



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113419364 B

(45) 授权公告日 2022.08.12

(21) 申请号 202110606401.1

(51) Int.CI.

(22) 申请日 2021.05.27

G02F 1/11 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

G02F 1/125 (2006.01)

申请公布号 CN 113419364 A

(56) 对比文件

(43) 申请公布日 2021.09.21

US 2003179975 A1, 2003.09.25

(73) 专利权人 香港理工大学深圳研究院

JP 2006285121 A, 2006.10.19

地址 518057 广东省深圳市南山区粤海街  
道高新技术产业园南区粤兴一道18号  
香港理工大学产学研大楼205室

CN 111090149 A, 2020.05.01

专利权人 江南大学

CN 111273396 A, 2020.06.12

(72) 发明人 黄冬梅 徐银 杨洋 程子豪

US 2009067771 A1, 2009.03.12

李锋 卫炳江

US 5477098 A, 1995.12.19

(74) 专利代理机构 深圳市君胜知识产权代理事  
务所(普通合伙) 44268

审查员 李彦双

专利代理人 朱阳波

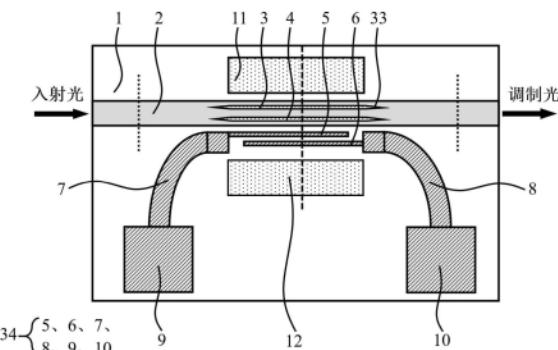
权利要求书1页 说明书9页 附图4页

(54) 发明名称

一种基于铌酸锂薄膜的凹槽辅助式声光调  
制器

(57) 摘要

本发明公开了一种基于铌酸锂薄膜的凹槽  
辅助式声光调制器，其中，所述声光调制器包括：  
铌酸锂薄膜层；设置于所述铌酸锂薄膜层上的铌  
酸锂薄膜波导和叉指换能器，其中，所述铌酸锂  
薄膜波导的顶部刻有凹槽。由于传统的基于铌酸  
锂薄膜设计的声光调制器中采用的光波导结构  
均为规则的条形波导，规则的条形波导基于表面  
声波产生的声光互作用效率不高，而本发明在铌  
酸锂薄膜波导的顶部刻有凹槽，可以增强铌酸锂  
薄膜波导基于表面声波产生的形变位移场与波  
导光学电磁场之间的相互作用，从而解决了现有  
声光调制器中声光互作用效率低的问题。



1. 一种声光调制器,其特征在于,所述声光调制器包括:

铌酸锂薄膜层;

设置于所述铌酸锂薄膜层上的铌酸锂薄膜波导和叉指换能器,其中,所述铌酸锂薄膜波导的顶部刻有凹槽;

所述声光调制器还包括设置于所述铌酸锂薄膜层下方的掩埋氧化层;所述铌酸锂薄膜层包括调制区域和非调制区域,其中,所述调制区域为所述铌酸锂薄膜波导下方和所述叉指换能器下方的预设范围内的区域,所述调制区域的一侧设置有第一反射槽,所述调制区域的另一侧设置有第二反射槽,所述第一反射槽和所述第二反射槽均贯穿所述铌酸锂薄膜层和所述掩埋氧化层。

2. 根据权利要求1所述的一种声光调制器,其特征在于,所述铌酸锂薄膜波导与所述叉指换能器分别位于所述铌酸锂薄膜层的两侧,且间隔预设距离。

3. 根据权利要求1所述的一种声光调制器,其特征在于,所述铌酸锂薄膜波导为梯形柱状波导,且所述铌酸锂薄膜波导与所述铌酸锂薄膜层的接触面为所述梯形柱状波导中面积最大的一个面。

4. 根据权利要求1所述的一种声光调制器,其特征在于,所述凹槽包括若干个子凹槽,所述若干个子凹槽以所述铌酸锂薄膜波导上表面的中心线为对称轴对称分布。

5. 根据权利要求4所述的一种声光调制器,其特征在于,所述若干个子凹槽包括第一子凹槽和第二子凹槽,所述第一子凹槽和所述第二子凹槽均为梯形凹槽,且所述第一子凹槽和所述第二子凹槽的两端均设置有锥形结构。

6. 根据权利要求1所述的一种声光调制器,其特征在于,所述叉指换能器包括第一金属电极,第二金属电极,以及与所述第一金属电极相连的第一金属导线,与所述第一金属导线相连的第一金属导电板,与所述第二金属电极相连的第二金属导线,与所述第二金属导线相连的第二金属导电板。

7. 根据权利要求1所述的一种声光调制器,其特征在于,所述调制区域下方为连接槽,所述连接槽位于所述第一反射槽和所述第二反射槽中间,且所述连接槽分别与所述第一反射槽、所述第二反射槽贯通。

8. 一种微环谐振腔,其特征在于,所述微环谐振腔的直波导区域包含权利要求1-7任一所述的声光调制器。

9. 一种马赫-曾德尔干涉仪,其特征在于,所述马赫-曾德尔干涉仪中至少一个干涉臂包含权利要求1-7任一所述的声光调制器。

## 一种基于铌酸锂薄膜的凹槽辅助式声光调制器

### 技术领域

[0001] 本发明涉及集成光子学技术领域,尤其涉及的是一种基于铌酸锂薄膜的凹槽辅助式声光调制器。

### 背景技术

[0002] 集成光子学是在统一的基底材料上(如常用的SOI晶圆)集成众多高性能、多功能的无源、有源器件以实现特定功能的一门科学,该技术通过片上集成的方法提高器件系统的集成度、稳定性与可靠性并同时降低器件系统的尺寸、功耗与成本,拥有传统分立光学系统难以媲美的技术优势。近来随着微纳加工工艺的进步,兼具优异电光、声光、压电、非线性光学与光折变特性的铌酸锂单晶薄膜(Lithium Niobate On Insulator,LNOI)被成功制备,随即受到了学术界与产业界的高度重视。当前铌酸锂薄膜技术已成为集成光子学领域的一项革命性技术,将推动更高性能、更低功耗、更大规模有源无源集成、更低成本的全新光子集成回路的研发进程与产业化,也必将引领集成光子学发展的新浪潮。

