



(21) 申请号 202511204420.6

(22) 申请日 2025.08.27

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 120686411 A

(43) 申请公布日 2025.09.23

(73) 专利权人 上海图灵智算量子科技有限公司
地址 201210 上海市浦东新区中国(上海)
自由贸易试验区芳春路400号1幢3层
专利权人 图灵智算量子科技(无锡)有限公
司

(72) 发明人 陈家琪 赵晨明 彭于权 战永兴
杨林

(74) 专利代理机构 北京布瑞知识产权代理有限
公司 11505
专利代理师 张云鹏

(51) Int.Cl.

G02B 6/293 (2006.01)

G02F 1/21 (2006.01)

G06N 10/00 (2022.01)

(56) 对比文件

US 2023168076 A1, 2023.06.01

US 2011102804 A1, 2011.05.05

审查员 裴芳莹

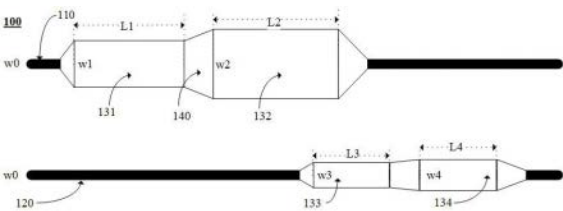
权利要求书2页 说明书9页 附图5页

(54) 发明名称

一种光学滤波器、波分复用装置及光量子计
算机

(57) 摘要

本申请提供一种光学滤波器、波分复用装置及光量子计算机,涉及集成光学领域。本申请提供的光学滤波器基于马赫曾德尔干涉仪原理配置而具有两条波导,每个波导中具有多个移相器。为克服光学滤波器工艺误差与温度误差,对前述移相器的长度进行约束以使两侧的移相器的有效折射率在温度变化下的数值波动与长度的乘积和相等且移相器的有效折射率在宽度变化下的数值波动与长度的乘积和相等,以克服工艺误差与温度波动对光学滤波器的影响,提高了光学滤波器的稳定性。此外,考虑到前述限定条件的可解性,前述移相器可以至少具有三种波导宽度(优选为四种),以使前述约束能实际实现。



1. 一种光学滤波器,其特征在于,包括第一波导以及第二波导,其中,所述第一波导以及所述第二波导形成马赫曾德尔干涉结构;

所述第一波导包括第一移相器组,所述第二波导包括第二移相器组,其中,所述第一移相器组与所述第二移相器组中的各个移相器至少具有三种不同波导宽度;

所述第一移相器组中各个移相器的有效折射率的第一波动因子与对应移相器的纯移相臂长度的乘积和等于所述第二移相器组中各个移相器的有效折射率的第一波动因子与对应移相器的纯移相臂长度的乘积和;所述第一移相器组中各个移相器的有效折射率的第二波动因子与对应移相器的纯移相臂长度的乘积和等于所述第二移相器组中各个移相器的有效折射率的第二波动因子与对应移相器的纯移相臂长度的乘积和,其中,所述第一波动因子反映有效折射率在温度变化下的数值波动,所述第二波动因子反映有效折射率在移相器的波导宽度变化下的数值波动。

2. 根据权利要求1所述的光学滤波器,其特征在于,对于所述第一移相器组中的任意移相器*i*与所述第二移相器组中的任意移相器*j*,满足如下要求:

$$\begin{cases} \sum \left(\frac{\partial n_{effi}}{\partial T} * L_i \right) = \sum \left(\frac{\partial n_{effj}}{\partial T} * L_j \right) \\ \sum \left(\frac{\partial n_{effi}}{\partial w} * L_i \right) = \sum \left(\frac{\partial n_{effj}}{\partial w} * L_j \right) \\ FSR = \lambda^2 / (\sum (n_{gi} * L_i) - \sum (n_{gj} * L_j)) \\ \sum (n_{effi} * L_i) - \sum (n_{effj} * L_j) = m\lambda \end{cases};$$

其中,*w*为对应移相器的波导宽度,*L*为对应移相器的纯移相臂长度, n_{eff} 为对应移相器的波导的有效折射率, n_g 为对应移相器的波导的群折射率, λ 为中心波长,*m*为任意偶数,FSR为赫曾德尔干涉结构的自由光谱范围,*T*为温度。

3. 根据权利要求1所述的光学滤波器,其特征在于,所述波导包括上游移相区段、连接区段以及下游移相区段,其中,所述连接区段的两端分别连接所述上游移相区段以及所述下游移相区段;

所述上游移相区段与所述下游移相区段内基于所述连接区段对称设置至少一个移相结构对,所述移相结构对包括分别设置在所述上游移相区段与所述下游移相区段的两个等长等宽的移相结构,所述移相结构对与一个移相器对应且所述移相结构对中移相结构的总长度与对应的移相器的纯移相臂长度匹配。

4. 根据权利要求1所述的光学滤波器,其特征在于,所述第一波导以及所述第二波导还包括多个宽度过渡结构,所述宽度过渡结构至少设置在波导宽度变化的区段间。

5. 根据权利要求4所述的光学滤波器,其特征在于,所述第一波导的宽度过渡结构组与所述第二波导的宽度过渡结构组中的各个宽度过渡结构的数量、类型及排布顺序均相同。

6. 根据权利要求1所述的光学滤波器,其特征在于,所述光学滤波器包括宽度不同的多个移相臂对,所述移相臂对中的两个移相臂以相同的波导宽度以及不同的波导程度分别设置在所述第一波导以及所述第二波导,且被配置为目标波导中的移相器;

其中,所述目标波导为所述移相臂对在所述第一波导与所述第二波导中移相臂长度较长的一个,所述移相器的纯移相臂长度为对应移相臂对在两个波导中长度的差值。

7. 根据权利要求6所述的光学滤波器,其特征在于,所述第一波导以及所述第二波导中所述多个移相臂对中的各个移相臂的设置顺序相同且所述多个移相臂中的各个移相臂的

较短长度相同。

8. 根据权利要求1所述的光学滤波器,其特征在于,所述第一波导以及所述第二波导均包括宽度相同的支路本体结构,其中,所述第一波导的支路本体结构与所述第二波导的支路本体结构的长度不同而使所述支路本体结构在长度较长的波导中基于长度差形成一个移相器。

9. 一种波分复用装置,其特征在于,所述波分复用装置至少包括多个根据权利要求1到8中任一权利要求所述的光学滤波器,多个所述光学滤波器基于不同的中心波长级联而分离输入光束的不同波长信号。

10. 一种光量子计算机,其特征在于,所述光量子计算机包括单光子源、光量子芯片及单光子探测器,所述单光子源、所述光量子芯片及所述单光子探测器中的一个或多个包括如权利要求1-8中任意一项所述的光学滤波器。

