



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 118688983 A

(43) 申请公布日 2024. 09. 24

(21) 申请号 202310304842.5

(22) 申请日 2023.03.21

(71) 申请人 华为技术有限公司

地址 518129 广东省深圳市龙岗区坂田华为总部办公楼

申请人 鹏城实验室

(72) 发明人 任杨 范维恩

(74) 专利代理机构 北京市金杜律师事务所
11256

专利代理师 张宁 郑振

(51) Int. Cl.

G02F 1/01 (2006.01)

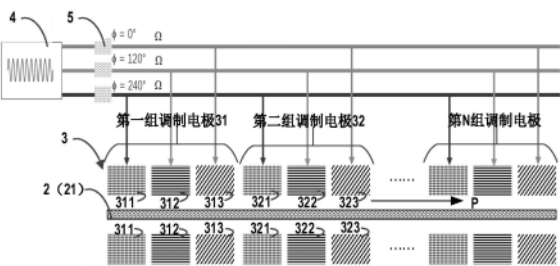
权利要求书3页 说明书10页 附图4页

(54) 发明名称

光调制结构、光隔离器和光环形器

(57) 摘要

本公开涉及一种光调制结构以及相关的光隔离器和光环形器。该光调制结构包括：光波导，沿第一延伸方向延伸并且具有波导调制段；多组调制电极，每组调制电极包括沿着第一延伸方向依次布置的多个子调制电极，每个子调制电极被定位在波导调制段中的相应子波导调制段的两侧，以用于对相应子波导调制段的折射率进行调制；其中每组调制电极中的所述多个子调制电极适于分别被施加频率相同但相位彼此不同的相应的多个周期性调制信号，而多组调制电极中的对应位置处的子调制电极适于被施加所述多个周期性调制信号中的相同一个的周期性调制信号，以使得波导调制段被调制成在时间-空间上沿着光波导移动且具有折射率周期性变化的折射率光栅结构。



1. 一种光调制结构,其特征在于,包括:

光波导(2),沿第一延伸方向(P)延伸并且具有波导调制段(21);

多组调制电极(3),沿着所述波导调制段(21)的两侧周期性布置,其中每组调制电极(3)包括沿着所述第一延伸方向(P)依次布置的多个子调制电极(311、312、313),每个子调制电极被定位在所述波导调制段(21)中的相应子波导调制段的两侧,以用于对所述相应子波导调制段的折射率进行调制;

其中每组调制电极(3)中的所述多个子调制电极(311、312、313)适于分别被施加频率相同但相位彼此不同的相应的多个周期性调制信号,而所述多组调制电极(3)中的对应位置处的所述子调制电极(311、312、313)适于被施加所述多个周期性调制信号中的相同一个的周期性调制信号,以使得所述波导调制段(21)被调制成在时间-空间上沿着所述光波导(2)移动且具有折射率周期性变化的折射率光栅结构。

2. 根据权利要求1所述的光调制结构,其特征在于,所述多个周期性调制信号中的每个周期性调制信号的电极调制频率 Ω 和所述折射率光栅结构的波矢 β 被配置为:允许沿所述光波导的所述第一延伸方向以第一波导模式传播的第一光信号在所述折射率光栅结构的调制下转换为仍以所述第一波导模式传播但频率有所不同的第二光信号,同时允许沿所述光波导的第二延伸方向以所述第一波导模式传播的所述第二光信号在所述折射率光栅结构的调制下转换为以第二波导模式传播的第三光信号,所述第一延伸方向和所述第二延伸方向相反。

3. 根据权利要求2所述的光调制结构,其特征在于,所述电极调制频率 Ω 和所述折射率光栅结构的波矢 β 被配置为满足以下条件:

$$\frac{2\pi n_0(\omega_1)}{\lambda_1} - \frac{2\pi n_1(\omega_2)}{\lambda_2} = \beta$$

$$\omega_2 - \omega_1 = \Omega$$

其中 λ_1 和 ω_1 分别是所述第二光信号的波长和频率,而 λ_2 和 ω_2 分别是所述第三光信号的波长和频率,其中 n_0 是处于第一波导模式下的光波导随着光频率变化的有效折射率;而 n_1 是处于第二波导模式下的光波导随着光频率变化的折射率。

4. 根据权利要求2所述的光调制结构,其特征在于,所述光波导(2)还具有输入端以及耗散段(23),所述耗散段(23)被设置在所述输入端和所述波导调制段(21)之间,用于对沿所述第二延伸方向传播的所述第三光信号进行耗散。

5. 根据权利要求1-4中任一项所述的光调制结构,其特征在于,每组调制电极(3)中的沿所述第一延伸方向(P)依次布置的所述多个子调制电极(311、312、313)被施加的相应的多个周期性调制信号的相位依次递增或递减。

6. 根据权利要求1-4中任一项所述的光调制结构,其特征在于,所述每组调制电极(3)包括沿所述第一延伸方向(P)依次布置的N个子调制电极(311、312、313),其中所述N个子调制电极(311、312、313)中的任意相邻的两个子调制电极(311、312、313)被施加的周期性调制信号具有 $2\pi/N$ 的相位差,其中N大于等于3。

7. 根据权利要求1-4中任一项所述的光调制结构,其特征在于,每组调制电极(3)包括沿所述第一延伸方向(P)依次布置的两个子调制电极(311、313),所述两个子调制电极被施加的周期性调制信号的相位差不等于 π 。

8. 根据权利要求2-4中任一项所述的光调制结构,其特征在于,与所述第一波导模式相比,所述第二波导模式是更高阶波导模式。

9. 根据权利要求1-4中任一项所述的光调制结构,其特征在于,所述光调制结构(1)适于使用兼容绝缘体上硅(SOI)技术和/或金属氧化物半导体(CMOS)技术的工艺来制备。

10. 一种光隔离器,其特征在于,包括:

光波导(2),具有第一端口(20)和第二端口(22),以及在所述第一端口(20)和所述第二端口(22)之间沿第一延伸方向(P)延伸的波导调制段(21);以及

多组调制电极(3),沿着所述波导调制段(21)的两侧周期性布置,其中每组调制电极(3)包括沿着所述第一延伸方向(P)依次布置的多个子调制电极(311、312、313),每个子调制电极(311、312、313)被定位在所述波导调制段(21)中的相应子波导调制段(21)的两侧,以用于对所述相应子波导调制段(21)的折射率进行调制;

其中每组调制电极(3)中的所述多个子调制电极(311、312、313)适于分别被施加频率相同但相位彼此不同的相应的多个周期性调制信号,而所述多组调制电极中的对应位置处的所述子调制电极(311、312、313)适于被施加所述多个周期性调制信号中的相同的一个周期性调制信号,以使得所述波导调制段(21)被调制成在时间-空间上沿所述光波导移动且具有折射率周期性变化的折射率光栅结构;

其中所述多个周期性调制信号中的每个周期性调制信号的电极调制频率 Ω 和所述折射率光栅结构的波矢 β 被配置为:允许沿所述光波导的所述第一延伸方向以第一波导模式传播的第一光信号在所述折射率光栅结构的调制下转换为仍以所述第一波导模式传播但频率有所不同的第二光信号,同时允许沿所述光波导的第二延伸方向以所述第一波导模式传播的所述第二光信号在所述折射率光栅结构的调制下转换为以第二波导模式传播的第三光信号,并以所述第二波导模式进行传播,所述第一延伸方向和所述第二延伸方向相反;

所述光波导(2)还包括:在所述第一端口(20)和所述波导调制段(21)之间的耗散段(23),所述耗散段(23)被设置在所述第一端口(20)和所述波导调制段(21)之间,用于对沿所述第二延伸方向传播的所述第三光信号进行耗散。

