

## 基于光辐射压激励的低频机械振子品质因数测量\*

王义建<sup>1)</sup> 高翔宇<sup>1)</sup> 孙恒信<sup>1)†</sup> 刘奎<sup>1)2)</sup> 郜江瑞<sup>1)2)</sup>

1) (山西大学光电研究所, 光量子技术与器件全国重点实验室, 太原 030006)

2) (山西大学, 极端光学协同创新中心, 太原 030006)

(2025 年 10 月 23 日收到; 2025 年 11 月 27 日收到修改稿)

高品质因数 ( $Q$  值) 的机械振子具有较低的机械损耗, 是光力学实验中研究光场和机械振子量子特性以及产生其他如量子压缩和纠缠光场时的重要条件. 在室温下低频段, 受环境和其他机械器件的影响, 机械振子的共振模式识别困难, 并且与其他器件的振动模式交叠, 影响了  $Q$  值的测量精度. 代替传统的机械接触式激励 (例如压电陶瓷激励), 本文采用了光辐射压对机械振子进行非机械接触式的激励. 基于声光调制器开关产生的光辐射压激励具有更快的响应速度和更宽的工作频段, 特别是在声频甚至更低频段, 能够避免环境和实验装置等因素带来的难以处理的低频噪声. 实验结果表明, 相比压电陶瓷激励, 光激励在低频段 (2 kHz 以内) 的  $Q$  值测量准确性更高, 测量误差在 5% 以内.

**关键词:** 光辐射压力, 低频段, 品质因数, 衰荡测量**DOI:** 10.7498/aps.75.20251443**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251443

## 1 引言

近年来, 随着低损耗材料制备技术、超高真空环境调控技术及高精度量子测量技术的突破性发展, 宏观尺度物体量子效应的观测与调控成为光力学领域的研究热点. 已有研究证实, 质量达数十千克量级的光学反射镜可展现出明显的量子特性<sup>[1]</sup>, 为宏观量子现象的深入探索奠定基础. 在光力学系统中, 常温环境下的机械振子受热噪声主导, 其量子效应常常被掩盖, 因此, 机械振子的有效冷却 (尤其是冷却至量子基态) 是观测其量子效应的前提<sup>[2-4]</sup>. 然而, 机械振子与周围环境间不可避免的相互作用会引发机械损耗, 导致了冷却温度的下限. 品质因数 ( $Q$  值) 作为表征机械振子能量耗散特性的参数,  $Q$  值越高, 能量耗散速率越低, 制备高  $Q$  值的机械振子成为量子光力学研究的重点之一<sup>[5-7]</sup>.

针对不同光力学研究场景 (如量子态制备、量子传感<sup>[8]</sup>、宏观量子叠加效应观测等), 科研人员已设计并制备出多种结构与材料体系的机械振子<sup>[7,9,10]</sup>, 这些机械振子的共振频率可从几 Hz 到数 GHz 不等, 其  $Q$  值测量方法也有所不同.

常用的  $Q$  值测量方法主要包括以下几类<sup>[10-12]</sup>. 第 1 种是通过直接测量机械振子的布朗热噪声<sup>[13,14]</sup>, 直接在电子频谱仪上找到共振频谱, 共振频率与共振线宽的比值即是  $Q$  值, 该方法主要适合于热噪声在总噪声中占主导的情况, 如高频机械振子 (MHz 甚至 GHz), 以及适合于低  $Q$  值的机械振子. 而对于 kHz 以下的低频机械振子, 各类低频噪声 (如声频地面振动、环境的声音噪声等) 导致较低的信噪比, 需要把机械振子驱动起来测量其频率响应, 此即第 2 种<sup>[10,12]</sup>. 测量频率响应, 可以采用第 1 种方法, 通过共振频率与共振线宽的比值计算. 但是, 对于一些高  $Q$  值机械振子, 其共振线宽可能低于大部分电子频谱仪的分辨率带宽, 无法用上述

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2021YFC2201802) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [hxsun@sxu.edu.cn](mailto:hxsun@sxu.edu.cn)

方法直接得到, 这时可采用衰荡法测量<sup>[5,6,10,11]</sup>, 先将机械振子激励起来, 得到时域的衰荡曲线, 拟合计算得其  $Q$  值.

