



200231

上海市徐汇区桂平路 555 号 45 幢 6 层 603 室 上海恒慧知识产权代
理事务所(特殊普通合伙)
张琳(021-54400090)

发文日:

2025 年 08 月 22 日



申请号: 202511183585.X

发文序号: 2025082201610860

专利申请受理通知书

根据专利法第 28 条及其实施细则第 43 条、第 44 条的规定,申请人提出的专利申请已由国家知识产权局受理。现将确定的申请号、申请日等信息通知如下:

申请号: 202511183585X

申请日: 2025 年 08 月 22 日

申请人: 上海交通大学

发明人: 何广强,李念芹

发明创造名称: 双环氮化硅微腔及色散诱导的多模压缩量子光源制备方法

经核实,国家知识产权局确认收到文件如下:

发明专利请求书 1 份 4 页

权利要求书 1 份 2 页,权利要求项数: 10 项

说明书 1 份 11 页

说明书附图 1 份 4 页

说明书摘要 1 份 1 页

实质审查请求书 文件份数: 1 份

申请方案卷号: SHJX3873I

提示:

1. 申请人收到专利申请受理通知书之后,认为其记载的内容与申请人所提交的相应内容不一致时,可以向国家知识产权局请求更正。

2. 申请人收到专利申请受理通知书之后,再向国家知识产权局办理各种手续时,均应当准确、清晰地写明申请号。

审查员: 自动受理

联系电话: 010-62356655

审查部门: 初审及流程管理部





(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 120742598 A

(43) 申请公布日 2025. 10. 03

(21) 申请号 202511183585.X

(22) 申请日 2025.08.22

(71) 申请人 上海交通大学

地址 200240 上海市闵行区东川路800号

(72) 发明人 何广强 李念芹

(74) 专利代理机构 上海恒慧知识产权代理事务

所(特殊普通合伙) 31317

专利代理师 张琳

(51) Int. Cl.

G02F 1/35 (2006.01)

G02F 1/365 (2006.01)

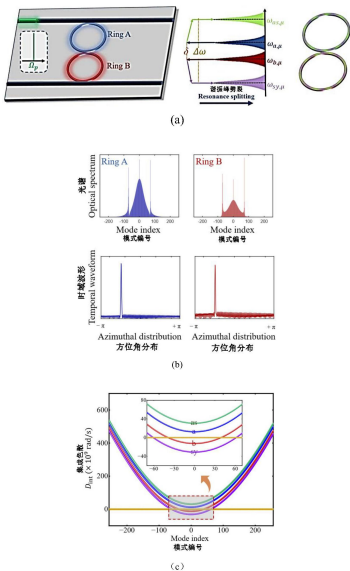
权利要求书2页 说明书8页 附图4页

(54) 发明名称

双环氮化硅微腔及色散诱导的多模压缩量子光源制备方法

(57) 摘要

本申请提供双环氮化硅微腔及色散诱导的多模压缩量子光源制备方法,包括两个采用氮化硅材料制备的环形微腔,所述环形微腔为肋形波导结构,嵌入二氧化硅包层中;其中,每个所述环形微腔的半径、波导宽度、波导高度、有效折射率均相同,且仅支持基模传播;两个所述环形微腔通过倏逝场耦合,其耦合效应诱导原本的谐振峰发生劈裂,进而产生对称S本征模与反对称AS本征模。本申请通过精准的参数设计与耦合机制,为超高压缩度、超多模式数、可工作于阈值以上的连续变量集成压缩光源的实现提供了核心支撑。



1. 一种双环氮化硅微腔,其特征在于,包括两个采用氮化硅材料制备的环形微腔,所述环形微腔为肋形波导结构,嵌入二氧化硅包层中;

其中,每个所述环形微腔的半径、波导宽度、波导高度、有效折射率均相同,且仅支持基模传播;

两个所述环形微腔通过倏逝场耦合,其耦合效应诱导原本的谐振峰发生劈裂,进而产生对称S本征模与反对称AS本征模。

2. 根据权利要求1所述的一种双环氮化硅微腔,其特征在于,两个所述环形微腔的耦合间距调整实现不同耦合率 J ;所述环形微环与直波导耦合间距调控实现不同直波导耦合率 γ ;所述环形微腔的本征损耗 μ 由品质因数 Q_0 决定。

3. 根据权利要求2所述的一种双环氮化硅微腔,其特征在于,两个所述环形微腔的半径均为 $125\mu\text{m}$,波导宽度为 1500nm ,波导高度为 850nm ,有效折射率为 1.99 ;所述耦合率 $J=4.5\text{GHz}$;所述品质因数 $Q_0\approx 4\times 10^6$,所述本征损耗 $\mu=2\pi\times 50\text{MHz}$;

耦合前,两个所述环形微腔的谐振峰失谐量 $\delta=4\text{GHz}$,耦合诱导谐振峰劈裂是 $\Delta\omega=\sqrt{(4J^2+\delta^2)}$ 。

4. 一种基于权利要求1-3任一项所述的双环氮化硅微腔的色散诱导的多模压缩量子光源制备方法,其特征在于,包括:

采用色散调控机制,调控双环氮化硅微腔的相位匹配条件和多模压缩形貌;

在所述色散调控机制基础上,通过泵浦光注入与状态演化产生目标量子光场,即得到多模压缩量子光源。

5. 根据权利要求4所述的双环氮化硅微腔的色散诱导的多模压缩量子光源制备方法,其特征在于,所述采用色散调控机制,调控双环氮化硅微腔的相位匹配条件和多模压缩形貌,包括:

将双环氮化硅微腔设计为反常色散特性,并将相同色散参数应用于双环氮化硅微腔;

在反常色散基础上,利用双环氮化硅微腔的倏逝场的耦合效应诱导谐振峰劈裂,产生对称S本征模与反对称AS本征模;

在单孤子态下,基于色散与非线性效应的平衡,所述反对称AS本征模对应的集成色散曲线被拉平,与对称S本征模对应的集成色散曲线形成交点,所述交点的位置即为色散波频率,主导四波混频的相位匹配条件;

反对称AS本征模的被拉平的集成色散曲线与对称S本征模对应的集成色散曲线,构成本征模的集成色散抛物线;

结合所述集成色散抛物线和零色散直线,在不同工作状态下定位色散零点;

引导多模压缩光场的频谱分布在所述色散零点附近聚集,实现对压缩形貌的调控。

6. 根据权利要求5所述的双环氮化硅微腔的色散诱导的多模压缩量子光源制备方法,其特征在于,所述结合所述集成色散抛物线和零色散直线,在不同工作状态下定位色散零点,包括:

