(19)国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 119948390 A
(43)申请公布日 2025.05.06

(21)申请号 202380070802.7
(22)申请日 2023.06.21
(30)优先权数据
2022-192105 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/JP2023/022845 2023.06.21
(87)PCT国际申请的公布数据
WO2024/116446 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 6/122(2006.01)

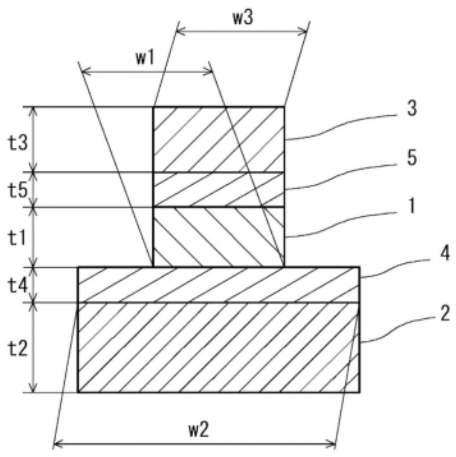
权利要求书2页 说明书14页 附图4页

(54)发明名称

光调制器

(57)摘要

光调制器(10)具备光波导(1)、第1电极(2)、第2电极(3)、以及第1低介电常数层(4)。光波导(1)包含具有电光效应的材料。第1电极(2)包含半导体材料,与光波导(1)空开间隙进行配置。第2电极(3)配置为与第1电极(2)形成电位差而对光波导施加电场。第1低介电常数层(4)具有比光波导(1)的折射率小的折射率,设置在第1电极(2)和光波导(1)的间隙。



CN 119948390 A

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,与所述光波导空开间隙进行配置;

第2电极,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;以及

第1低介电常数层,具有比所述光波导的折射率小的折射率,设置在所述第1电极和所述光波导的所述间隙。

2.根据权利要求1所述的光调制器,其中,

还具备:第2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2电极与所述光波导空开间隙进行配置,

所述第2低介电常数层设置在所述第2电极和所述光波导的所述间隙。

3.根据权利要求1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,所述第1低介电常数层包围所述光波导,并且分别设置在所述光波导与所述第1电极之间以及所述光波导与所述第2电极之间。

4.根据权利要求1~3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。

5.根据权利要求4所述的光调制器,其中,

所述第1电极的厚度相对于所述第1低介电常数层的厚度之比为20.0以上且44.0以下。

6.根据权利要求1所述的光调制器,其中,

所述光波导包含基板部和从所述基板部的表面突出的隆起部,

所述第1低介电常数层层叠于所述基板部以及所述隆起部,

所述第1电极以及所述第2电极层叠于所述第1低介电常数层上,相互空开间隙并列地配置。

7.根据权利要求6所述的光调制器,其中,

所述第1电极的厚度相对于所述隆起部的位置处的所述第1低介电常数层的厚度之比为0.1以上且4.0以下。

8.根据权利要求1~7中的任一项所述的光调制器,其中,

所述第1电极和所述光波导的所述间隙的大小为0.750μm以上且1.675μm以下。

9.根据权利要求1~8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。

10.根据权利要求9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$1.0\times10^{17}cm^{-3}$以上且$1.0\times10^{22}cm^{-3}$以下。

11.根据权利要求9或10所述的光调制器,其中,

所述第1电极为硅单晶基板。

12.根据权利要求9~11中的任一项所述的光调制器,其中,

所述第1低介电常数层的主成分为SiO_2。

13.根据权利要求1~12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。

14.根据权利要求1~13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日本特开2020-034610号公报(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] 在先技术文献

[0005] 专利文献

[0006] 专利文献1:日本特开2020-034610号公报

发明内容

[0007] 发明要解决的问题

[0008] 像专利文献1记载的那样,在以往的光调制器中,使用了金属电极。通常,作为光调制器的电极的材料,不会选择金属材料以外的材料。在用金属材料以外的材料构成了电极的情况下,根据该材料,光有可能会变得容易被电极吸收。若光被电极吸收,则光的损耗变大。

[0009] 本公开的目的在于,提供一种能够实现对电极应用金属材料以外的材料并且能够抑制光的损耗的光调制器。

[0010] 用于解决问题的技术方案

[0011] 本公开涉及的光调制器具备光波导、第1电极、第2电极、以及第1低介电常数层。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,与光波导空开间隙进行配置。第2电极配置为与第1电极形成电位差而对光波导施加电场。第1低介电常数层具有比光波导的折射率小的折射率,设置在第1电极和光波导的间隙。

[0012] 发明效果

[0013] 根据本公开涉及的光调制器,能够实现对电极应用金属材料以外的材料,并且能够抑制光的损耗。

附图说明

[0014] 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。

[0015] 图2是示出在第1实施方式中第1电极的厚度t2相对于第1低介电常数层的厚度t4

之比t2/t4和光调制器的电阻Z相对于终端电阻Z0之比Z/Z0的关联的图。

[0016] 图3是示出第1实施方式涉及的光调制器的变形例1的图。

[0017] 图4是示出第1实施方式涉及的光调制器的变形例2的图。

[0018] 图5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6是示出在第2实施方式中第1电极的厚度t2A相对于第1低介电常数层的厚度t4A之比t2A/t4A和光调制器的电阻Z相对于终端电阻Z0之比Z/Z0的关联的图。

[0020] 图7是示出在第2实施方式中光波导的厚度t1Ab相对于第1低介电常数层的厚度t4A之比t1Ab/t4A和有效折射率n的关联的图。

[0021] 图8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。

[0022] 图9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。

[0023] 图10是示出第4实施方式涉及的光调制器的变形例的图。

具体实施方式

[0024] 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方式进行说明,但是本公开并不限定于以下说明的例子。在以下的说明中,有时例示特定的数值、特定的材料,但是本公开并不限定于这些例示。

[0025] 本公开的实施方式涉及的光调制器具备光波导、第1电极、第2电极、以及第1低介电常数层。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,与光波导空开间隙进行配置。第2电极配置为与第1电极形成电位差而对光波导施加电场。第1低介电常数层具有比光波导的折射率小的折射率,设置在第1电极和光波导的间隙(第1结构)。

[0026] 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电极包含半导体材料。在半导体材料中,通常掺杂了杂质。为了使第1电极的作为电极的功能提高,而需要使杂质的掺杂量增加。若杂质的掺杂量增加,则第1电极的电导率变大,但是第1电极的光的吸收率变大。此外,包含半导体材料的第1电极由于其折射率比光波导的折射率大,因此若第1电极与光波导接触,则光容易从光波导泄漏到第1电极。因此,在第1结构中,将第1电极与光波导空开间隙进行配置而使其与光波导不接触,在此基础上,在第1电极和光波导的间隙配置了折射率比光波导小的第1低介电常数层。由此,通过光波导的光变得不易泄漏到第1电极侧,变得不易被第1电极吸收。因此,能够实现对第1电极应用作为金属材料以外的材料的半导体材料,并且能够抑制光的损耗。

