



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114514616 A

(43) 申请公布日 2022.05.17

(21) 申请号 202080070160.7

(22) 申请日 2020.10.08

(30) 优先权数据

2019-186371 2019.10.09 JP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2022.04.06

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/JP2020/038155 2020.10.08

(87) PCT国际申请的公布数据

W02021/070910 JA 2021.04.15

(71) 申请人 松下知识产权经营株式会社

地址 日本大阪府

(72) 发明人 泷泽俊幸

(74) 专利代理机构 中科专利商标代理有限责任

公司 11021

专利代理师 李新红

(51) Int.Cl.

H01L 29/267 (2006.01)

H01L 29/04 (2006.01)

H01L 29/78 (2006.01)

H01L 29/778 (2006.01)

H01S 5/30 (2006.01)

G30B 29/38 (2006.01)

H01L 21/02 (2006.01)

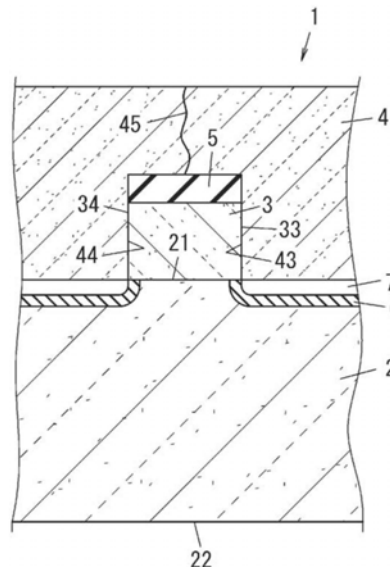
权利要求书2页 说明书28页 附图23页

(54) 发明名称

氮化物半导体结构体、氮化物半导体器件以及用于制作该器件的方法

(57) 摘要

本发明实现了一种包括在单晶第III族氮化物半导体部上的单晶第II-IV族氮化物半导体部的构造。氮化物半导体结构体(1)包括第III族氮化物半导体部(3)和第II-IV族氮化物半导体部(4)。第III族氮化物半导体部(3)是单晶。第III族氮化物半导体部(3)具有预定晶面。第II-IV族氮化物半导体部(4)设置在第III族氮化物半导体部(3)的预定晶面上。第II-IV族氮化物半导体部(4)是单晶。第II-IV族氮化物半导体部(4)含有第II族元素和第IV族元素。第II-IV族氮化物半导体部(4)与第III族氮化物半导体部(3)形成异质结。预定晶面是除(0001)面以外的晶面。



1. 一种氮化物半导体结构体,所述氮化物半导体结构体包括:
含有第III族元素并且具有预定晶面的单晶第III族氮化物半导体部,其中所述第III族元素是选自元素周期表的第13族元素的元素;和
设置在所述第III族氮化物半导体部的所述预定晶面上的单晶第II-IV族氮化物半导体部,所述第II-IV族氮化物半导体部含有第II族元素和第IV族元素,所述第II-IV族氮化物半导体部与所述第III族氮化物半导体部形成异质结,其中所述第II族元素是选自元素周期表的第2族元素或元素周期表的第12族元素的元素,并且所述第IV族元素是选自元素周期表的第14族元素的元素,
所述预定晶面是除(0001)面以外的晶面。
2. 权利要求1所述的氮化物半导体结构体,其中
所述第II族元素是锌。
3. 权利要求1或2所述的氮化物半导体结构体,其中
在所述第II-IV族氮化物半导体部中,与所述预定晶面垂直的晶轴方向是除[001]方向以外的晶轴方向。
4. 权利要求1至3中任一项所述的氮化物半导体结构体,其中
所述预定晶面是(11-20)面。
5. 权利要求4所述的氮化物半导体结构体,其中
在所述第II-IV族氮化物半导体部中,与所述预定晶面垂直的晶轴方向是[010]方向。
6. 权利要求1至3中任一项所述的氮化物半导体结构体,其中
所述预定晶面是(11-22)面。
7. 权利要求6所述的氮化物半导体结构体,其中
在所述第II-IV族氮化物半导体部中,与所述预定晶面垂直的晶轴方向是[011]方向。
8. 权利要求1至3中任一项所述的氮化物半导体结构体,其中
所述预定晶面是(1-100)面。
9. 权利要求8所述的氮化物半导体结构体,其中
在所述第II-IV族氮化物半导体部中,与所述预定晶面垂直的晶轴方向是[210]方向。
10. 一种氮化物半导体器件,所述氮化物半导体器件包括半导体元件,所述半导体元件包括根据权利要求1至9中任一项所述的氮化物半导体结构体的所述第II-IV族氮化物半导体部的至少一部分。
11. 权利要求10所述的氮化物半导体器件,其中
所述第II-IV族氮化物半导体部包括:
n型半导体区;和
p型半导体区,并且
所述半导体元件包括:
所述n型半导体区的至少一部分;和
所述p型半导体区的至少一部分。
12. 权利要求10或11所述的氮化物半导体器件,所述氮化物半导体器件还包括与作为所述半导体元件的第一半导体元件分开的、在所述第III族氮化物半导体部上形成的第二半导体元件。

13. 权利要求10至12中任一项所述的氮化物半导体器件,其中所述第III族氮化物半导体部具有多层结构,在所述多层结构中分别具有不同组成的多个第III族氮化物半导体层彼此层叠。

14. 权利要求10至13中任一项所述的氮化物半导体器件,所述氮化物半导体器件还包括单晶硅衬底,其中

所述第III族氮化物半导体部设置在所述单晶硅衬底上。

15. 权利要求10至14中任一项所述的氮化物半导体器件,其中

在所述第II-IV族氮化物半导体部上形成的所述半导体元件是发射光的发光元件。

16. 一种用于制作权利要求10至15中任一项所述的氮化物半导体器件的方法,所述方法包括:

在含有第III族元素的单晶第III族氮化物半导体部的除(0001)面以外的预定晶面上,外延生长含有第II族元素和第IV族元素的第II-IV族氮化物半导体部,其中所述第III族元素是选自元素周期表的第13族元素的元素,所述第II族元素是选自元素周期表的第2族元素或元素周期表的第12族元素的元素,并且所述第IV族元素是选自元素周期表的第14族元素的元素。

氮化物半导体结构体、氮化物半导体器件以及用于制作该器件的方法

技术领域

[0001] 本公开总体上涉及氮化物半导体结构体、氮化物半导体器件以及用于制作该氮化物半导体器件的方法。更具体地,本公开涉及包括第III族氮化物半导体部和第II-IV族氮化物半导体部的氮化物半导体结构体、包括这样的氮化物半导体结构体的氮化物半导体器件以及用于制作该氮化物半导体器件的方法。

背景技术

[0002] 专利文献1教导了在作为使用半导体层状结构的发光器件的发光二极管中,在两层第III族氮化物比如GaN之间形成ZnGeN₂活性层。

[0003] 然而,在专利文献1的半导体层状结构中,第III族氮化物层作为多晶层形成在衬底上。专利文献1既没有教导在单晶第III族氮化物半导体部上外延生长第II-IV族氮化物半导体部,也没有教导在其上外延生长第II-IV族氮化物半导体部时造成的任何问题。

[0004] 引用清单

[0005] 专利文献

[0006] 专利文献1:JP 2000-133841 A

发明内容

[0007] 本公开的一个目的是提供氮化物半导体结构体、氮化物半导体器件以及用于制作该氮化物半导体器件的方法,其均被配置或设计用于实现其中在单晶第III族氮化物半导体部上形成单晶第II-IV族氮化物半导体部的这种构造。

[0008] 根据本公开的一个方面的氮化物半导体结构体包括第III族氮化物半导体部和第II-IV族氮化物半导体部。所述第III族氮化物半导体部是单晶。所述第III族氮化物半导体部含有第III族元素,其中所述第III族元素是选自元素周期表的第13族元素的元素。所述第III族氮化物半导体部具有预定晶面。所述第II-IV族氮化物半导体部设置在所述第III族氮化物半导体部的所述预定晶面上。所述第II-IV族氮化物半导体部是单晶。所述第II-IV族氮化物半导体部含有第II族元素和第IV族元素,其中所述第II族元素是选自元素周期表的第2族元素或元素周期表的第12族元素的元素,并且所述第IV族元素是选自元素周期表的第14族元素的元素。所述第II-IV族氮化物半导体部与所述第III族氮化物半导体部形成异质结。所述预定晶面是除(0001)面以外的晶面。

[0009] 根据本公开的另一个方面的氮化物半导体器件包括半导体元件,所述半导体元件包括上述氮化物半导体结构体的所述第II-IV族氮化物半导体部的至少一部分。

[0010] 根据本公开的又一方面的用于制作所述氮化物半导体器件的方法包括:在含有第III族元素的单晶第III族氮化物半导体部的除(0001)面以外的预定晶面上外延生长含有第II族元素和第IV族元素的单晶第II-IV族氮化物半导体部,其中所述第III族元素是选自元素周期表的第13族元素的元素,所述第II族元素是选自元素周期表的第2族元素或元素

周期表的第12族元素的元素,并且所述第IV族元素是选自元素周期表的第14族元素的元素。

附图说明

[0011] 图1是根据第一实施方案的氮化物半导体结构体的横截面图;

[0012] 图2示出了通过在具有 ZnGeN_2 晶体/ AlN 晶体/单晶硅衬底的这种多层结构的样品上的X射线衍射的 ω 扫描进行的X射线摆动曲线分析的结果;

[0013] 图3A示出了具有 ZnGeN_2 晶体/ AlN 晶体/单晶硅衬底的这种多层结构的样品的表面SEM图像;

[0014] 图3B示出了具有 ZnGeN_2 晶体/ AlN 晶体/单晶硅衬底的这种多层结构的样品的 AlN 解理面(cleaved face)附近的SEM图像;

[0015] 图4是从c面观看的单晶 ZnGeN_2 的晶体结构的示意图;

[0016] 图5是从c面观看的单晶 GaN 的晶体结构的示意图;

[0017] 图6示出了关于 $\text{ZnGeN}_2/\text{AlN}$ 界面计算的第一模型(90/m);

[0018] 图7示出了关于 $\text{ZnGeN}_2/\text{AlN}$ 界面计算的第二模型(30/m);

[0019] 图8示出了关于 $\text{ZnGeN}_2/\text{AlN}$ 界面计算的第三模型(00/a);

[0020] 图9示出了关于 $\text{ZnGeN}_2/\text{AlN}$ 界面计算的第四模型(60Ge/a);

[0021] 图10示出了关于 $\text{ZnGeN}_2/\text{AlN}$ 界面计算的第五模型(60Zn/a);

[0022] 图11A-11F是示出根据第一实施方案的用于制作氮化物半导体结构体的方法的各个过程步骤的横截面图;

[0023] 图12是根据第一实施方案的氮化物半导体器件的横截面图;

[0024] 图13是根据第二实施方案的氮化物半导体结构体的横截面图;

[0025] 图14A-14D是示出一种用于制作所述氮化物半导体结构体的方法的各个过程步骤的横截面图;

[0026] 图15是根据第三实施方案的氮化物半导体结构体的横截面图;

[0027] 图16A-16C是示出一种用于制作所述氮化物半导体结构体的方法的各个过程步骤的横截面图;

[0028] 图17是根据第三实施方案的氮化物半导体器件的横截面图;

[0029] 图18A-18C是示出一种用于制作所述氮化物半导体器件的方法的各个过程步骤的横截面图;

[0030] 图19A-19C是示出用于制作所述氮化物半导体器件的所述方法的各个过程步骤的横截面图;

[0031] 图20是根据第四实施方案的氮化物半导体器件的横截面图;

[0032] 图21A-21C是示出一种用于制作所述氮化物半导体器件的方法的各个过程步骤的横截面图;

[0033] 图22A-22C是示出用于制作所述氮化物半导体器件的所述方法的各个过程步骤的横截面图;以及

[0034] 图23A-23C是示出用于制作所述氮化物半导体器件的所述方法的各个过程步骤的横截面图。

具体实施方式

[0035] 在以下对实施方案及其变化方案的描述中所参照的图1和图4-23C都是示意图。也就是说,图上所示的各构成要素的尺寸(包括厚度)的比率并不总是反映它们的实际尺寸比。

[0036] (第一实施方案)

[0037] (1) 概要

[0038] 将参照图1描述根据第一实施方案的氮化物半导体结构体1。

[0039] 氮化物半导体结构体1包括第III族氮化物半导体部3和第II-IV族氮化物半导体部4。

[0040] 第III族氮化物半导体部3是单晶。第III族氮化物半导体部3含有第III族元素。在此情况下,第III族元素是选自元素周期表的第13族元素的元素。具体地,第III族元素是选自由以下各项组成的组中的元素:硼(B)、铝(Al)、镓(Ga)、铟(In)、铊(Tl)和鉨(nihonium)(Nh)。第III族氮化物半导体部3中含有的第III族氮化物半导体由通式 $A_{III}N$ 表示,其中 A_{III} 是第III族元素。

[0041] 第II-IV族氮化物半导体部4也是单晶。第II-IV族氮化物半导体部4含有第II族元素和第IV族元素。在此情况下,第II族元素是选自元素周期表的第2族元素或选自元素周期表的第12族元素的元素。具体地,第II族元素是选自由以下各项组成的组中的元素:铍(Be)、镁(Mg)、钙(Ca)、锶(Sr)、钡(Ba)、镭(Ra)、锌(Zn)、镉(Cd)、汞(Hg)和鐳(copernicium)(Cn)。第IV族元素是选自元素周期表的第14族元素的元素。具体地,第IV族元素是选自由以下各项组成的组中的元素:碳(C)、硅(Si)、锗(Ge)、锡(Sn)、铅(Pb)和鈇(flerovium)(Fl)。第II-IV族氮化物半导体部4中含有的第II-IV族氮化物半导体由通式 $B_{II}C_{IV}N_2$ 表示,其中 B_{II} 是第II族元素,并且 C_{IV} 是第IV族元素。

[0042] 第III族氮化物半导体部3具有预定晶面。第II-IV族氮化物半导体部4设置在第III族氮化物半导体部3的预定晶面上。在此情况下,第II-IV族氮化物半导体部4与第III族氮化物半导体部3形成异质结。

[0043] (2) 关于预定晶面的面取向的研究

[0044] 在采用AlN晶体或GaN晶体作为第III族氮化物半导体部3中含有的第III族氮化物半导体,并且采用 $ZnGeN_2$ 晶体作为第II-IV族氮化物半导体部4中含有的第II-IV族氮化物半导体的情况下,本发明人对预定晶面的面取向进行了研究。以下是研究的细节。

[0045] (2.1) 在第III族氮化物半导体的c面上的第II-IV族氮化物半导体的晶体生长

[0046] 本发明人发现了以下问题:当第II-IV族氮化物半导体(比如 $ZnGeN_2$ 晶体)在第III族氮化物半导体(比如GaN晶体或AlN晶体)上异质外延生长时,有时在限定区域中混杂过多的旋转结构域。本发明人通过进行采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)法在AlN晶体上生长 $ZnGeN_2$ 晶体的研究开发并由此评价 $ZnGeN_2$ 晶体的结晶度、表面形貌、横截面结构和其他性质而遇到了此问题。注意,专利文献1并未提出或暗示这样的问题。

[0047] 本发明人进行了在AlN晶体的c面上生长 $ZnGeN_2$ 晶体的实验。实验结果如下:

[0048] 首先,使用具有第一主面和与第一主面相反的第二主面的单晶硅衬底来制备样品,在所述样品中通过MOCVD法在单晶硅衬底的第一主面上使AlN晶体生长到246nm的厚度。在此情况下,单晶硅衬底的第一主面是(111)面。由此生长的AlN晶体的主面(即AlN晶体的

背对单晶硅衬底的反面)是c面。AlN晶体的c面是(0001)面。

[0049] 通过MOCVD法在此样品的AlN晶体的主面上生长ZnGeN₂晶体。以此方式,制备了具有ZnGeN₂晶体/AlN晶体/Si衬底的这种多层结构的样品。当通过MOCVD法生长ZnGeN₂晶体时,分别使用二乙基锌(Zn(C₂H₅)₂)、四乙基锗(Ge(C₂H₅)₄)和氨(NH₃)作为Zn、Ge和N的源材料(也被称为“前体”)。备选地,例如,也可以分别使用二甲基锌(Zn(CH₃)₂)和四甲基锗(Ge(CH₃)₄)作为Zn和Ge的源材料。这降低了源材料的碳含量,因而即使ZnGeN₂晶体的晶体生长温度被设定为足够高于源材料的分解温度的温度,或者即使提高了源材料的分解效率,也使得能够减少ZnGeN₂晶体中的碳的沉析。

[0050] 通过MOCVD法生长ZnGeN₂晶体的条件包括900°C的衬底温度(在下文中也被称为“晶体生长温度”)、70kPa的生长压力和四小时的生长时间。如本文中使用的,“衬底温度”可以替换为支撑要被切成单晶硅衬底的晶片的基座(susceptor)的温度。例如,衬底温度可以替换为用热电偶测量的基座的温度。如本文中使用的,“生长压力”在本文中是指在将各源材料和载气供应到MOCVD系统的反应器中的这种状态下的反应器中的压力。本发明人成功获得具有大约0.4μm的厚度和镜面的ZnGeN₂薄膜。据本发明人所知,此实验应是世界上首次成功通过MOCVD法生长ZnGeN₂晶体。

[0051] 图2示出了通过在具有ZnGeN₂晶体/AlN晶体/单晶硅衬底的这种多层结构的样品上的X射线衍射的ω扫描(2θ-ω扫描)进行的X射线摆动曲线(XRC)分析的结果。在图2中可以看出,不仅存在多个表明Si的存在的峰,而且还存在多个表明ZnGeN₂的存在的峰和多个表明AlN的存在的峰。在图2中,每个峰都伴随有与该峰对应的晶体的名称及其面取向。由图2可以看出,ZnGeN₂晶体具有c轴取向。也就是说,图2表明在主面为c面的AlN晶体的主面上外延生长了主面为c面的ZnGeN₂晶体。

[0052] 本发明人通过扫描电子显微镜(SEM)观察上述样品的ZnGeN₂晶体。接下来将参照图3A和3B描述观察结果。图3A是通过观察样品的ZnGeN₂晶体的表面(主面)得到的SEM图像。图3B是在m面附近的ZnGeN₂晶体的SEM图像,m面是AlN晶体的解理面。AlN晶体的m面是(1-100)面。如本文中使用的,米勒标记中加入的负号“-”表示在负号后的标记的反转。注意,图3A所示的在表面中央附近看到的裂纹是由于Si与AlN之间以及AlN与ZnGeN₂之间的热膨胀系数差异而产生的裂纹,并且不与本讨论直接相关。而是,裂纹的存在表明在AlN晶体上外延生长了ZnGeN₂晶体。

[0053] 注意,图3A是通过观察ZnGeN₂晶体的表面区域得到的SEM图像,该图像比镜面稍微更白化,以突出由于ZnGeN₂晶体的晶体结构所造成的表面形貌变化。如图3A中的箭头所指示的,在ZnGeN₂晶体的主面上可识别出膨胀平面生长的痕迹。ZnGeN₂晶体是之后将会描述的具有二次或二重旋转对称性的晶体。因此,如果ZnGeN₂晶体的表面不是镜面而是稍微粗糙的表面,则应识别出条纹图案。然而,实际上,在那里没有观察到这样的图案。

[0054] 另一方面,参照图3B,可以看出ZnGeN₂晶体生长为从AlN晶体的解理面绘出V形线。在解理面的附近,在ZnGeN₂晶体的表面上可识别出具有六重对称性的条纹图案。此条纹图案的取向与AlN晶体的晶轴方向[11-20]一致。由其晶体结构推测ZnGeN₂晶体会具有这样的条纹形貌,但是这取决于其晶体生长条件。与这样的推测相反,在图3A中,ZnGeN₂晶体的表面没有这样的条纹图案。因此,推测由于与在限定区域中混杂的那些多个旋转结构域的结合的竞争而产生不规则形貌比如图3B所示的形貌。

[0055] 这些结果表明,在AlN晶体的c面上混杂了那些多个旋转结构域,即在AlN晶体的c面上生长了具有多个结构域的ZnGeN₂晶体。

[0056] (2.2) 第II-IV族氮化物半导体中产生旋转结构域的机理

[0057] 首先,将描述已经在第III族氮化物半导体上生长的第II-IV族氮化物半导体晶体中如何发生这样的在限定区域中混杂了过多旋转结构域的问题。

[0058] 图4是ZnGeN₂晶体的晶体结构的示意图。更具体地,图4是示出从表示ZnGeN₂晶体的c轴的晶轴[001]方向观看的ZnGeN₂晶体的晶体结构的示意图。图5是GaN晶体的晶体结构的示意图。更具体地,图5是示出从表示GaN晶体的c轴的晶轴[0001]方向观看的GaN晶体的晶体结构的示意图。注意,尽管引用ZnGeN₂晶体和GaN晶体作为示例,但是即使使用其他第II-IV族氮化物半导体和其他第III族氮化物半导体作为它们的替代,也不影响以下讨论的逻辑通用性。

[0059] 在图4中,小球体表示N原子。另外,在图4中,具有较密阴影的球体表示Ge原子,而具有较不密的阴影的球体表示Zn原子。注意,在图4中,那些原子为在圆点内加阴影,并不表示其横截面,而仅是使得能够更容易地在图上将Ge和Zn原子彼此区分开。

[0060] 在图5中,小球体表示N原子。另外,在图5中,具有阴影的球体表示Ga原子。注意,在图5中,那些原子被加阴影,并不表示其横截面,而仅是使得能够更容易地在图上将N和Ga原子彼此区分开。

[0061] 在图4和5中每个的左下角,用箭头和米勒标记指示晶轴方向。更具体地,在图4的左下角,示出了指示ZnGeN₂晶体的c轴的晶轴方向[001]、[100]和[010]。在图5的左下角,示出了指示GaN晶体的c轴的晶轴方向[0001]、指示其m轴的晶轴方向[1-100]和指示其a轴的晶轴方向[11-20]。如本文中使用的,米勒标记中加入的负号“-”表示在负号后的标记的反转。

[0062] 将图4和5彼此进行比较,可以看出N原子位于相同的位点。另外,还可以看出,在图5所示的GaN晶体的晶体结构中,Ga原子占据除了N原子位点以外的所有位点。因此,GaN晶体具有六重旋转对称性,其旋转中心轴由GaN晶体的c轴限定。另一方面,在图4所示的ZnGeN₂晶体的晶体结构中,Zn原子的条纹和Ge原子的条纹垂直延伸,彼此横向交替。这使得ZnGeN₂晶体能够仅具有二重旋转对称性,其旋转中心轴由ZnGeN₂晶体的c轴限定。在第II-IV族氮化物半导体中,两种阳离子(例如,在此实例中为Zn原子和Ge原子)由于两种电正性阳离子的离子性差异而如图4所示有序排列。如本文中使用的,措辞“有序排列”意指Zn原子排列在Zn位点,Ge原子排列在Ge位点,并且Zn原子和Ge原子周期性地规则排列。在ZnGeN₂晶体中,如果Zn原子和Ge原子彼此交换它们的位置(即如果Zn原子位于Ge位点,并且Ge原子位于Zn位点),则强的合金散射会使ZnGeN₂晶体的导带和价带的相应能带边缘较不清晰,从而造成带隙减小。在ZnGeN₂晶体中,如果Zn原子和Ge原子随机排列,则预期为宽带隙半导体的ZnGeN₂的带隙会从3.5eV减小至约2eV。

