[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl[7]
H01S 5/323

[12] 发明专利说明书

[21] ZL 专利号 00810470.0

[45] 授权公告日 2005 年 3 月 16 日

[11] 授权公告号 CN 1193470C

[22] 申请日 2000.7.14 [21] 申请号 00810470.0
[30] 优先权
[32] 1999. 7.16 [33] JP [31] 203930/1999
[86] 国际申请 PCT/US2000/019387 2000.7.14
[87] 国际公布 WO2001/006608 英 2001.1.25
[85] 进入国家阶段日期 2002.1.16
[71] 专利权人 安捷伦科技有限公司
地址 美国加利福尼亚
[72] 发明人 竹内哲也 渡边智 金子和
山田范秀 天野浩 赤崎勇
审查员 肖 霞

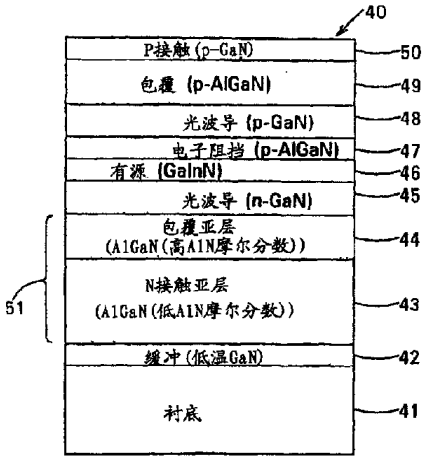
[74] 专利代理机构 中国专利代理(香港)有限公司
代理人 吴立明 梁 永

权利要求书 2 页 说明书 17 页 附图 4 页

[54] 发明名称 氮化物半导体分层结构以及结合该分层结构部分的氮化物半导体激光器

[57] 摘要

一种包括缓冲层和位于缓冲层之上的复合层的氮化物半导体分层结构。该缓冲层是一个包括 AlN 的低温沉积的氮化物半导体材料层。该复合层是一个包括 AlN 的单晶氮化物半导体材料层。该复合层包括临近缓冲层的第一亚层和位于该第一亚层之上第二亚层。该复合层的单晶氮化物半导体材料在第一亚层中具有第一 AlN 摩尔分数以及在第二亚层中具有第二 AlN 摩尔分数。第二 AlN 摩尔分数大于第一 AlN 摩尔分数。氮化物半导体激光器包括上述的氮化物半导体分层结构的一部分，并且还包括位于该复合层之上的光波导层和位于该光波导层之上的有源层。



ISSN1008-4274

1.一种氮化物半导体激光器，其中包括:

包括AlN的低温沉积的氮化物半导体材料的缓冲层，该低温沉积的氮化物半导体材料在低于单晶生长的温度被沉积；以及

在该缓冲层上的包括AlGaN的单晶氮化物半导体材料的复合层；该复合层包括:

临近该缓冲层的接触亚层，以及

位于该接触亚层之上的包覆亚层，其中

单晶氮化物半导体材料在接触亚层中具有第一AlN摩尔分数以及在包覆亚层中具有第二AlN摩尔分数，第二AlN摩尔分数大于第一AlN摩尔分数。

2.权利要求1的氮化物半导体激光器，其中还包括:

一个另外的包含AlGaN的单晶氮化物半导体材料的复合层，该另外的复合层包括:

另外接触亚层，以及

另外包覆亚层；以及

位于该复合层与该另外复合层之间的有源层，其中:

另外包覆亚层比另外接触亚层更接近该有源层，以及

该另外复合层的单晶氮化物半导体材料在另外接触亚层中具有第一另外AlN摩尔分数并且在该另外包覆亚层中具有第二另外AlN摩尔分数，第二另外AlN摩尔分数大于第一另外AlN摩尔分数。

3.权利要求1的氮化物半导体激光器，其中第二AlN摩尔分数与第一AlN摩尔分数之差不大于0.1。

4.权利要求3的氮化物半导体激光器，其中第二AlN摩尔分数与第一AlN摩尔分数之差大于0.03。

5.权利要求1的氮化物半导体激光器，其中还包括位于该缓冲层之下的蓝宝石衬底。

6.权利要求1的氮化物半导体激光器，其中还包括位于该缓冲层之下的衬底，该衬底包括SiC和GaN中的一个。

7.权利要求1的氮化物半导体激光器，其中还包括位于该缓冲层之下的衬底结构，该衬底结构包括:

衬底

GaN 层；以及

被夹在衬底与 GaN 层之间的低温沉积的氮化物半导体材料层。

8.权利要求 1 的氮化物半导体激光器，其中对缓冲层的低温沉积半导体材料与复合层的单晶氮化物半导体材料都采用相同的掺杂质进行掺杂。

9.权利要求 1 的氮化物半导体激光器，其中

缓冲层的厚度≤100 纳米；

缓冲层的低温沉积的氮化物半导体材料是氮化铝镓，其中铝的摩尔分数在 0.03 到 1 之间；

复合层的单晶氮化物半导体材料是氮化铝镓；以及

包覆亚层的厚度至少为 600 纳米以及铝的摩尔分数在 0.05 到 1 的范围内。

10.权利要求 1 的氮化物半导体激光器，其中缓冲层的低温沉积的氮化物半导体材料的 AlN 摩尔分数至少是 0.01。

11.权利要求 10 的氮化物半导体激光器，其中复合层的单晶氮化物半导体材料的 AlN 摩尔分数至少是 0.03。

12.权利要求 1 的氮化物半导体激光器，其中：

该复合层还包括位于接触亚层和包覆亚层之间的梯度亚层；以及

在该梯度亚层中，该复合层的单晶氮化物半导体材料的 AlN 摩尔分数从第一 AlN 摩尔分数变化至第二 AlN 摩尔分数。

13.权利要求 12 的氮化物半导体激光器，其中，在该梯度亚层中，复合层的单晶氮化物半导体材料的 AlN 摩尔分数通过(a)线性和(b)抛物线二种方式之一的方式从第一 AlN 摩尔分数变化至第二 AlN 摩尔分数。

14.权利要求 1 的氮化物半导体激光器，其中包括：

位于该复合层之上的光波导层；以及

位于该光波导层之上的有源层。

15. 权利要求 14 的氮化物半导体激光器，其中：

该包覆亚层有一个厚度；以及

至少包覆亚层厚度和第二 AlN 摩尔分数中的一个拥有这样的值使得采用该值的激光器所产生的光的远场图显示出单峰。

氮化物半导体分层结构以及结合该分层结构部分的氮化物半导体激光器

发明领域

本发明涉及氮化物半导体分层结构，并且更具体而言是涉及一种氮化物半导体分层结构，该结构包括一个相对厚的包含 AlN 的单晶氮化物半导体材料的复合层，该复合层位于一个低温沉积的包含 AlN 的氮化物半导体材料的缓冲层上。

发明背景

由 III 族氮化物半导体材料制造的氮化物半导体器件拥有作为电光器件诸如激光器和发光二极管的基本前景。这些材料的通式为 $Al_xGa_{1-x-y}In_yN$，其中 Al 是铝，Ga 是镓，In 是铟，N 是氮，以及 x 和 y 是组份比。例如，据报道，这些材料用于产生经过紫外部分的蓝光光谱。但是，采用氮化物半导体材料制成的常规结构的激光器的一个主要的实际问题是这种激光器产生的光的远场图显示出多峰。该远场图是该光的近场图的富利叶（Fourier）变换。例如，见 D.Hofstetter 等，“光泵浦的 $In_{0.15}Ga_{0.85}N/In_{0.05}Ga_{0.95}N$ 多量子阱激光结构中的高次横模激发”，应用物理快报 70 卷，1650 页，1997 年（Excitation of a Higher Order Transverse Mode in an $In_{0.15}Ga_{0.85}N/In_{0.05}Ga_{0.95}N$ Multi Quantum Well Laser Structure, 70 Appl. Phys. Lett., 1650(1997)）。所发光具有显示多峰的远场图的激光器的应用基本上少于所发光具有显示单峰的远场图的激光器。

因为激光器中的光波导层及其下面的包覆层所形成的光约束结构提供的光约束不够，所以这种常规激光器发出光的远场图显示出多峰，而不是想要的单峰。该光约束结构允许光从光波导层泄漏到包覆层下的接触层中。从而该接触层起到寄生光波导的作用，引起高次模中的的杂散激光振荡。该接触层被用来向该激光器的有源层中注入电流。

获得足够光约束的尝试包括采用增加厚度的包覆层以及增大光波导层与包覆层半导体材料之间折射指数的差。但是在采用常规方式实施时，这些措施增大了激光器结构中裂缝的影响范围．这显著降低了

