



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 119923588 A

(43) 申请公布日 2025. 05. 02

(21) 申请号 202380070791.2

(22) 申请日 2023.06.21

(30) 优先权数据

2022-192106 2022.11.30 JP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日

2025.04.02

(86) PCT国际申请的申请数据

PCT/JP2023/022849 2023.06.21

(87) PCT国际申请的公布数据

W02024/116447 JA 2024.06.06

(71) 申请人 株式会社村田制作所

地址 日本

(72) 发明人 浜村聪希 会田康弘

(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 赵琳琳

(51) Int.Cl.

G02F 1/035 (2006.01)

G02B 6/12 (2006.01)

权利要求书2页 说明书16页 附图6页

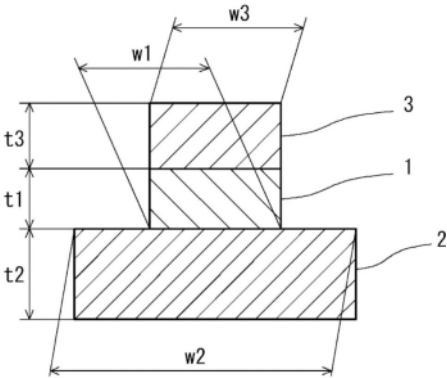
(54) 发明名称

光调制器

(57) 摘要

光调制器(10)具备包含具有电光效应的材料的光波导(1)、第1电极(2)、以及第2电极(3)。第1电极(2)包含半导体材料。第2电极(3)包含金属材料,配置为与第1电极(2)形成电位差而对光波导(1)施加电场。

10



1. 一种光调制器,具备:
光波导,包含具有电光效应的材料;
第1电极,包含半导体材料;以及
第2电极,包含金属材料,配置为与所述第1电极形成电位差而对所述光波导施加电场。
2. 根据权利要求1所述的光调制器,其中,
还具备:低介电常数层,具有比所述光波导的折射率小的折射率,
在所述第1电极以及所述第2电极之中,至少所述第1电极与所述光波导空开间隙进行配置,
所述低介电常数层设置在所述间隙。
3. 根据权利要求1所述的光调制器,其中,
还具备:低介电常数层,具有比所述光波导的折射率小的折射率,
所述第1电极以及所述第2电极分别与所述光波导空开间隙进行配置,
所述低介电常数层设置在所述间隙。
4. 根据权利要求2或3所述的光调制器,其中,
所述间隙的大小为 $0.750\mu\text{m}$ 以上且 $1.675\mu\text{m}$ 以下。
5. 根据权利要求2~4中的任一项所述的光调制器,其中,
所述半导体材料是在硅中掺杂了杂质的硅半导体材料,
所述低介电常数层的主成分为 SiO_2 。
6. 根据权利要求1~5中的任一项所述的光调制器,其中,
所述第1电极层叠于所述光波导,
所述第2电极在所述第1电极的相反侧层叠于所述光波导。
7. 根据权利要求6所述的光调制器,其中,
所述第1电极包含:凸部,在所述第1电极、所述光波导以及所述第2电极的层叠方向上设置在位于所述光波导侧的表面,并朝向所述光波导突出。
8. 根据权利要求7所述的光调制器,其中,
在与所述光波导延伸的方向垂直的剖面中观察时,越靠近所述光波导,与所述层叠方向垂直的方向上的所述凸部的长度越小。
9. 根据权利要求6~8中的任一项所述的光调制器,其中,
在与所述光波导延伸的方向垂直的剖面中观察时,在与所述第1电极、所述光波导以及所述第2电极的层叠方向垂直的方向上,所述第1电极的所述光波导侧的表面的长度比所述光波导的长度大。
10. 根据权利要求1~9中的任一项所述的光调制器,其中,
所述半导体材料是在硅中掺杂了杂质的硅半导体材料。
11. 根据权利要求10所述的光调制器,其中,
所述第1电极中的所述杂质的浓度为 $1.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 以上且 $1.0 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ 以下。
12. 根据权利要求1~11中的任一项所述的光调制器,其中,
所述第1电极的折射率小于3。
13. 根据权利要求10~12中的任一项所述的光调制器,其中,
所述第1电极为硅单晶基板。

14. 根据权利要求10~12中的任一项所述的光调制器,其中,所述第1电极是SOI基板的活性层。
15. 根据权利要求1~14中的任一项所述的光调制器,其中,所述金属材料的主成分为贵金属。
16. 根据权利要求1~15中的任一项所述的光调制器,其中,在与所述光波导延伸的方向垂直的剖面中观察时,所述第1电极的面积比所述第2电极的面积大。
17. 根据权利要求1~16中的任一项所述的光调制器,其中,所述第2电极为信号电极,所述第1电极为接地电极。
18. 根据权利要求1~17中的任一项所述的光调制器,其中,还具备:金属薄层,设置在所述第1电极的所述光波导侧的表面,厚度比所述第1电极薄。
19. 根据权利要求1~18中的任一项所述的光调制器,其中,在所述第1电极中的所述光波导侧的表层,与所述第1电极的其它部分相比较以高的浓度掺杂了杂质。

光调制器

技术领域

[0001] 本公开涉及光调制器。

背景技术

[0002] 由于移动终端、云的普及,互联网的通信量显著地增加。因此,光通信的需求扩大。在光通信中,为了对光信号和电信号进行相互变换,需要光收发器。在光收发器中,作为主要部件而具备光调制器。光调制器承担将电信号变换为光信号的作用。

[0003] 以往的光调制器例如在专利文献1以及非专利文献1有所记载。专利文献1的光调制器具备具有狭缝波导的构造的芯部。芯部具有上部高折射率层、下部高折射率层、以及设置在这些高折射率层的间隙(狭缝)的低折射率层。上部以及下部高折射率层的折射率比低折射率层的折射率大。上部以及下部高折射率层分别具有接触区域。在接触区域分别连接有金属电极。

[0004] 非专利文献1的光调制器具备光波导和两个金属电极。光波导配置在两个金属电极之间。例如,一个金属电极、光波导以及另一个金属电极并列地配置。或者,一个金属电极层叠于光波导,另一个金属电极在其相反侧层叠于光波导。两个电极配置为对光波导施加电场。

[0005] 在先技术文献

[0006] 专利文献

[0007] 专利文献1:日本特开2020-034610号公报

[0008] 非专利文献

[0009] 非专利文献1:Integrated lithium niobate electro-optic modulators:when performance meets scalability,Mian Zhang等,Optica Vol.8,Issue 5,pp.652-667 (2021)

发明内容

[0010] 发明要解决的问题

[0011] 为了在抑制消耗功率的同时对电极施加宽带且高频的信号,优选电极的厚度大。然而,在像以往的光调制器那样使用金属材料形成电极的情况下,若增大电极的厚度,则在电极产生大的内部应力。起因于该内部应力,在电极容易产生裂纹。特别是,在将两个金属电极层叠配置于光波导的两侧的情况下,在各电极中产生如使两个电极向同一方向翘曲变形那样的内部应力。因此,光波导与两个电极一起翘曲变形,在光波导也容易产生裂纹。

[0012] 本公开的目的在于,提供一种能够抑制裂纹的产生并且在抑制消耗功率的同时对电极施加电信号的光调制器。

[0013] 用于解决问题的技术方案

[0014] 本公开涉及的光调制器具备光波导、第1电极、以及第2电极。光波导包含具有电光效应的材料。第1电极包含半导体材料。第2电极包含金属材料,配置为与第1电极形成电位

差而对光波导施加电场。

[0015] 发明效果

[0016] 根据本公开涉及的光调制器,能够抑制裂纹的产生,并且在抑制消耗功率的同时对电极施加电信号。

附图说明

[0017] 图1是示出第1实施方式涉及的光调制器的概略结构的剖视图。

[0018] 图2是示出第2实施方式涉及的光调制器的概略结构的剖视图。

[0019] 图3是示出第3实施方式涉及的光调制器的概略结构的剖视图。

[0020] 图4是示出第4实施方式涉及的光调制器的概略结构的剖视图。

[0021] 图5是示出第5实施方式涉及的光调制器的概略结构的剖视图。

[0022] 图6是示出第5实施方式涉及的光调制器的变形例的图。

[0023] 图7是示出第6实施方式涉及的光调制器的概略结构的剖视图。

[0024] 图8是示出第7实施方式涉及的光调制器的概略结构的剖视图。

[0025] 图9是示出第8实施方式涉及的光调制器的概略结构的剖视图。

[0026] 图10是示出第9实施方式涉及的光调制器的概略结构的剖视图。

[0027] 图11是示出第10实施方式涉及的光调制器的概略结构的剖视图。

[0028] 图12是示出第10实施方式涉及的光调制器的变形例的图。

具体实施方式

[0029] 以下,对本公开的实施方式进行说明。另外,在以下的说明中,举例对本公开的实施例进行说明,但是本公开并不限于以下说明的例子。在以下的说明中,有时例示特定的数值、特定的材料,但是本公开并不限于这些例示。

[0030] 本公开的实施方式涉及的光调制器具备光波导、第1电极、以及第2电极。光波导包含具有电光效应的材料。第1电极包含半导体材料。第2电极包含金属材料,配置为与第1电极形成电位差而对光波导施加电场(第1结构)。

[0031] 在第1结构中,在对光波导施加电场的第1电极以及第2电极之中,第1电极是包含半导体材料的半导体电极。半导体电极与金属电极相比较,能够抑制内部应力,并且形成得厚。通过将半导体电极形成得厚,从而能够抑制消耗功率,并且对半导体电极施加宽带且高频的信号。此外,半导体电极能够在抑制内部应力的同时形成,因此能够抑制起因于内部应力的裂纹的产生。