[0003] 由于铌酸锂薄膜层与掩埋氧化层(如二氧化硅)之间存在较高的折射率差,输入光场将被极大地限制在铌酸锂薄膜层中传输,因此可以从根本上解决铌酸锂光子器件小型化问题,而且较小的器件尺寸可以增强光与铌酸锂薄膜的互作用强度提升器件性能。目前,能够将铌酸锂薄膜多项优势融合在一起的器件就是工作于多个不同物理场的声光调制器,可实现“微波—声波—光波”三个物理场在LNOI平台上的高效耦合与转换。并且随着铌酸锂薄膜的成功制备,片上集成化的声光调制器成为了研究与市场关注的热点,将为片上光电子集成回路、量子计算、微波光子信号处理等领域提供性能更加优越的多物理场调控器件。

[0004] 基于铌酸锂薄膜设计的声光调制器,通常由产生表面声波的叉指换能器、形成声学谐振腔的两个反射器和光波导组成,所有器件都在铌酸锂薄膜上单片集成。然而,现有的利用叉指换能器产生表面声波引起机械形变,该形变量与波导光学电磁场之间的相互作用比较弱,导致器件的声光互作用效率较低。

[0005] 因此,现有技术还有待改进和发展。

### 发明内容

[0006] 本发明要解决的技术问题在于,针对现有技术的上述缺陷,提供一种基于铌酸锂薄膜的凹槽辅助式声光调制器,旨在解决现有技术中由于表面声波产生的机械形变与波导光学电磁场之间的弱相互作用,导致器件声光互作用效率较低的问题。

[0007] 本发明解决问题所采用的技术方案如下:

[0008] 第一方面,本发明实施例提供一种声光调制器,其中,所述声光调制器包括:

[0009] 铌酸锂薄膜层;

[0010] 设置于所述铌酸锂薄膜层上的铌酸锂薄膜波导和叉指换能器,其中,所述铌酸锂薄膜波导的顶部刻有凹槽。

[0011] 在一种实施方式中,所述铌酸锂薄膜波导与所述叉指换能器分别位于所述铌酸锂

薄膜层的两侧,且间隔预设距离。

[0012] 在一种实施方式中,所述铌酸锂薄膜波导为梯形柱状波导,且所述铌酸锂薄膜波导与所述铌酸锂薄膜层的接触面为所述梯形柱状波导中面积最大的一个面。

[0013] 在一种实施方式中,所述凹槽包括若干个子凹槽,所述若干个子凹槽以所述铌酸锂薄膜波导上表面的中心线为对称轴对称分布。

[0014] 在一种实施方式中,所述若干个子凹槽包括第一子凹槽和第二子凹槽,所述第一子凹槽和所述第二子凹槽均为梯形凹槽,且所述第一子凹槽和所述第二子凹槽的两端均设置有锥形结构。

[0015] 在一种实施方式中,所述叉指换能器包括第一金属电极,第二金属电极,以及与所述第一金属电极相连的第一金属导线,与所述第一金属导线相连的第一金属导电板;第二金属电极,与所述第二金属电极相连的第二金属导线,与所述第二金属导线相连的第二金属导电板。

[0016] 在一种实施方式中,所述声光调制器还包括设置于所述铌酸锂薄膜层下方的掩埋氧化层;所述铌酸锂薄膜层包括调制区域和非调制区域,其中,所述调制区域为所述铌酸锂薄膜波导下方和所述叉指换能器下方的预设范围内的区域,所述调制区域的一侧设置有第一反射槽,所述调制区域的另一侧设置有第二反射槽,所述第一反射槽和所述第二反射槽均贯穿所述铌酸锂薄膜层和所述掩埋氧化层。

[0017] 在一种实施方式中,所述调制区域下方为连接槽,所述连接槽位于所述第一反射槽和所述第二反射槽中间,且所述连接槽分别与所述第一反射槽、所述第二反射槽贯通。

[0018] 第二方面,本发明实施例还提供一种微环谐振腔,其中,所述微环谐振腔的直波导区域包含上述任一所述的声光调制器。

[0019] 第三方面,本发明实施例还提供一种马赫-曾德尔干涉仪,其中,所述马赫-曾德尔干涉仪中至少一个干涉臂包含上述任一所述的声光调制器。

[0020] 本发明的有益效果:本发明中的声光调制器包括:铌酸锂薄膜层;设置于所述铌酸锂薄膜层上的铌酸锂薄膜波导和叉指换能器,其中,所述铌酸锂薄膜波导的顶部刻有凹槽。由于传统的基于铌酸锂薄膜设计的声光调制器中采用的光波导结构均为规则的条形波导,规则的条形波导基于表面声波产生的声光互作用效率不高,而本发明在铌酸锂薄膜波导的顶部刻有凹槽,可以增强铌酸锂薄膜波导基于表面声波产生的形变位移场与波导光学电磁场之间的相互作用,从而解决了现有声光调制器中声光互作用效率低的问题。

## 附图说明

[0021] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明中记载的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0022] 图1是本发明实施例提供的声光调制器的结构示意图。

[0023] 图2是本发明实施例提供的调制区域铌酸锂薄膜波导的结构示意图。

[0024] 图3是本发明实施例提供的调制区域的横截面中各部件的位置示意图。

[0025] 图4是本发明实施例提供的输入、输出铌酸锂薄膜波导的结构示意图。

[0026] 图5是本发明实施例提供的马赫-曾德尔干涉仪的结构示意图。

[0027] 图6是本发明实施例提供的微环谐振腔的结构示意图。

[0028] 附图标号:1:铌酸锂薄膜层;2:铌酸锂薄膜波导;3:第一子凹槽;4:第二子凹槽;5:第一金属电极;6:第二金属电极;7:第一金属导线;8:第二金属导线;9:第一金属导电板;10:第二金属导电板;11:第一反射槽;12:第二反射槽;13:掩埋氧化层;14:硅衬底;15:连接槽;16:输入波导;17、23:铌酸锂薄膜型多模干涉波导;20:铌酸锂薄膜直波导;18、19、21、22:铌酸锂薄膜弯曲波导;24:输出波导;25:铌酸锂薄膜微环谐振腔的输入、输出波导;26、28、30、32:铌酸锂薄膜微环谐振腔的弯曲波导;27、29、31:铌酸锂薄膜微环谐振腔的直波导;33:锥形结构;34:叉指换能器。