在衰荡法测量中, 激励方式的选择直接影响  $Q$  值测量的准确性, 激励方式可分为接触式与非接触式两类<sup>[11]</sup>. 接触式驱动激励, 可用压电陶瓷驱动, 将电信号转化为机械振动, 该方式存在局限, 压电陶瓷自身的机械结构存在固有振动模式, 且其固定装置 (如镜架<sup>[15]</sup>、位移台) 也会引入额外的振动模式和损耗<sup>[16]</sup>, 在振子共振频率与压电陶瓷或固定装置固有频率的交叉频段<sup>[17]</sup>, 易产生模态耦合干扰, 导致  $Q$  值测量误差增大. 非接触式驱动可以减少甚至避免这种模态耦合干扰, 可以用磁力或者光力驱动. 磁力驱动通过外部磁场对磁性振子施加驱动力<sup>[11,18]</sup>, 因此仅适用于磁性振子, 对于非磁性振子需要附加额外的磁性材料, 可能引起振子质量分布不均以及增加机械损耗等<sup>[19]</sup>, 影响振子的原始  $Q$  值而导致测量结果偏差. 光辐射压力驱动<sup>[20]</sup>将激励光场直接入射至机械振子表面, 利用光子动量传递产生的辐射压力对振子施加驱动力, 驱动力直接作用于振子本体, 从根本上避免了接触式激励中的模态耦合误差; 同时, 该方式无需依赖振子的磁性, 适用于各类材料体系的振子 (包括非磁性介电材料、半导体材料等); 此外, 相比接触式驱动, 光辐射压力不采用机械传动, 响应速度更快, 且激励频率可通过光场调制灵活调控, 工作频段覆盖范围更宽 (从 Hz 到 GHz 量级).

本文所采用的机械振子, 是为模拟地基引力波探测器重达数十千克的大型反射镜所用, 其特点是共振频率低, 且具有较高的  $Q$  值, 适合采用非接触式的光压驱动, 用衰荡法测量其  $Q$  值. 我们利用声光调制器 (AOM) 作为快速响应的光开关, 对悬镜微机械振子进行光力驱动. 此外, 作为对比, 还进行了接触式压电陶瓷激励的实验. 结果表明, 光激励在低频段的多次  $Q$  值测量的测量值标准差小于 5%, 测量准确性更高. 低于 2 kHz 频率处, 压电陶瓷接触式激励存在机械振荡, 测量的  $Q$  值普遍偏高.

## 2 $Q$ 值测量理论分析

$Q$  值定义为在一个振荡周期内机械振子的总能量  $W$  与损耗能量  $\Delta W$  的比值, 即:

$$Q = 2\pi \frac{W}{\Delta W}, \quad (1)$$

机械振子位移的运动方程写为

$$\ddot{x}(t) + \Gamma_m \dot{x}(t) + \Omega_m^2 x(t) = \frac{F_{\text{ext}}(t)}{m}, \quad (2)$$

其中,  $x(t)$  为振子随时间变化的振动幅度,  $F_{\text{ext}}(t)$  为所受到的外力,  $m$  为机械振子的约化质量,  $\Omega_m$  为机械振子共振频率,  $\Gamma_m$  为损耗速率.

假设机械振子为简谐振子, 其所受合外力为零, 其振幅  $x(t) = x_0 \sin(\Omega_m t + \phi_0)$ ,  $x_0$  为  $t_0$  时的最大振幅, 根据其运动方程, 一个运动周期内损耗的能量:

$$\begin{aligned} \Delta W &= \oint m \Gamma_m \dot{x}(t) dx(t) = m \Gamma_m \int_0^{2\pi/\Omega_m} \dot{x}(t)^2 dt \\ &= \frac{2\pi \Gamma_m}{\Omega_m} \times \frac{1}{2} m \Omega_m^2 x_0^2 = 2\pi \frac{\Gamma_m}{\Omega_m} W, \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $W = m \Omega_m^2 x_0^2 / 2$ , 结合 (1) 式得  $Q = \Omega_m / \Gamma_m$ .