[0027] 第1结构的光调制器也可以还具备第2低介电常数层。第2低介电常数层具有比光波导的折射率小的折射率。在该情况下,第2电极与光波导空开间隙进行配置,第2低介电常数层设置在第2电极和光波导的间隙(第2结构)。

[0028] 在第2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电极与光波导空开间隙进行配置。因此,第2电极与光波导不接触。进而,在第2电极和光波导的间隙配置有折射率比光波导小的第2低介电常数层。由此,通过光波导的光变得不易泄漏到第2电极侧,变得也不易被第2电极吸收。因此,能够进一步抑制光的损耗。

[0029] 在第1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,第1低介电常数层包围光波导,并且分别设置在光波导与第1电极之间以及光波导与第2电极之间(第3结构)。

[0030] 在第1结构～第3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4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。

[0031] 在第4结构的光调制器中,优选地,第1电极的厚度相对于第1低介电常数层的厚度之比为20.0以上且44.0以下(第5结构)。在该情况下,能够抑制产生电信号的反射波。

[0032] 在第1结构的光调制器中,光波导包含基板部和从基板部的表面突出的隆起部。也可以是,第1低介电常数层层叠于基板部以及隆起部,第1电极以及第2电极层叠于第1低介电常数层上,相互空开间隙并列地配置(第6结构)。

[0033] 在第6结构的光调制器中,优选地,第1电极的厚度相对于隆起部的位置处的第1低介电常数层的厚度之比为0.1以上且4.0以下(第7结构)。在该情况下,能够抑制产生电信号的反射波。

[0034] 在第1结构～第7结构中的任一个光调制器中,优选地,第1电极和光波导的间隙的大小为0.750μm以上且1.675μm以下(第8结构)。

[0035] 虽然微弱,但是仍有光从光波导渗出到设置于第1电极和光波导的间隙的第1低介电常数层。该渗出的光被称为瞬逝光(Evanescent Light)。如果像第8结构那样第1电极和光波导的间隙的大小为0.750μm以上,则瞬逝光变得不易与第1电极接触,能够进一步抑制光的损耗。

[0036] 在第8结构中,第1电极和光波导的间隙的大小成为1.675μm以下。在该情况下,第1电极和光波导的距离不会变得过大,即使不增大施加于第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。

[0037] 在第1结构～第8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9结构)。

[0038] 在第9结构的光调制器中,优选地,第1电极中的杂质的浓度为$1.0\times10^{17}cm^{-3}$以上且$1.0\times10^{22}cm^{-3}$以下(第10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$1.0\times10^{17}cm^{-3}$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$1.0\times10^{22}cm^{-3}$以下,则能够防止杂质的析出。

[0039] 在第9结构或第10结构的光调制器中,优选地,第1电极为硅单晶基板(第11结构)。

[0040] 在第9结构～第11结构中的任一个光调制器中,第1低介电常数层的主成分也可以为SiO_2(第12结构)。用于第1电极的半导体材料为硅半导体材料,因此能够通过热氧化法在第1电极上成膜SiO_2的第1低介电常数层。在利用热氧化法的成膜中,第1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电极和第1低介电常数层的界面。因此,在第1电极和第1低介电常数层的界面处,能够抑制电损耗。此外,在第1电极和第1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。

[0041] 在第1结构～第12结构中的任一个光调制器中,第1电极的折射率小于3(第13结构)。在该情况下,例如与第10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。

[0042] 在第1结构～第13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14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。

[0043] 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。

[0044] <第1实施方式>

[0045] [光调制器的结构]

[0046] 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、第2电极3、第1低介电常数层4、以及第2低介电常数层5。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。

[0047] 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(电光材料)。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(钽铌酸钾)、或者$BaTiO_3$(钛酸钡)等。作为光波导1,也可以使用电光聚合物(EO聚合物)。

[0048] 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。

[0049] 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。

[0050] 第1电极2与光波导1空开间隙进行配置。在本实施方式中,第1电极2在光波导1以及电极2、3的层叠方向上与光波导1分开。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0.750μm以上且1.675μm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是从第1电极2到光波导1的最短距离。

[0051] 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。

[0052] 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$1.0\times10^{17}cm^{-3}$以上且$1.0\times10^{22}cm^{-3}$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$1.0\times10^{17}cm^{-3}$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$1.0\times10^{22}cm^{-3}$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。

[0053] 与杂质的掺杂前后无关,半导体材料的折射率大于构成光波导1的电光材料的折射率。关于未掺杂杂质的状态的半导体材料的折射率,例如,Si为3.4,Ge为5.5,GaAs为3.3。关于电光材料的折射率,例如,$LiNbO_3$为2.3,$LiTaO_3$为2.8,PLZT为2.5,KTN为2.1,$BaTiO_3$为

2.6。若在掺杂了杂质则半导体材料的折射率会下降,但是与电光材料的折射率相比较,掺杂后的半导体材料的折射率也大。

[0054] 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$1.0\times10^{22}cm^{-3}$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$1.0\times10^{22}cm^{-3}$,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$1.0\times10^{17}cm^{-3}$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$1.0\times10^{17}cm^{-3}$时,电导率为1000S/m,趋肤深度成为500μm。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,500μm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$1.0\times10^{17}cm^{-3}$以上即可。

[0055] 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。

[0056] 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。

[0057] 第2电极3与光波导1空开间隙进行配置。在本实施方式中,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0.750μm以上且1.675μm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是从第2电极3到光波导1的最短距离。

[0058] 第2电极3例如包含金属材料。即,第2电极3是金属电极。不过,第2电极3例如也可以包含半导体材料。即,第2电极3也可以是半导体电极。作为半导体材料的例子,能够列举与用于第1电极2的半导体材料相同的半导体材料。

[0059] 在第2电极3包含金属材料的情况下,关于金属材料,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、铝或者它们的合金等。

[0060] 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。

[0061] 第1低介电常数层4设置在第1电极2和光波导1的间隙。在本实施方式中,在第1电极2上层叠有第1低介电常数层4,在第1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隔着第1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。第1低介电常数层4优选覆盖光波导1的与第1低介电常数层4对置的表面的整体。

[0062] 第1低介电常数层4具有比光波导1的折射率小的折射率。例如,第1低介电常数层4的折射率比光波导1的折射率小1%以上。光波导1的折射率比第1电极2的折射率小。光波导1

的折射率相对于第1低介电常数层4的折射率的比率例如为1.8以上且2.5以下。在该情况下,能够将光充分地封闭在光波导1内。此外,第1电极2的折射率相对于第1低介电常数层4的折射率的比率例如为1.5以上且6.0以下。在该情况下,在光从光纤向光波导1入射时,能够防止光向第1电极2入射。

