



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)
徐红银(021-54400090)

发文日:

2025 年 08 月 19 日



申请号: 202511158441.9

发文序号: 2025081901267470

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: 2025111584419

申请日: 2025 年 08 月 19 日

申请人: 上海交通大学

发明人: 何广强, 徐浩东

发明创造名称: 基于铈酸锂微环谐振腔二阶频率梳的多模压缩分析方法

经核实, 国家知识产权局确认收到文件如下:

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

发明专利请求书 1 份 4 页

实质审查请求书 文件份数: 1 份

申请方案卷号: SHJX3870I

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 120779641 A

(43) 申请公布日 2025. 10. 14

(21) 申请号 202511158441.9

(22) 申请日 2025.08.19

(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 徐浩东

(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 徐红银

(51) Int. Cl.

G02F 1/35 (2006.01)

G02F 1/355 (2006.01)

G02B 6/293 (2006.01)

G06F 30/20 (2020.01)

G06F 17/14 (2006.01)

G06F 123/02 (2023.01)

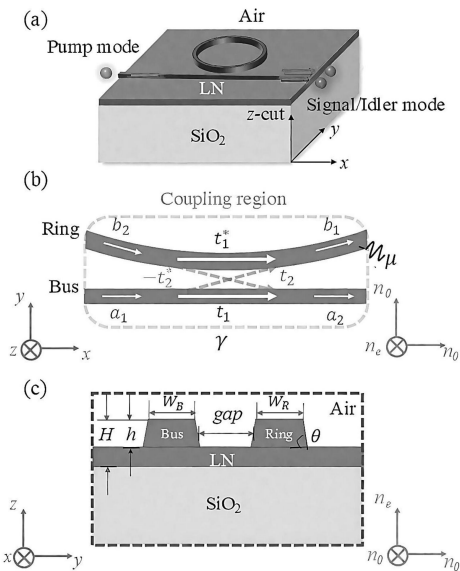
权利要求书2页 说明书8页 附图4页

(54) 发明名称

基于铌酸锂微环谐振腔二阶频率梳的多模
压缩分析方法

(57) 摘要

本申请公开了一种基于铌酸锂微环谐振腔二阶频率梳的多模压缩分析方法,所述方法构建二阶频率梳生成模型,所述模型基于MATLAB仿真环境,用于基于所述微环谐振腔的结构模拟并表征二阶频率梳的演化过程,其中仿真采用包含泵浦场与半谐波场相互作用的二阶耦合平均场理论模型;采用解析布洛赫-弥赛亚分解算法,对生成的二阶频率梳进行多模压缩度计算及超模分解系数分布分析,以量化评估频率梳的量子压缩特性与模式耦合规律。本申请为铌酸锂微环谐振腔在量子光学、光通信等领域的应用奠定关键技术基石。



1. 一种微环谐振腔,其特征在于,所述微环谐振腔包括一个由铌酸锂晶体膜制备成的非线性微环谐振腔,其中:

所述非线性微环谐振基于所述铌酸锂晶体膜的二阶非线性 $\chi^{(2)}$,在谐振腔结构内发生级联二阶非线性过程,形成泵浦场和半谐波场两组频率梳,这些模式之间存在量子多模压缩特性。

2. 根据权利要求1所述的一种微环谐振腔,其特征在于,所述非线性微环谐振腔包括非线性微环和直波导,两者在耦合区域发生模式耦合,通过优化所述非线性微环谐振腔的耦合关系和所述非线性微环、所述直波导结构,改变所述非线性微环谐振腔的色散关系,控制孤子晶体的形成。

3. 根据权利要求1所述的一种微环谐振腔,其特征在于,所述铌酸锂晶体膜为z-cut铌酸锂薄膜,其底部设有 SiO_2 层构成的衬底,顶部暴露在空气中。

4. 根据权利要求3所述的一种微环谐振腔,其特征在于,所述铌酸锂晶体膜的厚度为 $H=0.6\mu\text{m}$,宽度 $W=2\mu\text{m}$,刻蚀深度 $h=0.41\mu\text{m}$,刻蚀角度 $\theta=75^\circ$;所述非线性微环的半径为 $R=100\mu\text{m}$,所述非线性微环和所述直波导的间距 $\text{gap}=0.49\mu\text{m}$,耦合率 $r=1.222$ 。

5. 一种基于铌酸锂微环谐振腔二阶频率梳的多模压缩分析方法,其特征在于,包括:

构建二阶频率梳生成模型,所述模型基于MATLAB仿真环境,用于基于权利要求1-4中任一项所述微环谐振腔的结构模拟并表征二阶频率梳的演化过程,其中仿真采用包含泵浦场与半谐波场相互作用的二阶耦合平均场理论模型;

采用解析布洛赫-弥赛亚分解算法,对生成的二阶频率梳进行多模压缩度计算及超模分解系数分布分析,以量化评估频率梳的量子压缩特性与模式耦合规律。

6. 根据权利要求5所述的基于铌酸锂微环谐振腔二阶频率梳的多模压缩分析方法,其特征在于,所述二阶耦合平均场理论模型,其中二阶耦合平均场方程表示为:

$$\frac{da}{dt} = (-i\Delta - \Gamma)a - i\frac{k_1''Lv_f}{2}\frac{\partial^2 a}{\partial \tau^2} + ig_0ba^*;$$

$$\frac{db}{dt} = (-i\Delta_p - \Gamma)b - \Delta k'Lv_f\frac{\partial b}{\partial \tau} - i\frac{k_2''Lv_f}{2}\frac{\partial^2 b}{\partial \tau^2} + ig_0a^2 + \sqrt{2\gamma}B_{in};$$

其中,a、b分别表示半谐波和泵浦的时域场, Δ 表示失谐, Γ 表示总损耗, γ 表示外部损耗, g_0 表示二阶非线性系数, v_f 表示自由光谱范围,L表示腔长, B_{in} 表示输入泵浦振幅, $\frac{\partial b}{\partial \tau}$ 表示偏导数公式,i为虚数单位,*表示复数的共轭, k_1'' 、 k_2'' 分别表示半谐波场和泵浦场群速度色散, B_{in} 表示输入泵浦振幅, $\Delta k'$ 表示走离。

