与上述基准轴正交的面以 50 度以上且小于 130 度的角度倾斜。
17. 如权利要求 13 至 16 中任一项所述的 III 族氮化物半导体元件的制造方法,其特征在于,上述第 1 接触层的 p 型掺杂剂的浓度为 $5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 以下。
18. 如权利要求 13 至 17 中任一项所述的 III 族氮化物半导体元件的制造方法,其特征在于,上述第 2 接触层的 p 型掺杂剂的浓度为 $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$ 以下。

19. 如权利要求 13 至 18 中任一项所述的 III 族氮化物半导体元件的制造方法,其特征
在于,上述第 1 接触层的 p 型掺杂剂的浓度为 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 以上 $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 以下。

20. 如权利要求 17 至 19 中任一项所述的 III 族氮化物半导体元件的制造方法,其特征
在于,上述 p 型掺杂剂为镁。

21. 如权利要求 13 至 20 中任一项所述的 III 族氮化物半导体元件的制造方法,其特征
在于,上述第 1 及第 2 接触层由氮化镓构成。

22. 如权利要求 13 至 20 中任一项所述的 III 族氮化物半导体元件的制造方法,其特征
在于,上述第 1 及第 2 接触层为 $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$, 其中, $0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, 0 \leq 1-x-y$ 。

23. 如权利要求 13 至 22 中任一项所述的 III 族氮化物半导体元件的制造方法,其特征
在于,上述发光层为 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, 其中, $0.15 \leq x < 0.50$ 。

24. 如权利要求 13 至 23 中任一项所述的 III 族氮化物半导体元件的制造方法,其特征
在于,上述金属电极由 Pd、Au、或者 Ni 及 Au 构成。

25. 如权利要求 1 至 12 中任一项的 III 族氮化物半导体元件,其特征
在于,上述第 1 接触层中的碳杂质浓度为 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 以下。

26. 如权利要求 4 所述的 III 族氮化物半导体元件,其特征
在于,上述基板的上述主面自与上述基准轴正交的面以 70 度以上且小于 80 度的角度倾斜。

27. 如权利要求 4 所述的 III 族氮化物半导体元件,其特征
在于,上述基板的上述主面自与上述基准轴正交的面以 100 度以上且小于 110 度的角度倾斜。

28. 如权利要求 13 至 24 中任一项所述的 III 族氮化物半导体元件的制造方法,其特征
在于,

上述第 1 接触层的生长速度为 $1 \mu\text{m}/\text{hour}$ 以下,

上述第 2 接触层的生长速度为 $0.1 \mu\text{m}/\text{hour}$ 以下,

上述第 2 接触层的生长速度慢于上述第 1 接触层的生长速度。

29. 如权利要求 13 至 24、28 中任一项所述的 III 族氮化物半导体元件的制造方法,其
特征在于,上述第 1 及第 2 接触层在含氢气 20% 以上的气体环境下生长。

30. 如权利要求 13 至 24、28、29 中任一项所述的 III 族氮化物半导体元件的制造方法,
其特征
在于,上述第 1 接触层中的碳杂质浓度为 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 以下。

31. 如权利要求 13 至 24、28 至 30 中任一项所述的 III 族氮化物半导体元件的制造方
法,其特征
在于,上述第 1 及第 2 接触层的生长温度与上述活性层的生长温度的差为摄氏
100 度以上摄氏 250 度以下。

32. 如权利要求 16 所述的 III 族氮化物半导体元件的制造方法,其特征
在于,上述基板的上述主面自与上述基准轴正交的面以 70 度以上且小于 80 度的角度倾斜。

33. 如权利要求 16 所述的 III 族氮化物半导体元件的制造方法,其特征
在于,上述基板的上述主面自与上述基准轴正交的面以 100 度以上且小于 110 度的角度倾斜。

34. 如权利要求 13 至 24、28 至 33 中任一项所述的 III 族氮化物半导体元件的制造方
法,其特征
在于,上述活性层的生长温度为摄氏 650 度以上且小于摄氏 800 度。

III 族氮化物半导体元件及 III 族氮化物半导体元件的制造方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种 III 族氮化物半导体元件及 III 族氮化物半导体元件的制造方法。

背景技术

[0002] 在专利文献 1 中公开有一种以降低驱动电压为目的的关于发光元件的技术。

[0003] 此外,在非专利文献 1 及 2 中记载有关于压电电场的计算。

[0004] 在先技术文献

[0005] 专利文献

[0006] 专利文献 1 :日本特开平 08-97471 号公报

[0007] 非专利文献

[0008] 非专利文献 1 :Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 39 (2000) pp. 413

[0009] 非专利文献 2 :Journal of Applied Physics, Vol. 91 No. 12 (2002) pp. 9904

发明内容

[0010] 发明要解决的问题

[0011] 在专利文献 1 中,在蓝宝石基板之上形成有 500 埃的 AlN 的缓冲层、膜厚约 2.0 微米且电子浓度 $2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 的掺 Si 的 GaN 的高载流子浓度 n^+ 层、膜厚约 2.0 μm 且电子浓度 $2 \times 10^{18}/\text{cm}^3$ 的掺 Si 的 $(\text{Al}_{x2}\text{Ga}_{1-x2})_{y2}\text{In}_{1-y2}\text{N}$ 的高载流子浓度 n^+ 层、膜厚约 0.5 μm 的掺 Mg、Zn 及 Si 的 $(\text{Al}_{x1}\text{Ga}_{1-x1})_{y1}\text{In}_{1-y1}\text{N}$ 的 p 传导型发光层、膜厚约 1.0 μm 且空穴浓度 $2 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 的掺 Mg 的 $(\text{Al}_{x2}\text{Ga}_{1-x2})_{y2}\text{In}_{1-y2}\text{N}$ 的 p 层、膜厚约 0.2 μm 且空穴浓度 $5 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 的由 Mg 浓度 $1 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 的掺 Mg 的 GaN 构成的第 2 接触层、及膜厚约 500 埃且空穴浓度 $2 \times 10^{17}/\text{cm}^3$ 的由 Mg 浓度 $2 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 的掺 Mg 的 GaN 构成的第 1 接触层。进而,形成有与 p 层和高载流子浓度 n^+ 层分别连接的由镍形成的两个电极。

[0012] 专利文献 1 所记载的发光元件尤其包含:设置于蓝宝石基板的 c 面之上的最表面的高 Mg 浓度的 p 型的第 1 接触层、及设置于该第 1 接触层之下的低 Mg 浓度的 p 型的第 2 接触层。第 1 接触层的 Mg 浓度为 $1 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 以上且 $1 \times 10^{21}\text{cm}^{-3}$ 以下,第 2 接触层的 Mg 浓度为 $1 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 以上且 $5 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 以下。关于第 1 及第 2 接触层的膜厚,公开有 50nm 与 200nm。

[0013] 掺 Mg 的 p 型氮化镓的接触层的接触电阻根据 Mg 浓度而增减。接触电阻的值在 Mg 浓度为 $1 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 左右的情况下比较小。然而,在 Mg 浓度如此高的情况下,结晶性降低而导致 p 型载流子浓度的降低。因此,希望开发具有接触电阻、结晶性及载流子浓度均良好的 p 型接触层的 III 族氮化物半导体元件。因此,本发明的目的在于提供一种包含无损结晶性而具有比较小的接触电阻与比较高的载流子浓度的 p 型接触层的 III 族氮化物半导体元件及 III 族氮化物半导体元件的制造方法。

[0014] 用于解决问题的技术手段

[0015] 本发明的 III 族氮化物半导体元件的特征在于,包括:氮化镓系半导体的发光层;第 1 接触层,其设置于上述发光层上;第 2 接触层,其设置于上述第 1 接触层上,与上述第 1 接触层直接接触;以及金属电极,其设置于上述第 2 接触层上,与上述第 2 接触层直接接触,上述第 1 接触层及上述第 2 接触层由 p 型的同一氮化镓系半导体构成,上述第 1 接触层的 p 型掺杂剂的浓度低于上述第 2 接触层的 p 型掺杂剂的浓度,上述第 1 接触层与上述第 2 接触层的界面自与沿 c 轴延伸的基准轴正交的面以 50 度以上且小于 130 度的角度倾斜,上述发光层的发光波长为 480nm 以上 600nm 以下,上述第 2 接触层的膜厚为 1nm 以上 50nm 以下。而且,上述第 2 接触层的膜厚可为 1nm 以上 20nm 以下。

[0016] 第 2 接触层中,由于 p 型掺杂剂比较高,因此与金属电极的接触电阻降低,由于膜厚比较小,因此结晶性相对良好。第 1 接触层中,由于 p 型掺杂剂浓度相对较低,因此结晶性相对良好,载流子浓度也比较高。因此,可无损结晶性而实现第 2 接触层与金属电极的接触电阻的优化及载流子浓度的提高。进而,和第 1 接触层与第 2 接触层的界面的倾斜小于 50 度或为 130 度以上的情形相比,压电电场为反向且比较小或成为零。因此,与倾斜小于 50 度或为 130 度以上的情形相比,发光层的外部量子效率等良好。

[0017] 本发明的 III 族氮化物半导体元件优选为,还包括 p 型氮化镓系半导体的包覆层,上述包覆层设置于上述发光层与上述第 1 接触层之间,上述包覆层的带隙大于上述第 1 接触层的带隙,上述第 1 接触层与上述包覆层直接接触。

[0018] 本发明的 III 族氮化物半导体元件优选为,还包括由氮化镓系半导体构成的基板,在上述基板的主面上依次设置有上述发光层、上述包覆层、上述第 1 及第 2 接触层以及上述金属电极,上述主面自与上述基准轴正交的面以 50 度以上且小于 130 度的角度倾斜。因此,可使用由氮化镓系半导体构成的基板,因此通过使氮化镓系半导体层在自与基准轴正交的面以 50 度以上且小于 130 度的角度倾斜的主面之上生长,第 1 接触层与第 2 接触层的界面也可实现与主面相同的倾斜。

[0019] 本发明的 III 族氮化物半导体元件中,上述第 1 接触层的 p 型掺杂剂的浓度优选为 $5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 以下,上述第 2 接触层的 p 型掺杂剂的浓度优选为 $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 以上且 $1 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$ 以下。由于与金属电极直接接触的第 2 接触层的 p 型掺杂剂的浓度比较高,因此与金属电极的接触电阻降低。

[0020] 本发明的 III 族氮化物半导体元件中,上述第 1 接触层的 p 型掺杂剂的浓度优选为 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 以上且 $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 以下。由于未与金属电极直接接触的第 1 接触层的 p 型掺杂剂的浓度相对较低,从而结晶性相对良好,因此载流子浓度也比较高。

[0021] 本发明的 III 族氮化物半导体元件中,上述 p 型掺杂剂优选为镁。因此,可良好地进行 p 型掺杂剂的供给。Mg 在氮化物半导体中形成相对较浅的受体能级,因此空穴浓度相对于掺杂剂浓度的活化率较高,从而能够以比较小的掺杂剂浓度获得比较高的空穴浓度。

[0022] 本发明的 III 族氮化物半导体元件中,上述第 1 及第 2 接触层优选由氮化镓构成。由于 GaN 是作为二元化合物的氮化镓系半导体,因此在第 1 及第 2 接触层由 GaN 构成时,可提供良好的结晶质量。

[0023] 本发明的 III 族氮化物半导体元件中,上述第 1 及第 2 接触层优选为 $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ ($0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, 0 \leq 1-x-y$)。因此,第 1 及第 2 接触层的材料可使用

氮化镓以外的其它氮化镓系半导体。由此,与基板的晶格失配度改变,接触层中内含的应变变量发生变化,因此可提高第1接触层的载流子浓度,或降低第2接触层与金属电极的接触电阻。

[0024] 本发明的III族氮化物半导体元件中,上述发光层优选为 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0.15 \leq x < 0.50$)。因此,可实现480nm以上600nm以下的发光波长的发光。在该In组成区域内,发光层中内含的应变较大,在将基板主面的倾斜角取上述范围时可抑制的压电电场较大。因此,若使用本发明,则可制作该In组成区域内也具有良好的外部量子效率的发光元件。

[0025] 本发明的III族氮化物半导体元件中,上述金属电极优选由Pd、Au、或者Ni及Au构成。通过此种材料的金属电极,可实现与第2接触层良好的接触。通过使用这些金属,可实现良好的欧姆接合。

[0026] 本发明的III族氮化物半导体元件的制造方法的特征在于包括如下步骤:形成由氮化镓系半导体构成的发光层;在上述发光层上形成p型氮化镓系半导体的第1接触层;在改换了在形成上述第1接触层时所供给的p型掺杂剂的供给量之后,在上述第1接触层上形成p型氮化镓系半导体的第2接触层;以及在上述第2接触层上形成金属电极,上述第1接触层及上述第2接触层由p型的同一氮化镓系半导体构成,关于在形成上述第1接触层的步骤及形成上述第2接触层的步骤中供给至生长炉的p型掺杂剂的供给量,在形成上述第2接触层的步骤中所供给的量多于在形成上述第1接触层的步骤中所供给的量,上述第1及第2接触层的生长温度高于上述发光层中所包含的活性层的生长温度,上述第1及第2接触层的生长温度与上述活性层的生长温度的差为摄氏100度以上摄氏350度以下,上述第2接触层与上述金属电极直接接触,上述第1接触层与上述第2接触层直接接触,上述第1接触层与上述第2接触层的界面自与沿c轴延伸的基准轴正交的面以50度以上且小于130度的角度倾斜,上述发光层的发光波长为480nm以上600nm以下,上述第2接触层的膜厚为1nm以上50nm以下。而且,上述第2接触层的膜厚可为1nm以上20nm以下。

[0027] 第2接触层中,由于p型掺杂剂比较高,因此与金属电极的接触电阻降低,由于膜厚比较小,因此结晶性相对良好。第1接触层中,由于p型掺杂剂浓度相对较低,因此结晶性相对良好,载流子浓度也比较高。因此,可无损结晶性而实现第2接触层与金属电极的接触电阻的优化及载流子浓度的提高。进而,和第1接触层与第2接触层的界面的倾斜小于50度或为130度以上的情形相比,压电电场为反向且比较小或成为零。因此,与倾斜小于50度或为130度以上的情形相比,发光层的外部量子效率等良好。此外,第1及第2接触层的生长温度高于发光层的生长温度,第1及第2接触层的生长温度与发光层的生长温度的差为摄氏150度以上摄氏300度以下。若生长温度的差小于该差,则第1及第2接触层的生长温度变低,因此使电气特性降低。若生长温度的差大于该差,则活性层所受的热损害增加,因此使发光效率降低。

[0028] 本发明的方法优选为,还包括形成p型氮化镓系半导体的包覆层的步骤;上述包覆层在形成上述发光层之后形成,上述第1及第2接触层在形成上述包覆层之后形成,上述包覆层设置于上述发光层与上述第1接触层之间,上述包覆层的带隙大于上述第1接触层的带隙,上述第1接触层与上述包覆层直接接触。

[0029] 本发明的方法优选为,还包括准备由氮化镓系半导体构成的基板的步骤,上述包

覆层形成于上述基板上,在上述基板的主面上依次设置上述发光层、上述包覆层、上述第 1 及第 2 接触层以及上述金属电极,上述主面自与上述基准轴正交的面以 50 度以上且小于 130 度的角度倾斜。因此,可使用由氮化镓系半导体构成的基板,因此通过使氮化镓系半导体层在自与基准轴正交的面以 50 度以上且小于 130 度的角度倾斜的主面上生长,第 1 接触层与第 2 接触层的界面也可实现与主面相同的倾斜。

[0030] 本发明的方法中,上述第 1 接触层的 p 型掺杂剂的浓度优选为 $5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 以下,上述第 2 接触层的 p 型掺杂剂的浓度优选为 $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$ 以下。由于与金属电极直接接触的第 2 接触层的 p 型掺杂剂的浓度比较高,因此与金属电极的接触电阻降低。