[0063] 关于第1低介电常数层4的主成分,典型地是SiO_2。作为第1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、或者BCB(苯并环丁烯)、PI(聚酰亚胺)等聚合物。

[0064] 第2低介电常数层5设置在第2电极3和光波导1的间隙。在本实施方式中,在光波导1上层叠有第2低介电常数层5,在第2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隔着第2低介电常数层5间接地层叠,第2电极3与光波导1不接触。第2低介电常数层5优选覆盖光波导1的与第2低介电常数层5对置的表面的整体。

[0065] 第2低介电常数层5具有比光波导1的折射率小的折射率。作为第2低介电常数层5的主成分的例子,能够列举与上述的第1低介电常数层4相同的主成分。第2低介电常数层5的主成分可以与第1低介电常数层4的主成分相同,也可以与第1低介电常数层4的主成分不同。

[0066] 在这样的结构的光调制器10中,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,通过CVD、蒸镀、溅射等在第1电极2上成膜第1低介电常数层4。在成膜于第1电极2上的第1低介电常数层4上配置具有电光效应的材料基板,并将材料基板与第1低介电常数层4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CVD、蒸镀、溅射等在光波导1上成膜第2低介电常数层5。然后,通过溅射、蒸镀等在第2低介电常数层5上成膜金属层。通过光刻对成膜的金属层进行图案化,并通过蚀刻形成第2电极3。

[0067] 在使用光调制器10时,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t2进行估计。第1电极2的厚度t2相当于层叠方向上的长度。下述的式(1)是计算导体的趋肤深度的式子。

[0068] [数学式1]

[0069] $$d=\sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}=\sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}}=\sqrt{\frac{1}{\pi f\mu\sigma}} \quad (1)$$

[0070] d:趋肤深度[m]

[0071] ρ:导体的电阻率[Ω·m]=1/σ

[0072] ω:交流电流的角频率[rds/s]=2πf

[0073] μ:导体的磁导率[H/m]

[0074] σ:导体的电导率[S/m]

[0075] f:交流电流的频率[Hz]

[0076] 根据式(1),能够决定第1电极2所需的厚度t2。更具体地,通过使第1电极2的厚度t2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$1.0\times10^{22}cm^{-3}$,则第1电极2的电导率成为$1\times10^{7}S/m$,1GHz的电信号的趋肤深度成为5μm。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$1\times10^{6}S/m$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t2优选为25μm以上。

[0077] 在使用光调制器10时,光调制器10的电阻Z相对于终端电阻Z0之比Z/Z0优选为0.8以上且1.2以下。这是因为,若比Z/Z0偏离0.8以上且1.2以下的条件,则由于阻抗的失配而在电极的终端产生电信号的反射波。因此,优选设定光调制器10的各条件,使得比Z/Z0满足该条件。具体地,优选设定第1电极2的厚度t2相对于第1低介电常数层4的厚度t4之比t2/t4,使得光调制器10的电阻Z相对于终端电阻Z0之比Z/Z0成为0.8以上且1.2以下。第1低介电常数层4的厚度t4相当于第1电极2和光波导1的间隙的大小。

[0078] 图2是示出第1电极2的厚度t2相对于第1低介电常数层4的厚度t4之比t2/t4和光调制器10的电阻Z相对于终端电阻Z0之比Z/Z0的关联的图。在图2中,作为一个例子,示出了作为第1电极2而使用硅半导体材料、作为第2电极3而使用以Au为主成分的金属材料、作为低介电常数层4、5而使用SiO_2、作为光波导1而使用$LiNbO_3$进行了分析时的比t2/t4和比Z/Z0的关系。在分析中,将终端电阻Z0设为50Ω,将第1电极2的宽度w2设为50μm,将第2电极3的宽度w3设为40μm,将第2电极3的厚度t3设为5.0μm,将第1低介电常数层4的厚度t4设为0.7μm,将第2低介电常数层5的厚度t5设为0.7μm,将光波导1的宽度w1设为1.0μm,将光波导1的厚度t1设为1.3μm。另外,在本说明书中,厚度意味着光调制器10的剖面中层叠方向上的长度,宽度意味着光调制器10的剖面中与层叠方向垂直的方向上的长度。

[0079] 如图2所示,为了使比Z/Z0成为0.8以上且1.2以下,第1电极2的厚度t2相对于第1低介电常数层4的厚度t4之比t2/t4为20.0以上且44.0以下。

[0080] 再次参照图1,在本实施方式中,第1电极2由半导体材料形成。在使用金属材料作为第2电极3的材料的情况下,第1电极2的作为电极的性能优选与作为金属电极的第2电极3等同。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。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”。

[0081] 具体地,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的面积优选比第2电极3的面积大。在第2电极3包含金属材料的情况下,即使不增大剖面面积,第2电极3也具有比较小的电阻值。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,从而能够将电阻值减小至与第2电极3相同的程度。由此,能够抑制消耗功率。

[0082] 在第1电极2的宽度w2和第2电极3的宽度w3相同的条件下,为使作为半导体电极的第1电极2的电阻值与作为金属电极的第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t2之积与第2电极3中的电导率和厚度t3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t3设为0.1μm以上且2.0μm以下,其电导率为$4.3\times10^{7}S/m$。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t2变得比第2电极3的厚度t3大。第1电极2的电导率根据杂质的掺杂量而变化。

[0083] 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$1.0\times10^{22}cm^{-3}$时,第1电极2的电导率成为$1\times10^{7}S/m$。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t2能够设为第2电极3的厚度t3的4.3倍。另一方面,在杂质的掺杂量为下限的$1.0\times10^{17}cm^{-3}$时,第1电极2的电导率成为$1000\times10^{4}S/m$。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4.3×10^{3},第1电极2的厚度t2能够设为第2电极3的厚度t3的4.3×10^{3}倍。

[0084] 因此,在第1电极2由半导体材料形成而第2电极3由金属材料形成的情况下,第1电极2的厚度t2的下限能够设为第2电极3的厚度t3的下限即0.1μm的4.3倍。即,第1电极2的厚度t2能够设为0.43μm以上。另一方面,第1电极2的厚度t2的上限能够设为第2电极3的厚度t3的上限即2.0μm的4.3×10^{3}倍。即,第1电极2的厚度t2能够设为8600μm(8.6mm)以下。不过,在对第1电极2使用硅半导体材料的情况下,从其加工性的观点出发,第1电极2的厚度t2优选为500μm以下。

[0085] 像上述的那样,第2电极3还能够由半导体材料形成。在第1电极2以及第2电极3均包含半导体材料的情况下,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的面积优选与第2电极3的面积相同。

[0086] 作为半导体电极的第1电极2的厚度t2以及低介电常数层4的厚度t4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t2以及低介电常数层4的厚度t4。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t2以及低介电常数层4的厚度t4。无论是哪一种方法,测定结果实质上均相同。