[0032] 在第1结构中,在对光波导施加电场的第1电极以及第2电极之中,第2电极是包含金属材料的金属电极。构成第2电极的金属材料与半导体材料相比,电导率高。因此,与第1电极以及第2电极双方为半导体电极的情况相比较,能够抑制电损耗。

[0033] 第1结构的光调制器也可以还具备具有比光波导的折射率小的折射率的低介电常数层。在该情况下,也可以是,在第1电极以及第2电极之中,至少第1电极与光波导空开间隙进行配置,低介电常数层设置在该间隙(第2结构)。也可以是,第1电极以及第2电极分别与光波导空开间隙进行配置,低介电常数层设置在各间隙(第3结构)。

[0034] 在第2结构中,至少作为半导体电极的第1电极与光波导空开间隙进行配置。在该

情况下,第1电极与光波导不接触。进而,在第1电极和光波导的间隙设置有折射率比光波导小的低介电常数层。由此,通过光波导的光变得不易向第1电极泄漏,能够抑制光的损耗。

[0035] 在第3结构中,第1电极以及第2电极双方与光波导空开间隙进行配置。进而,在第1电极和光波导的间隙以及第2电极和光波导的间隙,分别设置有折射率比光波导小的低介电常数层。由此,通过光波导的光变得不易向第1电极以及第2电极各自泄漏,能够进一步抑制光的损耗。

[0036] 在第2结构或第3结构的光调制器中,优选地,间隙的大小为 $0.750\mu\text{m}$ 以上且 $1.675\mu\text{m}$ 以下(第4结构)。

[0037] 虽然微弱,但是仍有光从光波导渗出到低介电常数层。该渗出的光被称为瞬逝光(Evanescence Light)。如果像第4结构那样第1电极以及/或者第2电极和光波导的间隙的大小为 $0.750\mu\text{m}$ 以上,则瞬逝光变得不易与第1电极以及/或者第2电极接触,能够进一步抑制光的损耗。

[0038] 在第4结构中,第1电极以及/或者第2电极和光波导的间隙的大小成为 $1.675\mu\text{m}$ 以下。在该情况下,第1电极以及/或者第2电极和光波导的距离不会变得过大,即使不增大施加在第1电极与第2电极之间的电压,也能够确保对光波导的电场的大小。

[0039] 在第2结构~第4结构中的任一个光调制器中,也可以是,半导体材料是在硅中掺杂了杂质的硅半导体材料,低介电常数层的主成分为 SiO_2 (第5结构)。因为半导体材料为硅半导体材料,所以在第1电极和光波导的间隙设置低介电常数层的情况下,能够通过热氧化法在硅半导体材料的第1电极上成膜 SiO_2 的低介电常数层。在利用热氧化法的成膜中,低介电常数层对第1电极的密接性好,异物不易进入到第1电极和低介电常数层的界面。因此,在第1电极和低介电常数层的界面处,能够抑制电损耗。此外,在第1电极和低介电常数层的界面处可抑制异物的聚集,因此能够谋求光调制器的可靠性以及寿命的提高。

[0040] 在第1结构~第5结构中的任一个光调制器中,优选地,第1电极层叠于光波导,第2电极在第1电极的相反侧层叠于光波导(第6结构)。在该情况下,在第1电极、光波导以及第2电极的层叠方向上,光波导存在于第1电极与第2电极之间。因此,能够效率良好地对光波导施加由第1电极以及第2电极产生的电场。

[0041] 在第6结构的光调制器中,第1电极也可以包含凸部。凸部在第1电极、光波导以及第2电极的层叠方向上设置在位于光波导侧的表面,并朝向光波导突出(第7结构)。在该情况下,能够通过凸部使电场集中于光波导。因此,能够减小施加在第1电极与第2电极之间的电压,能够进一步抑制消耗功率。

[0042] 在第7结构的光调制器中,也可以是,在与光波导延伸的方向垂直的剖面中观察时,越靠近光波导,与层叠方向垂直的方向上的凸部的长度越小(第8结构)。例如,凸部在剖视下具有矩形形状的情况下,凸部的侧面相对于第1电极的光波导侧的表面的其它部分以直角连续。另一方面,在像第8结构这样越靠近光波导则与电极以及光波导的层叠方向垂直的方向上的凸部的长度越小的情况下,能够使凸部的侧面相对于第1电极的光波导侧的表面的其它部分比较平缓地连续。由此,能够使得在凸部和其它部分的边界处不易产生电损耗。

[0043] 在第6结构~第8结构中的任一个光调制器中,优选地,在与光波导延伸的方向垂直的剖面中观察时,在与第1电极、光波导以及第2电极的层叠方向垂直的方向上,第1电极

的光波导侧的表面的长度比光波导的长度大(第9结构)。在该情况下,能够在光波导的整个区域施加电场。

[0044] 在第1结构~第9结构中的任一个光调制器中,优选地,第1电极中的半导体材料是在硅中掺杂了杂质的硅半导体材料(第10结构)。

[0045] 在第10结构的光调制器中,优选地,第1电极中的杂质的浓度为 $1.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 以上且 $1.0 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ 以下(第11结构)。在第1电极中,伴随着杂质的增加,电阻率变小,电导率变大。如果杂质的浓度为 $1.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 以上,则能够使第1电极作为电极而有效地发挥功能。如果杂质的浓度为 $1.0 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ 以下,则能够防止杂质的析出。

[0046] 在第1结构~第11结构中的任一个光调制器中,第1电极的折射率小于3(第12结构)。在该情况下,例如与第11结构的杂质的浓度(掺杂量)对应地,第1电极的折射率变得小于3。

[0047] 在第10结构~第12结构中的任一个光调制器中,优选地,第1电极为硅单晶基板(第13结构)。

[0048] 在第10结构~第12结构中的任一个光调制器中,第1电极也可以是SOI基板的活性层(第14结构)。

[0049] 在第1结构~第14结构中的任一个光调制器中,优选地,金属材料的主成分为贵金属(第15结构)。在该情况下,构成第2电极的金属材料以不易进行化学反应的贵金属为主成分,因此光调制器的调制特性稳定。进而,如果构成第2电极的金属材料的主成分为贵金属,则能够抑制第2电极的电阻值,能够抑制消耗功率。

[0050] 在第1结构~第15结构中的任一个光调制器中,优选地,在与光波导延伸的方向垂直的剖面中观察时,第1电极的面积比第2电极的面积大(第16结构)。第2电极包含金属材料,因此即使不增大剖面面积,电阻值也足够小。另一方面,第1电极包含电导率比金属材料小的半导体材料,因此通过使剖面面积大于第2电极,从而能够减小电阻值。关于这一点,在第16结构中,第1电极的剖面面积比第2电极的剖面面积大,因此第1电极的电阻值变小,能够抑制消耗功率。

[0051] 在第1结构~第16结构中的任一个光调制器中,优选地,第2电极为信号电极,第1电极为接地电极(第17结构)。即,作为金属电极的第2电极被用于信号电极,作为半导体电极的第1电极被用于接地电极。第2电极包含电导率大且高频信号的衰减小的金属材料。如果将该第2电极设为信号电极,则能够抑制驱动电压。

[0052] 第1结构~第17结构中的任一个光调制器也可以还具备厚度比第1电极薄的金属薄层。金属薄层设置在第1电极的光波导侧的表面(第18结构)。金属薄层的电导率大,高频信号的衰减小。如果将该金属薄层设置在第1电极的光波导侧的表面,则能够抑制驱动电压。进而,在第1电极中,由于趋肤效应,高频信号更多地通过表层传播,因此优选表层附近的电导率更大。关于这一点,如果将金属薄层设置在第1电极的光波导侧的表面,则能够减小电阻率,能够抑制信号的衰减。

[0053] 在第1结构~第18结构中的任一个光调制器中,优选地,在第1电极中的光波导侧的表层,与第1电极的其它部分相比较以高的浓度掺杂了杂质(第19结构)。在该情况下,在第1电极中,能够使光波导的附近局部存在电导率大的区域,能够通过趋肤效应来抑制高频信号的衰减。

[0054] 以下,参照附图对本公开的实施方式进行说明。在各图中,对相同或相当的结构标注相同的附图标记,不再反复重复的说明。

[0055] <第1实施方式>

[0056] [光调制器的结构]

[0057] 图1是示出第1实施方式涉及的光调制器10的概略结构的剖视图。光调制器10具备光波导1、第1电极2、以及第2电极3。在图1中,示出了与光波导1延伸的方向垂直的剖面。在本说明书中,只要没有特别声明,剖面就意味着与光波导1延伸的方向垂直的剖面。

[0058] 如图1所示,光波导1也可以具有实质上为矩形形状的剖面。光波导1包含具有电光效应的材料。光波导1作为光的传输路而发挥功能。作为光波导1,可使用 LiNbO_3 (铌酸锂)、 LiTaO_3 (钽酸锂)、PLZT (锆钛酸铅镧)、KTN (铌铌酸钾)、或者 BaTiO_3 (钛酸钡)等。作为光波导1,也可以使用电光聚合物(E0聚合物)。

[0059] 第1电极2以及第2电极3作为用于对通过光波导1的光进行控制的控制电极而发挥功能。第1电极2以及第2电极3各自也可以具有实质上为矩形形状的剖面。第1电极2以及第2电极3配置为在彼此之间形成电位差而对光波导1施加电场。光波导1配置在第1电极2与第2电极3之间。