7. 根据权利要求6所述的基于铌酸锂微环谐振腔二阶频率梳的多模压缩分析方法,其特征在于,所述二阶耦合平均场方程,采用分步傅里叶法求解,包括:

采用分步傅里叶法进行时域仿真,初始激励设定为高斯白噪声,通过对失谐量的均匀扫描,模拟二阶频率梳的演化过程。

8. 根据权利要求5所述的基于铌酸锂微环谐振腔二阶频率梳的多模压缩分析方法,其特征在于,所述解析布洛赫-弥赛亚分解算法,包括:

将系统传输矩阵进行相似变换与矩阵分解,获取表征系统量子特性的关键参数,所述关键参数包括超模分解系数的相位与振幅分布,以及多模压缩的压缩度信息。

9. 根据权利要求8所述的基于铌酸锂微环谐振腔二阶频率梳的多模压缩分析方法, 其特征在于, 所述解析布洛赫-弥赛亚分解算法, 其中:

利用二阶频率梳的演化过程对应的时域数值代入所述解析布洛赫-弥赛亚分解算法分解程序中, 表征不同时刻的超模分解系数分布和多模压缩压缩谱, 以及演化全过程零傅里叶频率下的多模压缩压缩度的变化曲线。

10. 根据权利要求5所述的基于铌酸锂微环谐振腔二阶频率梳的多模压缩分析方法, 其特征在于, 所述量化评估频率梳的量子压缩特性, 包括:

记录不同失谐条件下频率梳的时域脉冲形态与光谱分布, 观察频率梳演化过程中零傅里叶频率下的多模压缩度变化, 从而评估量子压缩特性。

基于铌酸锂微环谐振腔二阶频率梳的多模压缩分析方法

技术领域

[0001] 本申请属于非线性光学与量子光学技术领域,具体涉及一种基于铌酸锂微环谐振腔的二阶频率梳生成及其量子多模压缩特性分析技术,尤其适用于集成光学、量子通信、精密测量等领域中对频率梳生成与量子特性调控的应用场景。

背景技术

[0002] 频率梳作为一种具备等间隔频率谱线的光源,凭借其极高的频率稳定性和宽光谱覆盖能力,在量子通信、精密光谱分析、光钟等领域发挥着不可替代的作用。随着集成光子学的飞速发展,芯片级量子光学系统成为研究热点,而微环谐振器因具有强光学限制能力和增强的非线性相互作用,成为生成频率梳的核心器件,为实现小型化、高性能的量子光源提供了关键平台。

[0003] 近年来,基于多种材料平台的微环谐振器量子光源研究取得了显著进展。在氮化硅微环中,通过阈值下自发四波混频可生成正交压缩真空态和光子数差压缩态,并已实现 heralded 单光子源及可扩展多用户量子网络;碳化硅微环则利用孤子微梳动力学实现了多模纠缠;此外,氮化镓、铝镓砷等材料及集成纳米光子平台也被证实可用于制备高纯度量子光源。这些研究推动了量子频率梳控制技术的发展,从强耦合光子二聚体系统的非平衡驱动到宇称-时间对称模式选择泵浦策略,凸显了量子频率梳在量子计算、通信等新兴应用中的核心地位。

[0004] 然而,现有主流材料平台(如氮化硅)主要依赖三阶非线性效应,在生成纠缠光子对时面临泵浦阈值较高、量子效率有限等问题。相比之下,铌酸锂凭借其显著的二阶非线性系数展现出独特优势:通过自发参量下转换(SPDC)过程,可高效生成纠缠光子对,且所需泵浦阈值远低于氮化硅等平台;同时,铌酸锂支持单光子在 telecom 波段与可见光或中红外波段的量子频率转换,满足多模量子架构的兼容性需求,其异质集成技术更为多功能量子光子芯片的研发奠定了基础。此外,铌酸锂的泡克尔斯效应使其具备高速、低损耗的电光调制能力,在光通信系统中具有重要应用价值。

[0005] 尽管铌酸锂微环谐振器在量子频率梳领域展现出巨大潜力,但现有研究仍存在诸多挑战:其一,针对二阶频率梳的多模压缩特性缺乏统一的分析框架,难以量化评估模式间的量子关联与压缩度分布;其二,色散与耦合工程的精准调控仍有待突破,制约了超宽带、高压压缩度多模压缩态的实现。

发明内容

[0006] 本申请针对现有技术中存在的上述不足,提供了一种基于铌酸锂微环谐振腔二阶频率梳的多模压缩分析方法,通过优化结构与仿真分析,实现高效的二阶频率梳生成与精准的量子多模压缩特性表征。

[0007] 本申请的一个方面,提供一种微环谐振腔,所述微环谐振腔包括一个由铌酸锂晶体膜制备成的非线性微环谐振腔,其中:

[0008] 所述非线性微环谐振基于所述铌酸锂晶体膜的二阶非线性 $\chi^{(2)}$,在谐振腔结构内发生级联二阶非线性过程,形成泵浦场和半谐波场两组频率梳,这些模式之间存在量子多模压缩特性。

[0009] 可选地,所述非线性微环谐振腔包括非线性微环和直波导,两者在耦合区域发生模式耦合,通过优化所述非线性微环谐振腔的耦合关系和所述非线性微环、所述直波导结构,改变所述非线性微环谐振腔的色散关系,控制孤子晶体的形成。

[0010] 可选地,所述铌酸锂晶体膜为z-cut铌酸锂薄膜,其底部设有SiO₂层构成的衬底,顶部暴露在空气中。

[0011] 可选地,所述铌酸锂晶体膜的厚度为 $H=0.6\mu\text{m}$,宽度 $W=2\mu\text{m}$,刻蚀深度 $h=0.41\mu\text{m}$,刻蚀角度 $\theta=75^\circ$;所述非线性微环的半径为 $R=100\mu\text{m}$,所述非线性微环和所述直波导的间距 $\text{gap}=0.49\mu\text{m}$,耦合率 $r=1.222$ 。

[0012] 本申请的第二方面,提供一种基于铌酸锂微环谐振腔二阶频率梳的多模压缩分析方法,包括:

[0013] 构建二阶频率梳生成模型,所述模型基于MATLAB仿真环境,用于基于所述微环谐振腔的结构模拟并表征二阶频率梳的演化过程,其中仿真采用包含泵浦场与半谐波场相互作用的二阶耦合平均场理论模型;

[0014] 采用解析布洛赫-弥赛亚分解算法,对生成的二阶频率梳进行多模压缩度计算及超模分解系数分布分析,以量化评估频率梳的量子压缩特性与模式耦合规律。

[0015] 可选地,所述二阶耦合平均场理论模型,其中二阶耦合平均场方程表示为:

$$\begin{aligned} \frac{da}{dt} &= (-i\Delta - \Gamma)a - i\frac{k_1''Lv_f}{2}\frac{\partial^2 a}{\partial \tau^2} + ig_0ba^*; \\ \frac{db}{dt} &= (-i\Delta_p - \Gamma)b - \Delta k'Lv_f\frac{\partial b}{\partial \tau} - i\frac{k_2''Lv_f}{2}\frac{\partial^2 b}{\partial \tau^2} + ig_0a^2 + \sqrt{2\gamma}B_{in}; \end{aligned}$$

[0017] 其中,a、b分别表示半谐波和泵浦的时域场, Δ 表示失谐, Γ 表示总损耗, γ 表示外部损耗, g_0 表示二阶非线性系数, v_f 表示自由光谱范围,L表示腔长, B_{in} 表示输入泵浦振幅, $\frac{\partial b}{\partial \tau}$ 表示偏导数公式,i为虚数单位,*表示复数的共轭, k_1'' 、 k_2'' 分别表示半谐波场和泵浦场群速度色散, B_{in} 表示输入泵浦振幅, $\Delta k'$ 表示走离。

[0018] 可选地,所述二阶耦合平均场方程,采用分步傅里叶法求解,包括:采用分步傅里叶法进行时域仿真,初始激励设定为高斯白噪声,通过对失谐量的均匀扫描,模拟二阶频率梳的演化过程。

[0019] 可选地,所述解析布洛赫-弥赛亚分解算法,包括:将系统传输矩阵进行相似变换与矩阵分解,获取表征系统量子特性的关键参数,所述关键参数包括超模分解系数的相位与振幅分布,以及多模压缩的压缩度信息。

[0020] 可选地,所述解析布洛赫-弥赛亚分解算法,其中:利用二阶频率梳的演化过程对应的时域数值代入所述解析布洛赫-弥赛亚分解算法分解程序中,表征不同时刻的超模分解系数分布和多模压缩压缩谱,以及演化全过程零傅里叶频率下的多模压缩压缩度的变化曲线。

[0021] 可选地,所述量化评估频率梳的量子压缩特性,包括:记录不同失谐条件下频率梳

的时域脉冲形态与光谱分布,观察频率梳演化过程中零傅里叶频率下的多模压缩度变化,从而评估量子压缩特性。

[0022] 与现有技术相比,本申请具有如下至少一种有益效果:

[0023] 本申请实施例提供的微环谐振腔采用基于铌酸锂薄膜结构设计,结合参数优化,可以实现高效的二阶频率梳生成。

[0024] 本申请实施例提供的基于铌酸锂微环谐振腔二阶频率梳的多模压缩分析方法,通过优化谐振腔的色散关系和孤子晶体形成,实现了对泵浦场和半谐波场两组频率梳的有效调控,能实现色散与耦合工程的精准调控;基于解析布洛赫-弥赛亚分解算法挖掘了其量子多模压缩特性,解决了二阶频率梳的多模压缩特性难以量化评估模式间的量子关联与压缩度分布的问题,为量子通信和精密测量提供了新的技术手段。

[0025] 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

[0026] 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加明显:

[0027] 图1为本申请一优选实施例中微环谐振腔设计示意图以及耦合关系和截面结构;

[0028] 图2为本申请一优选实施例中运用COMSOL Multiphysics仿真的色散曲线,给出了各模式集成色散 D_{int} 的取值;

[0029] 图3为本申请一优选实施例中二阶频率梳的演化过程以及一时刻孤子晶体的时域波形;

[0030] 图4为本申请一优选实施例中不同失谐量下的二阶频率梳及超模分解系数振幅的分布;

[0031] 图5为本申请一优选实施例中二阶频率梳演化过程多模压缩的最大压缩度的变化以及不同失谐量下的多模压缩谱。

具体实施方式

[0032] 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。以下实施例中未详细说明的部分可以参照现有技术实现。

[0033] 参见图1所示,展示的是基于铌酸锂(LiNbO_3 ,简称LN)材料的微环谐振腔相关设计,包含结构示意图(a)、耦合关系模型(b)以及截面参数示意(c)。

[0034] 铌酸锂具备二阶非线性光学特性,由此铌酸锂晶体膜制备的微环谐振腔可增强光场与材料相互作用,提升非线性光学过程效率。图1中(a)所示,实施例中的微环谐振腔,该微环谐振腔包括一个由铌酸锂晶体膜制备成的非线性微环谐振腔,非线性微环谐振基于铌酸锂晶体膜的二阶非线性 $\chi^{(2)}$,在谐振腔结构内发生级联二阶非线性过程,形成泵浦场和半谐波场两组频率梳,这些模式之间存在量子多模压缩特性。具体的,泵浦光子经下转换生成两个半谐波光子,而半谐波光子又通过和频过程反向生成泵浦光子,由此形成相互耦合的泵浦场与半谐波场两组频率梳,这些模式之间存在量子多模压缩特性。

[0035] 如图1中的 (b) 所示,非线性微环谐振腔包括非线性微环和直波导,两者在耦合区域发生模式耦合,通过优化非线性微环谐振腔的耦合关系和非线性微环、直波导结构,改变非线性微环谐振腔的色散关系,控制孤子晶体的形成。图 (b) 中,包含“Ring”(微环波导,即非线性微环)和“Bus”(直波导),二者在“Coupling region”(耦合区域)发生模式耦合。微环波导可将光场限制在环内循环谐振,直波导则用于输入和输出光信号。

