

# 光学学报

## 一种非线性腔光力系统中的光机械频梳现象

熊水东, 夏霖\*, 王付印, 侯庆凯, 陈虎, 姚琼, 曹春燕\*\*

国防科技大学气象海洋学院, 湖南长沙 410073

**摘要** 腔光力系统是一种光学谐振模式和机械振荡模式在微纳尺度上相互耦合作用的微纳腔体结构。基于微纳加工技术实现的腔光力结构具有超强光机械模式耦合效应,可在激光激励下产生超稳且窄线宽的机械振荡信号。腔光力系统中的经典力学、量子力学现象等已经被广泛应用于高精度传感、腔光力器件与电路、高效率微波-光学转换器件等技术领域。为了获得光机械振荡微波信号,采用基于非线性机械振子的光机械耦合方案,使腔光力作用在一个含有非线性振子的两级级联的机械振子系统上,实现由非线性特性光机械耦合作用引起的简并四波混频,进而产生光机械频梳。基于非线性腔光力系统的光机械频梳研究,将有效推动光子集成式光机械频梳技术的发展和广泛应用。

**关键词** 光声作用; 腔光力系统; 非线性振子; 光机械频梳

中图分类号 O426.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230945

### 1 引言

随着微纳加工技术飞速发展,国内外研究者在基于回音壁微腔及光子晶体微腔的多种腔光力系统中已开展了深入的经典力学、量子力学现象<sup>[1-2]</sup>相关研究。基于腔光力系统的精密测量<sup>[3]</sup>、高精度传感<sup>[4]</sup>、腔光力器件系统集成<sup>[5]</sup>、高效率微波-光学转换<sup>[6]</sup>等在应用技术领域也相继问世。光机械频梳是一种在腔光力系统中可输出超稳机械频率信号的现象。高稳定性光机械频梳技术在高精度导航授时、微波光子雷达等领域具有广阔的应用前景<sup>[7]</sup>。同时,光机械频梳具备超高机械振荡品质因子、超稳机械振荡频率信号等特性,因此,基于腔光力系统的光机械频梳研究目前正引起广泛关注。

腔光力系统中的光机械振荡是一种由光力作用引起的机械振子受激振荡,其振荡信号频率稳定性、相位噪声特性主要由系统噪声水平决定。为了在腔光力系统中产生性能良好的光机械频梳,目前基于腔光力系统的光机械频梳主要有以下几种实现方案:高 Q 值腔光力系统设计、采用多腔体/多模式频率同步、内部/外部锁频等。腔光力系统具有高光学及机械谐振 Q 值,它可以有效提高光机械振荡信号的信噪比,提升系统稳定性等特征。通过优化设计腔体结构可以获得高 Q 值的腔光力系统,从而实现低功耗、高稳定的光机械频梳。Schliesser 等<sup>[8]</sup>通过缩减支撑柱/悬臂与微盘/微环的接触点大小改进石英腔光力系统设计,实现了光学

谐振 Q 值和机械谐振 Q 值。此外,降低腔光力系统的工作温度( $\sim 1\sim 10$  K)、提升真空度( $\sim 10^{-3}$  Pa)等补偿方法可进一步优化光机械振荡信号的输出特性。美国加州理工学院 Chan 等<sup>[9]</sup>引入了一种声子晶体带隙结构,将其置于一维光子晶体微纳梁(PCN)型腔光机械结构外周,有效地抑制了系统中机械振子的能量泄漏,进而提高了光机械振荡 Q 值。实现高 Q 值光机械振荡信号特性的另一种技术途径是参数光机械振荡方案<sup>[10]</sup>。当耦合在腔光力系统内的激光能量超过机械振子的阻尼损耗时,机械振子受激振荡使腔光力系统进入自激振荡状态,即参数光机械振荡,此时系统可以输出超窄线宽机械模式。2023 年,国防科技大学 Kuang 等<sup>[11]</sup>观测到一种基于悬浮腔光力系统实现的声子激光模式光机械频梳。

腔光力系统中的频率同步技术将参数光机械振荡模式锁定到其他腔光力系统、同一腔光力系统中不同频率的机械谐振模式以及外部参考信号源中,以改善光机械振荡的频率稳定性。2012 年,美国康奈尔大学 Zhang 等<sup>[12]</sup>实现了两个物理上靠近的微盘腔光力系统的频率同步,并测试了多微盘腔光力系统的频率同步和光机械频梳的相位噪声特性提升效果;2016 年, Li 等<sup>[13]</sup>首次观测到超长距离双/多微盘型腔光力系统的单向频率同步现象;2017 年,电子科技大学 Huang 等<sup>[14]</sup>研究了含有空气槽的两个光子晶体腔光力系统中两个频率相近的机械模式之间的频率同步现象。多腔系统、多声子模式间的频率同步现象可以改善光机

收稿日期: 2023-05-08; 修回日期: 2023-06-18; 录用日期: 2023-07-11; 网络首发日期: 2023-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(61905283)

通信作者: \*xiaji\_2022@nudt.edu.cn; \*\*ccy\_nudt@163.com

械频梳频率信号输出的稳定性、信噪比等特性,但其稳定度目前仍然无法超过性能最佳的光机械振荡信号;同时,随着多微腔系统中腔体数量、模式数量的增加,实现频率同步现象所需的泵浦光功率会随之增大。

随着对腔光力系统非线性现象的深入研究,研究人员发现腔光力系统中的非线性效应可实现真正意义上的光机械频梳。2016年,在一维 PCN 微腔系统中,由强耦合光强引起的非线性效应产生的光机械频梳被首次报道,随着不同失谐频率的激光强度的增加,腔光力系统机械振荡频率信号出现多次分频,之后形成光机械频梳<sup>[15]</sup>。2020年, Mercadé 等<sup>[16]</sup>在腔光力系统中研究参数光机械振荡时,通过增加激光蓝失谐或激光功率观测到了光机械频梳现象。2021年,南京大学 Hu 等<sup>[17]</sup>也验证了微盘型腔光力系统中同时存在光学频梳和光机械频梳现象。同年,清华大学团队<sup>[2]</sup>深入研究了微盘型腔光力系统的非线性谐振谱线,在实验中分辨出光机械振荡信号中的周期模式、椭圆余弦波模式和孤子模式,并且频域上观测到相应的单频参数光机械振荡、多频光机械频梳、宽频电磁谱等光机械频梳。2021年,北京邮电大学 Gao 等<sup>[18]</sup>理论分析了通过控制耗散耦合有效调制腔光力系统中生成的光机械频梳的机理,为实现可调光机械频梳提供了理论支撑。

综上所述,基于腔光力结构的光机械频梳技术已经得到了深入广泛的研究,然而,目前已报道的基于腔光力结构的光机械频梳实现方案存在的问题是:实现高品质光机械谐振信号需要通过复杂的腔体结构设计和严格的实验条件来抑制系统噪声;多腔光力系统/模式间的频率同步、参数光机械振荡、非线性机械耦合等技术途径产生的超稳定度光机械振荡信号依赖强激光功率调制激发。本文提出了一种基于新型非线性光机械耦合原理的光机械频梳技术方案,建立了光机械耦合模型并进行仿真分析,且在实验测试中成功地观测到光机械频梳。