产额。

图 1 是常规氮化物半导体分层结构 10 的示意性的结构侧视图，采用这种分层结构可以制造常规的氮化物半导体激光器。在本公开中的所有半导体分层结构和半导体激光器的附图中，为更加清晰地展示这些层，这些层的厚度相对其宽度而言被极大地夸大了，较薄层厚度的夸大程度比起较厚层的厚度来说更大。

氮化物半导体层 10 包括低温沉积的 GaN 缓冲层 12、n 型 GaN 的 n 接触层 13、n 型 AlGaN 的包覆层 14、n 型 GaN 的光波导层 15、GaInN 的有源层 16、p 型 AlGaN 的电子阻挡层 17、p 型 GaN 的光波导层 18、p 型 AlGaN 的包覆层 19 和 p 型 GaN 的 p 接触层 20。层 12 到层 20 在衬底 11 上连续形成。衬底材料是蓝宝石、SiC、尖晶石、MgO、GaAs、硅或一些其它合适的材料。

缓冲层 12 是在温度 550°C 条件下沉积的 35 纳米厚的 GaN 层，该温度低于发生单晶生长的温度。n 接触层 13 是用约 $1x10^{18}cm^{-3}$ 的硅进行 n 型掺杂的 4 微米厚的 GaN 层。包覆层 14 是 600 纳米厚的 AlGaN，该层具有 0.06 的 AlN 摩尔分数并且采用约 $1x10^{18}cm^{-3}$ 的 Si 进行 n 型掺杂。光波导层 15 是 100 纳米厚的采用约 $1x10^{18}cm^{-3}$ 的 Si 进行 n 型掺杂的 GaN 层，有源层 16 包括 5 对亚层，每一对亚层包括 3 纳米厚的具有 0.1 的 InN 摩尔分数的 GaInN 亚层和 6 纳米厚的具有 0.03 的 InN 摩尔分数的 AlGaN 亚层。电子阻挡层 17 是 15 纳米厚的 AlN 摩尔分数为 0.15 的的并且用约 $5x10^{19}cm^{-3}$ 的 Mg 进行 p 型掺杂的 AlGaN 层。光波导层 18 是 100 纳米厚的用约 $5x10^{19}cm^{-3}$ 的 Mg 进行 p 型掺杂的 GaN 层。包覆层 19 是 500 纳米厚的具有 0.06 的 AlN 摩尔分数的并且用约 $5x10^{19}cm^{-3}$ 的 Mg 进行 p 型掺杂的 AlGaN 层。P 接触层 20 是 100 纳米厚的用约 $1x10^{20}cm^{-3}$ 的 Mg 进行 p 型掺杂的 GaN 层。

在日本专利申请: no.H10-313993(在先申请)中对一种改进的氮化物半导体分层结构进行了描述，采用这种氮化物半导体分层结构可以制造出产生显示单峰远场图的光的激光器。该在先申请被转让给本申请的受让人并且已经于 1998 年 10 月 16 日提交。该在先申请的英语版已经作为国际申请: WO 00/24097 被公开。本公开结合了该在先申请以作为参照。

该在先申请中被公开的氮化物分层结构缺少图 1 所示的分层结构

的电子阻挡层 17，但是包括一个另外的位于 n 型 GaN 接触层 13 和 n 型 AlGaN 包覆层 14 之间的缓冲层。该另外的缓冲层是包括 AlN 的低温沉积的半导体材料层。该另外的缓冲层使得在其上生长的包覆层 14 具有增加的厚度和较低的裂缝影响范围。在先申请公开的氮化物半导体分层结构中，可以对包覆层的厚度和包覆层的 AlN 摩尔分数二者之一或二者都进行调节以使采用该分层结构制造的激光器发出的光具有一个显示出单峰远场图，该远场图表明在远场中的强度分布。

虽然可以采用该在先申请中公开的分层结构来制造产生具有显示出单峰的远场图的光的激光器，但是人们需要结构比较简单的高质量的激光器。

所以，所需要的氮化物半导体分层结构是简单的结构并且由该结构可以制造出产生其远场图显示出单峰的光的半导体激光器，并且它具有低的阈电流和低的功率消耗。

所需要的氮化物半导体分层结构能够提供增加的光约束，它具有降低的制造成本并且在光电器件、其它波导结构和其它半导体器件中提供改良的性能。

发明概述

本发明提供一种氮化物半导体分层结构，该结构包括缓冲层和在缓冲层上的复合层。该缓冲层是一层包括 AlN 的低温沉积的氮化物半导体材料。复合层是一层包括 AlN 的单晶氮化物半导体材料。复合层包括与缓冲层相邻的第一亚层以及在第一亚层上的第二亚层。复合层的单晶氮化物半导体材料在第一亚层中具有第一 AlN 摩尔分数以及在第二亚层中具有第二 AlN 摩尔分数。第二 AlN 摩尔分数大于第一 AlN 摩尔分数。

本发明还提供氮化物半导体激光器，该激光器包括上述的氮化物半导体分层结构部分以及还包括在复合层上的光波导层和在光波导层上的有源层。

在本发明提供的简单的氮化物半导体分层结构中，可以对厚 AlGaN 复合层进行 p 型的或者 n 型掺杂。AlGaN 复合层具有一个通过层厚来改变的 AlN 摩尔分数以便在 AlGaN 复合层中限定二个亚层。亚层不同的摩尔分数优化了亚层特性使得亚层发挥包覆层和接触层的功能。相应

地，这二个亚层被分别称为包覆亚层和接触亚层。该包覆亚层与光波导层位于 AlGaN 复合层之上形成一个提供足够光约束的光约束结构。在包覆亚层中，AlGaN 复合层具有相对高的 AlN 摩尔分数。在接触亚层中，AlGaN 复合层具有相对低的 AlN 摩尔分数以便为接触亚层提供影响横向电流注入所需的高电导率而且不产生过大的正向电压降。通过在材料的复合层中仅仅提供材料的 AlN 摩尔分数有差别的接触层与包覆层的功能，基本上降低了氮化物半导体分层结构中的裂缝的影响范围。

因为 AlGaN 复合层虽然具有基本厚度，但是裂缝影响范围仍然较低，所以根据本发明的由上述氮化物半导体分层结构制造的氮化物半导体激光器具有高产量。因为 AlGaN 复合层的包覆亚层的相对大的 AlN 摩尔分数以及 AlGaN 复合层的包覆亚层的厚度导致形成充裕的光约束，所以这种激光器产生的光的远场图显示出单峰。因为 AlGaN 复合层的 n 接触亚层的高电导率和基本厚度，所以这种激光器还具有低的正向电压降。

因为根据本发明的激光器产生的光的远场图显示出单峰，所以这种激光器非常适合用于光信息记录器件或需要单峰发射轮廓形状的其它应用场合。并且因为这种激光器具有大大降低的正向电压降、较低的功率消耗以及较少的热量耗散，所以这种激光器显著地延长了使用寿命。

附图简要说明

图 1 是常规的基于 GaN 分层结构的结构的示意性侧视图，采用这种结构可以制造常规的氮化物半导体激光器。

图 2 是由图 1 所示的常规分层结构制造的激光器实例发射的光的远场图的曲线图.

图 3 是根据本发明的氮化物半导体分层结构的第一实施方式的示意性的侧视图。

图 4 是由图 3 所示的氮化物半导体分层结构制造的根据本发明的氮化物半导体激光器的示意性的侧视图。

图 5 是一个曲线图，它展示出从根据本发明的氮化物半导体激光器的一个实例中发射光的远场图，该氮化物半导体激光器是采用根据本

发明的氮化物半导体激光器结构制造的。

图 6 是一个曲线图，它展示出根据本发明的氮化物半导体激光器的一个实例的正向特性（曲线(a)）和比较激光器（曲线(b)）。

图 7 是一个曲线图，它展示出根据本发明的氮化物半导体激光器的一个实例的阈特性（曲线(a)）和比较激光器（曲线(b)）。

图 8 是一个示意性侧视图，它展示出结合了另外 AlN 复合层的根据本发明的氮化物半导体激光器结构的第二实施方式。

图 9A－9C 是通过改变 AlGaN 复合层厚度来改变 AlGaN 复合层摩尔分数的不同方式的曲线图。

发明详述

在如图 1 所示的常规的氮化物半导体分层结构 10 中，包覆层 14 的 AlGaN 与接触层 13 的 GaN 之间的晶格失配可能会在该包覆层以及在其上生长的层中引发裂缝。这种裂缝会显著降低采用所示常规分层结构的激光器的产量。为减小裂缝的影响范围，通常将包覆层 14 的厚度限制在 600 纳米以内，并且通常将包覆层 14 半导体材料的 AlN 摩尔分数限制在 0.06 以下。但是，如图 2 所示由光波导层 15 和满足上述限制条件的包覆层 14 形成的光约束结构所具有的光约束是不够的。