[0063] 假设以下情况:已经制备了其中Zn原子位于Zn位点并且Ge原子位于Ge位点的ZnGeN₂单晶,并且ZnGeN₂已经在ZnGeN₂单晶上同质外延生长。在这样的情况下,在已经同质外延生长的ZnGeN₂晶体(在下文中被称为“ZnGeN₂同质外延层”)中,Zn原子也位于Zn位点,并且Ge原子也位于Ge位点。这使得ZnGeN₂同质外延层能够表现出出色的物理性质。另一方面,如果在GaN晶体的c面上生长ZnGeN₂晶体,则因为GaN晶体和ZnGeN₂晶体具有相互不同的以c

轴为其旋转中心轴的旋转对称度,所以在确定 ZnGeN_2 晶体的阳离子位点中每120度允许一个自由度。

[0064] 在此情况下, GaN 晶体的空间群为 $P6_3mc$,而 ZnGeN_2 晶体的空间群为 $Pna2_1$ 。因此,如上所述, GaN 晶体具有六重旋转对称性,并且 ZnGeN_2 晶体具有二重旋转对称性。因此,如果将在 GaN 晶体的 c 面上生长 ZnGeN_2 晶体,则它们的原子排列每120度彼此一致。假设在 ZnGeN_2 晶体的晶体生长的初始阶段期间随机确定 ZnGeN_2 的面内晶轴,则会产生在限定区域中混杂过多旋转结构域的问题,从而使 Zn 和 Ge 原子在结构域彼此组合的区域中随机排列。

[0065] 关于如何确定 ZnGeN_2 晶体在 GaN 晶体上的面内取向,其取决于 GaN 晶体的表面结构、状态、生长条件和其他参数,并且因此不能通过显微镜控制 ZnGeN_2 晶体在 GaN 晶体上的面内取向。也就是说, ZnGeN_2 晶体的面内取向从一处到另一处是随机确定的。如果两个相邻的结构域(区域)以相互不同的面内取向生长,则 Zn 原子和 Ge 原子在具有相互不同的面内取向的两个相邻结构域彼此组合的这种区域中随机排列。也就是说,在 GaN 晶体的 c 面上生长的 ZnGeN_2 晶体中,其带隙在组合区域中减小至约 2eV 。这会对使用具有这样的组合区域的 ZnGeN_2 的电子器件的稳定运行造成不便。这就是为什么当将具有在第III族氮化物半导体上生长的第II-IV族氮化物半导体晶体的这种结构应用于电子器件时,应必须控制第II族元素和第IV族元素在第II-IV族氮化物半导体中排列的相应位点。

[0066] (2.3) 通过计算科学对 $\text{ZnGeN}_2/\text{AlN}$ 界面的设计

[0067] 为了控制第II族元素和第IV族元素在第II-IV族氮化物半导体中排列的相应位点,需要在第III族氮化物半导体中使用具有低对称度的面,并且需要通过界面能唯一确定由该面生长的第II-IV族氮化物半导体的面取向。界面结构如此难以分析,以致于在本文中通过计算科学来设计界面。

[0068] 第III族氮化物半导体中容易获得的面取向不仅包括 c 面,而且包括 a 面和 m 面。在第III族氮化物半导体中, a 面是(11-20)面。在第III族氮化物半导体中, m 面是(1-100)面。在 ZnGeN_2 中,不总是相对于第III族氮化物半导体的 a 面和 m 面中的每个都形成单个界面。即使考虑没有悬键的第III族氮化物半导体作为条件之一,也预期在第III族氮化物半导体的 a 面和 m 面中的每个都上存在两个或三个界面模型。通过计算科学来确定实际采用那些界面结构中的哪一种。在下文描述的实施例中,计算 AlN 晶体与 ZnGeN_2 晶体之间的界面能。然而,相对于第III族氮化物半导体和第II-IV族氮化物半导体的任何其他组合,不影响计算结果的通用性。

[0069] 在以下描述中,将参照图6-10描述五个计算模型。在图6-10中, AlN 晶体的 m 面或 a 面与 ZnGeN_2 晶体之间的界面用虚线表示。另外,在图6-10中,与每个 N 原子重叠的其他原子(即 Zn 原子、 Ge 原子或 Al 原子)在与其上画有图6-10中的每个的纸面垂直的方向上位于 N 原子后面。

[0070] AlN 晶体的 m 面与 ZnGeN_2 晶体之间的界面可以分别是图6和7所示的两种可想象到的类型中的一种。图6所示的第一计算模型是其中 Zn 原子的列(bank)和 Ge 原子的列以与界面成直角相交的计算模型,并且在下文中会被称为“90/ m 模型”。图7所示的第二计算模型是其中 Zn 原子的列和 Ge 原子的列与界面斜交的计算模型,并且在下文中会被称为“30/ m 模型”。

[0071] AlN 晶体的 a 面与 ZnGeN_2 晶体之间的界面可以分别是图8-10所示的三种可想象到

的类型中的一种。图8所示的第三计算模型是其中Zn原子的列和Ge原子的列与界面平行的计算模型,并且在下文中会被称为“00/a模型”。图9所示的第四计算模型是其中阳离子的列与界面倾斜接触并且其中界面处存在的阳离子的比率为Zn:Ge=1:3的计算模型,并且在下文中会被称为“60Ge/a模型”。图10所示的第五计算模型是其中阳离子的列与界面倾斜接触并且其中界面处存在的阳离子的比率为Zn:Ge=3:1的计算模型,并且在下文中会被称为“60Zn/a模型”。

[0072] 在第一计算模型到第五计算模型的每一个中,原子的总数应为192。192个原子的分解如下。对于AlN晶体,Al原子的数量为48,并且N原子的数量为48。对于ZnGeN₂晶体,Zn原子的数量为24,Ge原子的数量为24,并且N原子的数量为48。在第一计算模型到第五计算模型的每一个中,进行模型的结构弛豫,然后计算模型的总能量。所采用的计算程序是Vienna Ab-initio Simulation Package (VASP),并且采用通过平面波展开的赝势法。

[0073] 界面能被定义为通过从具有界面的模型的总能量中减去在每个晶相单独存在的情况下的总能量得到的能量。如果在两个晶相之间存在界面,则两个晶相各自由于它们的晶格常数差而经历应变。因此,还需要减去由于应变造成的每个晶相的能量增量。此应变能量增量可以通过获得关于每个晶相的弹性刚度常数并且通过使力与应变之间的平衡条件以及应变能最小化而唯一确定。然而,方程组具有包含总计十二个分量和六个约束条件的张量,意味着由于各向异性的坐标变换,并且需要基于变分原理来确定未知数。因此,在以下实施例中,应变能通过简便方法获得。

[0074] 现在将描述该简便方法。

[0075] 根据简便方法,在界面模型经历了位于界面处的结构弛豫的情况下,界面模型被分为两个体晶胞 (bulk unit cell),它们是ZnGeN₂晶体和AlN晶体。接下来,针对在界面处沿着两个轴中的每一个固定但沿着剩余一个轴改变的晶胞长度进行内部结构弛豫,由此得到总能量。在ZnGeN₂晶体和AlN晶体的体晶胞的每个中,分别沿着其剩余一个轴测量的各个晶胞长度之和应等于沿着界面模型中的剩余一个轴测量的晶胞长度。使用此约束条件,得到使能量总和最小化的沿着另一个轴测量的晶胞长度的组合。采用最小值作为弹性能。按照此方法,不考虑每个晶相中的扭转的影响。然而,在此情况下,假设界面处的压缩压力和拉伸应力的影响大于每个晶相中的扭转的影响。所计算的界面能的大小应包含一定程度的误差。然而,此假设不威胁此讨论的有效性。

[0076] 以下表1概述了与根据第一计算模型至第五计算模型的各个界面相关的特征量和界面能:

[0077] [表1]

AlN 晶体的面取向		m 面: (1-100)面		a 面: (11-20)面		
计算模型		第 1 计算模型	第 2 计算模型	第 3 计算模型	第 4 计算模型	第 5 计算模型
计算模型的缩写		90/m	30/m	00/a	60Zn/a	60Ge/a
[0078]	在界面与阳离子的列之间形成的角度	90	30	0	60	60
Zn: Ge 比		1:1	1:1	1:1	3:1	1:3
界面能	[eV/晶胞]	+4.04	+3.37	+2.54	+4.96	+4.57
	[eV/键]	+0.252	+0.211	+0.080	+0.155	+0.143
	[eV/nm ²]	+3.12	+2.63	+1.14	+2.22	+2.04

[0079] 由表1可以看出,与第一计算模型到第五计算模型中的任一个其他计算模型相比,计算模型“00/a”得到较低的界面能。在界面能/晶胞[eV/晶胞]、界面能/键合的原子[eV/键]和界面能/单位面积[eV/nm²]中的任一种中观察到相同的结果。可以看出,特别地,根据关于AlN晶体的a面与ZnGeN₂晶体之间的界面的第三计算模型至第五计算模型,00/a模型得到极低的界面能。此结果表明,具有根据00/a模型的界面结构的晶体开始在AlN晶体的a面上生长。这意味着在AlN晶体的a面上,ZnGeN₂晶体容易生长,使得AlN晶体的(11-20)面和ZnGeN₂晶体的(010)面彼此接触。因此,考虑到其选择性,预期会克服在ZnGeN₂晶体在AlN晶体的c面上生长期间看到的混杂过多旋转结构域的问题。还可以看出,根据关于AlN晶体的m面与ZnGeN₂晶体之间的界面的第一计算模型和第二计算模型,30/m模型得到最低的界面能。因此,预期在AlN晶体的m面上,ZnGeN₂晶体容易生长,使得AlN晶体的(1-100)面和ZnGeN₂晶体的(210)面彼此接触。尽管如此,30/m模型和90/m模型具有如此不明显的界面能差异,以致于ZnGeN₂晶体到AlN晶体的m面上的生长与ZnGeN₂晶体到AlN晶体的a面上的生长相比具有更低的选择性。另外,如果a面平台(terrace)存在于作为AlN晶体的主面的m面上,则ZnGeN₂晶体会优先从具有较低界面能的a面生长(在该情况下,界面结构是00/a模型),因此,在同一区域中可能存在多种不同类型的旋转结构域。这就是为什么从生长单结构域ZnGeN₂晶体同时防止过多旋转结构域混杂在限定区域中的观点出发,应使用AlN晶体的a面而不是AlN晶体的m面作为ZnGeN₂晶体的基面。

[0080] 在先前的描述中,已经通过计算关于ZnGeN₂晶体和AlN晶体的组合的界面能讨论了晶体生长的选择性。然而,这仅是一个示例,并且不应被解释为限制性的。也就是说,能够容易想象得到相同的讨论适用于第II-IV族氮化物半导体和第III族氮化物半导体的任何其他组合,并且由第II-IV族氮化物半导体和第III族氮化物半导体的任何其他组合可推导出相同的结论。这是因为这样的组合在它们的晶体结构之间的相似性和差异方面也类似于ZnGeN₂晶体和AlN晶体的组合,并且因为不同族中的原子与相同族中的原子相比具有更加显著不同的化学性质(换言之,在元素周期表上,横向差异与纵向差异相比更显著)。例如,即使采用任何其他第II-IV族化合物半导体比如ZnSiN₂、ZnSnN₂、MgGeN₂或CaSnN₂代替ZnGeN₂,也不会影响通用性。相同的陈述甚至适用于采用GaN或InN代替AlN的情况。

[0081] 尽管此处未示出计算结果,但是在第II-IV族氮化物半导体的晶体结构中,第II族元素(比如Zn原子)或第IV族元素(比如Ge原子)作为阳离子在(011)面上100%暴露。第II-IV族氮化物半导体的(011)面对应于第III族氮化物半导体的(11-22)面。通常,高标记面具

有低对称度。因此,在AlN晶体的(11-22)面上可以形成的ZnGeN₂晶体的晶体结构倾向于受到限制。具体地,ZnGeN₂晶体的(011)面容易相对于AlN晶体的(11-22)面形成界面,并且该界面的与ZnGeN₂晶体接触的一侧具有被Zn原子或Ge原子完全覆盖的结构。也就是说,甚至在这样的第III族氮化物半导体的(11-22)面和第II-IV族氮化物半导体的(011)面的组合中,也能够避免在限定区域中混杂过多旋转结构域的问题。

[0082] 由先前的描述可以看出,第III族氮化物半导体部3的预定晶面是除了c面以外的面,并且可以是例如a面或m面。在这两种面中,a面相对于m面来说是优选的。

[0083] (3) 制作方法

[0084] 为了实现上述界面结构,例如,可以制备主面为a面的AlN衬底,并且可以在AlN衬底的主面上生长ZnGeN₂晶体。备选地,可以在作为AlN衬底的主面的m面上生长ZnGeN₂晶体。结果,可以得到其中限定区域中未混杂过多旋转结构域并且表现出出色的结晶度的单结构域(单晶)ZnGeN₂晶体。

[0085] 然而,事实上,实际电子器件使用主面为c面的第III族氮化物半导体。主面为a面或m面的第III族氮化物半导体远不如主面为c面的第III族氮化物半导体广泛可用。因此,使用这种难以找到的第III族氮化物半导体将会造成显著的成本增加。这就是为什么对于电子器件来说实际上重要的是在使用这种主面为c面的第III族氮化物半导体的同时减少所产生的旋转结构域的数量。

[0086] 接下来,将参照图11描述一种用于制作氮化物半导体结构体1的方法,所述氮化物半导体结构体1包括含有作为第III族氮化物半导体的AlN的第III族氮化物半导体部3和含有作为第II-IV族氮化物半导体的ZnGeN₂的第II-IV族氮化物半导体部4。

[0087] 用于制作氮化物半导体结构体1的方法包括以下第一工艺步骤至第五工艺步骤。

[0088] 第一工艺步骤包括提供单晶硅晶片20,所述单晶硅晶片20是单晶硅衬底2的基础(参见图11A)。单晶硅衬底2具有第一主面21和与第一主面21相反的第二主面22。单晶硅晶片20具有第一主面201和第二主面202,所述第一主面201和第二主面202分别对应于单晶硅衬底2的第一主面21和第二主面22。在此情况下,单晶硅衬底2的第一主面21和单晶硅晶片20的第一主面201各自为(111)面。

[0089] 第二工艺步骤包括通过MOCVD法在单晶硅晶片20的第一主面201上晶体生长单晶AlN层30,所述晶体生长单晶AlN层30将被图案化为第III族氮化物半导体部3(参见图11A)。例如,单晶AlN层30的厚度可以是246nm。在此情况下,单晶AlN层30的主面301(即单晶AlN层30的与单晶硅晶片20相反的表面)为c面,即(0001)面。

[0090] 第三工艺步骤包括在单晶AlN层30的主面301上沉积二氧化硅膜,然后通过光刻技术和蚀刻技术将二氧化硅膜图案化,由此形成多个二氧化硅部5,其中的每个都形成二氧化硅膜的一部分。注意,在图11B中,示出了多个二氧化硅部5中的仅一个二氧化硅部5。当沿着单晶硅晶片20的厚度方向观看时,多个二氧化硅部5中的每一个都具有直线形状。多个二氧化硅部5以条状排列在单晶AlN层30的主面301上。当沿着单晶硅晶片20的厚度方向观看时,多个二氧化硅部5在与单晶硅晶片20的厚度方向垂直的一个方向(例如在此实例中为与单晶AlN层30的晶轴[11-20]对齐的方向)上以固定间隔排列。如本文中使用的,“固定间隔”不必是完全相同的间隔,而可以是差异在规定范围(例如规定距离±20%)内的间隔。当沿着单晶硅晶片20的厚度方向观看时,多个二氧化硅部5的纵轴与单晶AlN层30的晶轴[1-100]

方向对齐,并且多个二氧化硅部5的纬度轴(即宽度)与单晶AlN层30的晶轴[11-20]方向对齐。

[0091] 第四工艺步骤包括将单晶AlN层30图案化以形成多个第III族氮化物半导体部3,其中的每个都形成单晶AlN层30的一部分(参见图11C)。第四工艺步骤包括:使用多个二氧化硅部5作为掩模来干法刻蚀单晶AlN层30的第一步,和在第一步之后进行退火处理以去除由蚀刻工艺造成的损伤的第二步。在通过进行第四步骤形成的多个第III族氮化物半导体部3中的每一个中,其第一侧面33是AlN晶体的a面,即(11-20)面。多个第III族氮化物半导体部3中的每一个的第二侧面34是AlN晶体的(-1-120)面。AlN晶体的(-1-120)面在晶体学方面等同于AlN晶体的(11-20)面。在第四工艺步骤的第一步中,使用基于氯的气体作为用于干法蚀刻单晶AlN层30的蚀刻气体。然而,这仅是一个示例,并且不应被解释为限制性的。备选地,也可以使用氩气。另外,第四工艺步骤的第一步包括使用多个二氧化硅部5作为掩模来干法蚀刻单晶AlN层30,然后还将单晶硅晶片20干法蚀刻至预定深度。在第四工艺步骤的第二步中,例如,退火处理的退火条件包括:例如,将气氛压力限定为常压,将气氛限定为氮气气氛,将退火温度限定为700°C,以及将退火时间限定为一小时。备选地,第一侧面33可以是相对于a面的偏轴角(在下文中被称为“第一偏轴角”)大于0度但等于或小于5度的晶面。如本文中使用的,“第一偏轴角”是由第一侧面33相对于a面限定的倾角。因此,如果第一偏轴角为0度,则第一侧面33为a面。另外,在第四工艺步骤的第一步中,还部分地蚀刻单晶硅晶片20以避免当在下文描述的第五工艺步骤中生长ZnGeN₂晶体时形成额外的ZnGeN₂晶体的核。

[0092] 第五工艺步骤包括在第四工艺步骤之后将包括单晶硅晶片20和多个第III族氮化物半导体部3的晶片装载到MOCVD系统的反应器中,并且将晶片放置在反应器内的预定位置处以生长ZnGeN₂晶体。作为用于生长ZnGeN₂晶体的Zn、Ge和N的源材料,分别使用二乙基锌、四乙基锗和氨。在第五工艺步骤中,在将晶片装载到反应器中之后,开始升高晶片的温度。之后,在晶片的温度超过400°C后,将氨引入到反应器中,由此降低N原子通过第III族氮化物半导体部3的第一侧面33和第二侧面34逸出的可能性。接下来,将晶片的温度进一步升高到超过400°C以将单晶硅晶片20的暴露表面203氮化。以此方式,形成氮化硅膜6(参见图11D)。从600°C以上开始显著促进氮化反应。例如,在700°C,形成厚度为2nm的致密氮化硅膜6。氮化硅膜6的厚度小于在第四工艺步骤的第一步中通过干法蚀刻单晶硅晶片20在单晶硅晶片20的第一主面201上形成的凹部的深度。氮化硅膜6在生长ZnGeN₂晶体时起掩模的作用。将晶片温度进一步升高以达到ZnGeN₂的晶体生长温度(例如,900°C)。然后,开始供应Zn和Ge的相应源材料。ZnGeN₂晶体开始从多个第III族氮化物半导体部3各自的第一侧面33和第二侧面34生长。在此情况下,根据上述计算科学的结果,ZnGeN₂晶体的(010)面可以相对于第III族氮化物半导体部3的第一侧面33(即相对于AlN晶体的a面)选择性地形成具有稳定性的界面。也就是说,此第五工艺步骤使得能够实现初始生长,同时降低在限定区域中混杂过多旋转结构域的可能性。图11E示意性示出了从第III族氮化物半导体部3的第一侧面33开始并垂直于第一侧面33生长(即横向生长)的ZnGeN₂晶体430和从第III族氮化物半导体部3的第二侧面34开始并垂直于第二侧面34生长(即横向生长)的ZnGeN₂晶体440。在第五工艺步骤中,随着ZnGeN₂晶体进一步生长,ZnGeN₂晶体430和ZnGeN₂晶体440不仅横向生长,而且还垂直于主面生长。此外,ZnGeN₂晶体430和ZnGeN₂晶体440进一步生长以覆盖二氧化硅

部5。最终， ZnGeN_2 晶体430和 ZnGeN_2 晶体440在二氧化硅部5上彼此结合。图11F示出了包括 ZnGeN_2 晶体430和 ZnGeN_2 晶体440的第II-IV族氮化物半导体部4，以及在第II-IV族氮化物半导体部4中的 ZnGeN_2 晶体430和 ZnGeN_2 晶体440彼此结合的区域450。在此情况下，各自的所产生的旋转结构域的数量减少了的 ZnGeN_2 晶体430和 ZnGeN_2 晶体440彼此结合。因此，在结合区域450中，Zn原子和Ge原子容易分别排列在Zn位点和Ge位点。因此，在第II-IV族氮化物半导体部4中，在结合区域450中带隙不显著减小。包括 ZnGeN_2 晶体430和 ZnGeN_2 晶体440的第II-IV族氮化物半导体部4是 ZnGeN_2 单晶。第II-IV族氮化物半导体部4的主面41为 ZnGeN_2 单晶的c面。注意，由于此第五工艺步骤，在第II-IV族氮化物半导体部4和氮化硅膜6之间留下气隙7。

[0093] 在此氮化物半导体结构体1中，第III族氮化物半导体部3的第一侧面33的面取向为第III族氮化物半导体的a面，并且第二侧面34的面取向在晶体学上等同于a面。然而，这仅是一个示例，并且不应被解释为限制性的。备选地，例如，第一侧面33的面取向可以是m面，并且第二侧面34的面取向可以等同于m面。然而，在该情况下，如果在制造过程期间a面在第一侧面33上局部暴露，则 ZnGeN_2 晶体将会不仅在m面上生长，而且还在a面上生长，因此可能造成在限定区域中混杂过多旋转结构域。因此，第一侧面33的图案化精确度在该情况下是重要的。在此情况下，第一侧面33还可以是相对于m面的偏轴角（在下文中被称为“第二偏轴角”）大于0度且等于或小于5度的晶面。如本文中使用的，“第二偏轴角”是由第一侧面33相对于m面限定的倾角。因此，如果第二偏轴角为0度，则第一侧面33为m面。相同的陈述也适用于第二侧面34的图案化精确度。

[0094] 另外，氮化物半导体结构体1包括单晶硅衬底2作为用于支撑第III族氮化物半导体部3的支撑衬底。然而，这仅是一个示例，并且不应被解释为限制性的。备选地，氮化物半导体结构体1可以包括除单晶硅衬底2以外的任何衬底作为支撑衬底。也就是说，支撑衬底的材料不一定必需是硅。尽管如此，为了降低在氮化物半导体结构体1的制造过程期间在第III族氮化物半导体部3上生长的 ZnGeN_2 晶体中产生旋转结构域的可能性，需要避免 ZnGeN_2 晶体从支撑衬底的生长。为了该目的，需要为单晶硅衬底2的第一主面21（即单晶硅晶片20的表面203）提供由降低生长 ZnGeN_2 晶体的可能性的材料（比如二氧化硅或氮化硅）制成的掩模层。

