



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103208740 A

(43) 申请公布日 2013.07.17

(21) 申请号 201310003877.1

(22) 申请日 2013.01.06

(30) 优先权数据

2012-005367 2012. 01. 13 JP

(71) 申请人 住友电气工业株式会社

地址 日本大阪

申请人 索尼公司

(72) 发明人 滨口达史 高木慎平

(74) 专利代理机构 北京康信知识产权代理有限公司

责任公司 11240

代理人 余刚 吴孟秋

(51) Int. Cl.

H01S 5/323 (2006.01)

H01S 5/00 (2006.01)

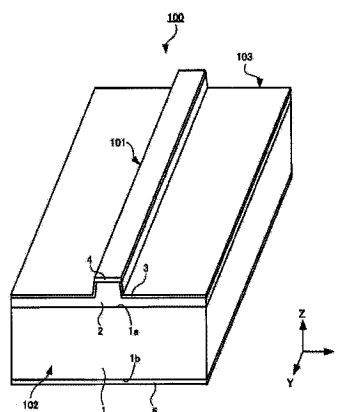
权利要求书1页 说明书12页 附图9页

(54) 发明名称

激光二极管以及制造激光二极管的方法

(57) 摘要

本发明公开了激光二极管以及制造激光二极管的方法,一种激光二极管包括:半导体基底,由六方晶系 III 族氮化物半导体制成并且具有沿 {2, 0, -2, 1} 方向定向的半极性面;外延层,包括形成激光的光波导的发光层,并且形成在半导体基底的半极性面上,所述外延层使得激光的传播方向在光波导面内相对于 c 轴在光波导面上的投影方向以在大约 8° 至大约 12° 或者大约 18° 至大约 29° 的范围内的角度倾斜,所述光波导面包括激光的传播方向并且与半极性面平行;两个谐振器端面;第一电极;以及第二电极。



1. 一种激光二极管,包括:

半导体基底,由六方晶系 III 族氮化物半导体制成并且具有沿 $\{2, 0, -2, 1\}$ 方向定向的半极性面;

外延层,包括形成激光的光波导的发光层,并且形成在所述半导体基底的所述半极性面上,所述外延层使得所述激光的传播方向在光波导面内相对于 c 轴在所述光波导面上的投影方向以在约 8° 至约 12° 或者约 18° 至约 29° 的范围内的角度倾斜,所述光波导面包括所述激光的传播方向并且与所述半极性面平行;

两个谐振器端面,设置在所述激光的所述光波导的两端;

第一电极,形成在所述外延层上;以及

第二电极,形成在与所述半导体基底的所述外延层所形成在的所述半极性面相对的面上。

2. 根据权利要求 1 所述的激光二极管,其中,所述激光的传播方向相对于 c 轴在所述光波导面上的所述投影方向以在约 22° 至约 27° 的范围内的角度倾斜。

3. 根据权利要求 2 所述的激光二极管,其中,所述激光的传播方向相对于 c 轴在所述光波导面上的所述投影方向以约 22° 、约 24° 以及约 27° 中的任一个角度倾斜。

4. 根据权利要求 1 所述的激光二极管,其中,所述谐振器端面 and 所述半极性面之间的角度与 90° 的偏移量为约 3° 以下。

5. 根据权利要求 1 所述的激光二极管,其中,所述外延层在其面向所述第一电极的表面中包括沿所述激光的所述传播方向延伸的脊状部。

6. 一种制造激光二极管的方法,所述方法包括:

在由六方晶系 III 族氮化物半导体制成的半导体基底的沿 $\{2, 0, -2, 1\}$ 方向定向的半极性面上形成外延层,所述外延层包括形成激光的光波导的发光层,并且使得所述激光的传播方向在光波导面内相对于 c 轴在所述光波导面上的投影方向以在约 8° 至约 12° 或者约 18° 至约 29° 的范围内的角度倾斜,所述光波导面包括所述激光的所述传播方向并且与所述半极性面平行;

分别在所述外延层和与所述半导体基底的所述半极性面相对的面上形成第一电极和第二电极;以及

在所述激光的所述光波导的两端形成两个谐振器端面。

激光二极管以及制造激光二极管的方法

技术领域

[0001] 本公开涉及一种激光二极管及其制造方法,更具体地,本公开涉及一种六方晶系 III 族氮化物激光二极管及其制造方法。

背景技术

[0002] 激光二极管目前用于各种领域中,具体地,在图像显示单元(例如,电视机以及投影仪)领域内激光二极管是必不可少的光学装置。在激光二极管在该领域的应用中,发出各个光的原色,即,红色、绿色和蓝色的光的激光二极管是必需的。实际上已经使用了红色和蓝色激光二极管,并且近年来已经积极地开发了绿色激光二极管(波长为大约为 500nm 至 560nm,包括 500nm 和 560nm)(例如,参照 Takashi Kyono 等人于 2010 年 1 月发表的“Development I of world's first green laser diode on novel GaN substrate”,SEI Technical Review,第 176 卷,第 88-92 页,以及 Masahiro Adachi 等人于 2010 年 1 月发表的“Development II of world's first green laser diode on novel GaN substrate”,SEI Technical Review 第 176 卷,第 93-96 页)。

[0003] 在 Takashi Kyono 等人于 2010 年 1 月发表的“Development I of world's first green laser diode on novel GaN substrate”,SEI Technical Review,第 176 卷,第 88-92 页,以及 Masahiro Adachi 等人于 2010 年 1 月发表的“Development II of world's first green laser diode on novel GaN substrate”,SEI Technical Review 第 176 卷,第 93-96 页中,提出了一种六方晶系 III 族氮化物激光二极管,其中,在 n 型 GaN 基板的 $\{2, 0, -2, 1\}$ 半极性面上,依次形成 n 型覆盖层、包括由 InGaN 制成的有源层的发光层以及 p 型覆盖层。在通过在这样的半导体基板的半极性面上层压(外延生长)各种激光元件薄膜而制造的激光二极管中,其垂直于激光的传播方向(波导方向)的面被用作反射面(后文中称为“谐振器端面”)。要注意的是,在该说明书中,六方晶系晶体的面取向(plane orientation)由 $\{h, k, l, m\}$ 表示,其中, h 、 k 、 l 和 m 为面指数(密勒指数)。

[0004] 此外,已经研究了使用具有半极性面的半导体基板(后文中称为“半极性基板”)的激光二极管,激光的传播方向的优化(例如,参照日本未审查专利申请公开(PCT 申请的公开的日文译本)第 2010-518626 号)。日本未审查专利申请公开第 2010-518626 号公开了一种技术,使得在半极性 III 族氮化物激光二极管中光传播轴与光偏振方向或晶体取向大致垂直。更具体地,在日本未审查专利申请公开第 2010-518626 号中,光传播轴的方向大致沿着半极性 III 族氮化物激光二极管的“c”轴,以将光增益最大化。

发明内容

[0005] 如上所述,已经研究了使用半极性基板的激光二极管内激光的适当传播方向。然而,在该技术领域,期望开发出一种进一步优化使用半极性基板的激光二极管内激光的传播方向以进一步提高激光特性的方法。

[0006] 期望提供一种借助于使用半极性基板通过优化激光的传播方向而获得优良的激

光特性的激光二极管,以及制造该激光二极管的方法。

[0007] 根据本公开的一个实施方式,提供了一种激光二极管,包括:半导体基底,由六方晶系 III 族氮化物半导体制成并且具有沿 $\{2, 0, 2, 1\}$ 方向定向的半极性面;外延层,包括形成激光的光波导的发光层,并且形成在半导体基底的半极性面上,所述外延层使得激光的传播方向在光波导面内相对于 c 轴在光波导面上的投影方向以在大约 8° 至大约 12° (包括 8° 和 12°) 或者大约 18° 至大约 29° (包括 18° 和 29°) 的范围内的角度倾斜,所述光波导面包括激光的传播方向并且与半极性面平行;两个谐振器端面,设置在所述激光的光波导的两端;第一电极,形成在所述外延层上;以及第二电极,形成在与半导体基底的外延层所形成在的半极性面相对的面。

[0008] 如这里所使用的,措辞“沿 $\{2, 0, -2, 1\}$ 方向定向的半极性面”不仅包括“精确地沿 $\{2, 0, -2, 1\}$ 方向定向的半极性面”,而且包括“沿从 $\{2, 0, -2, 1\}$ 方向略微倾斜的方向定向的半极性面”。

[0009] 根据本公开的一个实施方式,提供了一种制造激光二极管的方法,所述方法包括:在沿由六方晶系 III 族氮化物半导体制成的半导体基底的 $\{2, 0, -2, 1\}$ 方向定向的半极性面上形成外延层,所述外延层包括形成激光的光波导的发光层,并且使得激光的传播方向在光波导面内相对于 c 轴投影方向以在大约 8° 至大约 12° (包括 8° 和 12°) 或者大约 18° 至大约 29° (包括 18° 和 29°) 的范围内的角度倾斜,所述光波导面包括激光的传播方向并且与半极性面平行;在所述外延层和与半导体基底的半极性面相对的面分别形成第一电极和第二电极;以及在所述激光的光波导的两端形成两个谐振器端面。