一种光学滤波器、波分复用装置及光量子计算机

技术领域

[0001] 本申请涉及集成光学技术,具体涉及一种光学滤波器、波分复用装置及光量子计算机。

背景技术

[0002] 光学滤波器是集成光学(即光学集成电路)领域的重要器件。较为常用的光学滤波器为马赫曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI),其主要依靠两个不等长的移相臂来实现滤波。即光束经过两个不等长的移相臂后形成相位差而形成干涉,以进行初步滤波。

[0003] 考虑到前述器件主要基于不等长的移相臂实现,则在实际应用中,如何更合理设计移相臂及其长度是本领域技术人员亟待解决的技术问题。

发明内容

[0004] 有鉴于此,本申请实施例提供了一种光学滤波器、波分复用装置及光量子计算机,通过引入温度约束与工艺约束,提高了移相臂设计的合理性。

[0005] 第一方面,本申请提供一种光学滤波器。光学滤波器包括第一波导以及第二波导,其中,所述第一波导以及所述第二波导形成马赫曾德尔干涉结构。所述第一波导包括由至少一个宽度不同的移相器构成的第一移相器组,所述第二波导包括由至少一个宽度不同的移相器构成的第二移相器组,其中,所述第一移相器组与所述第二移相器组中的各个移相器至少具有三种不同波导宽度;所述第一移相器组中各个移相器的有效折射率的第一波动因子与对应移相器的纯移相臂长度的乘积和等于所述第二移相器组中各个移相器的有效折射率的第一波动因子与对应移相器的纯移相臂长度的乘积和;所述第一移相器组中各个移相器的有效折射率的第二波动因子与对应移相器的纯移相臂长度的乘积和等于所述第二移相器组中各个移相器的有效折射率的第二波动因子与对应移相器的纯移相臂长度的乘积和,其中,所述第一波动因子反映有效折射率在温度变化下的数值波动,所述第二波动因子反映有效折射率在移相器的波导宽度变化下的数值波动。

[0006] 第二方面,本申请提供一种波分复用装置,所述波分复用装置至少包括第一方面所述的多个光学滤波器,所述多个光学滤波器基于不同的中心波长级联而分离输入光束的不同波长信号。

[0007] 第三方面,本申请提供一种光量子计算机,光量子计算机包括单光子源、光量子芯片及单光子探测器,单光子源、光量子芯片及单光子探测器中的一个或多个包括如第一方面所述的光学滤波器波分复用装置。

[0008] 由此,基于本申请提供一种光学滤波器、波分复用装置及光量子计算机,光学滤波器基于马赫曾德尔干涉仪原理配置而具有两条波导,每个波导中具有多个移相器。为克服光学滤波器工艺误差与温度误差,对前述移相器的长度进行约束以使两侧的移相器的有效折射率在温度变化下的数值波动与长度的乘积和相等且移相器的有效折射率在宽度变化

下的数值波动与长度的乘积和相等,以克服工艺误差与温度波动对光学滤波器的影响,提高了光学滤波器的稳定性。此外,考虑到前述限定条件的可解性,前述移相器可以至少具有三种波导宽度(优选为四种),以使前述约束能实际实现。

附图说明

[0009] 为了更清楚地说明本发明实施例的技术方案,下面将对实施例中所需要使用的附图作简单介绍,应当理解,以下附图仅示出了本发明的某些实施例,因此不应被看作是对范围的限定,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相关的附图。

[0010] 图1是本申请一些实施例提供的光学滤波器的第一种结构示意图。

[0011] 图2是本申请一些实施例提供的光学滤波器的第二种结构示意图。

[0012] 图3是本申请一些实施例提供的光学滤波器的第三种结构示意图。

[0013] 图4是本申请一些实施例提供的光学滤波器的第四种结构示意图。

[0014] 图5是本申请一些实施例提供的光学滤波器的第五种结构示意图。

[0015] 图6是本申请一些实施例提供的波分复用装置的示例框图。

[0016] 其中,100、光学滤波器;110、第一波导;120、第二波导;131、第一移相器;132、第二移相器;133、第三移相器;134、第四移相器;140、宽度过渡结构;151、第一移相臂对;152、第二移相臂对;153、第三移相臂对;154、第四移相臂对;111、第一上游移相区段;112、第一连接区段;113、第一下游移相区段;121、第二上游移相区段;122、第二连接区段;123、第二下游移相区段;161、第一移相上游分量;162、第一移相下游分量;163、第三移相上游分量;164、第三移相下游分量;600、波分复用结构。

具体实施方式

[0017] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0018] 需要说明的是,本实施例中所提供的图示仅以示意方式说明本发明的基本构想,故图式中仅显示与本发明中有关的组件而非按照实际实施时的组件数目、形状及尺寸绘制,其实际实施时各组件的形态、数量及比例可为一种随意的改变,且其组件布局形态也可能更为复杂。

[0019] 在本发明中,需要说明的是,如出现术语“中心”、“上”、“下”、“左”、“右”、“竖直”、“水平”、“内”、“外”等,其所指示的方位或位置关系为基于附图所示的方位或位置关系,仅是为了便于描述本申请和简化描述,而不是指示或暗示所指的装置或元件必须具有特定的方位、以特定的方位构造和操作,因此不能理解为对本申请的限制。此外,如出现术语“第一”、“第二”仅用于描述和区分目的,而不能理解为指示或暗示相对重要性。

[0020] 申请概述:

[0021] 马赫曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)是一种基于分振幅双光束干涉原理的光学装置,其核心功能是通过测量两束光经不同路径传输后的相对相移变

化,实现高精度光学测量。

[0022] 在实际应用中,马赫曾德尔干涉仪常被用作光学滤波器。具体地,复用光信号输入后,不同波长因 $\Delta\varphi$ 差异在输出端口发生相长/相消。

[0023] 在集成光学技术,前述基于马赫曾德尔干涉仪原理的光学滤波器往往可以通过两个3dB定向耦合器(分束器)和两条波导组成。其中,波导用于对内部光束进行相位调节,从而使光束在两个波导内存在相位差。波导(waveguide)是一种用于引导光沿特定路径传播的介质结构。它是集成光学系统中的基本元件,类似于集成电路中的导线,负责将光信号从一个光学组件传输到另一个光学组件。波导可以通过限制光的传播路径,确保光在特定区域内高效传输,从而实现光信息的处理和传输。

[0024] 在实际相位调整时,波导构件/波导内的移相器一般可以基于两个波导的长度差实现。即波导主要通过相同波长宽度的不同长度进行相位调整。前述过程的相位调整公式为 $\Delta\varphi*\lambda=2\pi*\Delta L*n_{\text{eff}}$ 。其中, ΔL 为两个波导的相位差, λ 为波长。 n_{eff} 为有效折射率。

[0025] 然而在实际使用与制备过程中,马赫曾德尔干涉仪可能会出现误差,从而破坏设计好的光学约束。具体地,在器件制备过程中,实际制备出的移相臂的波导宽度往往会与设计值有所偏差,会影响有效折射率,进而会使滤波器的中心波长漂移。在工作过程中,若外界温度变化较大,也会影响材料折射率,进而导致滤波器的中心波长漂移。