图 2 的曲线图展示出采用常规氮化物半导体分层结构 10 制成的激光器实例发出光的远场图，在该结构中，包覆层 14 满足上述限制条件。在图 2 中，用 Y 轴以任意单位表示该激光器发出光的强度，并且用 X 轴以“度”为单位表示该激光器发出光与激光器光轴所成角度。该远场图显示出多峰。这表明由上述光约束结构提供的光约束是不够的，从而在 n 接触层 13 中有光存在。图 2 所示远场图所对应的激光器具有的光约束因子为 2.7%。

上述的在先申请公开了一种可以用于制造氮化物半导体激光器的氮化物半导体分层结构。在先申请所公开的分层结构中，通过在 AlGaN 包覆层 14 与 GaN 的 n 接触层 13 之间插入另外的 30 纳米厚的缓冲层降低了裂缝的影响范围，该缓冲层是低温沉积的半导体材料层。该另外的缓冲层使包覆层 14 的厚度降低到 1 微米并将包覆层 14 的半导体材料的 AlN 摩尔分数增加到 0.1 而没有在该包覆层中产生显著的裂缝。这种包覆层使得该光约束结构能够给激光器提供充分的光约束以生成

显示单峰的远场图。但是如上所述，人们期望采用比在先申请公开的结构和制造工艺更加简单的结构和制造工艺来获得相似的结果。

第一种简化在先申请所公开的结构和制造工艺并仍然保持其优点的方法是用一个厚而且均匀的 n 型单晶 AlGaN 半导体材料层代替 GaN 的 n 接触层、另外的缓冲层和 AlGaN 包覆层，该 n 型单晶 AlGaN 半导体材料层将 n 接触层和包覆层组合在一起。该单 AlGaN 层的材料可以拥有相对高的 AlN 摩尔分数使单 AlGaN 层与光波导层 15 形成能提供足够光约束的光约束结构。为了本公开目的，当结合了一个光约束结构的激光器生成的光的远场图显示出单峰时，则认为该光约束结构提供了足够的光约束。

但是单 AlGaN 层有足够高 AlN 摩尔分数以使该层形成能提供足够光约束的光约束结构，该单晶 AlGaN 层的材料会导致材料体电阻和单 AlGaN 层的接触电阻达到一个无法接受的高程度，这会妨碍单 AlGaN 层作为有效的横向电流注入层使用以及在该激光器上引起可接受的高电压降。

本发明通过将 AlGaN 复合层用作 n 接触层和包覆层解决了这一问题。这种 AlGaN 的复合层被称为 AlGaN 复合层。该 AlGaN 复合层包括若干亚层其中每一个亚层具有不同 AlN 摩尔分数，即：一个亚层的单晶 AlGaN 半导体材料具有较低的 AlN 摩尔分数，而一个亚层的单晶 AlGaN 半导体材料具有较高的 AlN 摩尔分数。具有较低 AlN 摩尔分数的亚层的电阻也较低，它位于低温沉积的 AlGaN 缓冲层附近，用作将横向电流注入到激光器中的接触层，并被称为 AlGaN 的 n 接触亚层。具有较高 AlN 摩尔分数的亚层位于 n 型 GaN 光波导层附近并形成带有 n 型 GaN 光波导层的光约束结构。该亚层被称为 AlGaN 包覆亚层。AlGaN 包覆亚层具有较高的电阻而且其厚度基本上小于 AlGaN 的 n 接触亚层。尽管 AlGaN 包覆亚层的材料具有较高的 AlN 摩尔分数，因此与 AlGaN 的 p 接触亚层的电阻率相比该亚层的电阻率较高，但是 AlGaN 包覆亚层的厚度基本上较小，这妨碍了利用该亚层较高的电阻率来显著提高 n 电极与有源区之间路径的总电阻。

在 AlGaN 复合层中，AlN 摩尔分数可以在 AlGaN 的 n 接触亚层和 AlGaN 的包覆亚层之间突变，实际上产生二个明显不相同的 AlGaN 层，每一层具有不同的 AlN 摩尔分数。作为一种替代情况，AlN 摩尔分数可

以在 AlGaN 的 n 接触亚层和 AlGaN 的包覆亚层之间渐变，生成一个通过层厚的不同来使摩尔分数不同的单层。不管摩尔分数以何种方式变化，AlGaN 的包覆亚层的厚度应当不大于提供足够光约束所要求的厚度。

与图 1 所示的分层结构相比，如上所述，一种包括一个单 AlGaN 复合层的氮化物半导体分层结构提供了基本上增大的光约束，该单 AlGaN 复合层包括若干具有不同 AlN 摩尔分数的亚层。另外，该复合层的亚层之间的晶格失配小，从而该分层结构中裂缝影响范围基本上小。只需稍微增大与有源区之间路径的电阻就可以获得这些优点。

为减小根据本发明的氮化物半导体分层结构的裂缝的影响范围，AlGaN 的 n 接触亚层，即：具有较低 AlN 摩尔分数的亚层，的 AlN 摩尔分数最好至少为 0.01。另外，为减小裂缝的影响范围和减小 n 接触层与有源层之间路径的电阻，AlGaN 的 n 接触亚层和 AlGaN 的包覆亚层之间的 AlN 摩尔分数之差最好在 0.03 到 0.10 的范围内。实际优选的差依赖于 AlGaN 的包覆亚层的 AlN 摩尔分数。AlGaN 的包覆亚层的摩尔分数应当至少为 0.05，以及高达单位 1（1）。

如上所述，当已经形成了结合 AlGaN 复合层的氮化物半导体分层结构时，该 AlGaN 复合层包括二个具有不同 AlN 摩尔分数的 AlGaN 亚层，利用反应离子刻蚀(RIE)或者其它适合的刻蚀工艺将在 n-AlGaN 接触亚层的一部分上生长的层部分刻蚀掉以暴露出 AlGaN 接触亚层。那么 n 电极沉积在由刻蚀工艺暴露出的 AlGaN 接触亚层的表面.P 电极沉积在 p 接触层的表面。对该分层结构进一步刻蚀以便将部分 p 接触亚层、p 型包覆层和 p 型光波导清除以定义一个隆起结构。然后将该分层结构进行切割以形成单独的激光器。如上所述形成的每一个氮化物半导体都结合了该氮化物半导体分层结构的一部分。

在根据本发明的氮化物半导体分层结构的实例中，其中的 AlN 摩尔分数在 AlGaN 的 n 接触亚层与 AlGaN 的包覆亚层之间发生突变，AlGaN 的 n 接触亚层的厚度，即：具有较低 AlN 摩尔分数的 AlGaN 层的厚度是 3 微米，并且该层中的 AlN 摩尔分数为 0.03。AlGaN 的包覆亚层的厚度，即具有较高 AlN 摩尔分数的 AlGaN 层的厚度是 1 微米，并且该层中的 AlN 摩尔分数为 0.06。已经在用 50 毫米直径衬底制成的测试样品表面观察到低的裂缝影响范围。

现在参照图 3 对根据本发明的氮化物半导体分层结构的实例进行描述。图 3 是根据本发明的氮化物半导体分层结构第一实施方式 40 的示意性侧视图。如下所述可以采用分层结构 40 制成根据本发明的氮化物半导体激光器以及其它半导体器件。在所示的实例中，复合 AlGaN 层 51 中的摩尔分数在 AlGaN 的 n 接触亚层 43 与 AlGaN 的包覆亚层 44 之间发生突变，这将在下文中参照图 9A 进行描述。

分层结构 40 包括具有以 C 面（0001）为表面的蓝宝石衬底 41. 采用金属－有机气相外延(MOVPE)方法在该表面上继续沉积 AlGaN 低温缓冲层 42; n 型复合 AlGaN 层 51 包括 n 接触亚层 43 和 AlGaN 的包覆亚层 44,在 n 接触亚层 43 中 AlGaN 具有较低 AlN 的摩尔分数,在 AlGaN 的包覆亚层 44 中 AlGaN 具有较高 AlN 的摩尔分数; n 型 GaN 光波导层 45; GaInN 有源层 46; p 型电子阻挡层 47; p 型 GaN 光波导层 48; p 型 AlGaN 包覆层 49 和 p 型 GaN 的 p 接触层 50。