[0010] 如上所述,根据本公开的实施方式的激光二极管为使用由六方晶系 III 族氮化物半导体制成的并具有沿 $\{2, 0, -2, 1\}$ 方向定向的半极性面的半导体基底的激光二极管。此外,在本公开的实施方式中,在包括激光的传播方向并平行于半极性面的光波导面中的激光的传播方向以这样的方向被确定,即,所述方向相对于 c 轴在光波导面上的投影方向以在大约 8° 至大约 12° (包括 8° 和 12°) 或者大约 18° 至大约 29° (包括 18° 和 29°) 的范围内的角度倾斜。在本公开的实施方式中,激光的传播方向以上述方向被确定,从而能够提高激光的传播方向和谐振器端面之间的正交性,并且进一步提高激光特性。

[0011] 要理解的是,上述整体描述和以下详细描述是示例性的,并且意在提供所要求的技术的进一步的说明。

附图说明

[0012] 本申请的附图提供了对该技术的进一步理解,这些附图被结合在说明书内并且构成该说明书的一部分。这些图示出了实施方式,并且与说明书一起,用于说明技术原理。

[0013] 图 1 为根据本公开的一个实施方式的激光二极管的示意性透视图;

[0014] 图 2A 和图 2B 为示出 GaN 的晶体结构的示意图;

[0015] 图 3 为示出 GaN 的晶体结构中的半极性面的一个实例的示意图;

[0016] 图 4 为根据本公开的实施方式的激光二极管的示意性截面图;

[0017] 图 5 为示出了根据本公开的实施方式的制造激光二极管的方法的步骤的流程图;

[0018] 图 6 为示出从谐振器端面的理想面的倾斜角度(偏移量)和激光阈值电流 I_{th} 之间的关系示意图;

- [0019] 图 7 为激光二极管的数值分析模型的示意性配置图；
- [0020] 图 8 为示出数值分析结果的表格；
- [0021] 图 9 为示出数值分析结果的表格；
- [0022] 图 10 为示出了在带状部形成的面内从带状部(stripe section)相对于谐振器端面的延伸方向的理想值的倾斜角度(水平偏移量)和激光阈值电流 I_{th} 之间的关系的示图。

具体实施方式

[0023] 下面参照附图,按照以下顺序,详细地描述本公开的优选实施方式。要注意的是,本公开并不限于以下实例。

- [0024] 1. 激光二极管的配置
- [0025] 2. 制造激光二极管的方法
- [0026] 3. 带状部的配置
- [0027] (1. 激光二极管的配置)
- [0028] [激光二极管的整体配置]

[0029] 图 1 示出了根据本公开的一个实施方式的激光二极管的示意性概图。要注意的是,在图 1 中所示的实例中,示出了脊状(折射率引导的)激光二极管 100;然而,本公开不限于此。例如,本公开的以下将被描述的技术可适用于增益引导的激光二极管。

[0030] 激光二极管 100 包括半导体基底 1、外延层 2、绝缘层 3、第一电极 4 以及第二电极 5。

[0031] 在根据该实施方式的激光二极管 100 中,半导体基底 1 的一个表面 1a(图 1 中的顶面)用作半极性面,并且外延层 2、绝缘层 3 以及第一电极 4 依次形成在半极性面 1a 上。此外,第二电极 5 形成在与半导体基底 1 的半极性面 1a 相对的表面 1b(图 1 中的底面;后文中称为“背面 1b”)上。要注意的是,在 $\{2, 0, -2, 1\}$ 方向附近定向的半极性面被用作半导体基底 1 的半极性面 1a 的情况下,例如,能够振动波长大约为 500nm 的绿光。

[0032] 此外,如图 1 中所示,激光二极管 100 大致为长方体形状,并且具有沿预定的方向(在图 1 中的 Y 方向)延伸的脊状配置的带状部 101 形成在面向激光 100 的第一电极 4 的表面上。带状部 101 被形成为从激光二极管 100 的一个侧面 102(后文中会进行描述)延伸到该激光二极管的另一个侧面 103。带状部 101 的延伸方向用作激光的传播方向(波导方向),并且外延层 2 的对应于带状部 101 的区域被用作光波导。

[0033] 在该实施方式中,激光的传播方向被确定为在包括激光的传播方向并且与半极性面平行光波导面内相对于“c”轴在光波导面上的投影方向以在大约 8° 至大约 12° (包括 8° 和 12°) 或者大约 18° 至大约 29° (包括 18° 和 29°) 的范围内的角度倾斜。更具体地,确定带状部 101 的延伸方向在其上形成有带状部 101 的面上相对于 c 轴在其上形成有带状部 101 的面上的投影方向(后文中称为“c 轴投影方向”)以在大约 8° 至大约 12° (包括 8° 和 12°) 或者大约 18° 至大约 29° (包括 18° 和 29°) 的范围内的角度倾斜。要注意的是,后文中会详细地描述为何带状部 101 的延伸方向相对于 c 轴投影方向以上述角度范围内的角度倾斜。要注意的是,带状部 101 的宽度为几微米或以下,并且带状部 101 的延伸长度(谐振器长度)大约为几百微米。

[0034] 此外,激光二极管 100 具有四个侧面(面),四个侧面的大致垂直于带状部 101 的延

伸方向(图 1 的 Y 方向)的两个侧面 102 和 103 用作激光谐振器的反射面。换言之,两个侧面 102 和 103 为谐振器端面(resonator facet),激光谐振器由具有两个谐振器端面 102 和 103 以及与外延层 2 的带状部 101 对应的光波导区域构成。要注意的是,如后文中所描述的,由于通过切割其中多个激光二极管 100 被二维地形成并被设置在芯片中的基板元件(后文中称为“生产基板”)来制造激光二极管 100,所以这四个侧面为切割生产基板的过程中形成的切割面。

[0035] 要注意的是,在根据该实施方式的激光二极管 100 中,诸如 SiO₂/TiO₂ 膜的介电多层膜可以形成在这两个谐振器端面 102 和 103 (面涂覆)中的一个或两个上。通过执行面涂覆,可调节谐振器端面的反射率。

[0036] [各个元件的配置]

[0037] 下面更详细地描述根据该实施方式的激光二极管 100 的各个元件的配置。

[0038] (1) 半导体基底

[0039] 半导体基底 1 例如由六方晶系 III 族氮化物半导体,诸如 GaN、AlN、AlGa_xN_{1-x}、InGa_xN_{1-x} 或 InAlGa_xN_{1-x} 制成。此外,作为半导体基板 1,可以使用载流子的导电性为 n 型的基板。在该实施方式中,如上所述,外延层 2、绝缘层 3 以及第一电极 4 由半导体基底 1 形成的一个表面构成半极性面 1a。

[0040] 图 2A、图 2B 和图 3 示出了 GaN 的晶体结构。如图 2A 和图 2B 中所示, GaN 具有被称为“六方晶系晶体”的晶体结构,并且在发光层中生成的压电场(随后将在外延层 2 中描述)沿 c 轴生成;因此,与 c 轴垂直的 c 面 201 ($\{0, 0, 0, 1\}$ 面)具有极性,并且被称为“极性面”。另一方面,由于与 m 轴垂直的 m 面 202 ($\{1, 0, -1, 0\}$ 面)与 c 轴平行,所以 m 面 202 是非极性的,并且称为“非极性面”。相反,沿作为法线方向的轴方向相对于 c 轴朝着 m 轴以预定的角度倾斜的面,例如,图 3 中所述的实例中沿作为法线方向的轴方向相对于 c 轴朝着 m 轴以 75° 的角度倾斜的面($\{2, 0, -2, 1\}$ 面)为 c 面和 m 面之间的中间面,并被称为“半极性面”。

[0041] 要注意的是,在该实施方式中,将在 $\{2, 0, -2, 1\}$ 方向周围的面用作半极性面 1a。更具体地,将 $\{2, 0, -2, 1\}$ 晶面和相对于该晶面略微倾斜(例如,倾斜大约 $\pm 4^\circ$)的晶面用作半极性面 1a。如下所述,在使用沿这样的方向定向的半极性面 1a 并且带状部 101 的延伸方向相对 c 轴投影方向以在大约 8° 至大约 12° (包括 8° 和 12°)或大约 18° 至大约 29° (包括 18° 和 29°)的范围内的角度倾斜的情况下,能够形成具有良好的正交性的谐振器端面 102 和 103。

[0042] 此外,例如,半导体基底 1 的厚度可被确定为大约 $400\ \mu\text{m}$ 或以下。在这个厚度范围内,在切割由激光二极管构成的生产基板(production substrate)的过程中,可获得具有高质量(良好的平坦度和良好的正交性)的谐振器端面 102 和 103 (切割面)。尤其是,当半导体基底 1 的厚度范围在大约 $50\ \mu\text{m}$ 至 $100\ \mu\text{m}$ (包括 $50\ \mu\text{m}$ 和 $100\ \mu\text{m}$) 时,能够形成质量更高的谐振器端面 102 和 103。

[0043] (2) 外延层、绝缘层、第一电极以及第二电极

[0044] 接下来,将参照图 4 中描述根据该实施方式的激光二极管 100 的外延层 2、绝缘层 3、第一电极 4 以及第二电极 5 的配置。图 4 为激光二极管 100 的厚度方向(图中的 Z 方向)的示意性截面图。要注意的是,图 4 示出了与带状部 101 的延伸方向(图中的 Y 方向)垂直