[0026] 针对前述技术问题,本申请发现可以通过多个移相器的级联并引入温度约束与宽度约束进行克服。即本申请提供的光学滤波器基于马赫曾德尔干涉仪原理配置而具有两条波导,每个波导中具有多个移相器。为克服光学滤波器工艺误差与温度误差,对前述移相器的长度进行约束以使两侧的移相器的有效折射率在温度变化下的数值波动与长度的乘积和相等且移相器的有效折射率在波导宽度变化下的数值波动与长度的乘积和相等,以克服工艺误差与温度波动对光学滤波器的影响,提高了光学滤波器的稳定性。此外,考虑到前述限定条件的可解性,前述移相器可以至少具有三种波导宽度(优选为四种),以使前述约束能实际实现。

[0027] 下面将结合图1~图4对本申请提供的光学滤波器与波分复用装置进行详细描述。

[0028] 示例性光学滤波器:

[0029] 承前述,为克服前述技术问题,本申请提供了一种基于马赫曾德尔干涉仪原理的光学滤波器。考虑到本申请主要对其移相区段进行了改进,本申请提供的光学滤波器省略了其他结构(如设置在两端的3dB定向耦合器),具体可以根据实际需要进行调整(如多个器件级联)。

[0030] 图1是本申请一些实施例提供的光学滤波器的一种结构示意图。

[0031] 如图1所示,本申请提供的光学滤波器100主要可以包括第一波导110与第二波导120。本申请中不直接利用第一波导110与第二波导120的长度差实现相位调整,而在第一波导110与第二波导120内构建多个移相器,实现相位调整。即第一波导110包括第一移相器组,第二波导120包括第二移相器组。

[0032] 第一移相器组可以指第一波导110内的移相器的集合。第二移相器组可以指第二波导120内的移相器的集合。其中,各个移相器组内的移相器可以指波导宽度不同而具有不同有效折射率的波导结构,而波导宽度相同的波导结构可以整体视作一个移相器。

[0033] 基于马赫曾德尔干涉仪内移相的原理,前述对于第一移相器组中的任意移相器i

与第二移相器组中的任意移相器j,其基本要求为:

[0034] $\sum(n_{effi} * L_i) - \sum(n_{effj} * L_j) = m\lambda$ 以及 $FSR = \lambda^2 / (\sum(n_{gi} * L_i) - \sum(n_{gj} * L_j))$ 。

[0035] 其中,w为对应移相器的波导宽度,L为对应移相器的纯移相臂长度, n_{eff} 为对应移相器的波导的有效折射率, n_g 为对应移相器的波导的群折射率, λ 为中心波长,FSR为赫曾德耳干涉结构的自由光谱范围。此外,前述m实际为前述 $\Delta \varphi / 2\pi$,实际取值为一个任意偶数即可,实际数值一般为三位数。

[0036] 考虑到前述温度对前述方程的影响主要体现为对 n_{eff} 的影响,进行影响 λ 。则结合前述差值关系,为消除温度的影响,可以控制温度造成的影响互相抵消。即第一波导110内第一移相器组的温度影响与第二波导120内第二移相器组的温度影响相同。

[0037] 考虑到在移相器中,相位延迟表征为有效折射率与对应的纯移相臂长度的乘积。则考虑到前述多个移相器的情况以及有效折射率受温度变化的影响,则前述“温度造成的影响互相抵消”可以具体表征为第一移相器组中各个移相器的有效折射率的第一波动因子与对应移相器的纯移相臂长度的乘积和等于第二移相器组中各个移相器的有效折射率的第一波动因子与对应移相器的纯移相臂长度的乘积和。其中,第一波动因子反映有效折射率在温度变化下的数值波动。

[0038] 考虑到第一波导110与第二波导120被配置为一个光学器件,则两个波导的温度变化是相同的。前述第一波动因子可以反映 ΔT 下的 Δn_{eff} 。

[0039] 进一步考虑到温度与有效折射率近似于线性关系,则前述影响相同可以表征为如下等式:

[0040] $\sum\left(\frac{\partial n_{effi}}{\partial T} * L_i\right) = \sum\left(\frac{\partial n_{effj}}{\partial T} * L_j\right)$ 。其中,T为温度。此外,考虑到有效折射率一般无量纲值,该公式可以理解为在两侧单位统一(主要是长度单位统一)时的纯数值计算。

[0041] 与前述温度的影响相似,制备工艺一般影响结构的波导宽度,从而影响有效折射率。则可以基于前述温度的类似的原理进行调整。即第一移相器组中各个移相器的有效折射率的第二波动因子与对应移相器的纯移相臂长度的乘积和等于第二移相器组中各个移相器的有效折射率的第二波动因子与对应移相器的纯移相臂长度的乘积和,其中,第二波动因子反映有效折射率在移相器的波导宽度变化下的数值波动。

[0042] 制备工艺导致的波导宽度的波动一般较小,也可以被视作在对应宽度下的导数。与前述等式的逻辑相同,工艺参数的波导可以在第一波导110与第二波导120内影响相同而互相抵消,进而表征为如下等式:

[0043] $\sum\left(\frac{\partial n_{effi}}{\partial w} * L_i\right) = \sum\left(\frac{\partial n_{effj}}{\partial w} * L_j\right)$ 。与前述公式类似,该公式也可以理解为纯数值计算。

[0044] 考虑到波导宽度与有效折射率之间的关系往往呈现为非线性,则前述有效折射率基于宽度的微分一般可以理解为在对应宽度下的导数。

[0045] 前述两种微分结果都可以通过测试确定,对于前述 $\frac{\partial n_{effi}}{\partial T}$,在测试时可以基于不同波导宽度的波导在温度下的有效折射率变化而确定。而对于 $\frac{\partial n_{effi}}{\partial w}$,可以基于不同波导宽度下的有效折射率变化(即对应点位的导数)而确定。

[0046] 优选地,为进一步避免前述波导宽度的变化导致前述影响进一步变化,在选取波导宽度时,可以选取有效折射率在该波导宽度处近似线形的波导宽度。其中近似线形可以通过有效折射率基于宽度的二阶导数阈值条件或曲线中变化趋势确定。

[0047] 因此,基于前述要求,对于第一移相器组中的任意移相器i与第二移相器组中的任意移相器j,整体满足如下要求:

$$[0048] \quad \begin{cases} \sum \left(\frac{\partial n_{effi}}{\partial T} * L_i \right) = \sum \left(\frac{\partial n_{effj}}{\partial T} * L_j \right) \\ \sum \left(\frac{\partial n_{effi}}{\partial w} * L_i \right) = \sum \left(\frac{\partial n_{effj}}{\partial w} * L_j \right) \\ FSR = \lambda^2 / (\sum (n_{gi} * L_i) - \sum (n_{gj} * L_j)) \\ \sum (n_{effi} * L_i) - \sum (n_{effj} * L_j) = m\lambda \end{cases}。$$