## 2 基本原理与系统设计

### 2.1 含非线性振子腔光力系统的光机械频梳产生机理

首先,建立引入非线性机械振子后的腔光力系统光机械耦合模型。由于光机械结构中硅基光子晶体光学腔产生的光力需要与机械振子发生有效光机械耦合,因此光学微腔需要与一个线性-非线性振子二自由度型(2-DOF)机械腔实现高效光机械耦合,即由第一级线性机械振子(弹性系数  $k_1$  和阻尼系数  $c_1$ )和第二级非线性机械振子(弹性系数  $k_2$  和阻尼系数  $c_2$ )构成,具体系统模型如图 1 所示。

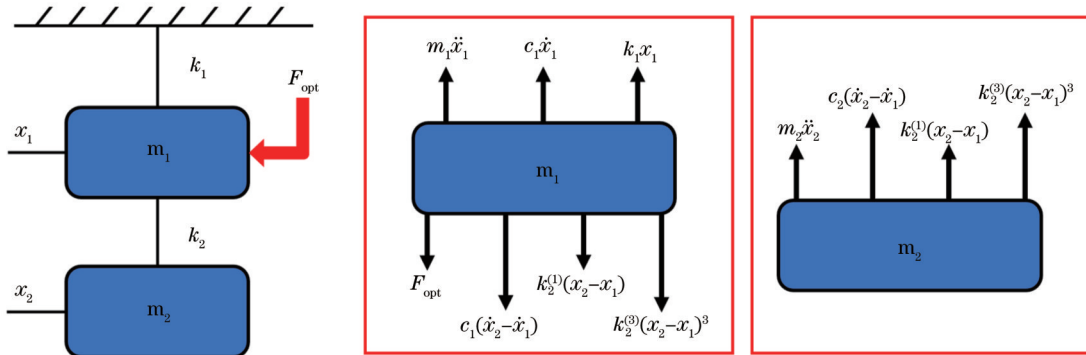


图1 光力驱动下含 2-DOF 机械振子的腔光力系统结构受力示意图

Fig. 1 Force diagram of optical force driven optomechanical system with a 2-DOF mechanical oscillator

该系统在光力驱动作用下的光机械耦合方程组为

$$\dot{\alpha} = -\frac{\kappa}{2}\alpha - i(\omega_c - Gx_1)\alpha + i\omega_l\alpha + \sqrt{\kappa_{ex}}\alpha_{in}, \quad (1)$$

$$m_1\ddot{x}_1 = \hbar G|\alpha|^2 - c_1\dot{x}_1 - k_1x_1 + c_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2^{(1)}(x_2 - x_1) + k_2^{(3)}(x_2 - x_1)^3, \quad (2)$$

$$m_2\ddot{x}_2 = -c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2^{(1)}(x_2 - x_1) - k_2^{(3)}(x_2 - x_1)^3, \quad (3)$$

式(1)描述了腔光力结构中的光学谐振模式( $\kappa$ 和 $\kappa_{ex}$ 分别为总衰减率和光学微腔衰减率, $\omega_l$ 为激光的工作频率, $\omega_c$ 为光学谐振频率, $\dot{\alpha}$ 和 $\alpha_{in}$ 分别为耦合光场能量一阶导数和泵浦激光光子能量);式(2)描述了第一级线性机械振子振荡模式( $\dot{x}_1$ 和 $\ddot{x}_1$ 是振子位移

的一阶、二阶导数, $\hbar$ 是普朗克常量, $k_1$ 和 $c_1$ 分别为第一级弹簧的弹性系数和阻尼系数);式(3)描述了第二级非线性机械振子振荡模式( $k_2$ 和 $c_2$ 分别是第二级弹簧的弹性系数和阻尼系数)。在光机械耦合作用( $G$ 为光机械耦合系数)下,光机械结构中的第一级线性振子质量块  $m_1$  及第二级非线性振子质量块  $m_2$  在光力  $F_{opt} = \hbar G|\alpha|^2$  ( $|\alpha|^2$  为腔体内的光子能量)作用下分别产生位移量  $x_1$  和  $x_2$ 。其中,非线性振子位移中的三次方项  $k_2^{(3)}(x_2 - x_1)^3$  通过光力驱动传递至第一级线性机械振子并最终影响腔光力系统的光机械耦合作用,因此它是腔光力系统非线性特性的主要贡献来源及光机械频梳产生的关键因素。利用 Euler

法求解上述三个非线性差分方程的数值解,可得出腔光力系统中光场和机械振子位移之间的相互作用关系。引入非线性振子会导致腔光力系统的光机械耦合作用也产生非线性效应,且非线性机械振子施加在线性机械振子上的弹性力也是非线性的。因此采用不同离散频率位移之和 $[\vec{x}(t)=\sum_j X_j e^{i\omega_j t} \vec{e}_x]$ ,其中: $X_j, \omega_j$ 分别是系统存在的某种机械振荡模式的幅值和频率; $\vec{e}_x$ 是 $x$ 方向的矢量符号]来表征该非线性弹性力:

$$\vec{F}_{NL} = k_2^{(1)} \vec{x} + k_2^{(3)} |\vec{x}|^2 \vec{x}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} F_3 = & 2|X_1|^2 X_3 + 2|X_2|^2 X_3 + |X_3|^2 X_3 + |X_1|^2 X_1 e^{i(\omega_1 - \omega_3)t} + 2|X_2|^2 X_1 e^{i(\omega_1 - \omega_3)t} + 2|X_3|^2 X_1 e^{i(\omega_1 - \omega_3)t} + \\ & 2|X_1|^2 X_2 e^{i(\omega_2 - \omega_3)t} + |X_2|^2 X_2 e^{i(\omega_2 - \omega_3)t} + 2|X_3|^2 X_2 e^{i(\omega_2 - \omega_3)t} + X_1 X_1 X_3^* e^{i(2\omega_1 - 2\omega_3)t} + X_2 X_2 X_3^* e^{i(2\omega_2 - 2\omega_3)t} + \\ & X_3 X_3 X_1^* e^{i(\omega_3 - \omega_1)t} + X_3 X_3 X_2^* e^{i(\omega_3 - \omega_2)t} + 2X_1 X_2 X_3^* e^{i(2\omega_1 - \omega_2 - \omega_3)t} + X_1 X_1 X_2^* e^{i(2\omega_1 - \omega_2 - \omega_3)t} + X_2 X_2 X_1^* e^{i(2\omega_2 - \omega_1 - \omega_3)t} + \\ & 2X_1 X_3 X_2^* e^{i(\omega_1 - \omega_2)t} + 2X_2 X_3 X_1^* e^{i(\omega_2 - \omega_1)t}, \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $X_j (j=1, 2, 3)$ 表示机械振荡模式 $\omega_j (j=1, 2, 3)$ 的复振幅; $X_j^*$ 为 $X_j$ 的共轭复数。借鉴光频梳产生条件,可以发现 $F_3$ 中的非线性项 $X_1 X_1 X_2^* e^{i(2\omega_1 - \omega_2 - \omega_3)t}$ 明显包含一种由非线性光机械耦合作用产生的不同机械振荡模式之间的简并四波混频(DFWM)现象<sup>[19]</sup>,即三个振荡模式之间满足条件:

$$2\omega_1 - \omega_2 - \omega_3 = 0. \quad (6)$$

式(6)表明,两种新的机械振荡频率成分( $\omega_2$ 和 $\omega_3$ )分别在 $\omega_1$ 处对称生成。可以观察到频谱仪采集到的非线性机械振荡模式的主频两侧会出现分布对称、频率间隔一致的分频信号,该现象被称为光机械频梳现象。随着光力作用在两级机械振子上的响应时间增加,DFWM现象持续发生,导致非线性振子的主频附近出现两个以等频率间隔分布的分频振荡模式,随着这两个分频振荡模式再次产生两个等频率间隔的信号,最终机械频谱中的主频边带上会出现等频率间隔(即梳距)的光机械频梳,且理论上该梳距由腔光力系统中机械振荡频率的最小值决定。