的截面。

[0045] 在该实施方式中,外延层 2 包括缓冲层 11、第一覆盖层 12、第一导光层(first light guide layer)13、发光层 14 (有源层)、第二导光层 15、载流子块层(carrier block layer)16、第二覆盖层 17 以及接触层 18。缓冲层 11、第一覆盖层 12、第一导光层 13、发光层 14、第二导光层 15、载流子块层 16、第二覆盖层 17 以及接触层 18 依次层压在半导体基底 1 的半极性面 1a 上。要注意的是,在本文中会描述了半导体基底 1 由 n 型 GaN 半极性基板构成的实例。

[0046] 缓冲层 11 例如可由氮化镓基半导体层(诸如, n 型 GaN 层)构成。第一覆盖层 12 例如可由氮化镓基半导体层(诸如, n 型 AlGaIn 层或 n 型 InAlGaIn 层)构成。此外,第一导光层 13 例如可由氮化镓基半导体层(诸如, n 型 GaN 层或 n 型 InGaIn 层)构成。

[0047] 发光层 14 例如由阱层(未示出)和阻挡层(未示出)构成,所述阱层由诸如 InGaIn 或 InAlGaIn 的氮化镓基半导体层制成,所述阻挡层由诸如 GaIn、InGaIn 或 InAlGaIn 的氮化镓基半导体层制成。在该实施方式中,发光层 14 例如可具有多量子阱结构,在该结构中,多个阱层和多个阻挡层交替层压。要注意的是,发光层 14 用作外延层 2 的发光区域,并且例如发射波长在大约 480nm 至 550nm (包括 480nm 和 550nm) 范围内的光。

[0048] 第二导光层 15 可由其载流子的导电性为 p 型的氮化镓基半导体层(例如,诸如 p 型 GaIn 层或 p 型 InGaIn 层的氮化镓基半导体层)构成。载流子块层 16 (电子块层)例如可由 p 型 AlGaIn 层构成。

[0049] 第二覆盖层 17 可由诸如 p 型 AlGaIn 层或 p 型 InAlGaIn 层的氮化镓基半导体层构成。要注意的是,根据该实施方式的激光二极管 100 为脊状激光二极管;因此,通过蚀刻等刻蚀第二覆盖层 17 的面向第一电极 4 的表面的与带状部 101 对应的区域之外的区域。因此,在第二覆盖层 17 的面向第一电极 4 的表面的对应于带状部 101 的区域中形成了脊状部 17a。要注意的是,与带状部 101 一样,脊状部 17a 被形成为沿与每个谐振器端面大致垂直的方向延伸,并且被形成为从一个谐振器端面 102 延伸到另一个谐振器端面 103。

[0050] 接触层 18 例如可由 p 型 GaIn 层构成。此外,接触层 18 形成在第二覆盖层 17 的脊状部 17a 上。

[0051] 绝缘层 3 例如由诸如 SiO₂ 膜的绝缘膜配置。如图 4 中所示,绝缘层 3 形成在第二覆盖层 17 的脊状部 17a 之外的区域以及脊状部 17a 和接触层 18 的侧面上。

[0052] 第一电极 4 (p 侧电极)可由诸如 Pd 薄膜的导电膜构成。此外,第一电极 4 形成在接触层 18 以及绝缘层 3 的面向接触层 18 的面上。要注意的是,在根据该实施方式的激光二极管 100 中,用于焊盘电极的电极膜可被设置为覆盖绝缘层 3 和第一电极 4。

[0053] 第二电极 5 (n 侧电极)例如可由诸如 Al 膜的导电膜构成。此外,第二电极 5 形成在半导体基底 1 的背面 1b 上。

[0054] (2. 制造激光二极管的方法)

[0055] 接下来,将参照图 5 中详细描述根据实施方式的制造激光二极管 100 的方法。图 5 为示出了制造激光二极管 100 的方法的步骤的流程图。此外,在该实施方式中,将描述介电多层膜形成在激光二极管 100 的每个谐振器端面(面涂覆)上的实例。

[0056] 首先,制备由六方晶系 III 族氮化物半导体制成的半极性基板,在该基板上,二维地形成并且设置多个激光二极管 100 (步骤 S10)。然后,对所制备的半极性基板执行热清

洗。

[0057] 接下来,例如通过 OMVPE (有机金属气相外延) 方法,在半极性基板的半极性面上,按照预定的顺序,外延生长各个半导体薄膜,以形成构成外延层 2 的半导体薄膜(步骤 S20)。更具体地,在半极性面上依次外延生长构成缓冲层 11、第一覆盖层 12、第一导光层 13、发光层 14、第二导光层 15、载流子块层 16、第二覆盖层 17 以及接触层 18 的各个半导体薄膜。

[0058] 接下来,在半导体薄膜由半极性基板配置的表面上,形成每个激光二极管 100 的带状部 101 (步骤 S30)。此时,每个激光二极管 100 的带状部 101 形成在设置了半导体薄膜的表面上,从而允许每个激光二极管 100 的带状部 101 的延伸方向相对于 c 轴投影方向,以在大约 8° 至大约 12° (包括 8° 和 12°) 或大约 18° 至大约 29° (包括 18° 和 29°) 的范围内的角度倾斜。更具体而言,如下形成带状部 101。

[0059] 首先,在带状部 101 由表面区域形成的区域上形成掩模,在该表面区域内,配置接触层的半导体薄膜由半极性基板设置。此时,掩模被形成为使得在要形成掩模的面内,允许掩模的延伸方向相对于 c 轴投影方向,以在大约 8° 至大约 12° (包括 8° 和 12°) 或大约 18° 至大约 29° (包括 18° 和 29°) 的范围内的角度倾斜。然后,蚀刻形成掩模的区域以外的区域,以在每个激光二极管 100 的面向接触层 18 的表面上形成脊状部(步骤 S31)。

[0060] 要注意的是,此时,将要形成带状部 101 的区域之外的区域从接触层 18 的表面切割至第二覆盖层 17 的预定深度,以在要形成带状部 101 的区域内形成脊状部。因此,通过该处理,形成了在每个激光二极管 100 的面向接触层 18 的表面的面内相对于 c 轴投影方向以在大约 8° 至大约 12° (包括 8° 和 12°) 或大约 18° 至大约 29° (包括 18° 和 29°) 的范围内的预定角度倾斜的方向上延伸的脊状部。此外,此时,这样连续地形成该脊状部,以跨过将形成在带状部 101 的延伸方向上彼此相邻的两个激光二极管 100 的区域之间的边界。

[0061] 接下来,在去除脊状部上的掩模之后,使用例如蒸发法或溅射法,在半极性基板的脊状部侧面的表面上形成构成绝缘层 3 的绝缘膜(步骤 S32)。要注意的是,可以在形成绝缘膜之后去除脊状部上的掩模。此外,在掩模例如由金属等形成时,掩模可用作第一电极 4 的一部分,因此,可以不去除掩模。

[0062] 接下来,在以上述方式通过在半极性基板上形成各种半导体薄膜和绝缘膜而制造的基板元件上,形成构成第一电极 4 和第二电极 5 的电极薄膜(步骤 S33)。

[0063] 更具体地,由以下方式形成构成第一电极 4 的电极薄膜(第一电极薄膜)。首先,使用光刻法去除每个脊状部上的绝缘膜,以暴露接触层 18 的表面。接下来,例如使用蒸发法或溅射法,在每个暴露的接触层 18 上形成构成第一电极 4 的电极薄膜。

[0064] 另一方面,由以下方式形成构成第二电极 5 的电极薄膜(第二的电极薄膜)。首先,将半极性基板的背面抛光,以允许半极性基板具有所期望的厚度。接下来,例如使用蒸镀法或溅射法,在半极性基板的整个背面上形成构成第二电极 5 的电极薄膜。

[0065] 在该实施方式中,通过以上步骤 S31 到 S33,形成带状部 101,该带状部沿着在每个激光二极管 100 的面向接触层 18 的表面的面内相对于 c 轴投影方向,以在大约 8° 至大约 12° (包括 8° 和 12°) 或大约 18° 至大约 29° (包括 18° 和 29°) 的范围内的角度倾斜的方向上延伸。此外,在该实施方式中,通过以上步骤 S10 到 S30 (步骤 S31 到 S33) 形成了

经过二维形成和设置多个激光二极管 100 而制造的生产基板。

[0066] 接下来,将描述从步骤 S40 开始的处理,即,将生产基板切割成激光二极管 100 的处理(切割处理)。要注意的是,在将生产基板切割成激光二极管 100 的处理中,可使用与相关技术领域内的技术相似的技术,以下将描述使用激光划片单元(laser scribing unit)(未示出)的技术。

[0067] 首先,形成每个激光二极管 100 的谐振器端面(步骤 S40)。更具体地,将生产基板置于激光划片单元上,并且通过将激光束沿着二维地设置在生产基板内的多个激光二极管 100 的谐振器端面施加至划片线的一部分来形成划片凹槽(步骤 S41)。此时,划片凹槽形成在生产基板的边缘区域的划片线上并且沿着该划片线。