[0095] (4) 优点

[0096] 根据第一实施方案的氮化物半导体结构体1包括第III族氮化物半导体部3和第II-IV族氮化物半导体部4。第III族氮化物半导体部3是单晶，并且具有预定晶面（第一侧面33）。第II-IV族氮化物半导体部4设置在第III族氮化物半导体部3的预定晶面上，并且是单晶。第II-IV族氮化物半导体部4与第III族氮化物半导体部3形成异质结。预定晶面（第一侧面33）是除(0001)面以外的晶面。预定晶面（第一侧面33）可以是例如(11-20)面。

[0097] 根据第一实施方案的氮化物半导体结构体1实现了其中在单晶第III族氮化物半导体部3上形成单晶第II-IV族氮化物半导体部4的这种构造。

[0098] 在第II-IV族氮化物半导体部4中，与预定晶面垂直的晶轴方向是除[001]方向以外的晶轴方向。这使得能够减少第II-IV族氮化物半导体部4中产生的旋转结构域的数量。在此情况下，在第II-IV族氮化物半导体部4，与预定晶面（第一侧面33）垂直的晶轴方向是[010]方向。这使得能够减少第II-IV族氮化物半导体部4中产生的旋转结构域的数量。

[0099] 另外,根据第一实施方案的用于制作氮化物半导体结构体1的方法包括在单晶第III族氮化物半导体部3的除(0001)面以外的预定晶面(第一侧面33)上外延生长含有第II族元素和第IV族元素的第II-IV族氮化物半导体部4的工艺步骤(即,包括上述第五工艺步骤)。

[0100] 因此,根据第一实施方案的用于制作氮化物半导体结构体1的方法使得能够实现其中在单晶第III族氮化物半导体部3上形成单晶第II-IV族氮化物半导体部4的这种构造。

[0101] 根据第一实施方案的用于制作氮化物半导体结构体1的方法可以防止在第II-IV族氮化物半导体部4的限定区域中混杂过多旋转结构域,由此使得能够改善第II-IV族氮化物半导体部4的特性,并且最终提供新型的电子器件。

[0102] 第III族氮化物半导体部3和第II-IV族氮化物半导体部4中的每种都可以含有杂质。杂质不仅可以包括在生长过程期间不可避免地含有的杂质,而且可以包括在生长过程期间或之后有意引入的掺杂剂。在生长过程期间不可避免地含有的杂质的实例包括氢(H)、硅(Si)、碳(C)和氧(O)。

[0103] 第II-IV族氮化物半导体可以通过MOCVD系统生长,所述MOCVD系统使用与第III族氮化物半导体相同的氮源(比如氨)。这使第II-IV族氮化物半导体被单片集成为用于基于GaN的功率晶体管的控制逻辑的应用成为可能。

[0104] 在根据第一实施方案的氮化物半导体结构体1及其制作方法中,如在上述计算中那样,作为实例描述了其中使用 $ZnGeN_2$ 作为第II-IV族氮化物半导体并且使用AlN作为第III族氮化物半导体的组合。然而,第II-IV族氮化物半导体和第III族氮化物半导体的组合不是必需为 $ZnGeN_2$ 和AlN。而是,根据第一实施方案的氮化物半导体结构体1及其制造方法的通用性不受除 $ZnGeN_2$ 和AlN以外的第II-IV族和第III族氮化物半导体的任何组合影响。

[0105] 另一方面,与使用硅的电子器件相比,使用第III族氮化物半导体比如氮化镓的电子器件倾向于较少造成由于载流子的热激发引起的热失控,因此甚至在高于使用硅的电子器件的最大工作温度的温度也可以以良好的稳定性工作。尽管如此,在p型第III族氮化物半导体中,空穴浓度不够高而无法避免电阻显著升高,这是p型第III族氮化物半导体的一个缺点。例如,当制作p型氮化镓时,加入镁作为受体元素,但是其价带的能级如此的低,以致于即使在所加入的镁具有高的掺杂剂浓度时,仍留有产生额外电子的氮缺陷而无意地补偿空穴。因此,对于使用第III族氮化物半导体的电子器件来说难以得到具有低电阻的p型氮化镓。这是使用第III族氮化物半导体的电子器件的问题之一。

[0106] 另一方面,在第II-IV族氮化物半导体比如氮化锌锗($ZnGeN_2$)中,Zn的3d轨道位于价带的正下方,由此造成它们的轨道之间的显著斥力而在高能量端提高价带。结果,价带的分散增加,并且空穴的有效质量减少。另外,这增加了受主能级和价带彼此混合的可能性。由于这些原因,理论上预测包含Zn作为第II族元素的第II-IV族氮化物半导体实现了高空穴浓度。

[0107] 在根据第一实施方案的氮化物半导体结构体1中,第II-IV族氮化物半导体的第II族元素是锌。这使得根据第一实施方案的氮化物半导体结构体1能够提供具有甚至更高浓度的p型半导体,这是因为通过锌的3d轨道提高价带同时降低在限定区域中混杂过多旋转结构域的可能性的效果。因此,一次实现了通过宽带隙减少泄漏电流的高温操作性和高空穴浓度,由此使得能够提供可以在前所未有的更高温度工作的逻辑电路。

[0108] (5) 氮化物半导体结构体的示例性应用

[0109] 接下来,将参照图12描述一种氮化物半导体器件10。

[0110] 氮化物半导体器件10包括氮化物半导体结构体1a。氮化物半导体结构体1a包括第II-IV族氮化物半导体部4a代替氮化物半导体结构体1的第II-IV族氮化物半导体部4。氮化物半导体器件10包括半导体元件100,所述半导体元件100包括第II-IV族氮化物半导体部4a的至少一部分。在以下对氮化物半导体结构体1a的描述中,与上述氮化物半导体结构体1的相应部分具有相同功能的此氮化物半导体结构体1a的任何构成要素将用与所述相应部分的附图标记相同的附图标记表示,并且在本文中适当省略其描述。

[0111] 半导体元件100是发射光的发光元件。更具体地,半导体元件100是具有电流限制结构和光限制结构的半导体激光二极管。此半导体元件100发射垂直于画有图12的纸面的光(激光束)。

[0112] 在第III族氮化物半导体部3上形成第II-IV族氮化物半导体部4a以及第II-IV族氮化物半导体部4。

[0113] 第II-IV族氮化物半导体部4a包括:n型 $ZnGeN_2$ 晶体401;在n型 $ZnGeN_2$ 晶体401的一部分上形成的n型 $ZnGeSnN_2$ 晶体402;在n型 $ZnGeSnN_2$ 晶体402上形成的 $ZnSnN_2$ 晶体403;在 $ZnSnN_2$ 晶体403上形成的p型 $ZnGeSnN_2$ 晶体404;和在p型 $ZnGeSnN_2$ 晶体404的一部分上形成的p型 $ZnGeN_2$ 晶体405。通过MOCVD法在第III族氮化物半导体部3上晶体生长第II-IV族氮化物半导体部4a以及第II-IV族氮化物半导体部4。注意,n型 $ZnGeN_2$ 晶体401和n型 $ZnGeSnN_2$ 晶体402在它们的生长期间用砷(As)作为掺杂剂进行掺杂,并且p型 $ZnGeSnN_2$ 晶体404和p型 $ZnGeN_2$ 晶体405在它们的生长期间用铝(Al)作为掺杂剂进行掺杂。第II-IV族氮化物半导体部4a可以按以下方式形成。具体地,在第III族氮化物半导体部3上生长n型 $ZnGeN_2$ 晶体401之后,在其上依次生长n型 $ZnGeSnN_2$ 晶体402、 $ZnSnN_2$ 晶体403、p型 $ZnGeSnN_2$ 晶体404和p型 $ZnGeN_2$ 晶体405。之后,通过从p型 $ZnGeN_2$ 晶体405的主面蚀刻将包括n型 $ZnGeN_2$ 晶体401、n型 $ZnGeSnN_2$ 晶体402、 $ZnSnN_2$ 晶体403、p型 $ZnGeSnN_2$ 晶体404和p型 $ZnGeN_2$ 晶体405在内的多层结构的一部分而图案化,从而形成第II-IV族氮化物半导体部4a。

[0114] 半导体元件100包括阳极8和阴极9。阳极8形成在p型 $ZnGeN_2$ 晶体405上,并且与其电连接。阴极9形成在n型 $ZnGeN_2$ 晶体401上,并且与其电连接。

[0115] 在半导体元件100中,n型 $ZnGeN_2$ 晶体401、n型 $ZnGeSnN_2$ 晶体402、 $ZnSnN_2$ 晶体403、p型 $ZnGeSnN_2$ 晶体404和p型 $ZnGeN_2$ 晶体405分别构成n型接触层、n型包覆层、活性层、p型包覆层和p型接触层。

[0116] 第II-IV族氮化物半导体部4a包括作为n型半导体区的n型 $ZnGeN_2$ 晶体401和n型 $ZnGeSnN_2$ 晶体402。

[0117] 第II-IV族氮化物半导体部4a包括作为p型半导体区的p型 $ZnGeSnN_2$ 晶体404和p型 $ZnGeN_2$ 晶体405。

[0118] 半导体元件100包括n型半导体区的至少一部分(例如,在此实施例中为全部)和p型半导体区的至少一部分(例如,在此实施例中为全部)。

[0119] 上述氮化物半导体器件10包括半导体元件100,其包括氮化物半导体结构体1a的第II-IV族氮化物半导体部4a的至少一部分。这使得氮化物半导体器件10能够实现其中在单晶第III族氮化物半导体部3上形成单晶第II-IV族氮化物半导体部4a的这种构造。

[0120] 另外,在氮化物半导体器件10中,作为示例性半导体元件100的半导体激光二极管包括第II-IV族氮化物半导体部4a。然而,这仅是一个示例,并且不应被解释为限制性的。备选地,作为示例性半导体元件100的半导体激光二极管可以包括第III族氮化物半导体部3。在该情况下,在制作氮化物半导体器件10时,形成要被图案化为第III族氮化物半导体部3的第III族氮化物半导体多层结构作为半导体激光二极管的原型。之后,例如,通过蚀刻将第III族氮化物半导体多层结构图案化为宽度为 $1\mu\text{m}$ 的窄条状。随后,在第III族氮化物半导体多层结构的侧面上晶体生长未掺杂的第II-IV族氮化物半导体。以此方式,可以得到具有横向电流限制结构和横向光限制结构的半导体激光二极管。此半导体激光二极管可以实现以下优点:消除了已知半导体激光二极管中由于脊形波导的残留厚度造成的光束形状分散。

[0121] (第二实施方案)

[0122] 接下来,将参照图13描述根据第二实施方案的氮化物半导体结构体1b。在以下描述中,与上述根据第一实施方案的氮化物半导体结构体1的相应部分具有相同功能的根据本第二实施方案的氮化物半导体结构体1b的任何构成要素将用与上述相应部分的附图标记相同的附图标记表示,并且在本文中省略其描述。

[0123] 氮化物半导体结构体1b包括第III族氮化物半导体部3b和第II-IV族氮化物半导体部4b,以代替根据第一实施方案的第III族氮化物半导体部3和第II-IV族氮化物半导体部4。

[0124] 在根据第二实施方案的氮化物半导体结构体1b中,第III族氮化物半导体部3b包括:具有主面31、第一侧面330和第二侧面340的AlN晶体30b;在AlN晶体30b的第一侧面330上生长的第一GaN晶体35;和在AlN晶体30b的第二侧面340上生长的第二GaN晶体36。第III族氮化物半导体部3具有沿着以与其纵轴成直角相交的平面截取的矩形横截面形状。另一方面,第III族氮化物半导体部3b具有沿着以与其纵轴成直角相交的平面截取的梯形横截面形状。

[0125] 第II-IV族氮化物半导体部4b在第III族氮化物半导体部3b的第一GaN晶体35的主面350上和在第III族氮化物半导体部3b的第二GaN晶体36的主面360上晶体生长。第一GaN晶体35的主面350为预定晶面。第一GaN晶体35的主面350为第一GaN晶体35的(11-22)面。第二GaN晶体36的主面360为第二GaN晶体36的(-1-122)面。这可以减少第II-IV族氮化物半导体部4b中产生的旋转结构域的数量。

[0126] 在第II-IV族氮化物半导体部4b,与预定晶面(主面350)垂直的晶轴方向是[011]方向。这可以减少在第一GaN晶体35的主面350上生长的第II-IV族氮化物半导体部4b中产生的旋转结构域的数量。另外,在第II-IV族氮化物半导体部4b中,与第二GaN晶体36的主面360垂直的晶轴方向是[0-11]方向。这可以减少在第二GaN晶体36的主面360上生长的第II-IV族氮化物半导体部4b中产生的旋转结构域的数量。

[0127] 接下来,将参照图11A和11B以及图14A-14D描述根据第二实施方案的用于制作氮化物半导体结构体1b的方法。在以下描述中,关于与上述根据第一实施方案的用于制作氮化物半导体结构体1的方法的相应部分对应的根据本第二实施方案的任何工艺步骤,在本文中适当省略其描述。

[0128] 用于制作氮化物半导体结构体1b的方法包括以下第一工艺步骤至第七工艺步骤。

[0129] 第一工艺步骤包括提供作为单晶硅衬底2的基础的单晶硅晶片20(参见图11A)。单晶硅晶片20具有第一主面201和第二主面202。在此情况下,单晶硅衬底2的第一主面201是(111)面。

[0130] 第二工艺步骤包括通过MOCVD法在单晶硅晶片20的第一主面201上晶体生长单晶AlN层30(参见图11A),所述单晶AlN层30将被图案化为第III族氮化物半导体部3的AlN晶体30b。在此情况下,单晶AlN层30的主面301(即单晶AlN层30的与单晶硅晶片20相反的表面)为c面,即(0001)面。

[0131] 第三工艺步骤包括在单晶AlN层30的主面301上沉积二氧化硅膜,然后通过光刻技术和蚀刻技术将二氧化硅膜图案化,由此形成多个二氧化硅部5,其中每一个都形成二氧化硅膜的一部分。注意,在图11B中,仅示出了多个二氧化硅部5中的一个二氧化硅部5。当沿着单晶硅晶片20的厚度方向观看时,多个二氧化硅部5中的每一个都具有直的形状。多个二氧化硅部5以条状排列在单晶AlN层30的主面301上。多个二氧化硅部5的纵轴与单晶AlN层30的晶轴[1-100]方向对齐,并且多个二氧化硅部5的纬度轴(即宽度)与单晶AlN层30的晶轴[11-20]方向对齐。

[0132] 第四工艺步骤包括将单晶AlN层30图案化以形成多个AlN晶体30b,其中的每个都形成单晶AlN层30的一部分(参见图14A)。第四工艺步骤包括:使用多个二氧化硅部5作为掩模来干法刻蚀单晶AlN层30的第一步,和在第一步之后进行退火处理以去除由蚀刻工艺造成的损伤的第二步。在通过进行第四工艺步骤形成的多个AlN晶体30b中的每一个中,其第一侧面330是AlN晶体的a面,即(11-20)面。多个AlN晶体30b中的每一个的第二侧面340是AlN晶体的(-1-120)面。AlN晶体的(-1-120)面在晶体学上等同于AlN晶体的(11-20)面。

[0133] 第五工艺步骤包括在第四工艺步骤之后将包括单晶硅晶片20和多个AlN晶体30b的晶片装载到MOCVD系统的反应器中,并且将晶片放置在反应器内的预定位置处。随后,开始升高晶片的温度。之后,在晶片的温度超过400°C后,将氨引入到反应器中,由此降低N原子通过AlN晶体30b的第一侧面330和第二侧面340逸出的可能性。接下来,将晶片的温度进一步升高到超过400°C以将单晶硅晶片20的暴露表面203氮化。以此方式,形成氮化硅膜6(参见图14B)。

[0134] 第六工艺步骤包括在MOCVD系统中在AlN晶体30b的第一侧面330和第二侧面340上分别生长第一GaN晶体35和第二GaN晶体36(参见图14C)。结果,形成多个第III族氮化物半导体部3,每个都包括AlN晶体30b、第一GaN晶体35和第二GaN晶体36。在第六工艺步骤中,在达到预定生长温度之后,开始将Ga源材料(比如三甲基镓)供应到MOCVD系统的反应器中。同时,在AlN晶体30b的第一侧面330和第二侧面340上分别生长第一GaN晶体35和第二GaN晶体36。在此情况下,如果在氨流量降低的情况下进行晶体生长过程,则GaN晶体的(11-22)面将失去稳定性而造成显著的晶体生长速率降低,因为(11-20)面的最外表面区域由氮原子组成。结果,形成了其主面350由于生长速率的限制而被限定为(11-22)面的楔形第一GaN晶体35和其主面360由于生长速率的限制而被限定为(-1-122)面的楔形第二GaN晶体36。在该情况下,主面350和360中的每一个都具有已经在原子级上对齐的表面结构。当第一GaN晶体35和第二GaN晶体36完成它们的生长时,停止供应Ga源材料。

[0135] 第七工艺步骤包括在第III族氮化物半导体部3b的各个主面350和360上生长ZnGeN₂晶体,该ZnGeN₂晶体将形成第II-IV族氮化物半导体部4b。当生长ZnGeN₂晶体时,分别

使用二乙基锌、四乙基锗和氨作为Zn、Ge和N的源材料。在第七工艺步骤中,在第六工艺步骤中停止供应Ga源材料之后,开始供应Zn源材料和氨。Zn具有高蒸气压,并且 Zn_3N_2 (Zn的氮化物)具有差的热稳定。因此,将没有 Zn_3N_2 沉积在第一GaN晶体35的主面350(即第III族氮化物半导体部3b的第一侧面)或第二GaN晶体36的主面360(即第III族氮化物半导体部3b的第二侧面)上,但是Zn将仅以原子层级被吸附到第一GaN晶体35的主面350和第二GaN晶体36的主面360中。因此,在第III族氮化物半导体部3b与第II-IV族氮化物半导体部4b之间的界面中的 $ZnGeN_2$ 晶体的初始生长层被唯一确定为Zn层。在Zn已经被充分吸附到第一GaN晶体35的主面350和第二GaN晶体36的主面360中之后,还将开始供应Ga源材料。这使 $ZnGeN_2$ 晶体开始生长。因为 $ZnGeN_2$ 晶体与第III族氮化物半导体部3b之间的结合面的面取向为(011),并且初始生长层为Zn层,所以可以减少在生长表面上的旋转结构域的数量。在图14D中以及在图11F中,还示出了包括 $ZnGeN_2$ 晶体430和 $ZnGeN_2$ 晶体440的第II-IV族氮化物半导体部4b,以及在第II-IV族氮化物半导体部4b中的 $ZnGeN_2$ 晶体430和 $ZnGeN_2$ 晶体440之间的结合区域450。在此情况下,各自的所产生的旋转结构域的数量减少了的 $ZnGeN_2$ 晶体430和 $ZnGeN_2$ 晶体440彼此结合。因此,在结合区域450中,Zn原子和Ge原子容易分别布置在Zn位点和Ge位点。因此,在第II-IV族氮化物半导体部4b中,在结合区域450中带隙减小不显著。包括 $ZnGeN_2$ 晶体430和 $ZnGeN_2$ 晶体440的第II-IV族氮化物半导体部4b是 $ZnGeN_2$ 单晶。第II-IV族氮化物半导体部4b的主面41为 $ZnGeN_2$ 单晶的c面。

[0136] 任选地,第七工艺步骤可以包括在开始生长 $ZnGeN_2$ 晶体之前,在第一GaN晶体35的主面350和第二GaN晶体36的主面360上沉积包含铝的第III族氮化物半导体,以形成第III族氮化物半导体部3b的第一侧面和第二侧面。理由是铝与氮之间的结合能大于镓与氮之间的结合能,因此该选择有效地减少在 $ZnGeN_2$ 和GaN在它们的界面处的混合。

[0137] 上述用于制作氮化物半导体结构体1b的方法包括:在含有第III族元素的单晶第III族氮化物半导体部3b的除(0001)面以外的预定晶面(主面350)上,外延生长含有第II族元素和第IV族元素的单晶第II-IV族氮化物半导体部4b(即包括上述第七工艺步骤)。因此,用于制作氮化物半导体结构体1b的方法使得能够实现其中在单晶第III族氮化物半导体部3b上形成单晶第II-IV族氮化物半导体部4b的这种构造。

[0138] (第三实施方案)

[0139] 接下来,将参照图15描述根据第三实施方案的氮化物半导体结构体1c。在以下描述中,与上述根据第一实施方案的氮化物半导体结构体1的相应部分具有相同功能的根据本第三实施方案的氮化物半导体结构体1c的任何构成要素将用与所述相应部分的附图标记相同的附图标记表示,并且在本部分中将省略其描述。

[0140] 根据第三实施方案的氮化物半导体结构体1c包括具有第一主面21c和第二主面22c的第III族氮化物半导体衬底2c,以代替根据第一实施方案的作为用于氮化物半导体结构体1的支撑衬底的单晶硅衬底2。第III族氮化物半导体衬底2c具有纤锌矿晶体结构。例如,第III族氮化物半导体衬底2c可以是GaN衬底。另外,根据第三实施方案的氮化物半导体结构体1c包括第III族氮化物半导体部3c和第II-IV族氮化物半导体部4c,以代替根据第一实施方案的氮化物半导体结构体1的第III族氮化物半导体部3和第II-IV族氮化物半导体部4。

[0141] 在第III族氮化物半导体衬底2c的第一主面21c上,形成多个凹部215。当沿着第

III族氮化物半导体衬底2c的厚度方向观看时,多个凹部215中的每个都具有线型形状。当沿着第III族氮化物半导体衬底2c的厚度方向观看时,多个凹部215以条状排列。当沿着第III族氮化物半导体衬底2c的厚度方向观看时,多个凹部215在一个与第III族氮化物半导体衬底2c的厚度方向垂直的方向上以固定间隔排列。如本文中使用的,“固定间隔”不必是完全相同的间隔,而可以是差异落入规定范围(例如规定距离 $\pm 20\%$)内的间隔。当沿着第III族氮化物半导体衬底2c的厚度方向观看时,多个凹部215的纵轴与第III族氮化物半导体衬底2c的晶轴[1-100]方向对齐,并且多个凹部215的纬度轴(宽度)与第III族氮化物半导体衬底2c的晶轴[11-20]方向对齐。两个相邻凹部215之间的区域包括第一主面21c的一部分、第一侧面213和第二侧面214。第一侧面213是两个相邻凹部215之一的内侧面。第二侧面214是另一个凹部215的内侧面。第一侧面213是GaN晶体的a面,即(11-20)面。第二侧面214是GaN晶体的(-1-120)面。

[0142] 在根据第三实施方案的氮化物半导体结构体1c中,第III族氮化物半导体部3c由GaN晶体组成。第III族氮化物半导体部3c的与第III族氮化物半导体衬底2c相反的另一个主面31c包括第一面355和第二面366。第一面355是GaN晶体的(11-22)面。第二面366是GaN晶体的(-1-122)面。这可以减少第II-IV族氮化物半导体部4c中产生的旋转结构域的数量。在氮化物半导体结构体1c中,第III族氮化物半导体部3c的第一面355是预定晶面。