[0060] 在本实施方式的例子中,第1电极2层叠于光波导1。第2电极3在第1电极2的相反侧层叠于光波导1。从另一个观点来看,第1电极2和第2电极3配置为夹着光波导1。在本实施方式中,在第1电极2上直接层叠光波导1,第1电极2与光波导1接触。进而,在光波导1上直接层叠第2电极3,第2电极3与光波导1接触。

[0061] 第1电极2包含半导体材料。即,第1电极2是半导体电极。关于用于第1电极2的半导体材料,典型地,是在Si(硅)中掺杂了杂质的硅半导体材料。作为半导体材料,例如,也可以使用利用了Ge(锗)等的其它单元素半导体或者GaAs(砷化镓)等化合物半导体。杂质可以是p型杂质以及n型杂质中的任一者。例如,在半导体材料为硅半导体材料的情况下,作为p型杂质,可使用硼等第3族元素,作为n型杂质,可使用磷、砷、锑等第5族元素。

[0062] 在用于第1电极2的半导体材料为硅半导体材料的情况下,第1电极2中的杂质的浓度(掺杂量)优选为 $1.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 以上且 $1.0 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ 以下。伴随着杂质的掺杂量的增加,半导体材料的电阻率变小,电导率变大。如果掺杂量为 $1.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 以上,则能够使第1电极2作为电极而有效地发挥功能。如果掺杂量为 $1.0 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ 以下,则能够通过硅半导体材料中的杂质的固溶极限来防止杂质的析出。伴随着掺杂量的增加,第1电极2的折射率下降。例如,第1电极2的折射率小于3。

[0063] 以下,对上述的掺杂量的范围进行更详细的说明。掺杂量的上限优选为 $1.0 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ 的理由基于硅半导体材料中的杂质的固溶极限。在第1电极2中,若掺杂量超过作为固溶极限的 $1.0 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$,则析出杂质,第1电极2以及光调制器10的可靠性下降。另一方面,掺杂量的下限优选为 $1.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 的理由如下。作为设计电极的厚度以及宽度时的指标,有趋肤深度。若电极的厚度以及宽度比趋肤深度小,则电阻值上升。因此,优选将电极的厚度以及宽度设为趋肤深度以上。在考虑处理1GHz以上的频率信号的光调制器的运用的情况下,在掺杂量为 $1.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 时,电导率为1000S/m,趋肤深度成为500 μm 。例如,若考虑通过微细加工用硅半导体材料形成电极,则作为电极的厚度,500 μm 程度是极限。这样一来,从确保作为电极的性能的观点出发,为了得到具有1000S/m以上的电导率的电极,只要将掺杂

量设为 $1.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 以上即可。

[0064] 第1电极2例如为硅单晶基板。杂质例如预先掺杂到成为第1电极2的原材料的硅单晶的母材基板。将该母材基板配置在其它的基板上并进行图案化(蚀刻、切割等),由此能够形成第1电极2。第1电极2也可以是SOI(Silicon on Insulator,绝缘体上的硅)基板的活性层。在该情况下,通过对SOI基板的活性层进行图案化(蚀刻、切割等),从而能够形成第1电极2。对于这样形成的第1电极2,也可以通过热扩散法或离子注入法等进一步导入杂质。

[0065] 第1电极2也可以是形成在基板上的半导体硅层。例如,能够通过溅射、蒸镀或CVD等在基板上形成硅层。对于该硅层,能够通过热扩散法或者离子注入法等导入杂质从而形成作为第1电极2的半导体硅层。

[0066] 第2电极3包含金属材料。即,第2电极3为金属电极。关于用于第2电极3的金属材料,例如,其主成分为贵金属。贵金属例如为Au(金)。作为贵金属,也可以使用Ag(银)、Pt(铂)等。在金属材料中,也可以包含微量的Cr、Ti等其它金属元素。作为金属材料,也可以使用铜、铝或它们的合金等。

[0067] 第2电极3例如能够像以下那样相对于光波导1以及第1电极2进行层叠。首先,将具有电光效应的材料基板配置在第1电极2上,并将材料基板与第1电极2粘接。然后,对材料基板实施光刻以及蚀刻,形成光波导1。接着,通过溅射、蒸镀等在光波导1上成膜金属层。对于成膜的金属膜,通过光刻进行图案化,并通过蚀刻形成第2电极3。

[0068] 第2电极3被用作信号电极,第1电极2被用作接地电极。也可以与此相反,第1电极2被用作信号电极,第2电极3被用作接地电极。

[0069] 在图1所示的例子中,光波导1具有相当于光波导1以及电极2、3的层叠方向上的长度的厚度 t_1 以及相当于与层叠方向垂直的方向上的长度的宽度 w_1 。第1电极2具有相当于层叠方向上的长度的厚度 t_2 以及相当于与层叠方向垂直的方向上的长度的宽度 w_2 。第2电极3具有相当于层叠方向上的长度的厚度 t_3 以及相当于与层叠方向垂直的方向上的长度的宽度 w_3 。

[0070] 在与光波导1延伸的方向垂直的剖面中观察时,第1电极2的面积比第2电极3的面积大。具体地,作为半导体电极的第1电极2的剖面面积比作为金属电极的第2电极3的剖面面积大。优选设定第1电极2的剖面面积以及第2电极3的剖面面积,使得第1电极2的电阻值与第2电极3的电阻值实质上一致。即,第1电极2的作为电极的性能优选与第2电极3等同。例如,第1电极2的剖面面积能够设为“(第2电极3的电导率/第1电极2的电导率)×第2电极3的剖面面积”。

[0071] 在第1电极2的宽度 w_2 和第2电极3的宽度 w_3 相同的条件下,为使第1电极2的电阻值与第2电极3的电阻值一致,只要第1电极2中的电导率和厚度 t_2 之积与第2电极3中的电导率和厚度 t_3 之积一致即可。例如,在第2电极3中的金属材料为Au的情况下,通常,第2电极3的厚度 t_3 设为 $0.1 \mu\text{m}$ 以上且 $2.0 \mu\text{m}$ 以下,其电导率为 $4.3 \times 10^7 \text{S/m}$ 。另一方面,第1电极2的电导率比第2电极3的电导率小,因此第1电极2的厚度 t_2 变得比第2电极3的厚度 t_3 大。第1电极2的电导率根据杂质的掺杂量而变化。

[0072] 例如,在第1电极2由硅半导体材料构成的情况下,在杂质的掺杂量为上限的 $1.0 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ 时,第1电极2的电导率成为 $1 \times 10^7 \text{S/m}$ 。此时,将第2电极3的电导率除以第1电极2的电导率而得到的值为4.3,第1电极2的厚度 t_2 能够设为第2电极3的厚度 t_3 的4.3倍。另一方

面,在杂质的掺杂量为下限的 $1.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 时,第1电极2的电导率成为 1000S/m 。此时,将第2电极3的电导率除以第1电极2的电导率而得到的值为 4.3×10^3 ,第1电极2的厚度 t_2 能够设为第2电极3的厚度 t_3 的 4.3×10^3 倍。

[0073] 因此,第1电极2的厚度 t_2 的下限能够设为第2电极3的厚度 t_3 的下限即 $0.1 \mu\text{m}$ 的 4.3 倍。即,第1电极2的厚度 t_2 能够设为 $0.43 \mu\text{m}$ 以上。另一方面,第1电极2的厚度 t_2 的上限能够设为第2电极3的厚度 t_3 的上限即 $2.0 \mu\text{m}$ 的 4.3×10^3 倍。即,第1电极2的厚度 t_2 能够设为 $8600 \mu\text{m}$ (8.6mm) 以下。

[0074] 不过,除了电极2、3的各电导率以及第2电极3的厚度 t_3 以外,例如还考虑加工性来决定第1电极2的厚度 t_2 。例如,在使用硅半导体材料形成第1电极2的情况下,从加工性的观点出发,第1电极2的厚度 t_2 优选为 $500 \mu\text{m}$ 以下。

[0075] 从另一个观点出发,在使高频电流流过第1电极2的情况下,能够基于趋肤效应对第1电极2所需的厚度 t_2 进行估计。下述的式(1)是计算导体的趋肤深度的式子。

[0076] [数学式1]

$$[0077] \quad d = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f\mu\sigma}} \quad (1)$$

[0078] d : 趋肤深度[m]

[0079] ρ : 导体的电阻率 [$\Omega \cdot \text{m}$] = $1/\sigma$

[0080] ω : 交流电流的角频率 [rds/s] = $2\pi f$

[0081] μ : 导体的磁导率 [H/m]

[0082] σ : 导体的电导率 [S/m]

[0083] f : 交流电流的频率 [Hz]

[0084] 根据式(1),能够决定第1电极2所需的厚度 t_2 。更具体地,通过使第1电极2的厚度 t_2 大于使用式(1)计算的趋肤深度,从而能够减小第1电极2的电阻,能够抑制多余的电损耗。第1电极2的电导率越高越优选。不过,杂质的掺杂量存在固溶极限,此外,若掺杂量接近于固溶极限,则杂质会团簇化,作为载流子会产生惰性的状态,因此若掺杂量超过某个量,则第1电极2的电导率饱和。如果设掺杂量的固溶极限为 $1.0 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$,则第1电极2的电导率成为 $1 \times 10^7 \text{S/m}$, 1GHz 的电信号的趋肤深度成为 $5 \mu\text{m}$ 。然而,可预想如下情况,即,实际的电导率下降一个数量级而成为 $1 \times 10^6 \text{S/m}$ 程度。因此,如果使电信号具有带宽并设为处理 0.5GHz 以上的信号的运用,则第1电极2的厚度 t_2 优选为 $25 \mu\text{m}$ 以上。