## 2.2 光机械频梳的腔光力系统结构设计

为了实现上述含非线性振子的光机械频梳的观测,设计了一种基于硅基光子晶体的腔光力系统光机械频梳的片上芯片结构,其系统原理模型如图2(a)所示,其中空气槽加载线分布着两根耦合型缺陷一维PCN波导[该结构包含与2-DOF振子连接的可移动一维PCN和与微纳光纤耦合的固定型一维PCN,如图2(b)所示],中心位置的部分空气孔具有一定位移调制作用,从而构成了具有超高光学谐振 $Q_0$ 值、高光机械耦合率的光机械结构。实验加工的测试芯片的扫描电子显微镜(SEM)图片如图2(c)所示。第二级非线性机械谐振腔是该光机械结构中的关键部分,该振子由两对双稳曲线梁连接。曲线梁线型遵循下列关系:

式中: $\vec{x}$ 是系统非线性振子的振动位移; $k_2^{(1)}$ 和 $k_2^{(3)}$ 分别是非线性机械振子弹性系数的线性部分和非线性部分。该非线性弹性力亦可由不同离散振荡频率之和表示为 $\vec{F}_{NL} = \sum_j F_j e^{i\omega_j t} \vec{e}_x$ 。类比光频梳的产生机理<sup>[19-21]</sup>,

采用非线性机械系统中声子的多模混叠原理来解释光机械频梳的产生机理。假定该系统存在某三种振荡模式(分别用 $\omega_1, \omega_2$ 和 $\omega_3$ 表示,三者之间不指定某种机械振荡模式,即具有互易性),当含有这三种频率成分的非线性弹性力施加在线性机械振子上时,该部分非线性作用力可以根据式(4)表示为

$$f(x) = \frac{h}{2} \left[ 1 - \cos\left(2\frac{y}{l}\pi\right) \right], y \in [0, l], \quad (7)$$

式中: $f$ 是施加的外力; $l$ 是曲线梁长度; $h$ 是曲线梁预弯高度。当外力施加在该曲线梁中间位置时,曲线梁形变位移和外力大小之间的关系为

$$F = \frac{3\pi^4 Q^2}{2} T \left[ \left( T - \frac{3}{2} \right)^2 + \left( \frac{4}{3Q^2} - \frac{1}{4} \right) \right], \quad (8)$$

式中: $F = fl^3/(EIh)$ 是施加的归一化外力( $E$ 是杨氏模量, $I$ 是截面转动惯量); $T$ 是曲线梁归一化的形变位移; $Q = h/w$ ( $w$ 是曲线梁宽度)是一个关键几何参数,其数值大于2.31时,可以保证曲线梁的双稳态特性。当 $Q = 4.17$ 时,施加在机械振子系统上的力和形变之间的关系如图2(d)所示。当曲线梁工作在不稳定态时存在三个平衡位置,即图2(d)右上角方框中P1、P2和P3处,其中P1和P3是具有最小弹性势能的稳定位置点,P2是具有最大弹性势能的不稳定位置点。在静态力驱动下,施加的外力需要达到 $F_{\max}$ 值且驱动位移需要超过预弯高度才可以实现有效的稳定位置点和非稳定位置点之间的切换。为了实现光力驱动下的最大化位移形变量,设计了一个两级机械振子结构用于放大第二级非线性振子受光力作用后的振荡模式,且弹性系数大的第一级线性振子可在光力作用后基本保持稳定以保证腔光力系统的光机械耦合作用不受影响。采用的结构参数如表1所示。最后,硅基PCN固定的下半部分与可移动的两级振子机械谐振腔硅薄膜层连接构成光力驱动下的光机械频梳系统。实验室测试时,采用微纳光纤倏逝场耦合方式将可调谐激光激励载入光子晶体微腔中,如图2(e)所示。

基于有限元法(FEM)及时域有限差分法等数值算法,仿真研究硅基光子晶体微腔光力驱动的微波光

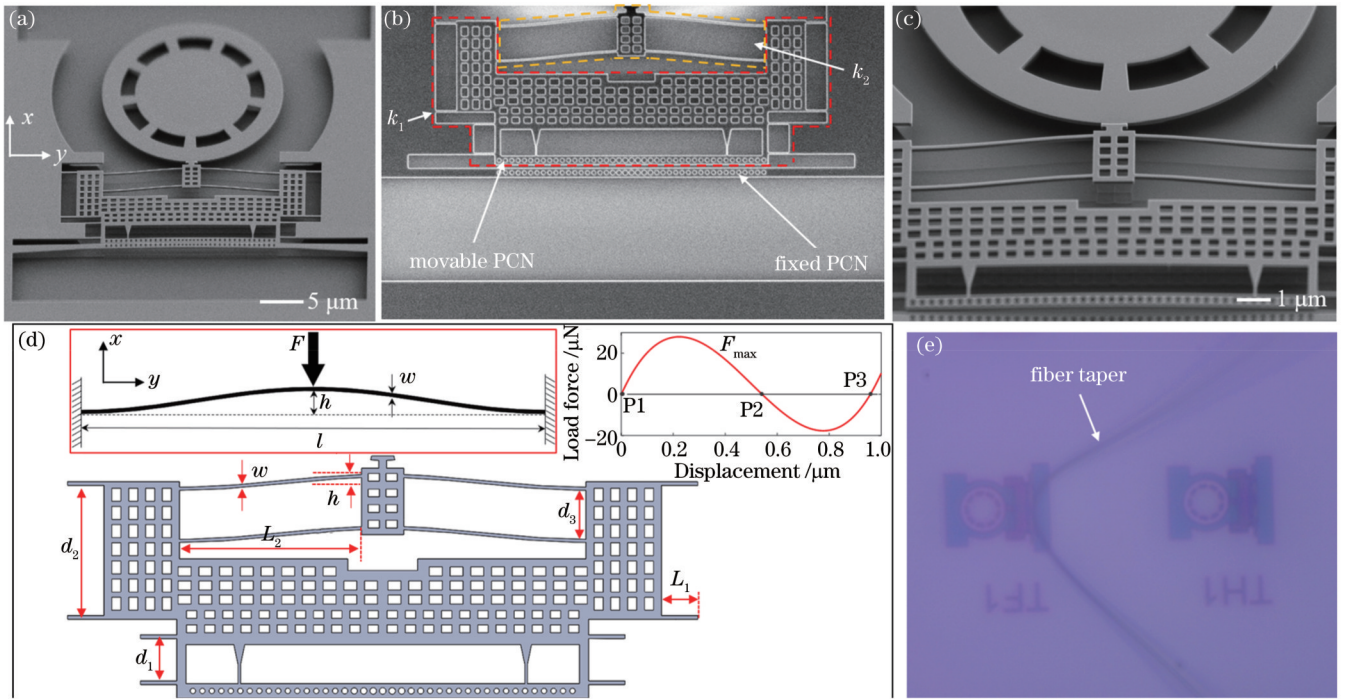


图 2 基于 PCN 的非线性腔光力系统光机械频梳测试。(a)非线性腔光力系统整体 SEM 图;(b)非线性光机械系统中两级机械振子的 SEM 图;(c)待测器件中非线性振子曲线梁的 SEM 图;(d)非线性机械振子设计;(e)光纤倏逝场耦合的 SEM 图  
 Fig. 2 PCN-based nonlinear optomechanical system for optomechanical frequency comb measurement. (a) Overall SEM image of nonlinear optomechanical system; (b) SEM image of two mechanical oscillators in the nonlinear optomechanical system; (c) SEM image of curved nonlinear beam of nonlinear oscillators in the device to be measured; (d) design of the nonlinear mechanical oscillator; (e) SEM image of optical evanescent coupling of dimpled fiber taper and device on chip