[0143] 在第II-IV族氮化物半导体部4c中,与第一面355垂直的晶轴方向是[011]方向。另外,在第II-IV族氮化物半导体部4c中,与第二面366垂直的晶轴方向是[0-11]方向。这可以减少第II-IV族氮化物半导体部4c中产生的旋转结构域的数量。

[0144] 接下来,将参照图16A-16C描述根据第三实施方案的用于制作氮化物半导体结构体1c的方法。在以下描述中,关于与上述根据第一实施方案的用于制作氮化物半导体结构体1的方法的相应部分对应的根据本第三实施方案的任何工艺步骤,在本文中适当省略其描述。

[0145] 用于制作氮化物半导体结构体1c的方法包括以下第一工艺步骤至第三工艺步骤。

[0146] 第一工艺步骤包括提供具有多个凹部215的第III族氮化物半导体晶片20c(参见图16A)。第III族氮化物半导体晶片20c是作为第III族氮化物半导体衬底2c的基础的晶片。第III族氮化物半导体衬底2c具有第一主面21c和第二主面22c。第III族氮化物半导体晶片20c具有分别与第III族氮化物半导体衬底2c的第一主面21c和第二主面22c对应的第一主面201c和第二主面202c。

[0147] 第二工艺步骤包括将第III族氮化物半导体晶片20c装载到MOCVD系统的反应器中,并且升高温度,同时向其中供应作为氮源材料的氨。当温度达到形成第III族氮化物半导体部3c的GaN晶体的所需晶体生长温度时,开始供应Ga源材料(比如三甲基镓),从而开始在第III族氮化物半导体晶片20c的第一主面201c、第一侧面213、第二侧面214和凹部215的底面上生长GaN晶体。在此第二工艺步骤中,采用减少从第一侧面213和第二侧面214的晶体生长的晶体生长条件。在此情况下,与第一主面201c相比,氮在第一侧面213和第二侧面214上更多地暴露。这就是为什么优选采用减少氮到第一侧面213和第二侧面214上的吸附的晶体生长条件。这样的晶体生长条件涉及以下中的至少一种:例如,降低氨的流量,提高Ga源材料的流量,降低晶体生长温度以降低氨的分解效率,或提高包含氢气和氮气的载气中氢气的比例以促进氢吸附到第一侧面213和第二侧面214上并由此抑制氮吸附到第一侧面213

和第二侧面214上。采用这样的晶体生长条件使得能够如图16B所示形成由具有第一面355和第二面366的GaN晶体(GaN再生长层)组成的第III族氮化物半导体部3c。第一面355是Ga晶体的(11-22)面。第二面366是Ga晶体的(-1-22)面。

[0148] 第三工艺步骤包括在第III族氮化物半导体部3c上晶体生长包括ZnGeN₂晶体的第II-IV族氮化物半导体部4c(参见图16C)。第三工艺步骤包括依次进行第一步和第二步。第一步包括将氨和Zn的源材料(比如二甲基锌)供应到反应器中,并且使Zn原子被吸附到第III族氮化物半导体部3c的第一面355和第二面366上,从而用Zn原子覆盖第一面355和第二面366。结果,在ZnGeN₂中,与形成第III族氮化物半导体部3c的Ga晶体接触的表面由Zn原子决定。第二步包括在第一步之后开始将Ge的源材料(比如四甲基锗)供应到反应器中,并且在预定生长时间段期间将各个源材料连续供应到反应器中。第三工艺步骤使得能够通过依次进行第一步和第二步外延生长ZnGeN₂单晶。在此情况下,已经外延生长的ZnGeN₂单晶为第II-IV族氮化物半导体部4c。第II-IV族氮化物半导体部4c的主面41是ZnGeN₂单晶的(001)面。在第二步中,重要的是控制晶体生长条件以使得ZnGeN₂在<001>方向上的生长速率低于在任何其他方向上的生长速率。对晶体生长条件的具体控制的实例包括:提高氨的流量,仅供应氮气作为载气,提高氮气在包含氮气和氢气的载气中的比例,提高生长压力,以及使Zn的源材料的摩尔流量相比于Ge的源材料的摩尔流量得到提高以补偿蒸发的Zn原子。适当控制晶体生长条件使得能够外延生长其主面41为(001)面的平坦ZnGeN₂单晶。

[0149] 接下来,将参照图17描述包括与氮化物半导体结构体1c类似的氮化物半导体结构体1d的氮化物半导体器件10d。在以下描述中,与氮化物半导体结构体1c的相应部分具有相同功能的此氮化物半导体结构体1d的任何构成要素将用与所述相应部分的附图标记相同的附图标记表示,并且在本文中省略其描述。

[0150] 第II-IV族氮化物半导体部4d是p型ZnGeN₂单晶。氮化物半导体器件10d包括氮化物半导体结构体1d。氮化物半导体器件10d包括半导体元件100d,所述半导体元件100d包括第II-IV族氮化物半导体部4d的至少一部分。

[0151] 半导体元件100d可以是例如金属绝缘体半导体场效应晶体管(MISFET)。半导体元件100d包括n型源区101、n型漏区102、源极111、漏极112、绝缘膜103和栅极113。n型源区101和n型漏区102被限定在第II-IV族氮化物半导体部4d的与主面41相邻的表面区域中。源极111形成在n型源区101上,并且与其电连接。漏极112形成在n型漏区102上,并且与其电连接。绝缘膜103完全覆盖第II-IV族氮化物半导体部4d的除分别被源极111和漏极112覆盖的区域以外的主面41。栅极113形成在绝缘膜103上。n型源区101和n型漏区102可以是例如n型ZnGeN₂区。源极111和漏极112的材料实例可以包括铝。绝缘膜103可以是例如氮化硅膜。绝缘膜103还作为栅绝缘膜。例如,绝缘膜103的厚度可以是200nm。栅极113的材料实例可以包括铝。

[0152] 上述氮化物半导体器件10d包括半导体元件100d,所述半导体元件100d包括氮化物半导体结构体1d的第II-IV族氮化物半导体部4d的至少一部分。这使得氮化物半导体器件10d能够实现其中在单晶第III族氮化物半导体部3c上设置单晶第II-IV族氮化物半导体部4d的这种构造。

[0153] 另外,氮化物半导体器件10d包括作为半导体元件100d的MISFET,因此与Si系晶体管相比,可以在更高的温度工作。

[0154] 接下来,将参照图18A-19C描述用于制作氮化物半导体器件10d的方法。在用于制作氮化物半导体器件10d的方法的以下描述中,关于与上述用于制作氮化物半导体结构体1c的方法的对应部分对应的任何工艺步骤,在本文中适当省略其描述。

[0155] 用于制作氮化物半导体器件10d的方法包括以下第一工艺步骤至第六工艺步骤。

[0156] 第一工艺步骤包括提供具有多个凹部215的第III族氮化物半导体晶片20c(参见图18A)。

[0157] 第二工艺步骤包括将第III族氮化物半导体晶片20c装载到MOCVD系统的反应器中,并且升高温度,同时向其中供应作为氮源材料的氨。当温度达到GaN晶体的所需晶体生长温度时,开始供应Ga源材料(比如三甲基镓),从而开始在第III族氮化物半导体晶片20c的第一主面201c、第一侧面213、第二侧面214和凹部215的底面上生长GaN晶体。在此第二工艺步骤中,采用减少从第一侧面213和第二侧面214的晶体生长的晶体生长条件。采用这样的晶体生长条件使得能够如图18B所示形成由具有第一面355和第二面366的GaN晶体(GaN再生层)组成的第III族氮化物半导体部3c。第一面355是GaN晶体的(11-22)面。第二面366是GaN晶体的(-1-22)面。

[0158] 第三工艺步骤包括在第III族氮化物半导体部3c上晶体生长包括p型 ZnGeN_2 单晶的第II-IV族氮化物半导体部4d(参见图18C)。第三工艺步骤包括依次进行第一步和第二步。第一步包括将氨和Zn的源材料(比如二甲基锌)供应到反应器中,并且使Zn原子被吸附到第III族氮化物半导体部3c的第一面355和第二面366上,从而用Zn原子覆盖第一面355和第二面366。结果,在p型 ZnGeN_2 单晶中,与形成第III族氮化物半导体部3c的GaN晶体接触的表面由Zn原子决定。第二步包括在第一步之后开始将Ge的源材料(比如四甲基锗)供应到反应器中,并且在预定生长时间期间将相应的源材料连续供应到反应器中。第三工艺步骤使得能够通过依次进行第一步和第二步外延生长p型 ZnGeN_2 单晶。在此情况下,已经外延生长的p型 ZnGeN_2 单晶为第II-IV族氮化物半导体部4d。第II-IV族氮化物半导体部4d的主面41(最外表面)是p型 ZnGeN_2 单晶的(001)面。

[0159] 第四工艺步骤包括将n型掺杂剂的离子注入到第II-IV族氮化物半导体部4d的相应区域中(这些区域将限定n型源区101和n型漏区102),然后进行退火处理,从而形成n型源区101和n型漏区102(参见图19A)。当施主元素将要替换第II族位点时,作为n型掺杂剂的施主元素适宜地为第III族元素,比如铝或镓。当施主元素将要替换第IV族位点时,施主元素适宜地为第V族元素,比如砷或磷。当施主元素将要替换氮位点时,施主元素适宜地为第VI族元素,比如氧。在这些选择中,为了通过离子注入将那些区域的导电类型变为n型,与氮原子几乎没有原子半径差异的氧是最合适的。退火处理的退火条件包括:将气氛压力设定为常压,使用氮气气氛,将退火温度设定为800°C,以及将退火时间设定为两小时。

[0160] 第五工艺步骤包括在第II-IV族氮化物半导体部4d的主面41上形成具有预定图案的绝缘膜103(参见图19B)。在此情况下,在第五工艺步骤中,在通过等离子体CVD工艺在第II-IV族氮化物半导体部4d的主面41上形成待作为绝缘膜103的氮化硅膜之后,通过光刻技术和蚀刻技术将氮化硅膜图案化,从而由氮化硅膜的一部分形成绝缘膜103。注意,作为用于蚀刻氮化硅膜的蚀刻剂,可以使用例如含有氢氟酸的蚀刻剂。

[0161] 第六工艺步骤包括例如通过蒸镀工艺形成源极111、漏极112和栅极113(参见图19C)。结果,形成了包括半导体元件100d的氮化物半导体器件10d。

[0162] 上述用于制作氮化物半导体器件10d的方法包括:在含有第III族元素的单晶第III族氮化物半导体部3c的除(0001)面以外的预定晶面上,外延生长含有第II族元素和第IV族元素的单晶第II-IV族氮化物半导体部4d(即包括上述第三工艺步骤)。因此,用于制作氮化物半导体器件10d的方法可以提供其中在单晶第III族氮化物半导体部3c上设置单晶第II-IV族氮化物半导体部4d的构造。

[0163] 任选地,在第III族氮化物半导体部3c的预定晶面上外延生长第II-IV族氮化物半导体部4d之前,可以在第III族氮化物半导体部3c上形成用于功率晶体管的器件结构,并且可以在其上已经生长晶体的第II-IV族氮化物半导体部4d上形成逻辑电路。于是,还可以提供可以在高温工作的功率控制器件。

[0164] (第四实施方案)

[0165] 接下来,将参照图20描述根据第四实施方案的包括氮化物半导体结构体1e的氮化物半导体器件10e。在以下描述中,与上述根据第一实施方案的氮化物半导体器件10的相应部分具有相同功能的根据本第四实施方案的氮化物半导体器件10e的任何构成要素将与与上述相应部分的附图标记相同的附图标记表示,并且在本文中适当省略其描述。

[0166] 氮化物半导体结构体1e包括第III族氮化物半导体部3e和第II-IV族氮化物半导体部4e,以代替根据第一实施方案的氮化物半导体结构体1的第III族氮化物半导体部3和第II-IV族氮化物半导体部4。在以下描述中,与上述第III族氮化物半导体部3和第II-IV族氮化物半导体部4的相应部分具有相同功能的第III族氮化物半导体部3e和第II-IV族氮化物半导体部4e的任何构成要素将用于所述相应部分的附图标记相同的附图标记表示,并且在本文中适当省略其描述。

[0167] 第II-IV族氮化物半导体部4e设置在第III族氮化物半导体部3e的第一侧面33e和第二侧面34e上。第一侧面33e是预定晶面。第II-IV族氮化物半导体部4e是单晶。第II-IV族氮化物半导体部4e与第III族氮化物半导体部3e形成异质结。预定晶面是除(0001)面以外的晶面。

[0168] 氮化物半导体器件10e包括半导体元件100e(在下文中被称为“第一半导体元件100e”),所述半导体元件100e包括第II-IV族氮化物半导体部4e的至少一部分。氮化物半导体器件10e还包括与第一半导体元件100e分开的在第III族氮化物半导体部3e上形成的第二半导体元件120。

[0169] 第III族氮化物半导体部3e具有多层结构,所述多层结构包括具有相互不同的组成的多个(例如在此实例中为两个)第III族氮化物半导体层。更具体地,第III族氮化物半导体部3e具有多层结构,所述多层结构包括在单晶硅衬底2的第一主面21上形成的第一第III族氮化物半导体层311和在第一第III族氮化物半导体层311上形成的第III族氮化物半导体层312。例如,第一第III族氮化物半导体层311可以是GaN层。例如,第二第III族氮化物半导体层312可以是 $Al_xGa_{1-x}N$ 层,其中 $0 < x < 1$ 。例如, Al 组成比 x 可以是0.25。例如, $Al_xGa_{1-x}N$ 层的厚度可以是25nm。与第一第III族氮化物半导体层311相比,第二第III族氮化物半导体层312具有更大的带隙。第III族氮化物半导体部3e具有在第一第III族氮化物半导体层311和第二第III族氮化物半导体层312之间的异质结。

[0170] 第III族氮化物半导体部3e的第一侧面33e包括GaN晶体的a面(即(11-22)面)和 $Al_xGa_{1-x}N$ 晶体的a面(即(11-22)面)。第III族氮化物半导体部3e的第二侧面34e包括GaN晶

体的(-1-120)面和 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 晶体的(-1-120)面。

[0171] 第II-IV族氮化物半导体部4e具有多层结构,所述多层结构包括n型 ZnGeN_2 层411和层叠在n型 ZnGeN_2 层411上的p型 ZnGeN_2 层412。例如,引入到p型 ZnGeN_2 层412中的掺杂剂可以是铝。引入到n型 ZnGeN_2 层411中的掺杂剂可以是砷。n型 ZnGeN_2 层411甚至还可以在没有用任何掺杂剂比如砷进行掺杂的情况下形成。当在沿着第III族氮化物半导体部3e的厚度方向的平面中观察时,n型 ZnGeN_2 层411排列在第III族氮化物半导体部3e旁边。第III族氮化物半导体部3e和n型 ZnGeN_2 层411并排排列在沿着与第III族氮化物半导体部3e的厚度方向对齐的面截取的横截面上。在此情况下,第III族氮化物半导体部3e和n型 ZnGeN_2 层411并排排列在与第一第III族氮化物半导体层311的晶轴[11-20]方向和第二第III族氮化物半导体层312的晶轴[11-20]方向对齐的方向上。n型 ZnGeN_2 层411的厚度大致等于第III族氮化物半导体部3e的厚度。p型 ZnGeN_2 层412的厚度小于n型 ZnGeN_2 层411的厚度。例如,p型 ZnGeN_2 层412的厚度可以是200nm。第II-IV族氮化物半导体部4e的主面41为 ZnGeN_2 单晶的c面。

[0172] 第二半导体元件120可以是例如n沟道金属半导体场效应晶体管(MESFET)。如上所述,第二半导体元件120形成在第III族氮化物半导体部3e上。在此情况下,在第III族氮化物半导体部3e中,在第一第III族氮化物半导体层311与第二第III族氮化物半导体层312之间的异质结附近产生二维电子气。包含二维电子气的区域(在下文中有时被称为“二维电子气层”)可以作为n沟道层(电子传导层)。第一第III族氮化物半导体层311可以是但不一定是GaN层。备选地,例如,第一第III族氮化物半导体层311也可以具有任何其他第III族氮化物半导体的多层结构。在该情况下,第一第III族氮化物半导体层311使得能够自由地控制膜内的应变分布和馈通(feedthrough)位错的密度,由此使得能够增加第一第III族氮化物半导体层311的厚度和降低第一第III族氮化物半导体层311的表面区域中的位错密度。

[0173] 第二半导体元件120包括源极121、漏极122和栅极123。源极121、漏极122和栅极123形成在第二第III族氮化物半导体层312的主面上。第二第III族氮化物半导体层312的主面是第二第III族氮化物半导体层312的与接触第一第III族氮化物半导体层311的另一个表面相反的表面。在第二半导体元件120中,源极121和漏极122在第二第III族氮化物半导体层312的主面上彼此间隔开。另外,在第二半导体元件120中,栅极123位于第二第III族氮化物半导体层312的主面上介于源极121和漏极122之间。源极121和漏极122的材料实例包括钛。栅极123的材料可以是例如具有大的功函数的金属,并且包括镍或钌。作为栅极123的构成材料的金属与形成第二第III族氮化物半导体层312的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 晶体具有不同的功函数,因此使 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 晶体的能带朝高能量范围提高。这消除了来自栅极123正下方的二维电子气,由此实现了常闭状态。

[0174] 例如,第一半导体元件100e可以是p沟道MISFET。第一半导体元件100e包括n型 ZnGeN_2 区413、源极111e、漏极112e、绝缘膜103e和栅极113e。n型 ZnGeN_2 区413形成在第II-IV族氮化物半导体部4e的与主面41相邻的表面区域中。n型 ZnGeN_2 区413被形成为延伸通过p型 ZnGeN_2 层412并且到达n型 ZnGeN_2 层411。源极111e和漏极112e形成在p型 ZnGeN_2 层412上。绝缘膜103e覆盖p型 ZnGeN_2 层412的除被源极111e和漏极112e覆盖的区域以外的整个主面41。栅极113e形成在绝缘膜103e上。在第一半导体元件100e中,当在沿着第一半导体元件100e的厚度方向的平面中观察时,栅极113e位于源极111e和漏极112e之间,并且与n型 ZnGeN_2 区413重叠。源极111e和漏极112e的材料实例包括镍。例如,绝缘膜103e可以是氮

化硅膜。绝缘膜103e还作为栅绝缘膜。例如,绝缘膜103e的厚度可以是200nm。栅极113e的材料可以包括例如铝。

[0175] 接下来,将参照图21A-23C描述用于制作氮化物半导体器件10e的方法。在以下描述中,关于与上述根据第一实施方案的用于制作氮化物半导体结构体1的方法的相应部分对应的任何工艺步骤,在本文中适当省略其描述。

[0176] 用于制作氮化物半导体器件10e的方法至少包括以下第一工艺步骤至第十二工艺步骤。

[0177] 第一工艺步骤包括提供作为单晶硅衬底2的基础的单晶硅晶片20(参见图21A)。单晶硅衬底2具有第一主面21和第二主面22。单晶硅晶片20具有分别对应于单晶硅衬底2的第一主面21和第二主面22的第一主面201和第二主面202。在此情况下,单晶硅晶片20的第一主面201是(111)面。

[0178] 第二工艺步骤包括通过MOCVD法在单晶硅晶片20的第一主面201上晶体生长第III族氮化物半导体层303e(参见图21A),其将会是第III族氮化物半导体部3e。在此情况下,第III族氮化物半导体层303e具有多层结构,所述多层结构包括在单晶硅晶片20的第一主面201上的第一第III族氮化物半导体层3301和在第一第III族氮化物半导体层3301上的第二第III族氮化物半导体层3302。第一第III族氮化物半导体层3301是单晶GaN层。第二第III族氮化物半导体层3302是单晶 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层。第III族氮化物半导体层303e的主面3331是c面,即(0001)面。作为用于晶体生长第一第III族氮化物半导体层3301的Ga和N的源材料,可以分别使用TMGa(三甲基镓)和 NH_3 (氨)。作为用于生长第二第III族氮化物半导体层3302的Al、Ga和N的源材料,可以分别使用TMA1(三甲基铝)、TMGa和 NH_3 。

[0179] 第三工艺步骤包括在第III族氮化物半导体层303e的主面3331上沉积二氧化硅膜50(参见图21A)。

[0180] 第四工艺步骤包括通过光刻技术和蚀刻技术将二氧化硅膜50图案化,从而形成多个二氧化硅部5,其中的每个二氧化硅部都形成二氧化硅膜50的一部分(参见图21B)。在图21B中,仅示出了多个二氧化硅部5中的一个。当沿着单晶硅晶片20的厚度方向观看时,多个二氧化硅部5中的每一个都具有直线形状。多个二氧化硅部5以条状排列在第III族氮化物半导体层303e的主面3331上。多个二氧化硅部5的纵轴与第一第III族氮化物半导体层3301的晶轴[1-100]方向和第二第III族氮化物半导体层3302的晶轴[1-100]方向对齐。多个二氧化硅部5的纬度轴(即宽度)与第一第III族氮化物半导体层3301的晶轴[11-20]方向和第二第III族氮化物半导体层3302的晶轴[11-20]方向对齐。

[0181] 第五工艺步骤包括将第III族氮化物半导体层303e图案化以形成多个第III族氮化物半导体部3e,其中的每个第III族氮化物半导体部3e都形成第III族氮化物半导体层303e的一部分(参见图21C)。第五工艺步骤包括:使用多个二氧化硅部5作为掩模来干法蚀刻第III族氮化物半导体层303e的第一步,和在第一步之后进行退火处理以去除由蚀刻工艺造成的损伤的第二步。在通过进行第五步骤形成的多个第III族氮化物半导体部3e中的每一个中,其第一侧面33e包括GaN晶体的a面即(11-22)面和 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 晶体的a面即(11-22)面。多个第III族氮化物半导体部3e中的每一个的第二侧面34e包括GaN晶体的(-1-120)面和 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 晶体的(-1-120)面。在第五工艺步骤的第一步中,使用氯系气体作为用于干法蚀刻第III族氮化物半导体层303e的蚀刻气体。然而,这仅是一个示例,并且不应被解释为限

制性的。备选地,例如,也可以使用氩气。另外,第五工艺步骤的第一步包括使用多个二氧化硅部5作为掩模来干法蚀刻第III族氮化物半导体层303e,然后还将单晶硅晶片20干法蚀刻至预定深度。在第五工艺步骤的第二步中,例如,退火处理的退火条件包括:例如,将气氛压力限定为常压,将气氛限定为氮气气氛,将退火温度限定为700°C,以及将退火持续时间限定为一小时。

[0182] 第六工艺步骤包括将单晶硅晶片20的暴露表面203(参见图21C)氮化以形成氮化硅膜6(参见图22A)。在第六工艺步骤中,首先,将包括单晶硅晶片20和多个第III族氮化物半导体部3e的晶片装载到MOCVD系统的反应器中,并且置于其中的预定位置处。之后,在将NH₃供应到反应器中的情况下,将晶片的温度升高到高于400°C以将单晶硅晶片20的暴露表面203氮化,从而形成氮化硅膜6。