11. 根据权利要求10所述的光隔离器,其特征在于,所述电极调制频率 Ω 和所述折射率光栅结构的波矢 β 满足以下条件:

$$\frac{2\pi n_0(\omega_1)}{\lambda_1} - \frac{2\pi n_1(\omega_2)}{\lambda_2} = \beta$$

$$\omega_2 - \omega_1 = \Omega$$

其中 λ_1 和 ω_1 分别是所述第二光信号的波长和频率,而 λ_2 和 ω_2 分别是所述第三光信号的波长和频率,其中 n_0 为处于第一波导模式下的光波导随着光频率变化的有效折射率;而 n_1 为处于第二波导模式下的光波导随着光频率变化的有效折射率。

12. 根据权利要求10或11中任一项所述的光隔离器,其特征在于,每组调制电极中的沿所述第一延伸方向依次布置的所述多个子调制电极(311、312、313)被施加的相应的多个周期性调制信号的相位依次递增或递减。

13. 根据权利要求10或11中任一项所述的光隔离器,其特征在于,所述每组调制电极包括沿所述第一延伸方向依次布置的N个子调制电极(311、312、313),其中所述N个子调制电极(311、312、313)中的任意相邻的两个子调制电极(311、312、313)被施加的周期性调制信

号具有 $2\pi/N$ 的相位差,其中N大于等于3。

14. 根据权利要求10或11中任一项所述的光隔离器,其特征在于,每组调制电极(3)包括沿所述第一延伸方向(P)依次布置的两个子调制电极(311、313),所述两个子调制电极被施加的周期性调制信号的相位差不等于 π 。

15. 根据权利要求10或11中任一项所述的光隔离器,其特征在于,与所述第一波导模式相比,所述第二波导模式是更高阶波导模式。

16. 根据权利要求10或11中任一项所述的光隔离器,其特征在于,还包括:另一波导,所述另一波导(24)具有第一端(241)和第二端(242),所述另一波导(24)的与所述第一端邻近的波导段与所述耗散段(23)光学耦合,用以从所述耗散段(23)耦出所述第三光信号,所述第二端(242)用于作为光隔离器的第三端口(25)。

17. 一种光环形器,其特征在于,包括:

至少3个根据权利要求16所述的光隔离器(11),其中每个光隔离器(11)中的第一端口(20)与邻近的光隔离器的第三端口(25)彼此连接,由此多个光隔离器(11)彼此首尾相连的环形结构。

18. 一种光学设备,其特征在于,包括:

根据权利要求1-9中任一项所述的光调制结构、根据权利要求10-16中任一项所述的光隔离器、或根据权利要求17所述的光环形器。

光调制结构、光隔离器和光环形器

技术领域

[0001] 本公开的实施例涉及光调制领域,更具体地涉及一种光调制结构以及相关的光隔离器和光环形器。

背景技术

[0002] 光隔离器/环形器是一种双/多端口非互易光学器件,它对沿正向传输的光信号的衰减很小,但对反向传输的光信号衰减很大,并通过此非互易的传输特性来实现光路的单向传输。激光器/光放大器与光纤之间接入光隔离器,可以有效抑制线路中的杂散光以及光纤端面的反射光对激光器的影响,保证激光器工作状态的稳定,降低噪声系数对高速光通信系统显得尤为重要。实际上,在长距离光通信系统中,每隔一段距离就需要安装一个隔离器。没有高质量的隔离器/环形器,后向反射光在链路中的不断干扰将引起信号源的剧烈波动。

发明内容

[0003] 本公开的目的在于提供一种新颖的光调制结构以及基于该光调制结构的有所改进的光隔离器和光环形器。

[0004] 根据本公开的第一方面,提供了一种光调制结构。该光调制机构包括:光波导,沿第一延伸方向延伸并且具有波导调制段;多组调制电极,沿着所述波导调制段的两侧周期性布置,其中每组调制电极包括沿着所述第一延伸方向依次布置的多个子调制电极,每个子调制电极被定位在所述波导调制段中的相应子波导调制段的两侧,以用于对所述相应子波导调制段的折射率进行调制;其中每组调制电极中的所述多个子调制电极适于分别被施加频率相同但相位彼此不同的相应的多个周期性调制信号,而所述多组调制电极中的对应位置处的所述子调制电极适于被施加所述多个周期性调制信号中的相同一个的周期性调制信号,以使得所述波导调制段被调制成在时间-空间上沿着所述光波导移动且具有折射率周期性变化的折射率光栅结构。

[0005] 将会理解,利用本公开的光调制结构,可以实现光信号在不同方向传播的波导模式的不同调制,由此可以实现对不期望的波导模式的耗散,从而实现光信号在例如正向和反向的非互易性传播。基于该光调制结构的非互易性传播的原理,还可以进一步实现有所改进的光隔离器和光环形器。

[0006] 在一些实施例中,多个周期性调制信号中的每个周期性调制信号的电极调制频率 Ω 和所述折射率光栅结构的波矢 β 被配置为:允许沿所述光波导的所述第一延伸方向以第一波导模式传播的第一光信号在所述折射率光栅结构的调制下转换为仍以所述第一波导模式传播但频率有所不同的第二光信号,同时允许沿所述光波导的第二延伸方向以所述第一波导模式传播的所述第二光信号在所述折射率光栅结构的调制下转换为以第二波导模式传播的第三光信号,所述第一延伸方向和所述第二延伸方向相反。

[0007] 在一些实施例中,所述电极调制频率 Ω 和所述折射率光栅结构的波矢 β 被配置为

满足以下条件：

$$[0008] \quad \frac{2\pi n_0(\omega_1)}{\lambda_1} - \frac{2\pi n_1(\omega_2)}{\lambda_2} = \beta$$

$$[0009] \quad \omega_2 - \omega_1 = \Omega$$

[0010] 其中 λ_1 和 ω_1 分别是所述第二光信号的波长和频率，而 λ_2 和 ω_2 分别是所述第三光信号的波长和频率，其中 n_0 是处于第一波导模式下的光波导随着光频率变化的有效折射率；而 n_1 是处于第二波导模式下的光波导随着光频率变化的折射率。

[0011] 在一些实施例中，所述光波导还具有输入端以及耗散段，所述耗散段被设置在所述输入端和所述波导调制段之间，用于对沿所述第二延伸方向传播的所述第三光信号进行耗散。

[0012] 在一些实施例中，每组调制电极中的沿所述第一延伸方向依次布置的所述多个子调制电极被施加的相应的多个周期性调制信号的相位依次递增或递减。

[0013] 在一些实施例中，所述每组调制电极包括沿所述第一延伸方向依次布置的N个子调制电极，其中所述N个子调制电极中的任意相邻的两个子调制电极被施加的周期性调制信号具有 $2\pi/N$ 的相位差，其中N大于等于3。