## 具体实施方式

[0029] 为使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚、明确,以下参照附图并举实施例对本发明进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。

[0030] 需要说明,若本发明实施例中有涉及方向性指示(诸如上、下、左、右、前、后……),则该方向性指示仅用于解释在某一特定姿态(如附图所示)下各部件之间的相对位置关系、运动情况等,如果该特定姿态发生改变时,则该方向性指示也相应地随之改变。

[0031] 集成光子学是在统一的基底材料上(如常用的SOI晶圆)集成众多高性能、多功能的无源、有源器件以实现特定功能的一门科学,该技术通过片上集成的方法提高器件系统的集成度、稳定性与可靠性并同时降低器件系统的尺寸、功耗与成本,拥有传统分立光学系统难以媲美的技术优势。近来随着微纳加工工艺的进步,兼具优异电光、声光、压电、非线性光学与光折变特性的铌酸锂单晶薄膜(Lithium Niobate On Insulator,LN0I)被成功制备,随即受到了学术界与产业界的高度重视。当前铌酸锂薄膜技术已成为集成光子学领域的一项革命性技术,将推动更高性能、更低功耗、更大规模有源无源集成、更低成本的全新光子集成回路的研发进程与产业化,也必将引领集成光子学发展的新浪潮。

[0032] 由于铌酸锂薄膜层与掩埋氧化层(如二氧化硅)之间存在较高的折射率差,输入光场将被极大地限制在铌酸锂薄膜层中传输,因此可以从根本上解决铌酸锂光子器件小型化问题,而且较小的器件尺寸可以增强光与铌酸锂薄膜的互作用强度提升器件性能。目前,能够将铌酸锂薄膜多项优势融合在一起的器件就是工作于多个不同物理场的声光调制器,可实现“微波—声波—光波”三个物理场在LN0I平台上的高效耦合与转换。并且随着铌酸锂薄膜的成功制备,片上集成化的声光调制器成为了研究与市场关注的热点,将为片上光电子集成回路、量子计算、微波光子信号处理等领域提供性能更加优越的多物理场调控器件。

[0033] 基于铌酸锂薄膜生成的声光调制器,通常由产生表面声波的叉指换能器、形成声子谐振腔的两个反射器和光波导器件组成,所有器件都在铌酸锂薄膜上单片集成。然而,现有的基于铌酸锂薄膜设计的声光调制器中采用的光波导结构均为规则的条形波导,规则的条形波导基于表面声波产生的声光互作用效率不高。

[0034] 针对现有技术的上述缺陷,本发明提供了一种声光调制器,如图1所示,所述声光调制器包括:

[0035] 铌酸锂薄膜层;

[0036] 设置于所述铌酸锂薄膜层上的铌酸锂薄膜波导和叉指换能器,其中,所述铌酸锂薄膜波导的顶部刻有凹槽。

[0037] 具体地,本实施例中的声光调制器与传统的基于铌酸锂薄膜生成的声光调制器的基础元件类似,均存在用于产生表面声波的叉指换能器和进行声光互作用的光波导器件,且叉指换能器与光波导器件均集成于铌酸锂薄膜上。不同之处在于,本实施例中的光波导器件限定为铌酸锂薄膜波导2,且该柱形波导体的顶部刻有凹槽。根据电磁场相关理论,波导的结构与波导所支持的电磁场模式之间存在对应关系,由于传统的基于铌酸锂薄膜设计的声光调制器中采用的光波导器件均为规则的条形波导,相较于本实施例中顶部具有凹槽的铌酸锂波导的设计自由度更低,很难有效增强波导的机械形变量与光学电磁场之间的相互作用。本发明技术方案通过在普通条形波导的顶部引入了刻蚀槽,通过对形变位移场、光学电磁场的分布进行调整优化,实现两者互作用的有效提升,进而明显改善器件的声光互作用效果,提高声光调制器的性能。因此本实施例的声光调制器具有更高的声光互作用效率。

[0038] 在一种实现方式中,如图1所示,所述铌酸锂薄膜波导与所述叉指换能器分别位于所述铌酸锂薄膜层的两侧,且间隔预设距离。具体地,根据附图3可以看出,在铌酸锂薄膜层1上,铌酸锂薄膜波导2的位置与叉指换能器34的位置是存在一定距离的,即铌酸锂薄膜波导2与叉指换能器34之间不是直接连接,而是通过铌酸锂薄膜层1间接连接的。在实际应用中,叉指换能器34会接收微波电信号,并将该微波电信号传出去,当该微波电信号接触到铌酸锂薄膜层1以后,会使得铌酸锂薄膜层1产生周期性形变,进而产生表面声波信号,表面声波信号在铌酸锂薄膜层1上会沿着与叉指换能器34中的叉指电极相垂直的方向进行传输最终传递到铌酸锂薄膜波导2中,使得铌酸锂薄膜波导2产生形变,进而改变铌酸锂薄膜波导2中的光学折射率。入射光从铌酸锂薄膜波导2的一端输入以后,入射光信号的相位发生改变,从而实现对入射光信号进行相位调制,并通过铌酸锂薄膜波导的另一端输出调制后的光信号。

[0039] 具体地,如图2所示,所述铌酸锂薄膜波导2为梯形柱状波导,且所述铌酸锂薄膜波导与所述铌酸锂薄膜层的接触面为所述梯形柱状波导中面积最大的一个面。在实际应用中,矩形柱状波导对工艺的要求更高,梯形柱状波导对工艺的要求相对较低,而现有技术表明矩形柱状波导与梯形柱状波导的有效折射率差别属于可接受范围,因此本实施例采用梯形柱状波导不仅可以节省大量的工艺时间还不会对器件的设计产生显著影响。

[0040] 在一种实现方式中,所述凹槽包括若干个子凹槽,所述若干个子凹槽以所述铌酸锂薄膜波导上表面的中心线为对称轴对称分布。具体地,如图1所示,本实施例中会在铌酸锂薄膜波导2上设置多个凹槽,这些凹槽的延伸方向与铌酸锂薄膜波导的延伸方向相同,且这些凹槽以铌酸锂薄膜波导2上表面的中心线为对称轴对称分布,从而使得铌酸锂薄膜到波导为对称结构。由于对结构复杂的波导,难以利用光学理论对波导内部的电磁场分布进行精确的解析求解,往往采用数值化的方法进行求解与优化设计。因此,本实施例将凹槽设置为同一结构且在铌酸锂薄膜波导上呈轴对称分布,从而使得技术人员可以更好地确定铌酸锂薄膜波导的各项光学指标,并进一步对铌酸锂薄膜波导的结构进行优化,例如对凹槽的各项结构参数进行优化,以得到形变位移场与光学电磁场分布的匹配度最佳的铌酸锂薄膜波导结构。