下面对前述的 3 种测量机械振子  $Q$  值方法进行简要的理论分析. 第 1 种频率响应法的原理是通过外部驱动力激励机械振子产生受迫振动, 测量振子在共振频率附近响应, 进而通过洛伦兹函数拟合提取  $Q$  值. 设外部驱动力的幅值为  $F_{\text{ext}}(t) = F_0 \sin(\Omega_0 t + \varphi)$ , 在共振频率  $\Omega_m$  附近扫描, 扫描频率为  $\Omega_0$ , 机械振子振动幅度为

$$\begin{aligned} x_0^2 &= \frac{F_0^2/m^2}{(\Omega_m^2 - \Omega_0^2)^2 + \Omega_0^2 \Omega_m^2 / Q^2} \\ &\approx \frac{(\Omega_m/2Q)^2}{(\Omega_m - \Omega_0)^2 + (\Omega_m/2Q)^2} \frac{F_0^2 Q^2}{m^2 \Omega_m^4}. \end{aligned} \quad (4)$$

由于  $F_0$  和  $x_0$  在实验上比较难测到, 实验中通常固定  $F_0$ , 在  $\Omega_m$  附近扫描  $\Omega_0$  得到响应曲线, 再用洛伦兹函数拟合  $Q$  值, 这种方法的缺点是只适用于  $Q$  值较低的损耗较大的机械振子, 对于  $Q$  值很高的机械振子会出现较大的测量误差.

第 2 种布朗热噪声法. 该方法以涨落耗散定理为物理基础, 直接利用常温下机械振子因热涨落产生的布朗运动作为信号源, 通过高灵敏度探测系统 (如激光干涉仪) 采集振子的热噪声振动信号, 再结合频谱分析实现  $Q$  值测量. 使用频谱分析仪得到的布朗热噪声的功率谱密度, 然后进行洛伦兹曲线拟合. 拟合曲线的半高全宽为机械振子衰荡速率  $\Gamma_m$ . 利用关系式  $Q = \Omega_m / \Gamma_m$  算得其  $Q$  值. 这种测量方法要求测量装置对机械振子振动有更高精

度的测量,且频谱分析仪的分辨率带宽要低于待测振子的机械线宽,对于较高  $Q$  值的振子测量,频谱分析仪的分辨率往往难以满足要求.

第 3 种机械衰荡法. 通过给机械振子施加驱动力  $F_{\text{ext}}(t) = F_0 \sin(\Omega_0 t)$  (此处的  $\Omega_0$  为机械振子的共振频率  $\Omega_m$ ), 迫使其在机械振子共振频率处激励起来达到稳态, 此时瞬间去掉外力, 对于一个欠阻尼 (即  $\Gamma_m \ll \Omega_m$ ) 的机械振子, 去掉外力机械振子会自由衰荡, 测量衰减到幅度的  $1/e$  的衰荡时间  $\tau$ , 计算得  $Q$  值. 这种方式实验装置要求低、实验过程简单且测量准确度较高, 也是使用最广泛的一种测量  $Q$  值的方法. 在机械振子欠阻尼条件下, 能量随时间变化如下表示:

$$W_t = W_0 e^{-\Gamma_m(t-t_0)} = W_0 e^{-\Omega_m(t-t_0)/Q}, \quad (5)$$

其中  $W_t$  为去掉外力后  $t$  时刻的机械振子的能量. 测量机械振子能量的衰减得到  $Q = \Omega_m \tau$ .

在光辐射压力驱动机械振子的物理过程中, 其驱动力来源于光子动量的变化. 一束激光入射至物体表面时, 若激光能量为  $E$ , 真空中光速为  $c$ , 则该激光束携带的动量大小为  $p = E/c$ , 根据动量守恒定理, 当动量为  $p$  的光子垂直入射并被物体表面完全反射时, 光子动量方向反向, 其动量变化量为  $\Delta p = 2p$  的动量作用在物体上. 因此, 激光对完全反射物体的辐射压力为

$$F = \frac{dp}{dt} = 2 \frac{dE}{cdt} = \frac{2P}{c}, \quad (6)$$

其中  $P = \frac{dE}{dt}$  为激光功率. 将 (2) 式运动方程利用

$x(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} dt e^{i\omega t} x(t)$  进行傅里叶变换, 得到频域上  $x(\omega) = \chi_m(\omega) F(\omega)$ , 式中  $\chi_m$  为机械敏感度:

$$\chi_m(\omega) = 1 / [m(\Omega_m^2 - \omega^2) - im\Gamma_m\omega]. \quad (7)$$

在共振频率  $\Omega_m$  处, 入射到机械振子上的功率和其位移的关系为  $x = 2P/mc\Gamma_m\Omega_m$ . 根据涨落耗散定理, 热平衡力引起的热噪声的位移均方根值为  $x_{\text{rms}} = \sqrt{k_B T/m\Omega_m^2}$ . 光辐射压力激励产生与热噪声位移大小相等时所需的功率近似为  $P_0 = (c\Gamma_m\sqrt{k_B Tm})/2$ , 其与振子质量及振子损耗有关. 为了产生明显的衰荡, 光激励对振子产生的位移要远大于热平衡力引起的热噪声位移, 以避免热噪声对衰荡曲线拟合的干扰.