[0183] 第七工艺步骤包括通过依次进行第一步和第二步来晶体生长第II-IV族氮化物半导体部4e(参见图22B)。第一步包括在MOCVD系统的反应器中在第III族氮化物半导体部3e的预定晶面上晶体生长第II-IV族氮化物半导体部4e的n型ZnGeN₂层411。第二步包括在MOCVD系统的反应器中在n型ZnGeN₂层411的主面上晶体生长p型ZnGeN₂层412。第一步中的晶体生长可以通过适当调整各源材料的流量(摩尔流量)来进行。例如,首先,晶体生长可以开始于使作为N源材料的氨的流量为Zn源材料(比如二乙基锌)的流量和Ge源材料(比如四乙基锗)的流量的20倍以上。备选地,晶体生长还可以开始于在包含氢气和氮气的载气中降低氢气的比率并且提高氮气的比率。在此情况下,锌源材料的流量需要高于锗源材料的流量。这对于减少在n型ZnGeN₂层411中产生的旋转结构域的数量来说是重要的。第一步中的n型ZnGeN₂层411的晶体生长是晶体的横向生长,即,晶体优先从第III族氮化物半导体部3e的第一侧面33e和第二侧面34e横向生长。在第一步中,不仅将分别用作Zn、Ge和N源材料的二乙基锌、四乙基锗和氨供应到反应器中,而且将作为As(作为掺杂剂引入)的源材料的砷或有机砷化合物(比如三甲基砷或三乙基砷)供应到反应器中。即使在生长过程期间没有供应掺杂剂源材料,n型ZnGeN₂层411也可以生长。在第二步中,晶体生长开始于降低氨的流量或载气中氮气的比率。第二步中的p型ZnGeN₂层的晶体生长是晶体的垂直生长,即,晶体优先沿着n型ZnGeN₂层411的厚度方向垂直生长。在第二步中,不仅将分别用作Zn、Ge和N源材料的二乙基锌、四乙基锗和氨供应到反应器中,而且还将作为Al(作为掺杂剂引入)的源材料的TMA1供应到反应器中。在第二步中,Ge源材料的摩尔流量被设定为小于Zn源材料的摩尔流量的值,由此使得能够将作为掺杂剂加入的Al被优先引入到Ge位点并且作为受主。注意,在第七工艺步骤中,在多个二氧化硅部5中的任一个上都不生长ZnGeN₂。也就是说,多个二氧化硅部5具有作为用于选择性生长的掩模的功能。另外,二氧化硅部5还具有作为保护涂层的功能,并且可以防止Zn、Ge和第II-IV族氮化物半导体部4e的其他构成元素扩散到第III族氮化物半导体部3e中。

[0184] 第八工艺步骤包括蚀刻掉多个二氧化硅部5(参见图22C)。在第八工艺步骤中,例如,可以使用氢氟酸作为蚀刻剂。

[0185] 第九工艺步骤包括通过使用例如光刻技术、离子注入技术和退火处理技术在每个第II-IV族氮化物半导体部4e中形成n型ZnGeN₂区413(参见图23A)。如果施主元素旨在替换ZnGeN₂的第II族位点(Zn位点),则优选使用第III族元素比如铝或镓作为施主元素。如果施主元素旨在替换ZnGeN₂的V族位点(Ge位点),则优选使用第V族元素比如砷或磷作为施主元

素。如果施主元素旨在替换 ZnGeN_2 的N位点,则优选使用第VI族元素比如氧作为施主元素。为了通过离子注入将导电类型变为n型,与铝、镓、砷、磷和氧的这些材料中的任何其他一种相比原子半径更接近于氮的原子半径的氧是最合适的。退火处理的退火条件可以通过例如以下各项限定:将气氛压力设定为常压,使用氮气气氛作为气氛,将退火温度设定为 800°C ,以及将退火时间设定为2小时。n型 ZnGeN_2 区413被形成为从p型 ZnGeN_2 层412的主面延伸通过甚至比n型 ZnGeN_2 层411的表面更深的深度水平。

[0186] 第十工艺步骤包括通过例如等离子体CVD工艺形成要成为相应绝缘膜103e和各绝缘膜124的氮化硅膜,然后将通过光刻技术和蚀刻技术将氮化硅膜图案化,从而形成各绝缘膜103e和各绝缘膜124,所述绝缘膜103e和各绝缘膜124各自都形成氮化硅膜的一部分(参见图23B)。为了蚀刻氮化硅膜,例如,可以使用氢氟酸。在第十工艺步骤中,将氮化硅膜图案化,以暴露第II-IV族氮化物半导体部4e的主面41的要形成第一半导体元件100e的源极111e和漏极112e的各区域,以及暴露第III族氮化物半导体部3e的主面的要形成第二半导体元件120的源极121、漏极122和栅极123的各区域。

[0187] 第十一工艺步骤包括通过例如蒸镀工艺形成第一半导体元件100e的源极111e、漏极112e和栅极113e以及第二半导体元件120的源极121、漏极122和栅极123(参见图23C)。第一半导体元件100e的源极111e和漏极112e中的每一个的材料都是镍。第一半导体元件100e的栅极123的材料是铝。第二半导体元件120的源极121和漏极122中的每一个的材料都是钛。例如,第二半导体元件120的栅极123的材料可以是镍或钨。

[0188] 第十二工艺步骤包括进行切割以得到多个氮化物半导体器件10e。

[0189] 在上述根据第四实施方案的氮化物半导体器件10e中,p沟道MISFET作为第一半导体元件100e形成在第II-IV族氮化物半导体部4e上,并且n沟道MESFET作为第二半导体元件120形成在第III族氮化物半导体部3e上。难以仅使用第III族氮化物半导体制作p沟道晶体管。在根据第四实施方案的氮化物半导体器件10e中,p沟道晶体管可以形成在第II-IV族氮化物半导体部4e上,所述第II-IV族氮化物半导体部4e与第III族氮化物半导体具有一样宽的带隙,并且可以以良好的稳定性在高温工作。另外,在根据第四实施方案的氮化物半导体器件10e中,还可以通过形成适当的线路来实施各种逻辑门。此外,根据第四实施方案,还可以单片集成使用第III族氮化物半导体的功率晶体管和具有在高温工作的能力的驱动电路。

[0190] 在根据第四实施方案的氮化物半导体器件10e中,在位于第III族氮化物半导体部3e在宽度方向上的两侧的两个第II-IV族氮化物半导体部4e中的每一个上形成p沟道MISFET。然而,这仅是一个示例,并且不应被解释为限制性的。备选地,可以在位于第III族氮化物半导体部3e在宽度方向上的两侧的两个第II-IV族氮化物半导体部4e中的仅一个上设置MISFET,并且可以在另一个第II-IV族氮化物半导体部4e上设置二极管、电阻器和其他部件。包括氮化物半导体结构体1e的氮化物半导体器件10e使得能够以提高的自由度布局与硅器件相比可以在更高温度工作的电子电路和元件。

[0191] 另外,在根据第四实施方案的氮化物半导体器件10e中,MESFET作为第二半导体元件120形成在第III族氮化物半导体部3e上。然而,第二半导体元件120不是必需的部件。另外,第二半导体元件120不必是MESFET,而是也可以是任何其他类型的半导体元件。其他类型的半导体元件的实例包括纵向晶体管、栅注入式晶体管、双向晶体管和超级结型二极管。

任选地,可以适当改变第III族氮化物半导体部3e的多层结构以形成作为第二半导体元件120的光学器件,比如发光二极管、半导体激光二极管或太阳能电池。在该情况下,可以在第II-IV族氮化物半导体部4e上形成用于发光器件的驱动电路、用于半导体激光二极管的驱动电路或用于太阳能电池的功率调节器作为电子电路。

[0192] 注意,上述第一实施方案至第四实施方案以及它们的变化方案仅是本公开的各种实施方案及其变化方案的示例性方案,并且不应解释为限制性的。而是,在不背离本公开的范围的情况下,可以根据设计选择或任何其他因素以各种方式容易地改变示例性实施方案及其变化方案。

[0193] 例如,在根据第一实施方案的用于制作氮化物半导体结构体1的方法中,生长 ZnGeN_2 晶体以平整化 ZnGeN_2 晶体的(001)面。然而,如果将要在 ZnGeN_2 晶体的除(001)面以外的表面上形成半导体元件,则不必平整化 ZnGeN_2 晶体的(001)面。在该情况下,仅需要在 ZnGeN_2 晶体的侧面上形成器件结构。

[0194] 另外,在氮化物半导体结构体1中,预定晶面还可以是(1-100)面。在该情况下,在第II-IV族氮化物半导体部4中,与预定晶面垂直的晶轴方向优选为[210]方向。这使得氮化物半导体结构体1能够降低在限定区域中混杂过多旋转结构域的可能性。

[0195] 此外,氮化物半导体器件10d可以包含包括以下各项的衬底来代替第III族氮化物半导体衬底2c:单晶硅衬底;和在单晶硅衬底上形成的GaN层。GaN层在其与单晶硅衬底接触的主面相反的另一个主面上具有与多个凹部215类似的多个凹部。

[0196] (概括)

[0197] 上述实施方案及其变化方案可以是本公开的以下方面的具体实施方式。

[0198] 根据第一方面的氮化物半导体结构体(1;1a;1b;1c;1d;1e)包括第III族氮化物半导体部(3;3b;3c;3e)和第II-IV族氮化物半导体部(4;4a;4b;4c;4d;4e)。第III族氮化物半导体部(3;3b;3c;3e)是单晶。第III族氮化物半导体部(3;3b;3c;3e)含有第III族元素,其中所述第III族元素是选自元素周期表的第13族元素的元素。第III族氮化物半导体部(3;3b;3c;3e)具有预定晶面(第一侧面33;主面350;第一面355;第一侧面33e)。第II-IV族氮化物半导体部(4;4a;4b;4c;4d;4e)设置在第III族氮化物半导体部(3;3b;3c;3e)的预定晶面(第一侧面33;主面350;第一面355;第一侧面33e)上。第II-IV族氮化物半导体部(4;4a;4b;4c;4d;4e)是单晶。第II-IV族氮化物半导体部(4;4a;4b;4c;4d;4e)含有第II族元素和第IV族元素,其中所述第II族元素是选自元素周期表的第2族元素或元素周期表的第12族元素的元素,并且所述第IV族元素是选自元素周期表的第14族元素的元素。第II-IV族氮化物半导体部(4;4a;4b;4c;4d;4e)与第III族氮化物半导体部(3;3b;3c;3e)形成异质结。预定晶面(第一侧面33;主面350;第一面355;第一侧面33e)是除(0001)面以外的晶面。

[0199] 根据第一方面的氮化物半导体器件(1;1a;1b;1c;1d;1e)实现了其中在单晶第III族氮化物半导体部(3;3b;3c;3e)上设置单晶第II-IV族氮化物半导体部(4;4a;4b;4c;4d;4e)的构造。

[0200] 在根据第二方面(其可以与第一方面结合实施)的氮化物半导体器件(1;1a;1b;1c;1d;1e)中,第II族元素是锌。这使得根据第二方面的氮化物半导体结构体(1;1a;1b;1c;1d;1e)能够有助于在第II-IV族氮化物半导体部(4;4a;4b;4c;4d;4e)的至少一个区域的导电类型被限定为p型时降低该p型区的电阻。

[0201] 在根据第三方面(其可以与第一方面或第二方面结合实施)的氮化物半导体结构体(1;1a;1b;1c;1d;1e)中,在第II-IV族氮化物半导体部(4;4a;4b;4c;4d;4e)中,与预定晶面(第一侧面33;主面350;第一面355;第一侧面33e)垂直的晶轴方向是除[001]方向以外的晶轴方向。这使得根据第三方面的氮化物半导体结构体(1;1a;1b;1c;1d;1e)能够减少所产生的旋转结构域的数量。

[0202] 在根据第四方面(其可以与第一方面至第三方面中任一项结合实施)的氮化物半导体结构体(1;1a;1e)中,预定晶面(第一侧面33;第一侧面33e)是(11-20)面。这使得根据第四方面的氮化物半导体结构体(1;1a;1e)能够减少所产生的旋转结构域的数量。

[0203] 在根据第五方面(其可以与第四方面结合实施)的氮化物半导体结构体(1;1a;1e)中,在第II-IV族氮化物半导体部(4;4a;4e)中,与预定晶面(第一侧面33;第一侧面33e)垂直的晶轴方向是[010]方向。这使得根据第五方面的氮化物半导体结构体(1;1a;1e)能够使第III族氮化物半导体部(3;3e)与第II-IV族氮化物半导体部(4;4a;4e)之间的界面能最小化,由此使得能够独特地限定界面结构。结果,这可以降低在限定区域中混杂过多旋转结构域的可能性。

[0204] 在根据第六方面(其可以与第一方面至第三方面中任一项结合实施)的氮化物半导体结构体(1b;1c;1d)中,预定晶面(第一主面350;第一面355)是(11-22)面。这使得根据第六方面的氮化物半导体结构体(1b;1c;1d)能够用第II-IV族氮化物半导体部(4b;4c;4d)的第II族元素或第IV族元素以原子层级覆盖预定晶面(第一主面350;第一面355),由此降低在限定区域中混杂过多旋转结构域的可能性。

[0205] 在根据第七方面(其可以与第六方面结合实施)的氮化物半导体结构体(1b;1c;1d)中,在第II-IV族氮化物半导体部(4b;4c;4d)中,与预定晶面(第一主面350;第一面355)垂直的晶轴方向是[011]方向。

[0206] 在根据第八方面(其可以与第一方面至第三方面中任一项结合实施)的氮化物半导体结构体(1)中,预定晶面(第一侧面33)是(1-100)面。这使得根据第八方面的氮化物半导体结构体(1)能够降低在限定区域中混杂过多旋转结构域的可能性。

[0207] 在根据第九方面(其可以与第八方面结合实施)的氮化物半导体结构体(1)中,在第II-IV族氮化物半导体部(4)中,与预定晶面(第一侧面33)垂直的晶轴方向是[210]方向。这使得根据第九方面的氮化物半导体结构体(1)能够降低在限定区域中混杂过多旋转结构域的可能性。

[0208] 根据第十方面的氮化物半导体器件(10;10d;10e)包括半导体元件(100;100d;100e),所述半导体元件包括根据第一方面至第九方面中任一项所述的氮化物半导体结构体(1;1a;1b;1c;1d;1e)的第II-IV族氮化物半导体部(4;4a;4b;4c;4d;4e)的至少一部分。因此,根据第十方面的氮化物半导体器件(10;10d;10e)实现了其中在单晶第III族氮化物半导体部(3;3b;3c;3e)上设置单晶第II-IV族氮化物半导体部(4;4a;4b;4c;4d;4e)的这种构造。

[0209] 在根据第十一方面(其可以与第十方面结合实施)的氮化物半导体器件(10;10d;10e)中,第II-IV族氮化物半导体部(4;4a;4b;4c;4d;4e)包括:n型半导体区(n型ZnGeN₂晶体401、n型ZnGeSnN₂晶体402、n型ZnGeN₂层411);和p型半导体区(p型ZnGeSnN₂晶体404、p型ZnGeN₂晶体405、p型ZnGeSnN₂层412)。半导体元件(100;100d;100e)包括:n型半导体区(n型

ZnGeN₂晶体401、n型ZnGeSnN₂晶体402、n型ZnGeN₂层411)的至少一部分;和p型半导体区(p型ZnGeSnN₂晶体404、p型ZnGeN₂晶体405、p型ZnGeSnN₂层412)的至少一部分。

[0210] 根据第十二方面(其可以与第十方面或第十一方面结合实施)的氮化物半导体器件(10e)还包括与作为半导体元件(100e)的第一半导体元件(100e)分开的在第III族氮化物半导体部(3e)上形成的第二半导体元件(120)。

[0211] 在根据第十三方面(其可以与第十方面至第十二方面中任一项结合实施)的氮化物半导体器件(10e)中,第III族氮化物半导体部(3e)具有多层结构,其中分别具有不同组成的多个第III族氮化物半导体层(第一第III族氮化物半导体层311、第二第III族氮化物半导体层312)彼此堆叠。

[0212] 根据第十四方面(其可以与第十方面至第十三方面中任一项结合实施)的氮化物半导体器件(10;10d;10e)还包括单晶硅衬底(2)。第III族氮化物半导体部(3;3e)设置在单晶硅衬底(2)上。

[0213] 在根据第十五方面(其可以与第十方面至第十四方面中任一项结合实施)的氮化物半导体器件(10)中,在第II-IV族氮化物半导体部(4a)上形成的半导体元件(100)是发射光的发光元件。

[0214] 根据第十六方面的用于制作氮化物半导体器件的方法是用于制作根据第十方面至第十五方面中任一项所述的氮化物半导体器件(10;10d;10e)的方法。所述方法包括:在含有第III族元素的单晶第III族氮化物半导体部(3;3b;3c;3e)的除(0001)面以外的预定晶面(第一侧面33;第一主面;第一面355;第一侧面33e)上,外延生长含有第II族元素和第IV族元素的单晶第II-IV族氮化物半导体部(4;4a;4b;4c;4d;4e),其中所述第III族元素是选自元素周期表的第13族元素的元素,所述第II族元素是选自元素周期表的第2族元素或元素周期表的第12族元素的元素,并且所述第IV族元素是选自元素周期表的第14族元素的元素。

[0215] 附图标记列表

[0216] 1、1a、1b、1c、1d、1e 氮化物半导体结构体

[0217] 2 单晶硅衬底

[0218] 3、3b、3c、3d 第III族氮化物半导体部

[0219] 33 第一侧面(预定晶面)

[0220] 311 第一第III族氮化物半导体层

[0221] 312 第二第III族氮化物半导体层

[0222] 350 主面(预定晶面)

[0223] 355 第一面(预定晶面)

[0224] 4、4a、4b、4c、4d、4e 第II-IV族氮化物半导体部

[0225] 401 n型ZnGeN₂晶体(n型半导体区)

[0226] 402 n型ZnGeSnN₂晶体(n型半导体区)

[0227] 404 p型ZnGeSnN₂晶体(p型半导体区)

[0228] 405 p型ZnGeN₂晶体(p型半导体区)

[0229] 10、10d、10e 氮化物半导体器件

[0230] 100、100d、100e 半导体元件(第一半导体元件)

[0231] 120 第二半导体元件

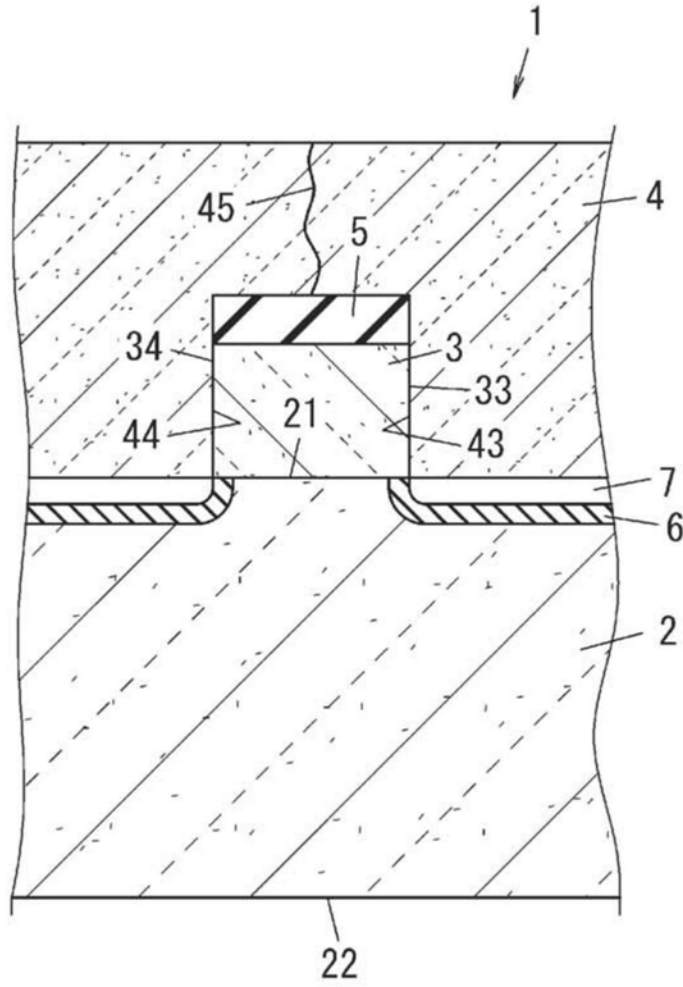


图1

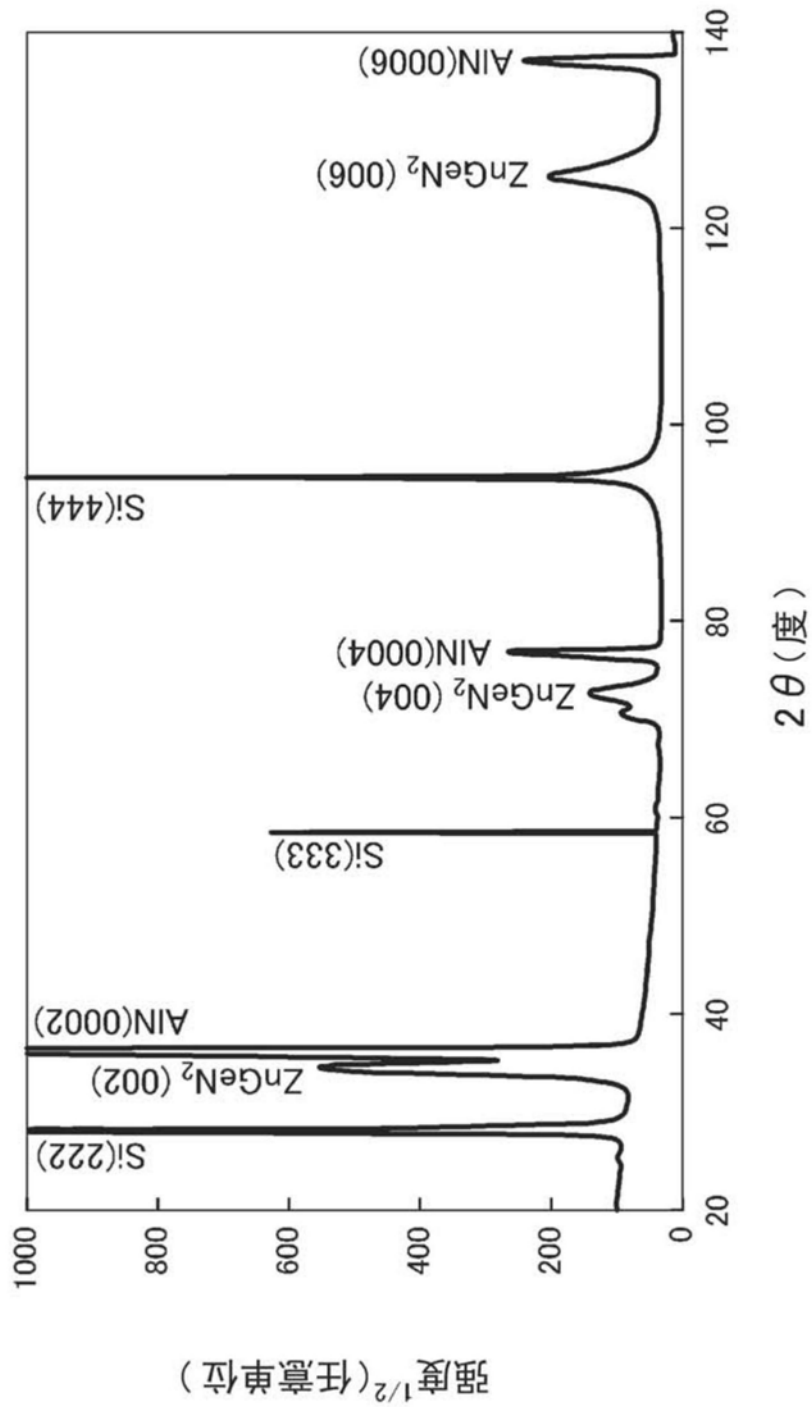
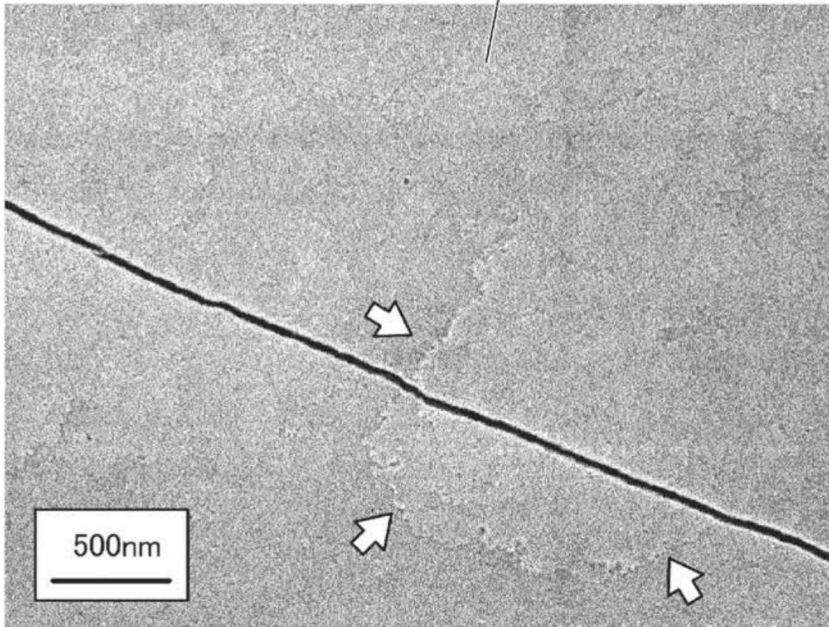