[0036] 对于直波导,输入信号用 a_1 表示,输出信号为 a_2 ,光在直波导自身传输的参数用 t_1 描述(包含传输损耗、相位变化等线性传输特性)。

[0037] 对于微环波导(非线性微环),环内沿顺时针和逆时针方向的信号分别用 b_1 、 b_2 表示,微环波导自身的传输特性由 t_1^* 等参数描述。

[0038] 直波导与微环波导之间的耦合通过 t_2 、 $-t_2^*$ 等参数体现, t_2 表示光在二者之间的耦合系数,包含耦合效率、相位匹配等信息,负号表示模式的传播方向或相位关系有关。 γ 为外部损耗,源于微环与直波导的耦合。而 μ 为本征损耗,指光在微环内传播时不可避免的能量损耗,与外界耦合无关,主要包括材料吸收损耗、散射损耗、辐射损耗、模式泄露等损耗路径。

[0039] 图中 n_o 、 n_e 表示光的折射率,关联LN晶体的双折射特性,LN是单轴晶体, n_o 为寻常光(o光)折射率, n_e 为非常光(e光)折射率,光的偏振态与晶体轴(x、y、z方向)关系会影响折射率,进而改变光的传播模式和耦合特性。

[0040] 如图1中的 (a) 所示,铌酸锂晶体膜为z-cut铌酸锂薄膜,其底部设有 SiO_2 层构成的衬底,顶部暴露在空气中。

[0041] 具体的,图1的 (a) 中:从下到上,基底是二氧化硅(SiO_2)层,中间为LN层即z-cut铌酸锂薄膜,最上层暴露于空气(Air)环境。这种分层结构利用了不同材料的光学特性, SiO_2 作为衬底起支撑与光学隔离等作用,LN层是实现非线性光学效应的核心功能层,空气层则构成光学边界条件。图中“Pump mode”(泵浦光模式)和“Signal/Idler mode”(信号光/闲频光模式),表示谐振腔结构用于参量下转换这一非线性过程,泵浦光在结构中激发信号光和闲频光。“z-cut”表示LN晶体的切割方向,沿z轴切割的LN晶体,其非线性光学系数的利用与晶体取向相关,x、y、z为空间直角坐标系,定义了光传播与晶体轴的方向关系。

[0042] 参照图1中 (c) 所示的微环谐振腔截面结构,和图1中 (a) 对应,截面方向为x-z平面,从下到上是 SiO_2 衬底、LN层(z-cut铌酸锂薄膜)、空气层。LN层中嵌入“Bus”(直波导)和“Ring”(微环波导),二者均为脊型波导结构,通过限制光场在波导芯区(Bus和Ring的脊部)传输,实现光的导波功能。

[0043] 图中所示的各波导尺寸参数: W_B 是直波导脊部的宽度, W_R 是微环波导脊部的宽度; H 为铌酸锂晶体膜的厚度, h 是刻蚀深度,也就是波导脊部相对于LN层平面的高度(脊型波导的凸起高度);“gap”是直波导与微环波导脊部之间的间隙,影响二者的模式耦合强度,间隙越小,耦合通常越强。 θ 是刻蚀角度,也就是微环波导脊部的倾斜角等几何参数,对微环波导的模式分布、光场限制能力有影响;折射率 n_e (非常光折射率)和 n_o (寻常光折射率),体现LN晶体的双折射特性,光在不同偏振态、不同波导结构中的传播折射率不同,会改变光的有效模式折射率,进而影响谐振条件和耦合效率。

[0044] 直波导与微环波导在耦合区域,通过模式重叠实现光场的耦合与能量交换,线性传输参数(如 t_1 、 t_1^* 等)描述光在波导内的传播损耗、相位变化,耦合参数(如 t_2 等)描述二

者之间的能量耦合比例,同时LN晶体的二阶非线性特性,以及晶体双折射,共同决定了泵浦光、信号光和闲频光在该微环谐振腔结构中的传输、谐振与非线性相互作用过程,分析该具体过程,可用于构建非线性光学器件(如光参量振荡器、非线性频率转换器等),利用微环谐振腔的谐振增强效应,提升非线性光学过程的效率。

[0045] 图2为本申请一优选实施例中运用COMSOL Multiphysics仿真的色散曲线,给出了各模式集成色散 D_{int} 的取值,实施例提供的铌酸锂微环谐振腔,通过优化谐振腔截面结构和耦合关系,实现了一定范围内色散平坦化,减轻相位失配的影响,为多模压缩资源的制备提供基础。泵浦场(Pump)谐振峰中心频率 ω_p 为 $2.41406 \times 10^{15} \text{ rad/s}$,半谐波场谐振峰中心频率 ω_0 为 $1.20688 \times 10^{15} \text{ rad/s}$,其左部分为信号场(Signal),右部分为闲频场(Idler)。标记半谐波场中心模式数1为0,可得到泵浦场中心模式数为959。这种色散工程不仅显著提升了光学参量振荡器过程的能量转换效率,还为二阶频率梳的稳定生成提供了相位匹配条件,可稳定制备孤子晶体,即由周期性排列的孤子脉冲构成的相干态。孤子晶体支撑的二阶频率梳可提供大量具备量子多模压缩特性的纠缠模式对,为并行量子计算、多通道量子密钥分发等场景提供高密度量子资源。

[0046] 比如,在一具体实施例中,色散与耦合工程的调控可以通过遍历不同参数,找出较为适合频率梳的色散平坦的色散关系来实现。

[0047] 在本申请的一个优选实施例中,非线性微环和直波导的横截面为梯形,通过优化波导截面结构与耦合关系改变谐振腔的色散关系。当然,横截面的形状并不仅限于梯形。一般的,横截面结构包括了铌酸锂晶体膜的厚度H,宽度W,刻蚀深度h,刻蚀角度 θ ,微环和波导间距gap,色散关系曲线通过设置这些参数,通过软件仿真而得。

[0048] 如图1中的(c)所示,在一具体实施例中,波导结构是在 $H=0.6\mu\text{m}$ 厚的z-cut铌酸锂薄膜上制备而成,衬底为 SiO_2 层,顶部暴露在空气中。环形波导和直波导的优选宽度 $W_R=W_B=2\mu\text{m}$,优选刻蚀深度 $h=0.4\mu\text{m}$,优选刻蚀角度 $\theta=75^\circ$,优选间距 $\text{gap}=0.49\mu\text{m}$ 。