[0087] 在第2电极3为金属电极的情况下,第2电极3的厚度t3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t3。无论是哪一种方法,测定结果实质上均相同。在第2电极3为半导体电极的情况下,第2电极3的厚度t3能够通过上述的第1电极2的厚度t2的测定方法来测定。

[0088] 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。

[0089] 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w2优选大于光波导1的宽度w1。所谓第1电极2的光波导1侧的宽度w2,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中的与第1低介电常数层4相接的面的与层叠方向垂直的方向上的长度为宽度w2。在该情况下,能够对光波导1的整个区域施加电场。

[0090] [效果]

[0091] 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1电极2包含半导体材料。在半导体材料中,通常掺杂了杂质。为了使第1电极2的作为电极的功能提高,而需要使杂质的掺杂量增加。若杂质的掺杂量增加,则第1电极2的电导率变大,但是第1电极2的光的吸收率变大。此外,包含半导体材料的第1电极2由于其折射率比光波导1的折射率大,因此若第1电极2与光波导1接触,则光容易从光波导1泄漏到第1

电极2。因此,在本实施方式中,将第1电极2与光波导1空开间隙进行配置而使其与光波导1不接触,在此基础上,在第1电极2和光波导1的间隙配置了折射率比光波导1小的第1低介电常数层4。由此,通过光波导1的光变得不易泄漏到第1电极2侧,变得不易被第1电极2吸收。因此,根据本实施方式涉及的光调制器10,能够实现对第1电极2应用作为金属材料以外的材料的半导体材料,并且能够抑制光的损耗。

[0092] 通常,在光调制器中,从电极施加于光波导的电信号(调制波(GHz))的有效折射率比通过光波导的光波(载波(THz))的有效折射率大。若电信号的有效折射率和光波的有效折射率大不相同,则光波的传播速度与电信号的传播速度之差变大,调制速度下降。在本实施方式涉及的光调制器10中,至少在第1电极2与光波导1之间配置了第1低介电常数层4,因此能够调整第1低介电常数层4相对于光波导1的剖面面积比率。通过调整第1低介电常数层4相对于光波导1的剖面面积比率,从而能够减小电信号的有效折射率与光波的有效折射率之差,其结果是,能够减小光波的传播速度与电信号的传播速度之差。由此,能够抑制调制速度的下降。

[0093] 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。在该情况下,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小的第2低介电常数层5。由此,通过光波导1的光变得不易泄漏到第2电极3侧,变得也不易被第2电极3吸收。因此,能够抑制光的损耗。

[0094] 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,与通过溅射、蒸镀等而成膜的金属电极相比较,能够降低第1电极2的内部应力。因此,能够抑制第1电极2的内部应力,并且将第1电极2形成得厚。通过将第1电极2形成得厚,从而第1电极2的电阻值变小,能够抑制消耗功率。此外,由于第1电极2的内部应力被降低,从而能够抑制起因于内部应力的裂纹的产生。其结果是,能够抑制光调制器10的故障、损伤。

[0095] 例如,与使用了贵金属的金属材料相比较,硅半导体材料是廉价的。因此,如果通过硅半导体材料构成第1电极2,则能够实现光调制器10的成本下降。

[0096] 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。

[0097] 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第1电极2上成膜SiO_2的第1低介电常数层4。在该情况下,第1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和第1低介电常数层4的界面。因此,在第1电极2和第1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10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和第1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10有可能破损。

[0098] 关于低介电常数层4、5各自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。在电极2、3各自与光波导1相距载波的波长以上的情况下,能够防止瞬逝光与电极2、3各自接触。因此,光波导1和电极2、3各自的间隙的大小,即,低介电常数层4、5各自的厚度t4、t5(层叠方向上的长度)优选为通过光波导1的光的波长以上。

[0099] 例如,如果像本实施方式这样电极2、3各自和光波导1的间隙的大小为0.750μm以上,则低介电常数层4、5各自的厚度变得比瞬逝光的渗出深度大,通过光波导1的光不易泄漏到电极2、3各自。像上述的那样,电极2、3各自和光波导1的间隙的大小也可以为1.675μm以下。如果电极2、3各自和光波导1的间隙的大小为1.675μm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。

[0100] [变形例1]

[0101] 在图3中,示出第1实施方式涉及的光调制器10的变形例1。如图3所示,光调制器10也可以不具备第2低介电常数层5(图1)。即,第2电极3也可以直接层叠于光波导1上而与光波导1接触。在该情况下,也能够像上述的那样决定作为半导体电极的第1电极2和第1低介电常数层4的尺寸关系。例如,优选设定第1电极2的厚度t2相对于第1低介电常数层4的厚度t4之比t2/t4,使得光调制器10的电阻Z相对于终端电阻Z0之比Z/Z0成为0.8以上且1.2以下。

[0102] [变形例2]

[0103] 在图4中,示出第1实施方式涉及的光调制器10的变形例2。在本变形例中,与图3所示的例子同样地,在光调制器10中未设置第2低介电常数层5(图1)。不过,在本变形例中,第1低介电常数层4设置为在光调制器10的剖视下包围光波导1。第1低介电常数层4不仅设置在第1电极2与光波导1之间,还设置在第2电极3与光波导1之间。即,第1电极2以及第2电极3相对于光波导1不接触,并且第1低介电常数层4介于第1电极2以及第2电极3各自与光波导1之间。在该情况下,第1低介电常数层4能够兼作第2低介电常数层5(图1)的作用。

[0104] <第2实施方式>

[0105] 图5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在光波导1A的结构和第1电极2A以及第2电极3A的配置上与第1实施方式涉及的光调制器10不同。

[0106] 参照图5,光调制器10A具备光波导1A、第1电极2A、第2电极3A、以及第1低介电常数层4A。光波导1A包含基板部1Aa和隆起部1Ab。隆起部1Ab从基板部1Aa的表面突出。隆起部1Ab实质上作为光波导而发挥功能。在光波导1A层叠有第1低介电常数层4A。更具体地,对基板部1Aa以及隆起部1Ab层叠有第1低介电常数层4A。

[0107] 第1电极2A以及第2电极3A层叠于第1低介电常数层4A上。第1电极2A和第2电极3A相互空开间隙并列地配置。具体地,在光调制器10A的剖视下,第1电极2A以及第2电极3A在相对于光波导1A以及第1低介电常数层4A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1Ab的一侧配置有第1电极2A,在隆起部1Ab的另一侧配置有第2电极3A。第1电极2A以及第2电极3A能够在彼此之间形成电位差而对光波导1A的隆起部1Ab施加电场。