图2

A

ZnGeN₂ (001) 面



B

ZnGeN₂
多晶

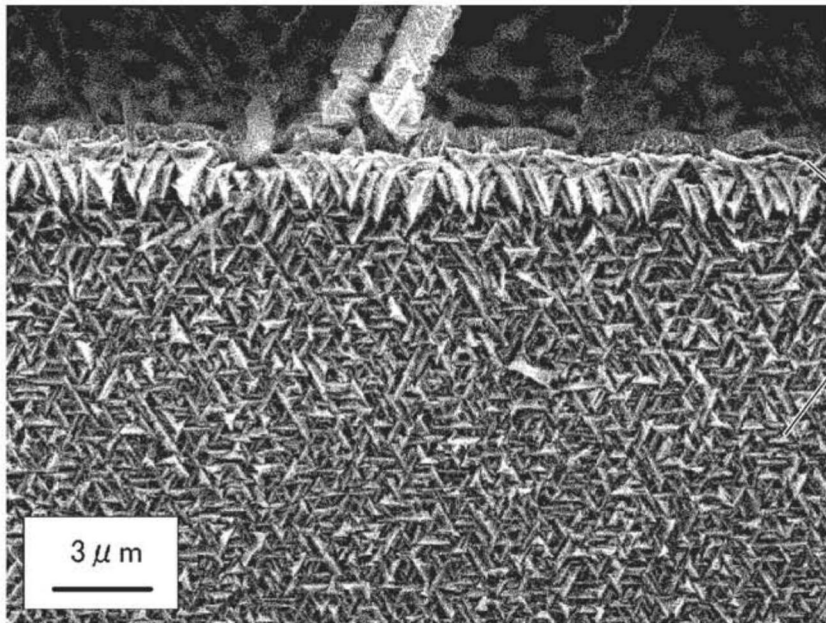


图3

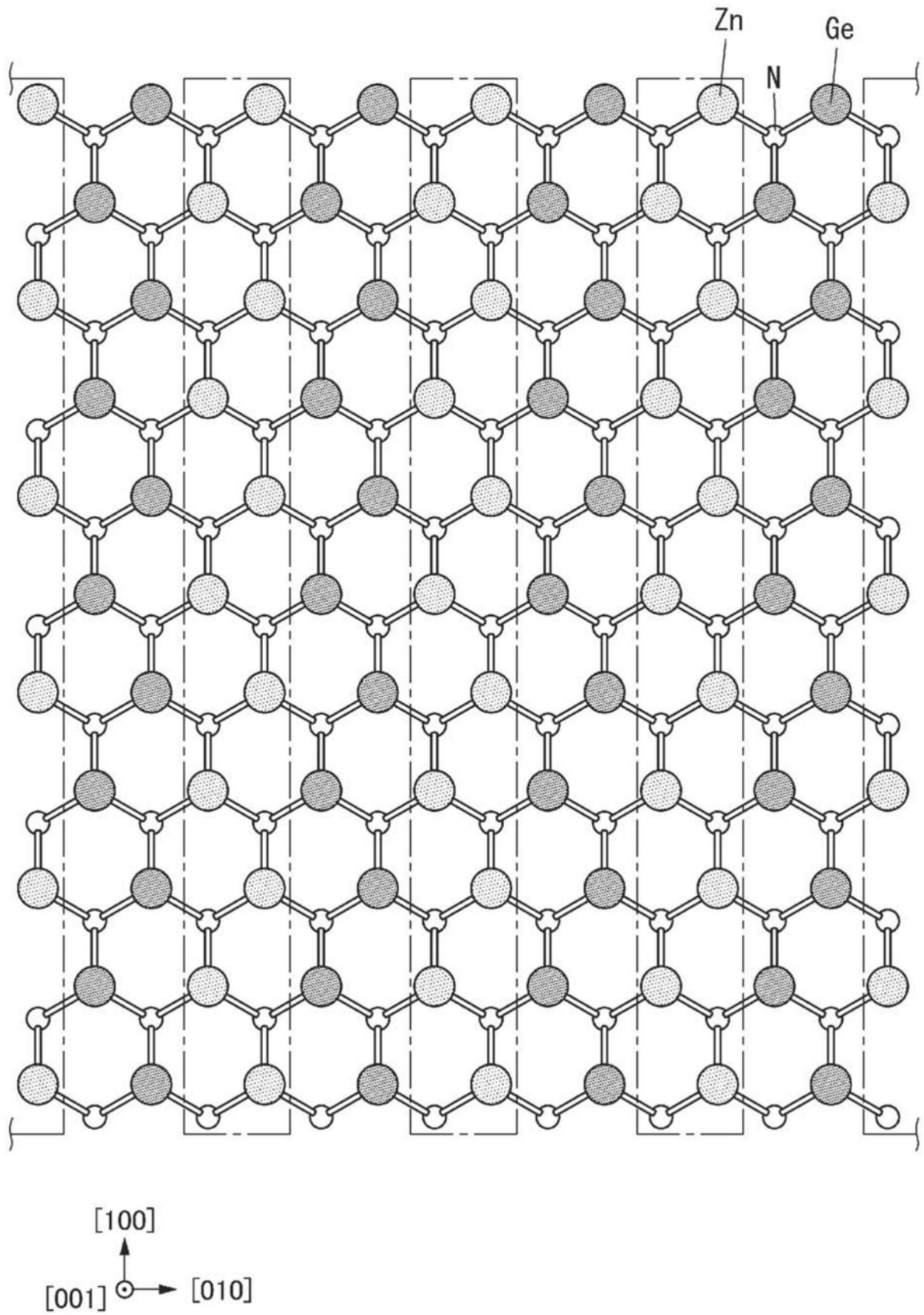


图4

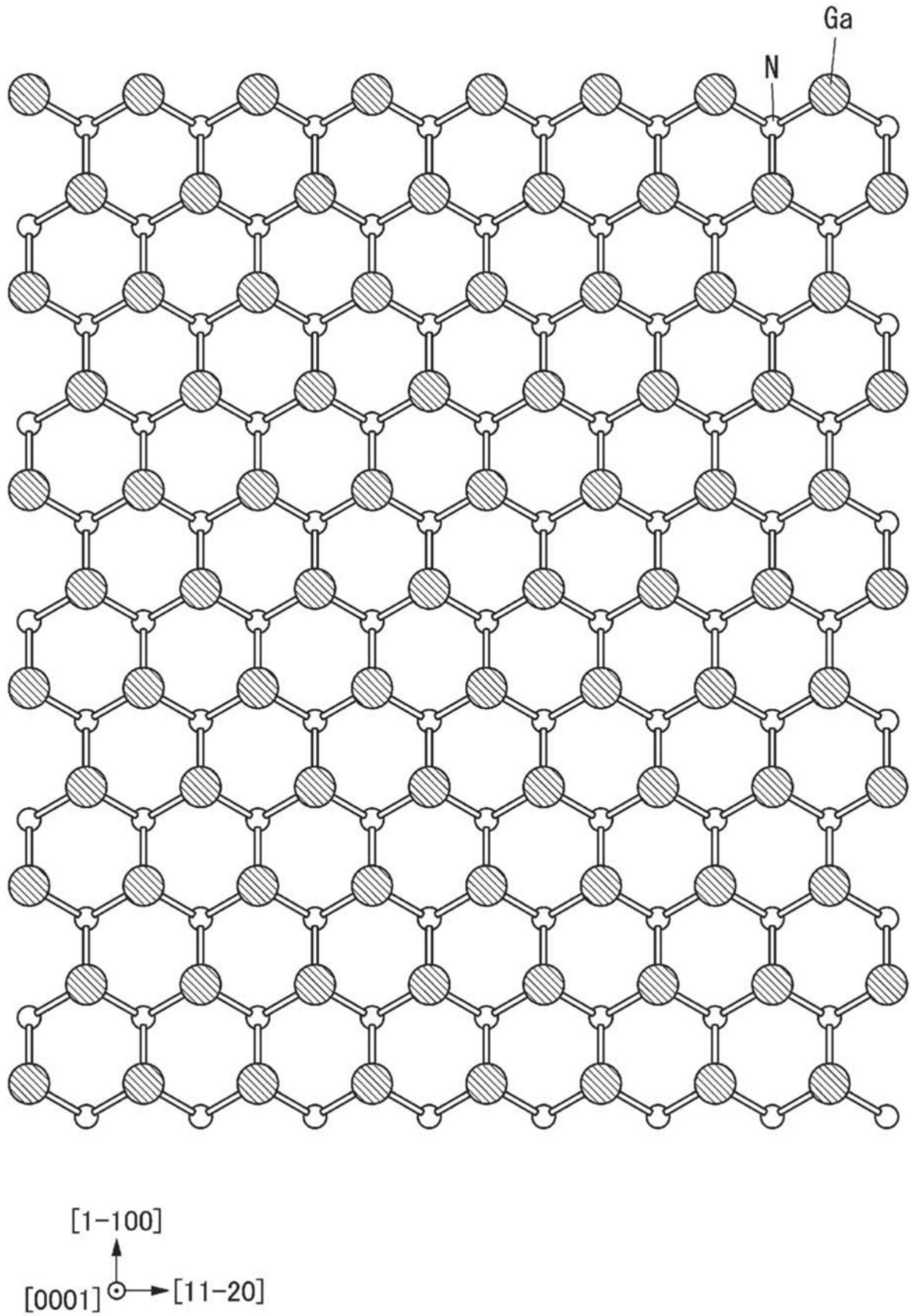


图5

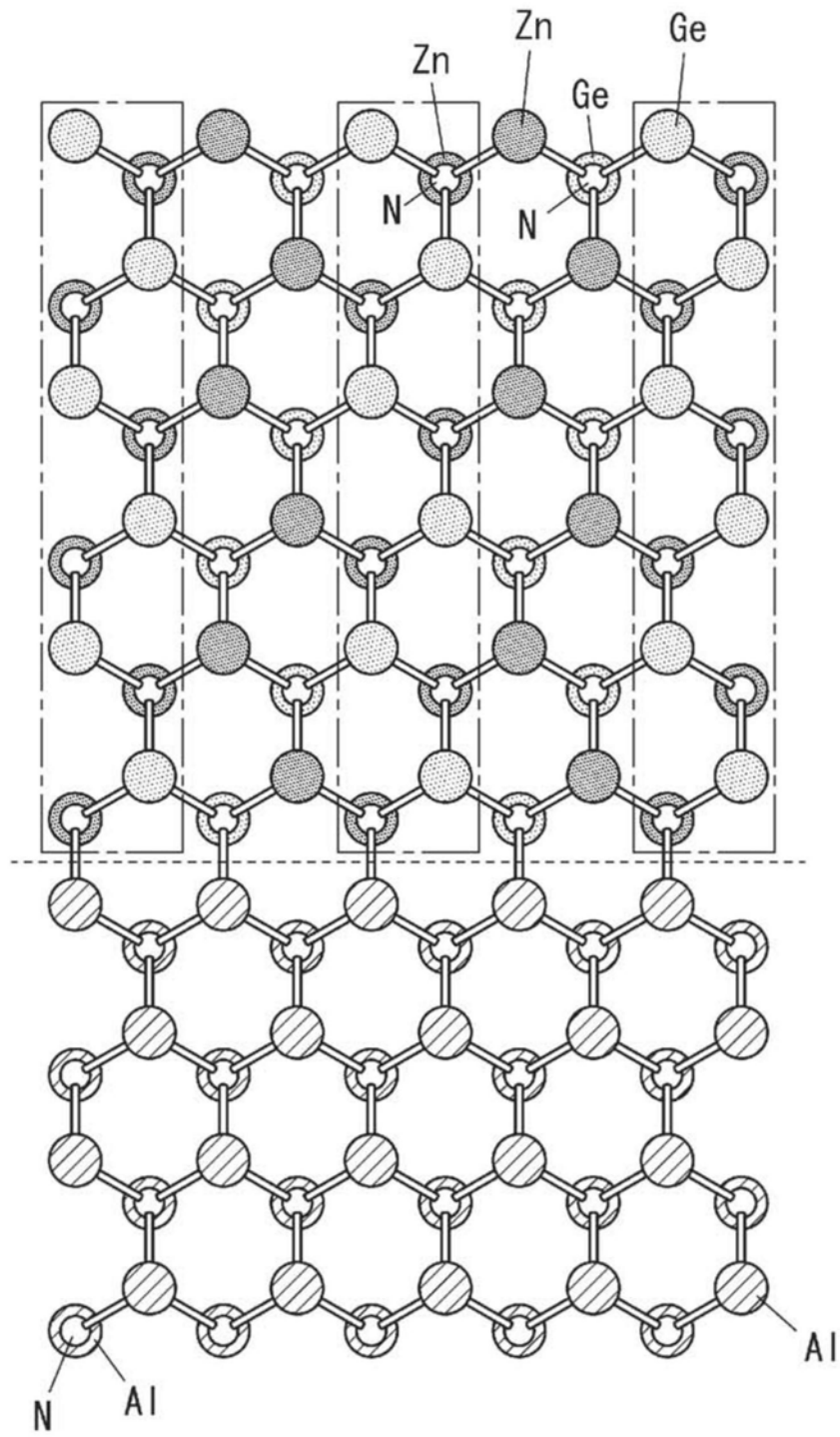


图6

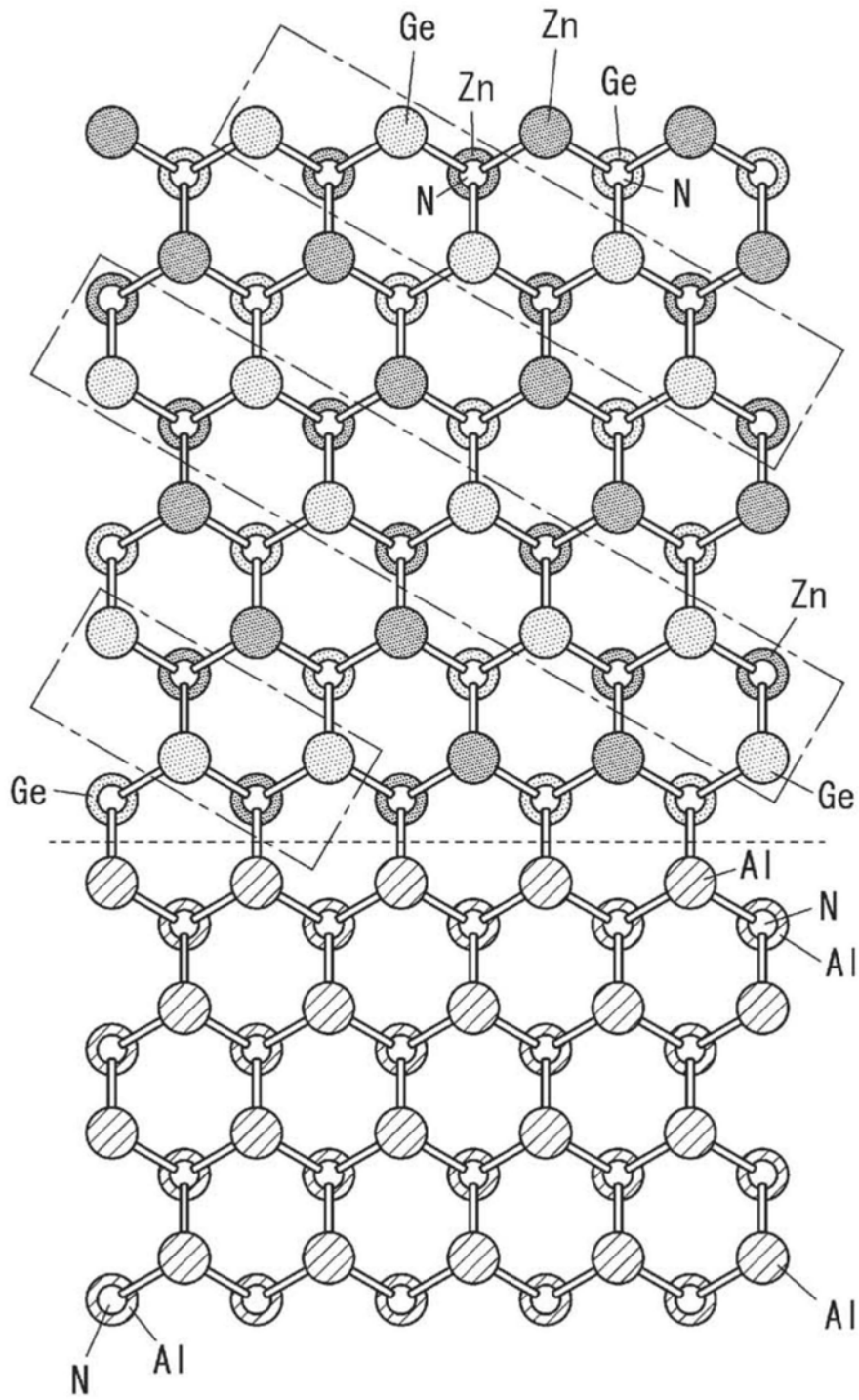


图7

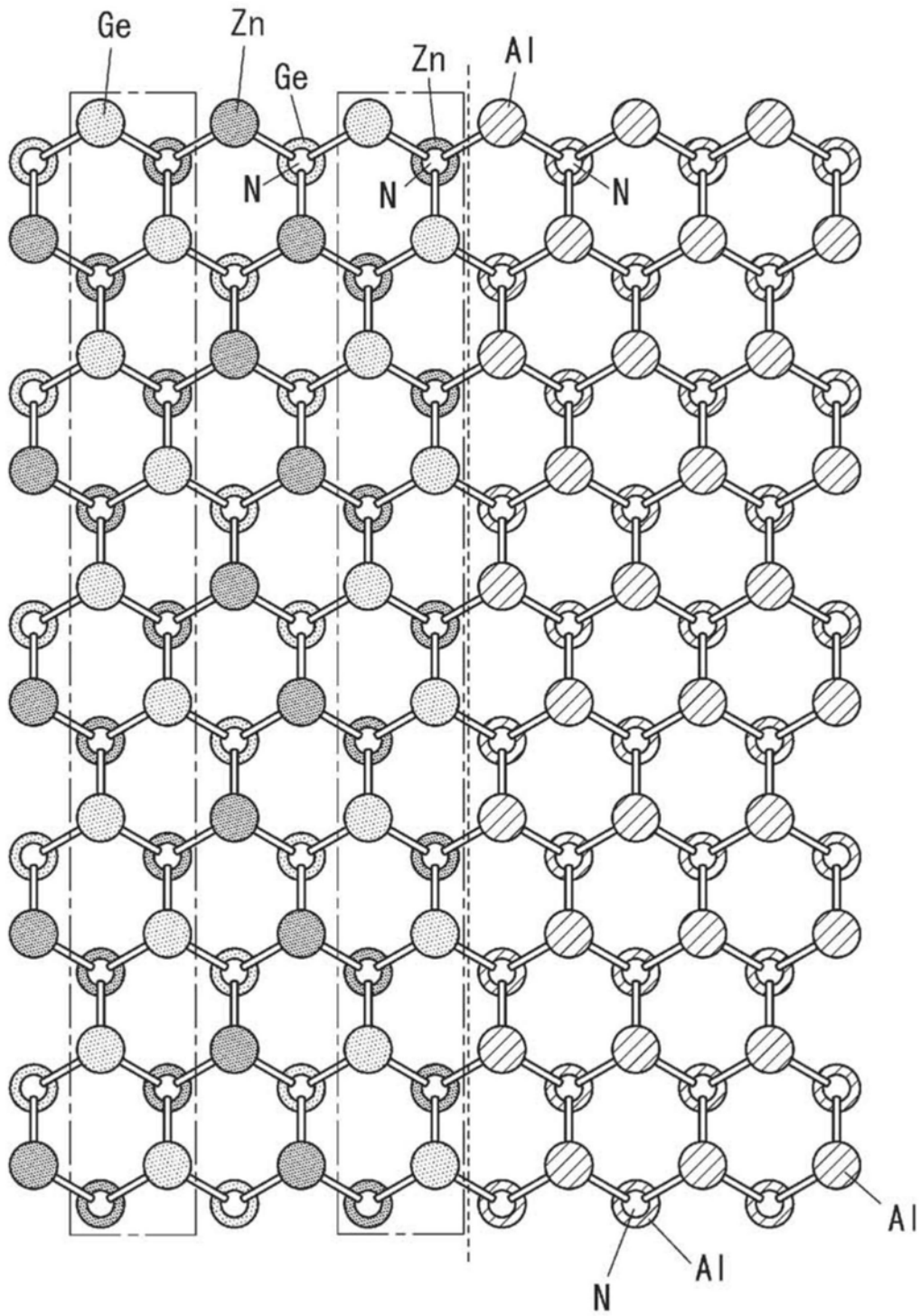


图8