[0049] 在另一实施例中,具体基于铌酸锂微环谐振腔的参数:铌酸锂晶体膜的厚度为 $H=0.6\mu\text{m}$,宽度 $W=2\mu\text{m}$,刻蚀深度 $h=0.41\mu\text{m}$,刻蚀角度 $\theta=75^\circ$;非线性微环的半径为 $R=100\mu\text{m}$,非线性微环和直波导的间距 $\text{gap}=0.49\mu\text{m}$,耦合率 $r=1.222$ 。该过耦合谐振腔促进泵浦光子的参量下转换过程,可高效制备量子多模压缩态。

[0050] 本申请上述实施例中设计了适配二阶频率梳生成的基于铌酸锂微环谐振腔,通过优化几何参数与材料特性,赋予其高效的非线性光学响应。

[0051] 在上述实施例设计的基于铌酸锂微环谐振腔,在本申请另一实施例中,还提供一种基于铌酸锂微环谐振腔二阶频率梳的多模压缩分析方法,具体包括如下步骤:

[0052] S1. 构建二阶频率梳生成模型,模型基于MATLAB仿真环境,用于基于微环谐振腔的结构模拟并表征二阶频率梳的演化过程,其中仿真采用包含泵浦场与半谐波场相互作用的二阶耦合平均场理论模型;

[0053] S2. 采用解析布洛赫-弥赛亚分解算法,对生成的二阶频率梳进行多模压缩度计算及超模分解系数分布分析,以量化评估频率梳的量子压缩特性与模式耦合规律。

[0054] 本申请上述实施例中,依托设计的基于铌酸锂微环谐振腔结构,仿真二阶频率梳的生成和演化,进而运用解析布洛赫-弥赛亚分解方法,对生成的二阶频率梳展开多模压缩度计算与超模分解系数分布分析,以此量化评估其量子压缩特性,实现高效的二阶频率梳

生成与精准的量子多模压缩特性表征。

[0055] 在本申请一些实施例中,上述步骤S1中的二阶耦合平均场理论模型,其中二阶耦合平均场方程表示为:

$$\begin{aligned} \frac{da}{dt} &= (-i\Delta - \Gamma)a - i\frac{k_1''Lv_f}{2}\frac{\partial^2 a}{\partial \tau^2} + ig_0ba^*; \\ \frac{db}{dt} &= (-i\Delta_p - \Gamma)b - \Delta k'Lv_f\frac{\partial b}{\partial \tau} - i\frac{k_2''Lv_f}{2}\frac{\partial^2 b}{\partial \tau^2} + ig_0a^2 + \sqrt{2\gamma}B_{in}; \end{aligned}$$

[0057] 其中,a、b分别表示半谐波和泵浦的时域场, Δ 表示失谐, Γ 表示总损耗, γ 表示外部损耗, g_0 表示二阶非线性系数, v_f 表示自由光谱范围,L表示腔长, B_{in} 表示输入泵浦振幅, $\frac{\partial b}{\partial \tau}$ 表示偏导数公式,i为虚数单位,*表示复数的共轭, k_1'' 、 k_2'' 分别表示半谐波场和泵浦场群速度色散, $\Delta k'$ 表示走离。 B_{in} 表示输入泵浦振幅。

[0058] 在本申请的一个优选实施例中,设置二阶耦合平均场方程有关参数:外部损耗 $\gamma = 4 \times 10^8 \text{ rad/s}$,本征损耗 $\mu = 3.27 \times 10^8 \text{ rad/s}$,半谐波场1560nm和泵浦场780nm群速度色散 $k_1'' = -0.0219 \text{ ps}^2/\text{m}$ 、 $k_2'' = 0.3624 \text{ ps}^2/\text{m}$,走离 $\Delta k' = 205.7 \text{ ps/m}$,自由光谱范围 $v_f = 201.976 \text{ GHz}$,另外泵浦光波长780nm,输入泵浦振幅 $B_{in} = 1.9 \times 10^8 \text{ V/m}$ 。

[0059] 本申请上述实施例中的二阶耦合平均场方程,可以采用分步傅里叶法求解,包括:采用分步傅里叶法(方程线性部分频域求解,非线性部分时域求解)进行时域仿真,初始激励设定为高斯白噪声,通过对失谐量的均匀扫描,模拟二阶频率梳的演化过程。

[0060] 具体的,在本申请一较佳实施例中,采用分步傅里叶法求解耦合方程:将时间演化过程分解为线性传播(含色散与损耗)和非线性相互作用两个阶段,每步迭代步长设为0.1ps,总演化时间700ns。以高斯白噪声作为初始激励,模拟自发参量下转换的初始扰动;通过均匀扫描失谐量 Δ (范围 $-1 \times 10^{10} \text{ rad/s}$ 至 $2.6 \times 10^{10} \text{ rad/s}$),记录给定失谐条件下频率梳的时域脉冲形态与光谱分布(考虑泵浦和半谐波场共 800×2 个模式),此时时域波形为周期性排列的孤子脉冲,如图3所示。

[0061] 在本申请一些实施例中,解析布洛赫-弥赛亚分解算法,包括:将系统传输矩阵进行相似变换与矩阵分解,获取表征系统量子特性的关键参数,所述关键参数包括超模分解系数的相位与振幅分布,以及多模压缩的压缩度信息。具体的,采用解析布洛赫-弥赛亚分解算法将相似变换后的传输矩阵 $S_x(\omega)$ 分解为 $U(\omega)D(\omega)V^\dagger(\omega)$ 的形式,其中 $U(\omega)$ 蕴含超模分解系数的相位和振幅信息, $D(\omega)$ 蕴含多模压缩压缩度信息。

[0062] 在上述基础上,利用二阶频率梳的演化过程对应的时域数值代入解析布洛赫-弥赛亚分解算法分解程序中,表征不同时刻的超模分解系数分布和多模压缩压缩谱,以及演化全过程零傅里叶频率下的多模压缩压缩度的变化曲线,根据该曲线变化情况可以实现对二阶频率梳的多模压缩特性的分析,并进一步量化评估模式间的量子关联与压缩度分布。