### 3 实验系统与测量结果

#### 3.1 实验装置

实验所用机械振子如图 1 所示, 其结构由悬梁与微镜两部分组成 [21]. 其中, 悬梁采用砷化镓 (GaAs) 单晶材料制备 [22], 微镜由 23 对  $1/4$  波长光学厚度膜层堆叠而成, 其透射率约为 250 ppm ( $1 \text{ ppm} = 10^{-6}$ ). 图 1(a) 所示振子的质量约为 100 ng, 对应结构参数为, 微镜半径 40  $\mu\text{m}$ 、悬梁长度 76  $\mu\text{m}$ 、悬梁宽度 8  $\mu\text{m}$ , 机械振子的质量与随微镜半径及悬梁几何尺寸有关. 本实验中, 采用的是  $20 \times 6$  阵列式机械振子, 该阵列包含  $20 \times 6$  个几何结构存在差异的独立的机械振子.

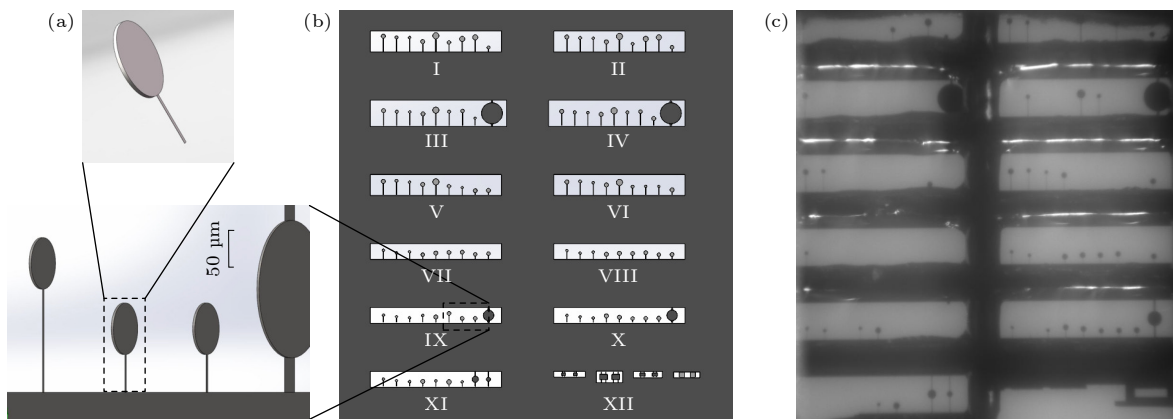


图 1 悬梁臂机械振子阵列 (a) 单个机械振子, 由一根悬梁和一个高反微镜片构成; (b) 机械振子阵列的设计图; (c) 采用 CCD 拍摄的机械振子阵列的实物图, 生产或运输过程中某些脆弱的振子已掉落

Fig. 1. Cantilever mechanical oscillator array: (a) A single mechanical oscillator, which consists of a cantilever beam and a high-reflectivity micro-mirror; (b) the design diagram of the mechanical oscillator array; (c) the physical image of the mechanical oscillator array captured by a CCD camera, due to production or transportation movements, some fragile oscillators in the physical image have fallen off.