当双环氮化硅微腔的输入光功率低于孤子态形成的临界功率阈值,定位两对色散零点;

当输入光功率达到或超过孤子态形成的临界功率阈值,定位一对色散零点。

7. 根据权利要求4所述的双环氮化硅微腔的色散诱导的多模压缩量子光源制备方法,

其特征在于,在所述色散调控机制基础上,通过泵浦光注入与状态演化产生目标量子光场,即得到多模压缩量子光源,包括:

选用波长1550nm波段的连续激光作为泵浦光,功率设定为1W;

将泵浦光注入AS本征模对应的谐振峰,通过调节泵浦光失谐量使双环氮化硅微腔经历完整孤子演化过程,依次实现阈值以下状态、图灵态、双孤子态,最终稳定在单孤子态,此时实现1024个腔模的多模压缩,零傅里叶频率处压缩度达29.74dB。

8.根据权利要求4所述的双环氮化硅微腔的色散诱导的多模压缩量子光源制备方法,其特征在于,还包括验证所述多模压缩量子光源的实际性能,包括:

将变形超模理论及ABMD分解应用于量子光场演化的海森堡-朗之万方程,根据ABMD分解结果提取多模压缩量子光源的最大压缩超模的腔模线性组合系数;

基于所述腔模线性组合系数,通过Wiener-Khinchin定理计算最大压缩超模的正交分量噪声谱。

9.一种终端,包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序,其特征在于,所述处理器执行所述程序时可用于执行权利要求4-8中任一项所述的方法。

10.一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,其特征在于,该程序被处理器执行时可用于执行权利要求4-8中任一项所述的方法。

双环氮化硅微腔及色散诱导的多模压缩量子光源制备方法

技术领域

[0001] 本申请涉及集成光子学、量子光学与拓扑光学领域,具体地,涉及双环氮化硅微腔及色散诱导的多模压缩量子光源制备方法。

背景技术

[0002] 经典领域的克尔孤子光频梳已有相对成熟的应用,在高精度时间同步、双光梳光谱学、大规模相干通信、激光雷达、光学频率合成器、光学并行卷积计算等领域,光频梳的作用被广泛强调。而得益于近年来突飞猛进的微纳加工技术,基于集成微纳谐振腔(集成微腔)的量子光频梳成为了研究热点。在这一量子领域中,克尔量子光频梳已经被应用于time-bin纠缠网路、光子对产生源、正交压缩真空态、预报单光子以及面向多用户的量子网络。

[0003] 具有多模压缩光量子态的量子光频梳是量子信息科学的核心研究内容。尽管量子光频梳(简称QFC)的制备始于体积庞大的空间光光学设备,集成光子学的进步极大地拓宽了克尔QFC的潜在应用方向。基于集成微纳谐振腔的片上QFC不仅在易操作性、高集成度和易扩展性等方面克服了传统空间光参量振荡器的局限,由于集成微腔的结构有很强的腔模空间约束,其非线性效应强度也得到了进一步提升。利用氮化硅材料的光学三阶非线性效应,输入微腔的连续波泵浦光发生四波混频,成对地激发信号光和闲置光,进而产生QFC。基于四波混频的传统量子光源目前多使用完全处于光参量振荡阈值以下的压缩真空态作为量子光源。弱泵浦微腔在光参量振荡阈值以下可产生单模/双模压缩真空态,但暗态的光强低、不易调控,且压缩度同样较低。若使用频分/空分复用技术,虽然扩展了参与非线性效应的模式数,但受限于高Q值微腔中相干光场仅存在于泵浦光处,非线性增益带宽受到限制,导致阈值以下量子光源的压缩带宽小、压缩度低、频率调制困难。尽管耗散克尔孤子可提供宽带相干光频梳,其携带的量子涨落的多模性质尚未被充分挖掘。

[0004] 与此同时,单个微腔的色散特性固有地确定了四波混频的相位匹配条件,多模压缩形貌呈广谱对称分布,且难以通过色散工程调控。2021年,T.J.Kippenberg课题组的研究表明,耦合微腔系统通过模式耦合诱导的谐振峰劈裂与自发对称性破缺,可产生色散波与可调制的相位匹配条件。然而,上述研究仅局限于经典领域,其量子特性,尤其是多模压缩动力学尚未被系统研究。

[0005] 经检索,申请号为202210320470.0的中国专利公开了一种量子光源系统及提高量子光源亮度的方法,通过双微环谐振腔与双波导耦合结构,将第一微环半径设为第二微环整数倍,调控耦合强度使重叠谐振峰劈裂展宽,允许更高重复频率泵浦光输入,提升光子对产生效率和量子光源亮度,但未涉及多模压缩相关调控设计,不能进行多模压缩。且该专利仅考虑离散变量量子光源,与本文中的连续变量多模压缩光源的基本系统动力学有较大区分。

发明内容

[0006] 针对现有技术中的缺陷/之一,本申请的目的是提供双环氮化硅微腔及色散诱导的多模压缩量子光源制备方法。

[0007] 本申请的第一方面,提供一种双环氮化硅微腔,包括两个采用氮化硅材料制备的环形微腔,所述环形微腔为肋形波导结构,嵌入二氧化硅包层中;

[0008] 其中,每个所述环形微腔的半径、波导宽度、波导高度、有效折射率均相同,且仅支持基模传播;

[0009] 两个所述环形微腔通过倏逝场耦合,其耦合效应诱导原本的谐振峰发生劈裂,进而产生对称(S)本征模与反对称(AS)本征模。

[0010] 可选地,两个所述环形微腔的耦合间距调整实现不同耦合率 J ;所述环形微环与直波导耦合间距调控实现不同直波导耦合率 γ ;所述环形微腔的本征损耗 μ 由品质因数 Q_0 决定。

[0011] 可选地,两个所述环形微腔的半径均为 $125\mu\text{m}$,波导宽度为 1500nm ,波导高度为 850nm ,有效折射率为 1.99 ;所述耦合率 $J=4.5\text{GHz}$;所述品质因数 $Q_0\approx 4\times 10^6$,所述本征损耗 $\mu=2\pi\times 50\text{MHz}$;

[0012] 耦合前,两个所述环形微腔的谐振峰失谐量 $\delta=4\text{GHz}$,耦合诱导谐振峰劈裂是 $\Delta\omega=\sqrt{(4J^2+\delta^2)}$ 。

[0013] 本申请的第二方面,提供一种基于所述的双环氮化硅微腔的色散诱导的多模压缩量子光源制备方法,包括:

[0014] 采用色散调控机制,调控双环氮化硅微腔的相位匹配条件和多模压缩形貌;

[0015] 在所述色散调控机制基础上,通过泵浦光注入与状态演化产生目标量子光场,即得到多模压缩量子光源。

[0016] 可选地,所述采用色散调控机制,调控双环氮化硅微腔的相位匹配条件和多模压缩形貌,包括:

[0017] 将双环氮化硅微腔设计为反常色散特性,并将相同色散参数应用于双环氮化硅微腔;

[0018] 在反常色散基础上,利用双环氮化硅微腔的倏逝场的耦合效应诱导谐振峰劈裂,产生对称S本征模与反对称AS本征模;

[0019] 在单孤子态下,基于色散与非线性效应的平衡,所述反对称AS本征模对应的集成色散曲线被拉平,与对称S本征模对应的集成色散曲线形成交点,所述交点的位置即为色散波频率,主导四波混频的相位匹配条件;

[0020] 反对称AS本征模的被拉平的集成色散曲线与对称S本征模对应的集成色散曲线,构成本征模的集成色散抛物线;

[0021] 结合所述集成色散抛物线和零色散直线,在不同工作状态下定位色散零点;

[0022] 引导多模压缩光场的频谱分布在所述色散零点附近聚集,实现对压缩形貌的调控。

[0023] 可选地,所述结合所述集成色散抛物线和零色散直线,在不同工作状态下定位色散零点,包括:

[0024] 当双环氮化硅微腔的输入光功率低于孤子态形成的临界功率阈值,定位两对色散

零点;

[0025] 当输入光功率达到或超过孤子态形成的临界功率阈值,定位一对色散零点。

[0026] 可选地,在所述色散调控机制基础上,通过泵浦光注入与状态演化产生目标量子光场,即得到多模压缩量子光源,包括:

[0027] 选用波长1550nm波段的连续激光作为泵浦光,功率设定为1W;

[0028] 将泵浦光注入AS本征模对应的谐振峰,通过调节泵浦光失谐量使双环氮化硅微腔经历完整孤子演化过程,依次实现阈值以下状态、图灵态、双孤子态,最终稳定在单孤子态,此时实现1024个腔模的多模压缩,零傅里叶频率处压缩度达29.74dB。

[0029] 可选地,还包括验证所述多模压缩量子光源的实际性能,包括:

[0030] 将变形超模理论及ABMD分解应用于量子光场演化的海森堡-朗之万方程,根据ABMD分解结果提取多模压缩量子光源的最大压缩超模的腔模线性组合系数;

[0031] 基于所述腔模线性组合系数,通过Wiener-Khinchin定理计算最大压缩超模的正交分量噪声谱。

[0032] 本申请的第四方面,提供一种终端,包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序,所述处理器执行所述程序时可用于执行所述的多模压缩量子光源制备方法。

[0033] 本申请的第五方面,提供一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,该程序被处理器执行时可用于执行所述的多模压缩量子光源制备方法。

[0034] 本申请提供的双环氮化硅微腔,通过双环氮化硅微腔结构通过相同的参数设计与耦合机制,为超高压压缩度、超多模式数、可工作于阈值以上的连续变量集成压缩光源的实现提供了核心支撑。

[0035] 由附加特征带来的其他技术效果将在相应的实施例中进一步阐述。

附图说明

[0036] 通过阅读参照以下附图对非限制性实施例所作的详细描述,本申请的其它特征、目的和优点将会变得更明显:

[0037] 图1为根据一示例性实施例示出的片上耦合微腔系统及其色散特性示意图,a图为微腔结构简图以及谐振峰劈裂的示意图,b图为通过上述耦合微腔系统制备得到的单孤子频谱以及时域波形,c图为微腔模式的集成色散图;

[0038] 图2为根据一示例性实施例示出的基于所述的双环氮化硅微腔的色散诱导的多模压缩量子光源制备方法的流程图;

[0039] 图3为根据一示例性实施例示出的孤子形成过程中的参数演化过程与阈值以下压缩分布示意图,a图为孤子演化过程中腔内功率随泵浦光失谐量的变化,b图为孤子演化过程中利用平均场近似下的最大压缩度,c图为阈值以下时多模压缩态简并为双模压缩真空态,d图为阈值以下时双模压缩的频谱分布以及其与微腔非线性色散的对应;

[0040] 图4为根据一示例性实施例示出的孤子形成过程不同状态下的非线性色散与压缩模场分布示意图;

[0041] 图5为根据一示例性实施例示出的多模压缩的本征谱示意图;

[0042] 图6为根据一示例性实施例示出的片上耦合微腔系统设计结构图,a图为片上耦合

微腔系统的详细结构与输入输出光场示意图,b图为波导剖面,c图为耦合部分的放大细节;

[0043] 图7为根据一示例性实施例示出的基于所述的双环氮化硅微腔的色散诱导的多模压缩量子光源制备系统的结构图。

具体实施方式

[0044] 下面结合具体实施例对本申请进行详细说明。以下实施例将有助于本领域的技术人员进一步理解本申请,但不以任何形式限制本申请。应当指出的是,对本领域的普通技术人员来说,在不脱离本申请构思的前提下,还可以做出若干变形和改进,这些都属于本申请的保护范围。以下实施例中沒有详细说明的部分,可以采用现有技术实现。

[0045] 现有技术中,很难得到的超高压缩度、超多模式数、可工作于阈值以上的集成压缩光源。基于上述问题,本申请实施例提供一种双环氮化硅微腔,以解决上述存在的问题。

[0046] 如图1与图6所示,一种双环氮化硅微腔,包括两个采用氮化硅材料制备的环形微腔,环形微腔为肋形波导结构,嵌入二氧化硅包层中;其中,每个环形微腔的半径、波导宽度、波导高度、有效折射率均相同,且仅支持基模传播;两个环形微腔通过倏逝场耦合,其耦合效应诱导原本的谐振峰发生劈裂,进而产生对称S本征模与反对称AS本征模。