[0041] 在一种实现方式中,如图2所示,所述若干个子凹槽包括第一子凹槽和第二子凹槽,所述第一子凹槽和所述第二子凹槽均为梯形凹槽,且所述第一子凹槽和所述第二子凹槽的两端均设置有锥形结构。具体地,为了提高铌酸锂薄膜波导的声光互作用效率,本实施例在铌酸锂薄膜波导的顶部设置了两个梯形凹槽,即第一子凹槽3和第二子凹槽4。并且为了方便器件插入,本实施例还将在第一子凹槽3和第二子凹槽4的两端设置有锥形结构33,通过锥形结构33进行过渡以减小器件整体插入损耗。

[0042] 在一种实现方式中,为了使铌酸锂薄膜波导实现最好的声光互作用效果,本实施例需要确定铌酸锂薄膜波导形变位移场与光学电磁场的互作用达到最高时所对应的各项结构参数,如铌酸锂薄膜波导的厚度、顶部宽度、底部倾角度数、每一个子凹槽的底部的倾角度数、顶部的宽度以及相邻两个子凹槽之间的距离等等。具体地,为了实现确定每一个子凹槽的结构参数,首先本实施例需要确定铌酸锂薄膜波导的影响因素。对于实际应用,声光调制器件中铌酸锂薄膜波导的影响因素主要与三种效应有关:移动边界效应、弹光效应以及电光效应。

[0043] 首先,移动边界效应产生于表面声波引起的铌酸锂薄膜边界所发生的形变位移,该位移效应引起铌酸锂薄膜波导光学折射率的变化  $\Delta n_{0,MB}$  的计算公式(1)如下:

$$[0044] \Delta n_{0,MB} = -\frac{n}{2} \cdot \frac{\oint (Q \cdot \mathbf{n}) \cdot (E_{||}^* \Delta \varepsilon E_{\perp} - D_{\perp}^* \Delta \varepsilon^{-1} D_{\perp}) dS}{\int E^* \varepsilon E dr} \cdot x_{zpf}$$

[0045] 其中,n为光模式有效折射率,n为计算区域边界的外法线方向单位矢量,D为光模式的电位移场,E为光模式的电场分布,“||”与“ $\perp$ ”分别表示平行于、垂直于边界的分量, $\Delta \varepsilon$ 的定义为 $\Delta \varepsilon = \varepsilon_{LN} - \varepsilon_1$ , $\Delta \varepsilon^{-1}$ 的定义为 $\Delta \varepsilon^{-1} = \varepsilon_{LN}^{-1} - \varepsilon_1^{-1}$ ( $\varepsilon_{LN}$ 为铌酸锂薄膜的介电常数, $\varepsilon_1$ 为空气包层的介电常数), $\varepsilon$ 为材料的介电常数,S为铌酸锂薄膜所在的积分计算区域的边界,r为铌酸锂薄膜结构的积分计算区域。需要强调的是,Q为归一化位移场(需归一化到声学谐振腔中单声子的最大位移 $x_{zpf}$ ),其中,最大位移 $x_{zpf}$ 与有效质量 $m_{eff}$ 的计算公式(2)如下,

$$[0046] x_{zpf} = \sqrt{\frac{h}{2m_{eff}\omega_m}}, \quad m_{eff} = L \int_D \rho Q(r)^2 dr / \max_D (Q(r)^2)$$

[0047] 其中, $m_{eff}$ 为声学模式的有效质量, $\omega_m$ 为声学模式的角频率,r为铌酸锂薄膜的密度,L为声学谐振腔在光传输方向的尺寸,h为约化普朗克常数。

[0048] 而弹光效应源于铌酸锂薄膜较高的弹光系数,即铌酸锂薄膜因表面声波作用发生形变后可引起铌酸锂薄膜波导光学折射率的变化  $\Delta n_{0,PE}$  的计算公式(3)如下:

$$[0049] \Delta n_{0,PE} = \frac{\epsilon_0 n^5}{2} \frac{\int dr (E_x^* E_y^* E_z^*) \begin{pmatrix} dB_1 & dB_6 & dB_5 \\ dB_6 & dB_2 & dB_4 \\ dB_5 & dB_4 & dB_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}}{\int E^* \epsilon E dr}$$

[0050] 其中,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $dB_k$  ( $k=1 \sim 6$ ) 为与应变  $\epsilon_k$  ( $k=1 \sim 6$ ) 相关的函数。

[0051] 此外, 电光效应的作用引起铌酸锂薄膜波导光学折射率的变化  $\Delta n_{0,EO}$  的计算公式 (4) 如下:

$$[0052] \Delta n_{0,EO} = \frac{\epsilon_0 n^5}{2} \frac{\int dr (E_x^* E_y^* E_z^*) \begin{pmatrix} dB_1 & dB_6 & dB_5 \\ dB_6 & dB_2 & dB_4 \\ dB_5 & dB_4 & dB_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix}}{\int E^* \epsilon E dr}$$

[0053] 其中,  $dB_k$  ( $k=1 \sim 6$ ) 为与静电场  $\epsilon_k$  ( $k=x, y, z$ ) 相关的函数。

[0054] 因此, 基于上述三种效应的叠加, 铌酸锂薄膜波导的总光学折射率变化  $\Delta n_{0,tot}$  (基于单声子作用) 的计算公式 (5) 如下:

$$[0055] \Delta n_{0,tot} = \Delta n_{0,MB} + \Delta n_{0,PE} + \Delta n_{0,EO}$$