[0108] 即使是本实施方式涉及的光调制器10A,也能够实现与第1实施方式涉及的光调制器10同样的效果。

[0109] 在使用光调制器10A时,如上所述,光调制器10A的电阻Z相对于终端电阻Z0之比Z/Z0优选为0.8以上且1.2以下。因此,优选设定第1电极2A的厚度t2A相对于第1低介电常数层4A的厚度t4A之比t2A/t4A,使得光调制器10A的电阻Z相对于终端电阻Z0之比Z/Z0成为0.8以上且1.2以下。本实施方式中的第1低介电常数层4A的厚度t4A是隆起部1Ab的位置处的第

1低介电常数层4A的厚度。所谓厚度t4A,是指在隆起部1Ab、第1低介电常数层4A以及电极2A、2B的层叠方向上从隆起部1Ab和第1低介电常数层4A的界面到第1低介电常数层4A和第1电极2A的界面的最短距离。

[0110] 图6是示出在第2实施方式中第1电极2A的厚度t2A相对于第1低介电常数层4A的厚度t4A之比t2A/t4A和光调制器10A的电阻Z相对于终端电阻Z0之比Z/Z0的关联的图。在图6中,作为一个例子,示出了作为第1电极2A而使用硅半导体材料、作为第2电极3A而使用以Au为主成分的金属材料、作为第1低介电常数层4A而使用SiO_2、作为光波导1A而使用$LiNbO_3$进行了分析时的比t2A/t4A和比Z/Z0的关系。在分析中,将终端电阻Z0设为50Ω,将第1电极2A的宽度w2A设为50μm,将第2电极3A的宽度w3A设为21.5μm,将第2电极3A的厚度t3A设为16.6μm,将第1低介电常数层4A的厚度t4A设为8.3μm,将隆起部1Ab的宽度w1Ab设为2.0μm,将隆起部1Ab的厚度t1Ab设为1.0μm,将第1电极2A和第2电极3A的间隙g设为10μm。

[0111] 如图6所示,为了使比Z/Z0成为0.8以上且1.2以下,而使第1电极2A的厚度t2A相对于第1低介电常数层4A的厚度t4A之比t2A/t4A为0.1以上且4.0以下。

[0112] 在使用光调制器10A时,有效折射率n优选为使调制速度变为最大的值。因此,优选设定光波导1A(隆起部1Ab)的厚度t1Ab相对于第1低介电常数层4A的厚度t4A之比t1Ab/t4A,使得有效折射率n成为使调制速度变为最大的值。

[0113] 图7是示出在第2实施方式中光波导1A的厚度t1Ab相对于第1低介电常数层4A的厚度t4A之比t1Ab/t4A和有效折射率n的关联的图。在图7中,作为一个例子,示出了在与图6同样的条件下进行了分析时的比t1Ab/t4A和有效折射率n的关系。不过,将第1电极2A的厚度t2A设为16.6μm。

[0114] 在作为光波导1A而使用$LiNbO_3$的情况下,如果有效折射率n为2,则能够使调制速度最大。如图7所示,为了使有效折射率n成为2,而使光波导1A(隆起部1Ab)的厚度t1Ab相对于第1低介电常数层4A的厚度t4A之比t1Ab/t4A实质上为0.28。

[0115] <第3实施方式>

[0116] 图8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在第1电极2B的结构上与第1实施方式涉及的光调制器10不同。

[0117] 参照图8,第1电极2B具有光波导1侧的表层2Ba和剩余部分2Bb。在本实施方式的例子中,表层2Ba在第1电极2B中配置为与第1低介电常数层4相邻。表层2Ba例如是处于从第1电极2B的光波导1侧的表面到第1电极2B相对于光波导1的层叠方向上的第1电极2B的长度(厚度)的10%的范围内的部分。剩余部分2Bb意味着第1电极2B中的除表层2Ba以外的部分。在第1电极2B中,关于在半导体材料中掺杂的杂质的浓度,表层2Ba比剩余部分2Bb更高。即,第1电极2B在表层2Ba和剩余部分2Bb中杂质的浓度即掺杂剂量不同。例如,表层2Ba中的杂质的浓度相对于剩余部分2Bb中的杂质的浓度高10%以上。这样的第1电极2B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。

[0118] 在第1电极2B中,杂质的浓度可以在表层2Ba和剩余部分2Bb的边界处急剧地变化,也可以随着在层叠方向上远离表层2Ba而逐渐变稀。第1电极2B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2Ba的杂质的浓度和剩余部分2Bb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2B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2Ba的杂质浓度的积分平均以及剩余部分2Bb的杂质浓度的积分平均,分别作为表层2Ba的杂质的浓度以及剩余部分2Bb的杂质的浓度。即,将从第1电极2B的光波导1侧的表面到第1电极2B的深度(厚度)的10%的范围的杂质浓度的积分平均作为表层2Ba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2Bb的杂质的浓度。得到的表层2Ba的杂质浓度比得到的剩余部分2Bb的杂质的浓度例如高10%以上。

[0119] 在第1电极2B中,由于趋肤效应,高频信号更多地通过表层2Ba传播,因此优选表层2Ba附近的电导率更大。在本实施方式涉及的光调制器10B中,在第1电极2B中的光波导1侧的表层2Ba,与第1电极2的剩余部分2Bb相比较以高的浓度掺杂了杂质。在该情况下,在第1电极2B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。

[0120] <第4实施方式>

[0121] 图9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在第1电极2C的结构上与第2实施方式涉及的光调制器10A不同。

[0122] 参照图9,第1电极2C具有光波导1A的隆起部1Ab侧的表层2Ca和剩余部分2Cb。所谓隆起部1Ab侧的表层2Ca,是第1电极2C中的与第2电极3A一起对隆起部1Ab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2Ca是第1电极2C中的在与第1电极2C相对于光波导1A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1Ab侧的表层。表层2Ca例如是处于从在第1电极2C的宽度方向上定位于隆起部1Ab侧的表面到第1电极2C的宽度方向上的长度的10%的范围内的部分。剩余部分2Cb意味着第1电极2C中的除表层2Ca以外的部分。与上述的第3实施方式的第1电极2B同样地,在第1电极2C中,关于在半导体材料中掺杂的杂质的浓度,表层2Ca比剩余部分2Cb更高。因此,即使是本实施方式涉及的光调制器10C,也能够实现与第3实施方式涉及的光调制器10B同样的效果。

[0123] 在图10中,示出第4实施方式涉及的光调制器10C的变形例。参照图10,表层2Ca也可以是第1电极2C中的在第1电极2C相对于光波导1的层叠方向上位于光波导1A侧的表层。在该情况下,表层2Ca例如是处于从在层叠方向上定位于光波导1A侧的表面到第1电极2C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3实施方式涉及的光调制器10B同样的效果。

[0124] 以上,对本公开涉及的实施方式进行了说明,但是本公开并不限定于上述实施方式,只要不脱离其主旨,就能够进行各种变更。

[0125] 例如,在第1实施方式涉及的光调制器10中,第1电极2也可以包含凸部。凸部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。凸部与第1低介电常数层4接触。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2与第2电极3之间的电压,能够进一步抑制消耗功率。