[0047] 本申请上述实施例中的双环氮化硅微腔的结构设计通过多重技术特征协同实现了关键技术效果:首先,两个环形微腔采用相同的半径、波导宽度、波导高度及有效折射率,确保了双环基础光学特性的一致性,为后续色散调控机制的精准实施提供了对称稳定的物理载体,避免因结构差异导致的模式干扰或调控误差。其次,肋形波导结构嵌入二氧化硅包层的设计,如图6所示,二氧化硅包层包括上包层和下包层两层,两个环形微腔位于上包层和下包层之间,被二氧化硅包层包裹,该设计强化了光场在氮化硅核心区的约束能力,结合“仅支持基模传播”的特性,有效降低了光场泄漏损耗,提升了微腔的模式纯净度,为高品质量子光场的产生排除了高阶模式串扰的干扰。最后,通过倏逝场耦合诱导谐振峰劈裂产生的对称(S)本征模与反对称(AS)本征模,构建了可调控的模式体系,这两种本征模的色散特性差异为后续利用色散与非线性效应平衡实现色散曲线拉平、色散零点定位奠定了核心模式基础,直接支撑了多模压缩光场频谱分布的定向调控,是实现超高压缩度、超多模式数量子光源的关键结构保障。

[0048] 本申请的一个具体实施方式中,耦合率 J 通过两个环形微腔的耦合间距调整;直波导耦合率 γ 通过环形微环与直波导耦合间距调控;本征损耗 μ 由品质因数 Q_0 决定。

[0049] 本申请这些参数的调控方式与来源设计,共同构建了双环微腔的可控光学特性体系,是实现色散诱导多模压缩量子光源高性能指标的关键技术保障。

[0050] 进一步的,为了得到一个更加精准的结构设计,本申请的一个具体实施例中,每个环形微腔的半径均为 $125\mu\text{m}$,波导宽度为 1500nm ,波导高度为 850nm ,有效折射率为 1.99 ;耦合率 $J=4.5\text{GHz}$;品质因数 $Q_0\approx 4\times 10^6$,本征损耗 $\mu=2\pi\times 50\text{MHz}$;耦合前,两个环形微腔的谐振峰失谐量 $\delta=4\text{GHz}$,耦合诱导谐振峰劈裂是 $\Delta\omega=\sqrt{(4J^2+\delta^2)}$ 。

[0051] 上述实施例中的双环氮化硅微腔结构通过精准的参数设计与耦合机制,为超多模式压缩光源的实现提供了核心支撑。

[0052] 基于相同的技术构思,本申请的一些具体实施方式中,提供一种基于的双环氮化

硅微腔的色散诱导的多模压缩量子光源制备方法,如图2所示,可以采用以下步骤:

[0053] S100,采用色散调控机制,调控双环氮化硅微腔的相位匹配条件和多模压缩形貌;

[0054] S200,在色散调控机制基础上,通过泵浦光注入与状态演化产生目标量子光场,即得到多模压缩量子光源。

[0055] 本申请上述实施例,通过耦合双环的色散能级调控非线性色散,能够在双孤子与单孤子态下实现1024个腔模的超大规模量子压缩。

[0056] 为了更精准的进行色散调控,本申请的一个具体实施方式中,S100,采用色散调控机制,调控双环氮化硅微腔的色散特性,可以采用以下步骤:

[0057] S101,基础色散设计。

[0058] 通过色散工程将双环氮化硅微腔设计为反常色散特性 ($D_2 \approx 3 \times 10^6 \text{ rad/s}$, 双环氮化硅微腔的二阶色散参数(也称为群速度色散参数)),并将相同色散参数应用于两个微腔,

[0059] 具体的,反常色散:折射率随频率升高而减小,高频成分传播速度快于低频成分,此时若介质同时存在非线性效应(如氮化硅的三阶非线性克尔效应),色散与非线性可形成平衡,抑制脉冲展宽,甚至支持孤子态(一种稳定传输的光脉冲形态)的形成。

[0060] 具体的,相同的色散参数是指每个环形微腔的半径(125 μm)、波导宽度(1500nm)、波导高度(850nm)、有效折射率(1.99)等参数完全相同,且均仅支持基模传播。这些结构参数直接决定微腔的色散特性(如群速度色散、高阶色散等),统一的结构确保了双环的色散参数(如反常色散的强度、色散曲线形态)完全一致。

[0061] 因此,以上设置能够确保双环基础色散特性一致,为孤子演化过程中色散与非线性效应的宽带平衡奠定物理基础,同时为后续模式耦合效应提供对称的色散载体。

[0062] S102,模式耦合分化。

[0063] 在步骤S101的反常色散基础上,利用双环倏逝场耦合效应诱导谐振峰劈裂,产生对称(S)与反对称(AS)本征模式;在单孤子态下,由于色散与非线性效应的平衡,AS本征模对应的集成色散曲线被拉平,与S本征模色散曲线形成交点,该交点位置即为色散波频率,主导四波混频的相位匹配条件。

[0064] 值得注意的是,通过热调节两个微腔的周长可实现色散特性从基础固定到动态可调的转化。示例性的:通过贴附在二氧化硅表面的电极调节微腔周长,可以实现20GHz的 δ 值调节范围。

[0065] S103,色散零点定位。

[0066] 基于步骤S102中形成的S/AS本征模集成色散抛物线与零色散直线,在不同工作状态下精准定位色散零点:阈值以下时定位两对色散零点,阈值以上稳定孤子态时定位一对色散零点,引导多模压缩光场的频谱分布在色散零点附近聚集,最终实现对压缩形貌的调控,完成从色散特性调节到量子光场功能输出的闭环。

[0067] 具体的,阈值以下时:当双环氮化硅微腔的输入光功率低于孤子态形成的临界功率阈值,此时微腔中非线性效应较弱,未达到孤子形成的能量条件,S/AS本征模的集成色散抛物线(即反对称AS本征模拉平后色散曲线与对称S本征模固有形态色散曲线构成的集成化曲线)与零色散直线的相互作用关系更复杂,两条本征模色散曲线会分别与零色散直线形成交点,因此定位出两对色散零点;

[0068] 阈值以上稳定孤子态时:当输入光功率达到或超过孤子态形成的临界功率阈值,

微腔进入稳定孤子态,色散与非线性效应达到平衡,S/AS本征模的集成色散抛物线形态因非线性调控趋于稳定,此时两条本征模色散曲线与零色散直线的作用关系简化,仅形成一组交点,因此定位出一对色散零点。

[0069] 本申请上述实施例,S101“基础色散设计”通过色散工程将双环设计为反常色散特性并统一参数,为孤子演化中色散与非线性的宽带平衡奠定物理基础,确保双环具备对称的色散载体,为后续模式耦合提供一致的初始条件,是多模压缩实现的前提。S102“模式耦合分化”利用双环倏逝场耦合诱导谐振峰劈裂产生S/AS本征模,单孤子态下AS模色散曲线拉平与S模曲线形成交点确定色散波频率,主导四波混频相位匹配,同时通过热调节微腔周长实现色散特性动态可调,为多模压缩的相位条件调控提供核心机制。S103“色散零点定位”基于S/AS集成色散抛物线与零色散直线,在不同阈值状态下精准定位色散零点,引导多模压缩光场频谱聚集于零点附近,完成从色散调节到量子光场功能输出的闭环,实现对压缩形貌的定向调控。三者层层递进,共同构建了多模压缩光源的色散调控路径,缺一不可。