[0031] 本发明的方法中,上述第 1 接触层的 p 型掺杂剂的浓度优选为 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 以上 $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 以下。由于未与金属电极直接接触的第 1 接触层的 p 型掺杂剂的浓度相对较低,从而结晶性相对良好,因此载流子浓度也比较高。

[0032] 本发明的方法中,上述 p 型掺杂剂优选为镁。因此,可良好地进行 p 型掺杂剂的供给。Mg 在氮化物半导体中形成相对较浅的受体能级,因此空穴浓度相对于掺杂剂浓度的活化率较高,从而能够以比较小的掺杂剂浓度获得比较高的空穴浓度。

[0033] 本发明的方法中,上述第 1 及第 2 接触层优选由氮化镓构成。由于 GaN 是作为二元化合物的氮化镓系半导体,因此在第 1 及第 2 接触层由 GaN 构成时,可提供良好的结晶质量。

[0034] 本发明的方法中,上述第 1 及第 2 接触层优选为 $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ ($0 \leq x \leq 1$, $0 \leq y \leq 1$, $0 \leq 1-x-y$)。因此,第 1 及第 2 接触层的材料中可使用氮化镓以外的其它氮化镓系半导体。由此,与基板的晶格失配度改变,接触层中内含的应变量发生变化,因此可提高第 1 接触层的载流子浓度,或降低第 2 接触层与金属电极的接触电阻。

[0035] 本发明的方法中,上述发光层优选为 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0.15 \leq x < 0.50$)。因此,可实现 480nm 以上且 600nm 以下的发光波长的发光。在该 In 组成区域内,发光层中内含的应变较大,在将基板主面的倾斜角取上述范围时可抑制的压电电场较大。因此,若使用本发明,则可制作该 In 组成区域内也具有良好的外部量子效率的发光元件。

[0036] 本发明的 III 族氮化物半导体元件中,上述第 1 接触层中的碳杂质浓度为 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 以下。如此,由于碳杂质浓度相对较低,因此可优化接触电阻及元件的动作电压。

[0037] 本发明的 III 族氮化物半导体元件中,上述基板的上述主面自与上述基准轴正交的面以 70 度以上且小于 80 度的角度倾斜。若使用该角度范围的基板,则可减少上述发光层中的 In 组成的波动,从而可制作具有良好的外部量子效率的发光元件。

[0038] 本发明的 III 族氮化物半导体元件中,上述基板的上述主面自与上述基准轴正交的面以 100 度以上且小于 110 度的角度倾斜。若使用该角度范围的基板,则可减少上述发光层中的 In 组成波动,从而可制作具有良好的外部量子效率的发光元件。

[0039] 本发明的 III 族氮化物半导体元件的制造方法中,上述第 1 接触层的生长速度为 $1 \mu\text{m}/\text{hour}$ 以下,上述第 2 接触层的生长速度为 $0.1 \mu\text{m}/\text{hour}$ 以下,上述第 2 接触层的生长速度慢于上述第 1 接触层的生长速度,上述第 1 及第 2 接触层在含氢气 20% 以上的气体环境下生长。如此,由于第 1 及第 2 接触层生长时的环境气体中使用氢气,且第 1 及第 2 接触层的生长速度也相对较慢,因此可使第 1 及第 2 接触层生长时的 V 族原子数/III 族原子数

的比比较高。因此,可使第 1 及第 2 接触层中的碳杂质浓度相对较低,因此使与电极的接触电阻及元件的动作电压良好。

[0040] 本发明的方法中,上述第 1 接触层中的碳杂质浓度为 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 以下。如此,由于碳杂质浓度相对较低,因此可优化接触电阻及元件的动作电压。

[0041] 本发明的方法中,上述第 1 及第 2 接触层的生长温度与上述活性层的生长温度的差为摄氏 100 度以上摄氏 250 度以下。因此,可提高接触层的结晶性,另一方面可抑制接触层生长时活性层所受的损害。

[0042] 本发明的方法中,上述基板的上述主面自与上述基准轴正交的面以 70 度以上且小于 80 度的角度倾斜。若使用该角度范围的基板,则可减少上述发光层中的 In 组成的波动,从而可制作具有良好的外部量子效率的发光元件。

[0043] 本发明的方法中,上述基板的上述主面自与上述基准轴正交的面以 100 度以上且小于 110 度的角度倾斜。若使用该角度范围的基板,则可减少上述发光层中的 In 组成的波动,从而可制作具有良好的外部量子效率的发光元件。

[0044] 本发明的方法中,上述活性层的生长温度为摄氏 650 度以上且小于摄氏 800 度。因此,可制作具有上述波长范围(480nm 以上 600nm 以下)的发光波长的活性层。

[0045] 本发明的方法中,上述金属电极优选由 Pd、Au、或者 Ni 及 Au 构成。通过此种材料的金属电极,可实现与第 2 接触层良好的接触。通过使用这些金属,可实现良好的欧姆接合。

[0046] 发明效果

[0047] 根据本发明,可提供包含无损结晶性而具有比较小的接触电阻与比较高的载流子浓度的 p 型接触层的 III 族氮化物半导体元件及 III 族氮化物半导体元件的制造方法。

附图说明

[0048] 图 1 是表示实施方式的 III 族氮化物半导体元件的构成的图。

[0049] 图 2 是表示实施方式的 III 族氮化物半导体元件的制造方法的主要步骤的图。

[0050] 图 3 是示意性地表示实施方式的 III 族氮化物半导体元件的制造方法的主要步骤中的产物的图。

[0051] 图 4 是表示实施例 1 的激光二极管的元件结构及生长温度的图。

[0052] 图 5 是表示实施例 2 的激光二极管的元件结构及生长温度的图。

[0053] 图 6 是表示发光波长与外部量子效率的关系及能见度曲线的图。

[0054] 图 7 是表示压电电场与主面的偏离角的关系的图。

[0055] 图 8 是表示镁浓度与载流子浓度的关系的图。

[0056] 图 9 是表示镁浓度与接触电阻的关系的图。

[0057] 图 10 是用于说明本实施方式的效果的图。

[0058] 图 11 是表示自表面侧分析外延积层结构所得的 SIMS 结果的图。

[0059] 图 12 是表示实施例 6 的激光二极管的元件结构及生长温度的图。

[0060] 图 13 是主要表示自表面侧分析实施例 6 的外延积层结构所得的 SIMS 结果的一部分的图。

[0061] 图 14 是主要表示自表面侧分析实施例 6 的外延积层结构所得的 SIMS 结果的一部

分的图。

[0062] 图 15 是主要表示自表面侧分析实施例 6 的外延积层结构所得的 SIMS 结果的一部分的图。

具体实施方式

[0063] 本发明的知识见解可通过参照作为例示而表示的附图并考虑以下的详细阐述而容易地理解。其次,参照附图对实施方式的 III 族氮化物半导体元件及 III 族氮化物半导体元件的制造方法进行详细说明。在可能的情况下,对相同要素标注相同符号,并省略重复说明。图 1 是概略性地表示本实施方式的 III 族氮化物半导体元件的结构及用于 III 族氮化物半导体元件的外延基板的结构的图。作为 III 族氮化物半导体元件 11,例如对发光二极管、激光二极管等发光元件进行说明,本实施方式可应用于包含 p 型 III 族氮化物半导体的 III 族氮化物半导体元件。

[0064] 图 1 的 (a) 部表示 III 族氮化物半导体元件 11,图 1 的 (b) 部表示用于 III 族氮化物半导体元件 11 的外延基板 EP。

[0065] 外延基板 EP 具有与 III 族氮化物半导体元件 11 相同的外延层结构。在接下来的说明中,对构成 III 族氮化物半导体元件 11 的半导体层进行说明。外延基板 EP 包含与这些构成 III 族氮化物半导体元件 11 的半导体层对应的半导体层(半导体膜),用于 III 族氮化物半导体元件 11 的说明适用于对应的半导体层。

[0066] 参照图 1,示出了坐标系 S 及结晶坐标系 CR。基板 13 的主面 13a 朝向 Z 轴的方向,且在 X 方向及 Y 方向上延伸。X 轴朝向 a 轴的方向。如图 1 的 (a) 部所示,III 族氮化物半导体元件 11 包括:基板 13、n 型 III 族氮化物半导体区域 15、发光层 17、及 p 型 III 族氮化物半导体区域 19。n 型 III 族氮化物半导体区域 15、发光层 17 及 p 型 III 族氮化物半导体区域 19 通过外延生长而形成于基板 13 上。

[0067] 基板 13 的 c 面沿图 1 所示的面 Sc 延伸。在面 Sc 上,表示有用于表示六方晶系氮化镓系半导体的晶轴的结晶坐标系 CR(c 轴、a 轴、m 轴)。基板 13 的主面 13a 以与基准轴 Cx 正交的面 Sc 为基准向基板 13 的氮化镓系半导体的 m 轴或 a 轴的方向以倾斜角 α 倾斜。倾斜角 α 由基板 13 的主面 13a 的法线向量 VN 与表示基准轴 Cx 的 c 轴向量 VC 所成的角度规定。在主面 13a 上,发光层 17 设置于 n 型 III 族氮化物半导体区域 15 与 p 型 III 族氮化物半导体区域 19 之间。在主面 13a 上,n 型氮化镓系半导体区域 15、活性层 17 及 p 型氮化镓系半导体区域 19 在法线向量 VN 的方向(Z 轴方向)上依次排列。在主面 13a 上,发光层 17 中所包含的 n 侧光导层 29、活性层 27 及 p 侧光导层 31 在法线向量 VN 的方向(Z 轴方向)上依次排列。在主面 13a 上,p 型 III 族氮化物半导体区域 19 中所包含的 p 型氮化镓系半导体层 21、p 型包覆层 23、接触层 25a 及接触层 25b 在法线向量 VN 的方向(Z 轴方向)上依次排列。

[0068] 基板 13 包括由具有导电性的氮化镓系半导体构成的主面 13a。基板 13 的主面 13a 自与沿氮化镓系半导体的 c 轴延伸的基准轴 Cx 正交的面 Sc 以 50 度以上且小于 130 度的范围的角度倾斜。基板 13 包含主面 13a,可由氮化镓系半导体构成。基板 13 的氮化镓系半导体可例如为 GaN(氮化镓)、InGaN(In:镓)、AlGaN 等。由于 GaN 是作为二元化合物的氮化镓系半导体,因此可提供良好的结晶质量与稳定的基板主面。此外,基板 13 也可例如为

AlN 等。

[0069] n 型 III 族氮化物半导体区域 15 由 n 型氮化镓系半导体构成。n 型 III 族氮化物半导体区域 15 设置于基板 13 上。n 型 III 族氮化物半导体区域 15 与基板 13 的主面 13a 直接接触。n 型 III 族氮化物半导体区域 15 包含一个或多个 n 型氮化镓系半导体层。该一个或多个 n 型氮化镓系半导体层设置于主面 13a 上。n 型 III 族氮化物半导体区域 15 可例如包含 n 型缓冲层、n 型包覆层、及 n 型光导层。n 型 III 族氮化物半导体区域 15 可例如由 n 型 GaN、InGaN、AlGaN 或 InAlGaN 等构成。

[0070] 发光层 17 例如由含有铟 (In) 的氮化镓系半导体构成。发光层 17 设置于基板 13 及 n 型 III 族氮化物半导体区域 15 上。发光层 17 与 n 型 III 族氮化物半导体区域 15 直接接触。发光层 17 包含活性层 27, 在必要的情况下可包含 n 侧光导层 29 及 p 侧光导层 31。活性层 27 包含一个或多个阱层 33、及多个势垒层 35。势垒层 35 具有大于阱层 33 的带隙的带隙。活性层 27 可具有单一或多重量子阱结构。阱层 33 及势垒层 35 均设置于 n 型 III 族氮化物半导体区域 15 及 n 侧光导层 29 上。阱层 33 及势垒层 35 均例如由 AlGaN、GaN、InGaN 或 InAlGaN 等构成。发光层 17 (活性层 27) 的发光波长为例如 480nm 以上 600nm 以下。在产生该发光波长范围的光的发光元件中, 可提高 p 型氮化镓系半导体的电气特性。进而, 在提供长波长的发光的发光元件中, 可提高 p 型氮化镓系半导体的特性。

[0071] 发光层 17 由含有铟 (In) 的氮化镓系半导体构成, 发光层 17 的铟 (In) 的组成为 15% 以上且小于 50%。因此, 可实现 480nm 以上 600nm 以下的发光波长的发光。例如, 发光层 17 可为 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ($0.15 \leq x < 0.50$)。

[0072] p 型 III 族氮化物半导体区域 19 由 p 型氮化镓系半导体构成。p 型 III 族氮化物半导体区域 19 的 p 型掺杂剂为镁 (Mg)。因此, 可良好地进行 p 型掺杂剂的供给。另外, 锌 (Zn) 等也可用于 p 型掺杂剂。p 型 III 族氮化物半导体区域 19 设置于基板 13、n 型 III 族氮化物半导体区域 15 及发光层 17 之上。p 型 III 族氮化物半导体区域 19 与发光层 17 直接接触。p 型 III 族氮化物半导体区域 19 包含一个或多个 p 型氮化镓系半导体层。p 型 III 族氮化物半导体区域 19 可例如包含 p 型氮化镓系半导体层 21。p 型氮化镓系半导体层 21 设置于发光层 17 上, 与发光层 17 直接接触。p 型氮化镓系半导体层 21 可包含 p 型电子阻挡层及 p 型光导层。p 型 III 族氮化物半导体区域 19 可例如还包含 p 型包覆层 23。p 型包覆层 23 设置于 p 型氮化镓系半导体层 21 上, 与 p 型氮化镓系半导体层 21 直接接触。p 型氮化镓系半导体层 21 及 p 型包覆层 23 各自可例如由 p 型 GaN、InGaN、AlGaN 或 InAlGaN 等构成。

[0073] p 型 III 族氮化物半导体区域 19 可例如还包含接触层 25a (第 1 接触层)。接触层 25a 设置于 p 型包覆层 23 上, 与 p 型包覆层 23 直接接触。p 型 III 族氮化物半导体区域 19 可例如还包含接触层 25b (第 2 接触层)。接触层 25b 设置于接触层 25a 上, 与接触层 25a 直接接触。

[0074] 在接触层 25a 与接触层 25b 之间形成有界面 J1。接触层 25a 与接触层 25b 由 p 型的相同氮化镓系半导体构成, 可例如由 p 型 GaN 构成。由于 GaN 是作为二元化合物的氮化镓系半导体, 因此在接触层 25a 及接触层 25b 由 GaN 构成的情况下, 可提供良好的结晶质量。

[0075] 接触层 25a 的 p 型掺杂剂的浓度小于接触层 25b 的 p 型掺杂剂的浓度。接触层 25a 的 p 型掺杂剂的浓度为 $5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 以下。例如, 接触层 25a 的 p 型掺杂剂的浓度可为

$5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 以上 $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 以下。由于未与电极 37 直接接触的接触层 25a 的 p 型掺杂剂的浓度相对较低,从而结晶性相对良好,因此载流子浓度也比较高。接触层 25b 的 p 型掺杂剂的浓度可为 $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 以上 $1 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$ 以下。由于与电极 37 直接接触的接触层 25b 的 p 型掺杂剂的浓度比较高,因此与电极 37 的接触 JC 中的接触电阻降低。

[0076] 接触层 25a 与接触层 25b 的界面 J1 自与沿 c 轴延伸的基准轴 Cx 正交的面 Sc 以 50 度以上且小于 130 度的角度倾斜。接触层 25b 的膜厚为 1nm 以上 50nm 以下。例如,接触层 25b 的膜厚可为 1nm 以上 20nm 以下。接触层 25a 的带隙小于 p 型包覆层 23 的带隙。