[0049] 考虑到前述m的任取,当移相器存在三种不同波导宽度(即一共三个L变量)时,前述方程中的L可能存在解。当存在四种及以上的波导宽度,方程中的L必然存在解。

[0050] 由此,第一移相器组与第二移相器组中的各个移相器至少具有三种不同宽度。

[0051] 仅作为一种示例,图1中,第一波导110的第一移相器组可以包括第一移相器131与第二移相器132,第一移相器131的波导宽度为w1,长度为L1。第二移相器132的波导宽度为w2,长度为L2。第二波导120的第二移相器组可以包括第三移相器133以及第四移相器134。第三移相器133的波导宽度为w3,长度为L3。第四移相器134的波导宽度为w4,长度为L4。此外,前述第一波导110与第二波导120的本体结构的宽度为w0。

[0052] 由此,前述各个移相器的长度应满足如下方程:

$$[0053] \quad \begin{cases} \frac{\partial n_{eff1}}{\partial T} * L_1 + \frac{\partial n_{eff2}}{\partial T} * L_2 = \frac{\partial n_{eff3}}{\partial T} * L_3 + \frac{\partial n_{eff4}}{\partial T} * L_4 \\ \frac{\partial n_{eff1}}{\partial w_1} * L_1 + \frac{\partial n_{eff2}}{\partial w_2} * L_2 = \frac{\partial n_{eff3}}{\partial w_3} * L_3 + \frac{\partial n_{eff4}}{\partial w_4} * L_4 \\ FSR = \lambda^2 / (n_{g1} * L_1 + n_{g2} * L_2 - n_{g3} * L_3 - n_{g4} * L_4) \\ n_{eff1} * L_1 + n_{eff2} * L_2 - n_{eff3} * L_3 - n_{eff4} * L_4 = m\lambda \end{cases}。$$

[0054] 前述公式中,波导宽度一般预先选取,从而使各个微分结果可以预先确定, λ 与FSR根据器件的光学需求确定。m一般任意选取偶数(一般>100)。

[0055] 在实际配置中,往往基于移相器的波导宽度将移相器分配在不同的波导中。即某一波导均为波导宽度较大的移相器,另一波导内设置波导宽度较小的移相器。在实际设置中,较宽的移相器一般是对光束进行处理的实际移相器,较窄的移相器一般为较宽移相器的补偿。

[0056] 由此,本申请提供的光学滤波器基于马赫曾德尔干涉仪原理配置而具有两条波导,每个波导中具有多个移相器。为克服光学滤波器工艺误差与温度误差,对前述移相器的长度进行约束以使两侧的移相器的有效折射率基于温度的微分与长度的乘积和相等且移相器的有效折射率基于宽度的微分与长度的乘积和相等,以克服工艺误差与温度波动对光学滤波器的影响,提高了光学滤波器的稳定性。此外,考虑到前述限定条件的可解性,前述移相器可以至少具有三种波导宽度(优选为四种),以使前述约束能实际实现。

[0057] 进一步地,考虑到移相器的波导宽度不同,为在波导中有效连接各个移相器,避免波导宽度突变对相位的影响。光学滤波器在第一波导110与第二波导120上还设置有多个宽度过渡结构140。宽度过渡结构140可以设置在波导宽度不同的区段之间,通过宽度过渡结构140自身的宽度渐变而匹配两个不同宽度的结构。

[0058] 具体地,为实现波导宽度的过渡,宽度过渡结构140的两端呈现为不同波导宽度的界面,该界面的波导宽度与其连接的波导结构一致。宽度过渡结构140在两端界面之间呈现为波导宽度渐变的结构,以匹配两端不同的波导宽度。其中,宽度过渡结构140在两端界面之间的波导宽度基于两端界面的波导宽度单调变换即可。图中呈现为线形变化而呈现为直线型样貌,在其他情况下也可以为非线性变化而呈现为曲线样貌。

[0059] 示例地,在第一波导110中,第一波导110本体与第一移相器131之间、第一移相器131与第二移相器132以及第二移相器132与第一波导110本体之间均设置有前述宽度过渡结构140。在第二波导120中,第二波导120本体与第三移相器133之间、第三移相器133与第四移相器134以及第四移相器134与第二波导120本体之间均设置有前述宽度过渡结构140。

[0060] 需要说明的是,前述排布方式可能根据实际需要调整。例如,在第一波导110中,第一移相器131与第二移相器132之间也可以设置一段 w_0 的支路本体并设置对应的宽度过渡结构。

[0061] 在一些实施例中,宽度过渡结构140的材料与制备方法一般与波导内的其他结构相同。在光学集成中,波导及其内部的移相器与宽度过渡结构一般基于铌酸锂(LiNbO_3)等衬底材料刻蚀而成。

[0062] 在一些实施例中,考虑到宽度过渡结构140自身可能也相对有一定的影响。为消除该影响,两个波导应具有相同的宽度过渡且排布相同,以抵消宽度过渡结构140的影响。即第一波导110内宽度过渡结构形成的宽度过渡结构组与第二波导120内宽度过渡结构形成的宽度过渡结构组中的各个宽度过渡结构的数量、类型及排布顺序均相同。

[0063] 为进一步说明该情况,本申请提供光学滤波器的又一种结构示意图(图2)。

[0064] 如图2所示,在第一波导110内除图1所示的宽度过渡结构140外,还包括第二波导120本体与第三移相器133之间($w_0 \rightarrow w_3$)、第三移相器133与第四移相器134($w_3 \rightarrow w_4$)以及第四移相器134与第二波导120本体($w_4 \rightarrow w_0$)之间设置的宽度过渡结构140,且该宽度过渡结构140设置在前述第二移相器132后。同理,在第二波导120在第三移相器133前还设置有第一波导110本体与第一移相器131之间($w_0 \rightarrow w_1$)、第一移相器131与第二移相器132($w_1 \rightarrow w_2$)以及第二移相器132与第一波导110本体($w_2 \rightarrow w_0$)之间设置的宽度过渡结构140。

[0065] 由此,在两个波导内移相器宽度不同的情况下,在设置宽度过渡结构时可以同样设置,进而通过两个波导抵消掉宽度过渡结构对光束的影响。

[0066] 此外,考虑到宽度过渡结构140的设置往往是用于抵消宽度变化的,在实际设置顺序中,对于在不存在宽度变化的区域内进行额外设置的宽度过渡结构的设置顺序不作要求。例如,前述第一波导110内与第二波导120对应额外设置的宽度过渡结构140可以任意设置在合适的区域内。

[0067] 在一些实施例中,前述各个移相器可以基于传统的马赫曾德尔干涉结构形成,即在两个波导上都存在对应的移相臂,基于其臂长差值形成一个移相器。即光学滤波器100包括宽度不同的多个移相臂对,移相臂对中的两个移相臂以相同的波导宽度以及不同的波导程度分别设置在第一波导110以及第二波导120,且被配置为目标波导中的移相器。