[0063] 图4对二阶频率梳的Turing模式与孤子晶体状态进行光谱分布及超模分解系数分析,结果显示两种状态均存在强多模压缩特性:Turing模式的压缩度达21.01dB,孤子晶体状态的压缩度达37.06dB;超模分解系数主要集中于半谐波场模式,且孤子晶体形成后,超模分解系数的最大值迁移至中心半谐波模式,体现该模式压缩特性的增强局域化。为验证多模压缩的集体性(即需包含光谱带内所有模式以避免因模间耦合导致量子关联损失),对

半谐波场与泵浦场分别分析:仅考虑半谐波场存在显著压缩,部分场景下其压缩度甚至超过全局压缩水平;而泵浦场单独无明显压缩,因泵浦场作为经典驱动,无法独立生成量子压缩,且忽略倍频或和频涉及的模式会破坏维持多模纠缠所需的量子非线性耦合。

[0064] 图5对全失谐扫描过程中零傅里叶频率下的多模压缩演化分析显示,其中图(a)失谐-压缩特性分布和图(b)频率-压缩响应:在Turing模式区间,压缩度随失谐呈现振荡,与腔内功率随失谐的变化一致;当失谐量过大时,多模压缩完全消失,表明孤子晶体结构解体。通过解析布洛赫-弥赛亚分解提取多模压缩频谱分布,其特征为两个主导峰,且峰位对失谐敏感;随失谐量增大,仅零傅里叶频率附近保留单个孤立压缩峰,此特性与泵浦功率调谐时压缩峰位基本不变的现象形成显著差异。

[0065] 现有的二阶频率梳的多模压缩特性缺乏统一的分析框架,难以量化评估模式间的量子关联与压缩度分布,以及色散与耦合工程的调控技术制约了超宽带、高压压缩度多模压缩态的实现,本申请很好地解决了这些技术问题,由上述图4、5可以看出,量子关联分布即图4展示的多模压缩的超模分解系数分布,量子压缩度的量化即图5。另外,通过本申请的色散耦合工程,实现了超宽带(即跨越泵浦场和半谐波场共1600个模式的压缩,1560nm到780nm)和高压压缩度(超过30dB)。

[0066] 本申请上述实施例中的基于铌酸锂微环谐振腔的二阶频率梳及多模特性分析方法,致力于提供高效生成二阶频率梳并精准解析其多模压缩特性的技术方案。其核心在于设计适配二阶频率梳生成的铌酸锂微环谐振腔,通过优化几何参数与材料特性,赋予其高效的非线性光学响应;依托该谐振腔结构,仿真二阶频率梳的生成和演化;进而运用解析布洛赫-弥赛亚分解方法,对生成的二阶频率梳展开多模压缩度计算与超模分解系数分布分析,以此量化评估其量子压缩特性。本申请为铌酸锂微环谐振腔在量子光学、光通信等领域的应用奠定关键技术基石。

[0067] 在本申请实施例的描述中,需要理解的是,术语“中心”、“纵向”、“横向”、“长度”、“宽度”、“厚度”、“上”、“下”、“前”、“后”、“左”、“右”、“竖直”、“水平”、“底”“内”、“外”、“顺时针”、“逆时针”等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。

[0068] 此外,术语“第一”、“第二”仅用于描述目的,而不能理解为指示或暗示相对重要性或者隐含指明所指示的技术特征的数量。由此,限定有“第一”、“第二”的特征可以明示或者隐含地包括一个或者更多个该特征。

[0069] 在本申请实施例的描述中,“多个”的含义是两个或两个以上,除非另有明确具体的限定。在本申请中,除非另有明确的规定和限定,术语“安装”、“相连”、“连接”、“固定”等术语应做广义理解,例如,可以是固定连接,也可以是可拆卸连接,或一体地连接;可以是机械连接,也可以是电连接;可以是直接相连,也可以通过中间媒介间接相连,可以是两个元件内部的连通。对于本领域的普通技术人员而言,可以根据具体情况理解上述术语在本申请中的具体含义。

[0070] 本申请实施例中术语“包括”和“具有”以及它们任何变形,意图在于覆盖不排他的包含。例如包含了一系列步骤或单元的过程、方法、系统、产品或设备没有局限于已列出的步骤或单元,而是可选地还包括没有列出的步骤或单元,或可选地还包括对于这些过程、方