[0126] 在第1电极2包含凸部的情况下,也可以是,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的长度越小。在该情况下,能够使凸部的侧面相对于第1电极2的光波导1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。凸部的侧面也可以相对于表面以固定的倾

斜度倾斜,侧面相对于表面的倾斜度也可以变化。

[0127] 第1实施方式涉及的光调制器10也可以还具备厚度比第1电极2薄的金属薄层。金属薄层设置在第1电极2的光波导1侧的表面。金属薄层的电导率大,并且高频信号的衰减小。金属薄层例如能够使用能够应用于第2电极3的金属材料来形成。如果将金属薄层设置在第1电极2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。也可以将金属薄层应用于第2实施方式～第4实施方式涉及的各光调制器10A、10B、10C。在该情况下,金属薄层设置在第1电极2A、2B、2C中的电场通过之处的表面。

[0128] <1>

[0129] 一种光调制器,具备:

[0130] 光波导,包含具有电光效应的材料;

[0131] 第1电极,包含半导体材料,与所述光波导空开间隙进行配置;

[0132] 第2电极,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;以及

[0133] 第1低介电常数层,具有比所述光波导的折射率小的折射率,设置在所述第1电极和所述光波导的所述间隙。

[0134] <2>

[0135] 根据<1>所述的光调制器,其中,

[0136] 还具备:第2低介电常数层,具有比所述光波导的折射率小的折射率,

[0137] 所述第2电极与所述光波导空开间隙进行配置,

[0138] 所述第2低介电常数层设置在所述第2电极和所述光波导的所述间隙。

[0139] <3>

[0140] 根据<1>所述的光调制器,其中,

[0141] 在与所述光波导延伸的方向垂直的剖面中观察,所述第1低介电常数层包围所述光波导,并且分别设置在所述光波导与所述第1电极之间以及所述光波导与所述第2电极之间。

[0142] <4>

[0143] 根据<1>～<3>中的任一项所述的光调制器,其中,

[0144] 所述第1电极层叠于所述光波导,

[0145] 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。

[0146] <5>

[0147] 根据<4>所述的光调制器,其中,

[0148] 所述第1电极的厚度相对于所述第1低介电常数层的厚度之比为20.0以上且44.0以下。

[0149] <6>

[0150] 根据<1>所述的光调制器,其中,

[0151] 所述光波导包含基板部和从所述基板部的表面突出的隆起部,

[0152] 所述第1低介电常数层层叠于所述基板部以及所述隆起部,

[0153] 所述第1电极以及所述第2电极层叠于所述第1低介电常数层上,相互空开间隙并列地配置。

[0154] <7>

[0155] 根据<6>所述的光调制器,其中,

[0156] 所述第1电极的厚度相对于所述隆起部的位置处的所述第1低介电常数层的厚度之比为0.1以上且4.0以下。

[0157] <8>

[0158] 根据<1>～<7>中的任一项所述的光调制器,其中,

[0159] 所述第1电极和所述光波导的所述间隙的大小为0.750μm以上且1.675μm以下。

[0160] <9>

[0161] 根据<1>～<8>中的任一项所述的光调制器,其中,

[0162] 所述半导体材料是在硅中掺杂了杂质的硅半导体材料。

[0163] <10>

[0164] 根据<9>所述的光调制器,其中,

[0165] 所述第1电极中的所述杂质的浓度为$1.0\times10^{17}cm^{-3}$以上且$1.0\times10^{22}cm^{-3}$以下。

[0166] <11>

[0167] 根据<9>或<10>所述的光调制器,其中,

[0168] 所述第1电极为硅单晶基板。

[0169] <12>

[0170] 根据<9>～<11>中的任一项所述的光调制器,其中,

[0171] 所述第1低介电常数层的主成分为SiO_2。

[0172] <13>

[0173] 根据<1>～<12>中的任一项所述的光调制器,其中,

[0174] 所述第1电极的折射率小于3。

[0175] <14>

[0176] 根据<1>～<13>中的任一项所述的光调制器,其中,

[0177] 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。

[0178] 附图标记说明

[0179] 10、10A、10B、10C:光调制器;

[0180] 1、1A:光波导;

[0181] 1Aa:基板部;

[0182] 1Ab:隆起部;

[0183] 2、2A、2B、2C:第1电极;

[0184] 2Ba、2Ca:表层;

[0185] 2Bb、2Cb:剩余部分;

[0186] 3、3A:第2电极;

[0187] 4、4A:第1低介电常数层;