[0014] 在一些实施例中，每组调制电极包括沿所述第一延伸方向依次布置的两个子调制电极，所述两个子调制电极被施加的周期性调制信号的相位差不等于 π 。

[0015] 在一些实施例中，与所述第一波导模式相比，所述第二波导模式是更高阶波导模式。

[0016] 在一些实施例中，所述光调制结构适于使用兼容绝缘体上硅技术和/或金属氧化物半导体技术的工艺来制备。

[0017] 根据本公开的第二方面，提供了一种光隔离器。该光隔离器包括：光波导，具有第一端口和第二端口，以及在所述第一端口和所述第二端口之间沿第一延伸方向延伸的波导调制段；以及多组调制电极，沿着所述波导调制段的两侧周期性布置，其中每组调制电极包括沿着所述第一延伸方向依次布置的多个子调制电极，每个子调制电极被定位在所述波导调制段中的相应子波导调制段的两侧，以用于对所述相应子波导调制段的折射率进行调制；其中每组调制电极中的所述多个子调制电极适于分别被施加频率相同但相位彼此不同的相应的多个周期性调制信号，而所述多组调制电极中的对应位置处的所述子调制电极适于被施加所述多个周期性调制信号中的相同的一个周期性调制信号，以使得所述波导调制段被调制成在时间-空间上沿所述光波导移动且具有折射率周期性变化的折射率光栅结构；其中所述多个周期性调制信号中的每个周期性调制信号的电极调制频率 Ω 和所述折射率光栅结构的波矢 β 被配置为：允许沿所述光波导的所述第一延伸方向以第一波导模式传播的第一光信号在所述折射率光栅结构的调制下转换为仍以所述第一波导模式传播但频率有所不同的第二光信号，同时允许沿所述光波导的第二延伸方向以所述第一波导模式传播的所述第二光信号在所述折射率光栅结构的调制下转换为以第二波导模式传播的第三光信号，并以所述第二波导模式进行传播，所述第一延伸方向和所述第二延伸方向相反；所述光波导还包括：在所述第一端口和所述波导调制段之间的耗散段，所述耗散段被设置在所述第一端口和所述波导调制段之间，用于对沿所述第二延伸方向传播的所述第三光信号进行耗散。

[0018] 在一些实施例中,所述电极调制频率 Ω 和所述折射率光栅结构的波矢 β 满足以下条件:

$$[0019] \quad \frac{2\pi n_0(\omega_1)}{\lambda_1} - \frac{2\pi n_1(\omega_2)}{\lambda_2} = \beta$$

$$[0020] \quad \omega_2 - \omega_1 = \Omega$$

[0021] 其中 λ_1 和 ω_1 分别是所述第二光信号的波长和频率,而 λ_2 和 ω_2 分别是所述第三光信号的波长和频率,其中 n_0 为处于第一波导模式下的光波导随着光频率变化的有效折射率;而 n_1 为处于第二波导模式下的光波导随着光频率变化的有效折射率。

[0022] 在一些实施例中,每组调制电极中的沿所述第一延伸方向依次布置的所述多个子调制电极被施加的相应的多个周期性调制信号的相位依次递增或递减。

[0023] 在一些实施例中,所述每组调制电极包括沿所述第一延伸方向依次布置的 N 个子调制电极,其中所述 N 个子调制电极中的任意相邻的两个子调制电极被施加的周期性调制信号具有 $2\pi/N$ 的相位差,其中 N 大于等于3。

[0024] 在一些实施例中,每组调制电极包括沿所述第一延伸方向依次布置的两个子调制电极,所述两个子调制电极被施加的周期性调制信号的相位差不等于 π 。

[0025] 在一些实施例中,与所述第一波导模式相比,所述第二波导模式是更高阶波导模式。

[0026] 在一些实施例中,该光隔离器还包括:另一波导,所述另一波导具有第一端和第二端,所述另一波导的与所述第一端邻近的波导段与所述耗散段光学耦合,用以从所述耗散段耦出所述第三光信号,所述第二端用于作为光隔离器的第三端口。

[0027] 根据本公开的第三方面,提供了一种光环形器。该光环形器包括:至少三个前述具有所述另一波导的光隔离器,其中每个光隔离器中的第一端口与邻近的光隔离器的第三端口彼此连接,由此多个光隔离器彼此首尾相连的环形结构。

[0028] 根据本公开的第四方面,提供一种光学设备。该光学设备包括:根据前述第一方面任一项所述的光调制结构、根据第二方面所述的光隔离器、或根据第三方面所述的光环形器。

[0029] 应当理解,发明内容部分中所描述的内容并非旨在限定本公开的实施例的关键或重要特征,亦非用于限制本公开的范围。本公开的其它特征将通过以下的描述变得容易理解。

附图说明

[0030] 结合附图并参考以下详细说明,本公开各实施例的上述和其他特征、优点及方面将变得更加明显。在附图中,相同或相似的附图标记表示相同或相似的元素,其中:

[0031] 图1示出了一种典型的基于法拉第磁光效应的自由空间型光隔离器的结构示意图;

[0032] 图2a示出了根据本公开的示例实施例的光调制结构的结构示意图;

[0033] 图2b示出了根据本公开的示例实施例的光调制结构中的各个子调制电极所施加的周期性调制信号的相位分布的示例;

[0034] 图3示出了根据本公开的示例实施例的光波导中的不同波导模式的跃迁的能带示

意图;

[0035] 图4a和图4b分别示出了根据本公开的示例实施例的光调制结构作为光隔离器在正向和反向实现非互易性传播的示意图;

[0036] 图5示出了根据本公开的示例实施例的光隔离器的隔离带宽随波长变化的示图;

[0037] 图6a示出了根据本公开的示例实施例的改造后的光隔离器的结构示意图;以及

[0038] 图6b示出了根据本公开的示例实施例的光环形器的结构示意图。

具体实施方式

[0039] 下面将参照附图更详细地描述本公开的实施例。虽然附图中显示了本公开的某些实施例,然而应当理解的是,本公开可以通过各种形式来实现,而且不应该被解释为限于这里阐述的实施例,相反提供这些实施例是为了更加透彻和完整地理解本公开。应当理解的是,本公开的附图及实施例仅用于示例性作用,并非用于限制本公开的保护范围。

[0040] 在本公开的实施例的描述中,术语“包括”及其类似用语应当理解为开放性包含,即“包括但不限于”。术语“基于”应当理解为“至少部分地基于”。术语“一个实施例”或“该实施例”应当理解为“至少一个实施例”。术语“第一”、“第二”等等可以指代不同的或相同的对象。下文还可能包括其他明确的和隐含的定义。

[0041] 众所周知的,光隔离器/环形器在本领域有广泛的应用。通常而言,光隔离器/环形器基于磁光效应来实现。图1示出了一种典型的基于法拉第磁光效应的自由空间型光隔离器的结构示意图。如图1所示,该自由空间型光隔离器主要包括法拉第旋光片和两个偏振片,其中两个偏振片的光轴成 45° 夹角。其工作原理如下:正向入射的线偏振光的偏振方向沿偏振片1的透光轴方向,经过法拉第旋光片时会逆时针旋转 45° ,而旋转后的光的偏振态正好与偏振片2一致,即可以透射输出;而当反射光从偏振片2输入时,经过法拉第旋光片会逆时针旋转 45° ,从而与偏振片1的透光轴相垂直,导致无法透过,形成隔离。

[0042] 尽管自由空间型光隔离器的实现原理较为简单,但不足也十分明显。第一,此类型隔离器器件的尺寸较大,长度普遍在10-cm左右,因此主要以分立器件的形式存在,不利于集成。其次,由于是分立型器件,成本很难进一步降低。第三,基于旋光效应的光隔离器需要特殊的旋光材料,例如石英晶体,或者由基于磁致旋光效应的磁铁材料参与。但不论是基于哪种材料,自由空间型光隔离器都无法满足未来片上集成的技术趋势需求,在架构上限制着光通信器件/系统的创新和进一步发展。

[0043] 本公开的目的在于提出一种新颖的光调制结构以及基于该光调制结构的有所改进的光隔离器和光环形器。

[0044] 为了更好地理解本公开的方案的设计原理,图2a示出了根据本公开的示例实施例的光调制结构的示意图。如图2a所示,本公开的光调制结构1可以主要包括沿第一延伸方向P延伸的光波导2,以及周期性地分布在光波导2的两侧的多组调制电极3。这里,由于多组调制电极3旨在对光波导2的折射率进行调制,因此与多组调制电极3相对应布置的光波导段又可以被称为波导调制段21。