现在进一步详细讨论氮化物半导体分层结构 40。缓冲层 42 是一个 30 纳米厚的低温沉积的 AlGaN 层，该层的 AlN 摩尔分数是 0.03，并且在 500°C 的温度下沉积。在低于单晶生长温度的条件下沉积该缓冲层材料。在进行沉积时，该缓冲层包含有非晶与多晶材料的混合体。下文将作进一步描述，然后在沉积复合 AlGaN 层 51 之前，将衬底和缓冲层加热到单晶生长温度以上。这使缓冲层的低温沉积材料退火，引起单晶区在缓冲层内扩展。作为结果，该复合 AlGaN 层在缓冲层上进行外延生长。但是在完成的分层结构 40 中，残余的多晶、非晶、或者多晶与非晶的材料区与沉积在缓冲层上的 AlGaN 复合层 51 的单晶材料区分开来。

尽管如上所述的缓冲层 42 是一个 30 纳米厚的低温沉积的 AlGaN 层，其 AlN 摩尔分数是 0.03，但是该缓冲层厚度可以达到 100 纳米并且 AlN 摩尔分数可以达到单位 1(1)。

复合 AlGaN 层 51 是一个以大约 $1x10^{18}cm^{-3}$ 的 Si 进行 n 型掺杂的 4 微米厚的 AlGaN 层，该层是在 1050°C 温度下被沉积的。该复合层包括 n 的 AlGaN 接触层 43 和 AlGaN 包覆亚层 44,层 43 是 3 微米厚的 AlGaN 层，其 AlN 摩尔分数为 0.03; 层 44 是 1 微米厚的 AlGaN 层，其 AlN 摩尔分数为 0.06。在所示的实例中,在 n 的 AlGaN 接触亚层 43 与 AlGaN 包覆亚层 44 之间的摩尔分数的变化是突变式的。

光波导层 45 是一个以大约 $1x10^{18}cm^{-3}$ 的 Si 进行 n 型掺杂的 100 纳米厚的 GaN 层，该层是在 1050°C 温度下被沉积的。

有源层 46 包括 5 对在 800°C 的温度被沉积的未掺杂 GaInN 层。每一对的层包括 3 纳米厚的 GaInN 层，其 InN 的摩尔分数为 0.01 和 6 纳米厚的 GaInN 层，其 InN 的摩尔分数为 0.03。

电子阻挡层 47 是一个以大约 $5x10^{19}cm^{-3}$ 的 Mg 进行 p 型掺杂的 15 纳米厚的 AlGaN 层，其 AlN 摩尔分数为 0.15，该层是在 800°C 温度下被沉积的。

光波导层 48 是一个以大约 $5x10^{19}cm^{-3}$ 的 Mg 进行 p 型掺杂的 100 纳米厚的 GaN 层，该层是在 1050°C 温度下被沉积的。

包覆层 49 是一个以大约 $5x10^{19}cm^{-3}$ 的 Mg 进行 p 型掺杂的 500 纳米厚的 AlGaN 层，其 AlN 摩尔分数为 0.06，该层是在 1050°C 温度下被沉积的。

P 接触层 50 是一个以大约 $1x10^{20}cm^{-3}$ 的 Mg 进行 p 型掺杂的 100 纳米厚的 GaN 层，该层是在 1050°C 温度下被沉积的。

图 4 是氮化物半导体激光器 60 的示意性的侧视图。激光器 60 是许多采用氮化物半导体分层结构 40 制成的激光器之一使得每一个激光器结合了分层结构 40 的一部分。对激光器中出现的分层结构元素采用相同的参照编号进行标示。

在激光器 60 中，激光器结构与 n 的 AlGaN 接触亚层 43 相重叠的部分被刻蚀掉以暴露出表面 61 并在表面 61 上形成 n 电极 62。该激光器还包括位于 p 接触层 50 表面的 p 电极 63。最后，将光波导层 48 的部分、包覆层 49 和 p 接触层 50 刻蚀掉以形成隆起结构 64，隆起结构 64 将流经有源层 46 的电流进行汇聚。

现在参照图 3 对可以用来制造根据本发明的氮化物半导体分层结构 40 的方法的实例进行描述。

最好采用以 0001(C)为表面的蓝宝石的衬底 41。通过将该衬底分别浸泡在氢氟酸和王水中各 5 分钟来对其进行清洁，然后再用纯水清洗 5 分钟。此后，将衬底分别用甲醇和丙酮各冲洗 5 分钟，然后再在纯水中清洗 5 分钟。上述各操作均是在室温下进行的。

将衬底 41 传送到金属－有机气相外延(MOVPE)装置的反应器。用干氮气置换该反应器中的气氛以清除氧气和水蒸汽。然后引入氢气并

通过将衬底加热至 1100°C 保持 10 分钟来清洁该衬底。

将衬底 41 的温度降低到 500°C。向反应器中输送三甲基铝(TMA1)、三甲基镓(TMGa)和氨以开始在衬底 41 上沉积低温沉积 A1GaN 的缓冲层 42。

如果衬底 41 的材料是导电的，例如 GaN 衬底，包括 GaN 层的衬底结构，或 SiC 衬底，可以另外向该反应器中输送硅烷以便对缓冲层 42 上的低温沉积 A1GaN 用硅进行 n 型掺杂。设定硅烷的流速以给出一个从大约 $5x10^{17}$ 到大约 $5x10^{19}$ cm^{-3} 的硅浓度范围。在一个示例性的实施方式中，设定硅烷的流速从而给出硅浓度为 $1x10^{18}$ cm^{-3}。对缓冲层 42 掺杂将该层的电阻率降低到使激光器 60 的激励电流以可忽略不计的电压降流过该缓冲层。

向反应器持续传送气流约 3 分钟以便在衬底 41 上将缓冲层 42 的厚度沉积到 30 纳米。

当缓冲层 42 达到其 30 纳米的设计厚度时，如果还在向反应器提供 TMA1、TMGa、和硅烷，那么停止进行供应。然后将衬底 41 的温度升高到 1050°C 并保持该温度约 5 分钟。

重新开始提供 TMA1、TMGa 和硅烷以生长 A1GaN 复合层 51。首先，以生成摩尔分数为 0.03 的 A1GaN 的 n 接触亚层 43 的相对流速供应气体。持续输送气流直到 A1GaN 的 n 接触亚层 43 的厚度达到 3 微米。然后改变 TMA1 与 TMGa 之间的相对流速以便开始生长 A1N 摩尔分数为 0.06 的 n－A1GaN 包覆亚层 44。持续输送气流直到 n－A1GaN 包覆亚层的厚度达到 1 微米。

完成时，A1GaN 复合层 51 的总厚度为 4 微米。因为低温沉积的 A1GaN 的缓冲层 42 直接位于该层之下以及因为构成该复合层的 A1GaN 的 n 接触亚层 43 和 A1GaN 接触亚层 44 之间的晶格失配小，所以能够以低裂缝影响范围形成具有该总厚度的一层。

对输送到反应器的硅烷流速进行调节以对 A1GaN 复合层 51 以大约 $5x10^{17}$ 到大约 $5x10^{19}$ cm^{-3} 的硅浓度范围进行掺杂。在一个优选的实施方式中，对流速进行设定以给出 $1x10^{18}$ cm^{-3} 的硅掺杂浓度。被掺杂层的电导率依赖于掺杂质浓度的总和以及载流子的迁移率。所以，提高掺杂质浓度不会简单地降低该层的电阻。最佳的掺杂质浓度是将该层的电阻降低至最低的浓度。

当 AlGaN 包覆亚层 44 达到其设计厚度时，将衬底的温度维持在 1050°C 并且只停止 TMAl 的供应以生长 n 型 GaN 光波导层 45。调节硅烷的流速以对光波导层 45 以 $1x10^{18}$ cm^{-3} 的硅浓度进行掺杂。该生长速度是大约 40 纳米/分钟。连续供应气流直到光波导层 45 达到 100 纳米的厚度。当光波导层 45 达到其设计厚度时，停止供应 TMGa 和硅烷，但是仍然继续供应氨气。然后将蓝宝石衬底的温度降低至 800°C。

在刚刚描述的实例中，对 n 型光波导层 45 以 $1x10^{18}$ cm^{-3} 的硅浓度进行掺杂。利用较高的硅浓度会降低光波导层的电阻率，但是会使该层的结晶度退化。考虑到这一点，优选的硅浓度的范围是从 $5x10^{17}$ cm^{-3} 到大约 $1x10^{19}$ cm^{-3}，其中心浓度大约是 $2x10^{18}$ cm^{-3}。