[0188] 5:第2低介电常数层。

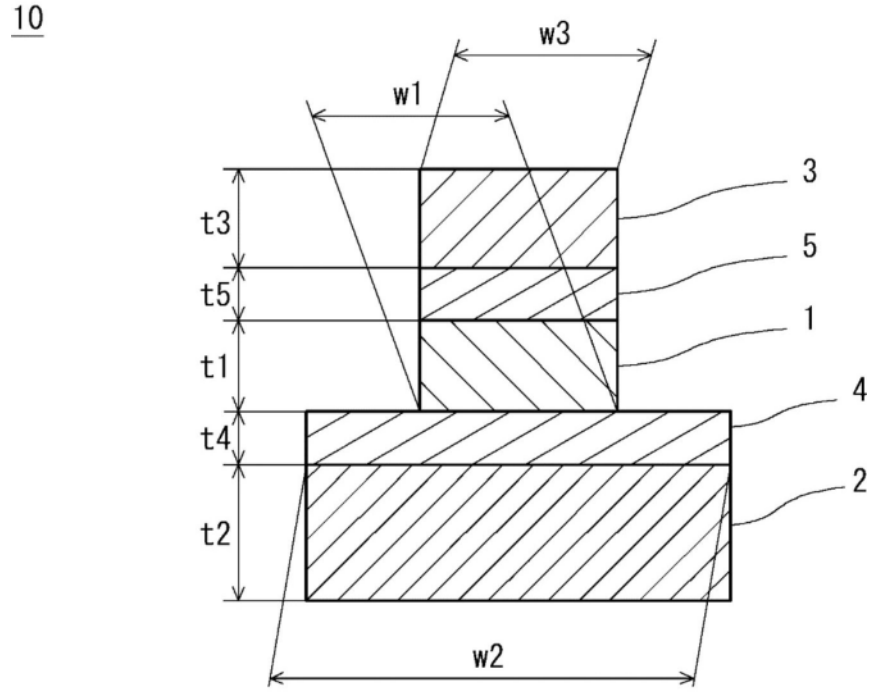

10
w3
w1
3
5
1
4
2
t3
t5
t1
t4
t2
w2

图1

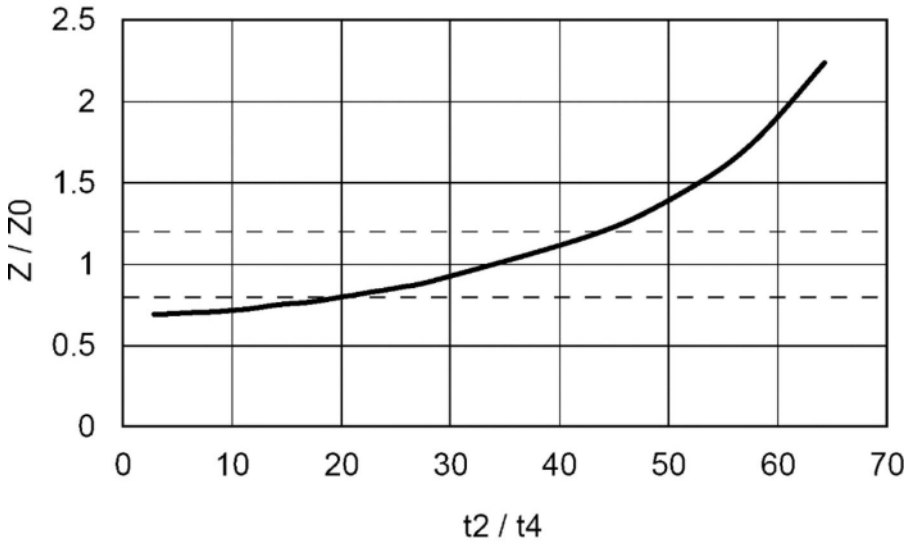

2.5
2
1.5
1
0.5
0
Z / Z0
0
10
20
30
40
50
60
70
t2 / t4

图2

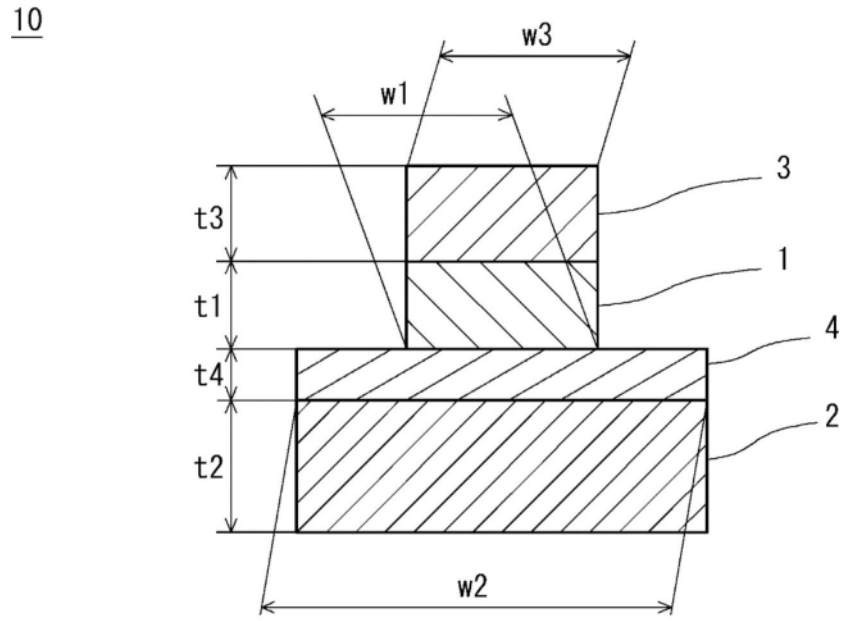


图3

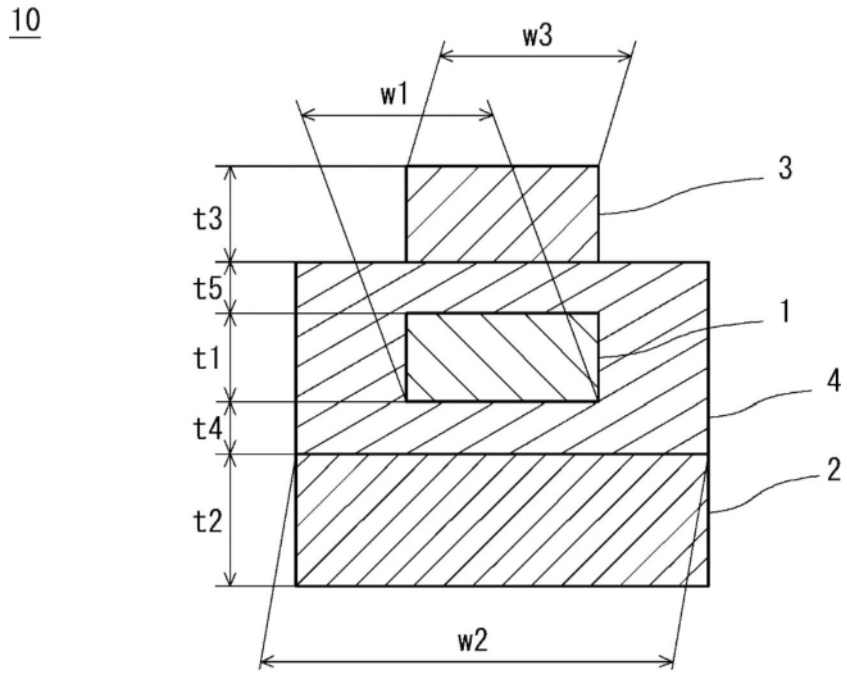


图4

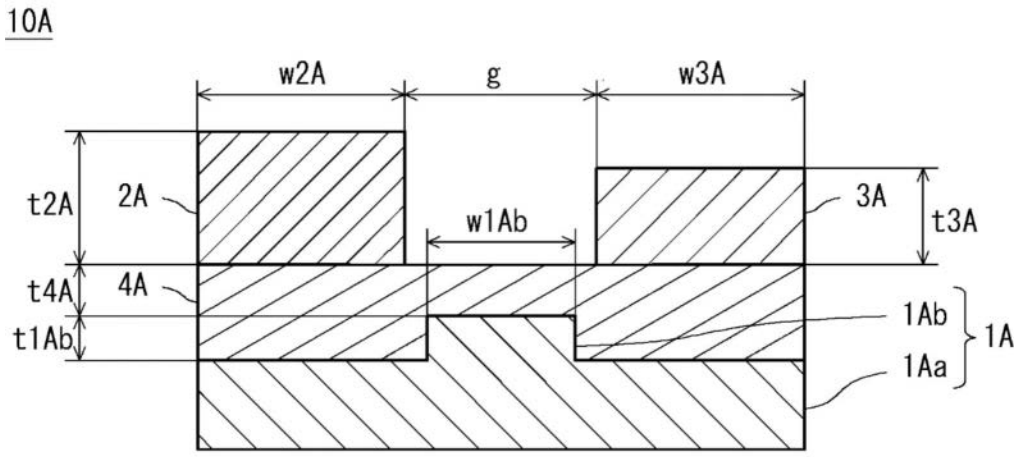

10A
w2A
g
w3A
t2A
2A
w1Ab
3A
t3A
t4A
4A
t1Ab
1Ab
1A
1Aa

图5

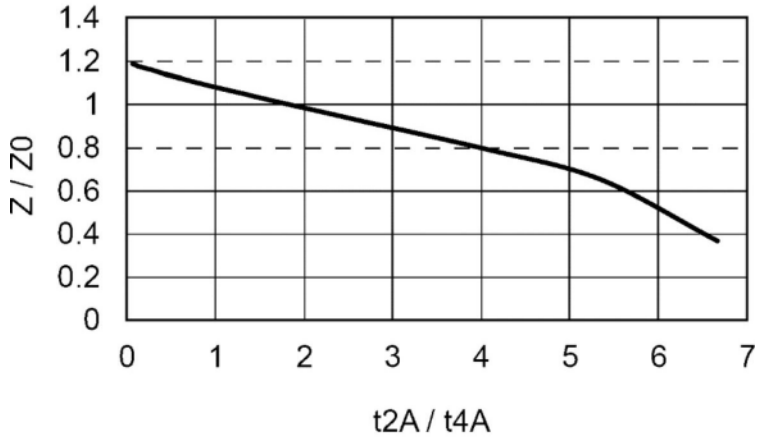