[0068] 接下来,将称作“刀片”的断裂单元(breaking unit)(未示出)按压在生产基板的背面的面向形成了划片凹槽的区域上,以沿着划片线切割(劈开)生产基板(步骤 S42)。然后,沿着激光二极管 100 的谐振器端面,对每个划片线重复地进行该切割处理,以将生产基板切割成多个基板元件。要注意的是,在该实施方式中描述了通过切割(劈开)处理形成谐振器端面的实例;然而,本公开不限于此,并且可通过例如干法蚀刻等,形成谐振器端面。

[0069] 要注意的是,在该实施方式中,如上所述,每个激光二极管 100 的带状部 101 的延伸方向等于以下方向:该方向相对于 c 轴投影方向,以在大约 8° 至大约 12° (包括 8° 和 12°)或大约 18° 至大约 29° (包括 18° 和 29°)的范围内的预定角度倾斜。在这种情况下,如将在后文中所描述的,允许可能被暴露至在上述步骤 S40 中形成谐振器端面的面与形成有带状部 101 的面(半极性面 1a)之间的角度更接近理想值(90°)。更具体地,例如,可能被暴露至谐振器端面的晶面与形成有带状部 101 的面(半极性面 1a)之间的角度和理想值(90°)之间的差值例如能够为大约 3° 或以下;因此,进一步提高了这两个角度之间的正交性。

[0070] 接下来,在上述步骤 S40 中分离的每个基板元件的切割面(谐振器端面)上形成介电多层膜(步骤 S50)。然后,沿划片线(该划片线与沿着每个基板元件的激光二极管 100 的谐振器端面的划片线垂直)的延伸方向将每个基板元件切割分割为多个芯片,即,激光二极管(步骤 S60)。在该实施方式中,以上述方式制造激光二极管 100。

[0071] (3. 带状部的配置)

[0072] 接下来,将详细描述根据该实施方式的激光二极管 100 中的带状部 101 的配置。在根据该实施方式的激光二极管 100 中,如上所述,带状部 101 的延伸方向被确定在形成带状部 101 的面内相对于 c 轴投影方向以在大约 8° 至大约 12° (包括 8° 和 12°)或大约 18° 至大约 29° (包括 18° 和 29°)的范围内的角度倾斜的方向。因此,可提高激光的传播方向(带状部 101 的延伸方向)和谐振器端面之间的正交性,并且可获得有利的激光特性,下面描述其中的一个原因。

[0073] (1) 谐振器端面的倾斜角的合适范围

[0074] 在相关技术领域中的激光二极管内,谐振器端面被形成为与激光的波导(带状部)垂直。此外,在谐振器端面上形成例如由电介质制成的多层膜(介电多层膜),以提高各种激光特性,例如包括激光阈值电流 I_{th} 。更具体地,在谐振器端面上形成介电多层膜时,与在谐振器端面(未涂覆)上未形成介电多层膜的情况相比,进一步提高了该谐振器端面的反射率,并且相应地提高包括例如激光阈值电流 I_{th} 的各种激光特性。

[0075] 此时,为了提高激光特性,具体地,与未涂覆谐振器端面的情况相比,用作不提取激光的谐振器端面的背面的反射率通常更高。要注意的是,尽管正面的反射率取决于包括例如激光谐振器长度和所使用的半导体的结晶度的各种条件,但是就激光特性和设计灵活性而言,也可以将用作提取激光的谐振器端面的正面的反射率设置为高。换言之,实际上,在激光二极管内,可以将反射率比未涂覆的谐振器端面更高的谐振器端面形成为与未涂覆的谐振器端面相比,允许更多的光返回到激光谐振器的内部。

[0076] 使用理论计算,将更定量地描述谐振器端面的上述定性的配置条件。未涂覆的谐振器端面的反射率 R 由 $R=(n_0-n_1)^2/(n_0+n_1)^2$ 确定,其中, n_0 为介质(通常为空气)的折射率,而 n_1 为半导体的折射率。要注意的是,上述表达式所表示的折射率 R 为激光进入与其垂直的谐振器端面内时的反射率。

[0077] 例如,根据半导体组分或所期望的光的波长,InAlGa_N基氮化物半导体的折射率落在大约 2 到 3 (包括 2 和 3) 的范围内;因此,在使用这样的四元半导体的激光二极管内,未涂覆的谐振器端面的折射率 R 落在大约 10% 到 25% (包括 10% 和 25%) 的范围内。因此,在 InAlGa_N 基氮化物激光二极管内,需要将谐振器端面上入射的 10% 或以上的光返回到激光谐振器的内部。而且,在 InAlGa_N 基氮化物激光二极管内,优选地将谐振器端面上入射的大约 25% 的光返回到激光二极管中,并且优选地将大于大约 25% 的光返回到激光谐振器中。

[0078] 然而,当谐振器端面 and 带状部的延伸方向(激光的传播方向)之间丧失正交性时,谐振器端面的光反射方向与激光的传播方向不一致;因此,难以满足谐振器端面内的上述条件(返回光的百分比)。

[0079] 因此,当本公开的发明人通过理论计算,验证谐振器端面 and 带状部的延伸方向(激光的传播方向)之间的正交性偏差和返回到激光谐振器的光的百分比之间的关系时,获得以下研究结果。要注意的是,基于例如具有折射率 n_1 为 2.5 的半导体且在垂直方向(半导体基底的厚度方向)上的 20° 的发射角的典型氮化物激光二极管进行这种验证。此外,基于假设从激光二极管中发射的光强度分布和激光二极管内的光强度分布为高斯分布,并且这些光强度分布的传播与折射率成反比,来进行这种验证。此外,在该验证中,当谐振器端面 and 形成有带状部的面之间的角度为 90° (理想值)时,谐振器端面的折射率为 100%。

[0080] 结果,可以发现的是,当谐振器端面 and 形成有带状部的面之间的角度相对于 90° 倾斜大约 3° 时,返回到谐振器内部的光的百分比降低至大约 25%。此外,可以发现的是,当谐振器端面 and 形成有带状部的面之间的角度相对于 90° 倾斜大约 6° 时,返回到激光谐振器内部的光的百分比降低至大约 10%。

[0081] 从以上验证结果中可以发现的是,当从谐振器端面 and 形成有带状部的面之间的角度的理想值的偏移量(倾斜角)为大约 6° 或以下,并且更优选地为 3° 或以下时,满足谐振器端面的上述定性的配置条件。换言之,可以发现的是,谐振器端面 and 形成有带状部的面之间的角度的理想值优选地为 90°;然而,即使该角度偏离理想值,只要理想值的偏移量为大约 6° 或以下,并且更优选地为 3° 或以下,就可获得足够优良的激光特性。要注意的是,当谐振器端面 and 形成有带状部的面之间的角度为 90° (理想值)时的谐振器端面在下文中被“理想的面”。

[0082] 在使用具有 {2, 0, -2, 1} 面的半极性基板制造的 InAlGa_N 基氮化物激光二极管内,最终确定了从谐振器端面的理想面的倾斜角(偏移量)和激光阈值电流 I_{th} 之间的关系。要

注意的是,在本文中所制造的 InAlGa_N 基氮化物激光二极管内,在正面和背面的每一个上形成介电多层膜,将正面的折射率调节为 55%,并且将背面的折射率调节为 95%。

[0083] 图 6 示出了测量结果。要注意的是,图 6 中所示的特性的水平轴表示从谐振器端面相对于形成有带状部的面的角度的理想值(90°)的倾斜角(偏移量)即,相对于谐振器端面的理想面的倾斜角,而垂直轴表示激光阈值电流 I_{th} 。如图 6 中所示,随着谐振器端面的倾斜角的增大,激光阈值电流 I_{th} 增大;然而,当倾斜角接近 3° 时,激光阈值电流 I_{th} 增大,而当倾斜角超过 3° 时,激光阈值电流 I_{th} 进一步增大。从该测量结果还发现,如在上述通过理论计算的上述验证结果,相对于谐振器端面的理想面的倾斜角更优选地为大约 3° 或以下,以便获得优良的激光特性。

[0084] (2) 带状部的合适的延伸方向

[0085] 接下来,下面将描述使用半导体基底(后文中称为“半极性基底”)的六方晶系 III 族氮化物二极管中的带状部的优选的延伸方向,该半导体基底具有沿 {2, 0, -2, 1} 方向定向的半极性面。

[0086] 通常,在使用半极性基底的六方晶系 III 族氮化物激光二极管内,带状部的延伸方向(激光的传播方向)被确定为沿着 c 轴在形成有带状部的面(半极性面)上的投影方向上定向。然而,在这种情况下,谐振器端面并非可容易地解理的面,例如,“c”面、“m”面或“a”面(参照图 2A 和 2B)。因此,在这种情况下,难以以 90° (理想值)将形成有带状部的面和谐振器端面之间的角度进行定向,并且难以确定从谐振器端面的理想面的偏移量(倾斜角),以满足上述角度条件(大约 6° 或以下,并且优选地大约 3° 或以下)。

[0087] 因此,通过数值分析,确定了在使用沿着 {2, 0, -2, 1} 方向的半极性基底的激光二极管内,是否存在允许从形成有带状部的面和谐振器端面之间的角度的理想值的偏移量满足上述角度条件的带状部的延伸方向。