[0056] 本申请通过计算不同结构参数下铌酸锂薄膜波导的波导折射率变化, 得到最大波导折射率变化, 并将此时对应的结构参数作为最优结构参数, 以该最优结构参数在铌酸锂薄膜波导上设置凹槽, 从而改善铌酸锂薄膜波导的声光互作用效果, 提高其调制光信号的效率。在一种实现方式中, 当根据上述 (1)、(2)、(3)、(4)、(5) 5 个公式确定铌酸锂薄膜波导上的凹槽的结构参数以后, 可以确定对应的声光调制器的半波电压长度积 ( $V_{\pi}L$ )、单声子耦合强度 ( $g_0$ ) 等参数, 从而有助于进一步表征声光调制器的性能指标。对于本发明器件, 单声子作用下铌酸锂薄膜波导的折射率变化约为  $5 \times 10^{-10}$  量级,  $V_{\pi}L$  低于  $0.01V \cdot cm$ , 单声子耦合强度大于  $1kHz$ 。换言之, 本实施例通过在铌酸锂薄膜波导的顶部设置若干个凹槽, 从而改变表面声波应力场的分布以及铌酸锂薄膜波导的光模式分布, 然后根据上述公式 (1) - (5) 可以确定铌酸锂薄膜波导可以产生更大的总光学折射率变化, 有助于获得更低的半波电压长度积, 实现片上小尺寸、低功耗的声光调制器。

[0057] 具体地, 本实施例中的每一个子凹槽均采用浅刻蚀工艺制成, 其中, 每一个子凹槽底部的倾斜角的度数范围在  $100$  度到  $110$  度之间; 每一个子凹槽顶部的宽度的范围设置为  $0.1$  微米到  $0.3$  微米之间, 底部宽度为  $100$  纳米到  $150$  纳米之间; 每一个子凹槽的深度的范围设置为  $50$  纳米。

[0058] 在一种实现方式中, 当本实施例中的铌酸锂薄膜波导为梯形柱状波导时, 该铌酸锂薄膜波导的底部的倾斜角的度数范围可以设置为  $70$  度到  $80$  度之间, 该铌酸锂薄膜波导的厚度的范围可以设置为  $300$  纳米到  $400$  纳米之间, 该铌酸锂薄膜波导的顶部宽度的范围可以设置为  $1.0$  微米到  $1.2$  微米之间。当该铌酸锂薄膜波导的顶部设置的子凹槽数量为  $2$  时, 即设置有第一子凹槽 3 和第二子凹槽 4, 其中, 第一子凹槽与其相距最近的铌酸锂薄膜波导的顶边的距离范围为  $0.05$  微米至  $0.15$  微米, 第二子凹槽与其相距最近的铌酸锂薄膜波导的顶边

的距离范围也为0.05微米至0.15微米。

[0059] 在一种实现方式中,如图2所示,当该铌酸锂薄膜波导的顶部设置的子凹槽数量为2时,本实施例提供一个最佳的结构参数:每一个子凹槽底部的倾斜角的度数设置为110度;每一个子凹槽顶部的宽度设置为0.2微米;每一个子凹槽的深度设置为50纳米;铌酸锂薄膜波导的底部的倾斜角的度数为70度;铌酸锂薄膜波导的厚度为300纳米;铌酸锂薄膜波导的顶部宽度为1微米。第一子凹槽与其相距最近的铌酸锂薄膜波导的顶边的距离为0.1微米,第二子凹槽与其相距最近的铌酸锂薄膜波导的顶边的距离也为0.1微米。

[0060] 在一种实现方式中,如图1所示,本实施例采用的叉指换能器34包括第一金属电极5,第二金属电极6,以及与所述第一金属电极5相连的第一金属导线7,与所述第一金属导线7相连的第一金属导电板9,与所述第二金属电极6相连的第二金属导线8,与所述第二金属导线8相连的第二金属导电板10。具体地,本实施例中的第一金属电极5与第二金属电极6设置为并列形式,且第一金属电极5与第二金属电极6在铌酸锂薄膜层1上的位置与铌酸锂薄膜波导2在所述铌酸锂薄膜层1上的位置设置为平行。为了实现产生表面声波信号,本实施例通过第一金属导线7连接第一金属电极5与其对应的金属导电板,即第一金属导电板9;通过第二金属导线8连接第二金属电极6与其对应的金属导电板,即第二金属导电板10。第一金属导电板9和第二金属导电板10作为叉指换能器34的两个输入端,可以产生交替变换的微波电信号,并通过第一金属导线7和第二金属导线8分别将微波电信号传递至第一金属电极5和第二金属电极6,从而通过第一金属电极5和第二金属电极6输出微波电信号,通过输出的微波电信号与铌酸锂薄膜层1之间相互作用产生表面声波信号。在一种实现方式中,所述第一金属导线7和所述第二金属导线8均设置为弧形金属导线,以提供较好的微波电接触。

[0061] 在一种实现方式中,为了实现更好的声光互作用效果,所述第一金属电极5与所述铌酸锂薄膜波导2的间距控制在1.0微米到1.4微米之间。此外,所述第一金属电极5和所述第二金属电极6的电极宽度控制在0.1微米到0.3微米之间,例如可以设置为0.2微米。所述第一金属电极5和所述第二金属电极6之间的距离控制在0.1微米到0.3微米之间,例如可以设置为0.2微米。所述第一金属电极5和所述第二金属电极6的电极厚度控制在70纳米到90纳米之间,例如可以设置为80纳米。

[0062] 在一种实现方式中,为了提高铌酸锂薄膜波导的声光互作用效率,如图4所示,所述声光调制器还包括设置于所述铌酸锂薄膜层下方的掩埋氧化层13;所述铌酸锂薄膜层1包括调制区域和非调制区域,其中,所述调制区域为所述铌酸锂薄膜波导2下方和所述叉指换能器34下方的预设范围内的区域,所述调制区域的一侧设置有第一反射槽11,所述调制区域的另一侧设置有第二反射槽12,所述第一反射槽11和所述第二反射槽12均贯穿所述铌酸锂薄膜层1和所述掩埋氧化层13。具体地,第一反射槽和第二反槽可以为全刻蚀矩形槽,本实施例通过第一反射槽和第二反射槽构建声学谐振腔。并且,在铌酸锂薄膜层1的下方设置掩埋氧化层13可以有效降低铌酸锂薄膜波导2的损耗。在一种实现方式中,由于所有器件均在铌酸锂薄膜层1上进行集成,为了增加铌酸锂薄膜层1的支撑力,如图4所示,本实施例还在该掩埋氧化层13的下方设置了硅衬底14。在一种实现方式中,所述掩埋氧化层可以采用二氧化硅材料制成。