AlGaN 的 n 接触亚层 43、AlGaN 的包覆亚层 44 和光波导层 45 中的掺杂质浓度可以有所不同，或者二个或更多的浓度相同。但是当所有层中的该掺杂质浓度基本相同时，可以简化制造工艺。

当衬底 41 的温度达到 800°C 时，向反应器供应 TMGa 和三甲基铟 (TMIn) 以生长有源层 46。该有源层包括通过生长 5 对亚层所形成的多量子阱。每一个亚层对包括 InN 摩尔分数为 0.1 的 3 纳米厚的 GaInN 亚层和 InN 摩尔分数为 0.03 的 6 纳米厚的 GaInN 亚层。InN 的摩尔分数由采用分层结构 40 制成的激光器所发出光的波长确定。在本实例中所示的 InN 摩尔分数对应于 400 纳米的波长。以相关流速向反应器供应气体使得所生成的有源层亚层具有所示的摩尔分数。通常的生长速度范围是从 3 到 6 纳米/分钟，但是在这里所描述的条件是 5 纳米/分钟。

一旦有源层 46 的最后亚层达到其设计厚度，停止 TMIn 的供应，向反应器供应 TMAl 和双环戊二烯基镁 (Cp_2Mg) 以生长 p 型 AlGaN 电子阻挡层 47。以相关流速向反应器供应气体使得所生成的电子阻挡层的 AlN 摩尔分数为 0.15。调节 Cp_2Mg 的流速以给出镁的浓度范围在从大约 $1x10^{18}$ 到大约 $1x10^{20}$ cm^{-3}。在一个优选的实施方式中，将 Cp_2Mg 流速设为 $5x10^{19}$ cm^{-3}。采用与上述的确定硅浓度范围相同的方式确定镁的浓度范围。

持续供应气流直到 p 型 AlGaN 电子阻挡层 47 的厚度达到 15 纳米。

当 p 型 AlGaN 电子阻挡层 47 达到其设计厚度时，停止供应 TMAl 和 Cp_2Mg 并升高衬底 41 的温度。当该衬底的温度达到 1050°C 时，向该

反应器供应 TMGa 和 Cp_2Mg 以开始生长 p 型 GaN 的光波导层 48。在上述条件下，p 型 GaN 的光波导层 48 的生长速率是 2 微米/小时。调节 Cp_2Mg 的流速以给出镁的浓度范围在从大约 $1x10^{18}$ 到大约 $1x10^{20}$ cm^{-3}。过高的镁浓度会使 p 型 GaN 的光波导层的材料的结晶度退化。在优选的实施方式中，设定 Cp_2Mg 的流速以给出大约 $5x10^{19}$ 的镁的浓度。

持续供应气流直到 p 型 GaN 光波导层 48 的厚度达到 100 纳米。

当 p 型 GaN 光波导层 48 达到其设计厚度时，还向反应器供应 TMA1 以开始生长 p 型 AlGaN 包覆层 49。设定 TMA1 和 TMGa 的相关流速以给出大约 0.06 的 AlN 摩尔分数。设定 Cp_2Mg 的流速以给出镁的浓度范围在从 $1x10^{18}$ 到 $1x10^{20}$ cm^{-3}。在优选的实施方式中，设定 Cp_2Mg 的流速以给出大约 $5x10^{19}$ 的镁浓度。

在 p 型 GaN 光波导层 48 和 p 型 AlGaN 包覆层 49 中镁的掺杂质浓度可以有所不同，但是如果浓度相同，制备工艺比较简单。

持续供应气流直到 p 型 AlGaN 包覆层 49 的厚度达到 500 纳米。

当 p 型 AlGaN 包覆层 49 达到其设计厚度时，停止供应 TMA1 以开始生长 p 型 GaN 的 p 接触层 50。在上述条件下，该 p 接触层的生长速度是 2.5 微米/小时。设定 Cp_2Mg 的流速以给出大约 $1x10^{20}$ cm^{-3} 的镁浓度。持续供应气流直到该 p 型接触层的厚度达到 100 纳米。

当 p 型 GaN 的 p 接触层 50 达到其设计厚度时，停止向反应器供应 TMA1、TMGa 和 Cp_2Mg 并降低衬底 41 的温度。当该衬底温度降低到 100°C 以下时，停止向反应器供应氨气，将分层结构 40 从反应器中移开。利用微分干涉显微镜观察该分层结构的表面以检验裂缝。

与图 4 所示激光器 60 相似的激光器采用以下的分层结构 40 制备。对该分层结构进行有选择地刻蚀以暴露出每一个激光器 AlGaN 的 n 接触亚层 43 的表面 61。以及对该分层结构再进行刻蚀以形成隆起，该隆起结构对流经有源层 46 的电流进行会聚。然后，采用气相沉积的常规方式形成激光器的 n 电极 62。在优选的实施方式中，形成了钛/铝 n 电极。

在形成该激光器的 p 电极 63 之前，利用常规热退火或电子束辐照促使镁掺杂层的 p 型转换。也可以在形成 n 电极 62 之前进行退火，但是在本实例中，在 n 电极 62 形成之后进行退火。该退火工艺可以采用日本专利申请 H9-37705 中所述的方法进行。该专利申请被转让给本公

开的受让人并结合在此作为参照。该申请的英文版已经作为国际申请no.WO 98/37586被公开。该激光器的p电极采用Ni/Au制成，每一个电极的宽度为5微米，长度为500微米。

在形成n电极和p电极之后，进行切割操作以将分层结构40分成单独的激光器60，每一个激光器带有一个谐振腔结构。

图5是一幅曲线图，它展示出采用如上所述分层结构40制成的激光器60的实例所发光的远场图。在图5中，用y轴以任意单位表示该激光器发光的强度，用x轴以度为单位表示相对于激光器光轴的相对发射角，激光器以该相对发射角发光。该远场图显示出单峰，这表明光波导层45与AlGaN复合层51的AlGaN包覆亚层44所构成的光约束结构提供了足够的光约束。在所示的实例中，光约束因子为3.2%。

图6和图7示出了激光器60的其它特性。图6是一幅曲线图，它展示出该激光器的正向传导特性。在该图中，y轴表示跨在该激光器上的电压降，x轴表示流经该激光器的电流。曲线(a)表示激光器60的正向特性。图7是该激光器的阈特性曲线图。在该图中，y轴以任意单位表示该激光器发光的强度，x轴表示流经该激光器的电流。曲线(a)表示激光器60的阈特性。

为了与激光器60进行比较，另外制成了二个激光器。第一个用于比较的被称为比较实例1的激光器具有图4所示的结构。但是，该AlGaN的n接触亚层43的AlN摩尔分数和缓冲层42的低温沉积的AlGaN的AlN摩尔分数都是0.06。在激光器60中，这些AlN摩尔分数都是0.03。图6中的曲线(b)展示出比较实例1的正向特性。在图6中，将曲线(a)（根据本发明的激光器60）与曲线(b)（比较实例）进行比较，可以在看到在AlGaN的n接触亚层43中采用较低的AlN摩尔分数使激光器60具有的基本优点。对于给定的电流，跨在根据本发明的激光器60上的电压降基本上低于跨在比较实例1上的电压降。

制成的第二个用于比较的激光器具有图1所示的结构，该激光器被称为比较实例2。n型GaN接触亚层13的厚度为4微米。n型GaN接触层13的厚度为4微米，该n型接触层GaN材料将沉积在该层上的n型AlGaN包覆层14的厚度限制在600纳米以内，而在激光器60中，沉积在AlGaN的n接触亚层43上的n型AlGaN包覆亚层44的厚度为1000纳米。将比较实例2中的包覆层厚度限制到600纳米以减小在该

包覆层中的裂缝影响范围。图 7 中的曲线(b)展示出比较实例 2 的阈特性。图 7 的曲线(b)表明比较实例的阈电流大约是 300 毫安，图 7 的曲线(a)表明根据本发明的激光器 60 的阈电流大约是 200 毫安。另外如图 2 所示，比较实例 2 发光的远场图显示出多峰；而如图 5 所示，根据本发明的激光器 60 发光显示出单峰。

在分层结构 40 和激光器 60 的衬底 41 所采用的蓝宝石衬底已经得到充分的研究并且价格便宜。在替代的情况下，可以用碳化硅（SiC）作衬底 41。SiC 是一种价格较贵的衬底材料，但是其电阻率较低并且更稳定，而且具有超解理性。作为另一种替代，可以采用 GaN 导电衬底而且提供优越的性能。另外，包括沉积在一个衬底上的 GaN 层的衬底结构可以用作导电衬底。如日本专利申请 H9-306215 所公开的那样，这种衬底结构还可以包括一个在该衬底与 GaN 层之间低温沉积的氮化物半导体材料的缓冲层。该申请被转让给本公开的受让人，并结合于此作为参照。该申请的英文版作为国际申请 no.WO99/25030 被公开。其它可以采用的衬底材料包括尖晶石、MgO、GaAs、硅等。