[0077] 具有以上所说明的构成的 III 族氮化物半导体元件 11 中,在接触层 25b,由于 p 型掺杂剂比较高,因此与电极 37 的接触电阻降低,由于膜厚比较小,因此结晶性相对良好。在接触层 25a,由于 p 型掺杂剂浓度相对较低,因此结晶性相对良好,载流子浓度也比较高。因此,可无损结晶性而实现接触层 25b 与电极 37 的接触电阻的优化及载流子浓度的提高。进而,和接触层 25a 与接触层 25b 的界面 J1 的倾斜度为小于 50 度或 130 度以上的情形相比,压电电场为反向(作用于积层方向(VN 的方向)上的压电电场的方向相对于积层方向为反向)且比较小或成为零。因此,与倾斜度为小于 50 度或 130 度以上的情形相比,发光层 17 的外部量子效率等良好。

[0078] 此外,III 族氮化物半导体元件 11 具备由氮化镓系半导体构成的基板 13,在基板 13 的主面 13a 上依次设置有 n 型 III 族氮化物半导体区域 15、发光层 17 及 p 型 III 族氮化物半导体区域 19 等氮化镓系半导体层,主面 13a 自与基准轴 Cx 正交的面 Sc 以 50 度以上且小于 130 度的角度倾斜。因此,可使用由氮化镓系半导体构成的基板 13,因此通过使 p 型 III 族氮化物半导体区域 19 等氮化镓系半导体层在自与基准轴 Cx 正交的面 Sc 以 50 度以上且小于 130 度的角度倾斜的主面 13a 上生长,接触层 25a 与接触层 25b 的界面 J1 也可实现与主面 13a 相同的倾斜。

[0079] 此外,接触层 25a 及接触层 25b 的相同氮化镓系半导体可为 p 型 $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ ($0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, 0 \leq 1-x-y$)。因此,接触层 25a 及接触层 25b 的材料可使用 GaN 以外的其它氮化镓系半导体。

[0080] III 族氮化物半导体元件 11 还包括电极 37 及绝缘膜 39。在基板 13、n 型 III 族氮化物半导体区域 15、发光层 17 及 p 型 III 族氮化物半导体区域 19 上,设置有电极 37(例如阳极)、以及覆盖接触层 25b 的绝缘膜 39。电极 37 设置于接触层 25b 之上,经由绝缘膜 39 的开口 39a 与接触层 25b 直接接触。接触层 25b 与电极 37 经由开口 39a 而形成接触 JC。电极 37 例如由 Pd、Au、或者 Ni/Au(Ni 及 Au) 等构成。因此,通过此种材料的电极 37,可实现与接触层 25b 良好的接触。此外,III 族氮化物半导体元件 11 具备电极 41(例如阴极)。电极 41 设置于基板 13 的背面 13b 上,与背面 13b 直接接触。电极 41 例如由 Pd、Ti/Al 等构成。

[0081] 如图 1 的 (b) 部所示,III 族氮化物半导体元件 11 的外延基板 EP 包含与 III 族氮化物半导体元件 11 的上述各半导体层对应的半导体层(半导体膜),用于 III 族氮化物半导体元件 11 的说明适合于对应的半导体层。外延基板 EP 的表面粗糙度具有在 $10 \mu\text{m}$ 见方的范围内为 1nm 以下的算术平均粗糙度。图 2 是表示本实施方式的 III 族氮化物半导体元件的制造方法的主要步骤的图。图 3 是示意性地表示本实施方式的 III 族氮化物半导体元件的制造方法的主要步骤中的产物的图。

[0082] 根据图 2 所示的步骤流程,通过有机金属气相生长法而制作发光元件的结构的外延基板 EP 与 III 族氮化物半导体元件 11。作为用于外延生长的原料,使用三甲基镓 (TMG)、三甲基铟 (TMI)、三甲基铝 (TMA)、氨 (NH_3)、硅烷 (SiH_4) 及双环戊二烯基镁 (Cp_2Mg)。

[0083] 在步骤 S101 中,准备具有由氮化镓系半导体构成的主面的基板 (图 3 的 (a) 部所示的基板 51)。该基板 51 (与基板 13 对应) 的主面 51a (与主面 13a 对应) 的法线轴具有相对于氮化镓系半导体的 c 轴呈 50 度以上且小于 130 度的角度范围内的倾斜角。基板 51 的主面 51a 例如可为自六方晶系 GaN 中的 c 面以 75 度的角度向 m 轴方向倾斜的 {20-21} 面。对主面 51a 进行镜面研磨。

[0084] 其次,在以下的条件下在基板 51 上进行外延生长。首先,在步骤 S102 中,将基板 51 设置于生长炉 10 内。在生长炉 10 内配置有例如石英流道等石英制夹具。在必要的情况下,在摄氏 1050 度左右的温度及 27kPa 左右的炉内压力下,将包含 NH_3 与 H_2 的热处理气体供给至生长炉 10,并且进行 10 分钟左右热处理。通过该热处理,主面 51a 等产生表面改性。

[0085] 在该热处理后,在步骤 S103 中,使 III 族氮化物半导体层在基板 51 上生长而形成外延基板 EP。环境气体包含载气及次流气体 (subflow gas)。环境气体可例如包含氮气及 / 或氢气。步骤 S103 包括下述步骤 S104、步骤 S105 及步骤 S110。

[0086] 在步骤 S104 中,将包含用于 III 族构成元素及 V 族构成元素的原料、及 n 型掺杂剂的原料气体以及环境气体供给至生长炉 10,外延生长而形成 n 型 III 族氮化物半导体区域 53 (与 n 型 III 族氮化物半导体区域 15 对应)。n 型 III 族氮化物半导体区域 53 的主面 53a 的倾斜角与基板 51 的主面 51a 的倾斜角对应。n 型 III 族氮化物半导体区域 53 可包含一个或多个 III 族氮化物半导体层。本实施方式中,例如使以下的 III 族氮化物半导体层生长。在摄氏 950 度左右将 TMG、 NH_3 、 SiH_4 、以及氮气及 / 或氢气供给至生长炉 10,生长并形成掺 Si 的 GaN 层 55a。然后,在摄氏 870 度左右的基板温度下将 TMG、TMI、TMA、 NH_3 、 SiH_4 及氮气供给至生长炉 10,生长并形成掺 Si 的 InAlGa_{0.9}N 层 55b。此后,在摄氏 1050 度左右将 TMG、 NH_3 、 SiH_4 、以及氮气及 / 或氢供给至生长炉 10,生长并形成掺 Si 的 GaN 层 55c。在具有还原性的氢气环境下,氧变得容易自生长炉 10 内的夹具或夹具的附着物中脱离。

[0087] 在步骤 S105 中,生长并形成发光层 57 (与发光层 17 对应)。步骤 S105 包括下述步骤 S106 ~ 步骤 S109。在步骤 S106 中,在摄氏 840 度左右的基板温度下将 TMG、TMI、 NH_3 及氮气供给至生长炉 10,生长并形成 n 侧的 InGa_{0.9}N 光导层 59a。InGa_{0.9}N 光导层 59a 的一部分或全部可为无掺杂或 n 型导电性。

[0088] 然后,在步骤 S107 及步骤 S108 中,生长并形成活性层 59b (与活性层 27 对应)。在步骤 S107 中,将 TMG、TMI、 NH_3 及环境气体的氮气供给至生长炉 10,生长并形成无掺杂 InGa_{0.9}N 势垒层 61a。无掺杂 InGa_{0.9}N 势垒层 61a 的厚度为 15nm 左右。在无掺杂 InGa_{0.9}N 势垒层 61a 生长后,中断生长,使基板温度自势垒层的生长温度变更为阱层的生长温度。在变更基板温度后的步骤 S108 中,将 TMG、TMI、 NH_3 及环境气体的氮气供给至生长炉 10,生长并形成无掺杂 InGa_{0.9}N 阱层 61b。InGa_{0.9}N 阱层 61b 的厚度为 3nm 左右。在必要的情况下,可重复势垒层的生长、温度变更、阱层的生长。本实施方式中,活性层 59b 的量子阱结构包含 3 层无掺杂 InGa_{0.9}N 阱层 61b。

[0089] 在步骤 S109 中,在摄氏 840 度左右的基板温度将 TMG、TMI、 NH_3 及环境气体的氮气

供给至生长炉 10, 生长并形成 p 侧的 InGaN 光导层 59c。InGaN 光导层 59c 的一部分或全部可为无掺杂或 p 型导电性。发光层 57 的主面 57a 及活性层 59b 的主面 59b-1 的倾斜角与基板 51 的主面 51a 的倾斜角对应。

[0090] 在步骤 S110 中, 将包含 III 族原料、V 族原料及 p 型掺杂剂的原料气体、以及环境气体供给至生长炉 10, 外延生长而形成 p 型 III 族氮化物半导体区域 63 (与 p 型 III 族氮化物半导体区域 19 对应)。p 型 III 族氮化物半导体区域 63 的主面 63a 的倾斜角与基板 51 的主面 51a 的倾斜角对应。p 型 III 族氮化物半导体区域 63 可包含一个或多个 III 族氮化物半导体层。本实施例中, 使以下的 III 族氮化物半导体层生长。例如, 在发光层 57 生长后, 停止供给 TMG, 使基板温度上升。将 TMG、NH₃、Cp₂Mg 及环境气体供给至生长炉 10, 以摄氏 900 度左右的基板温度生长并形成 p 型 GaN 电子阻挡层 65a。在 p 型 GaN 电子阻挡层 65a 的生长中, 优选供给环境气体的氮气。然后, 将 TMG、TMI、NH₃、Cp₂Mg 及氮气供给至生长炉 10, 以摄氏 840 度左右的基板温度生长并形成掺 Mg 的 InGaN 光导层 65b。此后, 在摄氏 900 度左右将 TMG、NH₃、Cp₂Mg 及环境气体供给至生长炉 10, 生长并形成掺 Mg 的 GaN 光导层 65c。在掺 Mg 的 GaN 光导层 65c 的生长中, 优选供给氮气作为环境气体。然后, 在摄氏 870 度左右的基板温度将 TMG、TMI、TMA、NH₃、Cp₂Mg 及氮气供给至生长炉 10, 生长并形成掺 Mg 的 InAlGaIn 包覆层 65d (与 p 型包覆层 23 对应)。

[0091] 在掺 Mg 的 InAlGaIn 包覆层 65d 生长后, 生长并形成掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e (与接触层 25a 对应) 及掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f (与接触层 25b 对应)。首先, 在步骤 S110a 中, 在摄氏 900 度左右将 TMG、NH₃、Cp₂Mg 及环境气体供给至生长炉 10, 生长并形成掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e。掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 的厚度为 40nm 左右。掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 的 Mg 浓度为 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 左右。掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 的生长一结束, 便在步骤 S110b 中, 更换在形成掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 时 (步骤 S110a) 供给的 p 型掺杂剂 (Mg) 的供给量之后 (将 p 型掺杂剂 (Mg) 的供给量自例如 1sccm 变更为 500sccm。然而, 在流量控制装置的控制范围存在限制的情况下, 也变更掺杂低浓度 Mg 的 GaN 层与掺杂高浓度 Mg 的 GaN 层的生长速度而可获得设计的 Mg 浓度), 在摄氏 900 度左右将 TMG、NH₃、Cp₂Mg 及环境气体供给至生长炉 10, 生长并形成掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f。掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 的膜厚为 10nm 左右。掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 的 Mg 浓度为 $5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 左右。

[0092] 掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 与掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 为 p 型的相同氮化镓系半导体, 例如为 $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ ($0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, 0 \leq 1-x-y$), 尤其由 GaN 等构成。在掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 生长时供给的 Mg 的供给量多于在掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 生长时供给的 Mg 的供给量。因此, 关于 p 型掺杂剂 (Mg) 的浓度, 相较掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e, 掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 较高。掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 及掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 的生长中, 优选供给氮气作为环境气体。在掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 与掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 之间形成有界面 (与界面 J1 对应)。

[0093] 掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 及掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 的生长温度也可为摄氏 1000 度左右的同一温度。掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 及掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 的生长温度高于活性层 59b 的生长温度。掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层

65e 及掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 的生长温度与活性层 59b 的生长温度的差处于摄氏 100 度以上摄氏 350 度以下的范围内,例如可处于摄氏 150 度以上摄氏 300 度以下的范围内。若生长温度的差小于该差,则掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 及掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 的生长温度变低,因此使电气特性降低。若生长温度的差大于该差,则活性层 59b 所受的热损害增加,因此使发光效率降低。在以上所说明的步骤 S101 ~ 步骤 S110 之后,形成外延基板 EP1。

[0094] 在步骤 S111 中,在外延基板 EP1 之上(尤其是在掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 之上)形成电极。电极的形成以如下的方式进行。例如,在掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 上形成 Ni/Au 或 Pd 等金属的电极(与电极 37 对应),并且于外延基板 EP1 的背面形成 Ti/Al 等金属的电极(与电极 41 对应)。可先于电极的形成,对外延基板 EP1 进行加工而形成隆脊结构。通过步骤 S111,形成外延基板 EP。然后,通过解理而自外延基板 EP 形成激光条,在该激光条的谐振器端面成膜由电介质多层膜(例如 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$) 构成的反射膜之后,分离成 III 族氮化物半导体元件 11。

[0095] 为使氮化镓系半导体的发光元件的发光波长变长,发光层的质量提升不可或缺。作为对发光层的质量造成影响的要因,存在由压电电场所致的影响、与由作为发光层的 InGaIn 的组成的不均匀性所致的影响。InGaIn 的组成的不均匀性是通过在结晶过程中 In 偏析而形成较高的 In 组成的结晶区域与较低的 In 组成的结晶区域、在结晶过程中内含局部的应变等而产生,因该不均匀性而形成结晶缺陷,发光效率降低。首先,参照图 6。图 6 表示 InGaIn 阱层的发光元件及 AlGaInP 阱层的发光元件中的外部量子效率与人类的能见度曲线。图 6 的横轴表示发光元件的发光波长 (nm),图 6 的纵轴表示外部量子效率 (%)。如图 6 所示,在包含能见度比较高的 480nm 以上 600nm 以下的发光波长的区域内,InGaIn 阱层的发光元件及 AlGaInP 阱层的发光元件的外部量子效率相对较低。进而,参照图 7。图 7 表示非专利文献 1 及非专利文献 2 所示的计算结果。图 7 的横轴表示 GaN 层的主面的偏离角 (度),图 7 的纵轴表示 GaN 层内所产生的纵压电电场 (MV/cm)。此处,纵压电电场是压电电场中作用于积层方向 (VN 的方向) 上的压电电场的分量。如图 7 所示,在包含发光层或接触层等且设置有氮化镓系半导体的外延层的氮化镓系半导体的基板主面的偏离角为 50 度以上且小于 130 度的半极性或无极性的情况下,纵压电电场成为与基板主面为 c 面的情况的纵压电电场反向的比较大的电场,或者成为零。因此,在基板主面的偏离角为 50 度以上且小于 130 度的情况下,纵压电电场与以 c 面为主面的情况的电场为反向,或成为零,因此发光层的外部量子效率良好。进而,在偏离角为 63 度以上且小于 80 度的情况下,因其晶体表面状态而使发光层的 In 组成均匀,In 偏析得到抑制,外部量子效率良好。因此,本实施方式的 III 族氮化物半导体元件 11 的发光层的质量得到提高。