[0088] 图 7 为示出了用于数值分析的激光二极管 100 的分析模型的示意性透视图。要注意的是,使用向量运算作为数值分析的方法。

[0089] 更具体地,由以下表达式(1)确定六方晶系晶体内的预定晶面({h, k, l, m} 面)和半极性面 1a ({2, 0, -2, 1} 面)之间的角度。

[0090] [数学表达式 1]

$$[0091] \quad \alpha = \arccos \left(\frac{\mathbf{Pe} \cdot \mathbf{Ps}}{|\mathbf{Pe}| |\mathbf{Ps}|} \right) \quad \cdots (1)$$

[0092] 此外,当将预定晶面({h, k, l, m} 面)考虑为谐振器端面 102 时,通过以下表达式(2),确定带状部 101 的延伸方向的从 c 轴投影方向的偏移量 $d\theta$ (倾斜角)。

[0093] [数学表达式 2]

$$[0094] \quad d\theta = \arccos \left(\frac{\mathbf{Pe_s} \cdot \mathbf{Pc}}{|\mathbf{Pe_s}| |\mathbf{Pc}|} \right) \quad \cdots (2)$$

[0095] 要注意的是,上述表达式(1)中的向量“Pe”为表示晶面({h, k, l, m} 面:谐振器端面)的面取向的向量,而向量“Ps”为表示半极性面 1a 的面取向的向量。此外,上述表达式(2)中的向量“Pc”为表示作为带状部 101 的延伸方向的参考的 c 轴投影方向的向量。然而,上述向量为当六方晶系晶体的面指数(h, k, l 以及 m)被转换成直角坐标时的向量,并且

上述向量由以下表达式(3)表示。

[0096] [数学表达式 3]

$$[0097] \quad \mathbf{Pe} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1/\sqrt{3} & 2/\sqrt{3} & 0 \\ 0 & 0 & a/c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h \\ k \\ m \end{pmatrix}, \mathbf{Ps} = \begin{pmatrix} 2.00 \\ 1.15 \\ 0.61 \end{pmatrix}, \mathbf{Pc} = \begin{pmatrix} -1.73 \\ -1.00 \\ 7.53 \end{pmatrix} \dots(3)$$

[0098] 此外,上述表达式(3)中的“c”表示沿六方晶系晶体的 c 轴方向的晶格常数,并且“a”表示沿六方晶系晶体的 a 轴方向的晶格常数。此外,上述表达式(2)中的向量“Pes”表示向量“Pe”的半极性面 1a 的面内方向的分量,并且由以下表达式(4)表示。

[0099] [数学表达式 4]

$$[0100] \quad \mathbf{Pcs} = \mathbf{Pe} - \frac{\mathbf{Pe} \cdot \mathbf{Ps}}{|\mathbf{Ps}|^2} \mathbf{Ps} \dots(4)$$

[0101] 要注意的是,上述表达式(1)、(2)以及(4)内的“|V|”表示向量 V 的绝对值,其中, V 为向量 Pe、Ps、Pes 以及 Str 中的任一个。在数值分析中,六方晶系晶体的面指数 h、k、l 以及 m 在 0 到 ±9 的范围内变化,以执行上述表达式(1)到(4)的向量运算。

[0102] 图 8 和 9 示出了上述数值分析的结果。图 8 为示出了从晶面的理想面的偏移量 δ (=90-α) 为 3° 或以下的各种晶面的面指数与对应于各种晶面中的每个的带状部 101 的延伸方向的从 c 轴投影方向的偏移量 dθ (倾斜角)之间的关系表格。此外,图 9 为示出了从晶面的理想面的偏移量 δ 在大于 3° 和小于 6° 的范围内的各种晶面的面指数和带状部 101 的延伸方向的从 c 轴投影方向的偏移量 dθ 之间的关系表格。

[0103] 如图 8 和图 9 中所示,可以发现,在使用半极性基底的六方晶系 III 族氮化物激光二极管内,存在大量的从半极性面 1a ({2, 0, -2, 1} 面)和谐振器端面之间的角度的理想值(90°)的偏移量 δ 小于 6° 的晶面。然而,由于使用半极性基底的六方晶系 III 族氮化物激光二极管内的激光具有偏振特性,所以激光特性随着带状部 101 的延伸方向(激光的传播方向)的偏移量 dθ (倾斜角)的增大而劣化。实际上,在日本未审查专利申请公开(PCT 申请的公布的日文译本)第 2010-518626 号中指出,在使用半极性基底的情况下,当带状部 101 的延伸方向沿着 c 轴定向时,光增益被最大化,并且带状部 101 的延伸方向偏离沿着 c 轴的方向越多,光增益减少得越多。因此,带状部 101 的延伸方向的从 c 轴投影方向的偏移量 dθ (倾斜角)优选地尽可能较小。获得优良的光增益的偏移量 dθ 的实际范围大约为 30° 或以下。要注意的是,考虑到必要的特征等等,偏移量 dθ 的上限可适当地变化。

[0104] 当从图 8 中选择从谐振器端面的理想面的偏移量 δ 为大约 3° 或以下以及带状部 101 的延伸方向的从 c 轴投影方向的偏移量 dθ 为大约 30° 或以下的晶面时,获得表 1 中的以下结果。

[0105] [表 1]

[0106]

面取向 {h, k, l, m}	δ (度)	dθ (度)
{-2, 2, 0, 7}	0.2	24

{0, 1, -1, -4}	1.5	22
{0, 1, -1, -3}	2.3	27
{1, 1, -2, -9}	2.5	10
{0, 2, -2, -9}	2.9	20

[0107] 从表 1 中可以发现,为了将从形成有带状部 101 的面和谐振器端面之间的角度 α 的理想值的偏移量 δ 保持在大约 3° 或以下,带状部 101 的延伸方向优选地从 c 轴投影方向倾斜大约 10° 、 20° 、 22° 、 24° 或 27° 。尤其地,当带状部 101 的延伸方向倾斜大约 22° 、 24° 或 27° 时,允许从谐振器端面的理想面的偏移量 δ 为大约 2.3° 或以下,并且允许谐振器端面更加接近理想面。换言之,可以发现,当带状部 101 的延伸方向从 c 轴投影方向倾斜大约 22° 、 24° 或 27° 时,可进一步提高带状部 101 的延伸方向和谐振器端面之间的正交性,并且可获得优良的激光特性。

[0108] 要注意的是,在这种情况下,将带状部 101 的延伸方向的相对于 c 轴投影方向的倾斜角优选地以高精度确定为 22° 、 24° 或 27° 。然而,实际上制造该带状部 101 时,由于制造误差等,造成了带状部 101 的延伸方向的相对于 c 轴投影方向的倾斜角($d\theta$)发生变化(制造变化)。因此,即使带状部 101 的延伸方向在与制造变化对应的范围内偏离预定的方向,这种偏差也由制造误差吸收,并且不会引起实际问题。因此,当密切地研究带状部 101 的延伸方向的制造变化时,可以发现,在大约 $\pm 0.5^\circ$ 的范围内发生制造变化。换言之,可以发现,带状部 101 的延伸方向的相对于 c 轴投影方向的倾斜角($d\theta$)可为 22° 、 24° 或 27° 且可允许其偏差大约 $\pm 0.5^\circ$ 。

[0109] 在以上数值分析中,分析了从形成有带状部 101 的面和谐振器端面之间的角度 α 的理想值(90°)的偏移量 δ ,即,在半导体基底 1 的厚度方向上的形成有带状部 101 的面和谐振器端面之间的角度 α 的偏移量。然而,为了验证带状部 101 的延伸方向和谐振器端面之间的正交性,还需要考虑在形成有带状部 101 的面内的带状部 101 的延伸方向和谐振器端面之间的偏移量(水平偏移量)。

[0110] 图 10 示出了形成有带状部 101 的面内的带状部 101 的延伸方向和谐振器端面之间的角度的水平偏移量和激光阈值电流 I_{th} (实验结果)之间的关系。图 10 中所示的特性的水平轴表示从在形成有带状部 101 的面内带状部 101 的延伸方向相对于谐振器端面的理想值(90°)的水平偏移量(倾斜角:绝对值),而垂直轴表示激光阈值电流 I_{th} 。

[0111] 如图 10 中所示,可以发现,当从在形成有带状部 101 内带状部 101 的延伸方向相对于谐振器端面的理想值(90°)的水平偏移量在大约 $\pm 2^\circ$ 的范围内时,激光阈值电流 I_{th} 的分布未被大幅劣化,并且获得优良的值。

[0112] 从上述数值分析(参照表 1)的结果和实验结果(参照图 10)可以发现,当带状部 101 的延伸方向相对于 c 轴投影方向以在大约 8° 至大约 12° (包括 8° 和 12°)或者大约 18° 至大约 29° (包括 18° 和 29°)的范围内的角度倾斜时,获得良好的激光特性。

[0113] 要注意的是,允许本公开具有以下配置:

[0114] (1)一种激光二极管,包括:

[0115] 半导体基底,由六方晶系 III 族氮化物半导体制成并且具有沿 $\{2, 0, -2, 1\}$ 方向的半极性面;