[0068] 其中,目标波导为移相臂对在第一波导与第二波导中移相臂长度较长的一个,移相器的纯移相臂长度为对应移相臂对在两个波导中长度的差值。

[0069] 为进一步说明前述情况,本申请基于图1的移相器结构提供了一种包含移相臂对

的光学滤波器的结构示意图(图3)。

[0070] 如图3所示,基于前述四个移相器,则前述光学滤波器100可以包括第一移相臂对151、第二移相臂对152、第三移相臂对153以及第四移相臂对154。其中,第一移相臂对151与第一移相器131对应,第二移相臂对152与第二移相器132对应,第三移相臂对153与第三移相器133对应,第四移相臂对154与第四移相器134对应。

[0071] 基于前述对应关系,即第一移相臂对151在第一波导110的第一移相臂第一波导分量的波导长度 $L_{1,1}$ 大于第一移相臂对151在第二波导120的第一移相臂第二波导分量的波导长度 $L_{1,2}$,而使第一波导110被配置为第一移相臂对151的目标波导并形成第一波导110上的移相器,且波导长度 $L_1 = L_{1,1} - L_{1,2}$ 。其他移相臂对与该情况类似,在此不做赘述。

[0072] 则对应的,前述宽度过渡结构140可以设置在各个移相臂对中的移相臂的两端,而无需额外在波导上额外设置宽度过渡结构。

[0073] 基于前述设置的移相器可以使前述的宽度过渡结构基于真实的波导宽度设置,避免了宽度过渡结构在宽度与长度层面的误差。例如,额外设置宽度过渡结构可能在交界处形成一定的宽度而影响另一侧的移相器的纯移相臂长度。示例性地,在第一波导110内, $w_0 \rightarrow w_3$ 的宽度过渡结构140与 $w_3 \rightarrow w_4$ 过渡结构140在交界处可能形成 w_3 宽度一定长度 l 的结构,而减少第二波导120内第三移相器133的纯移相臂长度 $L_3 - l$ 。

[0074] 进一步地,为提高器件的稳定性,第一波导110以及第二波导120中多个移相臂对中的各个移相臂的设置顺序相同且多个移相臂中的各个移相臂的较短长度相同。即在前述图4中,各个波导的移相臂顺序均为第一、第二、第三、第四。前述第一移相臂第二波导分量的波导长度 $L_{1,2}$ =第二移相臂第二波导分量的波导长度 $L_{2,2}$ =第三移相臂第一波导分量的波导长度 $L_{3,1}$ =第四移相臂第一波导分量的波导长度 $L_{4,1} = L_{\text{ref}}$ (一般记作参考长度)。则各个移相臂对在目标波导内的长度可以基于纯移相臂长度直接设置,减少了计算复杂度。

[0075] 在实际集成光子电路中,考虑到前述光学滤波器主要基于长度进行相位调整,其可能占据较大的空间而影响其他结构的集成。在实际制备中,前述光学滤波器的波导往往可以进行弯曲,从而使其长度在延伸方向的垂直方向进行调整,从而减少光学滤波器的空间占据。

[0076] 在实际结构中,光学滤波器的波导往往呈现会凹出一个弯曲部,本申请可以将移相器集成在该弯曲部中,以使移相器的长度调整不会影响光学滤波器的在延伸方向的空间占据。

[0077] 进一步地,为实现弯折出的两个区段的对称设置,前述移相器可以拆分为长度相同的移相结构而对称设置在对应区段内。该移相器可以与前述移相臂对结合,以使实际进行分配的长度对应的移相臂在该波导的分量的长度(如 $L_1 + L_{\text{ref}}$)。

[0078] 为说明该情况,本申请还提供一种涉及弯折的光学滤波器的结构示意图(图4)。

[0079] 如图4所示,各个波导可以包括上游移相区段、连接区段以及下游移相区段。其中,上游移相区段与下游移相区段可以指对应波导中沿光束传播方向对弯折两侧的区域指代。即上游移相区域可以指光束进入波导结构后,在到达波导中的弯折部分之前的波导结构。上游移相区域可以指光束进入波导结构后,经过波导中的弯折部分之后的波导结构。连接区段的两端分别连接上游移相区段以及下游移相区段,一般指波导中的弯折。上游移相区段以及下游移相区段(在公差范围内)垂直于波导的延伸方向。此外,考虑到与其他器件

或器件内部的连接情况,波导还可以包括复位区段以将末端方向复位回波导本身的延伸方向。

[0080] 如图4所示,第一波导110可以包括第一上游移相区段111、第一连接区段112以及第一下游移相区段113。第二波导120可以包括第二上游移相区段121、第二连接区段122以及第二下游移相区段123。

[0081] 波导内的各个移相结构对可以对称设置在两个移相区段内。即上游移相区段与下游移相区段内基于连接区段对称设置至少一个移相结构对,移相结构对包括分别设置在上游移相区段与下游移相区段的两个等长等宽的移相结构。

[0082] 基于马赫曾德尔干涉结构的原理,移相结构对与一个移相器对应且移相结构对中移相结构的总长度与对应的移相器的纯移相臂长度匹配。当不涉及前述移相臂对时,移相结构对的总长度即为对应移相器的纯移相臂长度。当涉及移相臂对时,移相结构对的总长度为对应移相器对应的移相臂波导支路长度,需要与另一波导内的移相臂波导支路长度进行作差而确定纯移相臂长度(具体参见前述描述)。

[0083] 为简化复杂性,前述第一波导110内仅设置第一移相器131,第二波导120内仅设置第三移相器133,且未在其他波导内设置对应的移相臂,其他移相器也可以进行类似设置。

[0084] 基于前述设置要求,第一移相器131可以与第一移相结构对对应。第一移相结构对的第一移相上游分量161设置在第一上游移相区段111,第一移相下游分量162设置在第一下游移相区段113。第三移相器133可以与第三移相结构对对应。第三移相结构对的第三移相上游分量163设置在第二上游移相区段121,第三移相下游分量164设置在第二下游移相区段123。

[0085] 考虑到未设置移相臂对的情况,由此,第一移相下游分量162的长度=第一移相上游分量161的长度=0.5*第一移相器131的纯移相臂长度 L_1 。第三移相下游分量164的长度=第三移相上游分量163的长度=0.5*第三移相器133的纯移相臂长度 L_3 。

[0086] 在一些实施例中,考虑到前述第一波导与第二波导的波导支路本体也存在一定的宽度且宽度相同,其实际上也可以构成移相器。即第一波导的支路本体结构与第二波导的支路本体结构的长度不同而使支路本体结构在长度较长的波导中基于长度差形成一个移相器。其中,波导支路本体可以指波导的本体结构。即未设置其他波导结构(如未设置前述移相器)时的结构(如前述连接区段)。