[0096] 此外,图 8 是表示 p 型 GaN 层的 Mg 浓度与载流子浓度的关系的图。图 8 的横轴表示 p 型 GaN 层内的 Mg 浓度 (cm^{-3}),图 8 的纵轴表示 p 型 GaN 层内的载流子浓度 (cm^{-3})。如图 8 所示,直至 Mg 浓度为 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 为止,载流子浓度随着 Mg 浓度的增加而增加,在 Mg 浓度为 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 的情况下,载流子浓度成为最大。若 Mg 浓度超过 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$,则因结晶性降低而使载流子补偿显著,因而使载流子浓度降低。Mg 浓度越是增加,则 GaN 层的结晶性越是降低。载流子浓度在 Mg 浓度为 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 以上 $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 以下的范围内最高。进而,图 9 是表示 p 型 GaN 层的 Mg 浓度与接触电阻的关系的图。图 9 的横轴表示 p 型 GaN 层内

的 Mg 浓度 (cm^{-3}), 图 9 的纵轴表示 p 型 GaN 层与金属电极的接触电阻 (Ωcm^2)。如图 9 所示, 直至 Mg 浓度为 $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 为止, 接触电阻的值随着 Mg 浓度的增加而急剧减少, 在 Mg 浓度为 $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 至 $1 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$ 的区间, 虽增加率有所降低, 但接触电阻的值仍随着 Mg 浓度的增加而减少。然而, 若 Mg 浓度超过 $1 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$, 则随着 Mg 浓度的增加, 接触电阻的值转而急剧增加。因此, 接触电阻的值在为 $3 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 以上 $5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 以下的范围内的 Mg 浓度的情况下比较小。若 Mg 浓度较高, 则金属电极与 p 型 GaN 层的界面的势垒如图 10 所示降低, 若 Mg 浓度高至超过 $1 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$ 左右, 则结晶性的降低显著, 而使载流子浓度降低。如此, 若 Mg 浓度比较高, 则存在虽金属电极与 p 型 GaN 层的界面的势垒变低, 仍会导致接触电阻增加这一结果。

[0097] 图 10 是在 p 型 GaN 层设置有金属电极的情况下的能带图。图 10 的 (a) 部表示在具有 50nm 的厚度与 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 的 Mg 浓度的 p 型 GaN 层设置有金属电极时的能带。图 10 的 (b) 部表示在具有 50nm 的厚度与 $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 的 Mg 浓度的 p 型 GaN 层设置有金属电极时的能带。图 10 的 (c) 部表示在具有 50nm 的厚度与 $1 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$ 的 Mg 浓度的 p 型 GaN 层设置有金属电极时的能带。图 10 所示的符号 E_f 表示费米能级 (Fermi energy level)。

[0098] 若如图 10 的 (a) 部所示, Mg 浓度相对较低, 则 p 型 GaN 层的块体部分的载流子浓度增加, 而与金属电极的界面的能带的弯曲相对较大, 从而势垒比较高, 因此接触电阻的值相对较大。若如图 10 的 (c) 部所示, Mg 浓度比较高, 则与金属电极的界面的能带的弯曲比较小, 从而势垒变得相对较低, 而 p 型 GaN 层的块体部分的载流子浓度减少, 因此接触电阻的值相对较大。此外, 如图 10 的 (b) 部所示, 在 Mg 浓度成为图 10 的 (a) 部及图 10 的 (c) 部分别所示的 Mg 浓度的中间的值的情况下, 与图 10 的 (a) 部及图 10 的 (c) 部所示的情形相比, 接触电阻的值较小, 通过 50nm 的厚度而使结晶性保持相对较低的状态, 载流子浓度并不充分。也考虑到为维持结晶性而减少厚度, 但若仅减少厚度, 则块体容积会减少, 因而难以改善载流子浓度。

[0099] 因此, 如图 10 的 (d) 部所示, 若使用本实施方式的 III 族氮化物半导体元件 11 的接触层 25a 及接触层 25b, 则虽结晶性得以维持, 但接触电阻降低, 载流子浓度增加。在与电极 37 直接接触的接触层 25b 的情况下, Mg 浓度比较高, 为 $5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 左右, 而厚度比较小, 为 10nm 左右。因此, 与电极 37 直接接触的接触层 25b 通过比较高的 Mg 浓度, 进而通过因厚度比较小而具有良好的结晶性, 而具有足够低的接触电阻。进而, 在接触层 25b 以直接接触的方式设置有接触层 25a。在接触层 25a 的情况下, Mg 浓度相对较低, 为 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 左右, 而厚度相对较大, 为 40nm 左右。接触层 25a 通过相对较低的 Mg 浓度而具有良好的结晶性, 此外, 通过具有良好的结晶性, 进而通过厚度相对较大, 而具有比较高的载流子浓度。因此, 由接触层 25a 与接触层 25b 构成的 III 族氮化物半导体元件 11 的 p 型接触层具有相对较低的接触电阻、与比较高的载流子浓度, 而不会降低结晶性。

[0100] 另外, 关于图 7 ~ 图 10 所示的物性, 即便代替 Mg 而使用例如 Zn 等作为 p 型掺杂剂, 该物性也相同, 进而即便代替 GaN 层而使用氮化镓系半导体, 具体而言使用 $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ ($0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1, 0 < x+y \leq 1$), 该物性也相同。在任一情况下, 掺杂剂的量与结晶性、载流子浓度的关系均相同, 最佳掺杂浓度可根据掺杂剂的种类而变化, 但通过如本实施方式所示使用双层接触层, 可同时实现相对较低的接触电阻与比较高的载流子浓度。

[0101] (实施例 1) 制作图 4 的 (a) 部所示的元件结构的激光二极管 (与 III 族氮化物半导体元件 11 对应)。图 4 的 (b) 部表示外延结构的构成层的生长温度。p-GaN 层 (与接触层 25a 对应) 具有 40nm 左右的厚度与 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 左右的 Mg 浓度。p⁺-GaN 层 (与接触层 25b 对应) 具有 10nm 左右的厚度与 $5 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 左右的 Mg 浓度。p-GaN 层及 p⁺-GaN 层的生长温度为摄氏 900 度左右的同一温度。准备 {20-21} 面 GaN 基板。通过有机金属气相生长法在该 GaN 基板上形成外延积层。p 型掺杂剂为 Mg。图 11 表示自表面侧分析该外延积层的结构所得的 SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry, 二次离子质谱法) 结果。图 11 的横轴表示该外延积层的自表面起的深度。图 11 表示外延积层的自表面至深度 100nm 左右的分析结果。图 11 的左纵轴表示 Mg 浓度。根据图 11 所示的 SIMS 结果, 在 p⁺-GaN 层确认 $2 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 左右的 Mg 浓度, 在 p-GaN 层确认 $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 左右的 Mg 浓度 (另外, 图 11 中, 例如将 1×10^{21} 表示为“1E+21”, 将 1×10^6 表示为“1E+06”)。图 11 所示的 SIMS 结果中, 也包含对作为标记物的铝 (Al) 及铟 (In) 的分析结果。若参照图 11, 则铝 (Al) 浓度及铟 (In) 浓度的上升部分为 p-GaN 层与该层下方的 p-InAlGaN 包覆层的界面。再次返回图 4 进行说明。在 p 型氮化镓系半导体层的生长中, 不含铟 (In) 的氮化镓系半导体层的生长是在仅供给氢气作为环境气体而形成的氢气环境中生长。此外, 含有铟 (In) 的氮化镓系半导体层的生长是在仅供给氮气作为环境气体而形成的氮气环境中生长。通过湿式蚀刻在外延积层上形成具有宽度为 10 μm 左右的条状开口的绝缘膜 (例如 SiO_2 膜)。通过蒸镀而形成由 Pd 构成的阳极电极 (p 侧的电极) 及焊盘电极。此后, 通过蒸镀在背面形成由 Pd 构成的阴极电极 (n 侧的电极) 及焊盘电极。以 600 μm 左右的间隔对如此制作的基板产物进行解理而使其分离, 从而制作激光条。解理面是相对于 {20-21} 面及 {11-20} 面垂直的面。在激光条的谐振器端面成膜由电介质多层膜构成的反射膜。电介质多层膜例如由 $\text{SiO}_2/\text{TiO}_2$ 构成。前端面的反射率为 80% 左右, 后端面的反射率为 95% 左右。以 525nm 左右的波长及 $3 \text{kA}/\text{cm}^2$ 左右的阈值电流振荡, 50mW 功率时的动作电压为 6.5 伏左右。阳极电极的接触电阻的测定结果为 $1 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}^2$ 左右。

[0102] (实施例 2) 实施例 1 与实施例 2 的不同点仅在于 p-GaN 层及 p⁺-GaN 层的生长温度。制作图 5 的 (a) 部所示的元件结构的激光二极管 (与 III 族氮化物半导体元件 11 对应)。图 5 的 (b) 部表示外延结构的构成层的生长温度。实施例 2 的情况下的 p-GaN 层及 p⁺-GaN 层的生长温度为摄氏 1000 度左右的同一温度。实施例 2 的情况下的阳极电极的接触电阻的测定结果为 $1 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}^2$ 左右, 与实施例 1 相比有所提高。50mW 功率时的动作电压为 5.5 伏, 与实施例 1 相比有所提高。元件寿命超过 10000 小时。根据以上的实施例 1 及实施例 2 的结果, Mg 浓度较大的 p⁺-GaN 层的生长温度优选在不对活性层 (ud-InGaN 层 (3nm)) 造成损害的范围内设定得较高。

[0103] (实施例 3 ~ 实施例 5) 其它实施例 3 ~ 实施例 5 具备单一 p⁺-GaN 层以代替实施例 1 及实施例 2 的 p-GaN 层及 p⁺-GaN 层, 实施例 3 ~ 实施例 5 的单一 p⁺-GaN 层的生长温度为摄氏 900 度左右。除了此种 p⁺-GaN 层的构成及生长温度之外, 实施例 3 ~ 实施例 5 与实施例 1 及实施例 2 相同。在实施例 3 的情况下, p⁺-GaN 层的厚度为 50nm 左右, Mg 浓度为 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 左右, 阳极电极的接触电阻的测定结果为 $1 \times 10^{-1} \Omega \text{cm}^2$ 左右, 50mW 功率时的动作电压为 8.5 伏左右。在实施例 4 的情况下, p⁺-GaN 层的厚度为 50nm 左右, Mg 浓度为 $1 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 左右, 阳极电极的接触电阻的测定结果为 $1 \times 10^{-2} \Omega \text{cm}^2$ 左右, 50mW 功率时的动作电压为 7.5 伏左

右。在实施例 5 的情况下, p^+ -GaN 层的厚度为 50nm 左右, Mg 浓度为 $1 \times 10^{21} \text{cm}^{-3}$ 左右, 阳极电极的接触电阻的测定结果为 $1 \times 10^{-1} \Omega \text{cm}^2$ 左右, 50mW 功率时的动作电压为 8.5 伏左右。因此, 实施例 1 及实施例 2 与实施例 3 ~ 实施例 5 相比, 至少阳极电极的接触电阻及动作电压有所优化 (接触电阻及动作电压的各值较小)。

[0104] 以上, 对优选实施方式中本发明的原理进行图示并加以说明, 但本领域技术人员可知本发明可不脱离此种原理而在配置及详情方面加以变更。本发明并不限于本实施方式所记载的特定构成。因此, 对源于权利要求及其精神范畴的所有修正及变更申请权利。

[0105] (其它实施方式) 当制作在绿色带的长波长区域具有发光波长的 GaN 系半导体发光元件时, 利用以半极性面及无极性面中的任一个为主面的基板非常有利, 其理由在于, 可减弱对发光层施加的压电电场, 可制作减少了铟 (In) 偏析的高质量 InGaIn 发光层等。

[0106] 然而, 发明人认为在利用半极性面及无极性面中的任一个时可能会成为障碍的问题至少存在两个。作为第一个问题, 存在与 p 侧电极之间的接触电阻比较高这一情况。典型而言, 相对于以 c 面为主面的基板上的接触电阻为 $5 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}^2$ 左右, 以半极性面及无极性面中的任一个为主面的基板上的接触电阻为 $2 \times 10^{-2} \Omega \text{cm}^2$ 左右, 接触电阻增加将近约 2 位数。该接触电阻的增加相当于当电流在纵方向上流动时约 2V 左右的电压上升。

[0107] 作为第二个问题, 存在如下情况, 即, 以长波长发光且铟 (In) 组成较高的 InGaIn 发光层耐热性较弱, 因此需要降低 p 型层的生长温度 (典型而言为摄氏 1100 度左右至摄氏 900 度左右), 而在此情况下, p 型层的结晶质量降低。p 型层的结晶质量的降低导致接触电阻的劣化, 典型而言, 以 c 面为主面的基板上的接触电阻为 $5 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}^2$ 左右, 以半极性面及无极性面中的任一个为主面的基板上的接触电阻为 $5 \times 10^{-2} \Omega \text{cm}^2$ 左右, 无论基板的主面的面取向如何, 接触电阻均劣化。

[0108] 因此, 发明人发现了一种制造方法, 该制造方法即便使 p 型层在以半极性面及无极性面中的任一个为主面的基板上以低温生长, 也可制造具有良好的接触电阻的 GaN 系半导体发光元件。在氢气环境下, 若为保护发光层而使 p 型层以相对低温 (摄氏 900 度左右) 生长, 则在生长速度为 $1 \mu \text{m}/\text{hour}$ 以上的情况下, 超过 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 而为 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 左右的碳杂质会导入至 p 型层。此种碳杂质浓度会增加 p 型层的电阻值, 因而导致 p 型层与电极的接触电阻的劣化。相对于此, 发明人发现, 作为降低 p 型层的碳杂质浓度的方法, 有效的是通过降低生长速度而增加 V 族原子数 / III 族原子数的比, 而实际上可降低接触电阻。此时的生长速度, 在具有与 p 侧的电极接触的表面且 Mg 掺杂量较多的接触层 (与掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 对应的 p^+ -GaN 层) 的情况下为 $0.1 \mu \text{m}/\text{hour}$ 以下, 在与该接触层接触且 Mg 掺杂量比较小的接触层 (与掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 对应的 p-GaN 层) 的情况下为 $1 \mu \text{m}/\text{hour}$ 以下。

[0109] 另外, 发明人还发现, 作为减少碳杂质浓度的方法, 有效的是在氮气环境下使 p 型层生长, 但在此情况下, 并未见到接触电阻的大幅度改善。发明人认为此现象 (在氮气环境下使 p 型层生长的情况下, 即便可减少碳杂质浓度, 也未见到接触电阻的大幅度改善这一现象) 的原因如下。即, 发明人认为, 镁 (Mg) 原子取代 GaN 中的镓 (Ga) 而作为受体发挥作用, 相对于在氢气环境下镁 (Mg) 原子有效地取代镓 (Ga) 原子, 在氮气环境下 Mg 原子未有效地取代镓 (Ga) 原子而是进入晶格间等, 鉴于上述两点, 即便在氢气环境与氮气环境下 SIMS 分析上掺杂有相同程度的浓度的镁 (Mg) 原子, 在氮气环境的情况下镁 (Mg) 原子也未

作为有效受体而发挥作用,因此而产生如上所述的现象(在氮气环境下使 p 型层生长的情况下,即便可减少碳杂质浓度,也未见到接触电阻的大幅度改善这一现象)。

[0110] 根据以上的知识见解,发明人成功发现了如下 GaN 系半导体发光元件与制作 GaN 系半导体发光元件的方法,该 GaN 系半导体发光元件通过在氢气环境下降低生长速度并提高 V 族原子数 / III 族原子数的比(供给的原料中的摩尔比)进行生长,即便使 p 型层在以半极性面及无极性面中的任一个为主面的基板上以低温生长,也具有良好的接触电阻。可制造此种即便使 p 型层在以半极性面及无极性面中的任一个为主面的基板上以低温生长也具有良好的接触电阻的 GaN 系半导体发光元件的制造方法、与通过该制造方法制造的 GaN 系半导体发光元件,可通过对图 3 所示的外延基板 EP1 的构成与外延基板 EP1 的制造方法加上如下变更而实现。以下,将变更后的外延基板称为外延基板 EP11。