在上述激光器 60 的实例中，可以与用在先申请作为参照来改变 AlGaN 包覆亚层的 AlN 摩尔分数和厚度以增大光约束因子、改善该激光器发光的远场图、和降低阈电流。

分层结构 40 和激光器 60 作为包括位于衬底 41 和有源层 46 之间的 n 型 AlGaN 复合层 51 进行了描述。如图 8 所示，该分层结构和相应的激光器可以还包括一个另外的位于有源层上的 p 型 AlGaN 复合层。

图 8 是一幅示意性的侧视图，它展示出根据本发明的氮化物半导体分层结构的第二实施方式 80。分层结构 80 包括 n 型 AlGaN 复合层 51、p 型 AlGaN 复合层 71、p 型 GaN 的 p 接触层 72。分层结构 80 中与分层结构 41 中的对应元素用相同的编号标明，而且不在这里再进行描述。对本领域的普通技术人员来说是明显的，即：可以在分层结构 80 中采用与上述工艺相似的工艺使得激光器在结构方面与激光器 60 相似。

在分层结构 80 中，p 型 AlGaN 复合层 71 包括二个厚度大致相等的亚层，每一个亚层的摩尔分数不同。该 p 型 AlGaN 复合层包括一个具有较低 AlN 摩尔分数的单晶 AlGaN 半导体材料的亚层和一个具有较高 AlN 摩尔分数的单晶 AlGaN 半导体材料的亚层。该具有较高 AlN 摩尔分数的单晶 AlGaN 半导体材料的亚层位于 p 型 GaN 的波导层附近从而

与 p 型 GaN 光波导层一起形成一个光约束结构。该亚层被称为 AlGaN 的 p 包覆亚层 69。该 AlGaN 的 p 包覆亚层较高的 AlN 摩尔分数使得该光约束结构能提供足够的光约束。

该具有较低 AlN 摩尔分数的亚层的电阻比 AlGaN 的 p 覆盖亚层 69 的低，该层离 p 型 GaN 光波导层 48 距离远，并且向激光器注入电流。该亚层被称为 AlGaN 的 p 接触亚层 70。AlGaN 的 p 接触亚层 70 较低的 AlN 摩尔分数提供较低电阻的电流传导路径。

n 型 AlGaN 复合层 51 和 p 型 AlGaN 复合层 71 相对于光波导层 45 和 48 以相同程度进行取向，即，在每一个 AlGaN 复合层中，具有较高 AlN 摩尔分数的包覆亚层位于各自光波导层的附近以形成各自的光约束结构。作为结果，n 型 AlGaN 复合层 51 的亚层和 p 型 AlGaN 复合层 71 在分层结构 80 中反向排列。

在 p 型 AlGaN 复合层 71 中，AlN 摩尔分数可以在 AlGaN 的 p 包覆亚层 69 与 AlGaN 的 p 接触亚层 70 之间进行突变，从而实际上生成二个不同的 AlGaN 层，每一层的 AlN 摩尔分数都不相同。作为替代的情况，AlN 摩尔分数可以在 AlGaN 的 p 包覆亚层 69 与 AlGaN 的 p 接触亚层 70 之间进行逐渐变化，从而生成一个具有一个 AlN 摩尔分数的单 p 型层，其摩尔分数通过不同的厚度有所改变。无论 AlN 摩尔分数如何变化，p 包覆亚层 69 的厚度不应该大于提供足够光约束所要求的厚度。

在氮化物半导体分层结构 80 得实施方式中，p 型 AlGaN 包覆亚层 69 的厚度为 500 纳米以及 AlN 摩尔分数为 0.06。AlGaN 的 p 接触亚层 70 的厚度为 500 纳米以及 AlN 摩尔分数为 0.03，以及 p 型 GaN 的 p 接触亚层 72 的厚度为 50 纳米。其它层的厚度和成分与分层结构 40 中的相同。对本领域的普通技术人员来说下面一点是明显的即：可以修改上述用于制造分层结构 40 的方法以便进行分层结构 80 的制造。

可以对分层结构 40 或者分层结构 80 进行修改使其可以被用来制造 n 上（n-up）激光器和其它的氮化物半导体器件。在上述修改的分层结构中，对位于衬底 41 与有源层 46 之间的层进行 p 型掺杂，对位于该有源层之上包括任何另外的 AlGaN 复合层 71 的层进行 n 型掺杂。

上述的分层结构 40 和 80 以及激光器 60 可以包括一个另外的低温沉积的缓冲层（未示出），该缓冲层被夹在 p 型 GaN 光波导层 48 和 p

型 AlGaN 包覆层 49 之间或夹在 p 型 GaN 光波导层 48 和 p 型 AlGaN 复合层 71 之间，以进一步减小裂缝的影响范围。可以对该另外的低温沉积的 AlGaN 缓冲层用从大约 $1x10^{18}$ 到大约 $1x10^{20}cm^{-3}$ 的浓度范围的镁进行掺杂，从而使该材料成为 p 型。例如，可以选择镁的浓度为 $1x10^{20}cm^{-3}$。

最好采用金属－有机气相外延（MOVPE）来沉积包括分层结构 40 和 80 的层。但是这不是本发明所必需的。作为替代可以采用分子束外延(MBE)、卤素气相外延(HVPE)或者其它合适的外延沉积技术来沉积这些层。

图 9A－9C 是曲线图，它展示出 AlN 摩尔分数可以通过 AlGaN 复合层 51 的厚度来进行变化。y 轴表示 AlN 摩尔分数，x 轴表示 AlGaN 复合层 51 厚度的百分比，0％对应该 AlGaN 复合层与缓冲层 42 之间的界面，100％对应该 AlGaN 复合层与 n 的 GaN 光波导层 45 之间的界面。AlN 摩尔分数发生变化的厚度实际百分比依赖于 AlGaN 的 n 接触亚层 43 和 AlGaN 包覆亚层 44 的相对厚度。

如上所述，AlN 摩尔分数可以在 AlGaN 的 n 接触亚层 43 和 AlGaN 包覆亚层 44 之间突变，如图 9A 所示，从而实际上产生二个不同的 AlGaN 层，每一个 AlGaN 层的 AlN 摩尔分数不同。

作为替代，AlN 摩尔分数可以在 AlGaN 的 n 接触亚层 43 和 AlGaN 包覆亚层 44 之间的梯度亚层 55 中进行逐渐变化。图 9B 展示出一个实施方式，其中 AlN 摩尔分数在该梯度亚层范围内基本上是线性变化的。在这种情况下，梯度亚层的厚度是大约 20 纳米。图 9C 展示出一个实施方式，其中 AlN 摩尔分数在该梯度亚层范围基本上是以抛物线方式进行变化的。逐渐改变 AlN 摩尔分数以生成该梯度亚层可以减小异型缝隙，从而降低器件的电阻。

另外的 AlGaN 复合层 71 中的 AlN 摩尔分数可以在 p 包覆亚层 69 和 p 接触亚层 70 之间以与 9A－9C 相似的方式变化。

根据本发明的氮化物半导体分层结构 40 和 80 包括厚的低电阻的 AlGaN 复合层 51，因而具有相对低的裂缝和其它缺陷的影响范围。这些分层结构可以用来改进不仅是电光器件如激光二极管，而且其它器件包括 III 族氮化物半导体及结构。这些器件包括光二极管、发光二极管、平面发光二极管、高电子迁移率晶体管和场效应晶体管。