[0087] 基于前述波导支路本体的长度差异,其一般体现在连接区段的长度差异中。例如,前述图4中,第一连接区段112的长度大于第二连接区段122的长度,则该长度差可以基于前述移相臂对的类似原理构成一个移相器。

[0088] 进一步地,在实际结构中,两个波导的弯折区域的弯折尺寸一般相同,前述连接区段的长度差异实际上体现为(或理解为)连接区段进入移相区段内的长度差异。

[0089] 由此,图4所示的光学滤波器在实际应用中也可能作为一个满足前述光学约束条件的光学滤波器。

[0090] 本申请提供的各个实施例可以进行组合。基于此,本申请还提供一种既设置移相臂对又设置移相结构对的光学滤波器的结构示意图(图5)。

[0091] 如图5所示,光学滤波器上方的波导与下方的波导均设置有四种波导宽度的移相结构对,不同波导中相同波导宽度的移相结构对可以等价为一对移相臂。需要说明的是,图

中标记的长度为移相结构对的总长度。

[0092] 此外,两个波导的自体宽度 w_0 与长度相同,未形成一个额外的移相器。

[0093] 示例性波分复用装置及光量子计算机:

[0094] 基于前述提供的光学滤波器,可以构建出集成光子电路中的波分复用结构。具体地,本申请还提供一种波分复用结构的示例性框图(图6)。

[0095] 如图6所示,波分复用结构600可以由多个光学滤波器100构成(图中为3个),并通过配置参数以使光学滤波器100能分离光束的不同波长分量。具体配置过程可以参见基于马赫曾德尔干涉仪的波分复用结构的相关描述,在此不做赘述。

[0096] 基于相同的原理,本申请还提供一种光学设备,该光学设备中可以包括本申请任意实施例提供的光学滤波器或本申请提供的波分复用结构。

[0097] 在实际应用中,本申请提供的光学滤波器以及波分复用结构可以基于铌酸锂(LiNbO_3)等基础材料实现,而集成在光量子计算机中。其中,光量子计算机是一种利用光子(光粒子)作为量子比特(qubit)进行信息处理的量子计算设备。

[0098] 在光量子计算机中主要包括单光子源、光量子芯片以及探测系统。其中,单光子源通过激光激发量子点或自发参量下转换(SPDC)产生高品质单光子,作为量子比特载体。光量子处理器由光纤、波导、分束器、相位调制器、反射镜等光学元件构成以实现光学传输与逻辑操作(如Hadamard门、CNOT门)。探测系统可以测量光子最终状态(如偏振或路径),输出计算结果。关于光量子计算机的具体处理过程可以参见相关技术的具体描述,在此不做赘述。

[0099] 在实际应用中,本申请提供的光学滤波器以及波分复用结构可以涉及前述光量子计算机的各个组成器件。即光量子计算机中的单光子源、光量子芯片及单光子探测器中的一个或多个包括如本申请提供的光学滤波器。

[0100] 例如,单光子源可以通过光学滤波器进行量子随机性的验证以及单光子量子态的操控。光量子芯片可以通过前述光学滤波器(即干涉仪)、分束器以及相位调制器实现可编程光路。单光子探测器可以通过光学滤波器中加入相位延迟反推源结果的相位值。

[0101] 由此,涉及前述光学滤波器或波分复用装置的光量子计算机也在本申请的保护范围内。

[0102] 以上公开的本发明实施例只是用于帮助阐述本发明。实施例并没有详尽叙述所有的细节,也不限制该发明仅为所述的具体实施方式。显然,根据本说明书的内容,可作很多的修改和变化。本说明书选取并具体描述这些实施例,是为了更好地解释本发明的原理和实际应用,从而使所属技术领域技术人员能很好地理解和利用本发明。本发明仅受权利要求书及其全部范围和等效物的限制。