表 1 含非线性振子的腔光力系统的机械结构参数  
 Table 1 Structure parameters of the nonlinear optomechanical system

Structural parameter	Label	Size / $\mu\text{m}$
Length of curved nanobeam	$l=2L_2$	14.000
Width of curved nanobeam	$w$	0.120
Pre-bent height	$h$	0.500
Distance between two curved nanobeams	$d_3$	1.880
Distance between two clamp beams in the first spring (top)	$d_2$	5.000
Distance between two clamp beams in the first spring (bottom)	$d_1$	1.630
Length of clamp beam in the first spring	$L_1$	1.200
Gap between two PCN cavities	$s$	0.125

子源系统中的光学谐振模式、机械振荡模式、光-机械耦合率特性以及在光力作用下产生的位移特性。腔光力系统中光学谐振模式及机械振荡模式如图 3 所示,在空气槽缝隙宽度  $s=0.125 \mu\text{m}$  时,仿真结果表明 PCN 微腔光机械结构中存在多种光场耦合模式和机械谐振模式。考虑到在光力作用下机械振子主要发生平面内(IP)位移,因此图 3 中仅有平面内的机械谐振模式产生的位移能够与微腔光学模式进行能量耦合。选取其中光-机械耦合效率较高的光学谐振模式和平面内机械谐振基模实现微腔光力结构光机械频梳的设计。

### 3 实验测试与分析讨论

首先,利用电子束刻蚀等技术,在中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所公共微纳加工平台和超净间制备上述优化设计好的腔光力系统光机械频梳芯片;然后,对微纳加工完成的芯片进行光机械结构的释放,采用氢氟酸对初步加工好的腔光力系统光机械频梳芯片进行二氧化硅层的腐蚀工序;完全腐蚀掉二氧化硅层后,得到含可移动的腔光力系统光机械频梳芯片样品。搭建的腔光力系统的光学谐振特性、机械振荡特性的实验测试平台如图 4 所示。可

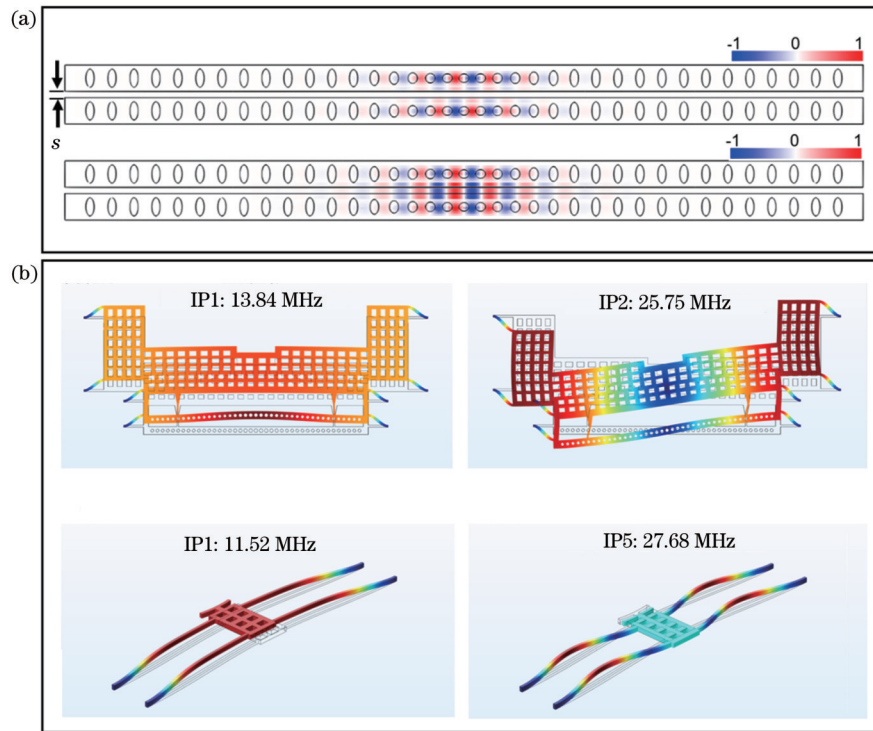


图 3 腔光力系统中不同模式仿真结果。(a)光学谐振模式(上:光学一阶谐振奇模;下:光学一阶谐振偶模);(b)第一级线性机械振子(上)和第二级非线性机械振子(下)的平面内机械振荡模式

Fig. 3 Simulation results of different modes in the optomechanical system. (a) Optical resonance modes (top: the odd mode of the first order resonant; bottom: the even mode of the first order resonant); (b) in-plane mechanical oscillation modes of first-order linear mechanical oscillators (top) and second-order nonlinear mechanical oscillators (bottom)

调谐窄线宽激光经过偏振控制器(FPC)后通过真空腔侧壁上的穿舱口传输到带微凹结构的光纤光锥,精确控制光纤光锥与固定的一维PCN的耦合位置实现对腔光力系统的光场激励;光力调制后的光信息经输出

光纤连接到光电探测器(PD)进行解调,并将解调后的电信息输入到频谱仪(ESA)等仪器进行测量。为了研究高性能的机械振荡特性,该光机械频梳芯片需在真空条件下(0.1 Pa)。

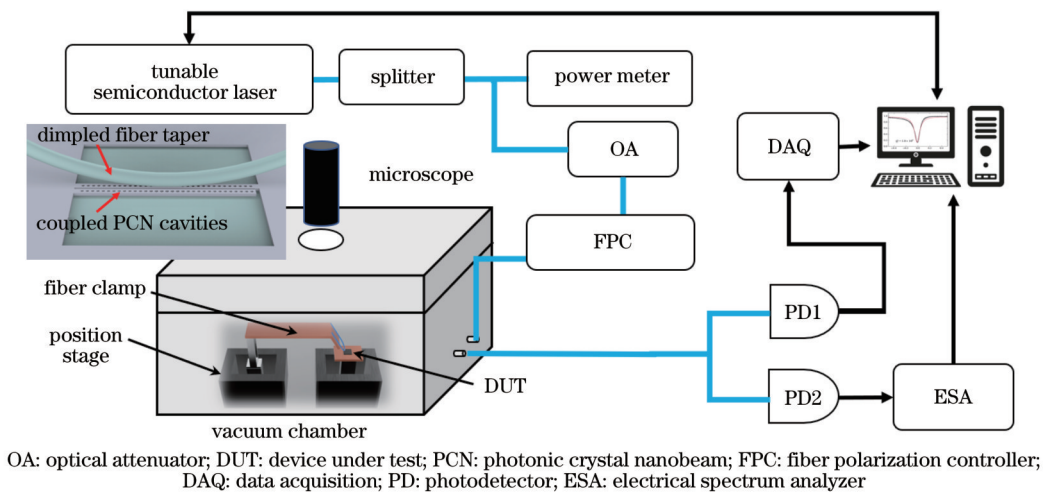


图 4 腔光力系统测试平台

Fig. 4 Measurement setup of the optomechanical system

首先,为了观测含非线性振子的腔光力系统的机械谐振特性,对该腔光力系统的特性进行测试,测试结果如图 5 所示。当输入一维光子晶体微腔的泵浦光功率  $P_{in} = 25 \mu W$  时,在光学传输谱 1500~1580 nm