[0085] 作为半导体电极的第1电极2的厚度 t_2 例如能够通过以下的方法来测定。第1方法是基于SEM观察的计测方法。在该方法中,通过FIB(聚焦离子束)将光调制器10切断,采集试样。能够通过SEM对采集的试样的剖面进行拍摄,并从得到的图像测定第1电极2的厚度 t_2 。第2方法是光学计测方法。在该方法中,能够通过干涉光谱法来直接测定第1电极2的厚度 t_2 。无论是哪一种方法,测定结果实质上均相同。

[0086] 作为金属电极的第2电极3的厚度 t_3 例如能够通过以下的方法来测定。第1方法是上述的基于SEM观察的计测方法。第2方法是利用X射线的计测方法。在该方法中,向第2电极3照射X射线,并测定透射的X射线量,由此求出由第2电极3造成的衰减量。通过对求出的衰减量进行逆运算,从而能够测定第2电极3的厚度 t_3 。无论是哪一种方法,测定结果实质上均

相同。

[0087] 第1电极2中的掺杂量能够通过外延电阻率测定、气隙CV测定、水银CV测定、表面电荷分布、二次离子质谱分析或扩展电阻测定等来测定。无论是哪一种方法,测定结果实质上均相同。

[0088] 在与光波导1延伸的方向垂直的剖面中观察时,第1电极2的光波导1侧的宽度 w_2 大于光波导1的宽度 w_1 。所谓第1电极2的光波导1侧的宽度 w_2 ,意味着第1电极2中的最靠近光波导1的表面的宽度。在本实施方式中,第1电极2中的与光波导1相接的面的与层叠方向垂直的方向上的长度为宽度 w_2 。

[0089] [效果]

[0090] 在本实施方式涉及的光调制器10中,第1电极2包含半导体材料,第2电极3包含金属材料。即,在对光波导1施加电场的第1电极2以及第2电极3之中,第1电极2为半导体电极。半导体电极与金属电极相比,能够抑制内部应力,并且能够形成得厚。通过将半导体电极形成得厚,从而能够抑制消耗功率,并且对半导体电极施加宽带且高频的信号。此外,半导体电极能够在抑制内部应力的同时形成,因此能够抑制起因于内部应力的裂纹的产生。

[0091] 用于第1电极2的半导体材料例如是在Si中掺杂了杂质的硅半导体材料。第1电极2可以是硅单晶基板,也可以是成膜在基板上的半导体硅层。例如,在第1电极2为硅单晶基板的情况下,与在基板上形成半导体硅层的情况相比较,能够降低第1电极2的内部应力。因此,能够在进一步抑制第1电极2的内部应力的同时将第1电极2形成得厚。

[0092] 在本实施方式涉及的光调制器10中,在对光波导1施加电场的第1电极2以及第2电极3之中,第2电极3为金属电极。构成第2电极的金属材料与半导体材料相比,电导率高。因此,与第1电极以及第2电极双方为半导体电极的情况相比较,能够抑制电损耗。

[0093] 作为金属电极的第2电极3能够通过溅射或蒸镀等在不隔着粘接层的情况下形成在光波导1上。因此,能够防止产生由粘接层造成的光吸收。此外,还能够防止粘接层扩散到光波导1而使光波导1的折射率变化。

[0094] 在本实施方式中,第1电极2层叠于光波导1,第2电极3在第1电极2的相反侧层叠于光波导1。在该情况下,在层叠方向上,光波导1存在于第1电极2与第2电极3之间。因此,能够效率良好地对光波导1施加由第1电极2以及第2电极3产生的电场。

[0095] 在本实施方式中,第2电极3包含金属材料,金属材料的主成分例如为贵金属。在第2电极3暴露于大气下的情况下,来自第2电极3所接触的材料杂质或者通过除气而从其它材料飞出的气体分子有可能扩散到第2电极。若在第2电极3中产生这样的扩散,则阻抗变化而从初始的设计值偏离。若第2电极3的阻抗从设计值偏离,则对光调制器10的调制特性产生影响。在构成第2电极3的金属材料以不易进行化学反应的贵金属为主成分的情况下,光调制器10的调制特性稳定。进而,如果构成第2电极3的金属材料的主成分为贵金属,则能够抑制第2电极3的电阻值,能够抑制消耗功率。

[0096] 在本实施方式中,在与光波导1延伸的方向垂直的剖面中观察时,在与层叠方向垂直的方向上,第1电极2的光波导1侧的表面的长度(宽度 w_2)大于光波导1的长度(宽度 w_1)。在该情况下,能够对光波导1的整个区域施加电场。此外,在对第1电极2形成光波导1时,能够缓解应力。

[0097] 在本实施方式中,在与光波导1延伸的方向垂直的剖面中观察时,第1电极2的面积

大于第2电极3的面积。第2电极3包含金属材料,因此即使不增大剖面面积,电阻值也足够小。另一方面,第1电极2包含电导率比金属材料小的半导体材料,因此通过使剖面面积大于第2电极3,从而能够减小电阻值。在本实施方式中,第1电极2的剖面面积大于第2电极3的剖面面积,因此第1电极2的电阻值变小,能够抑制消耗功率。

[0098] 在本实施方式中,作为金属电极的第2电极3被用于信号电极,作为半导体电极的第1电极2被用于接地电极。第2电极3包含电导率大且高频信号的衰减小的金属材料。因此,如果将第2电极3设为信号电极,则能够抑制驱动电压。

[0099] <第2实施方式>

[0100] 图2是示出第2实施方式涉及的光调制器10A的概略结构的剖视图。光调制器10A与第1实施方式涉及的光调制器10的不同点在于,具备低介电常数层4。

[0101] 在上述第1实施方式中,第1电极2与光波导1接触。即使在第1电极2与光波导1接触的情况下,也只要第1电极2和光波导1的折射率差大,就能够通过光波导1的厚度调整等将光封闭在光波导1。然而,若使第1电极2中的杂质的掺杂量增加,则第1电极2的折射率下降而接近于光波导1的折射率。因此,光有可能从光波导1泄漏到第1电极2。

[0102] 在本实施方式中,第1电极2与光波导1空开间隙进行配置。即,第1电极2在层叠方向上不与光波导1接触。第1电极2与光波导1不接触。第1电极2和光波导1的间隙的大小例如为 $0.750\mu\text{m}$ 以上且 $1.675\mu\text{m}$ 以下。在本说明书中,第1电极2和光波导1的间隙的大小意味着从第1电极2到光波导1的最短距离。在本实施方式的情况下,从第1电极2到光波导1的层叠方向上的距离为从第1电极2到光波导1的最短距离。

[0103] 低介电常数层4具有比光波导1的折射率小的折射率。低介电常数层4设置在第1电极2和光波导1的间隙。在光调制器10A中,在第1电极2上层叠有低介电常数层4,在低介电常数层4上层叠有光波导1。也就是说,相对于第1电极2,光波导1隔着低介电常数层4间接地层叠,第1电极2与光波导1不接触。低介电常数层4优选覆盖光波导1的与低介电常数层4对置的表面的整体。另一方面,与第1实施方式同样地,第2电极3直接层叠于光波导1上,并与光波导1接触。

[0104] 关于低介电常数层4的主成分,典型地是 SiO_2 。作为低介电常数层4的主成分,也可以使用 Al_2O_3 、 LaAlO_3 、 LaYO_3 、 ZnO 、 HfO_2 、 MgO 、 Y_2O_3 等氧化物、或BCB(苯并环丁烯)、PI(聚酰亚胺)等聚合物。

[0105] 低介电常数层4例如通过CVD、蒸镀、溅射等成膜在第1电极2上。然后,能够将具有电光效应的材料基板配置在低介电常数层4上,并将材料基板与低介电常数层4粘接。以下,像在第1实施方式中说明的那样,只要将光波导1以及第2电极3形成在低介电常数层4上即可。

[0106] 在本实施方式中,第1电极2与光波导1不接触。进而,在第1电极2和光波导1的间隙,设置有折射率比光波导1小的低介电常数层4。因此,与第1电极2和光波导1接触的情况相比较,通过光波导1的光不易向第1电极2泄漏,不易被第1电极2吸收。因此,能够抑制光的损耗。

[0107] 例如,如果用于第1电极2的半导体材料为硅半导体材料,则能够通过热氧化法在硅半导体材料的第1电极2上成膜 SiO_2 的低介电常数层4。在该情况下,低介电常数层4对第1电极2的密接性好,异物不易进入到第1电极2和低介电常数层4的界面。因此,在第1电极2和

低介电常数层4的界面处,能够抑制电损耗。此外,能够谋求光调制器10A的可靠性以及寿命的提高。这是因为,如果异物聚集在第1电极2和低介电常数层4的界面,并且电场集中于聚集的异物,则光调制器10A有可能破损。

[0108] 低介电常数层4中的瞬逝光的渗出深度能够以通过光波导1的光(载波)的波长为基准而进行估计。在第1电极2与光波导1相距载波的波长以上的情况下,能够防止瞬逝光与第1电极2接触。因此,光波导1和第1电极2的间隙的大小,即,低介电常数层4的厚度(层叠方向上的长度)优选为通过光波导1的光的波长以上。