[0045] 为了保证上述波导调制段21的上述折射率调制,在一些示例中,光波导2的材料可以例如为硅、氮化硅、铌酸锂、二氧化硅。此外,本公开并不限制光波导2的结构,其例如可以是条形波导或脊波导,等。

[0046] 根据本公开的设计,多组调制电极3的数目N可以大于或等于2。仅作为示例,如图2所示,所述多组调制电极3可以包括沿着波导调制段21依次布置的第一组调制电极31、第二组调制电极32、……、以及第N组调制电极。

[0047] 进一步地,每组调制电极可以包括沿着第一延伸方向P依次布置的多个子调制电极,并且每个子调制电极被定位在所述波导调制段中的相应子波导调制段的两侧,以用于对所述对应子波导调制段的折射率进行调制。具体地,每个子调制电极可以例如由定位在对应的子波导调制段的相对侧的两个电极段来实现。由此,可以通过向这两个电极段施加不同的电平来产生作用于对应子波导调制段的电场,从而引起子波导调制段以及由此整个波导调制段21上的折射率的调制。仅作为示例,可以例如向每个子波导调制段一侧的电极段施加周期性的正电平(例如,1V),而将每个子波导调制段另一侧的电极段接地(即,0V)或者周期性的负电平(例如,-1V)来产生电场。

[0048] 一般而言,每组调制电极中的多个子调制电极的数目可以至少为3个,然而在一些实施例中,如果巧妙设计多个子调制电极沿光波导的相对位置,使得后面所要进一步讨论的折射率光栅的波矢方向也能够被标识的话,那么,每组调制电极仅包括2个子调制电极也是有可能的。此外,不同组调制电极中的多个子调制电极的数目一般是相同的,但这也并非限制的。在其他实施例中,不同组调制电极中的多个子调制电极的数目彼此不同也是有可能的。

[0049] 仅作为示例,如图2a所示,第一组调制电极31可以包括沿第一延伸方向P依次布置的多个子调制电极311、312、313;而第二组调制电极32可以包括沿着第一延伸方向P依次布置的多个子调制电极321、322、323,依次类推。

[0050] 将会理解,本公开的光调制结构的构思即在于:向每组调制电极中的多个子调制电极分别施加频率相同但相位彼此不同的相应的多个周期性调制信号,以及向多组调制电极中的对应位置处的所述子调制电极施加所述多个周期性调制信号中的相同一个的周期性调制信号,来使得所述波导调制段被调制成在时间-空间上沿着所述光波导移动且具有折射率周期性变化的折射率光栅结构。以这种方式,可以实现光信号在波导中的不同方向的非互易性传播。利用这种光调制结构的非互易性传播的特性,可以随后制备相关的光隔离器和光环形器。

[0051] 在一些实施例中,上述多个周期性调制信号的数目通常与每组调制电极中的多个子调制电极的数目是相同。

[0052] 根据本公开的设计,上述多个周期性调制信号之间的电极调制频率相同,但相位彼此不同。此外,这多个周期性调制信号的幅度可以相同或不同。在一些实施例中,针对每组调制电极中的沿所述第一延伸方向依次布置的N个子调制电极的相位可以递增或递减。在又一些实施例中,每组调制电极在包括沿所述第一延伸方向依次布置的N个子调制电极的情况下,任意相邻的两个子调制电极被施加的周期性调制信号可以具有 $2\pi/N$ 的相位差,其中N大于等于3。

[0053] 仅作为示例,如图2a所示,在每组调制电极包括3个子调制电极的情况下,可以设置对应的3条信号控制线路,以提供3个不同的周期性调制信号。此外,这3个不同的周期性调制信号分别向N组调制电极中的对应位置的所有子调制电极供给同一个周期性调制信号。特别地,这3个不同的周期性调制信号的幅度相同,但相位差为120度。图2b示出了根据

本公开的光调制结构的各个子调制电极所施加的周期性调制信号的相位分布的示例。

[0054] 如前所述的,每组调制电极中一般至少包括3个子调制电极,以在对光波导上的3个子波导调制段进行调制时,便于标识折射率光栅的波矢方向;但一些特别设计下,每组调制电极包括2个子调制电极也是有可能的,此时,这2个子调制电极之间的相位差例如需要不等于 π ,或者,譬如将图2a中的仅包括3个子调制电极中的每组调制电极中的中间子调制电极(例如,312、322、332,等)去掉,但仍保留每组调制电极中的另外两个子调制电极的位置也是可行的。

[0055] 在一些实施例中,上述多个周期性调制信号可以通过RF信号发射器4来产生,每个周期性调制信号的电极调制频率均为 Ω 。在一些实施例中,上述多个周期性调制信号之间的相位差可以由移相器5在各自链路中调整,从而使得该多个周期性调制信号之间形成预定的相位差。

[0056] 将会理解,受多个子调制电极的多个对应周期性调制信号的电场调控作用,多个子调制电极所对应的子波导调制段的折射率将会在光波导的延伸方向(即空间上)上呈周期性分布,即形成一个类似布拉格光栅的折射率分布;与此同时,每一个子波导调制段的折射率也将会在时间上进行周期性调制。也就是说,本公开的整个波导调制段将会在空间和时间两者上被调制(即STM)。由于这种STM调制,可以在时间-空间上沿着所述光波导移动且具有折射率周期性变化的折射率光栅结构。

[0057] 假设上述折射率光栅结构的光栅周期为 Λ ,上述多个周期性调制信号的周期性调制信号的频率均为 Ω ,那么上述折射率光栅在时间-空间上将会以速度 $v = \Lambda \Omega$ 向前或向后(取决于每组调制电极中的多个子调制电极之间的时延是正或负)匀速移动。同时,该折射率光栅的波矢 β 可以表示为 $\beta = 2\pi/\Lambda$,此光栅对入射到其中的光信号将起到时间-空间的调制效果。

[0058] 将会理解,通过配置上述多个周期性调制信号中的每个周期性调制信号的电极调制频率 Ω 和折射率光栅结构的波矢 β ,该光调制结构将会具有允许光信号在光波导中的正向和反向传播中所处的波导模式有所变化的特性。譬如,通过配置上述多个周期性调制信号中的每个周期性调制信号的电极调制频率 Ω 和所述折射率光栅结构的波矢 β ,可以允许沿所述光波导的所述第一延伸方向以第一波导模式传播的第一光信号在所述折射率光栅结构的调制下转换为仍以所述第一波导模式传播但频率有所不同的第二光信号,同时允许沿所述光波导的第二延伸方向以所述第一波导模式传播的所述第二光信号在所述折射率光栅结构的调制下转换为以第二波导模式传播的第三光信号,其中所述第一延伸方向和所述第二延伸方向相反。

[0059] 下面将参照图3来简单地介绍本公开的光调制结构中的光信号在正向和反向传播中所处的波导模式有所变化的原理,其中图3示出了根据本公开的示例实施例的光波导中的不同波导模式的跃迁的能带示意图。

[0060] 如图3所示,不失一般性,假设一束频率为 ω_0 的处于第一波导模式(譬如,基模TE₀)的第一光信号沿光波导的正向(例如,第一延伸方向)与输入,那么第一光信号在经过上述折射率光栅结构的时间-空间调制下,将会产生一个频率为 $\omega_0 + \Omega$ 的边带。同时,上述折射率光栅会向光子施加波矢 β 。根据本公开的设计,上述 Ω 和 β 的值可以被配置为使得上述 $\Omega + \beta$ 的矢量和所指向的能带图中的位置没有存在对应的波导特征模式,这意味着:上述