[0111] 首先,下文中列举外延基板 EP11 的构成及制造方法与外延基板 EP1 的不同点(变更点)。在外延基板 EP11 的情况下,掺 Si 的 GaN 层 55a、掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 及掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 生长时的环境气体中使用氢气这一点。在外延基板 EP11 的情况下,外延基板 EP11 的其它层生长时的环境气体使用氮气这一点是不同的,这些方面是在构成具有良好的接触电阻的 GaN 系半导体发光元件及其制造方法方面重要的要素。除此以外,还有在外延基板 EP11 的情况下在 p 型 III 族氮化物半导体区域 63 生长时未设置 p 型 GaN 电子阻挡层 65a 这一点。在外延基板 EP11 的情况下,掺 Si 的 GaN 层 55c 的生长温度设定为摄氏 840 度左右这一点。在外延基板 EP11 的情况下,掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 及掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 的生长温度均设定为摄氏 870 度左右这一点。在外延基板 EP11 的情况下,在图中符号 65d 所示的位置所形成的层上形成有掺 Mg 的 AlGaIn 包覆层而非掺 Mg 的 InAlGaIn 包覆层这一点等不同,这些方面是在构成具有良好的接触电阻的 GaN 系半导体发光元件及其制造方法方面无关的变更点。此外,除了以上方面之外,外延基板 EP11 的构成及制造方法与外延基板 EP1 的构成及制造方法相同。

[0112] 此外,在外延基板 EP11 的情况下,掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 的碳杂质浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 以下。由于碳杂质浓度相对较低,因此可优化接触电阻及元件的动作电压。

[0113] 进而,在外延基板 EP11 的情况下,可实现如下两种情形:基板 51 的主面 51a 自与沿氮化镓系半导体的 c 轴延伸的基准轴(基准轴 Cx)正交的面(面 Sc)以 70 度以上且小于 80 度的角度倾斜;以及自与沿氮化镓系半导体的 c 轴延伸的基准轴(基准轴 Cx)正交的面(面 Sc)以 100 度以上且小于 110 度的角度倾斜。若使用该角度范围的基板,则可减少发光层中的 In 组成的波动,从而可制作具有良好的外部量子效率的发光元件。

[0114] 在外延基板 EP11 的制造方法的情况下,掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 的生长速度为 $1 \mu \text{ m/hour}$ 以下,掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 的生长速度为 $0.1 \mu \text{ m/hour}$ 以下,掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 的生长速度慢于掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 的生长速度,掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 及掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 在含氢气 20% 以上($\text{vol}\%$ (体积比例))的气体环境下生长。如此,掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 及掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 生长时的环境气体中使用氢气,掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 及掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 的生长速度也相对较慢,因此可使掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 及掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 生长时的 V 族原子数 / III 族原子数的比比较高。因此,可使掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 及掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层

65f 中的碳杂质浓度相对较低,因此与电极的接触电阻及元件的动作电压良好。另外,为减少掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 及掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 的碳杂质,有使掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 及掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 在氮气环境下生长的方法,但由于在氮气环境下掺杂高浓度的镁 (Mg) 的晶体的生长较为困难,从而掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 及掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 的结晶性降低,因此与电极的接触电阻及元件的动作电压均升高。为减少掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 及掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 的碳杂质,有增加掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 及掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 的生长温度的方法,在相对而言为长波长的情况下,活性层的生长温度较低,其后的 p 层的生长中的耐热性降低,因此存在活性层 59b 受到损害的情形。因此,通过在氢气环境下降低生长速度并提高 V 族原子数 /III 族原子数的比而进行生长,即便以保护发出比较长波长的光的发光层为目的使 p 型层在以半极性面及无极性面中的任一个为主面的基板上以低温生长,也可制作具有良好的接触电阻的 GaN 系半导体发光元件。

[0115] 在外延基板 EP11 的制造方法的情况下,活性层 59b 的生长温度处于摄氏 650 度以上且小于摄氏 800 度的范围。进而,在外延基板 EP11 的制造方法的情况下,掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 及掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 各自的生长温度与活性层 59b 的生长温度的差处于摄氏 100 度以上摄氏 250 度以下的范围。因此,可抑制活性层 59b 在 p 型层生长中受到的损害。

[0116] (实施例 6)

[0117] 接下来说明外延基板 EP11 的实施例 6。实施例 6 是具有图 12 的 (a) 部所示的元件结构的激光二极管。图 12 的 (b) 部表示图 12 的 (a) 部所示的元件结构的外延积层的生长温度。

[0118] 参照图 4 与图 12,可知实施例 6 与实施例 1 在以下方面不同,在其它方面与实施例 1 相同。实施例 6 在下述七个不同点与实施例 1 不同。即,在以下方面不同:与掺 Si 的 GaN 层 55a 对应的 n-GaN 层、与掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 对应的 p-GaN 层、及与掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 对应的 p^+ -GaN 层生长时的环境气体中使用氢气;其它层生长时的环境气体使用氮气;以及将与掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 对应的 p-GaN 层的生长速度设定为 $0.43 \mu\text{m}/\text{hour}$,将与掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 对应的 p^+ -GaN 层的生长速度设定为 $0.07 \mu\text{m}/\text{hour}$ 。这些方面是在构成具有良好的接触电阻的 GaN 系半导体发光元件及其制造方法方面重要的要素。除此以外,还有如下方面等不同:将与掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 对应的 p-GaN 层的生长温度、和与掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 对应的 p^+ -GaN 层的生长温度均设定为摄氏 870 度左右;与 InGaN 光导层 59a 对应的 n-InGaN 层具有 $0.145 \mu\text{m}$ 左右的厚度与 0.05 左右的铟 (In) 的组成比;在与 InGaN 光导层 59c 对应的 ud-InGaN 层上形成与掺 Mg 的 InGaN 光导层 65b 对应且具有 $0.040 \mu\text{m}$ 左右的厚度的 p-InGaN 层,而非与 p 型 GaN 电子阻挡层 65a 对应的 p-GaN 层;以及在与掺 Mg 的 GaN 光导层 65c 对应的 p-GaN 层和与掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 对应的 p-GaN 层之间形成具有 $0.40 \mu\text{m}$ 左右的厚度与 0.05 的铝 (Al) 的组成比的 p-AlGaN 层,而非与掺 Mg 的 InAlGa 包覆层 65d 对应的 InAlGa 层。这些方面是在构成具有良好的接触电阻的 GaN 系半导体发光元件及其制造方法方面无关的变更点。

[0119] 在实施例 6 的构成中,以 525nm 左右的波长及 $3\text{kA}/\text{cm}^2$ 左右的阈值电流振荡且 50mW

功率时的动作电压为 5.5 伏左右。对于实施例 6 的构成,使用 TLM 法(Transmission Line Method,传输线法)测定与掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 对应的 p⁺-GaN 层和金属电极(钯(Pd)电极)的接触电阻。根据通过 TLM 法获得的测定结果,p⁺-GaN 层与金属电极(钯(Pd)电极)的接触电阻在整个 p⁺-GaN 层中处于 $5 \times 10^{-4} \Omega \text{ cm}^2$ 以下的范围。

[0120] 实施例 6 中将与掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e 对应的 p-GaN 层的生长温度和与掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 对应的 p⁺-GaN 层的生长温度均设定为相对低温(至少与实施例 1、2 的情形相比为低温)的摄氏 870 度左右。如此,通过降低接触层(p-GaN 层及 p⁺-GaN 层)的生长温度,可抑制接触层的生长中的活性层的热劣化。

[0121] 图 13 ~ 图 15 表示自表面侧分析外延积层的结构所得的 SIMS 结果。另外,用于该分析的外延积层结构是为了准确测量接触层的原子浓度而将无掺杂 GaN 覆盖层积层于掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 之上而成的结构。各图的横轴表示该外延积层的自表面(p 侧的表面)起的深度。各图表示外延积层的自表面(p 侧的表面)起 200nm 左右为止的分析结果。图 13 ~ 图 15 所示的 SIMS 结果中也包含对作为标记物的镁(Mg)、铝(Al)、镓(In)的分析结果。另外,各图的左纵轴表示各原子的浓度,各图的左纵轴表示碳(C)、镁(Mg)的浓度。各图的曲线 GC1、GC2、GC3 表示对碳(C)的测定结果。各图的曲线 GMg1、GMg2、GMg3 表示对镁(Mg)的测定结果。图 13 表示对如下外延积层的测定结果,该外延积层与实施例 6 同样,p-GaN 层(掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e)与 p⁺-GaN 层(与掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 对应)生长时的环境气体中使用氢气,将 p-GaN 层(掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e)的生长速度设为 $0.43 \mu \text{ m/hour}$ 左右,将 p⁺-GaN 层(与掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 对应)的生长速度设为 $0.07 \mu \text{ m/hour}$ 左右而形成。此情况下的外延积层的 p 侧的表面与 Pd 电极的接触电阻为 $5 \times 10^{-4} \Omega \text{ m}^2$ 左右。曲线 GC1 所示的碳(C)的浓度在 p-GaN 层(掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e)中为 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 左右,在 p⁺-GaN 层(与掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 对应)中为 $3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 左右。曲线 G01 所示的氧(O)的浓度在 p-GaN 层(掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e)中为 $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 左右,在 p⁺-GaN 层(与掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 对应)中为 $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 左右。曲线 GMg1 所示的镁(Mg)的浓度在 p-GaN 层(掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e)中为 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 左右,在 p⁺-GaN 层(与掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 对应)中为 $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 左右。

[0122] 图 14 表示对如下外延积层的测定结果,该外延积层在 p-GaN 层(掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e)与 p⁺-GaN 层(与掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 对应)生长时的环境气体中使用氢气,使 p-GaN 层(掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e)的生长速度以与曲线 GMg1 所示的情形相比较快的生长速度(为 $3.5 \mu \text{ m/hour}$ 左右,在 p⁺-GaN 层的情况下为 $0.21 \mu \text{ m/hour}$ 左右)形成。此情况下的外延积层的 p 侧的表面与 Pd 电极的接触电阻为 $2 \times 10^{-3} \Omega \text{ m}^2$ 左右。曲线 GC2 所示的碳(C)的浓度在 p-GaN 层(掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e)中为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 左右,在 p⁺-GaN 层(与掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 对应)中为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 左右。曲线 G02 所示的氧(O)的浓度在 p-GaN 层(掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e)中为 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 左右,在 p⁺-GaN 层(与掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 对应)中为 $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 左右。曲线 GMg2 所示的镁(Mg)的浓度在 p-GaN 层(掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e)中为 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 左右,在 p⁺-GaN 层(与掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 对应)中为 $3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 左右。

[0123] 图 15 表示对如下外延积层的测定结果,该外延积层在 p-GaN 层(掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e)与 p⁺-GaN 层(与掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 对应)生长时的环境气体使用氮气,使 p-GaN 层(掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e)的生长速度以与曲线 GMg1 所示的情形相同的生长速度形成。此情况下的外延积层的 p 侧的表面与 Pd 电极的接触电阻为 $2 \times 10^{-3} \Omega \text{m}^2$ 左右。曲线 GC3 所示的碳(C)的浓度在 p-GaN 层(掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e)中为 $4 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 左右,在 p⁺-GaN 层(与掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 对应)中为 $4 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 左右。曲线 G03 所示的氧(O)的浓度在 p-GaN 层(掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e)中为 $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 左右,在 p⁺-GaN 层(与掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 对应)中为 $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 左右。曲线 GMg3 所示的镁(Mg)的浓度在 p-GaN 层(掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层 65e)中为 $3 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 左右,在 p⁺-GaN 层(与掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层 65f 对应)中为 $3 \times 10^{20} \text{cm}^{-3}$ 左右。

[0124] 根据图 12 所示的结果可知,如曲线 GC1 所示,在接触层(p-GaN 层及 p⁺-GaN 层)生长时的环境气体中使用氢气且生长速度相对较慢的情况下,碳(C)的浓度为 $3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 左右,相对较低。相对于此,如曲线 GC2 所示可知,在接触层(p-GaN 层及 p⁺-GaN 层)生长时的环境气体中使用氢气,生长速度与曲线 GC1 的情况相比仍较快的情况下,碳(C)的浓度为 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 左右,比较高。另外,如曲线 GC3 所示可知,在接触层(p-GaN 层及 p⁺-GaN 层)生长时的环境气体使用氮气的情况下,碳(C)的浓度为 $4 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 左右,相对较低,但结晶性相对较低。进而,在获得曲线 GC1、G01、GMg1 所示的测定结果的情况,即接触层(p-GaN 层及 p⁺-GaN 层)生长时的环境气体中使用氢气且生长速度相对较慢的情况下,外延积层的 p 侧的表面与 Pd 电极的接触电阻为 $5 \times 10^{-4} \Omega \text{m}^2$ 左右,相对较低。

[0125] 产业利用性

[0126] 根据本实施方式,可提供包含无损结晶性而具有比较小的接触电阻与比较高的载流子浓度的 p 型接触层的 III 族氮化物半导体元件。此外,根据本实施方式,可提供制作 III 族氮化物半导体元件的方法,该 III 族氮化物半导体元件包含无损结晶性而具有比较小的接触电阻与比较高的载流子浓度的 p 型接触层。

[0127] 符号说明

[0128] 10 生长炉

[0129] 11 III 族氮化物半导体元件

[0130] 13、51 基板

[0131] 13a、51a、53a、57a、59b-1、63a 主面

[0132] 13b 背面

[0133] 15、53 n 型 III 族氮化物半导体区域

[0134] 17、57 发光层

[0135] 19、63 p 型 III 族氮化物半导体区域

[0136] 21 p 型氮化镓系半导体层

[0137] 23 p 型包覆层

[0138] 25a、25b 接触层

[0139] 27、59b 活性层

[0140] 29 n 侧光导层

- [0141] 31 p 侧光导层
- [0142] 33 阱层
- [0143] 35 势垒层
- [0144] 37、41 电极
- [0145] 39 绝缘膜
- [0146] 39a 开口
- [0147] 55a 掺 Si 的 GaN 层
- [0148] 55b 掺 Si 的 InAlGaN 层
- [0149] 55c 掺 Si 的 GaN 层
- [0150] 59a InGaN 光导层
- [0151] 59c InGaN 光导层
- [0152] 61a 无掺杂 InGaN 势垒层
- [0153] 61b 无掺杂 InGaN 阱层
- [0154] 65a p 型 GaN 电子阻挡层
- [0155] 65b 掺 Mg 的 InGaN 光导层
- [0156] 65c 掺 Mg 的 GaN 光导层
- [0157] 65d 掺 Mg 的 InAlGaN 包覆层
- [0158] 65e 掺杂低浓度 Mg 的 GaN 接触层
- [0159] 65f 掺杂高浓度 Mg 的 GaN 接触层
- [0160] Ax 法线轴
- [0161] CR 结晶坐标系
- [0162] Cx 基准轴
- [0163] EP、EP1、EP11 外延基板
- [0164] J1 界面
- [0165] JC 接触
- [0166] S 坐标系
- [0167] Sc 面
- [0168] VC c 轴向量
- [0169] VN 法线向量