[0109] 例如,如果像本实施方式这样第1电极2和光波导1的间隙的大小为 $0.750\mu\text{m}$ 以上,则低介电常数层4的厚度变得比瞬逝光的渗出深度大,通过光波导1的光不易泄漏到第1电极2。像上述的那样,第1电极2和光波导1的间隙的大小也可以为 $1.675\mu\text{m}$ 以下。如果第1电极2和光波导1的间隙的大小为 $1.675\mu\text{m}$ 以下,则即使不增大施加在第1电极2与第2电极3之间的电压,也能够确保对光波导1的电场的大小。

[0110] <第3实施方式>

[0111] 图3是示出第3实施方式涉及的光调制器10B的概略结构的剖视图。光调制器10B与第1实施方式涉及的光调制器10的不同点在于,具备低介电常数层5。

[0112] 在本实施方式中,第2电极3与光波导1空开间隙进行配置。即,第2电极3在层叠方向上与光波导1分开。第2电极3与光波导1不接触。第2电极3和光波导1的间隙的大小例如为 $0.750\mu\text{m}$ 以上且 $1.675\mu\text{m}$ 以下。在本说明书中,第2电极3和光波导1的间隙的大小意味着从第2电极3到光波导1的最短距离。在本实施方式的情况下,从第2电极3到光波导1的层叠方向上的距离为从第2电极3到光波导1的最短距离。

[0113] 低介电常数层5具有比光波导1的折射率小的折射率。低介电常数层5设置在第2电极3和光波导1的间隙。在光调制器10B中,在光波导1上层叠有低介电常数层5,在低介电常数层5上层叠有第2电极3。也就是说,相对于第2电极3,光波导1隔着低介电常数层5间接地叠层,第2电极3与光波导1不接触。低介电常数层5优选覆盖光波导1的与低介电常数层5对置的表面的整体。另一方面,与第1实施方式同样地,第1电极2直接层叠于光波导1上,并与光波导1接触。

[0114] 作为低介电常数层5的主成分的例子,能够列举与第2实施方式的低介电常数层4同样的主成分。低介电常数层5的主成分可以与低介电常数层4的主成分相同,也可以与低介电常数层4的主成分不同。

[0115] 低介电常数层5例如通过CVD、蒸镀、溅射等成膜在光波导1上。只要在成膜低介电常数层5之前像在第1实施方式中说明的那样在第1电极2上形成光波导1即可。然后,只要通过溅射、蒸镀等在低介电常数层5上成膜金属层并像在第1实施方式中说明的那样对成膜的金属膜形成第2电极3即可。

[0116] 在本实施方式中,第2电极3与光波导1不接触。进而,在第2电极3和光波导1的间隙,设置有折射率比光波导1小的低介电常数层5。因此,与第2电极3和光波导1接触的情况相比较,通过光波导1的光不易向第2电极3泄漏,不易被第2电极3吸收。因此,能够抑制光的损耗。

[0117] 在本实施方式中,第2电极3和光波导1的间隙的大小为 $0.750\mu\text{m}$ 以上且 $1.675\mu\text{m}$ 以下。因此,与第2实施方式同样地,能够抑制光的损耗,并且确保对光波导1的电场的大小。

[0118] <第4实施方式>

[0119] 图4是示出第4实施方式涉及的光调制器10C的概略结构的剖视图。光调制器10C与第1实施方式涉及的光调制器10的不同点在于,具备低介电常数层4以及低介电常数层5。从另一个观点来看,光调制器10C是将第2实施方式的结构和第3实施方式的结构进行了组合的光调制器。

[0120] 在本实施方式中,第1电极2以及第2电极3双方与光波导1空开间隙进行配置。进而,在第1电极2和光波导1的间隙以及第2电极3和光波导1的间隙,分别设置有折射率比光波导1小的低介电常数层4、5。由此,通过光波导1的光变得不易向第1电极2以及第2电极3各自泄漏。因此,在光调制器10C中,与光调制器10A、10B相比,能够进一步抑制光的损耗。

[0121] <第5实施方式>

[0122] 图5是示出第5实施方式涉及的光调制器10D的概略结构的剖视图。光调制器10D在第1电极2A的结构上与第4实施方式涉及的光调制器10C不同。

[0123] 参照图5,第1电极2A包含凸部2Aa。在第1电极2A中,凸部2Aa在层叠方向上设置在位于光波导1侧的表面,并朝向光波导1突出。在本实施方式的例子中,第1电极2A包含凸部2Aa和基部2Ab。基部2Ab在层叠方向上配置在与光波导1相反侧。凸部2Aa从基部2Ab的表面2Aba朝向光波导1突出。凸部2Aa以及基部2Ab各自也可以具有实质上为矩形形状的剖面。在光调制器10D中,在第1电极2A的凸部2Aa上层叠低介电常数层4,凸部2Aa与低介电常数层4接触。

[0124] 在与光波导1延伸的方向垂直的剖面中观察时,基部2Ab的宽度 w_{2Ab} 大于凸部2Aa的宽度 w_{2Aa} 。宽度 w_{2Aa} 意味着凸部2Aa中的最靠近光波导1的表面2Aaa的宽度。在本实施方式中,凸部2Aa中的与低介电常数层4相接的表面2Aaa的与层叠方向垂直的方向上的长度为宽度 w_{2Aa} 。凸部2Aa的宽度 w_{2Aa} 大于光波导1的宽度 w_1 。

[0125] 在本实施方式的光调制器10D中,能够通过凸部2Aa使电场集中于光波导1。因此,能够减小施加在第1电极2A与第2电极3之间的电压,能够抑制消耗功率。

[0126] 在图5的例子中,包含凸部2Aa以及基部2Ab的第1电极2A例如为硅单晶基板。通过对硅单晶的母材基板实施光刻以及蚀刻,从而能够形成凸部2Aa以及基部2Ab。

[0127] 在图6中,示出第5实施方式涉及的光调制器10D的变形例。在图6中,作为设置第1电极2A的基板,使用了SOI基板20。SOI基板20包含氧化膜21和配置为从其两个表面夹着氧化膜21的活性层22a、22b。在SOI基板20中,一个活性层22a成为第1电极2A。如果利用SOI基板20的活性层22a,则可容易地进行用于形成第1电极2A的图案化。

[0128] 也可以将第1电极2A应用于第1实施方式涉及的光调制器10。在该情况下,凸部2Aa与光波导1接触。也可以将第1电极2A应用于第2实施方式涉及的光调制器10A。在该情况下,凸部2Aa与低介电常数层4接触,与光波导1不接触。也可以将第1电极2A应用于第3实施方式涉及的光调制器10B。在该情况下,凸部2Aa与光波导1接触。

[0129] <第6实施方式>

[0130] 图7是示出第6实施方式涉及的光调制器10E的概略结构的剖视图。光调制器10E在第1电极2B的结构上与第5实施方式涉及的光调制器10D不同。

[0131] 参照图7,第1电极2B包含凸部2Ba和基部2Bb。凸部2Ba从基部2Bb的表面2Bba朝向光波导1突出。在与光波导1延伸的方向垂直的剖面中观察时,越靠近光波导1,与层叠方向

垂直的方向上的凸部2Ba的长度(宽度)变得越小。凸部2Ba能够在光波导1侧的表面2Baa中具有最小的宽度 w_{2Ba} 。在本实施方式中,凸部2Ba的表面2Baa与低介电常数层4相接。凸部2Ba也可以具有实质上为梯形形状的剖面。在该情况下,凸部2Ba的表面2Baa相当于梯形的上底。

[0132] 在本实施方式的光调制器10E中,在凸部2Ba的剖面中,越靠近光波导1,凸部2Ba的宽度变得越小。在该情况下,能够使凸部2Ba的侧面2Bab相对于基部2Bb的表面2Bba比较平缓地连续。更具体地,能够将凸部2Ba的侧面2Bab以钝角即接近于曲线的形状相对于基部2Bb的表面2Bba平滑地连接。由此,与凸部2Ba的侧面2Bab以直角与基部2Bb的表面2Bba连接的情况相比较,能够使得在凸部2Ba和基部2Bb的边界处不易产生电损耗。

[0133] 在本实施方式中,凸部2Ba的侧面2Bab相对于表面2Baa以固定的倾斜度倾斜。然而,侧面2Bab相对于表面2Baa的倾斜度也可以变化。

[0134] 也可以将第1电极2B应用于第1实施方式~第3实施方式涉及的光调制器10、10A、10B。

[0135] <第7实施方式>

[0136] 图8是示出第7实施方式涉及的光调制器10F的概略结构的剖视图。光调制器10F与第5实施方式涉及的光调制器10D的不同点在于,具备金属薄层6。

[0137] 参照图8,金属薄层6设置在第1电极2A的光波导1侧的表面。具体地,金属薄层6设置在凸部2Aa的光波导1侧的表面2Aaa。金属薄层6的厚度 t_6 比第1电极2A的厚度 t_2 薄。金属薄层6的剖面面积小于第1电极2A的剖面面积。此外,金属薄层6的厚度 t_6 比第2电极3的厚度 t_3 薄。

[0138] 金属薄层6的电导率大,并且高频信号的衰减小。如果将该金属薄层6设置在凸部2Aa的光波导1侧的表面2Aaa,则能够抑制驱动电压。进而,在第1电极2A的凸部2Aa中,由于趋肤效应,高频信号更多地通过表层传播,因此优选表层附近的电导率更大。关于这一点,如果将金属薄层6设置在第1电极2A的光波导1侧的表面,则能够减小电阻值,能够抑制信号的衰减。在该情况下,对于低频信号,可利用凸部2Aa。