波长范围内,前两阶光学耦合模式被激发。图 5(a)给出了包含耦合型一维 PCN 谐振腔的一阶奇模  $TE_{1,o}$  (波长  $\lambda = 1518.612 \text{ nm}$ ) 和偶模  $TE_{1,e}$  ( $\lambda = 1531.005 \text{ nm}$ )、二阶奇模  $TE_{2,o}$  ( $\lambda = 1560.120 \text{ nm}$ ) 和偶模  $TE_{2,e}$  ( $\lambda =$

1573.470 nm)的光谱曲线。通过 Lorentzian 拟合二阶偶模  $TE_{2,e}$  谐振峰位置,如图 5(b)所示,得到实验室测量的光学谐振腔光学  $Q_0$  值可达  $4.0 \times 10^4$ 。总体来说,实验所测光学微腔的谐振峰波长位置和光学  $Q_0$  值均与仿真软件计算值基本一致,但是由于加工误差因素的存在,二者在数值上存在一定的可以预见的偏差。由于光学偶模谐振峰处具有更高的光机械耦合效率且光力作用在机械振子上的方向与其平面内运动方向一致,因此在光学偶模谐振峰位置处测试含非线性振子的腔光力系统的机械特性。为了更好地观察后期产生的光机械频梳,此处将光学谱分别用黄色(A区)、红色(B区)和蓝色(C区)三个区域对该光学谐振峰进行扫谱测试。将可调谐激光器的波长位置置于二阶偶模  $TE_{2,e}$  谐振峰半波位置处,腔光力系统的机械谐振特性

可以通过 RF (radio frequency) 谱进行观测。如图 6 所示,在真空环境下,含非线性振子的腔光力系统的机械模式中存在第二级非线性振子平面内移动基模  $\Omega_{m_2}/2\pi = 10.22$  MHz 和第一级梁振子平面内移动基模  $\Omega_{m_1}/2\pi = 13.54$  MHz,与仿真结果对比后可知这些测量的机械谐振峰位置与仿真数值基本吻合。采用 Lorentzian 拟合机械谐振峰后可以得到第二级非线性振子平面内移动基模和第一级线性振子平面内移动基模的机械线宽,分别是  $\Gamma_{m_2}/2\pi = 1.6$  kHz 和  $\Gamma_{m_1}/2\pi = 2.0$  kHz。相应地,二者对应的机械  $Q_m$  值分别是  $Q_{m_2} \approx 6.4 \times 10^3$  和  $Q_{m_1} \approx 6.8 \times 10^3$ 。由于在 6 MHz 频率以下存在一些来源于探测器的电噪声信号,因此在后期的 PSD (power spectral density) 扫谱绘制时将扫谱范围设定在 6~18 MHz 范围内。

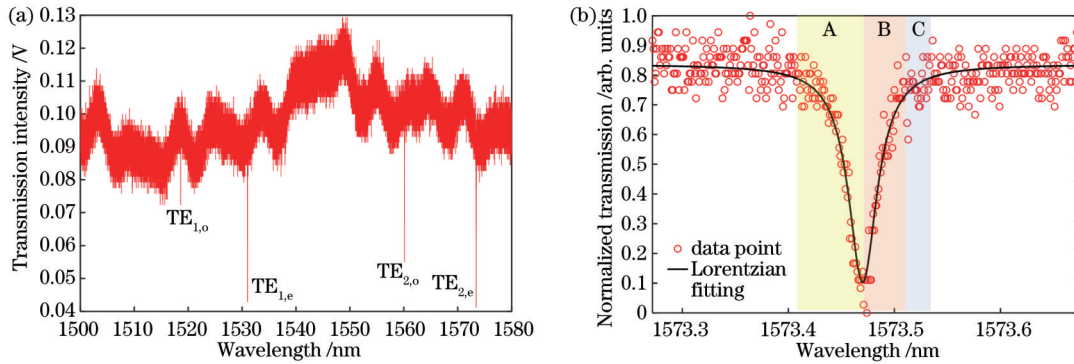


图 5 光学谐振腔的光学透射谱。(a)前 2 阶光学谐振峰;(b)  $TE_{2,e}$  谐振峰处的 Lorentzian 拟合

Fig. 5 Optical transmission spectrum of optical resonator. (a) First two orders optical resonances; (b) resonance of  $TE_{2,e}$  mode with Lorentzian fitting

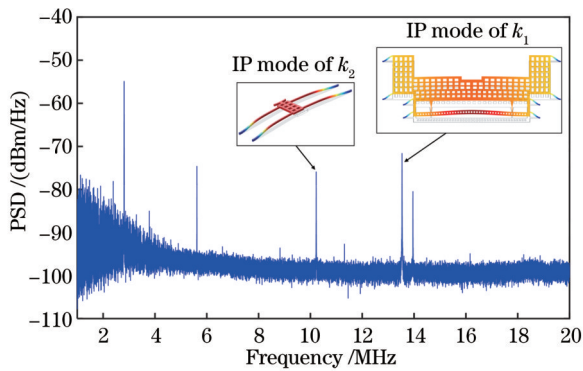


图 6 含 2-DOF 振子的腔光力系统的 RF 谱(插图为 FEM 计算出的 IP 模式)

Fig. 6 Measured RF spectrum of the 2-DOF optomechanical system (insets are FEM-calculated IP modes)

接着,在输入功率为  $25 \mu\text{W}$  时对  $TE_{2,e}$  谐振峰处以波长扫描步长为 1 pm 进行扫谱,得到该腔光力系统在目标频段(6~18 MHz)的 PSD 谱图。实验测试的该腔光力系统的第二级非线性振子和第一级线性振子的 PSD 谱分别如图 7(a)和图 7(b)所示。根据光学透射谱 [图 5(b)] 中不同波长对应的区域,相应地,PSD 谱图可

以分为 A 区和 C 区的激光调谐区以及 B 区的观察光机械频梳区域。在区域 A (激光器蓝失谐调制) 中,系统测试的 RF 谱线如图 7(c) 所示,该区域的 RF 谱线表明系统受到了典型的光学弹簧效应 (optical spring and damping) 作用且该效应与扫描波长位置紧密相关。图 7(c) 中插图所示的第二级非线性振子平面内振动的 PSD 谱表明其机械谐振频率和机械线宽均随着激光器调谐波长的变化而变化,符合激光器蓝失谐区域系统受到腔光力作用后的变化特性。随着激光器波长扫描至区域 B,即 1573.471~1573.512 nm 的红失谐调制区域,如图 7(d) 所示,两级振子的机械谐振峰两侧均出现了等频率间隔分布且对称的旁瓣信号。为了更好地观察该区域的 RF 谱线,对图 7(d) 进行放大,可以发现这些旁瓣频率信号是以机械谐振峰频率为中心频率对称分布的,且这些信号具有相同的频率间隔  $\delta\Omega \approx 81.5$  kHz,如图 7(e)、(f) 所示,此现象与光频梳相似,故称作光机械频梳。此外,由于耦合进入腔光力系统的激光功率较低,因此当光机械频梳现象出现后,RF 谱线的幅值出现大幅下降。最后,当可调谐激光器波长扫描至区域 C 时,这些离散的等间隔频率信号消失,此时