[0116] 外延层,包括形成激光的光波导的发光层,并且形成在半导体基底的半极性面上,所述外延层使得激光的传播方向在光波导面内相对于 c 轴在光波导面上的投影方向以在大约 8° 至大约 12° (包括 8° 和 12°) 或者大约 18° 至大约 29° (包括 18° 和 29°) 的范围内的角度倾斜,所述光波导面包括激光的传播方向并且与半极性面平行;

[0117] 两个谐振器端面,设置在所述激光的光波导的两端;

[0118] 第一电极,形成在所述外延层上;以及

[0119] 第二电极,形成在与半导体基底的外延层所形成在的半极性面相对的面上。

[0120] (2) 根据(1)所述的激光二极管,其中,所述激光的传播方向相对于 c 轴在光波导面上的投影方向以在大约 22° 至大约 27° (包括 22° 和 27°) 的范围内的角度倾斜。

[0121] (3) 根据(2)所述的激光二极管,其中,,所述激光的传播方向相对于 c 轴在光波导面上的投影方向以大约 22° 、大约 24° 以及大约 27° 中的任一个角度倾斜。

[0122] (4) 根据(1)到(3)中任一项所述的激光二极管,其中,所述谐振器端面 and 所述半极性面之间的角度与 90° 的偏移量约为 3° 以下。

[0123] (5) 根据(1)到(4)中任一项所述的激光二极管,其中,所述外延层在其面向所述第一电极的表面中包括沿激光的传播方向延伸的脊状部。

[0124] (6) 一种制造激光二极管的方法,所述方法包括:

[0125] 在由六方晶系 III 族氮化物半导体制成的半导体基底的沿 $\{2, 0, -2, 1\}$ 方向的半极性面上形成外延层,所述外延层包括形成激光的光波导的发光层,并且使得激光的传播方向在光波导面内相对于 c 轴在光波导面上的投影方向以在大约 8° 至大约 12° (包括 8° 和 12°) 或者大约 18° 至大约 29° (包括 18° 和 29°) 的范围内的角度倾斜,所述光波导面包括激光的传播方向并且与半极性面平行;

[0126] 分别在所述外延层和与半导体基底的半极性面相反的面上形成第一电极和第二电极;以及

[0127] 在所述激光的光波导的两端形成两个谐振器端面。

[0128] 本公开包含与在 2012 年 1 月 13 日向日本专利局提交的日本在先专利申请第 2012-00536 号 7 中所公开的主题相关的主题,其全部内容结合于此作为参考。