[0139] 在第1电极2A包含硅半导体材料的情况下,如上所述,第1电极2A的厚度 t_2 例如为 $0.43\mu\text{m}$ 以上且 $500\mu\text{m}$ 以下。金属薄层6的厚度 t_6 例如相对于第1电极2A的厚度 t_2 为10%以上且50%以下。金属薄层6的剖面面积例如相对于第1电极2A的剖面面积为10%以上且50%以下。金属薄层6的剖面面积也可以为 $0.043\mu\text{m}^2$ 以上且 $2500\mu\text{m}^2$ 以下。金属薄层6例如能够使用与第2电极3同样的金属材料来形成。

[0140] 也可以将金属薄层6应用于第1实施方式~第4实施方式涉及的光调制器10、10A、10B、10C。在该情况下,金属薄层6设置在不具有凸部的第1电极2的表面。也可以将金属薄层6应用于第6实施方式涉及的光调制器10E。在该情况下,金属薄层6设置在第1电极2B的凸部2Ba的表面2Baa。

[0141] <第8实施方式>

[0142] 图9是示出第8实施方式涉及的光调制器10G的概略结构的剖视图。光调制器10G在光波导1C的结构和第1电极2C以及第2电极3C的配置上与第4实施方式涉及的光调制器10C不同。

[0143] 参照图9,光调制器10G具备光波导1C、第1电极2C、第2电极3C、以及低介电常数层

4C。光波导1C包含基板部1Ca和隆起部1Cb。隆起部1Cb从基板部1Ca的表面突出。隆起部1Cb实质上作为光波导而发挥功能。在光波导1C层叠有低介电常数层4C。更具体地,相对于基板部1Ca以及隆起部1Cb,层叠有低介电常数层4C。

[0144] 第1电极2C以及第2电极3C层叠于低介电常数层4C上。第1电极2C以及第2电极3C相互空开间隙并列地配置。具体地,在光调制器10G的剖视下,第1电极2C以及第2电极3C在相对于光波导1C以及低介电常数层4C的层叠方向实质上垂直的方向上排列配置。在相对于层叠方向实质上垂直的方向上,在隆起部1Cb的一侧配置有第1电极2C,在隆起部1Cb的另一侧配置有第2电极3C。第1电极2C以及第2电极3C能够在彼此之间形成电位差而对光波导1C的隆起部1Cb施加电场。

[0145] 即使是本实施方式涉及的光调制器10G,也实现与第4实施方式涉及的光调制器10C同样的效果。也可以对本实施方式涉及的光调制器10G应用第7实施方式的金属薄层6。

[0146] <第9实施方式>

[0147] 图10是示出第9实施方式涉及的光调制器10H的概略结构的剖视图。光调制器10H在第1电极2D的结构上与第1实施方式涉及的光调制器10不同。

[0148] 参照图10,第1电极2D具有光波导1侧的表层2Da和剩余部分2Db。在本实施方式的例子中,表层2Da在第1电极2D中配置为与光波导1相邻。表层2Da例如是处于从第1电极2D的光波导1侧的表面到第1电极2D相对于光波导1的层叠方向上的第1电极2D的长度(厚度)的10%的范围内的部分。剩余部分2Db意味着第1电极2D中的除表层2Da以外的部分。在第1电极2D中,关于在半导体材料中掺杂的杂质的浓度,表层2Da比剩余部分2Db更高。即,第1电极2D在表层2Da和剩余部分2Db中杂质的浓度即掺杂剂量不同。例如,表层2Da中的杂质的浓度相对于剩余部分2Db中的杂质的浓度高10%以上。这样的第1电极2D中的杂质的浓度分布能够通过热扩散法或离子注入法等来形成。

[0149] 在第1电极2D中,杂质的浓度可以在表层2Da和剩余部分2Db的边界处急剧地变化,也可以随着在层叠方向上远离表层2Da而逐渐变稀。第1电极2D中的杂质的浓度能够通过外延电阻率测定、气隙CV测定、水银CV测定、表面电荷分布、二次离子质谱分析或扩展电阻测定等来测定。无论是哪一种方法,测定结果实质上均相同。表层2Da的杂质的浓度和剩余部分2Db的杂质的浓度的差异能够通过上述的测定方法中的任一者来确认。具体地,通过实施上述的测定方法,从而得到第1电极2D的从光波导1侧的表面起的深度方向上的杂质浓度的分布图。根据得到的杂质浓度的分布图,计算表层2Da的杂质浓度的积分平均以及剩余部分2Db的杂质浓度的积分平均,分别作为表层2Da的杂质的浓度以及剩余部分2Db的杂质的浓度。即,将从第1电极2D的光波导1侧的表面到第1电极2D的深度(厚度)的10%的范围的杂质浓度的积分平均作为表层2Da的杂质浓度,将剩余的范围的杂质浓度的积分平均作为剩余部分2Db的杂质的浓度。得到的表层2Da的杂质浓度比得到的剩余部分2Db的杂质的浓度例如高10%以上。

[0150] 在本实施方式涉及的光调制器10H中,在第1电极2D中的光波导1侧的表层2Da,与第1电极2的剩余部分2Db相比较以高的浓度掺杂了杂质。在该情况下,在第1电极2D中,能够使光波导1的附近局部存在电导率大的区域,能够通过趋肤效应来抑制高频信号的衰减。

[0151] 也可以将第1电极2D应用于第2实施方式~第7实施方式涉及的各光调制器10A、10B、10C、10D、10E、10F。

[0152] <第10实施方式>

[0153] 图11是示出第10实施方式涉及的光调制器10I的概略结构的剖视图。光调制器10I在第1电极2E的结构上与第8实施方式涉及的光调制器10G不同。

[0154] 参照图11,第1电极2E具有光波导1C的隆起部1Cb侧的表层2Ea和剩余部分2Eb。所谓隆起部1Cb侧的表层2Ea,是第1电极2E中的与第2电极3C一起对隆起部1Cb施加的电场所通过之处的表层。在本实施方式的例子中,表层2Ea是第1电极2E中的在与第1电极2E相对于光波导1C的层叠方向垂直的方向(宽度方向)上位于实质上作为光波导而发挥功能的隆起部1Cb侧的表层。表层2Ea例如是处于从在第1电极2E的宽度方向上定位于隆起部1Cb侧的表面到第1电极2E的宽度方向上的长度的10%的范围内的部分。剩余部分2Eb意味着第1电极2E中的除表层2Ea以外的部分。与上述的第9实施方式的第1电极2D同样地,在第1电极2E中,关于在半导体材料中掺杂的杂质的浓度,表层2Ea比剩余部分2Eb更高。因此,即使是本实施方式涉及的光调制器10I,也实现与第9实施方式涉及的光调制器10H同样的效果。

[0155] 在图12中,示出第10实施方式涉及的光调制器10I的变形例。参照图12,表层2Ea也可以是第1电极2E中的在第1电极2E相对于光波导1的层叠方向上位于光波导1C侧的表层。在该情况下,表层2Ea例如是处于从在层叠方向上定位于光波导1C侧的表面到第1电极2E的厚度的10%的范围内的部分。即使是该结构,也能够实现与第9实施方式涉及的光调制器10H同样的效果。

[0156] 以上,对本公开涉及的实施方式进行了说明,但是本公开并不限于上述实施方式,只要不脱离其主旨,就能够进行各种变更。

[0157] 以下,对本公开涉及的光调制器的结构进行总结。

[0158] <1>

[0159] 一种光调制器,具备:

[0160] 光波导,包含具有电光效应的材料;