尽管本公开对本发明的说明性的实施方式进行了详细描述，应当理解到本发明不受所描述的精密的实施方式的局限，在所附权利要求限定的本发明的范围之内可以进行各种修改。

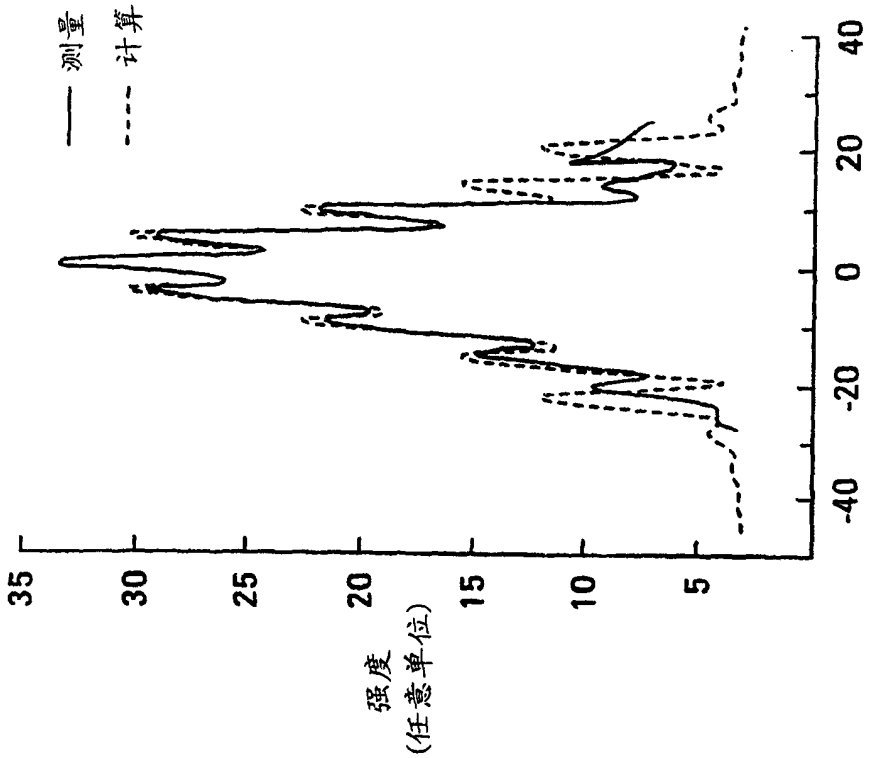


图 2(现有技术)

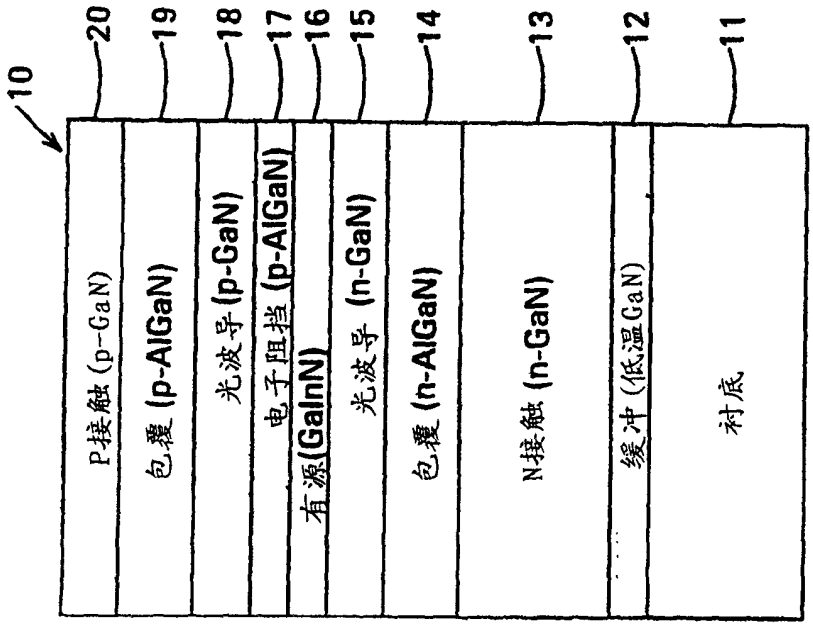


图 1(现有技术)

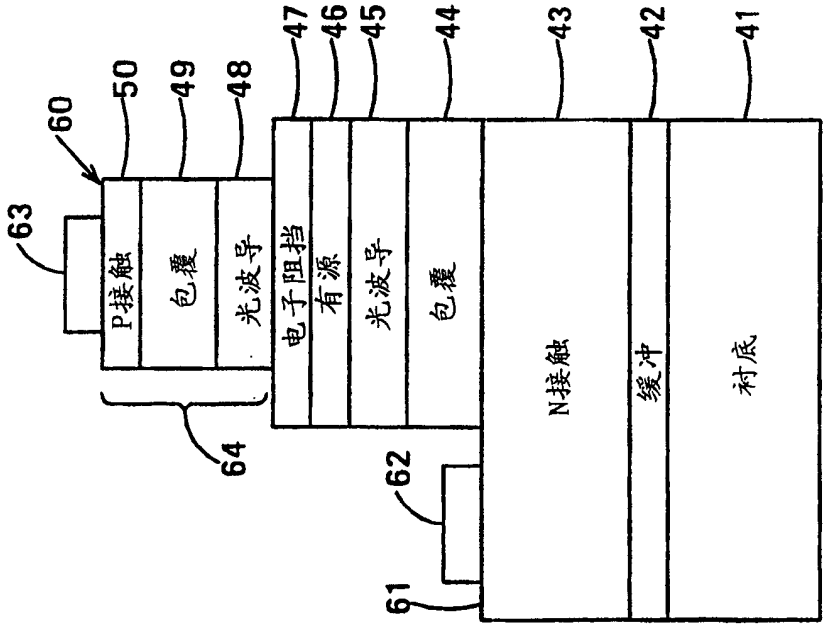

63
60
50
49
48
47
46
45
44
43
42
41
P接触
包覆
光波导
电子阻挡
有源
光波导
包覆
N接触
缓冲
衬底
64
62
61

图 4

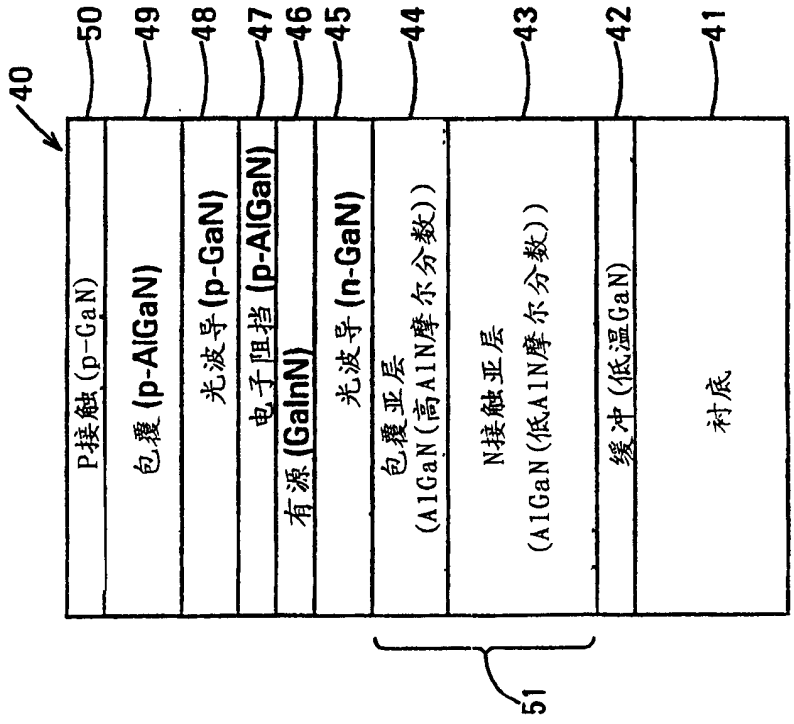

40
50
49
48
47
46
45
44
43
42
41
P接触(p-GaN)
包覆(p-AlGaN)
光波导(p-GaN)
电子阻挡(p-AlGaN)
有源(GaInN)
光波导(n-GaN)
包覆亚层
(AlGaN(高AlN摩尔分数))
N接触亚层
(AlGaN(低AlN摩尔分数))
缓冲(低温GaN)
衬底
51

图 3

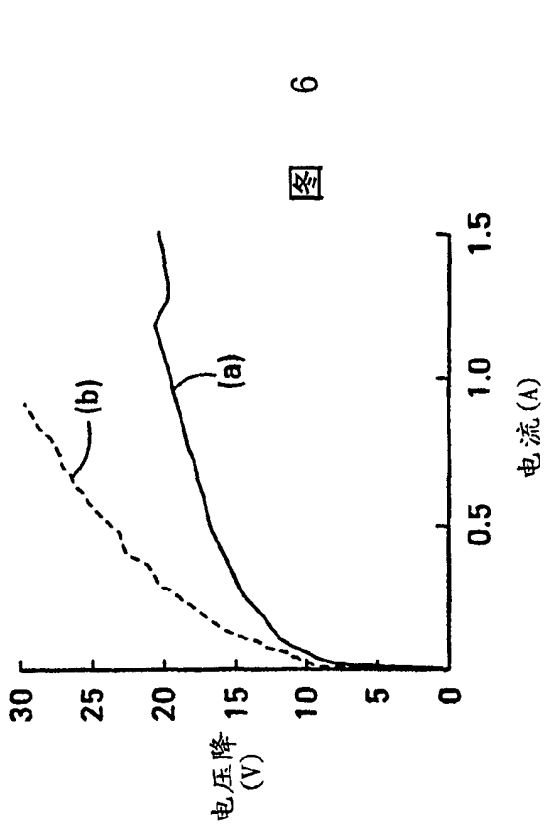

30
25
20
15
10
5
0
0.5
1.0
1.5
电压降 (V)
电流 (A)
(a)
(b)