[0063] 在一种实现方式中,为了减少表面声波信号的损耗,所述调制区域下方为连接槽,

所述连接槽15位于第一反射槽11和第二反射槽12中间,且所述连接槽15分别与所述第一反射槽11、所述第二反射槽12贯通。如图3所示,本实施例将所述调制区域下方的掩埋氧化层13用连接槽15代替,在一种实现方式中,可以通过腐蚀的方法去除调制区域下方的掩埋氧化层,使得该部分去除并变成凹槽结构,即所述连接槽15,从而调制区域形成了悬臂梁型铌酸锂薄膜波导结构(可以理解的是,本实施例中只有调制区域下方有所述连接槽15,铌酸锂薄膜波导的输入端和输出段对应的铌酸锂薄膜层下方的掩埋氧化层仍旧保留)。如此一来,表面声波信号仅能存在于铌酸锂薄膜层1和铌酸锂薄膜波导2中,无法泄露至衬底与包层,提高了表面声波信号以及能量的利用效率。在一种实现方式中,所述连接槽15、所述第一反射槽11和所述第二反射槽12均采用深刻蚀工艺制程。

[0064] 在一种实现方式中,铌酸锂薄膜层1的厚度为300纳米到400纳米之间,例如可以采用厚度为300纳米的铌酸锂薄膜层,且本实施例中采用的铌酸锂薄膜均为x切向铌酸锂晶体薄膜。

[0065] 本实施例中提供声光调制器与现有技术相比,具有以下显著优势:

[0066] 1、器件尺寸小、可片上集成。常规声光调制器因采用块状铌酸锂或砷化镓等压电材料,器件的体积较大、调制效率较低,无法满足未来光电子集成化发展的需要。本发明提出采用铌酸锂薄膜作为压电材料并将光波导、叉指电极与声学谐振腔同时集成于铌酸锂薄膜,实现“微波—声波—光波”信号在片上的高效耦合,整体器件尺寸可以压缩至20um×100um,优于现有分立的器件方案。

[0067] 2、器件损耗低、使用灵活。与常规调制器件相比,本发明器件采用表面声波作为中间媒介实现微波电信号到光波信号之间的转换,因此器件的控制电极无需靠近光波导(如一般调制器为获得较高调制效率,电极与波导的间距往往只有500nm左右或者更小),可使得金属吸收损耗大为降低。另外,因表面声波的数量多、工作频率多,将表面声波作为重要的能量传递与耦合的方式,通过控制不同的微波电信号输入即可产生多种表面声波,使用灵活。同时对比目前主要用于数据通信的电光调制,声光调制的适用范围将会更加广泛(光/量子通信、传感、光机械学、成像等)。

[0068] 3、器件声光调制效率高、半波电压长度积小。在条形铌酸锂薄膜波导的基础上,本发明在条形铌酸锂薄膜波导的顶部加入了两个凹槽,通过对应变位移场、光学电磁场的分布进行优化设计以获得更高的声光互作用效率,对应于波导光学折射率的改变更大。进一步将其应用于马赫-曾德尔干涉仪或微环谐振腔可获得明显优于电光调制的半波电压长度积(实现 $V_s L < 0.01V \cdot cm$ )。

[0069] 基于上述实施例,本发明还提供一种微环谐振腔,如图6所示,所述微环谐振腔的直波导区域包含所述声光调制器。具体地,为了将所述声光调制器应用于微环谐振腔,本实施例需要将该微环谐振腔设置为跑道型结构,并将所述声光调制器设置于跑道型结构的直道区域,即直波导区域。其中,所述微环谐振腔包括:输入输出波导25,微环谐振腔的弯曲波导26、28、30、32,微环谐振腔的直波导27、29、31。该微环谐振腔的工作原理是利用声光调制器对入射光的光信号相位进行改变,进而改变谐振腔内部的谐振条件,从而改变谐振波长的位置。微环谐振腔的输出端反映为谐振波长的移动。对单波长来讲,则是反映为光信号强度的变化,从而实现对光信号调制的功能。

[0070] 基于上述实施例,本发明还提供一种马赫-曾德尔干涉仪,如图5所示,所述马赫-

曾德尔干涉仪中至少一个干涉臂包含所述声光调制器。具体地,所述马赫-曾德尔干涉仪包括:输入波导16、输出波导24、铌酸锂薄膜型多模干涉波导17,23、铌酸锂薄膜直波导20、铌酸锂薄膜弯曲波导18,19,21,22。在该马赫-曾德尔干涉仪中,所述声光调制器位于至少其中一个干涉臂,其余部分均为铌酸锂薄膜波导。通过微波电信号的输入,激发铌酸锂薄膜表面声波的产生,并进而作用于铌酸锂薄膜波导光学折射率的变化,实现光信号相位的改变。进一步结合马赫-曾德尔干涉仪可将干涉臂中光信号相位的变化转变为输出端光信号强度的变化,最终实现利用声波完成微波到光波的转换与调制功能。此外在该器件中,与调制臂相对应的其他干涉臂也可采用非直波导结构,以选择适当的器件初始相位差进行工作。

[0071] 综上所述,本发明公开了一种基于铌酸锂薄膜的凹槽辅助式声光调制器,其中,所述声光调制器包括:铌酸锂薄膜层;设置于所述铌酸锂薄膜层上的铌酸锂薄膜波导和叉指换能器,其中,所述铌酸锂薄膜波导的顶部刻有凹槽。由于传统的基于铌酸锂薄膜设计的声光调制器中采用的光波导结构均为规则的条形波导,规则的条形波导基于表面声波产生的声光互作用效率不高,而本发明在铌酸锂薄膜波导的顶部刻有凹槽,可以增强铌酸锂薄膜波导基于表面声波产生的形变位移场与波导光学电磁场之间的相互作用,从而解决了现有声光调制器中声光互作用效率低的问题。

[0072] 应当理解的是,本发明的应用不限于上述的举例,对本领域普通技术人员来说,可以根据上述说明加以改进或变换,所有这些改进和变换都应属于本发明所附权利要求的保护范围。