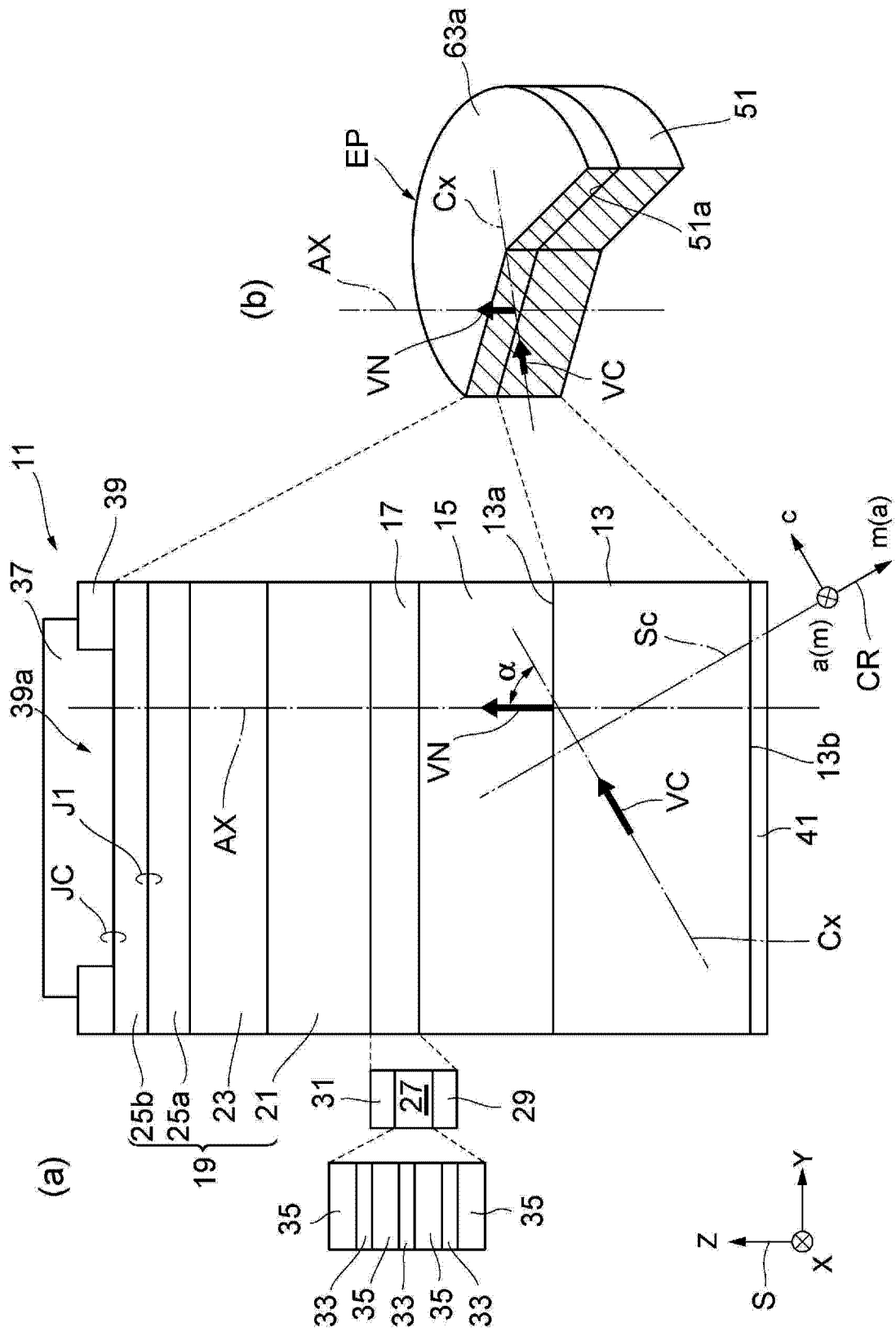


图 1

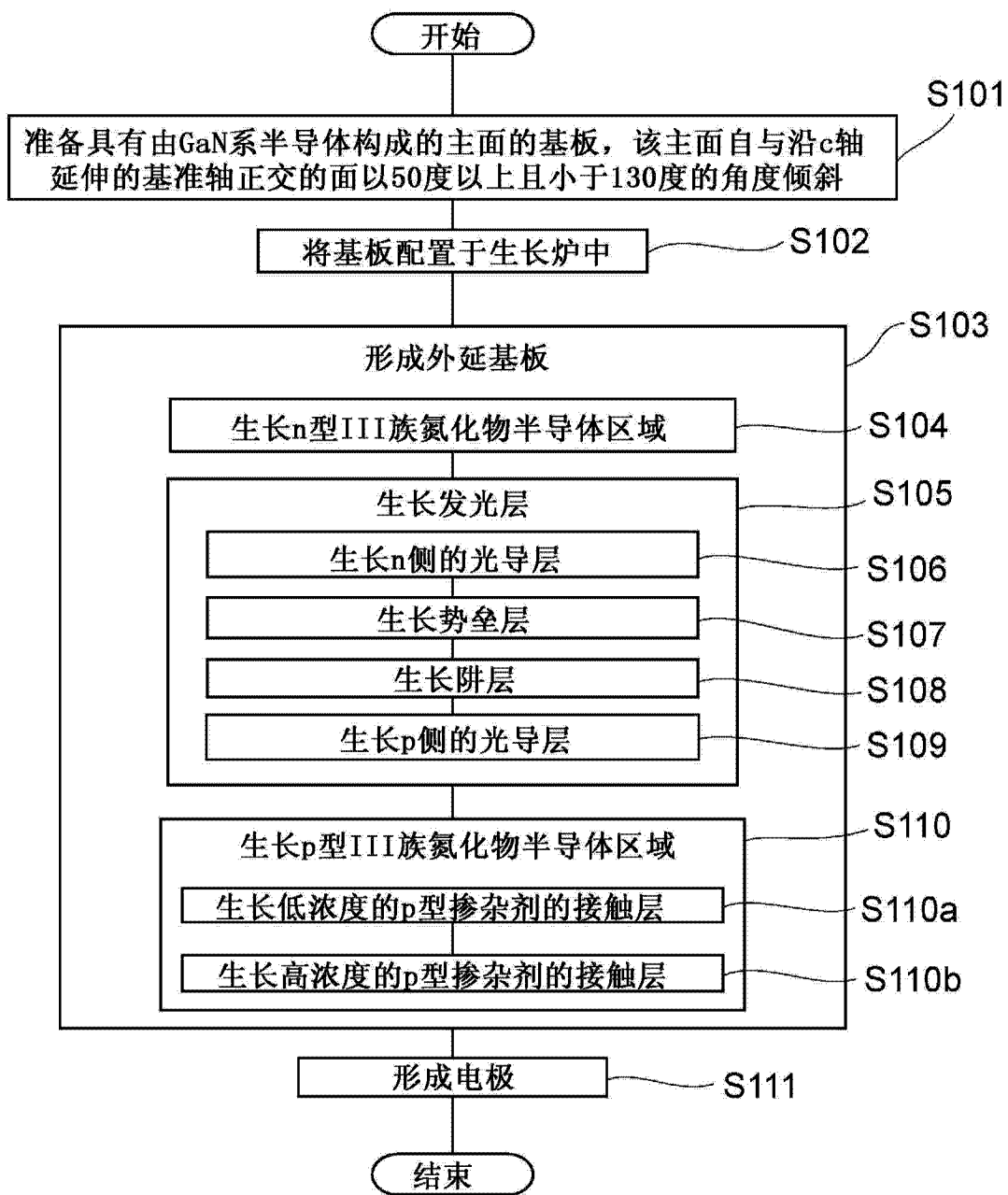


图 2

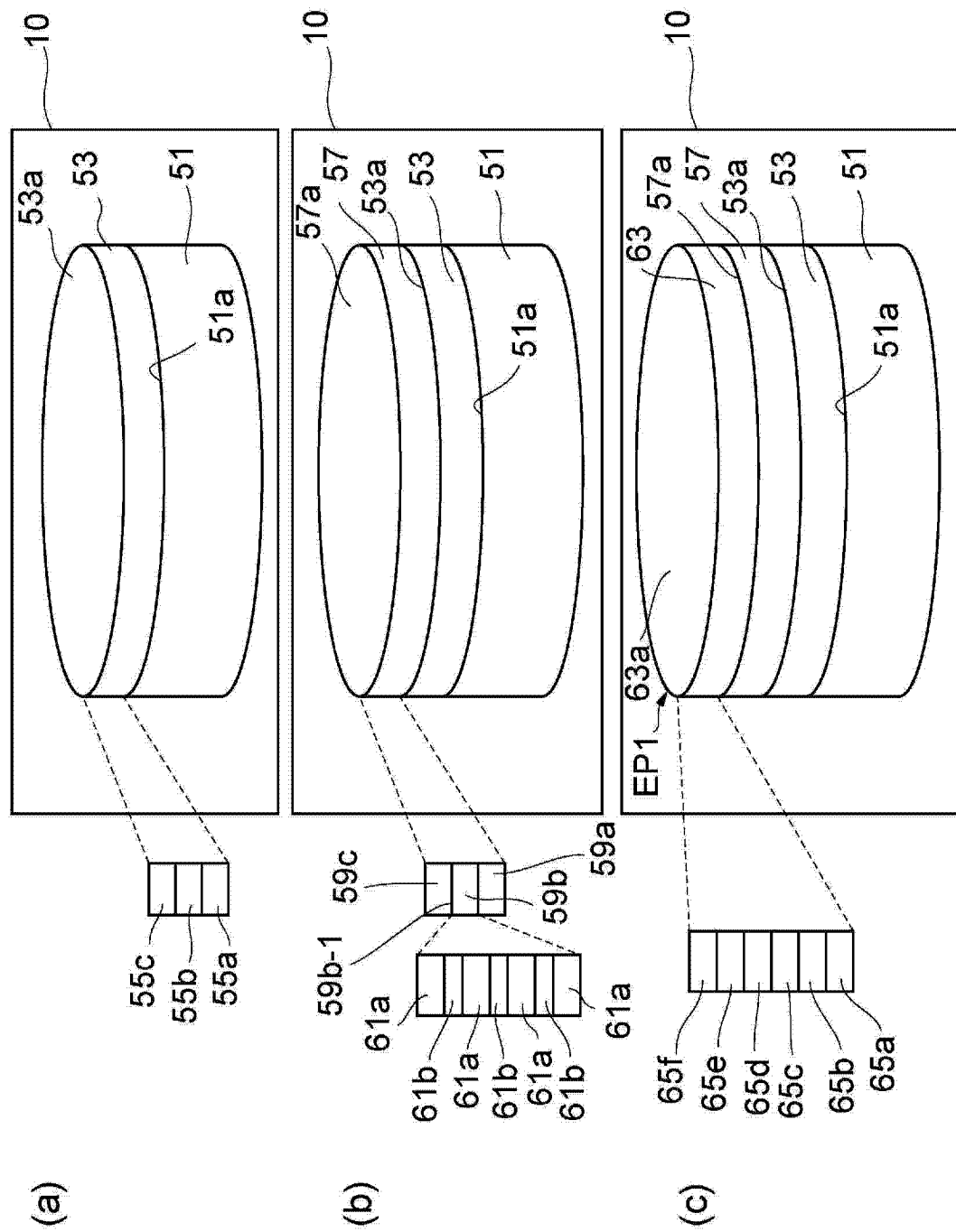


图 3

(a)

p ⁺ -GaN
p-GaN
p-In _{0.03} Al _{0.14} GaN 0.40 μm
p-GaN 0.250 μm
p-In _{0.03} GaN 0.050 μm
p-GaN 20nm
ud-In _{0.03} GaN 0.075 μm
ud-In _{0.30} GaN 3nm
n-In _{0.03} GaN 0.115 μm
n-GaN 0.250 μm
n-In _{0.03} Al _{0.14} GaN 1.2 μm
n-GaN 1.1 μm
GaN基板

(b)

层	T _c
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
热处理	1050°C

图 4

(a)

p ⁺ -GaN
p-GaN
p-In _{0.03} Al _{0.14} GaN 0.40 μm
p-GaN 0.250 μm
p-In _{0.03} GaN 0.050 μm
p-GaN 20nm
ud-In _{0.03} GaN 0.075 μm
ud-In _{0.30} GaN 3nm
n-In _{0.03} GaN 0.115 μm
n-GaN 0.250 μm
n-In _{0.03} Al _{0.14} GaN 1.2 μm
n-GaN 1.1 μm
GaN基板

(b)

层	T _c
p ⁺ -GaN	1000°C
p-GaN	1000°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
热处理	1050°C