[0129] 本领域的技术人员应理解的是,根据设计要求和因素,可进行各种修改、组合、子组合以及变形,只要它们在所附权利要求书或其等替换的范围内。

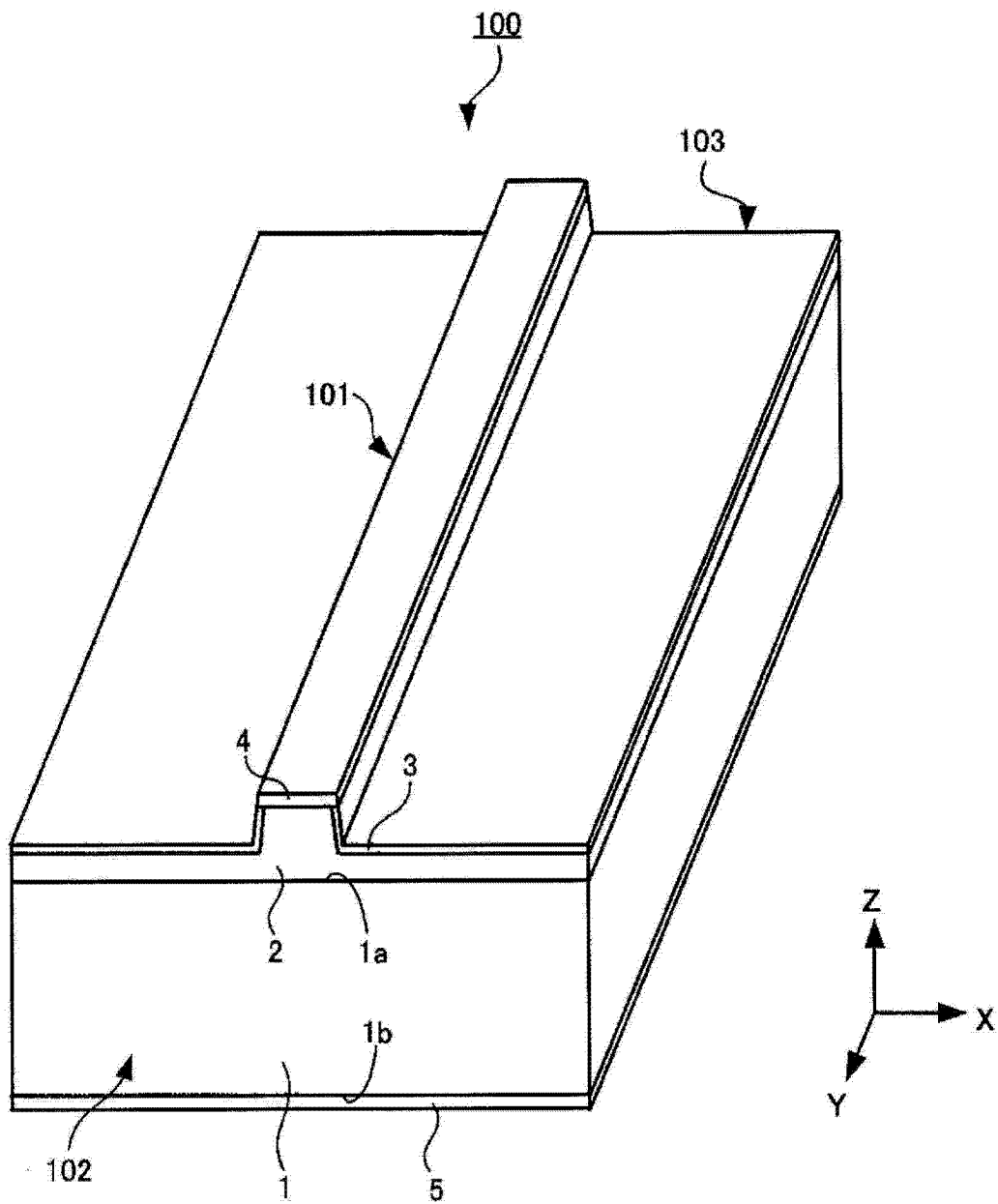


图 1

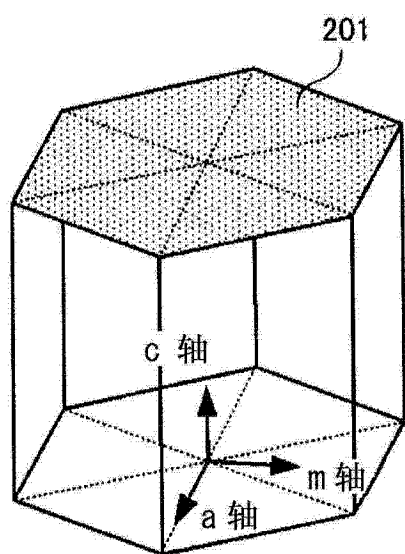


图 2A

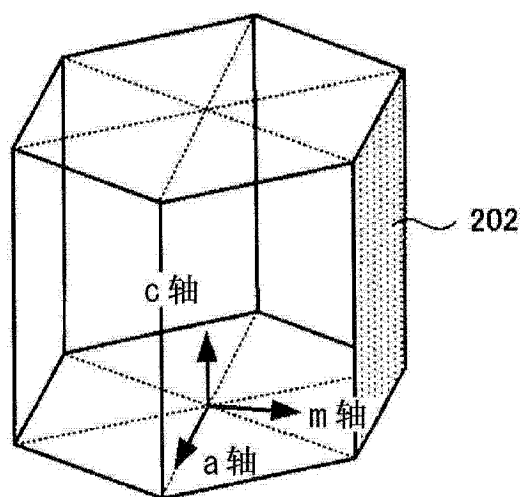


图 2B

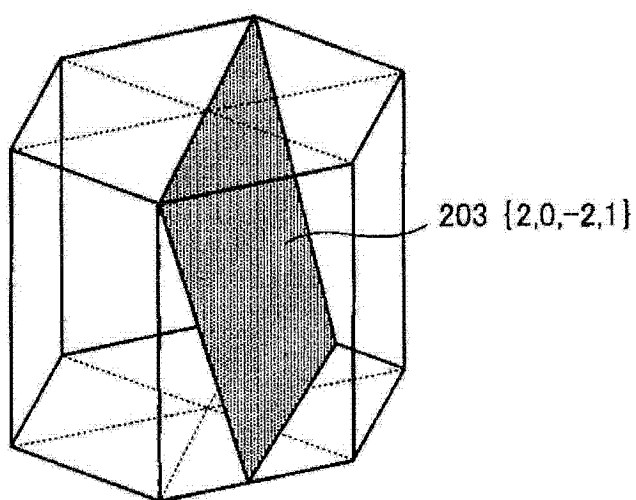


图 3

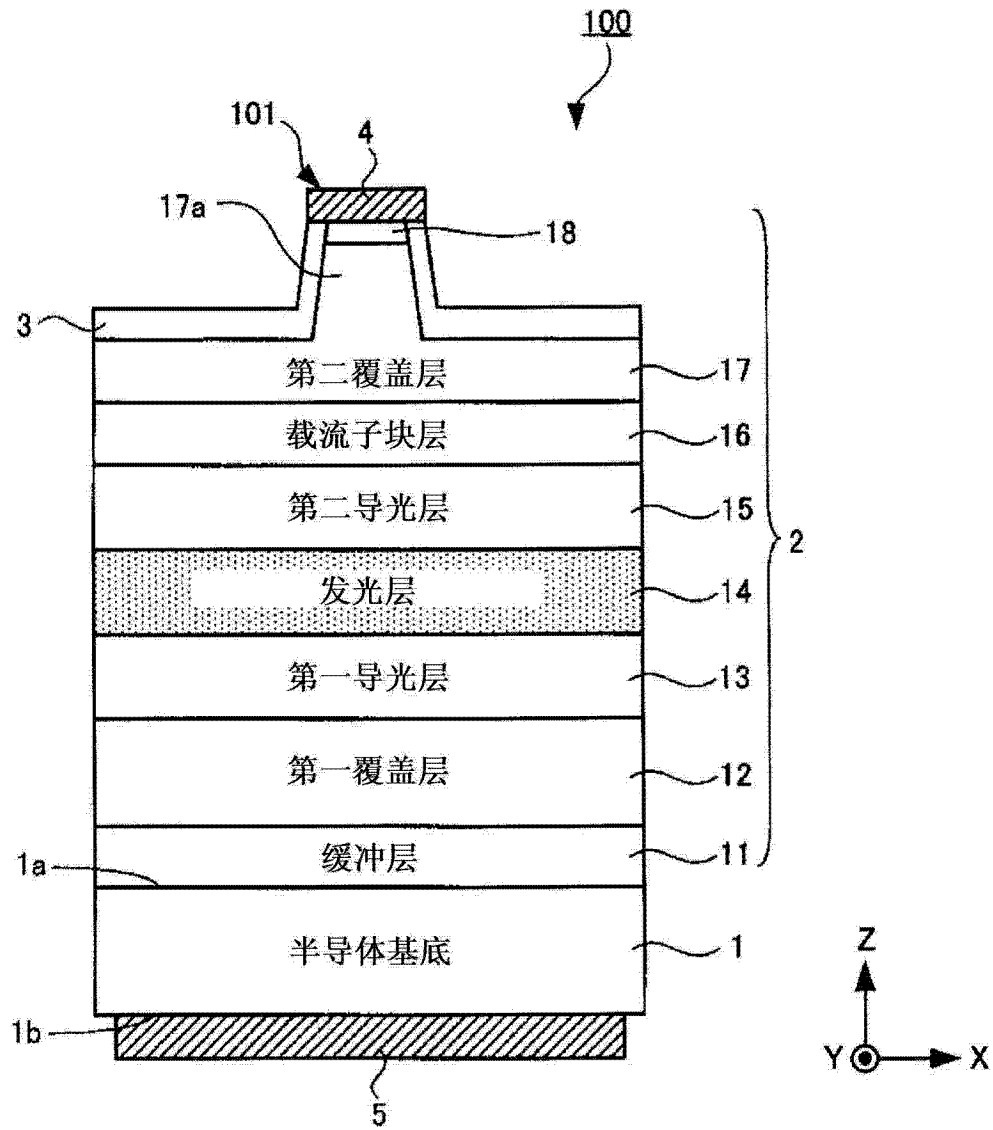


图 4

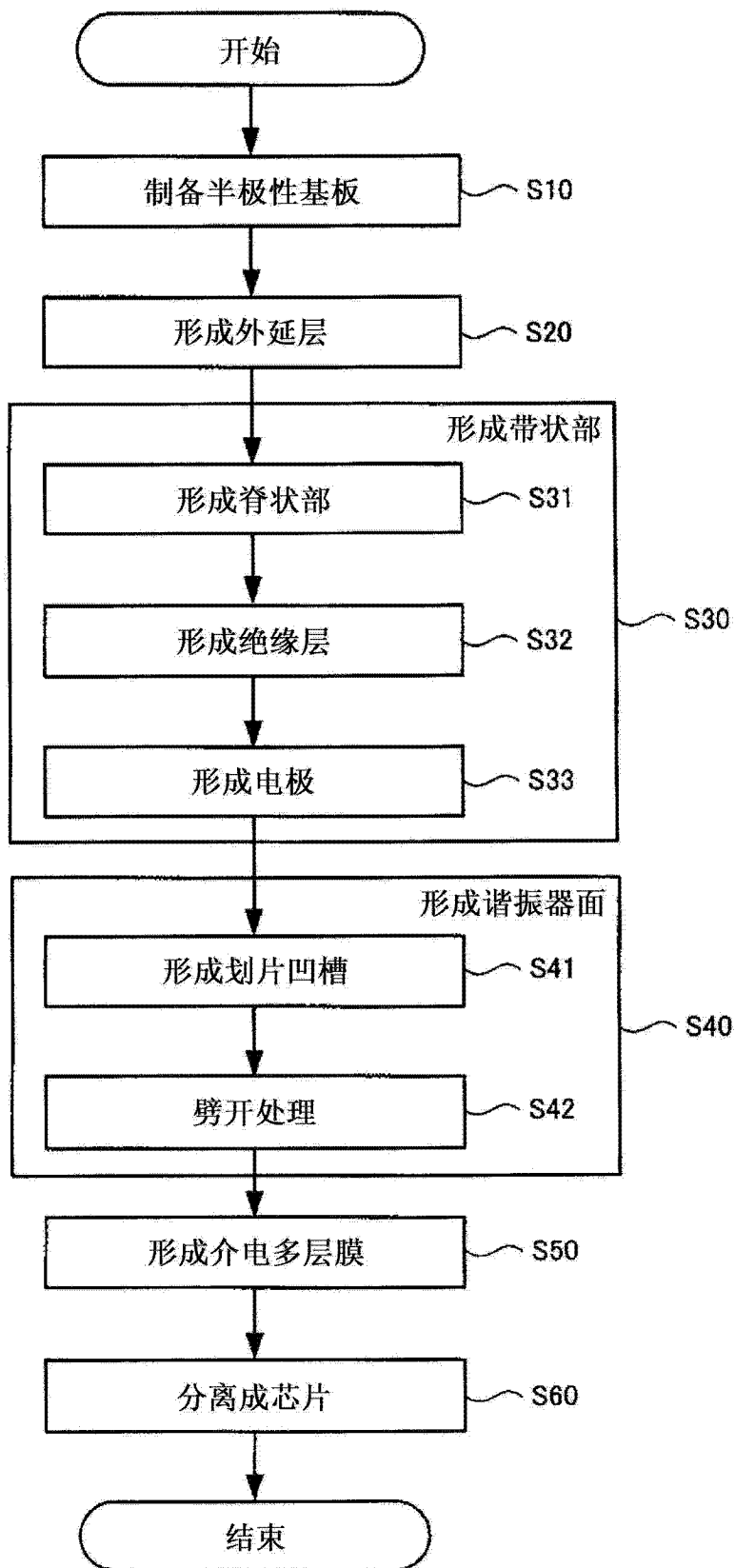


图 5

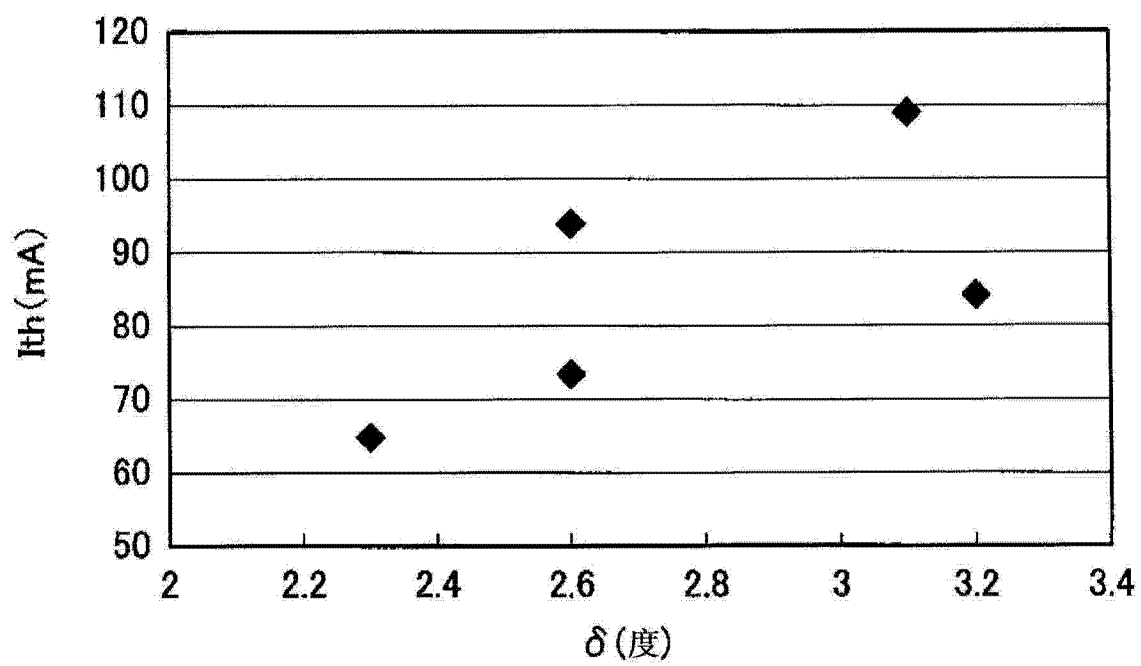


图 6

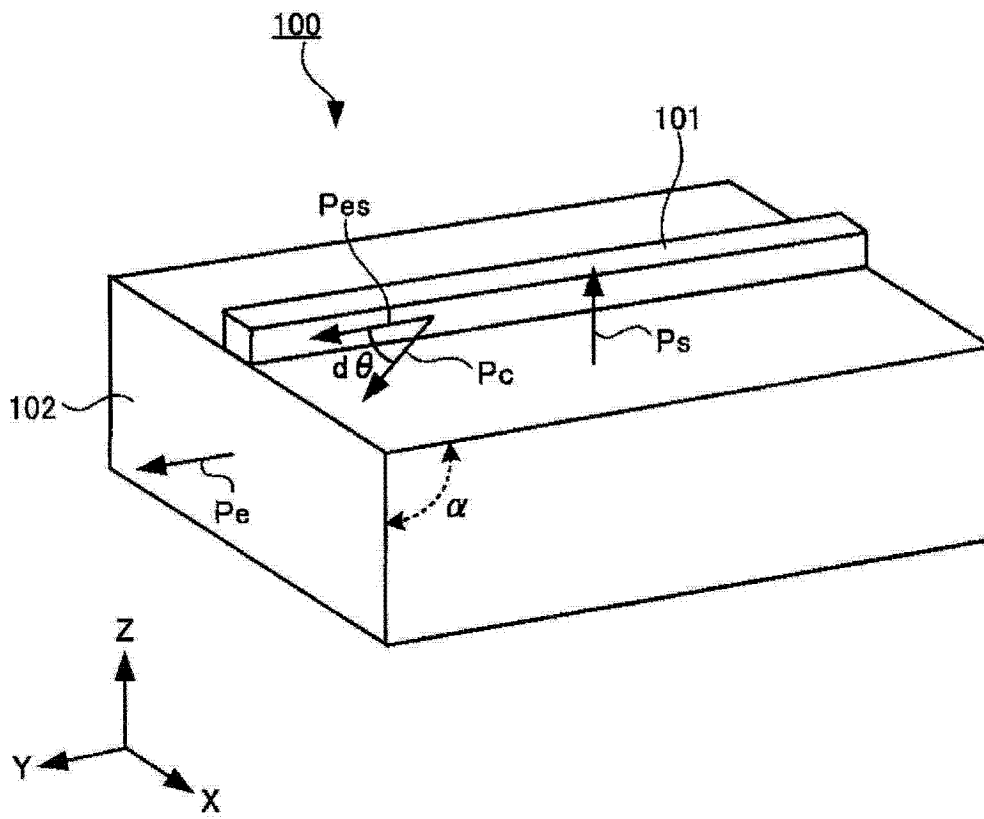


图 7

平面指数				δ (度)	$d\theta$ (度)
h	k	l	m		
-1	2	-1	0	0.0	90
-5	8	-3	7	0.1	61
-4	6	-2	7	0.1	53
-3	4	-1	7	0.1	42
-2	2	0	7	0.2	24
4	-9	5	4	0.4	74
-5	9	-4	3	0.5	78
3	-7	4	4	0.6	70
-4	7	-3	3	0.7	75
-3	5	-2	4	0.7	63
3	-8	5	8	0.9	58
-3	5	-2	3	0.9	69
1	-3	2	4	1.1	50
-5	8	-3	6	1.1	64
4	-8	4	1	1.1	86
-3	4	-1	8	1.3	38
-2	3	-1	3	1.4	57
4	-9	5	5	1.4	71
3	-6	3	1	1.5	84
0	1	-1	-4	1.5	22
-5	9	-4	2	1.5	82
-5	7	-2	9	1.6	50
3	-7	4	5	1.7	66
1	-4	3	6	1.8	46
3	-8	5	9	1.8	55
-4	5	-1	9	1.9	41
-4	7	-3	2	2.0	79
2	-6	4	9	2.1	47
-5	8	-3	5	2.2	68
2	-4	2	1	2.2	82
2	-5	3	5	2.2	58