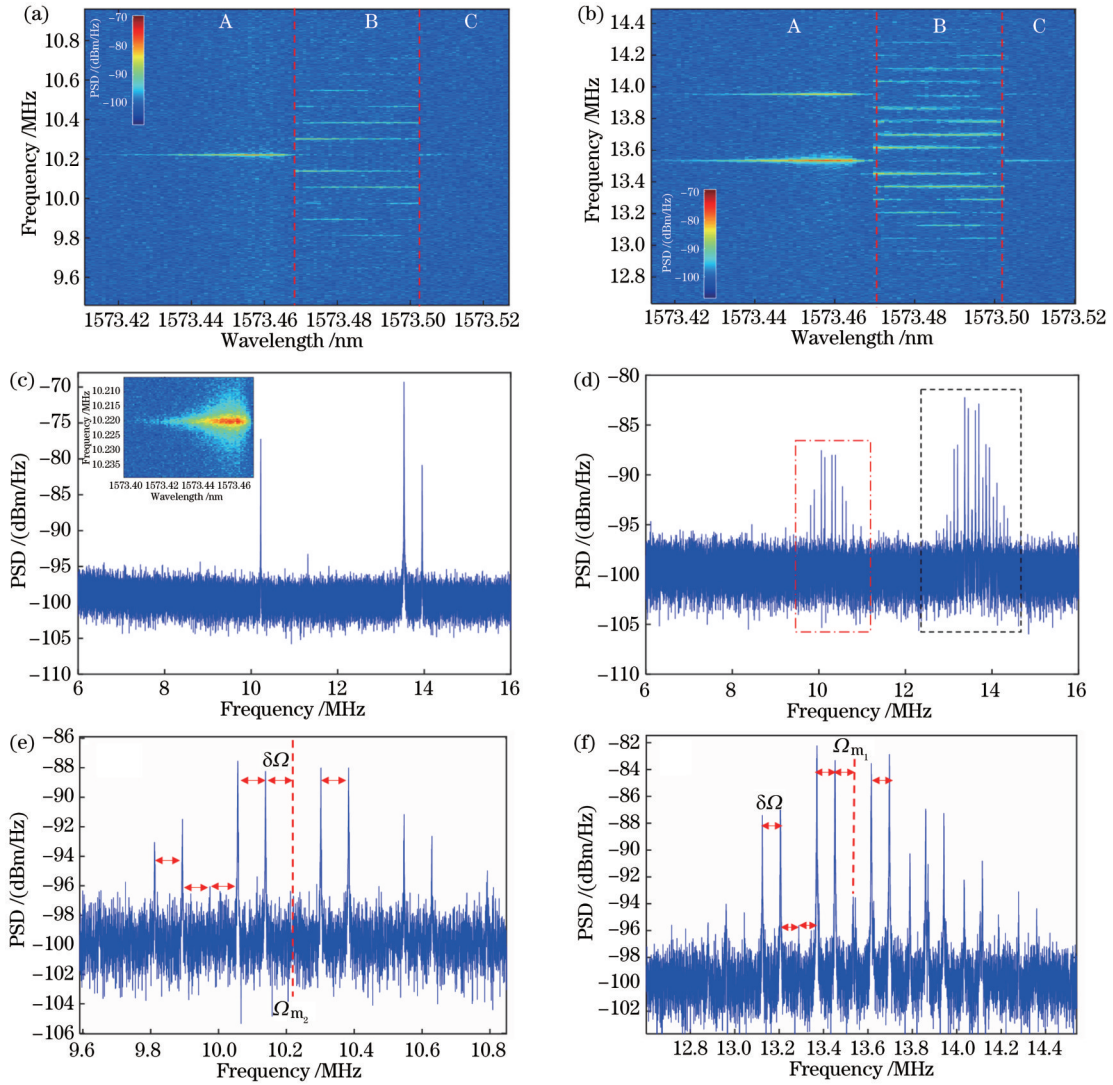


图 7 光学  $TE_{2,e}$  谐振峰处观察的光机械频梳结果。(a) 二阶非线性振子平面内振荡基模 IP1 模式的 PSD 谱; (b) 一阶线性振子平面内振荡基模 IP1 模式的 PSD 谱; (c) 区域 A 1573.460 nm 波长处的 RF 谱线; (d) 区域 B 1573.478 nm 波长处的光机械频梳现象; (e)~(f) 图 7(d) 中虚线方框内信号曲线的放大

Fig. 7 Observation results of optomechanical frequency comb at  $TE_{2,e}$  mode. (a) PSD map of the fundamental IP1 mode of second-order nonlinear oscillator; (b) PSD map of the fundamental IP1 mode of first-order linear oscillator; (c) RF spectra measured in the zone A at the wavelength of 1573.460 nm; (d) optomechanical frequency comb measured in the zone B at the wavelength of 1573.478 nm; (e)-(f) zoom-in views of the dashed squares in Fig. 7(d)

腔光力系统再次恢复到正常光机械耦合状态直至激光器波长完成整个光学谐振峰位置的扫描。

考虑到光学腔内两根一维光子晶体微腔空气缝隙槽内的一阶光场谐振模式能量分布会高于二阶模式, 因此, 也在光学谐振峰一阶偶模  $TE_{1,e}$  位置处观察了光机械频梳现象, 具体结果如图 8 所示。如图 8(a) 所示, 随着微腔光场能量增强, 一阶偶模  $TE_{1,e}$  的谐振峰出现了非对称分布(这是由光强增大引起的光学非线性热效应导致的)。同样地, 在图 8(a) 的光学谐振峰谱线中标记了 4 个不同颜色的区域以观察和分析光机械频梳现象, 并且这些区域与 PSD 谱图中对应一致。实验结果表明, 在区域 A, 即未进入光强导致的热非线性区域之前, 腔光力系统仍旧表现出正常的光机械耦合现

象。含非线性振子腔光力系统的两级振子的谐振峰附近的 PSD 谱如图 8(b)、(c) 所示。当激光器波长扫描至区域 B 后, 腔光力系统受到热光效应和自由载流子耗散效应的共同作用, 使得  $TE_{1,e}$  位置处区域 B 的光机械耦合现象明显不同。在此区域, PSD 谱线显示, 系统整体的噪声基底明显增加, 尤其是当激光器波长扫描至光学谐振峰中心波长处时, 该现象达到最显著水平。同时, 在 PSD 谱线中可以观察到 RF 信号发生频率间隔逐渐变化的分频现象, 由于该现象的产生机理复杂且腔光力系统在该处表现出不稳定态, 因此对此不进行深入探讨。当激光器波长扫描至区域 C (激光器红失谐调制) 时, 光机械频梳以相同的频率间隔对称分布在机械谐振峰中心频率两侧的现象再次出现, 如图

8(d)所示。由于变频作用,主瓣频率信号的幅值较低,各旁瓣信号以 81.3 kHz 的频率间隔分布在机械谐振峰中心频率两侧,如图 8(e)、(f)所示。不同的是,TE<sub>1,e</sub>模式的能量分布高于 TE<sub>2,e</sub>模式导致其光机械耦合作用增

强,因此,机械谐振峰两侧出现了数量更多的等频率间隔分布的光机械频梳信号。最后,当波长扫描区域 D 至整个光学谐振峰波长范围时,光机械频梳现象消失,腔光力系统恢复正常的光机械耦合现象。