时间-空间调制信号只会对上述第一光信号进行频率为 $\omega_1 = \omega_0 + \Omega$ 的边带调制,并产生仍沿所述第一波导模式(譬如,基模TE0)传播的第二光信号,后者将可以以该第一波导模式输出光波导。另一方面,当上述第二光信号沿光波导的反向(例如,第二延伸方向)输入(譬如,存在反射)时,第二光信号在经过上述折射率光栅结构的时间-空间调制下,将同样受到上述 $\Omega + \beta$ 的矢量和的作用,而上述 Ω 和 β 的值还可以被配置成使得上述 $\Omega + \beta$ 的矢量和所指向的能带图中的位置恰好对应第二波导模式(例如,TE2)。应当理解,在这种情况下,上述第二光信号将会转换为仍在反向(例如,第二延伸方向)传播方向上但变化为第二波导模式传播的第三光信号。

[0061] 从图3的能带示意图,可以看出:要实现上述光信号在正向和反向传播中所处的波导模式的上述变化,其需要满足以下的相位匹配关系和频率匹配关系:

$$[0062] \quad \frac{2\pi n_0(\omega_1)}{\lambda_1} - \frac{2\pi n_1(\omega_2)}{\lambda_2} = \beta \quad (1)$$

$$[0063] \quad \omega_2 - \omega_1 = \Omega \quad (2)$$

[0064] 其中 λ_1 和 ω_1 分别是上述第二光信号的波长和频率,而 λ_2 和 ω_2 分别是上述第三光信号的波长和频率,其中 n_0 是处于第一波导模式下的光波导随着光频率变化的有效折射率;而 n_1 为处于第二波导模式下的光波导随着光频率变化的折射率。

[0065] 换句话说,一旦上述电极调制频率 Ω 和折射率光栅结构的波矢 β 被配置为满足上述相位匹配和频率匹配关系时,沿第二延伸方向(例如,反向)输入的第二光信号就可以从频率 ω_1 的第一波导模式(例如,TE0)跃迁为频率为 ω_2 的沿相同方向传播的第二波导模式(例如,TE2)。一般而言,在一些实施例中,与所述第一波导模式相比,第二波导模式是更高阶的波导模式。但这并非限制,在又一些实施例中,与所述第一波导模式相比,第二波导模式是更低阶的波导模式也是可能的。

[0066] 将会理解,可以利用上述光信号在正向和反向传播中所处的波导模式的不同,来对不期望的波导模式进行耗散,从而实现光信号在正向和反向的非互易性传播。

[0067] 图4a和图4b分别示出了根据本公开的示例实施例的光调制结构作为光隔离器在正向和反向实现非互易性传播的示意图。注意,为了方便起见,其中的光调制结构1仅示出具有与一组调制电极的长度(或一个光栅周期 Λ) 相对应的波导调制段21。应当理解,在实际的光调制结构中,其可以有与更多调制电极的长度相对应的波导调制段21。

[0068] 如图4a和图4b所示,除了波导调制段21之外,该光波导2还可以包括作为第一端口20的输入端、作为第二端口22的输出端以及耗散段23,其中耗散段23被设置在上述输入端和所述波导调制段21之间,用于对沿所述第二延伸方向传播的所述第三光信号进行耗散。典型地,耗散段23可以是朝向输入端的尺寸渐缩的绝热光导段。

[0069] 如图4a所示的正向传播的示图中,从第一端口20沿第一延伸方向(例如,正向)输入的光信号所对应的波导模式(例如,第一波导模式TE0,见图4a中的光场图片)在经过整个光导过程中仍然保持不变;而如图4b所示的正向传播的示图中,从第二端口23沿第二延伸方向(或反向上)的光信号在波导调制段21的调制下将从第一波导模式(例如,TE0)转换为第二波导模式(例如,TE2),而处于第二波导模式下的光信号在耗散段23的作用下,将会被耗散掉,从而没有任何光信号可以从第一端口20反向输出。

[0070] 也就是说,利用上述耗散段,本公开的上述光调制结构1可以实现正向透射传输,

反向耗散的功能。可以理解,在上述情况下,上述光调制结构1可以用作光隔离器10。

[0071] 下面简单描述一下该光隔离器10的一些性能参数。例如,上述光隔离器的隔离度受到耦合效率的影响,其耦合效率可以表示为:

$$[0072] \quad \eta = 4\kappa_2^2 \left(\frac{\gamma - \frac{\Delta\beta}{2}}{\Delta} \right) \sin^2(\gamma z) \quad (3)$$

[0073] 其中 κ_2 为第一波导模式(例如TE0)向第二波导模式(例如,TE2)的耦合系数; $\Delta\beta = \beta(\omega_2) - \beta(\omega_1) - \beta$ 为调制后的第二波导模式(例如,TE2)与输入的第一波导模式(例如TE0)和移动的折射率光栅的波矢差。此外, $\gamma = \sqrt{\kappa_1\kappa_2 + (\Delta\beta/2)^2}$, $\Delta = \kappa_1\kappa_2 + (\gamma - \Delta\beta/2)^2$, κ_1 为第二波导模式(例如,TE2)向第一波导模式(例如TE0)的耦合系数。当相位匹配完全时,耦合效率会简化为:

$$[0074] \quad \eta = \frac{\kappa_2}{\kappa_1} \sin^2(\gamma z) \quad (4)$$

[0075] 可以理解,在特定波导长度 z 下,沿第二延伸方向(例如,反向)传输的第一波导模式(例如TE0)的光信号会100%转化为第二波导模式(例如,TE2),从而实现完全隔离。

[0076] 隔离器的隔离带宽则与第一波导模式(例如TE0)和第二波导模式(例如,TE2)的群折射率差相关,具体可以表示为:

$$[0077] \quad \Delta\omega = \frac{5.56(c/L)}{|n_{g,1} - n_{g,2}|} \quad (5)$$

[0078] 其中 L 为隔离器中的光波导长度, $n_{g,i}$ 为第 i 个模式的群折射率, c 为光速。由此可见第一波导模式(例如TE0)和第二波导模式(例如,TE2)之间的群折射率的差越小,器件长度越短,隔离器的隔离带宽越宽。图5示出了根据本公开的示例实施例的光隔离器的隔离带宽随波长变化的示图。

[0079] 应当理解,光隔离器的带宽不是无限的,其具体地取决于隔离器的光波导模式群折射率的色散表现。通过设计光波导结构,可以使得第一波导模式(例如TE0)和第二波导模式(例如,TE2)之间的群折射率在尽可能长的波长区间内满足相位匹配关系,就可以尽可能拓宽隔离器的隔离带宽。另一方面,通过增加时空调制效率,降低光波导长度 L ,也可以增加隔离器带宽。

[0080] 此外,除了适配上述参数,还可以通过适配前面提及的时空调制的频率 Ω (如图3中矢量箭头的纵向长度)和/或波矢 β 的长度(如图3中矢量箭头的横向长度)而使得隔离器在任意波长实现隔离波长和带宽可调。

[0081] 以上已经详细介绍了光隔离器的具体实现,本公开还可以基于改造后的上述光隔离器来实现光环形器的功能。

[0082] 图6a示出了根据本公开的示例实施例的改造后的光隔离器11的结构示意图。类似地,为了方便起见,其中的光调制结构1仅示出具有与一组调制电极的长度(或一个光栅周期 Λ)相对应的波导调制段21。应当理解,在实际的光调制结构1中,其可以有与更多调制电极的长度相对应的波导调制段21。

[0083] 与图4a和图4b所示的光隔离器10的结构相比,图6a中所示的改造后的光隔离器11还具有另一波导24,该另一波导24具有第一端241和第二端242,其中上述另一波导24的与第一端242邻近的波导段(或可以称为耦合波导段26)可以被构造成与上述耗散段23光学耦