[0161] 第1电极,包含半导体材料;以及

[0162] 第2电极,包含金属材料,配置为与所述第1电极形成电位差而对所述光波导施加电场。

[0163] <2>

[0164] 根据<1>所述的光调制器,其中,

[0165] 还具备:低介电常数层,具有比所述光波导的折射率小的折射率,

[0166] 在所述第1电极以及所述第2电极之中,至少所述第1电极与所述光波导空开间隙进行配置,

[0167] 所述低介电常数层设置在所述间隙。

[0168] <3>

[0169] 根据<1>所述的光调制器,其中,

[0170] 还具备:低介电常数层,具有比所述光波导的折射率小的折射率,

[0171] 所述第1电极以及所述第2电极分别与所述光波导空开间隙进行配置,

[0172] 所述低介电常数层设置在所述间隙。

[0173] <4>

[0174] 根据<2>或<3>所述的光调制器,其中,

- [0175] 所述间隙的大小为 $0.750\mu\text{m}$ 以上且 $1.675\mu\text{m}$ 以下。
- [0176] <5>
- [0177] 根据<2> ~ <4>中的任一项所述的光调制器,其中,
- [0178] 所述半导体材料是在硅中掺杂了杂质的硅半导体材料,
- [0179] 所述低介电常数层的主成分为 SiO_2 。
- [0180] <6>
- [0181] 根据<1> ~ <5>中的任一项所述的光调制器,其中,
- [0182] 所述第1电极层叠于所述光波导,
- [0183] 所述第2电极在所述第1电极的相反侧层叠于所述光波导。
- [0184] <7>
- [0185] 根据<6>所述的光调制器,其中,
- [0186] 所述第1电极包含:凸部,在所述第1电极、所述光波导以及所述第2电极的层叠方向上设置在位于所述光波导侧的表面,并朝向所述光波导突出。
- [0187] <8>
- [0188] 根据<7>所述的光调制器,其中,
- [0189] 在与所述光波导延伸的方向垂直的剖面中观察时,越靠近所述光波导,与所述层叠方向垂直的方向上的所述凸部的长度越小。
- [0190] <9>
- [0191] 根据<6> ~ <8>中的任一项所述的光调制器,其中,
- [0192] 在与所述光波导延伸的方向垂直的剖面中观察时,在与所述第1电极、所述光波导以及所述第2电极的层叠方向垂直的方向上,所述第1电极的所述光波导侧的表面的长度比所述光波导的长度大。
- [0193] <10>
- [0194] 根据<1> ~ <9>中的任一项所述的光调制器,其中,
- [0195] 所述半导体材料是在硅中掺杂了杂质的硅半导体材料。
- [0196] <11>
- [0197] 根据<10>所述的光调制器,其中,
- [0198] 所述第1电极中的所述杂质的浓度为 $1.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 以上且 $1.0 \times 10^{22} \text{cm}^{-3}$ 以下。
- [0199] <12>
- [0200] 根据<1> ~ <11>中的任一项所述的光调制器,其中,
- [0201] 所述第1电极的折射率小于3。
- [0202] <13>
- [0203] 根据<10> ~ <12>中的任一项所述的光调制器,其中,
- [0204] 所述第1电极为硅单晶基板。
- [0205] <14>
- [0206] 根据<10> ~ <12>中的任一项所述的光调制器,其中,
- [0207] 所述第1电极是SOI基板的活性层。
- [0208] <15>
- [0209] 根据<1> ~ <14>中的任一项所述的光调制器,其中,

- [0210] 所述金属材料的主成分为贵金属。
- [0211] <16>
- [0212] 根据<1> ~ <15>中的任一项所述的光调制器,其中,
- [0213] 在与所述光波导延伸的方向垂直的剖面中观察时,所述第1电极的面积比所述第2电极的面积大。
- [0214] <17>
- [0215] 根据<1> ~ <16>中的任一项所述的光调制器,其中,
- [0216] 所述第2电极为信号电极,所述第1电极为接地电极。
- [0217] <18>
- [0218] 根据<1> ~ <17>中的任一项所述的光调制器,其中,
- [0219] 还具备:金属薄层,设置在所述第1电极的所述光波导侧的表面,厚度比所述第1电极薄。
- [0220] <19>
- [0221] 根据<1> ~ <18>中的任一项所述的光调制器,其中,
- [0222] 在所述第1电极中的所述光波导侧的表层,与所述第1电极的其它部分相比较以高的浓度掺杂了杂质。
- [0223] 附图标记说明
- [0224] 10、10A、10B、10C、10D、10E、10F、10G、10I:光调制器;
- [0225] 1、1C:光波导;
- [0226] 1Ca:基板部;
- [0227] 1Cb:隆起部;
- [0228] 2、2A、2B、2C、2D、2E:第1电极;
- [0229] 2Aa、2Ba:凸部;
- [0230] 2Ab、2Bb:基部;
- [0231] 2Da、2Ea:表层;
- [0232] 2Db、2Eb:剩余部分;
- [0233] 20:SOI基板;
- [0234] 21:氧化膜;
- [0235] 22a、22b:活性层;
- [0236] 3、3C:第2电极;
- [0237] 4、5、4C:低介电常数层;
- [0238] 6:金属薄层。