1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
Z / Z0
0
1
2
3
4
5
6
7
t2A / t4A

图6

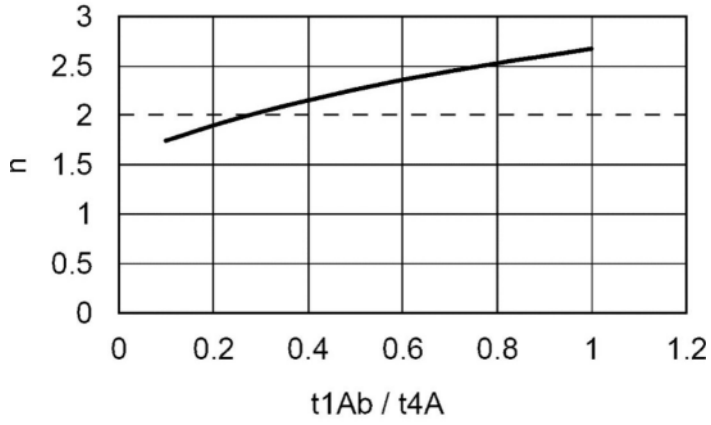

3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
n
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
t1Ab / t4A

图7

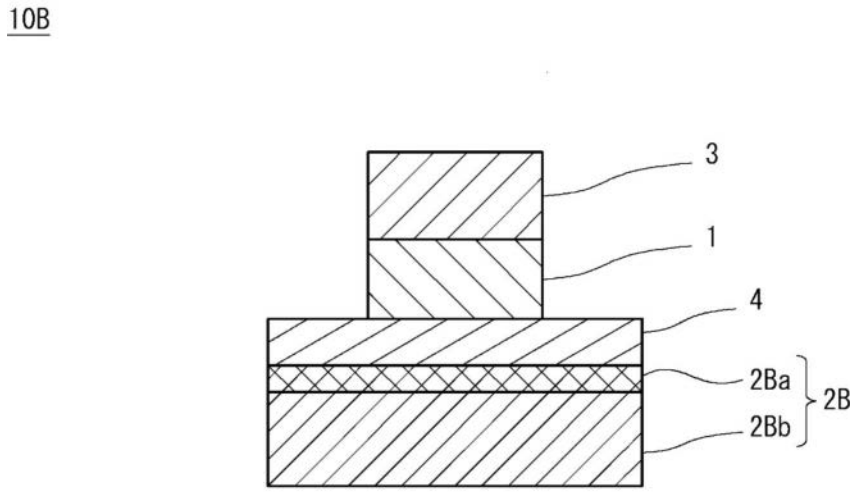

10B
3
1
4
2Ba
2Bb
2B

图8

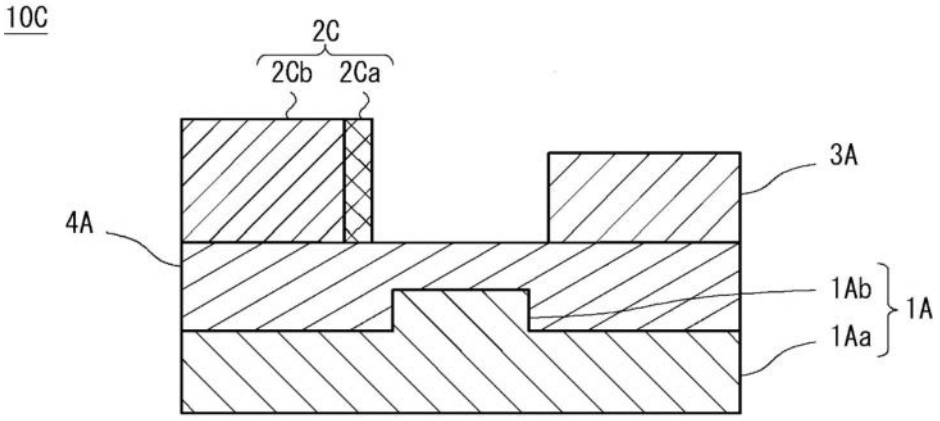

10C
2C
2Cb
2Ca
3A
4A
1Ab
1Aa
1A

图9

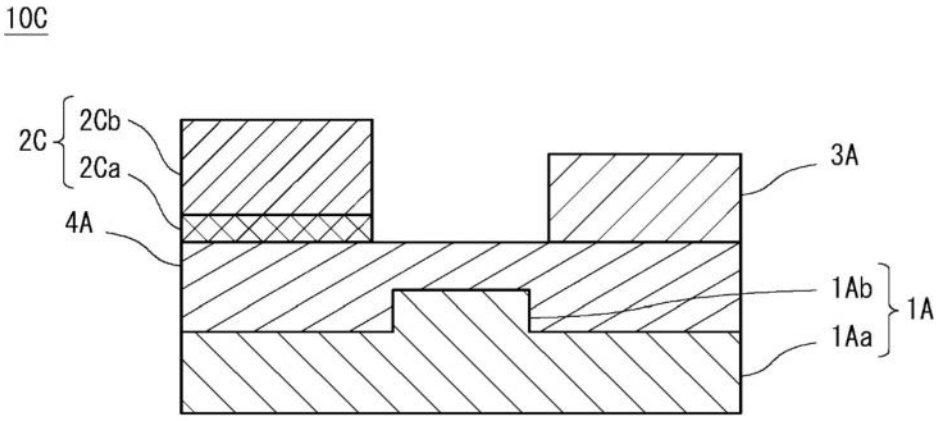

10C
2C
2Cb
2Ca
4A
3A
1Ab
1Aa
1A

图10