[0070] 为了实现多模压缩,本申请的一些具体实施方式中,步骤S200,在色散调控机制基础上,通过泵浦光注入与状态演化产生目标量子光场,即得到多模压缩量子光源,可以采用以下步骤:

[0071] S201,设定泵浦光参数。

[0072] 选用波长1550nm波段(频率192.175THz)的连续激光作为泵浦光,功率设定为1W。

[0073] S202,注入与状态演化。

[0074] 如图4所示,将泵浦光注入AS本征模对应的谐振峰,通过调节泵浦光失谐量使系统经历完整孤子演化过程,依次实现阈值以下状态、图灵态、双孤子态,最终稳定在单孤子态,此时系统实现1024个腔模的多模压缩,零傅里叶频率处压缩度达29.74dB。

[0075] 本申请上述实施例实现了阈值以上的高压缩度多模压缩,压缩度超出了以往所有的连续变量阈值以下量子压缩光场。

[0076] 本申请的一些具体实施方式中,采用变形超模理论及ABMD分解,提取最大压缩超模的线性组合系数;通过Wiener-Khinchin定理计算正交分量噪声谱,实现对多模压缩的定量表征。

[0077] 具体的,ABMD分解算法

[0078] 通过ABMD算法解耦并提取多模压缩的形貌。首先,通过海森堡-朗之万方程表征多模压缩随时间的演化:

$$[0079] \quad \frac{d\hat{\delta}}{dt} = M_a \cdot \hat{\delta} + \sqrt{2\gamma} \cdot \hat{\delta}^{in} + \sqrt{2\mu} \cdot \hat{\delta}^{loss}$$

[0080] 式中 $\hat{\delta}$ 表示产生/湮灭算符基下的多模量子涨落, M_a 表示一个矩阵,作用于多模量子涨落 $\hat{\delta}$,用于描述系统内部因素对多模量子涨落随时间演化的影响。 γ 表示直波导耦合率; $\hat{\delta}^{in}$ 代表外部输入的多模量子涨落; $\hat{\delta}^{loss}$ 表示由于损耗产生的多模量子涨落, μ 表示本征损耗。

[0081] 然后,将上述方程改写至位置/动量基下, M_a 相应的作相似变换为 S_x 后,对 S_x 作ABMD分解:

$$[0082] \quad S_x(\omega) = U(\omega)D(\omega)V^\dagger(\omega)$$

[0083] 其中 $U(\omega)$ 的列向量给出超模的线性组合系数,作用在输出腔模算符上,对角矩阵 $D(\omega)$ 的对角线元素给出不同线性组合下的多模压缩/反压缩度, $V(\omega)$ 的行向量同样给出超模的线性组合系数,作用在输入腔模算符上。 ω 为傅里叶频率,物理上表现为旋波变换后在频谱上距离谐振峰 ω 处的光场。

[0084] 通过上述运算方法,在单孤子态时零傅里叶频率处的压缩度为29.74dB(图3),而本征谱的尖峰表明色散调制的频率相关性(图5)。

[0085] 具体的,通过Wiener-Khinchin定理计算正交分量噪声谱,包括采用以下过程:

[0086] 结合变形超模理论,明确多模压缩态超模的腔模线性组合系数;

[0087] 利用Wiener-Khinchin定理计算超模正交分量的噪声谱,将量子涨落转化为可直观分析的噪声分布曲线;

[0088] 通过噪声谱精准测量不同模式的压缩程度,最终验证在单孤子态下实现了1024个腔模的超多模压缩(如图5所示),且零傅里叶频率处压缩度达到29.74dB(如图3所示)。

[0089] 本申请利用变形超模理论与ABMD分解方法在数值上定位受相位匹配条件诱导的多模压缩态频谱形貌分布,支持量子计算、通信及精密测量应用。

[0090] 值得注意的是,通过上述两个环形微腔制备的超多模式压缩光源可被拓展至多环耦合的氮化硅微腔情形。针对集成拓扑氮化硅微腔阵列,可直接沿用本申请中提出的分析方法构造相应多模压缩量子光源。也就是说,多环耦合时可沿用“统一结构参数确保色散一致性”“倏逝场耦合诱导多组本征模劈裂”“色散调控主导相位匹配”等逻辑,通过增加微环数量进一步扩展模式数量或优化压缩性能,从而制备更复杂的超多模式压缩光源。通过设计拓扑微腔阵列的反常色散特性、分析阵列中耦合诱导的模式劈裂规律、利用孤子态演化调控压缩形貌,并通过ABMD分解和噪声谱计算验证多模压缩性能,即可高效构造出适用于拓扑微腔阵列的多模压缩量子光源。本申请不仅限于双环微腔本身,其核心技术逻辑和分析方法可横向扩展至更复杂的多环系统或拓扑微腔阵列,显著提升了技术的应用范围和实用价值。

[0091] 基于相同的技术构思,本申请的一些具体实施方式中,一种基于双环氮化硅微腔的色散诱导的多模压缩量子光源制备系统100,如图7所示,包括:

[0092] 色散调控模块110:采用色散调控机制,调控双环氮化硅微腔的相位匹配条件;

[0093] 多模压缩模块120:在色散调控机制基础上,通过泵浦光注入与状态演化产生目标量子光场,即得到多模压缩量子光源。

[0094] 本申请上述实例中各模块/单元具体可以参照上述实施例中基于双环氮化硅微腔的色散诱导的多模压缩量子光源制备方法对应的步骤的实现技术,在此不再赘述。

[0095] 基于相同的技术构思,在本申请的其他实施例中,提供一种终端,包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序,处理器执行程序时可用于执行上述的基于双环氮化硅微腔的色散诱导的多模压缩量子光源制备方法,或,运行上述的基于双环氮化硅微腔的色散诱导的多模压缩量子光源制备系统。

[0096] 基于相同的技术构思,在本申请的其他实施例中,提供一种计算机可读存储介质,其上存储有计算机程序,该程序被处理器执行时可用于执行上述的基于双环氮化硅微腔的色散诱导的多模压缩量子光源制备方法,或,运行上述的基于双环氮化硅微腔的色散诱导的多模压缩量子光源制备系统。