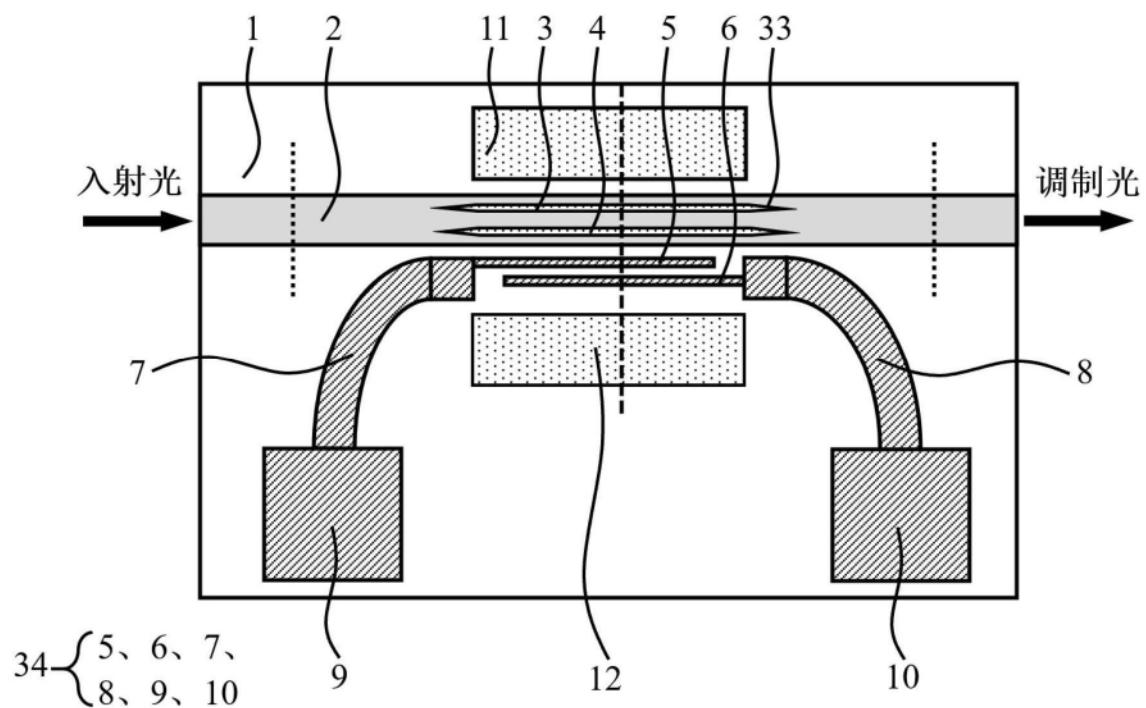


图1

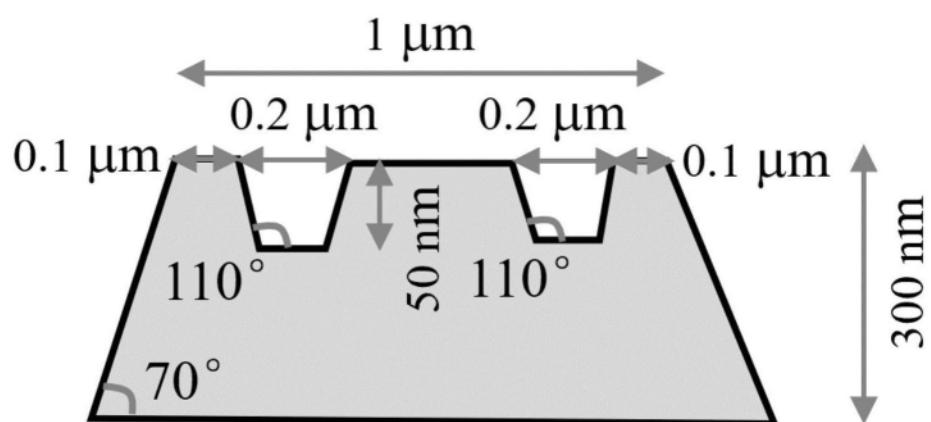


图2

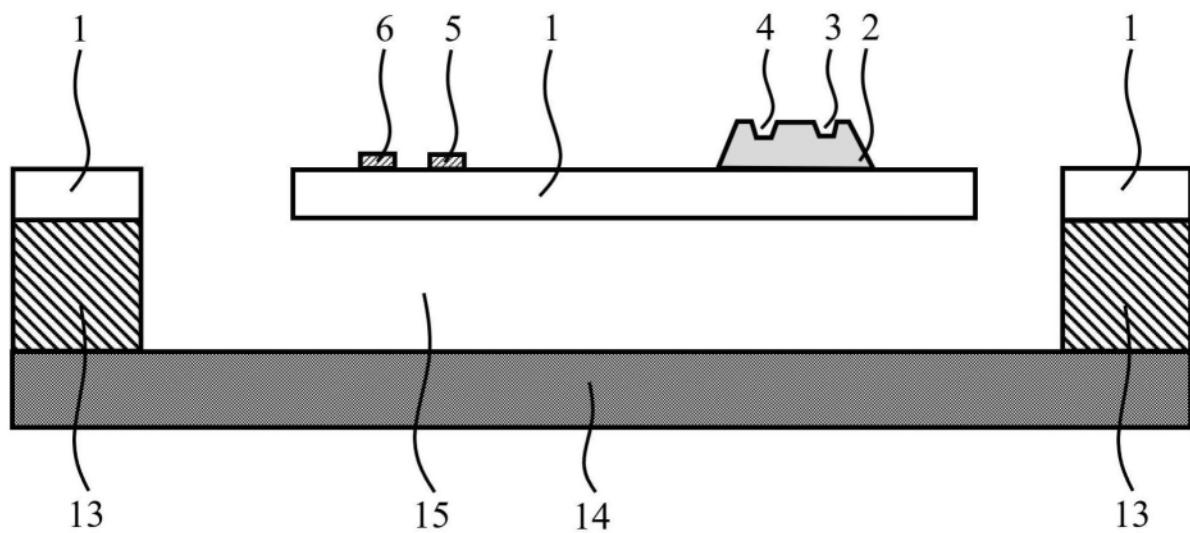


图3