0	1	-1	-3	2.3	27
4	-9	5	6	2.3	68
-6	9	-3	8	2.3	60
1	-4	3	9	2.5	35
1	1	-2	-9	2.5	10
-5	9	-4	1	2.5	85
-3	5	-2	2	2.7	75
-5	7	-2	8	2.7	53
-4	6	-2	5	2.8	61
0	2	-2	-9	2.9	20
-3	6	-3	2	2.9	79
-2	3	-1	5	3.0	44

图 8

平面指数				δ (度)	$d\theta$ (度)
h	k	l	m		
4	-9	5	7	3.1	64
-6	9	-3	7	3.2	63
-4	7	-3	1	3.3	84
-4	5	-1	8	3.3	44
-5	8	-3	4	3.3	72
4	-8	4	3	3.3	77
5	-9	4	0	3.5	89
-3	5	-2	6	3.6	53
-3	4	-1	5	3.6	51
3	-7	4	7	3.8	58
-5	7	-2	7	3.9	57
4	-9	5	8	3.9	61
0	3	-3	-8	4.0	30
0	1	-1	-5	4.0	18
-2	3	-1	2	4.2	66
1	-2	1	1	4.3	73
-5	8	-3	3	4.5	75
1	1	-2	-8	4.5	11
-3	5	-2	1	4.5	82
-4	9	-5	1	4.5	87
4	-7	3	0	4.6	89
-2	3	-1	6	4.6	39
4	-9	5	9	4.7	59
2	-8	6	9	4.7	53
3	-7	4	8	4.7	55
-3	5	-2	7	4.7	49
-4	5	-1	7	4.8	47
-2	2	0	5	4.9	32
-5	7	-2	6	5.2	60
-6	9	-3	5	5.3	69
-4	8	-4	5	5.3	70
5	-9	4	2	5.5	83
-5	6	-1	9	5.5	45
3	-7	4	9	5.5	52
3	-6	3	4	5.6	68
-5	8	-3	2	5.6	80
2	-5	3	8	5.7	46
0	1	-1	-6	5.8	15
-3	4	-1	4	5.8	56
2	-6	4	3	5.8	71
-3	7	-4	1	5.8	86
1	-3	2	7	5.9	35
0	3	-3	-7	5.9	33

图 9

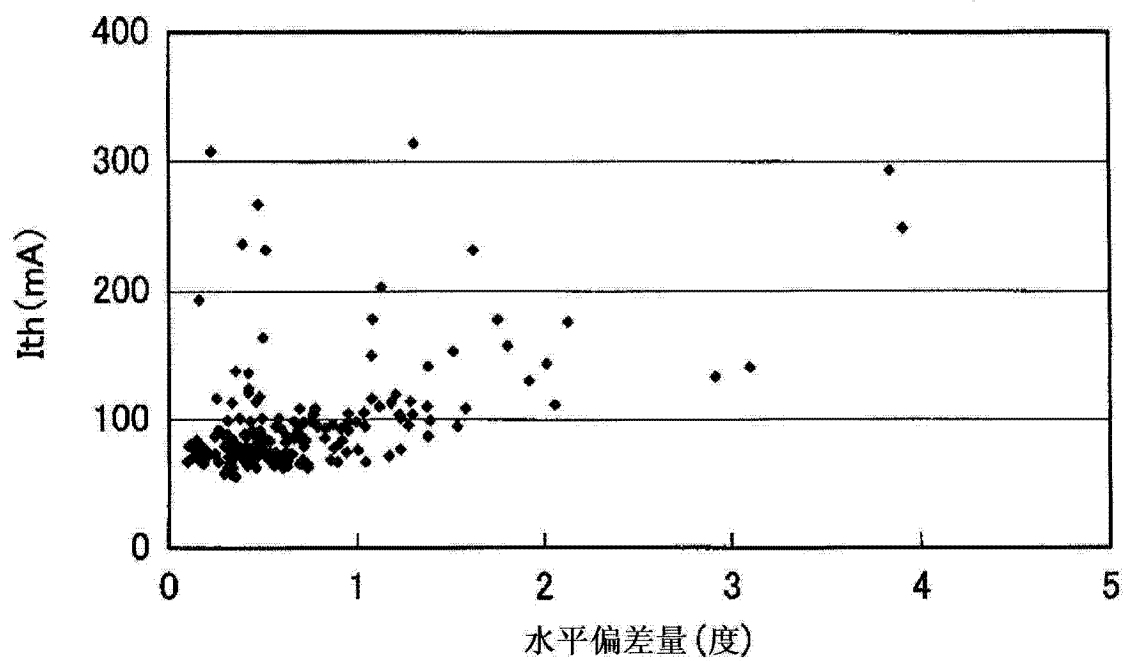


图 10