合,用以从耗散段23耦出前面所提及的第三光信号,并且上述第二端242可以用作光隔离器11的第三端口25。

[0084] 也就是说,改造后的光隔离器11成为一个三端口器件。在一些实施例中,如果令沿第二延伸方向(例如,反向)以第一波导模式(例如,TE0)传播的光从第二端口22输入,那么在波导调制段21的时空调制下,其可以从第一波导模式(例如,TE0)跃迁为第二波导模式(例如,TE2)。由于前面另一波导24中的耦合波导段26的存在,则上述第二波导模式的光信号会从耗散段23耦合至另一波导24中的耦合波导段26,并经由第三端口25输出。在又一些实施例中,耦合波导段26还可以将耦入的第二波导模式的光信号转换为以第一波导模式传播的光信号,并且在上述第三端口25输出。

[0085] 也就是说,上述耗散段23和耦合波导段26两者的布置可以构成模式耦合器。由于模式耦合器的存在,从第二端口22输入的光无法从第一端口20输出;而沿第一延伸方向(例如,反向)以第一波导模式传播的光从第一端口20输入时,上述模式耦合器无法将第一波导模式(例如,TE0)耦合为第二波导模式(例如,TE2)并从第三端口25输出,亦无法将第一波导模式(例如,TE0)转化为第二波导模式(例如,TE2)输入至光隔离器的波导调制段21。

[0086] 另外,从第一端口20输入的以第一波导模式(例如,TE0)传播的光不会受模式耦合器的限制,而仍会以第一波导模式(例如,TE0)输入至波导调制段21。由于波导调制段21的布拉格光栅折射率分布的移动具有方向性,当满足从第二端口22输入第一波导模式(例如,TE0)向第二波导模式(例如,TE2)跃迁的相匹配关系时,就无法同时满足从第一端口20输入第一波导模式(例如,TE0)向右传播的第二波导模式(例如,TE2)跃迁的相位匹配关系。因此,从第一端口输入的第一波导模式(例如,TE0)仍会以第一波导模式(例如,TE0)输出至第二端口22。

[0087] 利用上述三端口的光隔离器11,可以进一步构造产生光环形器30。例如,可以将多个光隔离器11首尾相连而形成该光环形器30,其中上述多个光隔离器的数目至少为3个。具体地,譬如可以将上述至少3个光隔离器中的每个光隔离器中的第一端口与邻近的下一个光隔离器的第三端口彼此连接来产生。

[0088] 图6b示出了根据本公开的示例实施例的光环形器的结构示意图。仅作为示例,在图6b中,该光环形器30可以由4个上述改造的光隔离器11来形成。

[0089] 例如,上述4个改造的光隔离器11可以依照顺时针来首尾相连,其中第一光隔离器11-1中的第三端口25可以连接到顺时针下游的第二光隔离器11-2的第一端口20,而第二光隔离器11-2中的第三端口25可以连接到顺时针下游的第三光隔离器11-3的第一端口20,接着,第三光隔离器11-3中的第三端口25可以连接到顺时针下游的第四光隔离器11-4的第一端口20;最后,第四光隔离器11-4的第三端口25可以连接到第一光隔离器11-1中的第一端口20。也就是说,光环形器30可以具有4个上述改造的光隔离器11的4个第二端口22作为该光环形器30的输入/输出端口41-44。

[0090] 不失一般性,如果端口41被输入第一波导模式(例如,TE0)的光信号时,输出光信号仍会以第一波导模式(例如,TE0)从第一光隔离器11-1中的第三端口25输出,并直接输入到第二光隔离器11-2的第一端口20,而后从光环形器30的端口42以第一波导模式(例如,TE0)输出。而第一波导模式(例如,TE0)的光信号从光环形器30的端口42输入时,光信号会从第二光隔离器11-2的第三端口25以第一波导模式(例如,TE0)输出至光环形器30的端口

43所在的第三光隔离器11-3的第一端口20,并最终以第一波导模式(例如,TE0)从光环形器30的端口43输出。依次类推,此环形器结构可以实现从光环形器30的端口41至端口44的顺时针光传输功能。

[0091] 应当理解,上述顺时针的连接仅仅是示例,在其他实施例中,以逆时针进行连接也是可能的。此外,取决于应用需要(例如,对光环形器的输入/输出端口的数目的要求),用于实现光环形器的光隔离器11的数目也可以有所不同。

[0092] 以上已经详细地介绍了本公开的光调制结构,以及基于本公开的光调制结构的原理而实现的光隔离器和光环形器。应当理解,通过本公开所阐述的设计方法,可以实现在芯片尺度($\sim$ cm)下的超紧凑的光调制结构和光隔离技术,这可以有效降低器件尺寸。此外,与现有旋光隔离器以及磁致旋光隔离器相比,本公开所涉及的隔离器/环形器不需要正常SOI或者CMOS兼容工艺以外的任何特殊工艺或特殊材料。因此,本公开可以实现与众多光电器件的片上集成(例如与激光器直接集成)、片上光放大器的直接集成、与调制器的集成和与光探测器的直接集成,等等。当实现与众多现有器件直接集成后,光隔离器的电封装,光纤耦合进出等结构就可以被省略,这进一步减小器件互联之间的插损。

[0093] 还应当理解,本公开的通过光调制结构的参数可调,这允许隔离器可在各个任一波长实现隔离/环形功能,灵活性远高于现有技术,由此可以在不同场景下实现器件的复用。此外,特殊的旋光材料或者表现出磁致旋光特性的磁铁材料的光隔离机制,其制备成本和良率都有很大风险;与此不同,本公开利用现有材料工艺,可以提高产品良率,并降低成本。

[0094] 还应当理解,本公开的光调制结构、光隔离器和光环形器还可以作为其他光学设备的一部分。

[0095] 虽然已经在附图和前述描述中详细说明和描述了本发明,但这些说明和描述应被认为是说明性的或示例性的而不是限制性的;本发明不限于所公开的实施例。本领域技术人员在实践所请求保护的发明中,通过研究附图、公开和所附权利要求可以理解并且实践所公开的实施例的其它变体。

[0096] 在权利要求中,词语“包括”并不排除其它元件,并且不定冠词“一”或“一个”不排除多个。单个元件或其它单元可以满足在权利要求中阐述的多个项目的功能。仅在互不相同的实施例或从属权利要求中记载某些特征的仅有事实,并不意味着不能有利地使用这些特征的组合。在不脱离本申请的精神和范围的情况下,本申请的保护范围涵盖在各个实施例或从属权利要求中记载的各个特征任何可能组合。