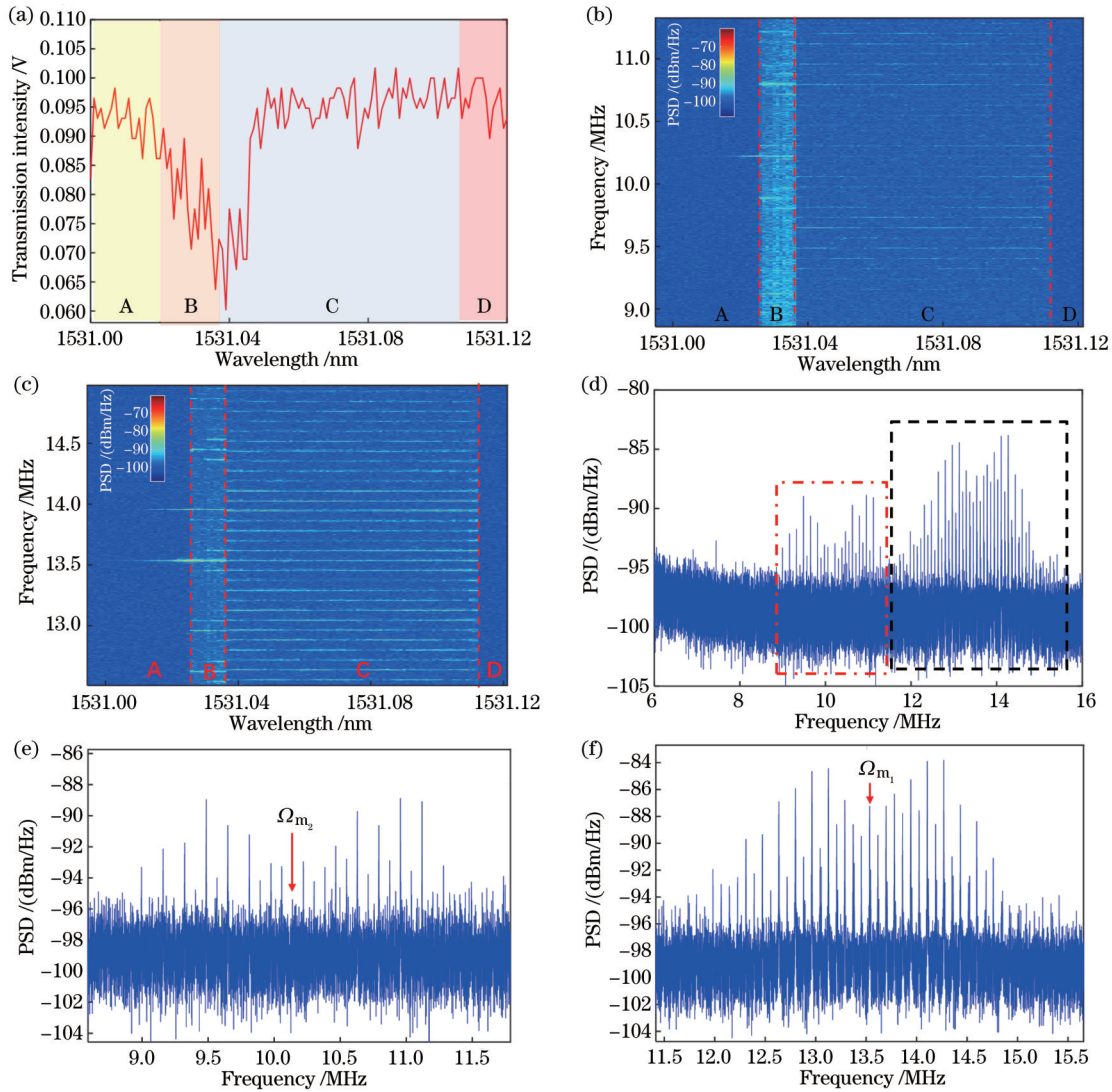


图 8 TE<sub>1,e</sub> 谐振峰处观察的光机械频梳结果。(a) 泵浦功率为 25  $\mu$ W 时的 TE<sub>1,e</sub> 谐振峰谱线; (b) 二阶非线性振子平面内振荡基模 IP1 模式的 PSD 谱; (c) 一阶线性振子平面内振荡基模 IP1 模式的 PSD 谱; (d) 区域 C 1531.076 nm 波长处的光机械频梳现象; (e)~(f) 图 8(d) 中虚线方框内信号曲线的放大 ( $\Omega_{m_2}/2\pi = 10.22$  MHz,  $\Omega_{m_1}/2\pi = 13.54$  MHz)

Fig. 8 Observation results of optomechanical frequency comb at TE<sub>1,e</sub> mode. (a) Optical resonance of the TE<sub>1,e</sub> mode at the input power of 25  $\mu$ W; (b) PSD map of IP1 mode of second-order nonlinear oscillator; (c) PSD map of IP1 mode of first-order linear oscillator; (d) optomechanical frequency comb measured at the zone C at the wavelength of 1531.076 nm; (e)–(f) zoom-in views of the dashed squares in Fig. 8(d) ( $\Omega_{m_2}/2\pi = 10.22$  MHz and  $\Omega_{m_1}/2\pi = 13.54$  MHz)

## 4 结 论

设计了一种引入非线性振子的硅基片上腔光力系统,通过理论分析和实验测试观测到光机械频梳现象。当腔光力作用在非线性的腔光力系统上时,非线性光机械耦合产生机械模式 DFWM 作用,使得光机械系统输出的机械谐振峰两侧出现了对称的等间隔分布的光机械频梳现象。通过实验测试对比了低激

发光功率下前两阶光学谐振偶模 TE<sub>1,e</sub> 和 TE<sub>2,e</sub> 位置处的光机械频梳,可以发现,光机械频梳一般出现在激光红失谐调制处,且随着腔内能量分布增加导致的光机械耦合作用增强,光机械频梳现象更加显著。在新型非线性腔光力系统中观测到的光机械频梳现象将为研制高稳定型片上集成式光生微波源提供一种新的研究思路,同时,也在未来传感技术等领域具有较大的研究潜力。