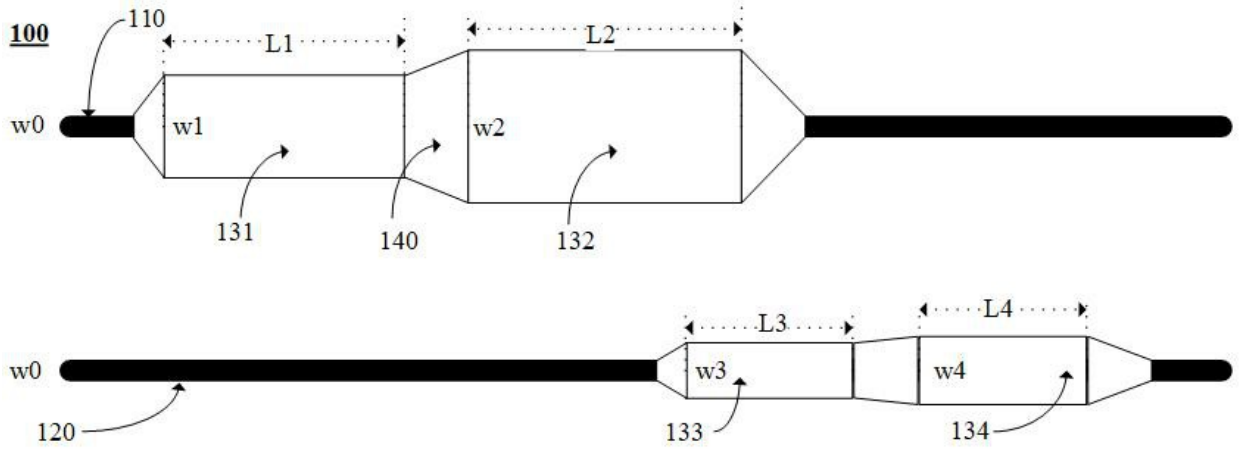


图1

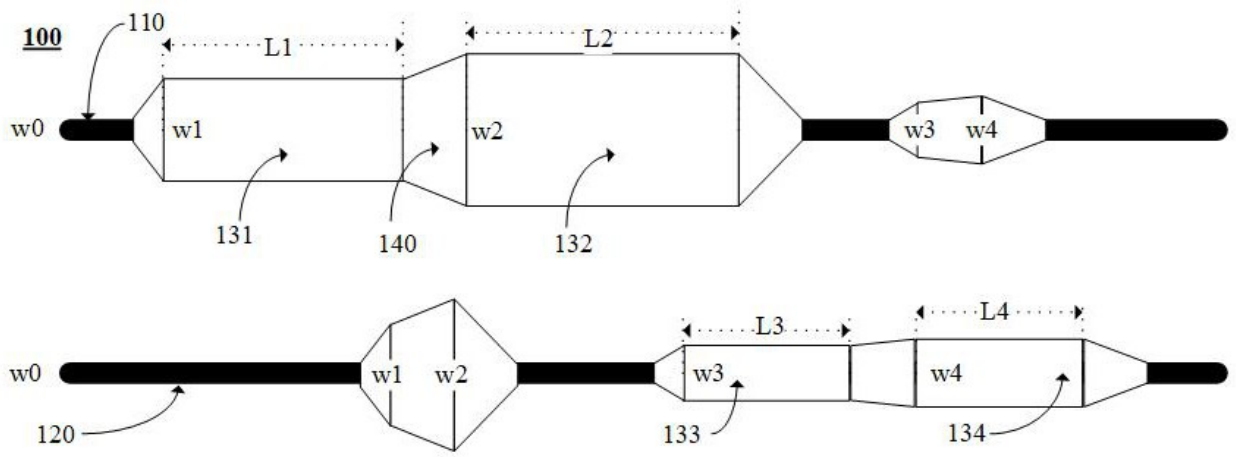


图2

100

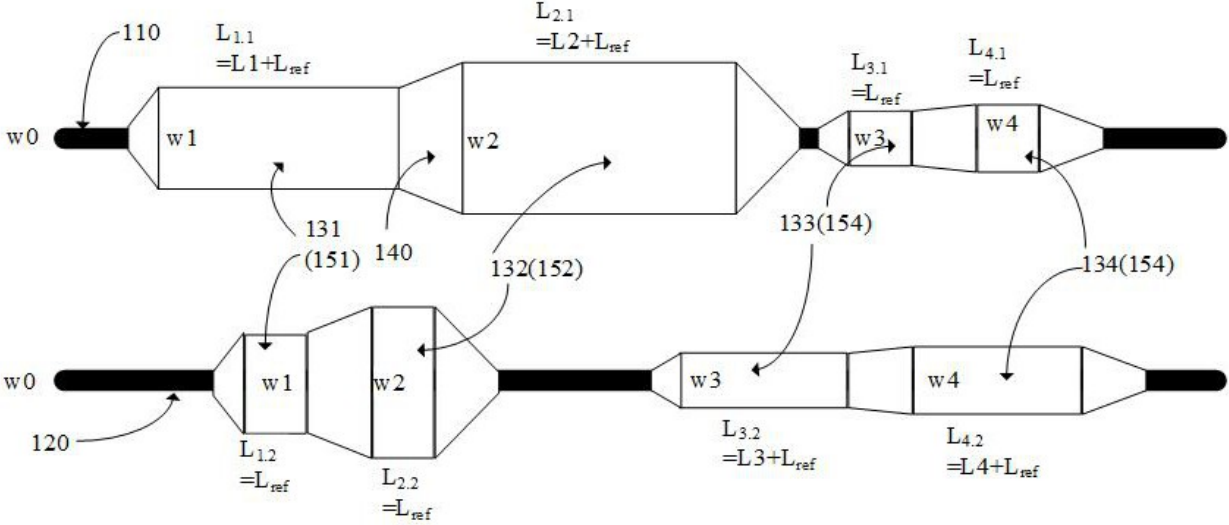