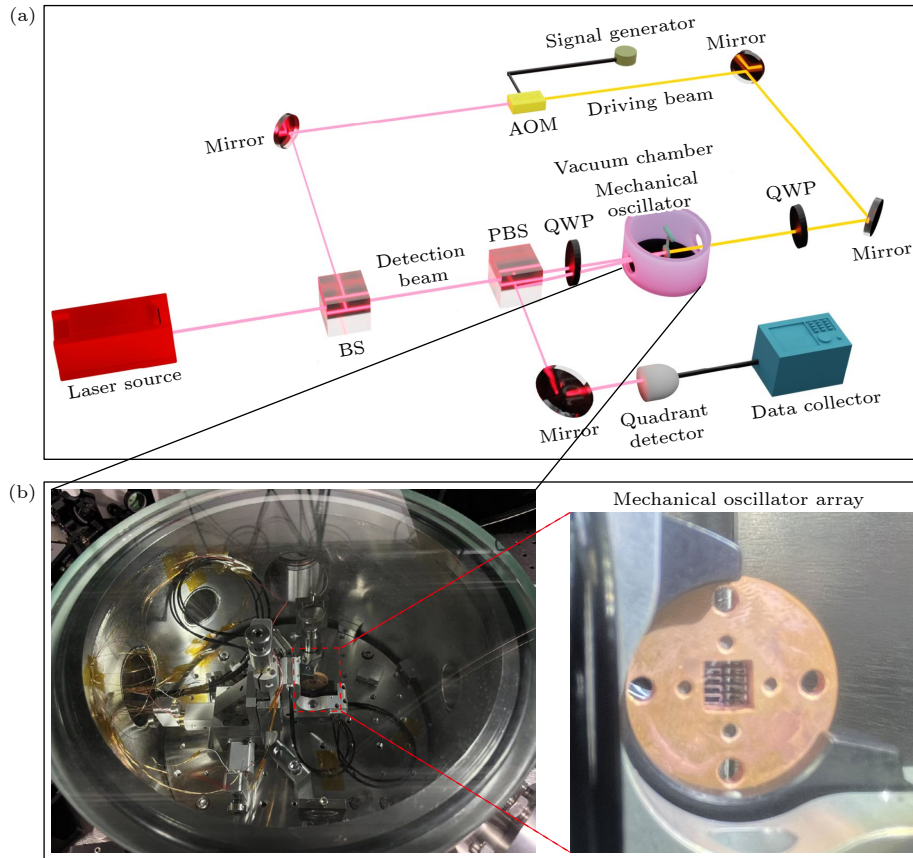


图 2 实验装置图 (a) 机械振子放置在  $1 \times 10^{-6}$  Pa 的真空中, 激光器输出光束 (红色) 经 AOM 移频 80 MHz 成为激励光束 (橙色), 另一探测光束以小角度入射到机械振子, 并反射到四象限探测器中; (b) 真空室内装置实物图以及放大的机械振子阵列及其夹持器件

Fig. 2. Schematic of the experimental setup: (a) The mechanical resonator is placed in a vacuum chamber with a pressure of  $1 \times 10^{-6}$  Pa, the output beam (red) from the laser is frequency-shifted by 80 MHz via an acousto-optic modulator (AOM) to form the pump beam (orange), another probe beam is incident on the mechanical resonator at a small angle and reflected into a quadrant photodetector (QPD); (b) optical image of the internal components in the vacuum chamber, along with a magnified view of the mechanical resonator array and its clamping assembly.

实验装置如图 2 所示, 激光器输出波长为 1064 nm 的激光, 经分束器 (BS) 分为探测光与激励光两束. 激励光经声光调制器 (AOM), 产生不同频率的振幅调制, 激发机械振子到各阶振动模式的稳态振动. 同时, AOM 作为快速响应光开关, 瞬间切断光束, 使稳态激励的机械振子进入自由衰荡状态, 测量其衰荡时间, 计算机械振子的  $Q$  值. 为抑制探测干扰 (避免机械振子非理想全反射透过的少量激励光与探测光发生干涉), 采用两种方法, 一是在激励光路中加入一个  $1/4$  波片 (QWP), 使激励光与探测光束偏振正交; 二是 AOM 将激励光束的频率偏移 80 MHz, 远离探测光束频率. 探测光依次经过反射镜、透镜、PBS 以及  $45^\circ$  放置的 QWP 等光学元件, 汇聚至机械振子表面, 经高反射率机械振子反射至四象限探测器, 采集机械振子的振动

信号. 探测光两次经过 QWP 使水平偏振光变为竖直偏振光, 形成光隔离器. 四象限探测器可采集水平和竖直方向的光束偏移, 分辨机械振子的各阶模式, 同时采集衰荡信号获取  $Q$  值.