[0097] 可选地,存储器,用于存储程序;存储器,可以包括易失性存储器(英文:volatile memory),例如随机存取存储器(英文:random-access memory,缩写:RAM),如静态随机存取存储器(英文:static random-access memory,缩写:SRAM),双倍数据率同步动态随机存取存储器(英文:Double Data Rate Synchronous Dynamic Random Access Memory,缩写:DDR SDRAM)等;存储器也可以包括非易失性存储器(英文:non-volatile memory),例如快闪存储器(英文:flash memory)。存储器用于存储计算机程序(如实现上述方法的应用程序、功能模块等)、计算机指令等,上述的计算机程序、计算机指令等可以分区存储在一个或多个存储器中。并且上述的计算机程序、计算机指令、数据等可以被处理器调用。

[0098] 上述的计算机程序、计算机指令等可以分区存储在一个或多个存储器中。并且上述的计算机程序、计算机指令、数据等可以被处理器调用。

[0099] 处理器,用于执行存储器存储的计算机程序,以实现上述实施例涉及的方法中的各个步骤。具体可以参见前面方法实施例中的相关描述。

[0100] 处理器和存储器可以是独立结构,也可以是集成在一起的集成结构。当处理器和存储器是独立结构时,存储器、处理器可以通过总线耦合连接。

[0101] 本领域内的技术人员应明白,本申请的实施例可提供为方法、系统、或计算机程序产品。因此,本申请可采用完全硬件实施例、完全软件实施例、或结合软件和硬件方面的实施例的形式。而且,本申请可采用在一个或多个其中包含有计算机可用程序代码的计算机可用存储介质(包括但不限于磁盘存储器、CD-ROM、光学存储器等)上实施的计算机程序产品的形式。

[0102] 本申请是参照根据本申请实施例的方法、设备(系统)、和计算机程序产品的流程图和/或方框图来描述的。应理解可由计算机程序指令实现流程图和/或方框图中的每一流程和/或方框、以及流程图和/或方框图中的流程和/或方框的结合。可提供这些计算机程序指令到通用计算机、专用计算机、嵌入式处理机或其他可编程数据处理设备的处理器以产生一个机器,使得通过计算机或其他可编程数据处理设备的处理器执行的指令产生用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的装置。

[0103] 这些计算机程序指令也可存储在能引导计算机或其他可编程数据处理设备以特定方式工作的计算机可读存储器中,使得存储在该计算机可读存储器中的指令产生包括指令装置的制造品,该指令装置实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能。

[0104] 这些计算机程序指令也可装载到计算机或其他可编程数据处理设备上,使得在计算机或其他可编程设备上执行一系列操作步骤以产生计算机实现的处理,从而在计算机或其他可编程设备上执行的指令提供用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的步骤。

[0105] 以上对本申请的部分具体实施例进行了描述。需要理解的是,本申请并不局限于上述特定实施方式,本领域技术人员可以在权利要求的范围内做出各种变形或修改,这并不影响本申请的实质内容。上述各优选特征在互不冲突的情况下,可以任意组合使用。

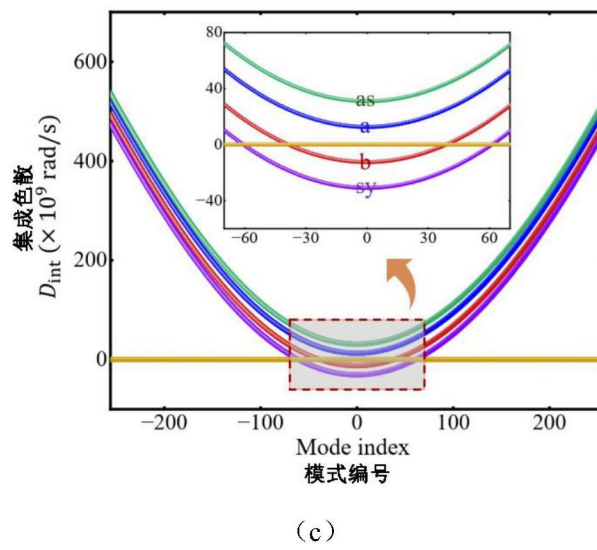
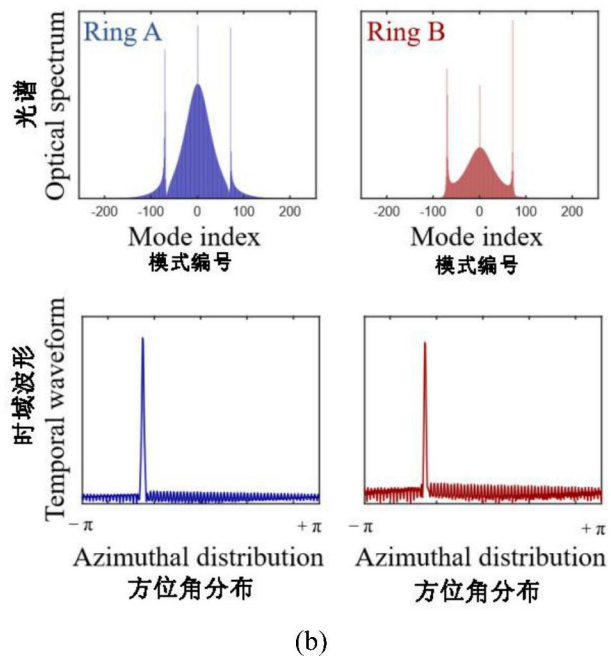
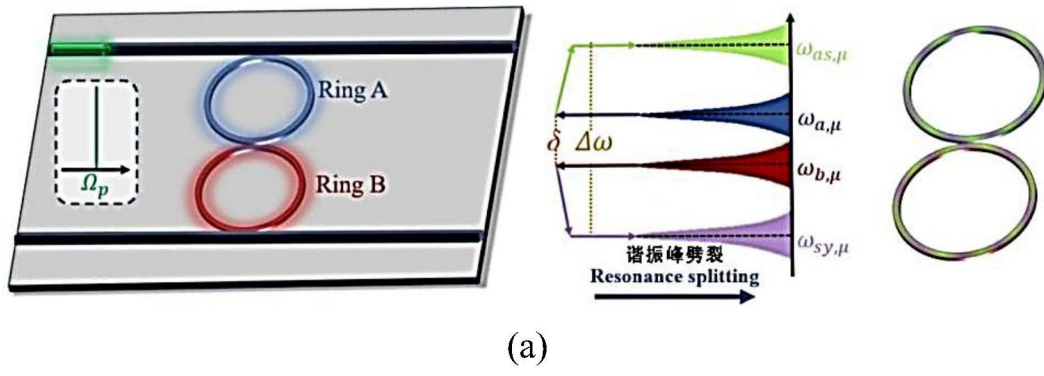