图3

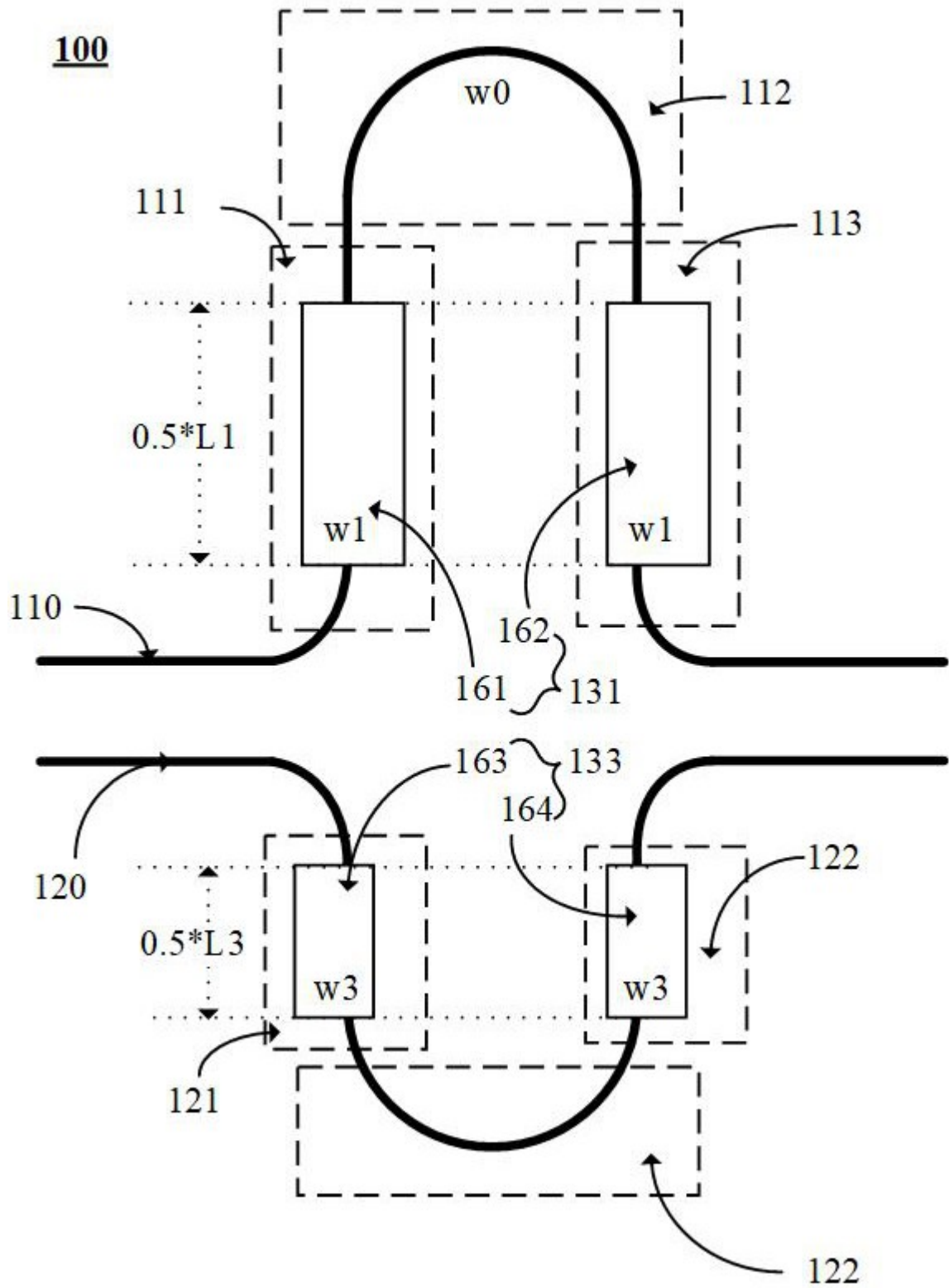


图4

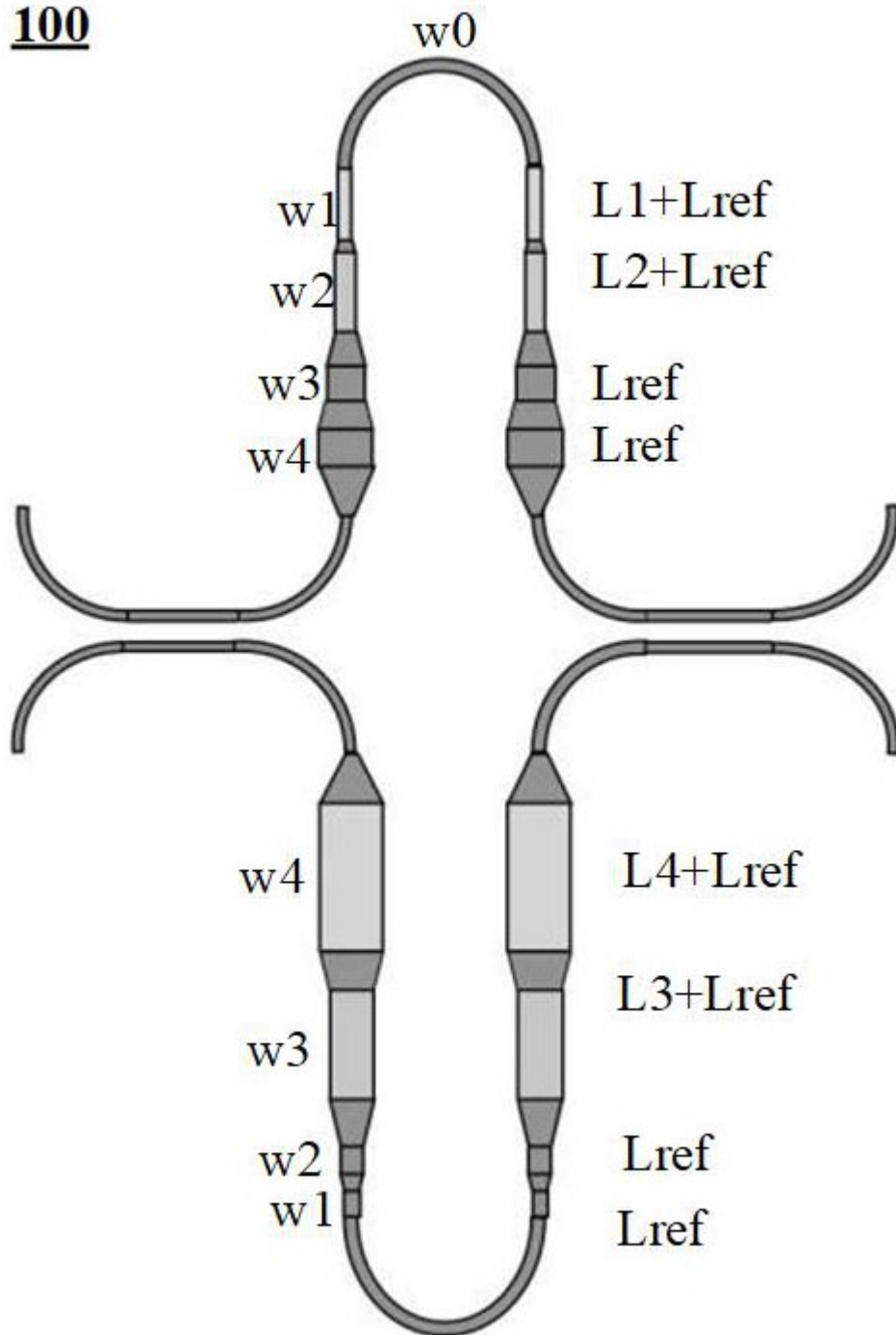
100

图5

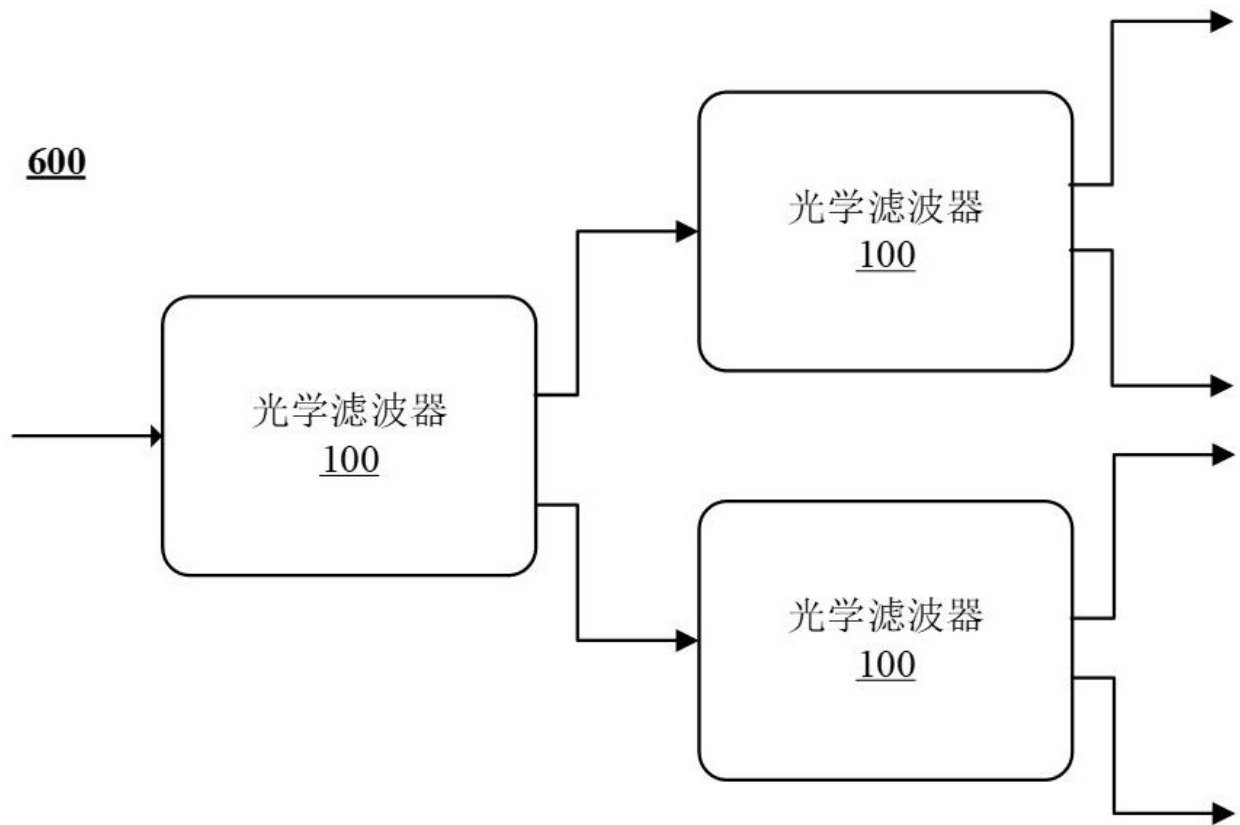


图6