### 3.2 机械振子共振模式

为确定机械振子的振动模式, 本研究采用软件模拟和实验验证相结合的方法. 首先通过有限元分析软件对机械振子的振动模式进行模拟, 建立有限元模型时, 输入参数包括机械振子悬梁与镜面的几何参数, 以及砷化镓悬梁、镜面垫的力学性能参数 (如弹性模量、泊松比、密度等). 图 3(a)–(c) 所示为特定结构参数机械振子 (镜面半径  $20 \mu\text{m}$ 、悬梁长度  $40 \mu\text{m}$ 、悬梁宽度  $5 \mu\text{m}$ ) 的前三阶振动模式仿真结果. 机械振子不同阶模式具有不同的运动模式,

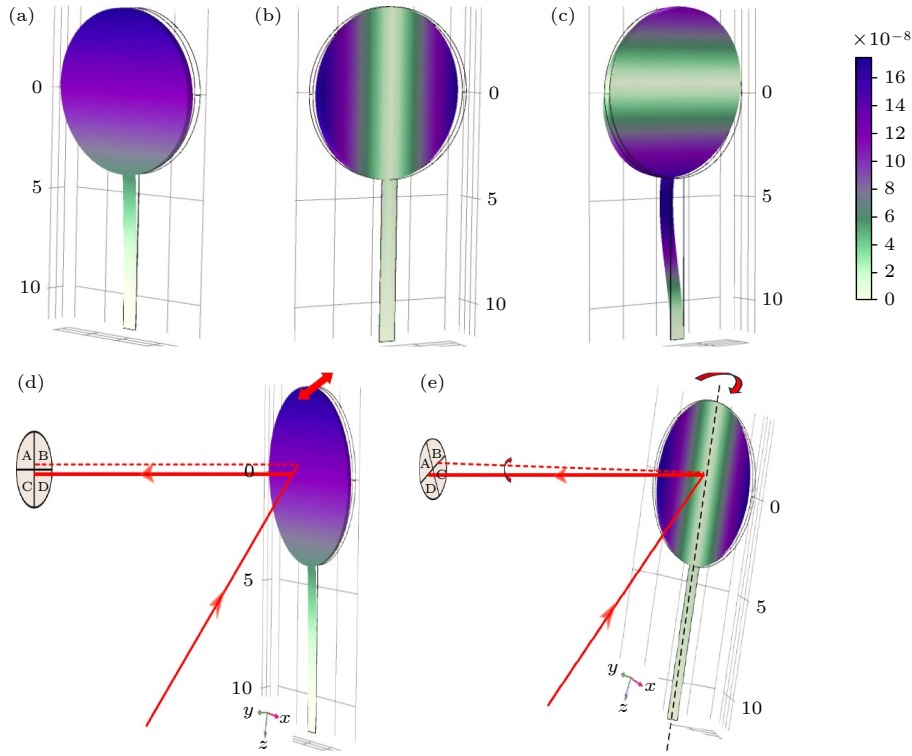


图 3 机械振子的前三阶机械振动模式 (a) 基模振动, 振动模式类似于钟摆, 做垂直于镜面方向摆动; (b) 偏航 (yaw) 模振动, 绕悬梁轴线转动; (c) 俯仰 (pitch) 模振动, 悬梁微镜整体垂直于悬梁轴线俯仰摆动; (d) 光束入射到机械振子并反射, 基模振动使光束产生垂直方向的位移, 四象限探测器获取该位移信号, ABCD 为四象限探测器的 4 个象限; (e) 偏航模式使光束产生水平方向的倾斜, 四象限探测器获取该倾斜信号

Fig. 3. The first three mechanical vibration modes of the resonator: (a) Fundamental mode, the vibration behavior resembles a pendulum, oscillating perpendicular to the mirror surface; (b) yaw mode, rotation about the axis of the cantilever beam; (c) pitch mode, tilt oscillation of the cantilever mirror as a whole, perpendicular to the cantilever axis; (d) schematic of the incident and reflected laser beam, the fundamental mode induces vertical displacement of the reflected beam, which is captured by the quadrant detector (QPD), where A, B, C, and D denote the four quadrants of the QPD; (e) the yaw mode causes horizontal tilting of the reflected beam, and the corresponding tilt signal is acquired by the QPD.

基模振动模式为微镜的前后摆动, 偏航模式为镜面一阶的左右摆动, 俯仰模式是镜面一阶的俯仰摆动.