[0097] 此外,在权利要求中的任何参考标记不应被理解为限制本发明的范围。

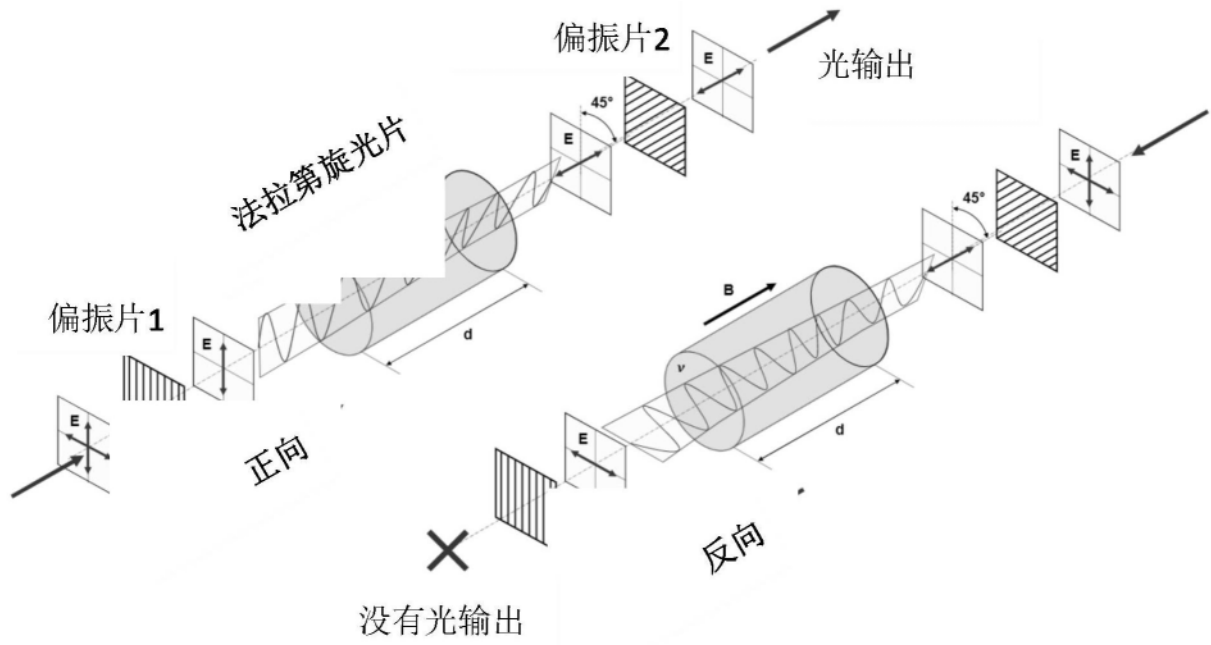


图1

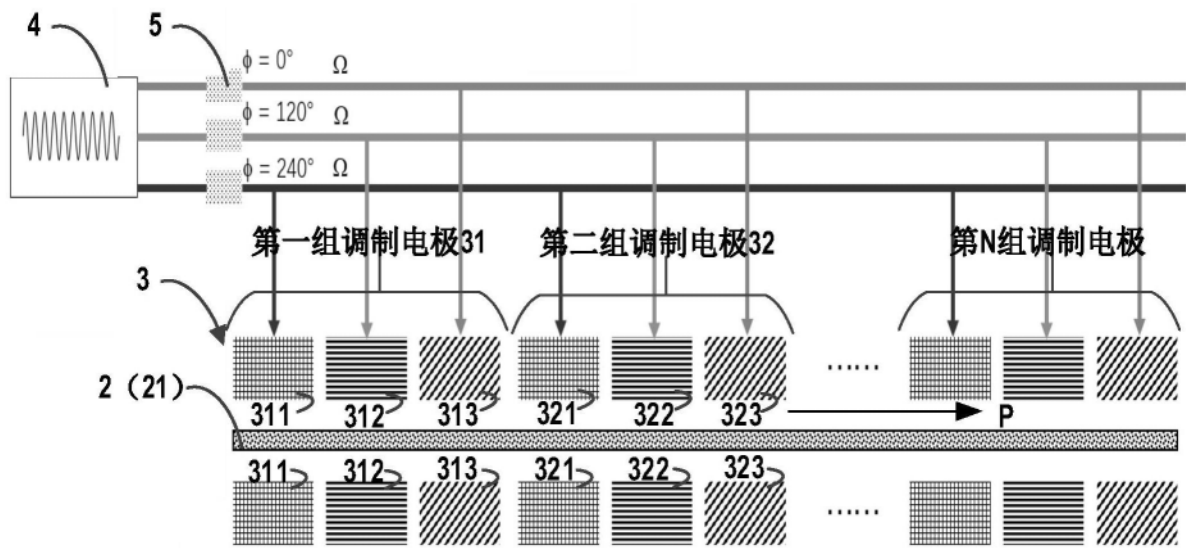


图2a

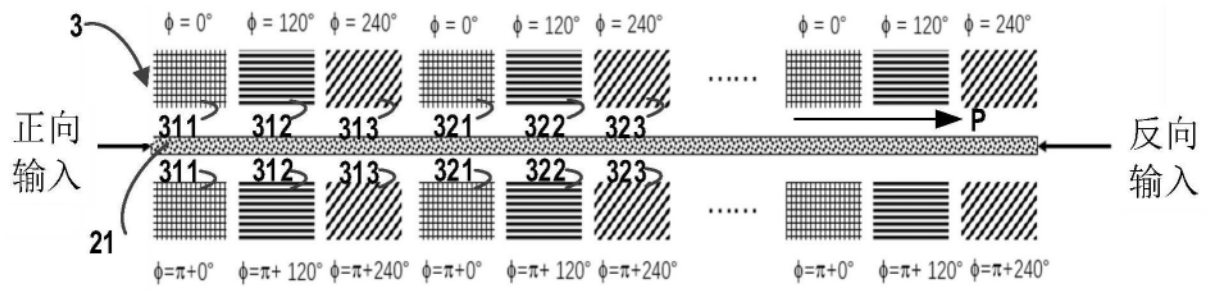


图2b

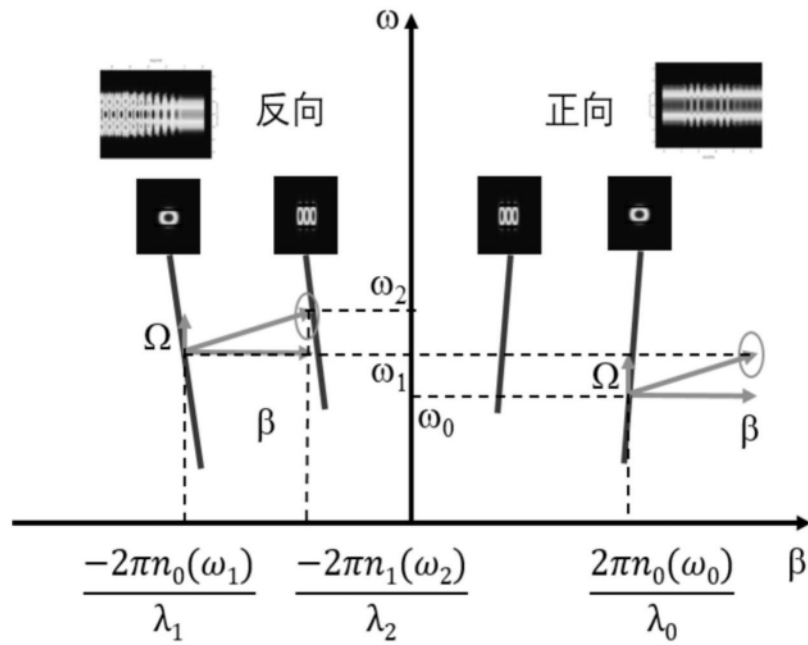


图3