图 6

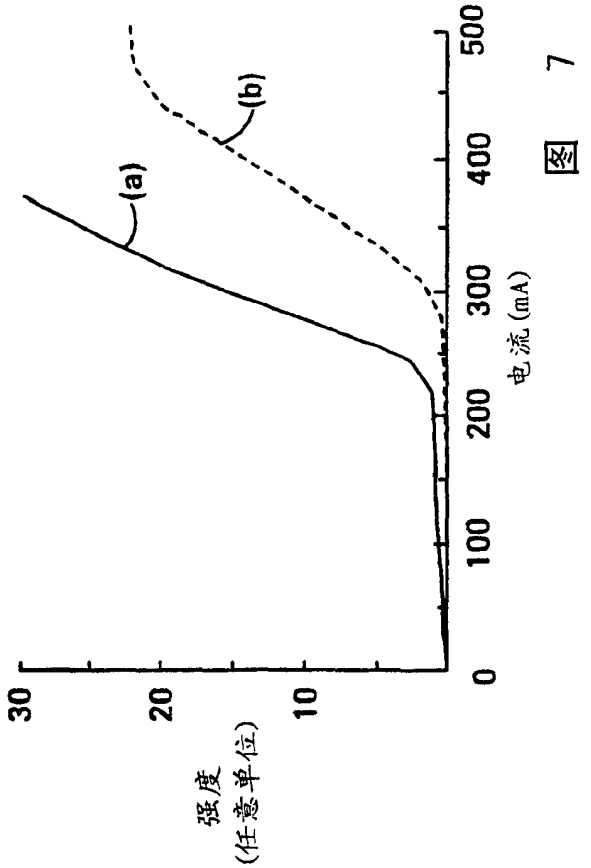

30
20
10
0
100
200
300
400
500
强度 (任意单位)
电流 (mA)
(a)
(b)

图 7

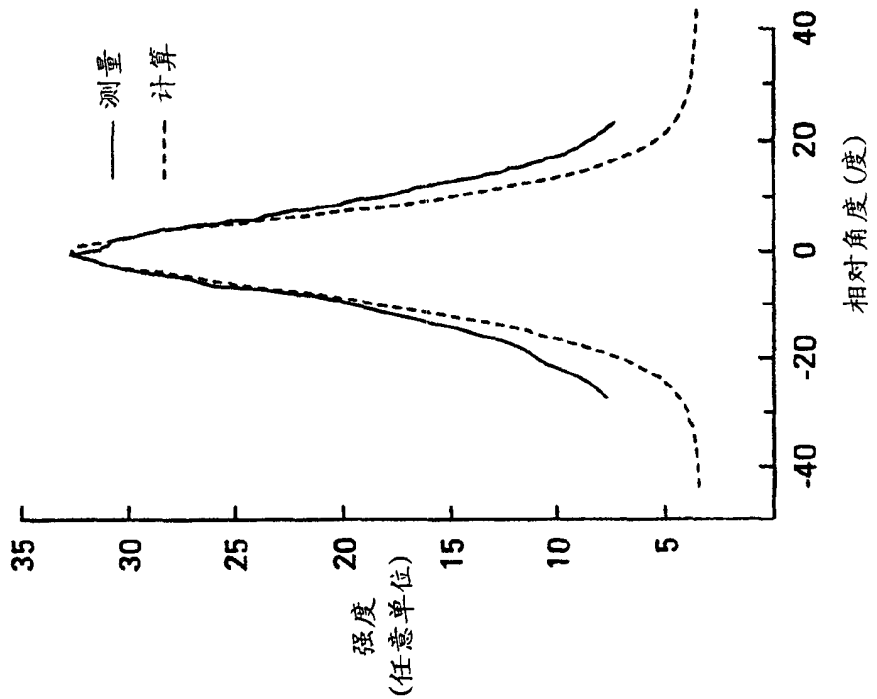

测量
计算
35
30
25
20
15
10
5
-40
-20
0
20
40
强度 (任意单位)
相对角度 (度)

图 5

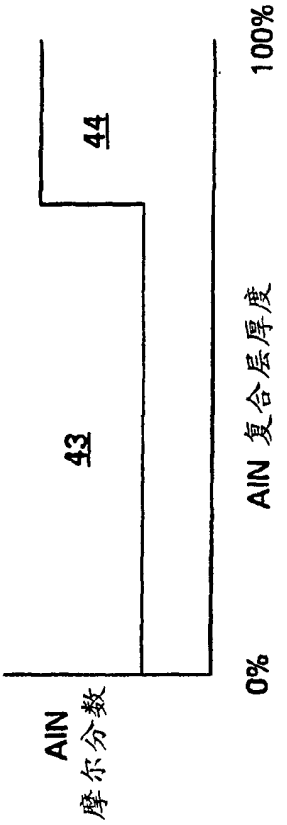


图 9A

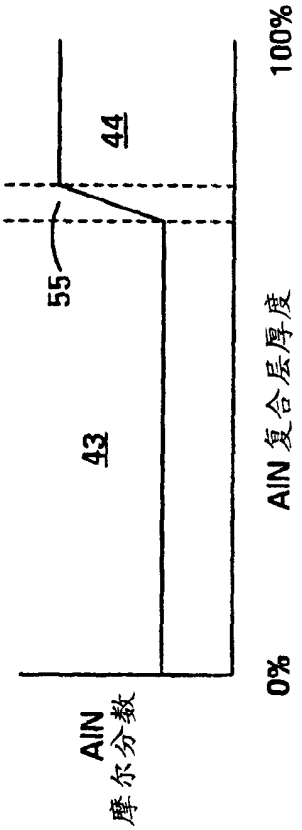


图 9B

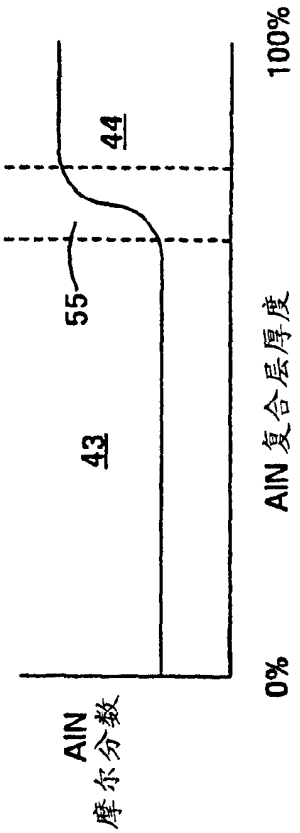


图 9C

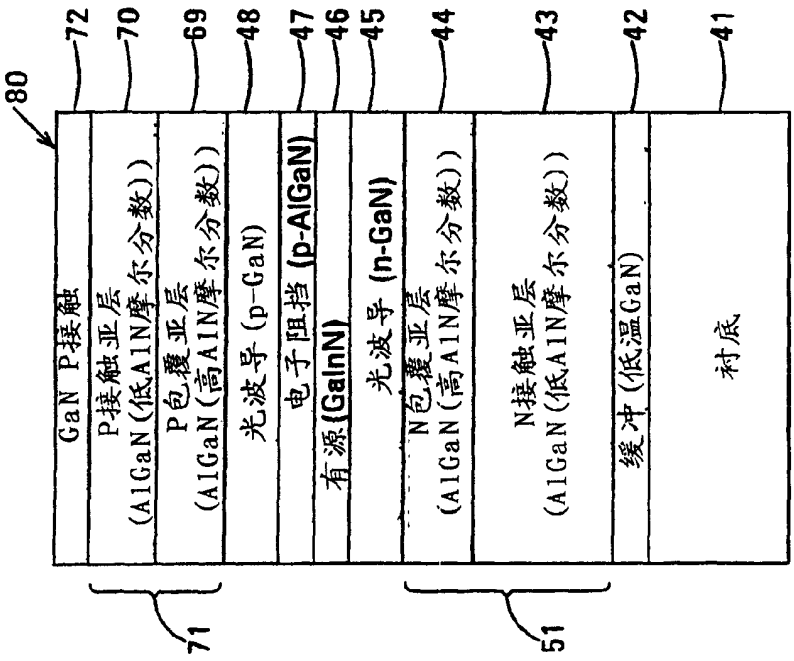


图 8