实验上, 通过四象限探测器在正交方向 (水平、竖直) 测得的频域位移谱密度差异, 结合实现对振动模式的判定. 如图 3(d), (e) 所示, 四象限探测器正对于机械振子摆放, ABCD 代表四象限探测器的 4 个象限. 一束激光入射到机械振子表面并反射, 振子基模的振动模式使反射光束产生垂直方向的位移 (以位移为主导), 四象限探测器获取垂直方向的电流信号 (即  $I_{\text{vertical}} = I_{(A+B)} - I_{(C+D)}$ ), 如图 3(d). 偏航模的运动模式使反射光束产生水平方向倾斜, 光束的倾斜会引起四象限探测器水平方向的信号 (即  $I_{\text{horizontal}} = I_{(A+C)} - I_{(B+D)}$ ), 如图 3(e). 为进一步对比不同阶模态的运动模式, 实验中将探测光束沿入射方向 (垂直于镜面入射) 引入微小倾

斜角入射至振子表面, 同一阶模态的振动模式与倾斜探测光束会形成差异化耦合效应, 不同阶振动模态在水平、竖直方向的探测信号强度呈现显著差异. 图 4 为实验探测结果, 据此可确定机械振子前三阶振动模态 (基模、偏航模和俯仰模) 的共振频率分别为 760, 4003, 12801 Hz. 判定依据如下: 红色曲线对应竖直方向的机械振子热噪声信号, 由于基模、俯仰模与探测光束在竖直方向存在强耦合, 故这两阶模态的位移信号幅值显著较大; 而偏航模与探测光束的耦合作用主要体现在水平方向, 在竖直方向的信号幅值较小. 蓝色曲线对应水平方向的热噪声信号, 偏航模因在水平方向与探测光束强耦合, 其信号幅值较大; 而基模和俯仰模在水平方向的耦合作用较弱, 故信号幅值较小. 3 条曲线在 19520 Hz 处均出现一致的特征峰, 该峰源于实验所用斯坦福 SR785 型频谱分析仪的系统噪声.

具体原因可能是该频谱分析仪配备单色 CRT 显示器, 其水平扫描频率信号通过输入端口的同轴电缆发生耦合, 最终在测量数据中引入这一稳定存在的显示器扫描频率噪声。

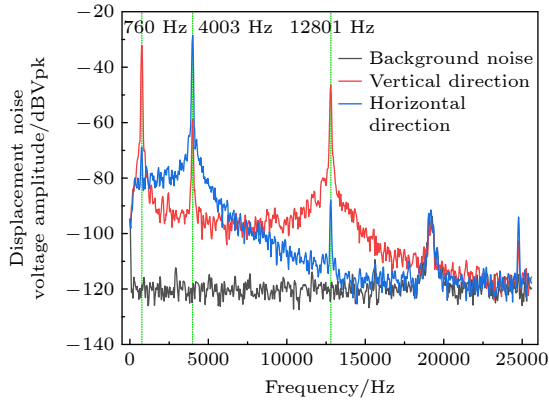


图 4 X-5 号振子的四象限探测器的输出信号, 不同频率对应不同的振动模式, 黑色为探测器的电子学噪声, 红色 (蓝色) 为四象限探测器竖直 (水平) 方向的探测信号

Fig. 4. The output signals of the quadrant detector for the X-5 oscillator, different frequencies correspond to different vibration modes. Black represents the electronic noise of the detector, and red (blue) represents the detection signals of the quadrant detector in the vertical (horizontal) direction.

### 3.3 Q 值测量与结果

根据前文的理论分析, 对于质量  $m = 100 \text{ ng}$ 、基模阻尼率为  $1 \text{ Hz}$  的机械振子, 若要激励其产生与热噪声相当的位移, 需要约  $0.2 \mu\text{W}$  的入射光功率. 为了获得明显的受迫振荡, 要求光驱动位移显著大于热噪声位移. 考虑到不同机械振子质量存在差异, 且同一机械振子不同振动模式的阻尼率各不相同, 实验中采用  $20\text{--}100 \mu\text{W}$  范围的光功率对机械振子进行激励。

首先需要确定共振频率. 利用频谱分析仪扫描频率找到机械振子的热噪声信号, 初步锁定各阶振动模式的频率区间. 针对某一特定振动模式, 采用振幅调制的激励光进行扫频激励: 保持激励光振幅不变, 在初步确定的频率区间内调节激励频率 (频率间隔最小可达  $0.1 \text{ Hz}$ ), 同时通过频谱分析仪监测对应激励频率处的信号幅值. 当频谱分析仪显示的信号幅值达到最大值时, 此时的激励频率即为该振动模式的共振频率。