图1

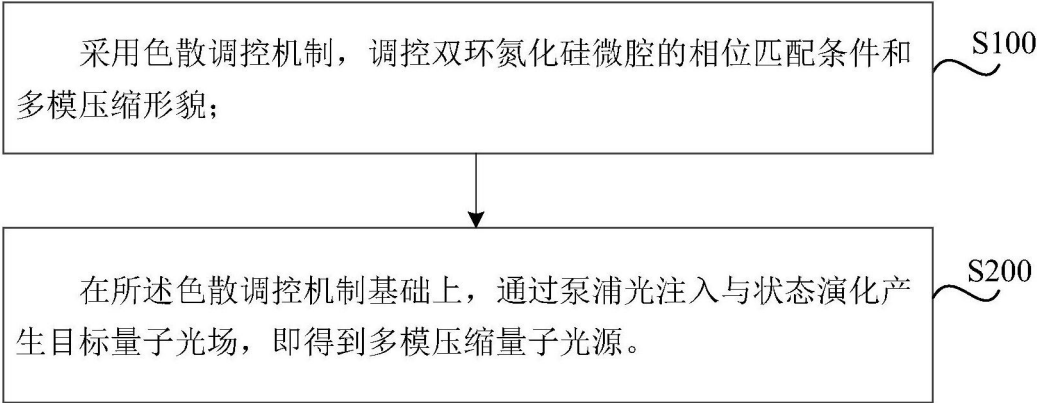


图2

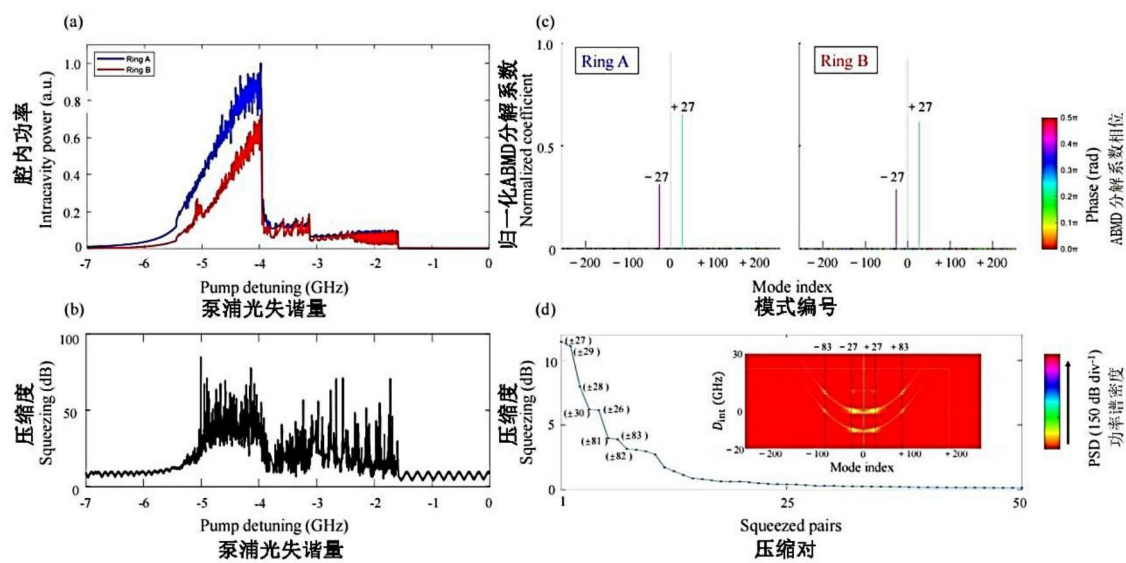


图3

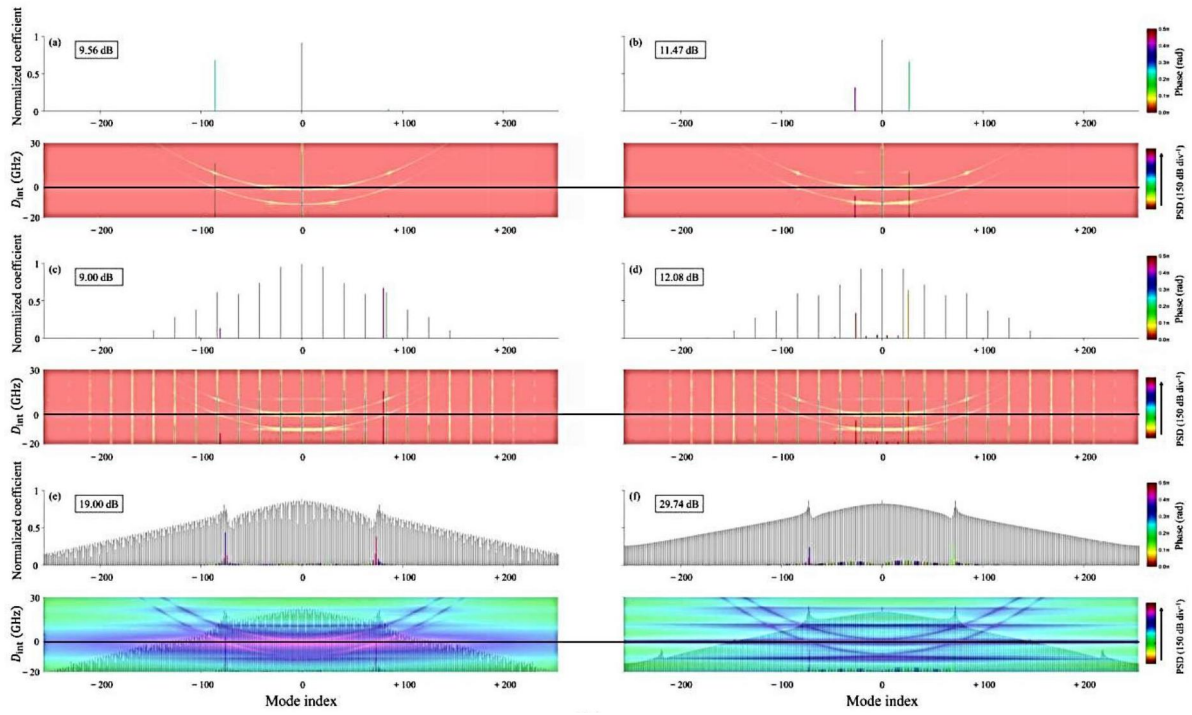