10

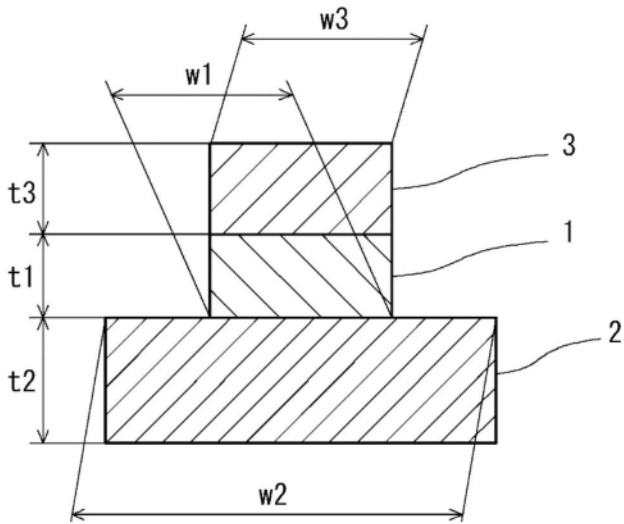


图1

10A

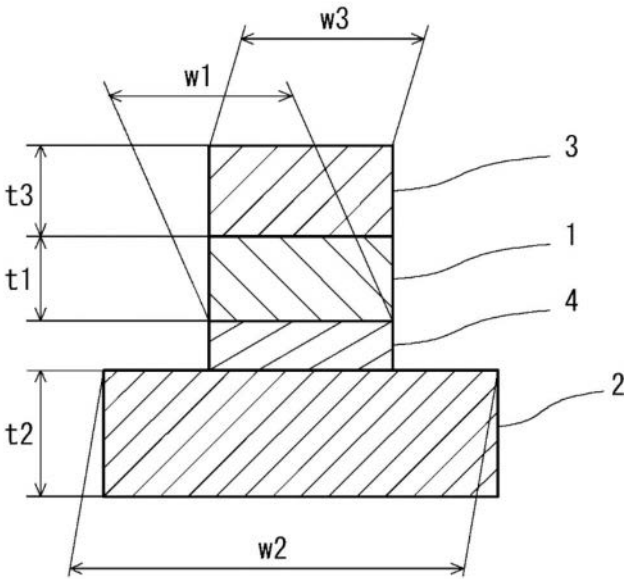


图2

10B

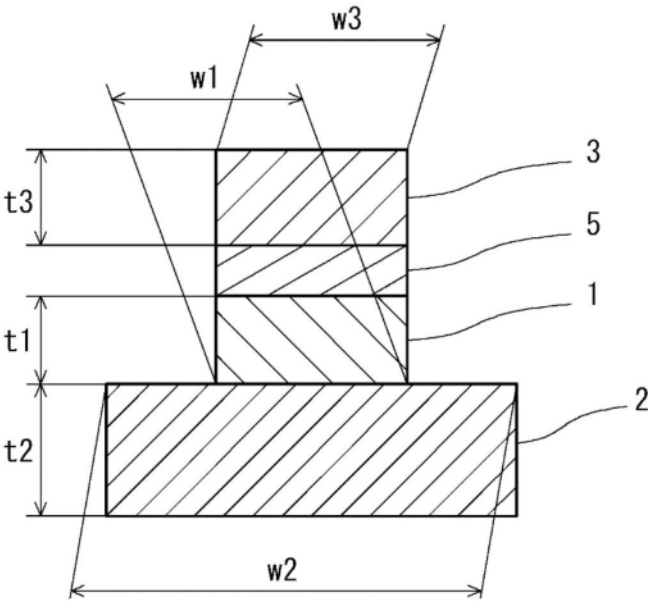


图3

10C

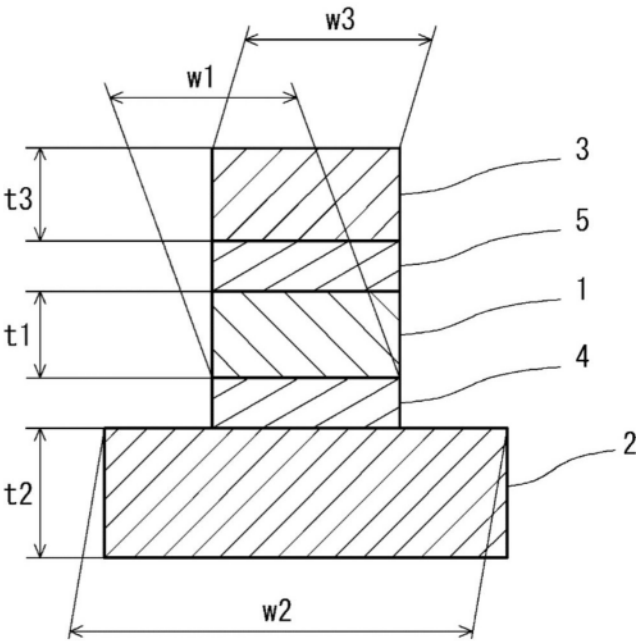


图4

10D

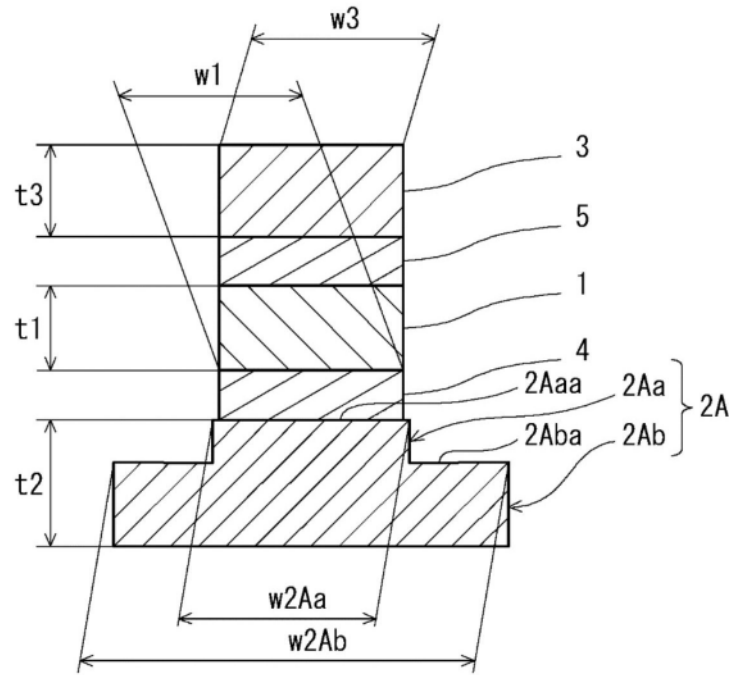


图5

10D

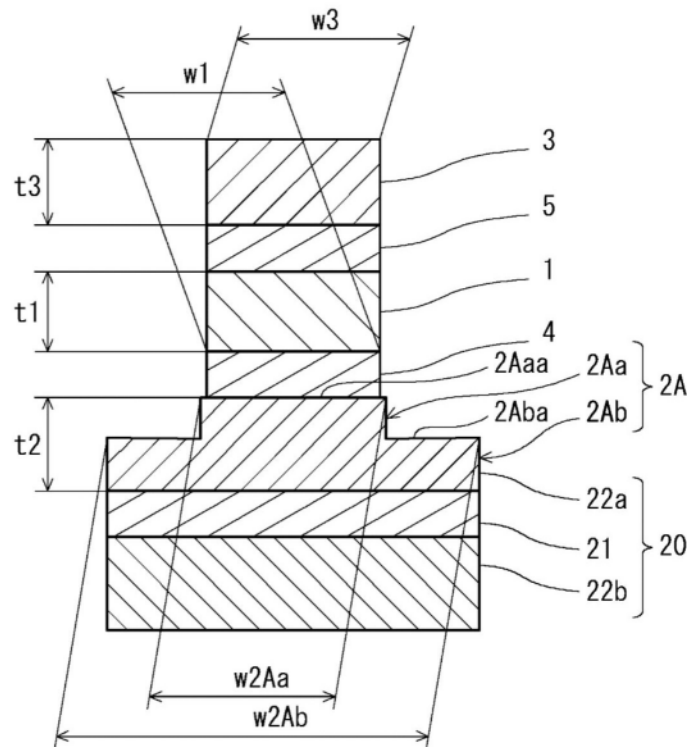


图6

10E

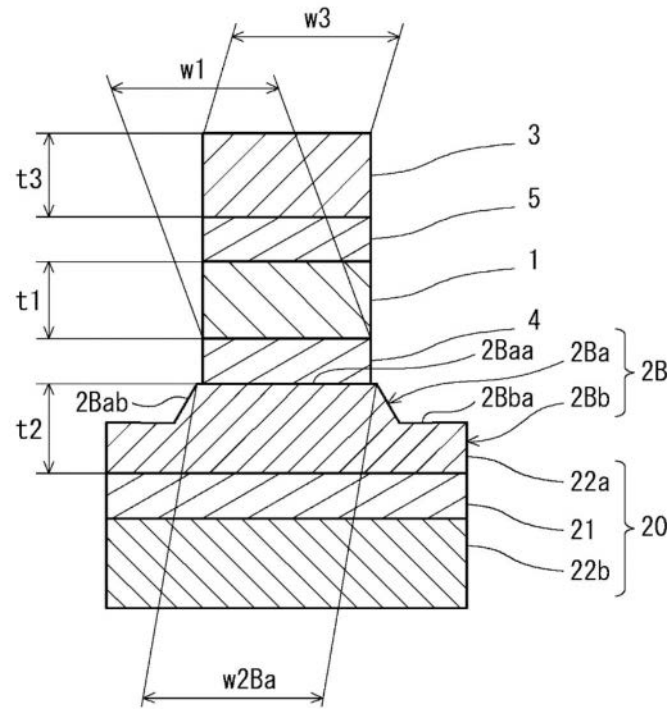


图7

10F

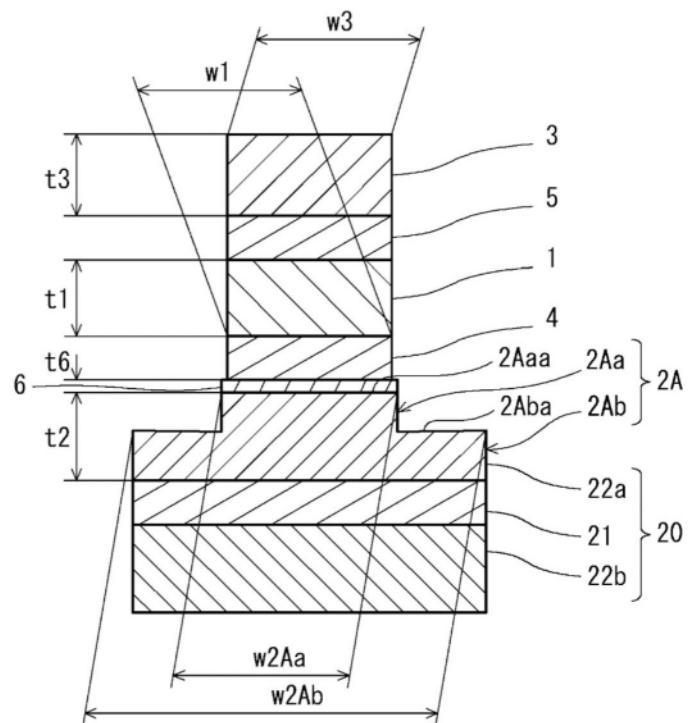


图8

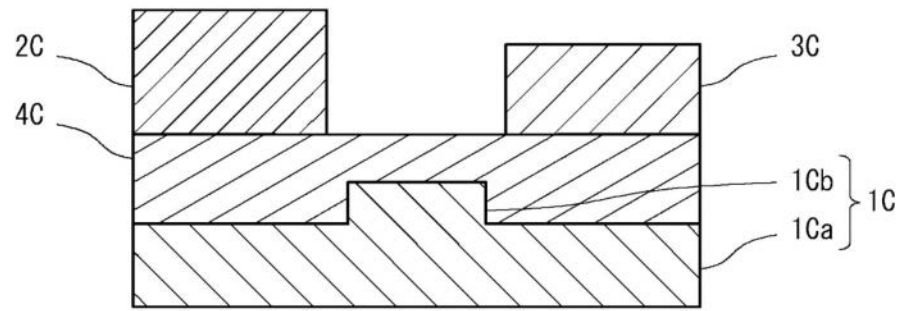
10G

图9

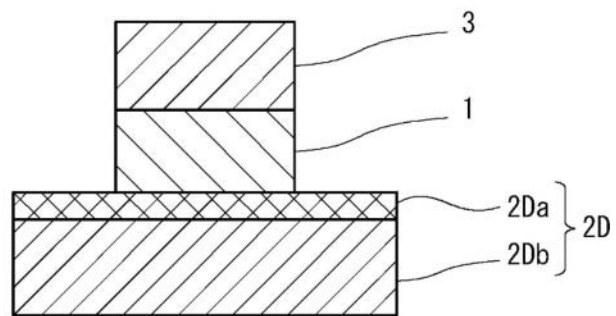
10H

图10

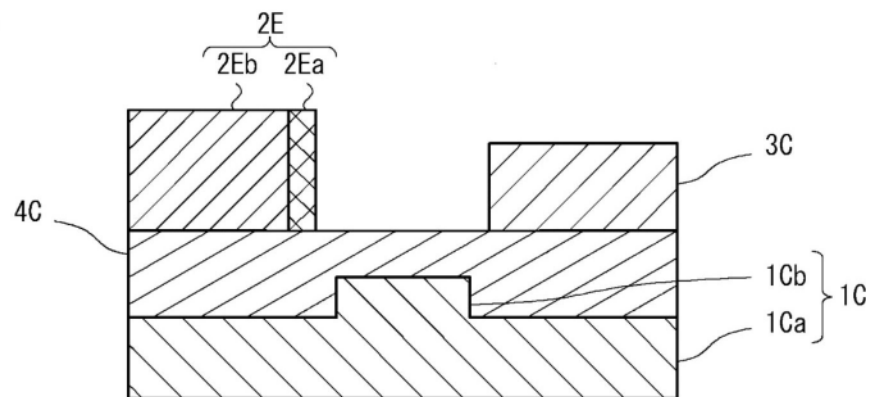
10I

图11

101

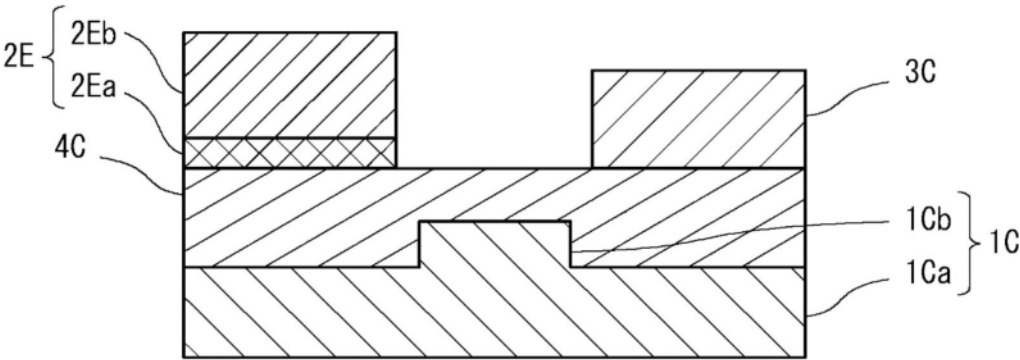


图12