图 5

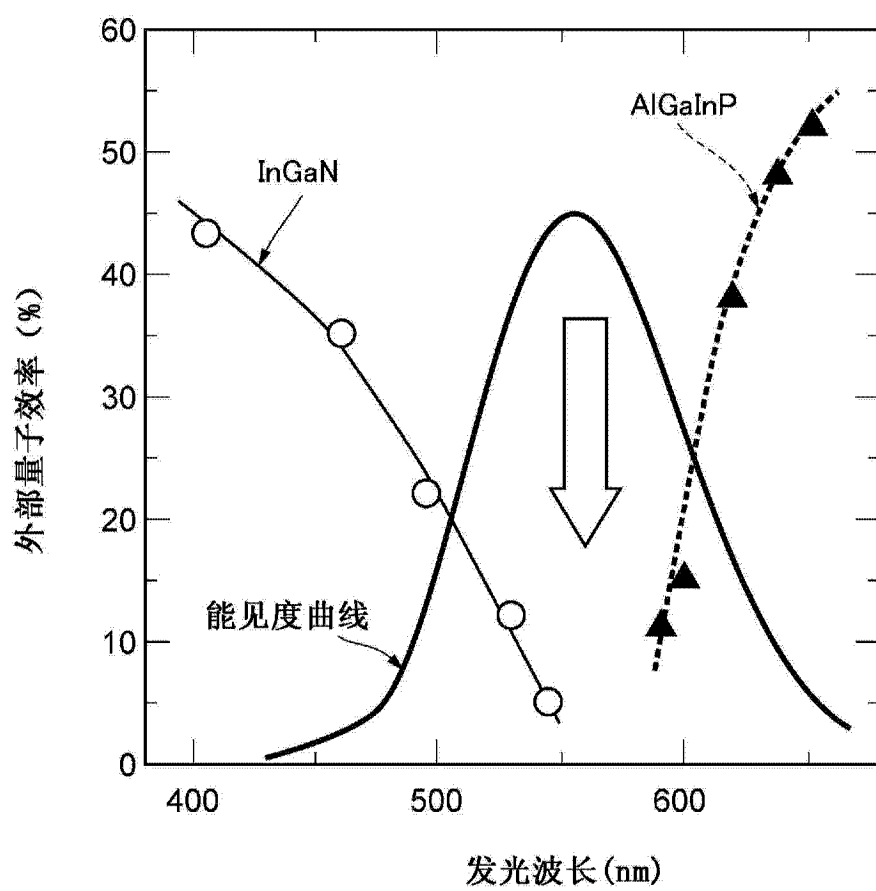


图 6

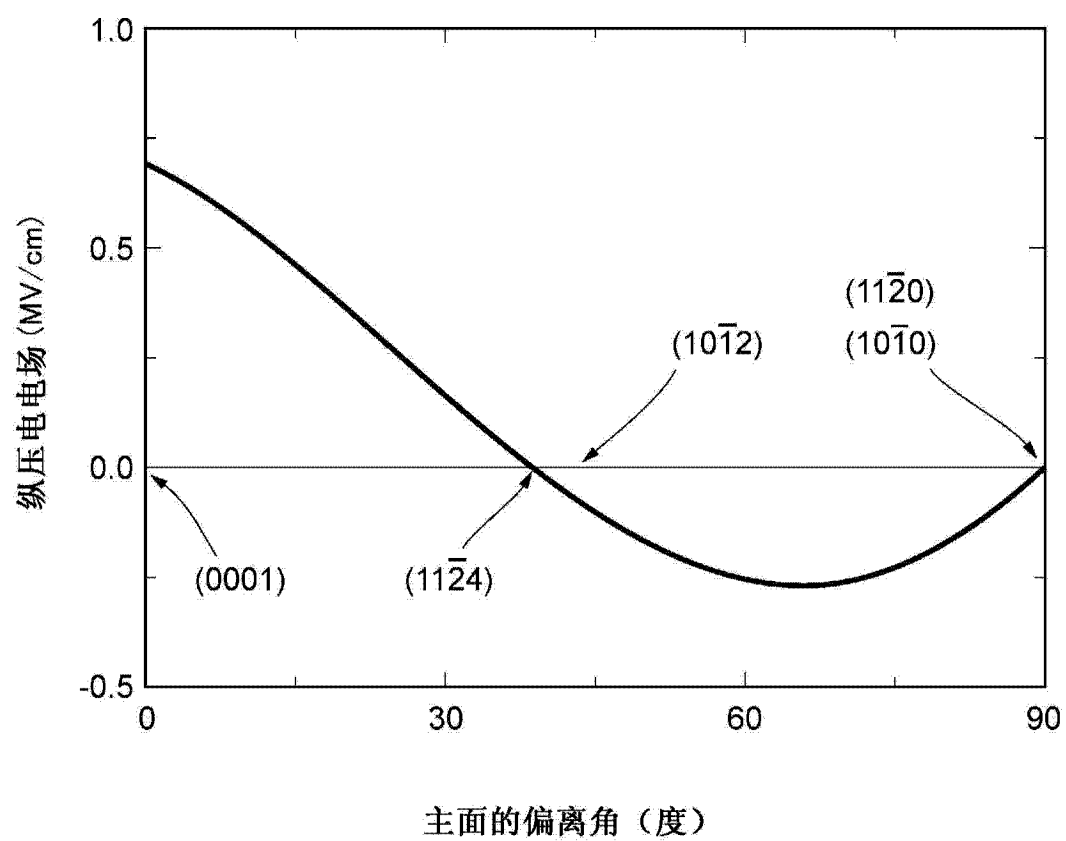


图 7

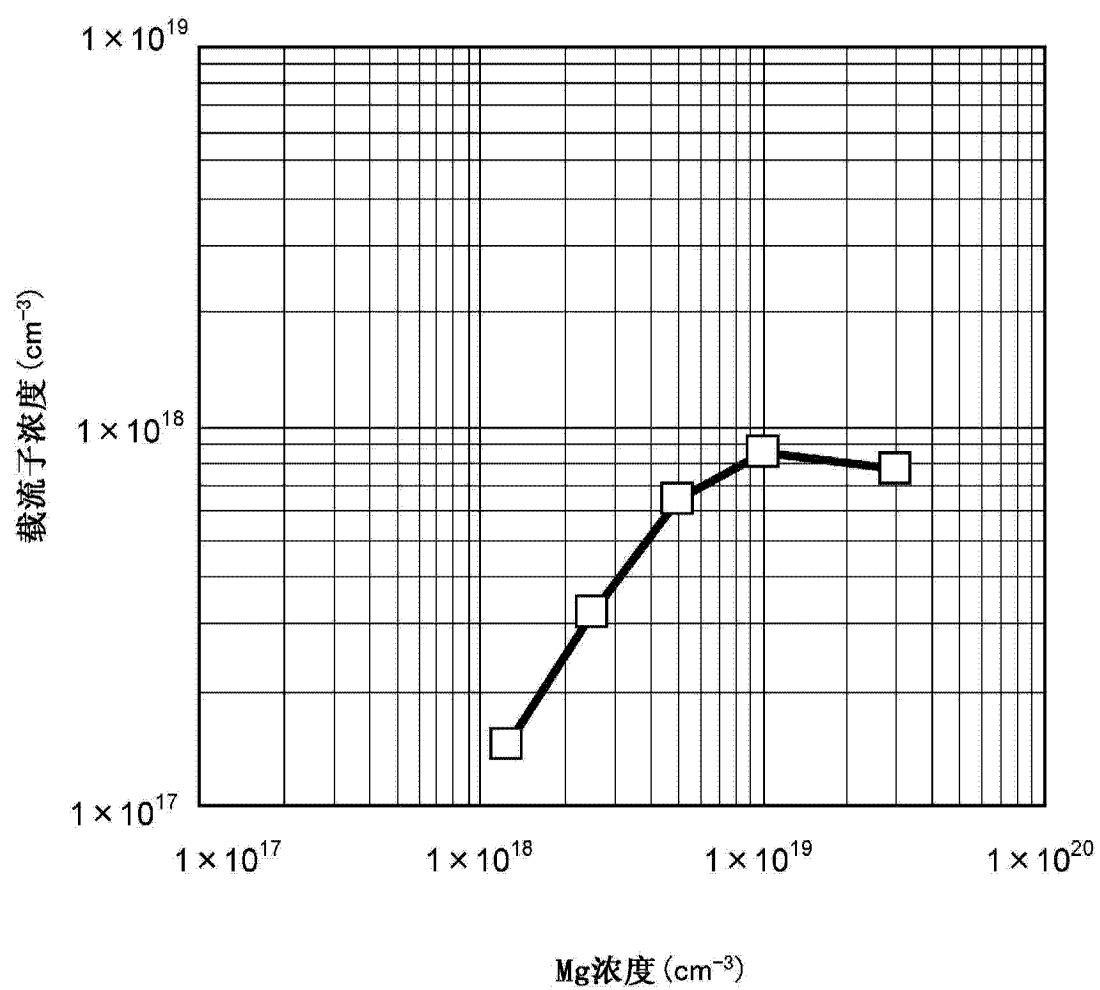


图 8

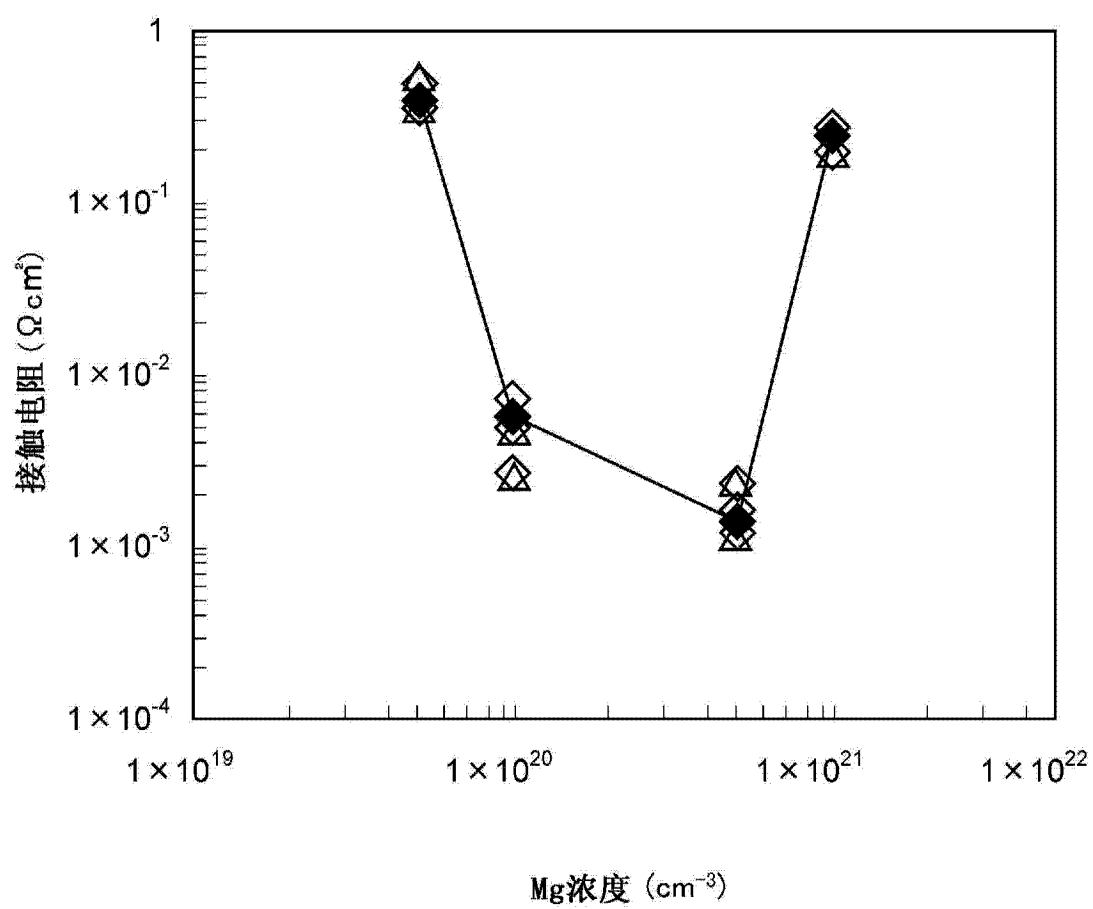


图 9

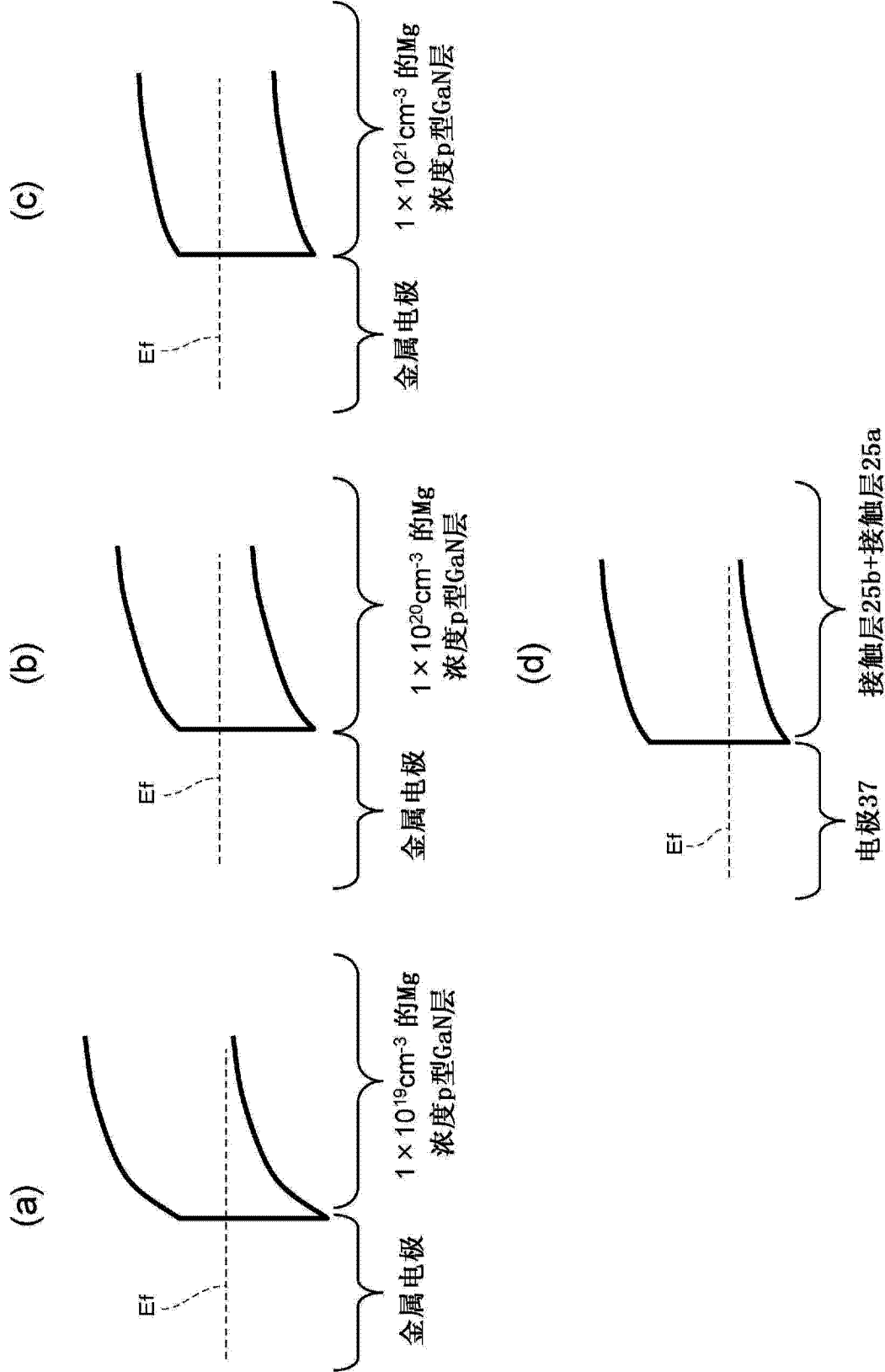


图 10