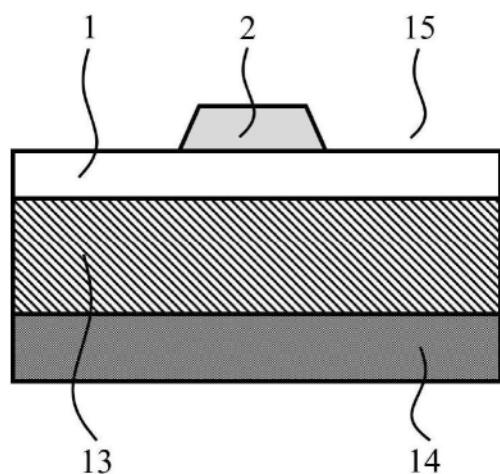


图4

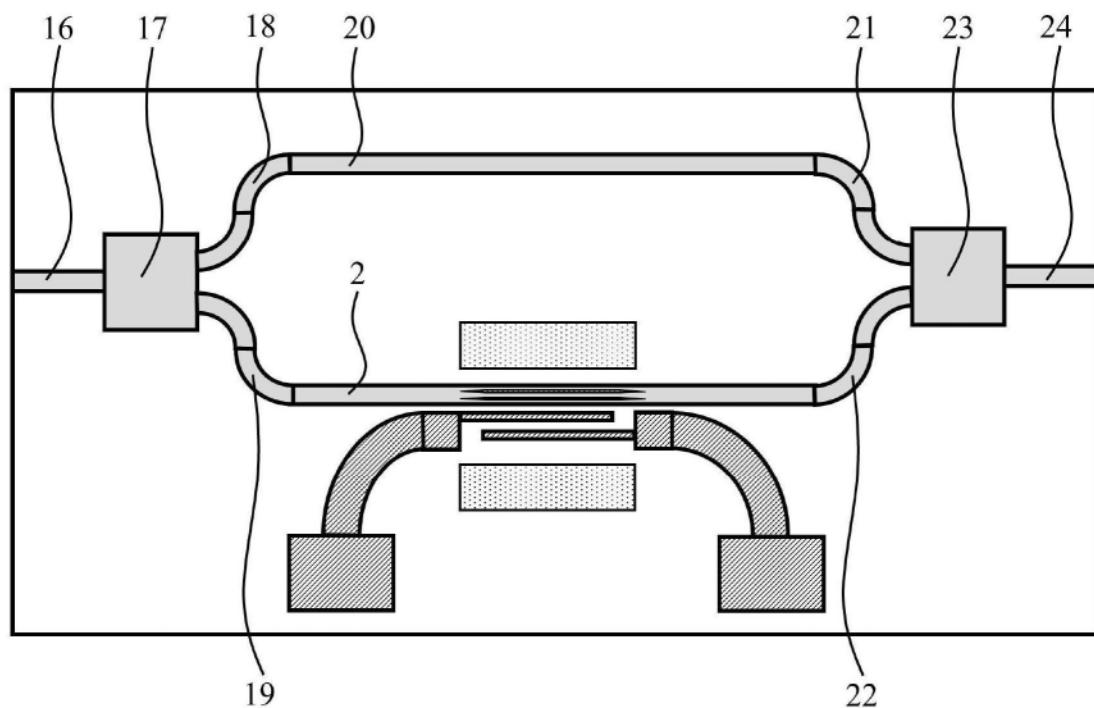


图5

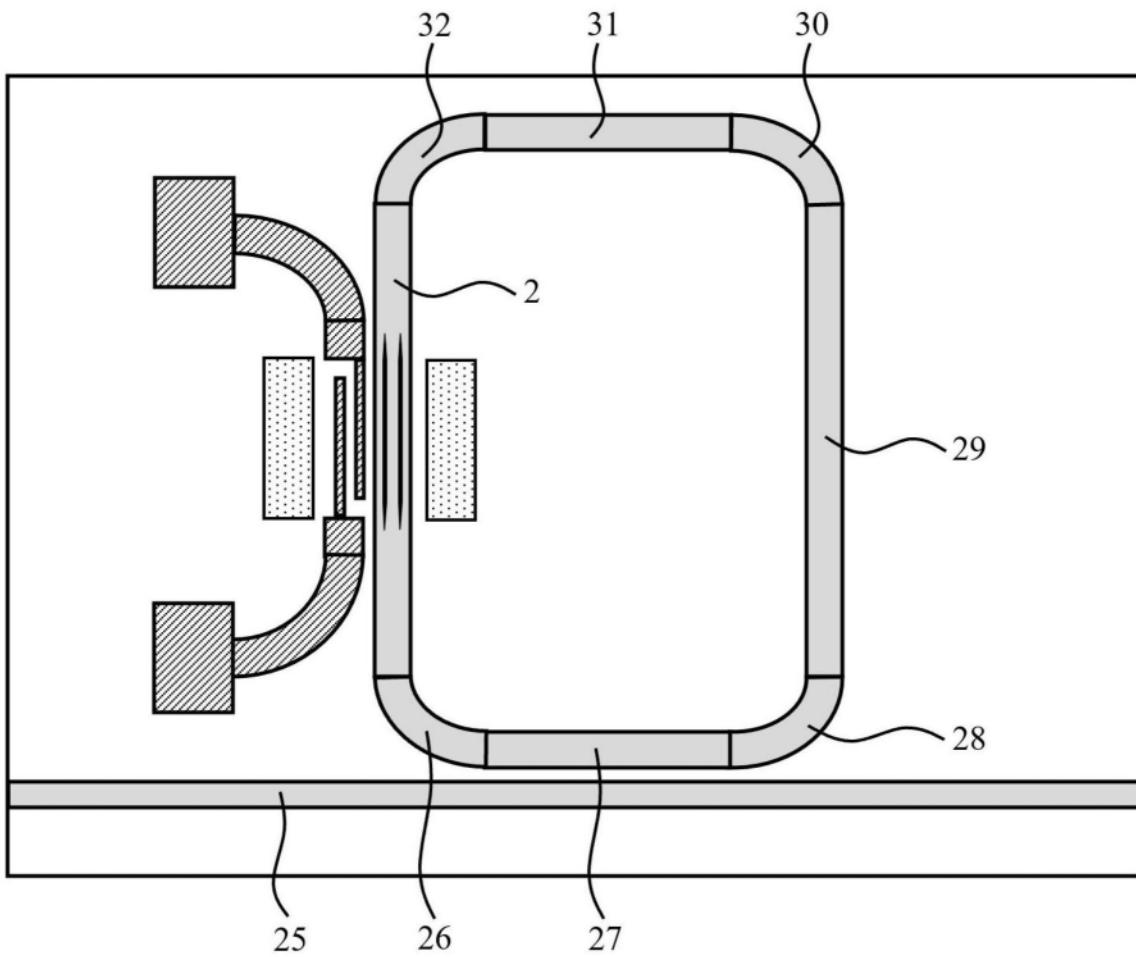


图6