法、产品或设备固有的其它步骤或单元。

[0071] 以上对本申请的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。

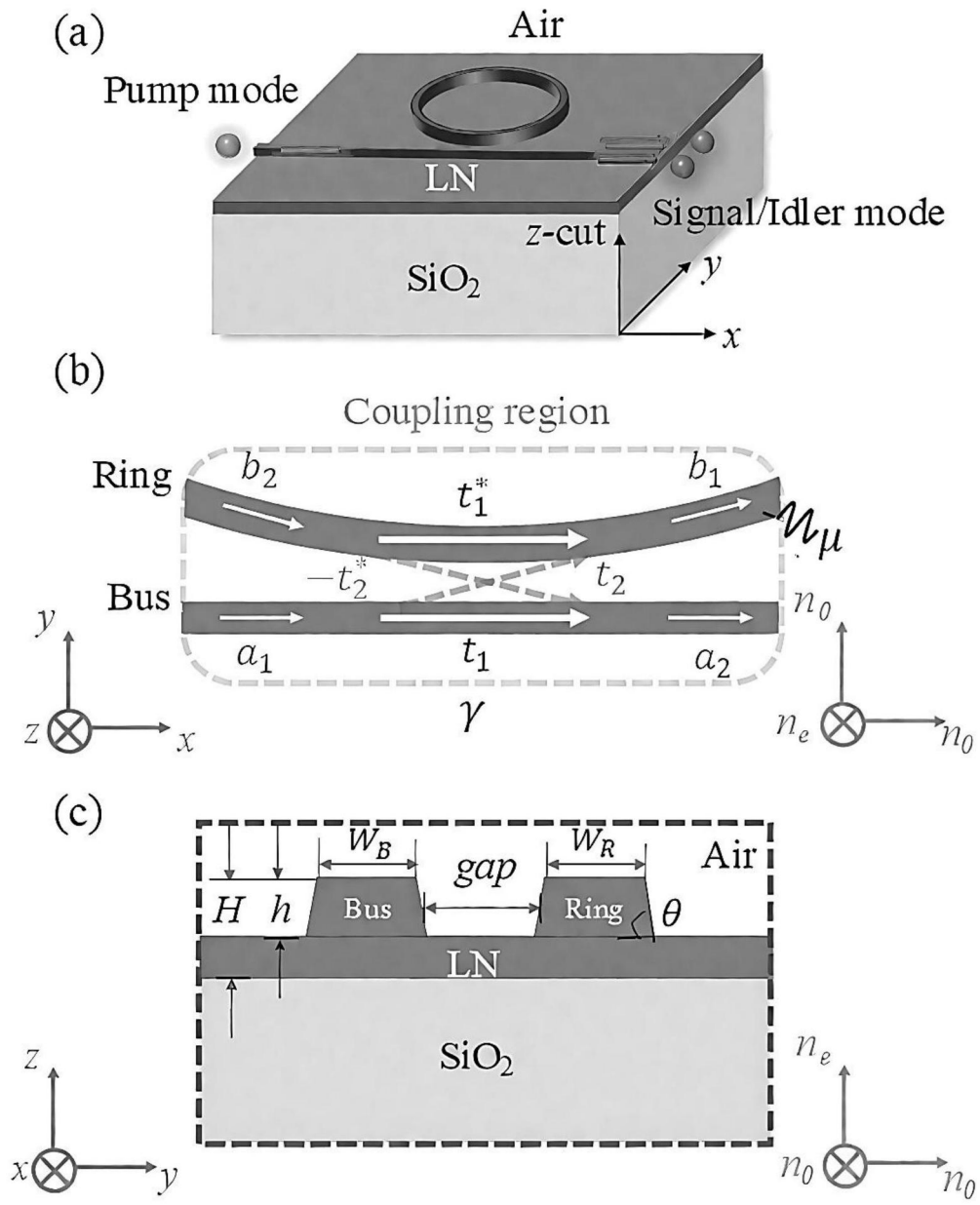


图1

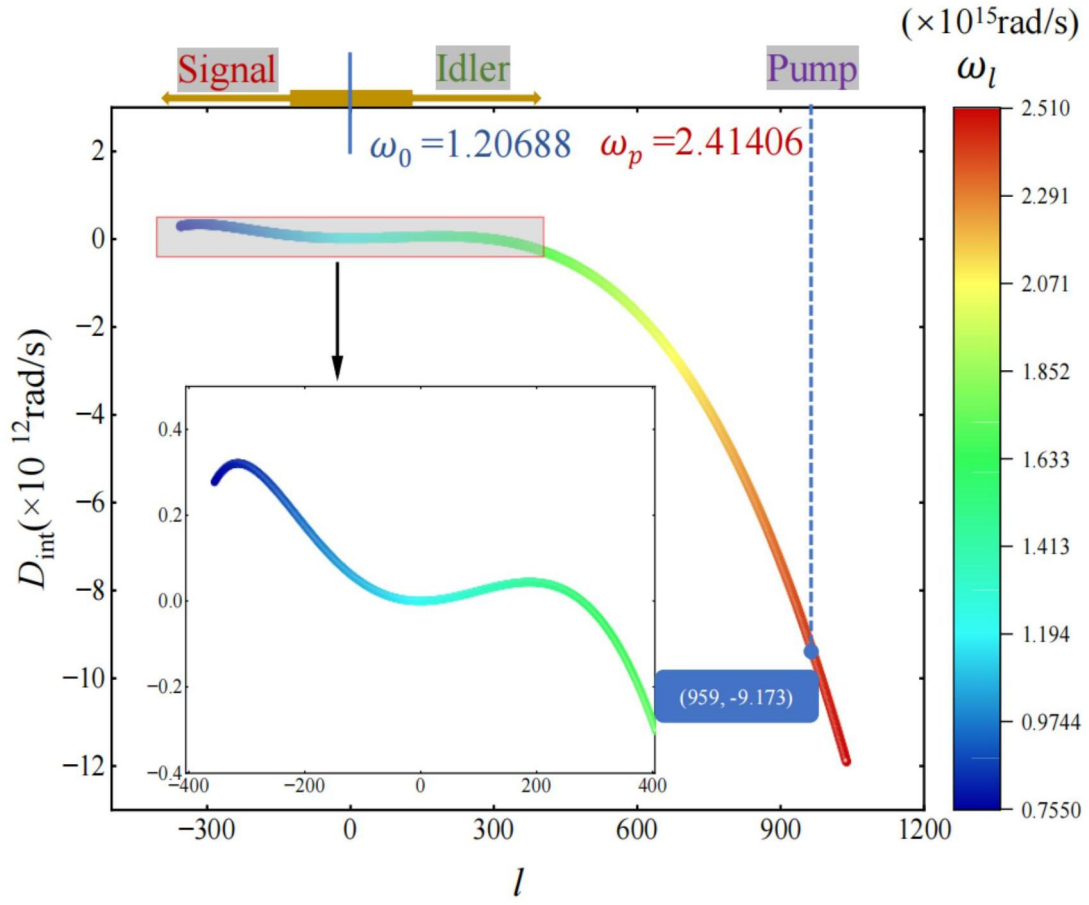