图4

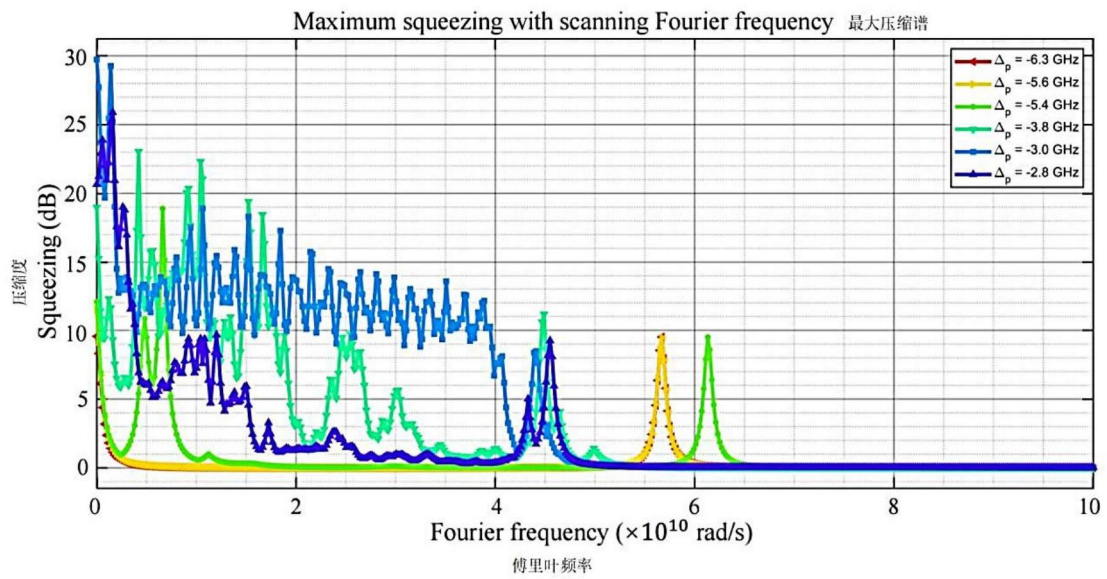


图5

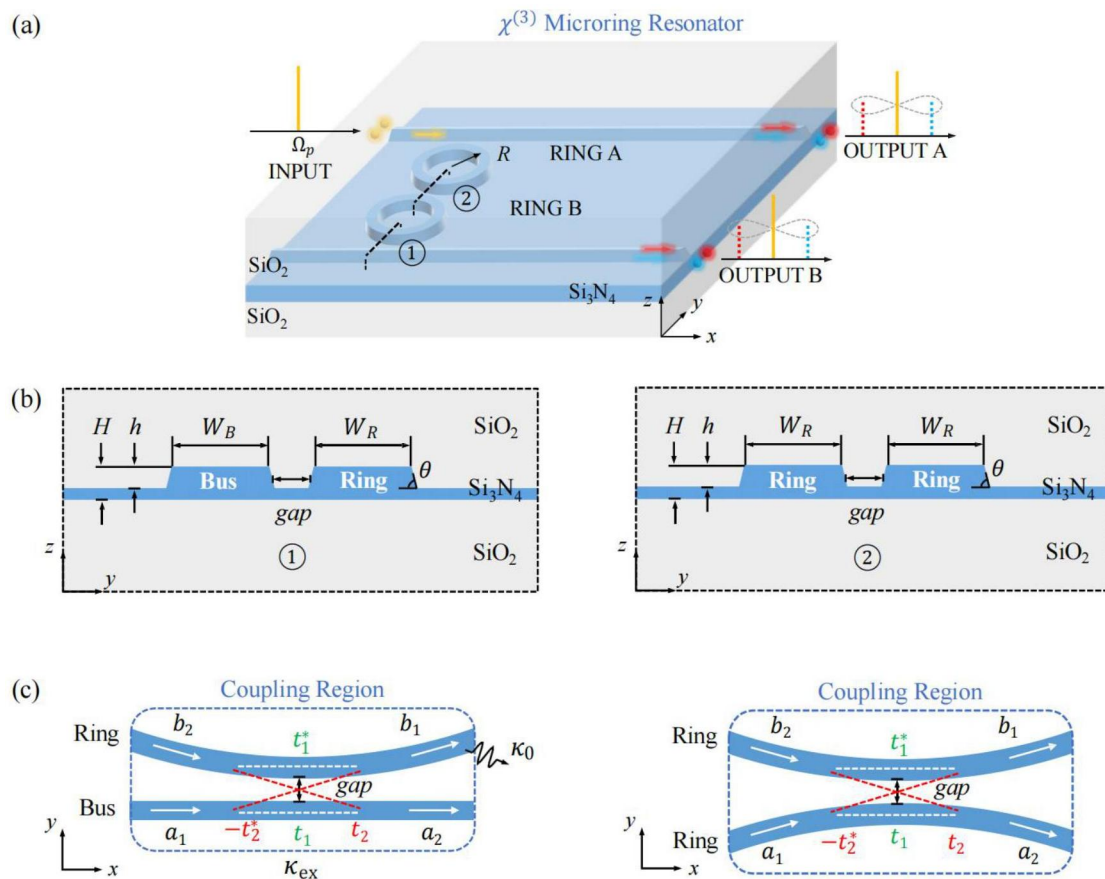


图6

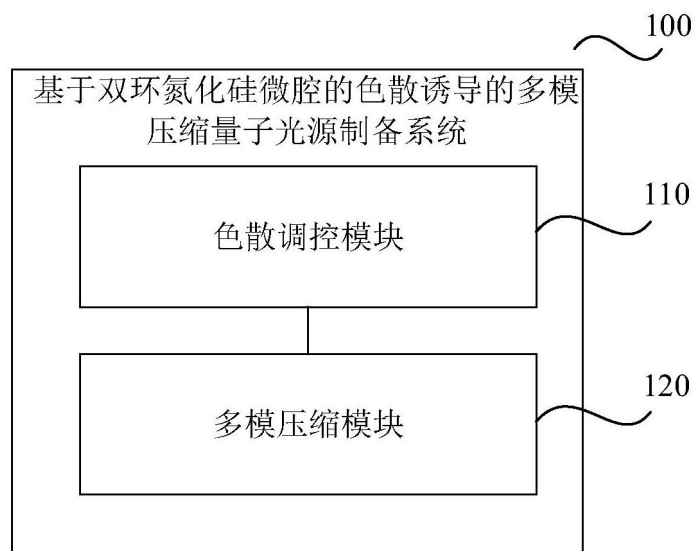


图7