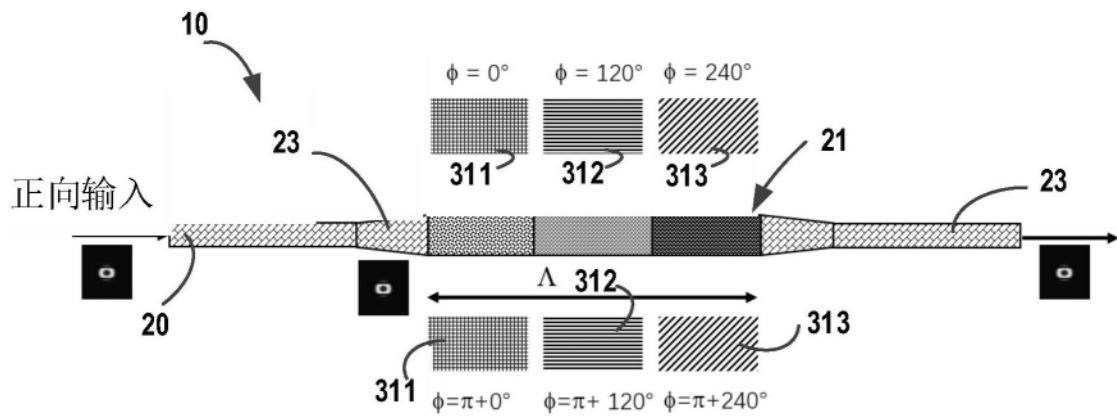


图4a

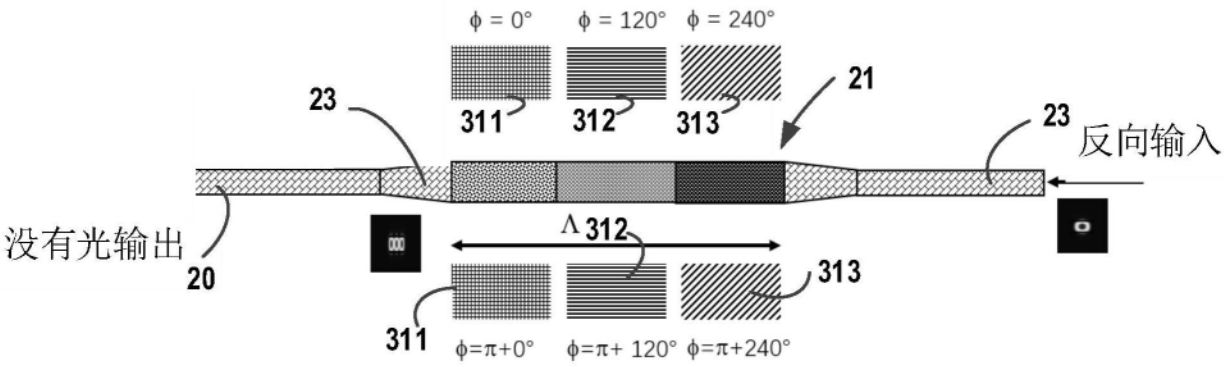


图4b

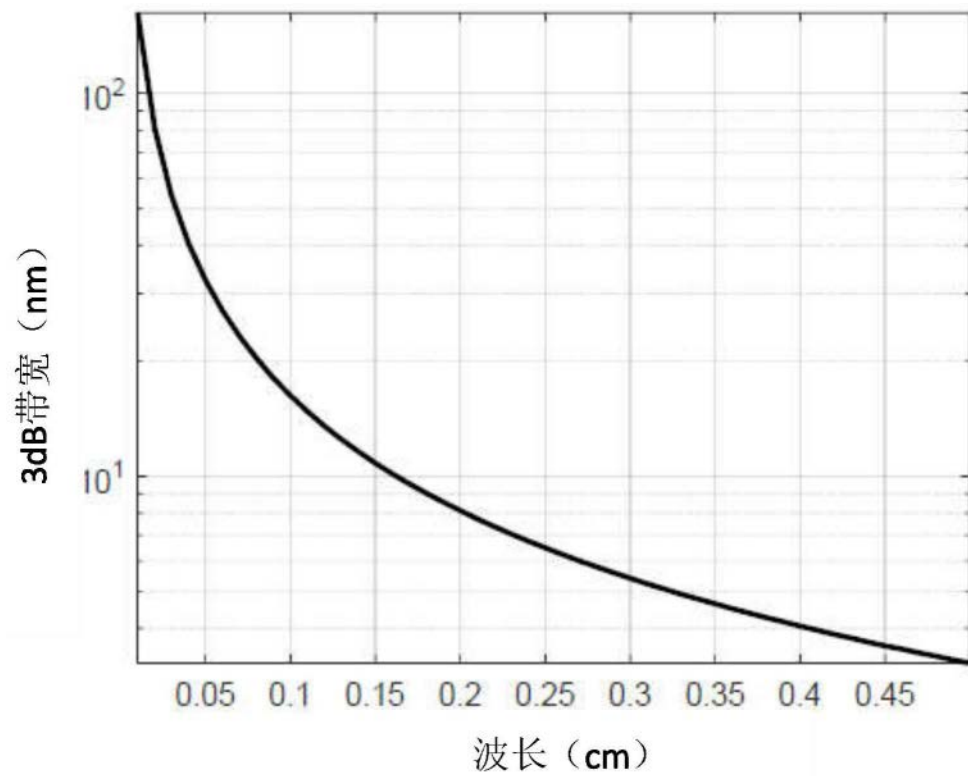


图5

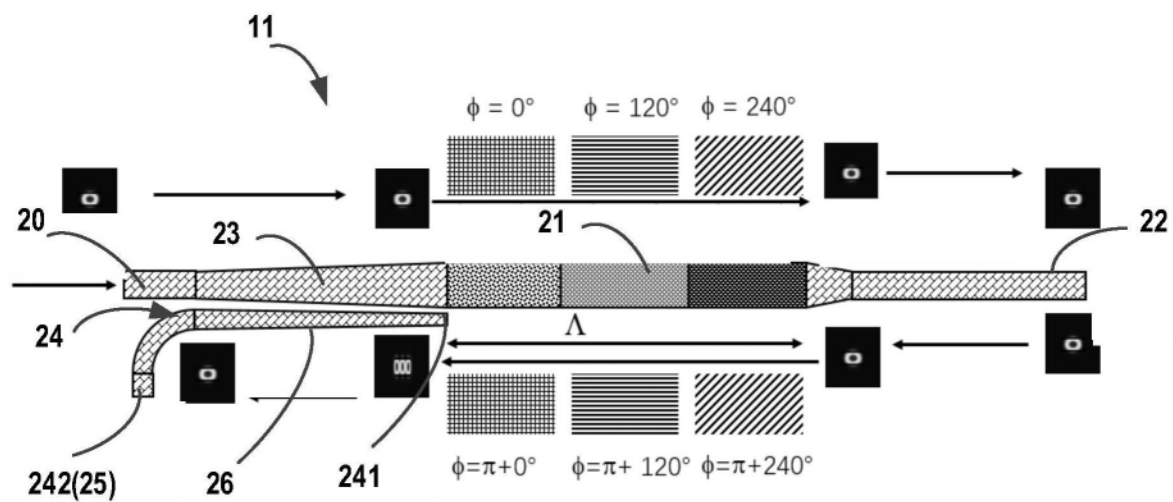


图6a

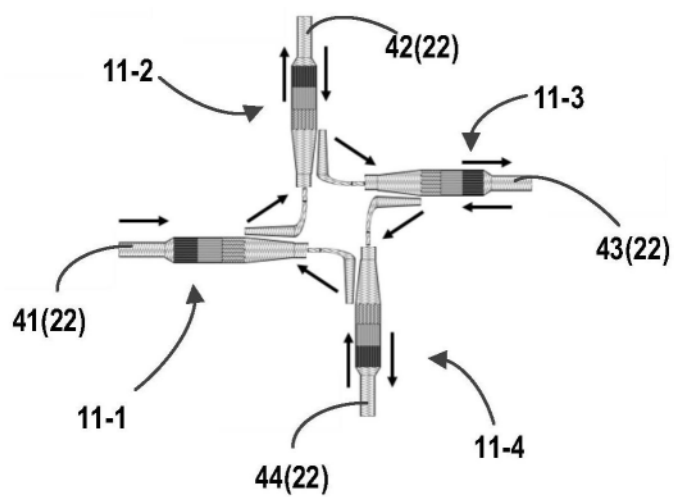


图6b