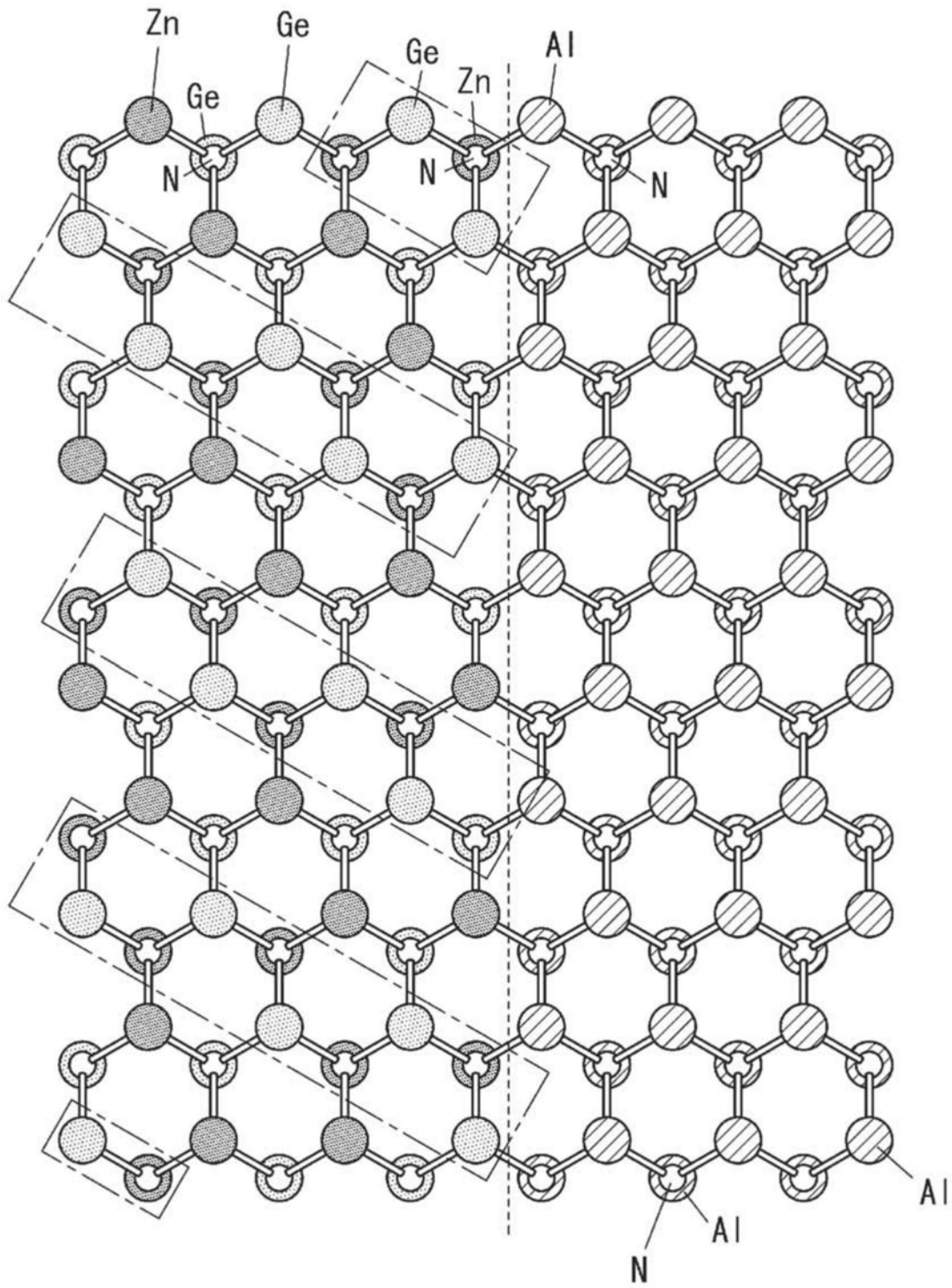


图9

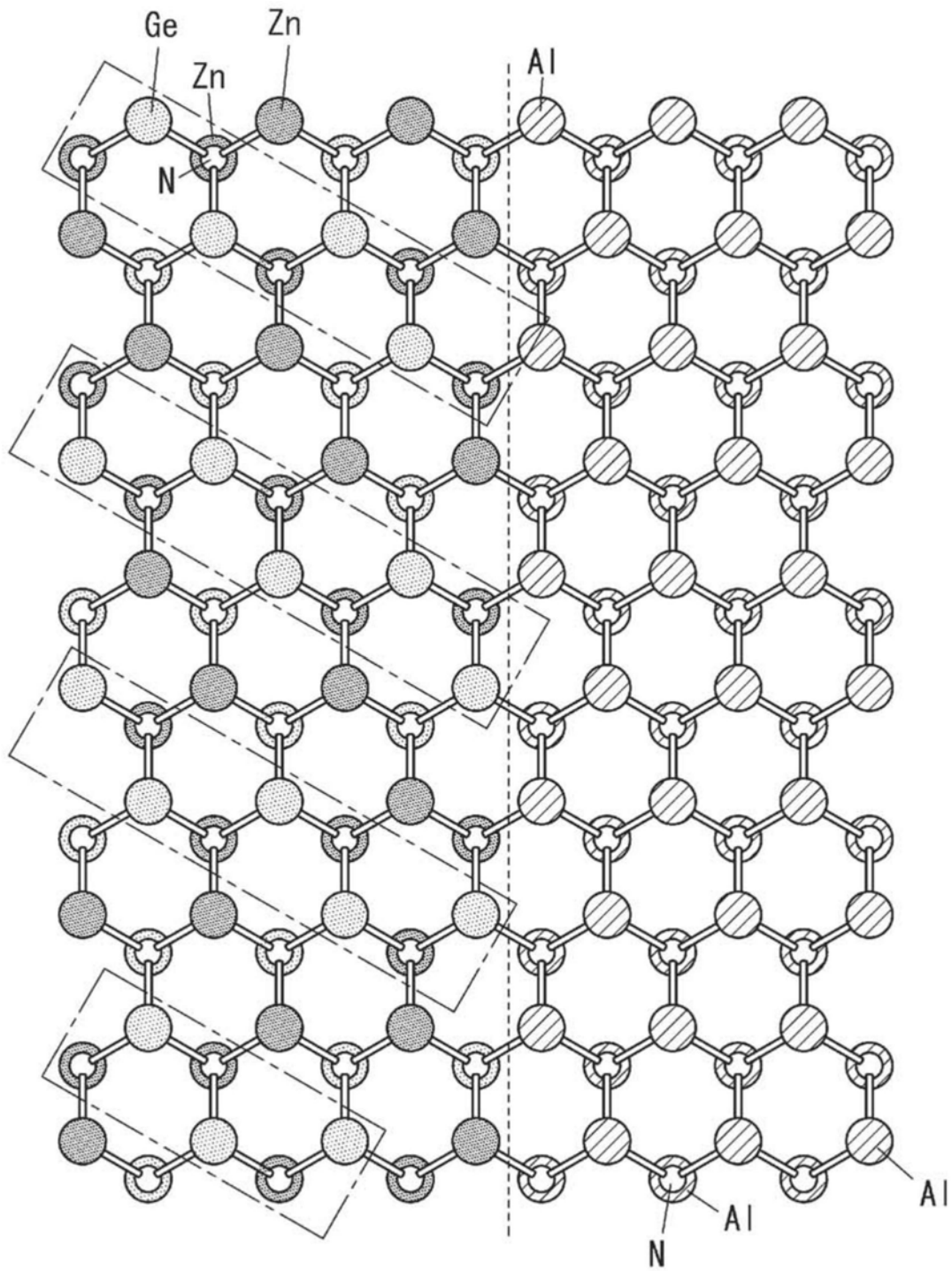


图10

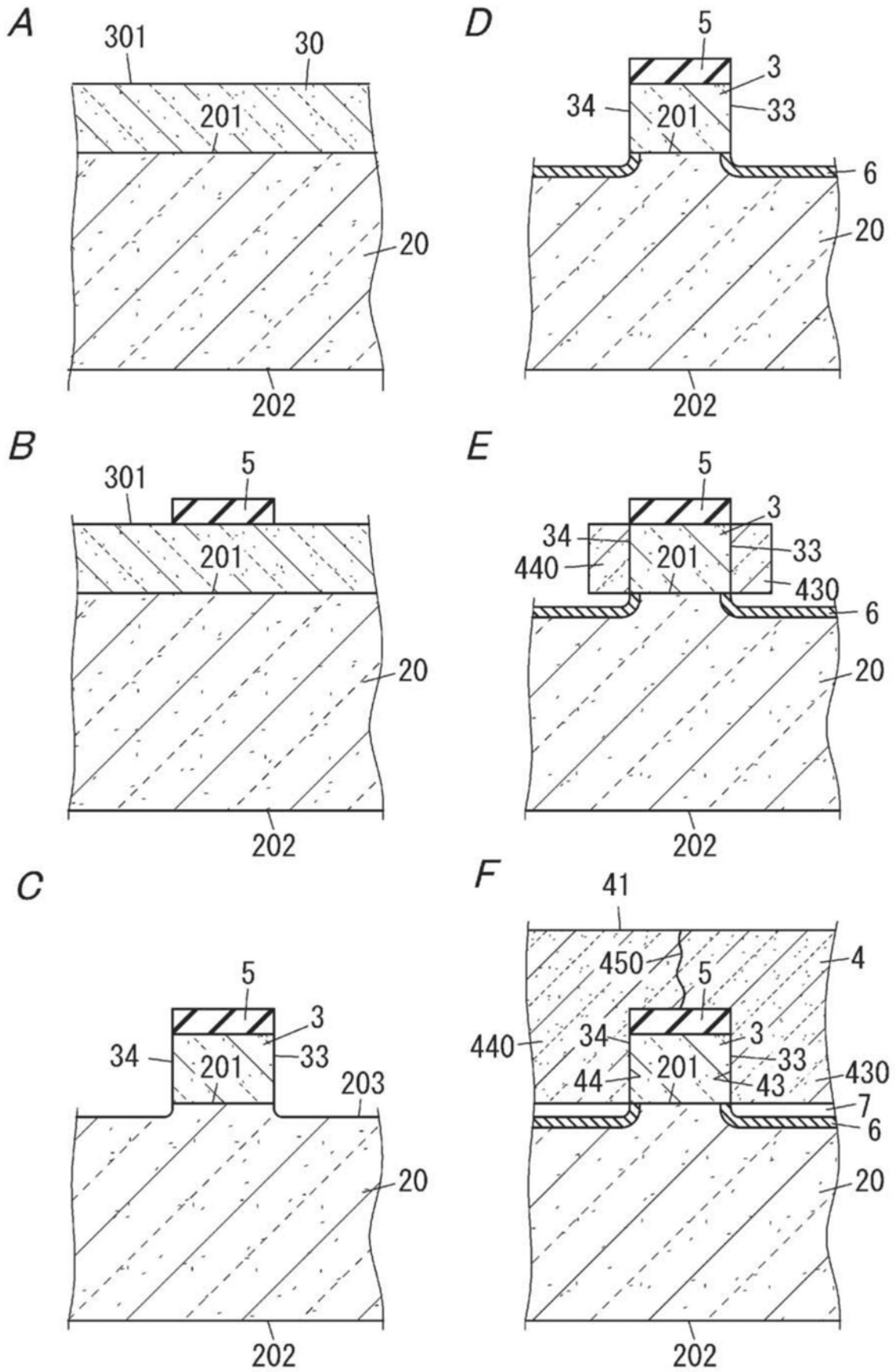


图11

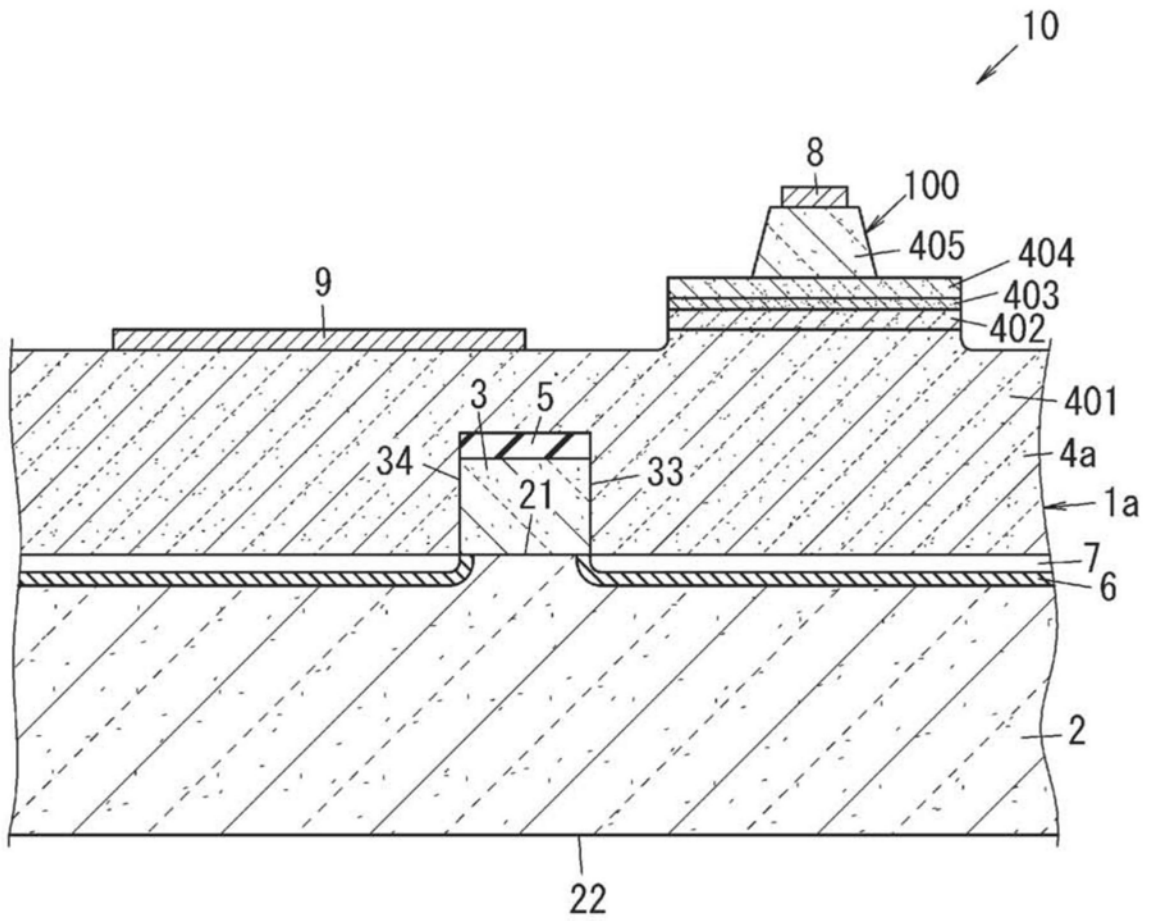


图12

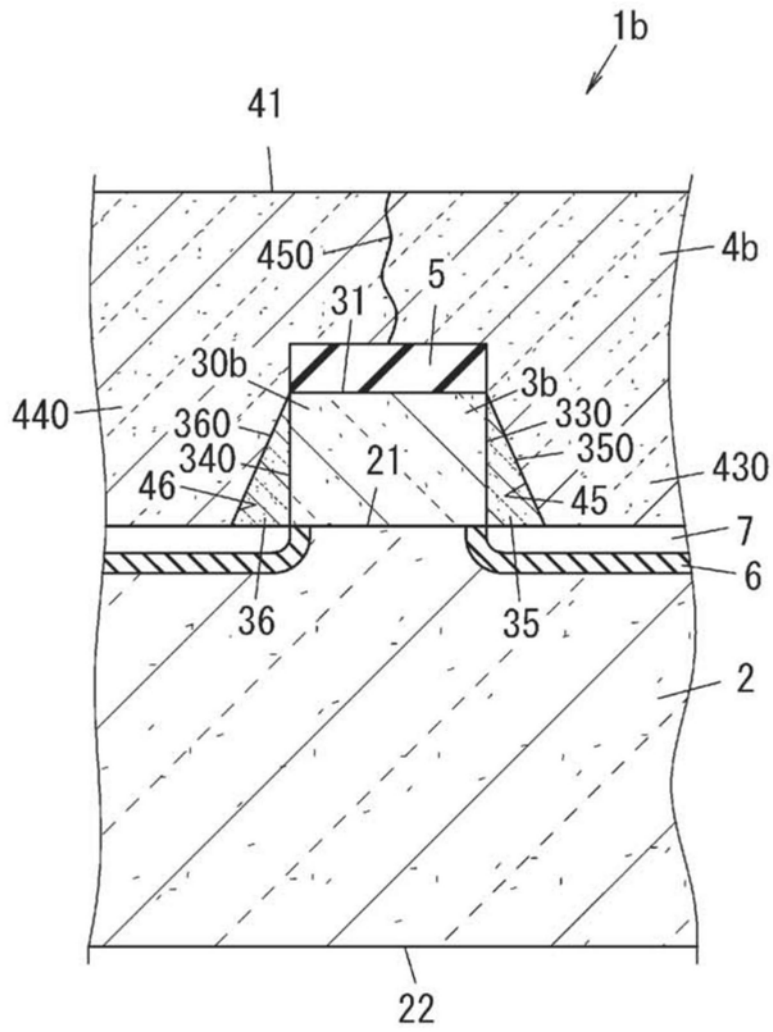


图13

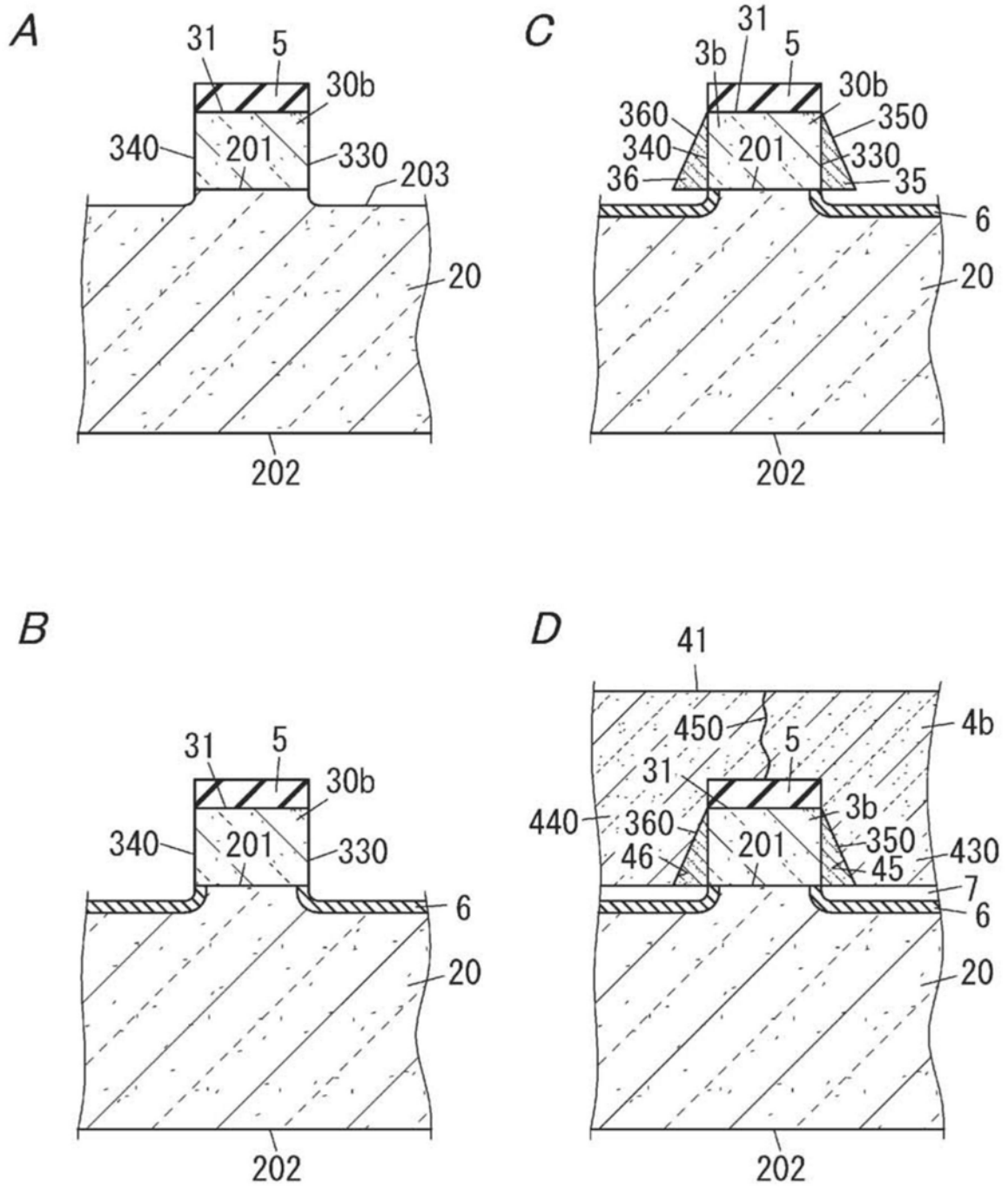


图14

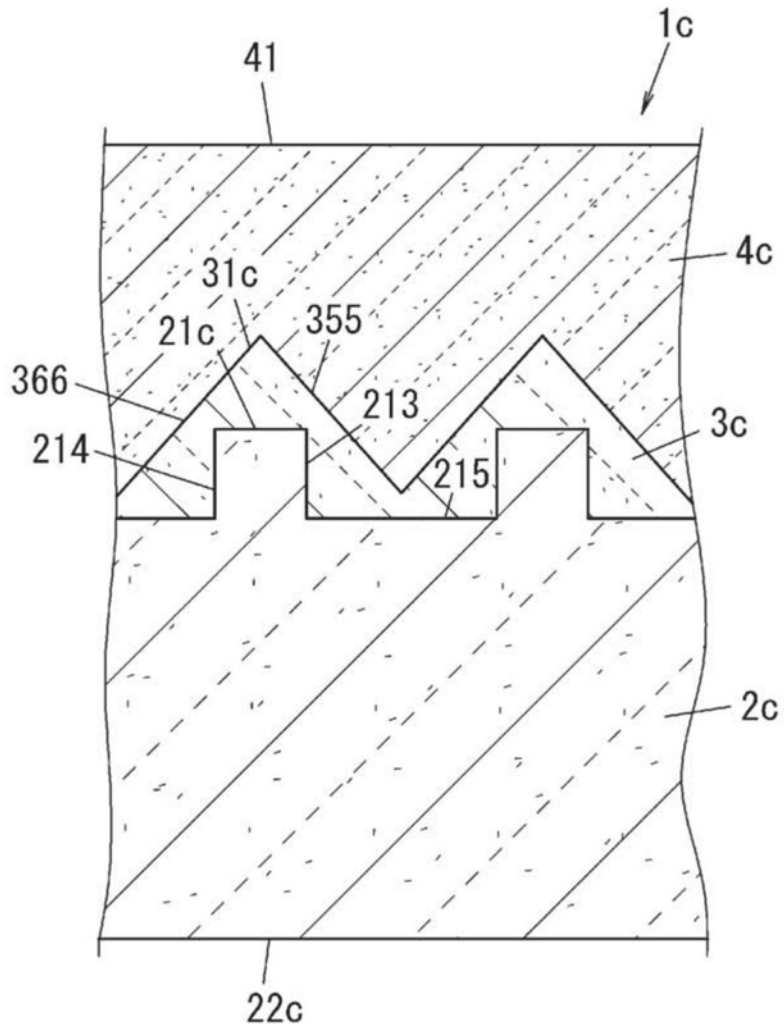


图15