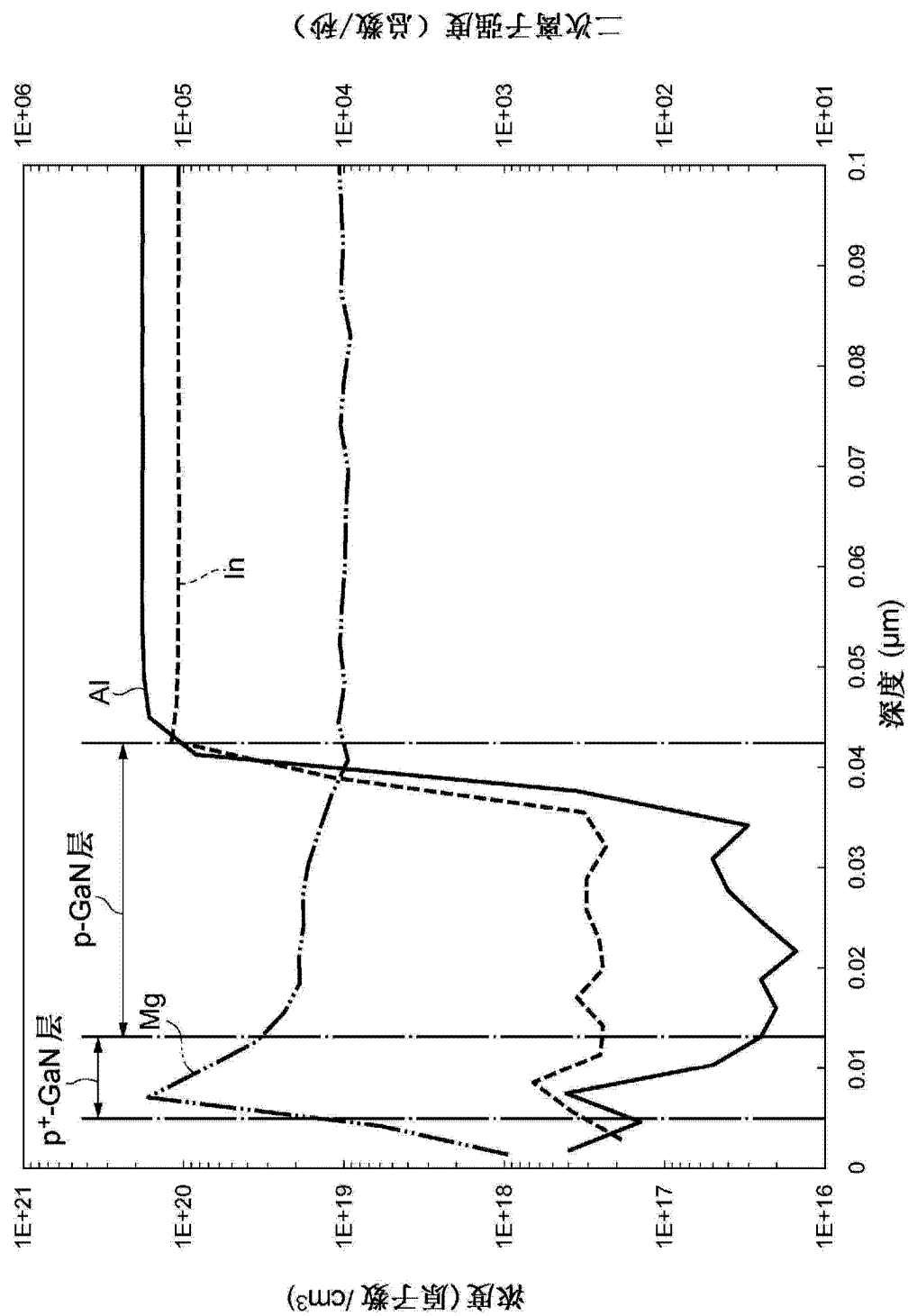


图 11

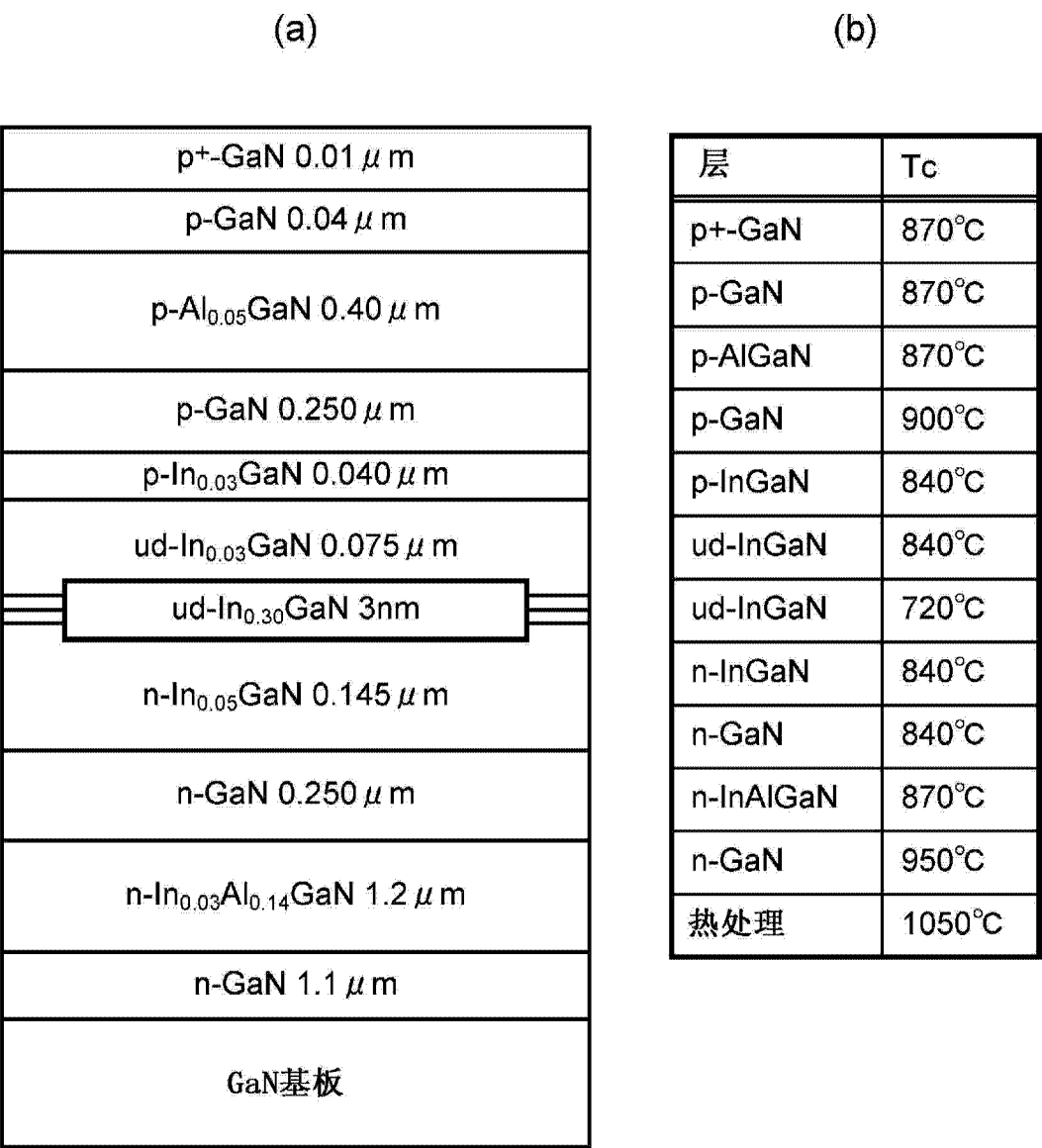


图 12

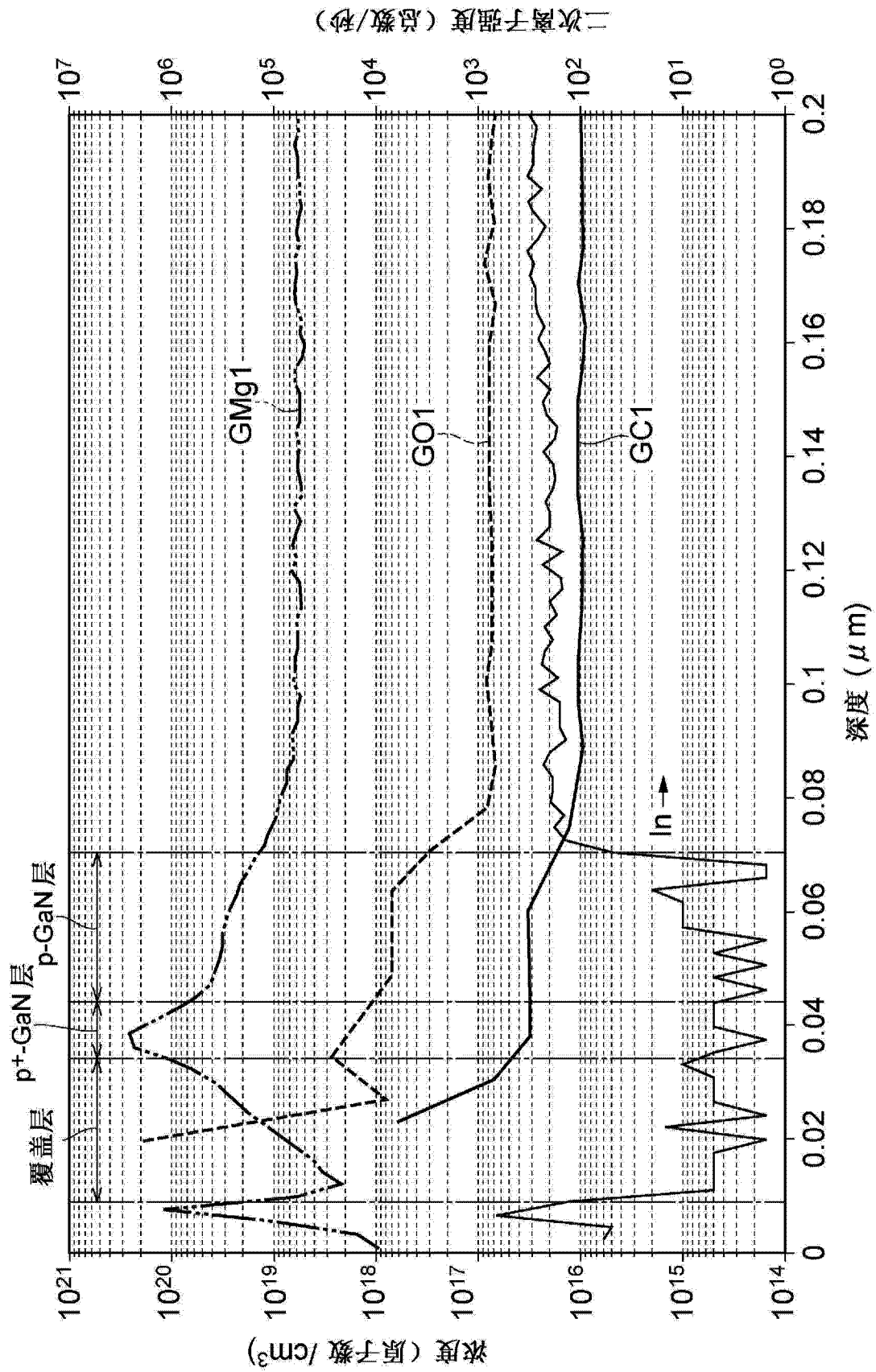


图 13

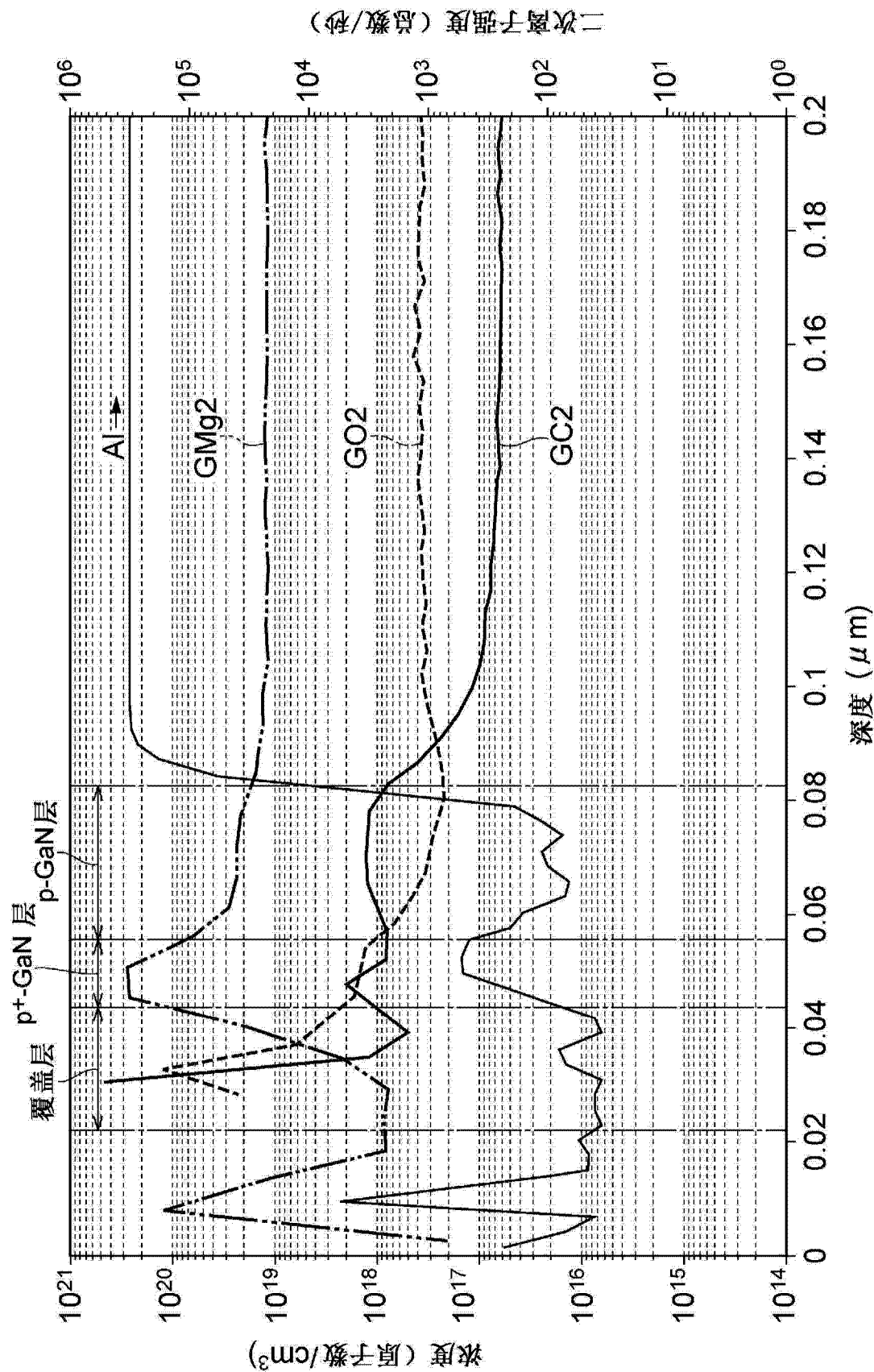


图 14

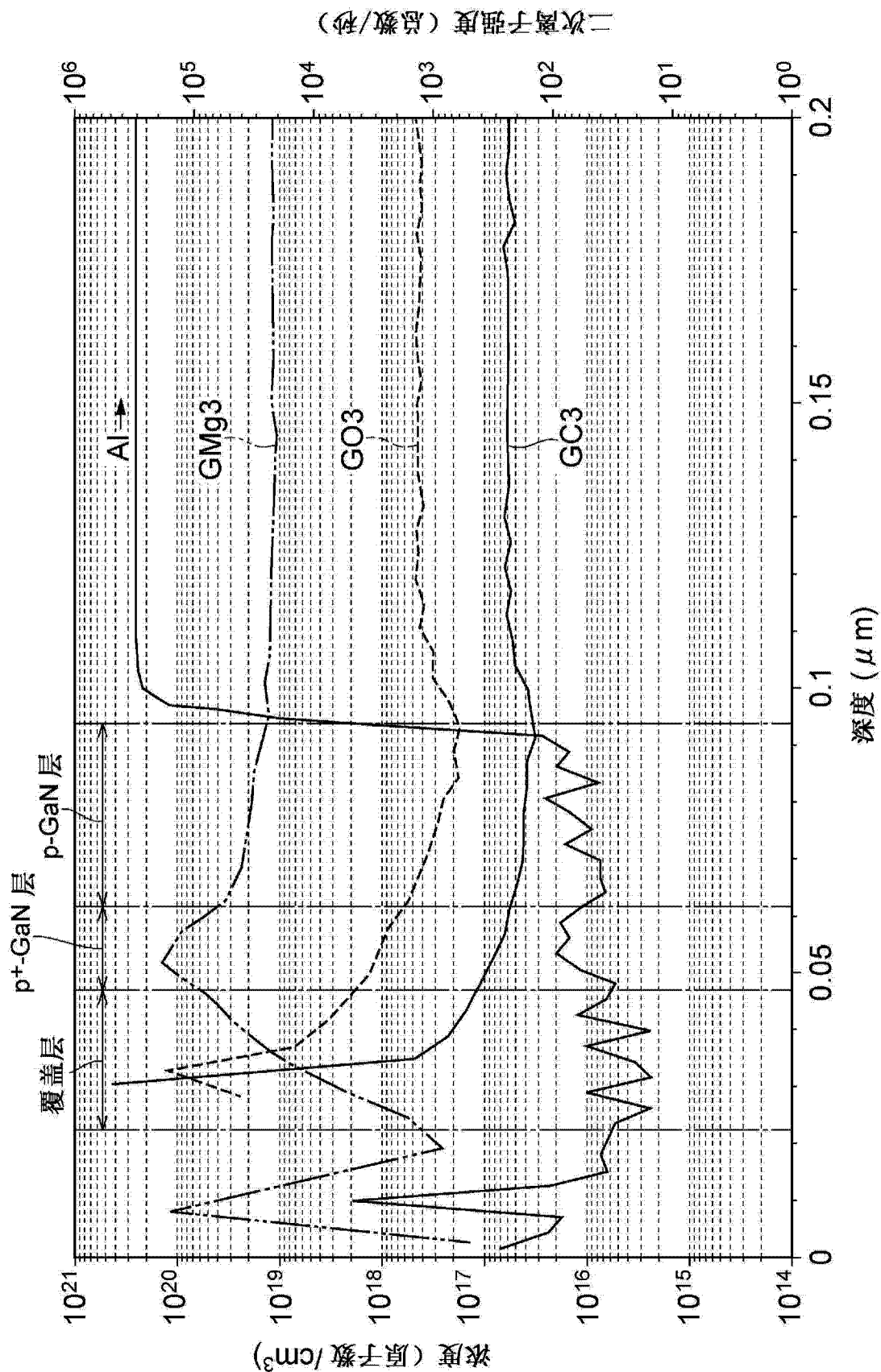


图 15