图2

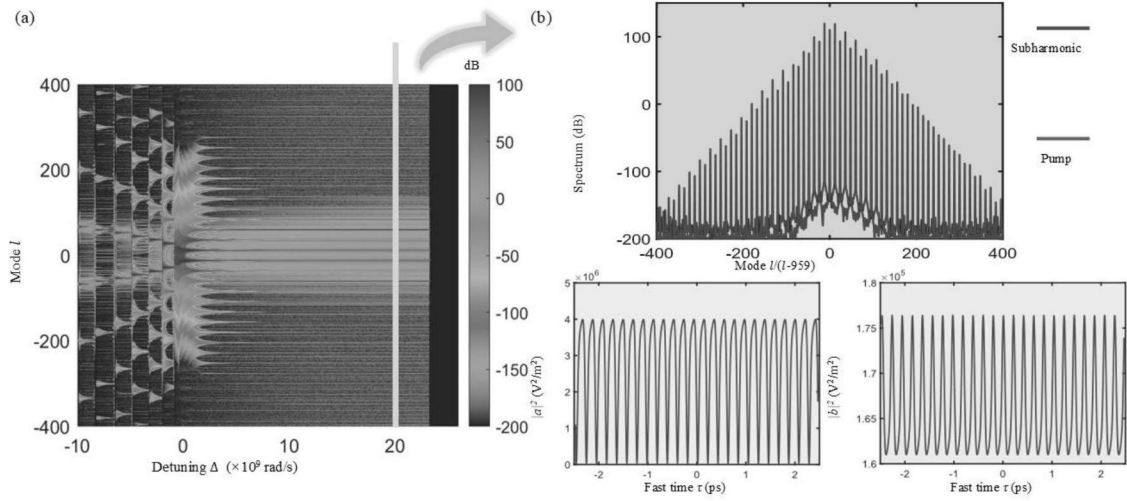


图3

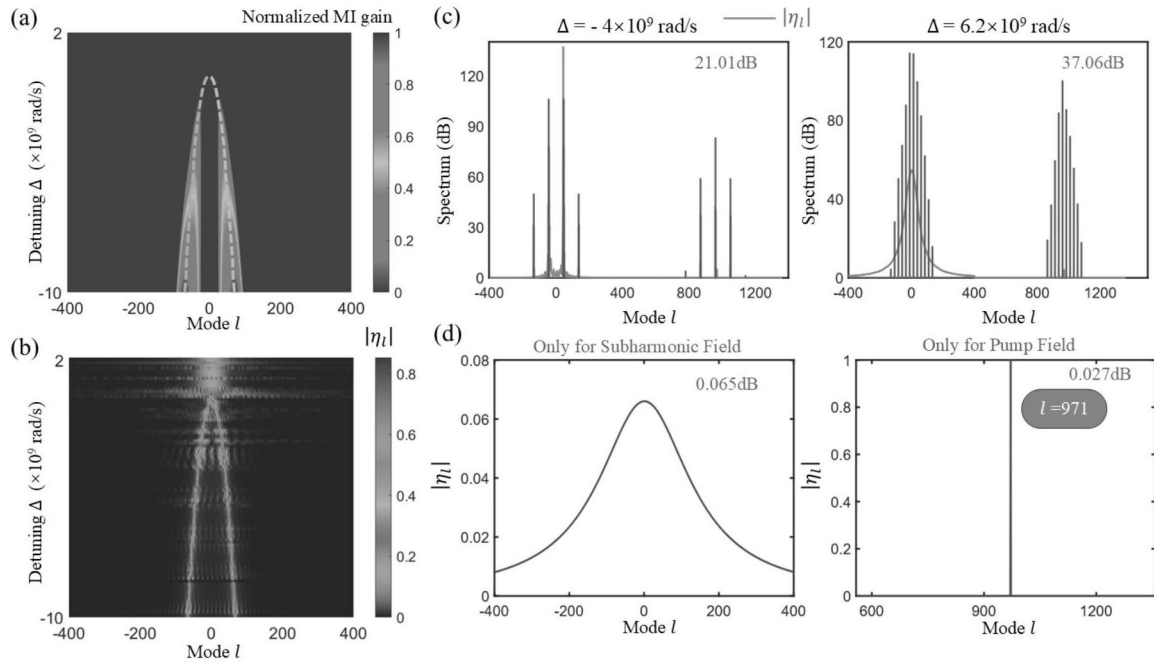


图4

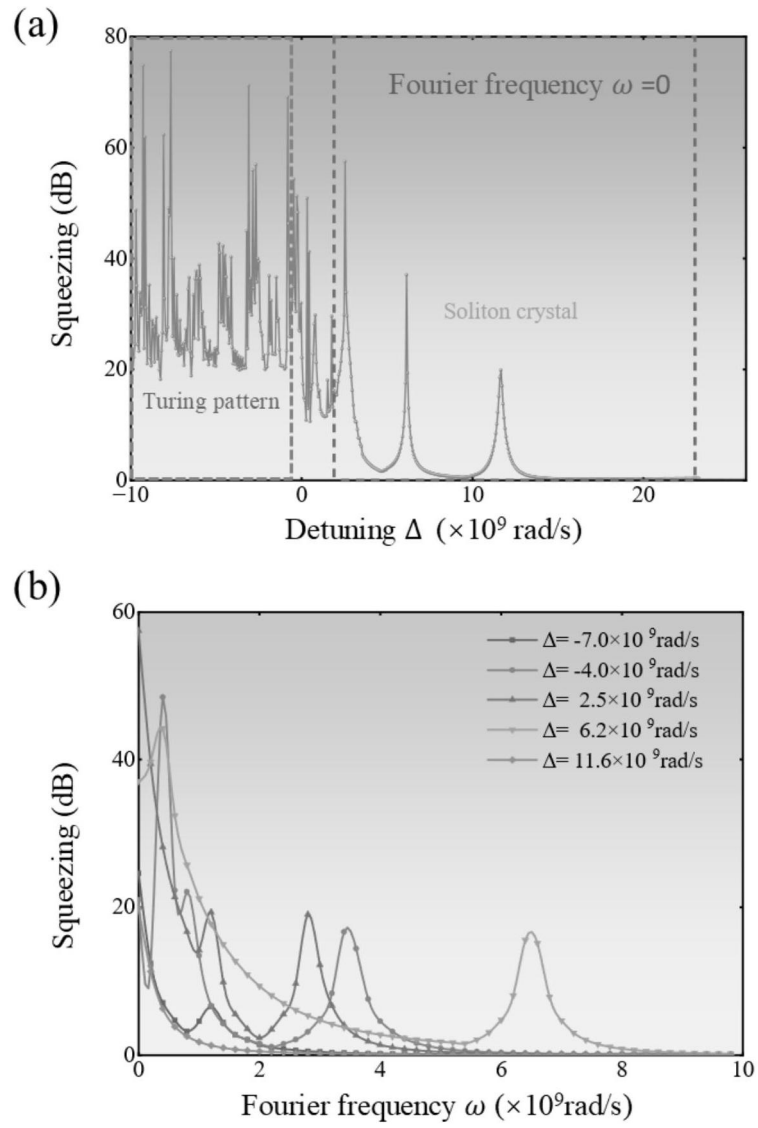


图5