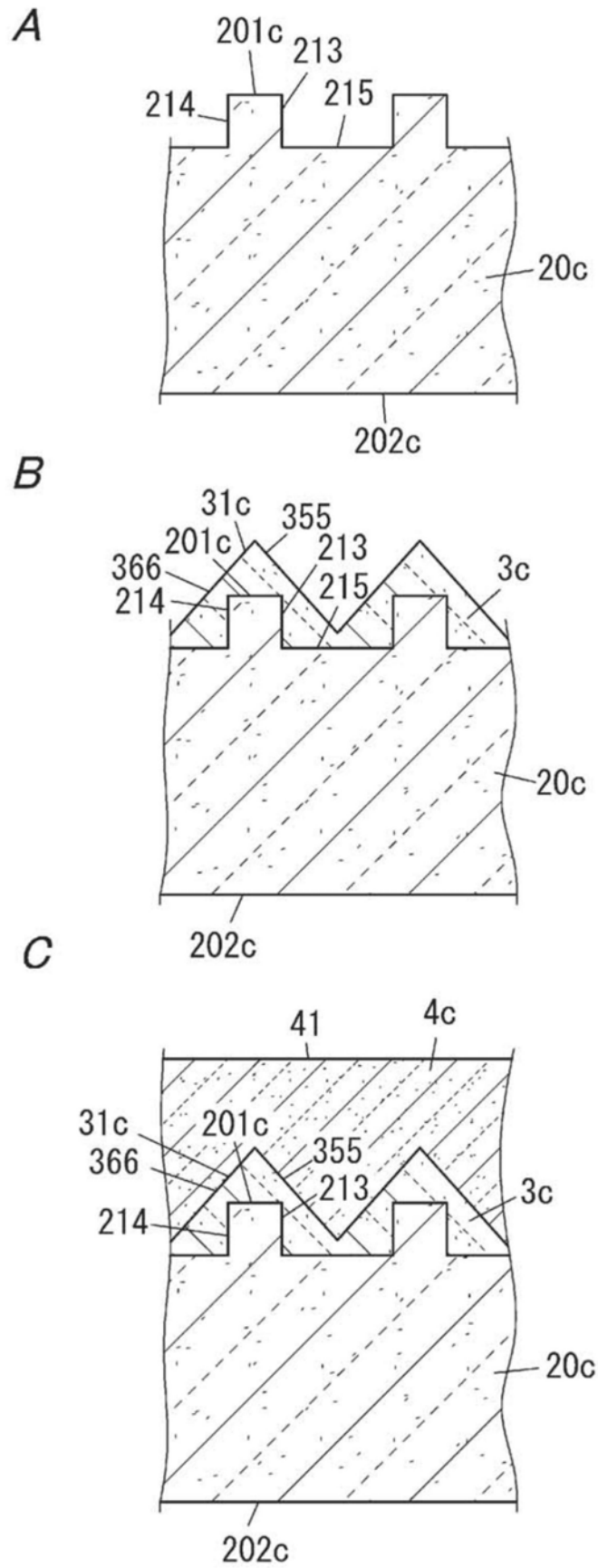


图16

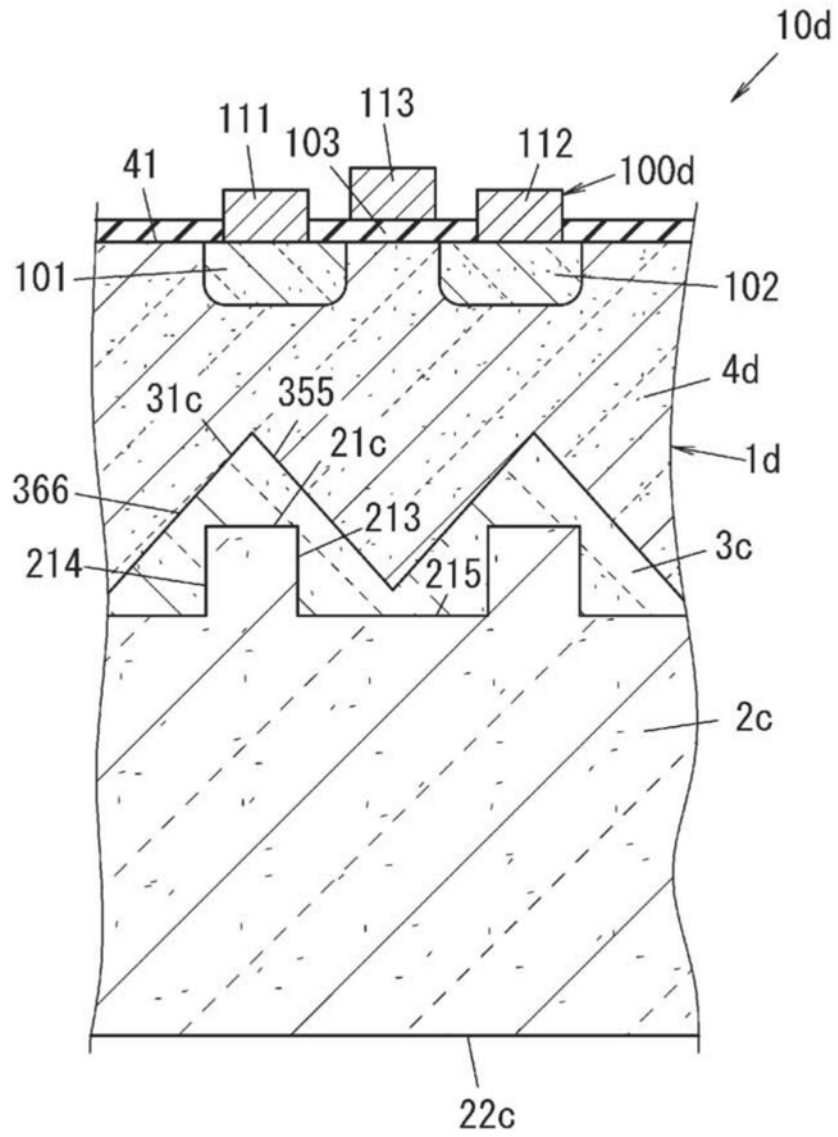


图17

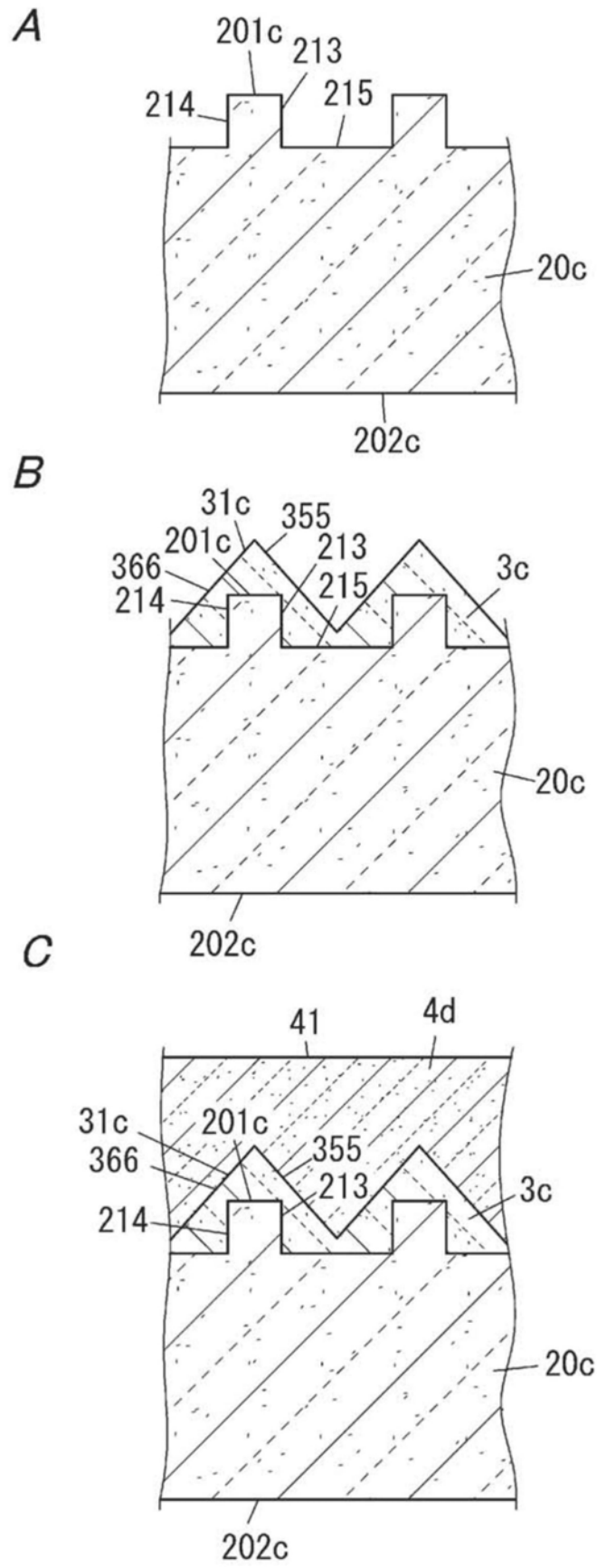


图18

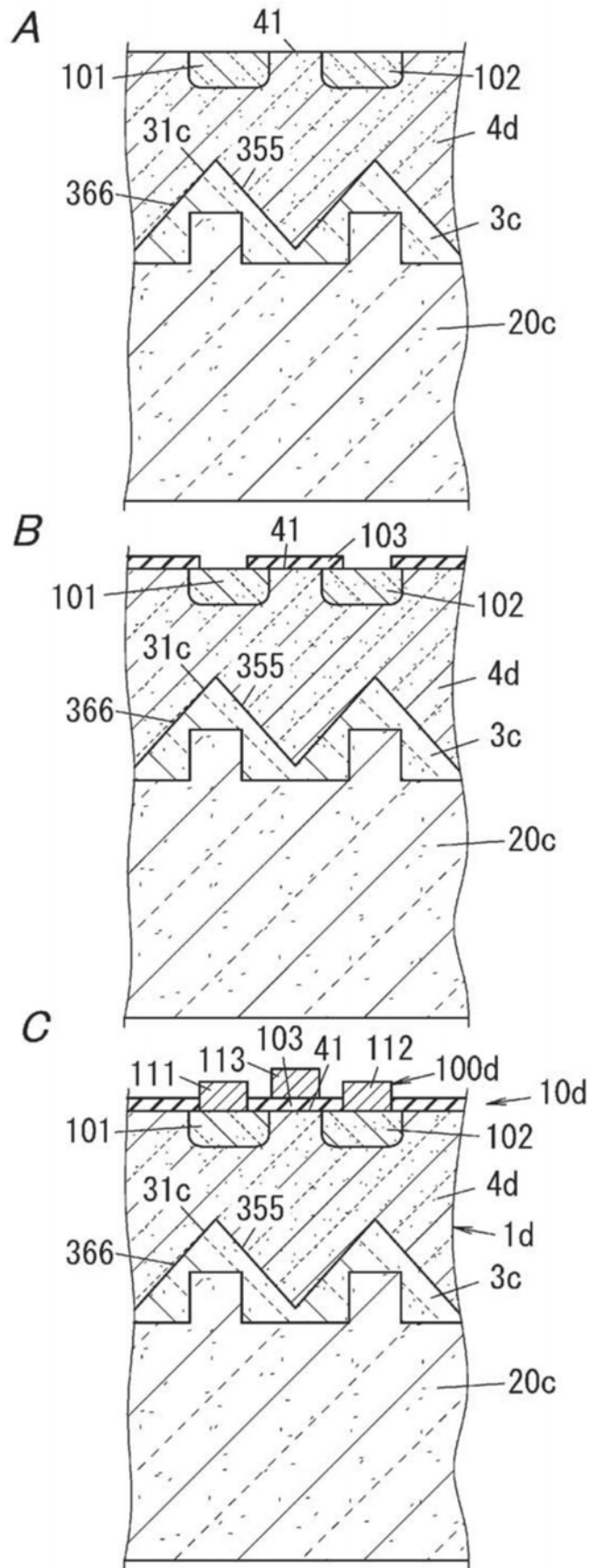


图19

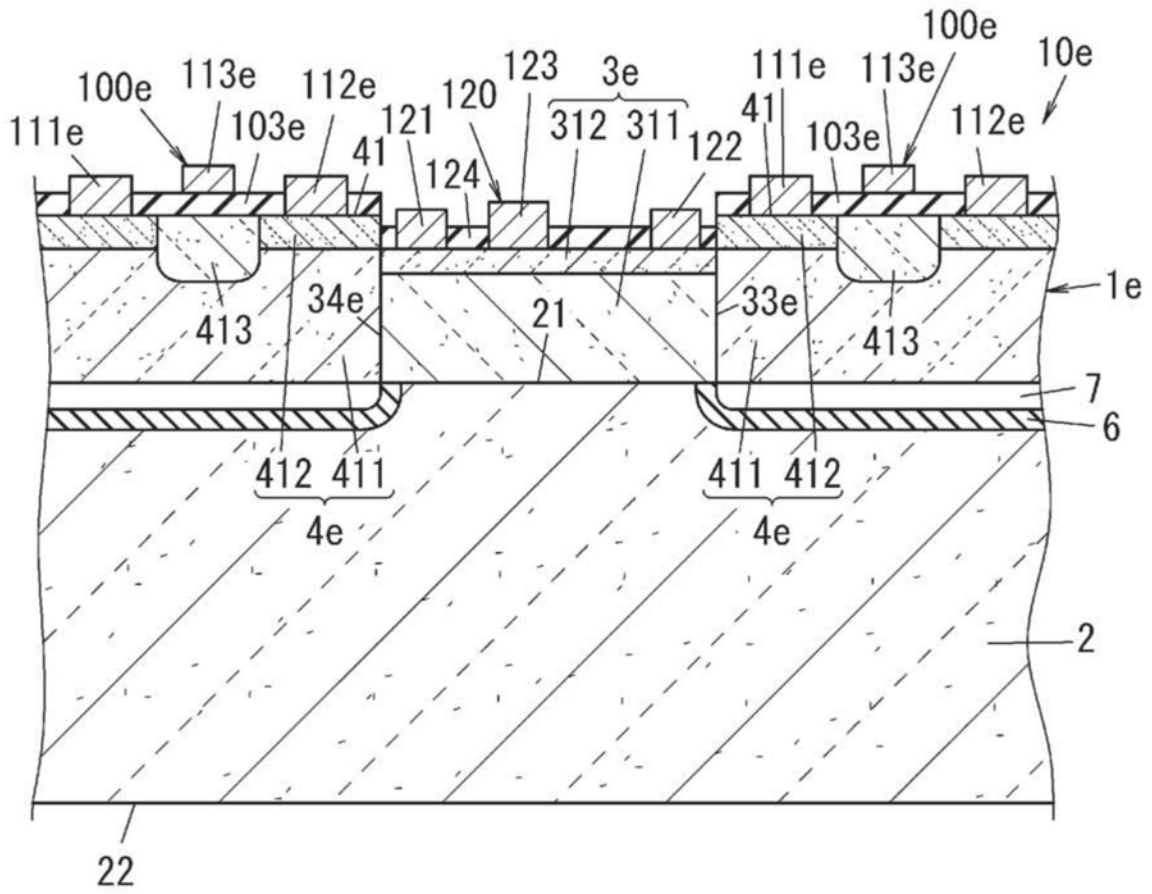


图20

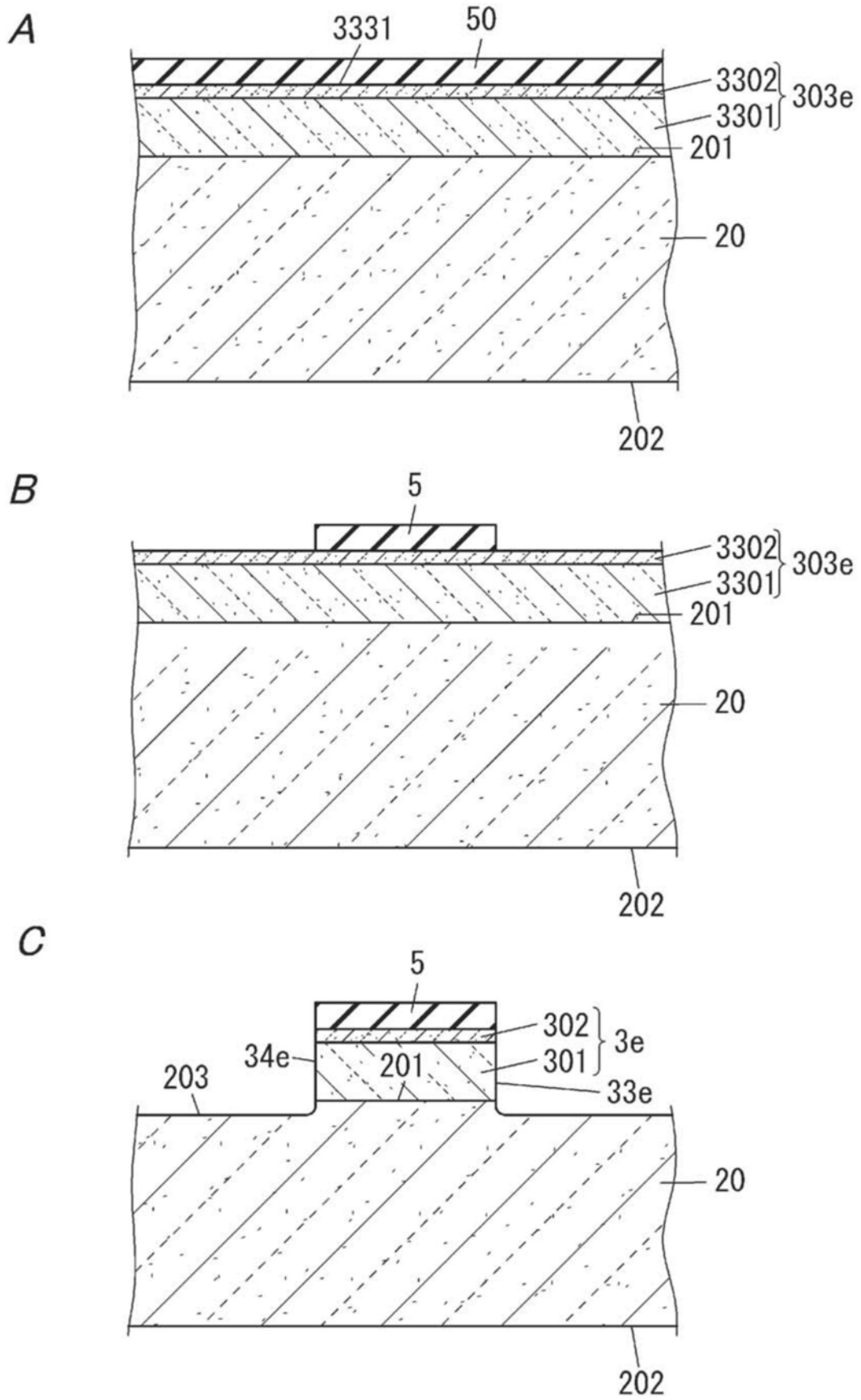


图21

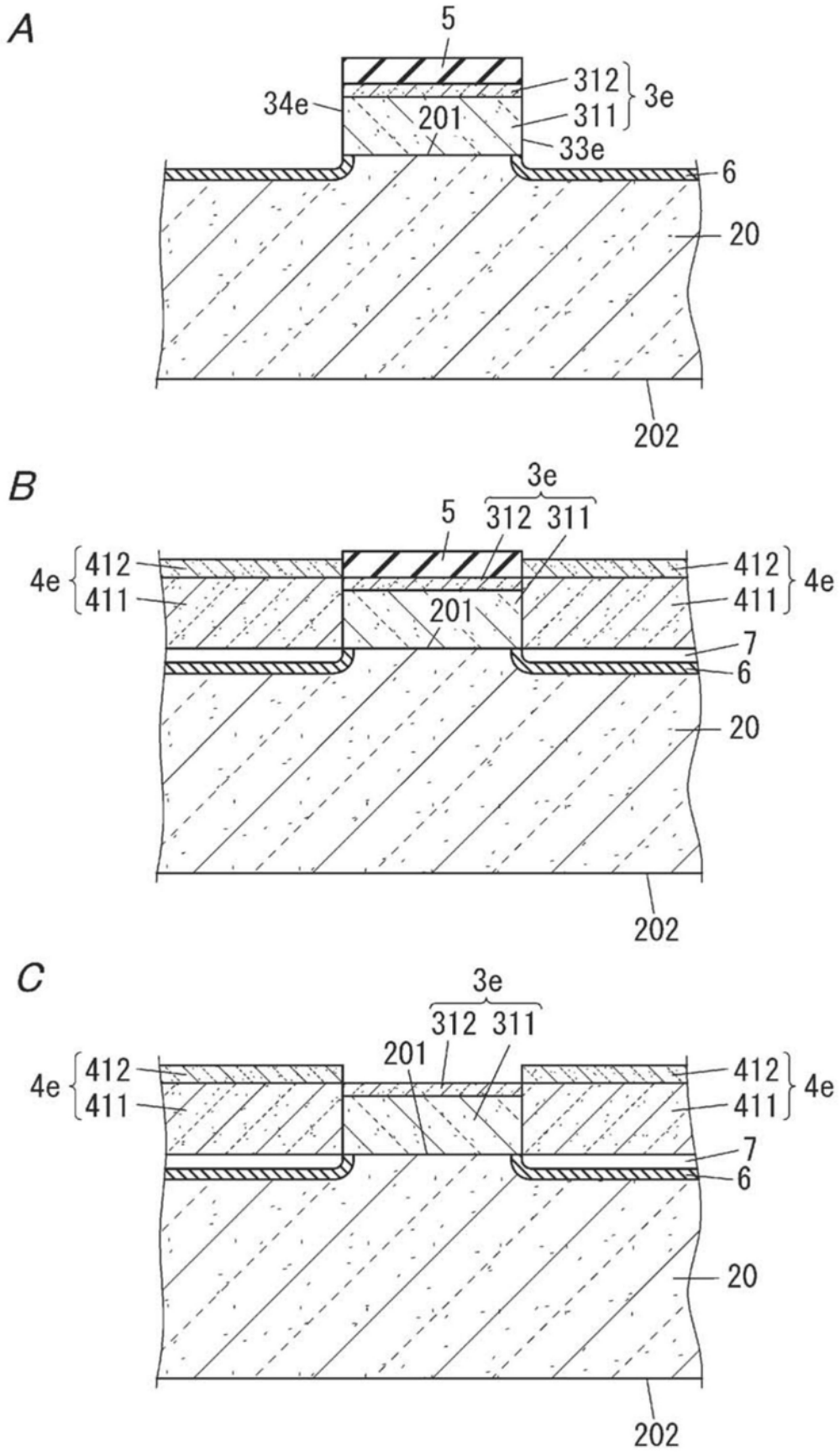


图22