## 参 考 文 献

- [1] Barzanjeh S, Xuereb A, Gröblacher S, et al. Optomechanics for quantum technologies[J]. *Nature Physics*, 2022, 18(1): 15-24.
- [2] Zhang J, Peng B, Kim S, et al. Optomechanical dissipative solitons[J]. *Nature*, 2021, 600(7887): 75-80.
- [3] Li B B, Ou L F, Lei Y C, et al. Cavity optomechanical sensing[J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(11): 2799-2832.
- [4] Zhu G L, Liu J, Wu Y, et al. Quantum magnetometer with dual-coupling optomechanics[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(9): 2100636.
- [5] Xu H, Jiang L Y, Clerk A A, et al. Nonreciprocal control and cooling of phonon modes in an optomechanical system[J]. *Nature*, 2019, 568(7750): 65-69.
- [6] Jiang W T, Sarabalis C J, Dahmani Y D, et al. Efficient bidirectional piezo-optomechanical transduction between microwave and optical frequency[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 1166.
- [7] Ghelfi P, Laghezza F, Scotti F, et al. A fully photonics-based coherent radar system[J]. *Nature*, 2014, 507(7492): 341-345.
- [8] Schliesser A, Rivière R, Anetsberger G, et al. Resolved-sideband cooling of a micromechanical oscillator[J]. *Nature Physics*, 2008, 4(5): 415-419.
- [9] Chan J, Safavi-Naeini A H, Hill J T, et al. Optimized optomechanical crystal cavity with acoustic radiation shield[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(8): 081115.
- [10] Kippenberg T J, Rokhsari H, Carmon T, et al. Analysis of radiation-pressure induced mechanical oscillation of an optical microcavity[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95(3): 033901.
- [11] Kuang T F, Huang R, Xiong W, et al. Nonlinear multi-frequency phonon lasers with active levitated optomechanics[J]. *Nature Physics*, 2023, 19(3): 414-419.
- [12] Zhang M A, Wiederhecker G S, Manipatruni S, et al. Synchronization of micromechanical oscillators using light[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 109(23): 233906.
- [13] Li T, Bao T Y, Zhang Y L, et al. Long-distance synchronization of unidirectionally cascaded optomechanical systems[J]. *Optics Express*, 2016, 24(11): 12336-12348.
- [14] Huang Y J, Wu J G, Flores J G F, et al. Synchronization in air-slot photonic crystal optomechanical oscillators[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(11): 2152-2166.
- [15] Navarro-Urrios D, Capuj N E, Colombano M F, et al. Nonlinear dynamics and chaos in an optomechanical beam[J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 14965.
- [16] Mercadé L, Martín L L, Griol A, et al. Microwave oscillator and frequency comb in a silicon optomechanical cavity with a full phononic bandgap[J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(11): 3535-3544.
- [17] Hu Y, Ding S L, Qin Y C, et al. Generation of optical frequency comb via giant optomechanical oscillation[J]. *Physical Review Letters*, 2021, 127(13): 134301.
- [18] Gao Y P, Liu X C, Wang K, et al. Dissipation assisted frequency comb and chaos generation in the optomechanics[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 14(1): 3005906.
- [19] 张新亮, 赵延菁. 微腔光频梳研究进展[J]. *光学学报*, 2021, 41(8): 0823014.
- Zhang X L, Zhao Y J. Research progress of microresonator-based optical frequency combs[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(8): 0823014.
- [20] 刘先琳, 郭军强, 胡亚, 等. 欧姆热调谐光学微泡谐振腔光频梳研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(16): 1614002.
- Liu X L, Guo J Q, Hu Y, et al. Ohmic thermal tuning optical frequency comb in microbubble resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(16): 1614002.
- [21] 赵欣, 杨建军, 张力钎, 等. 单腔双光梳技术[J]. *中国激光*, 2022, 49(19): 1901003.
- Zhao X, Yang J J, Zhang L Q, et al. Single-cavity dual-comb technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(19): 1901003.

## Observation of Optomechanical Frequency Comb in a Nonlinear Cavity Optomechanical System

Xiong Shuidong, Xia Ji\*, Wang Fuyin, Hou Qingkai, Chen Hu, Yao Qiong, Cao Chunyan\*\*

*College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China*

### Abstract

**Objective** Cavity optomechanical system enables a hybrid system where optical resonant mode and mechanical oscillation mode are coupled together. Benefiting from the compatibility of the manufacturing process with the semiconductor industry, a strong optomechanical interaction between the optical cavity and mechanical resonator can be achieved in nanoscale silicon photonics devices. The nanoscale optomechanical system can considerably improve the interaction between optics and mechanics mediated by the optical force, enabling the development of ultra-stable and ultra-narrow linewidth mechanical oscillation signals. Cavity optomechanics research on classical mechanics and quantum systems has been widely utilized to provide an unprecedented platform for high-precision sensing, cavity optomechanical devices and circuits, and high-efficiency microwave-optical conversion devices. We propose a nonlinear cavity optomechanical coupling scheme by introducing a nonlinear mechanical oscillator integrated with a linear mechanical oscillator to achieve the high-performance optomechanical frequency comb. This novel nonlinear optomechanical system can provide a solution for the high-performance cavity optomechanical frequency comb and hence effectively promote the development and application of photonic microwave source technology.

**Methods** A nonlinear mechanical oscillator integrated with a linear mechanical oscillator is introduced into an optomechanical system, and the optomechanical frequency comb is experimentally observed with a series of equally spaced and discrete frequencies. In this optomechanical system, a zipper cavity consists of two photonic crystal nanobeam (PCN) cavities. One PCN is doubly clamped to work as a fixed PCN for laser pumping, and the other movable PCN is integrated with a 2-degree-of-freedom (2-DOF) vibration system to transform the optical force acting on two mechanical oscillator. In the 2-DOF oscillator system, a curved nonlinear mechanical oscillator is integrated with a linear mechanical oscillator. Based on the degenerated multimode mixing method, the mechanism of the optomechanical frequency comb is theoretically analyzed. These nonlinear mechanics are coupled to the optomechanical interaction, and the response of the light field can be eventually detected to observe the optomechanical frequency comb.

**Results and Discussions** The optical performance of the zipper cavity is investigated for the following detection of mechanical spectra, and the optical spectrum is divided to identify the laser sweeping range for the observation of optomechanical frequency comb. In this coupled PCN cavity with a high  $Q_c$ , the even cavity mode has a high optomechanical coupling strength to detect the in-plane oscillation of the 2-DOF oscillator system. The characterization of the nonlinear optomechanical device, a power spectral density (PSD) map, is conducted to observe the mechanical oscillations by the wavelength swept through the resonance of  $TE_{1,e}$  and  $TE_{2,e}$  modes. When the laser is swept into the optomechanical frequency comb zone at the  $TE_{2,e}$  resonance mode, two sidebands of the mechanical resonant frequency are generated with some symmetrical side lobes with a frequency-spacing of 81.5 kHz, which behaves very similar to an optical frequency comb. At the  $TE_{1,e}$  resonance mode, cavity energy inside the fundamental optical mode is higher than that of  $TE_{2,e}$  mode, so the nonlinear optomechanical system is driven by a higher optical force. The optomechanical frequency comb at the  $TE_{1,e}$  resonance is observed with more excited side lobes with a frequency-spacing of 81.3 kHz due to the stronger optomechanical coupling between the 2-DOF vibrator and optical cavity induced by higher cavity energy. As a result, the measured optomechanical frequency comb in the  $TE_{1,e}$  cavity mode is clearer than that of  $TE_{2,e}$  cavity mode when the pump power is  $25 \mu\text{W}$ , which indicates that the generation of the optomechanical frequency comb is highly dependent on the energy in the intracavity.

**Conclusions** In the paper, the optomechanical frequency comb is experimentally observed in a nonlinear optomechanical system. In this optomechanical system, a nonlinear oscillator is integrated with a linear oscillator to form a 2-DOF oscillator. In analogue to the generation of optomechanical frequency comb, a numerical model is theoretically proposed to analyze the nonlinear optomechanical coupling by introducing a nonlinear term. When the nonlinear force is acted on the 2-DOF oscillator, the degenerate four-wave mixing of mechanical modes can contribute to the generation of an optomechanical frequency comb. In the experiments, a demonstration of the optomechanical frequency comb is conducted using the  $TE_{1,e}$  and  $TE_{2,e}$  modes. From the analysis of the optomechanical frequency comb, it can be concluded that first, the optomechanical frequency comb always arises at the red-detuned sideband, and it is highly dependent on the optical power coupled into the cavity. Second, a remarkable optomechanical frequency comb is excited in the fundamental cavity mode much more visible than that of the second cavity mode. In future practical applications, the optomechanical frequency comb can be potentially used as a microwave photonic source, which can provide a reference clock signal in the frequency range of MHz.

**Key words** optomechanical coupling; cavity optomechanical system; nonlinear mechanical oscillator; optomechanical frequency comb