确定共振频率后, 对振动模式进行衰荡测量. 利用激励光将机械振子的该阶模式激励至稳态振

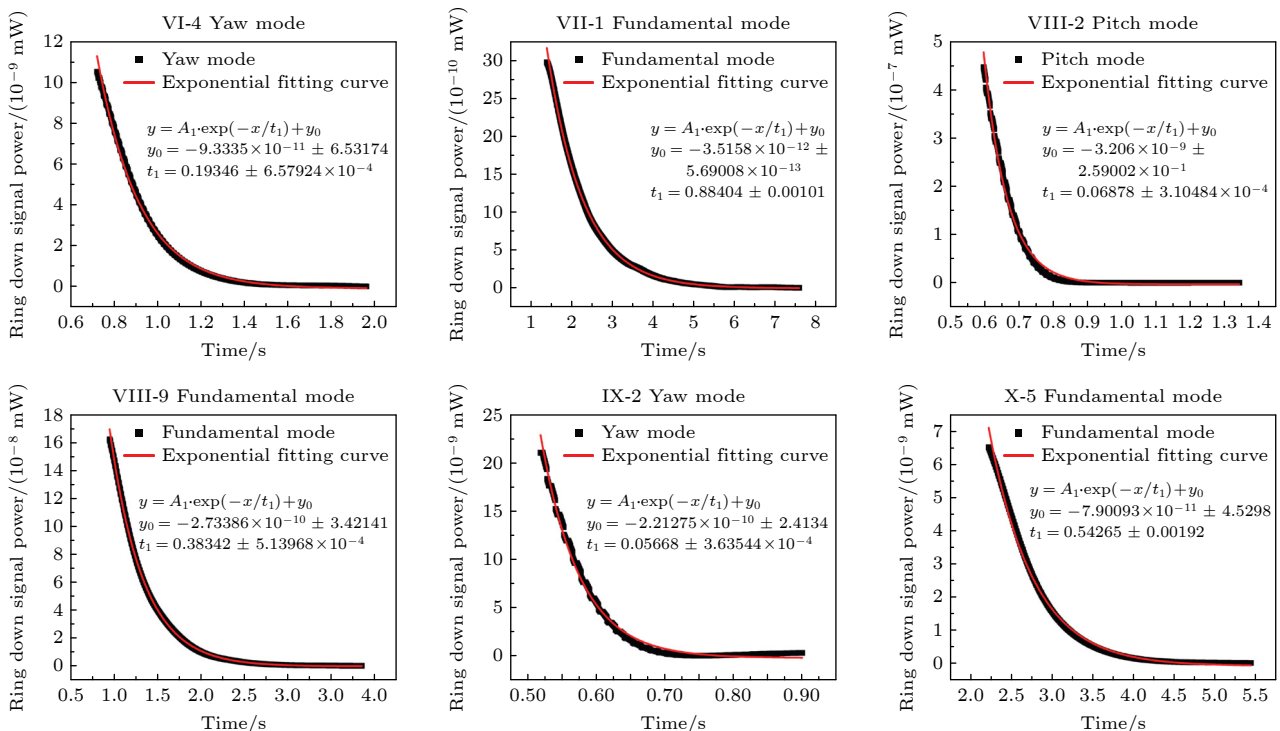


图 5 不同几何结构的机械振子不同阶模式的衰荡结果, 黑色线为测量的衰荡曲线, 红色线为拟合曲线, 图中给出了包含衰荡时间在内拟合的相关信息

Fig. 5. The ring-down results of different modes for mechanical oscillators with various geometric structures. The black lines represent the measured ring-down curves, and the red lines are the fitted curves. The figures also present the fitting-related information, including the ring-down time.

动状态, 随后关闭声光调制器 (AOM) 瞬间切断激励光, 使振子进入自由衰荡阶段, 测量该振动模式共振频率处的位移谱衰荡曲线, 实验采用频谱分析仪的零扫宽 (zero-span) 模式, 在共振频率处直接测量振子的时域位移衰荡曲线. 对测量曲线进行指数拟合时, 剔除了激励光瞬间关断后衰荡初始阶段的不稳定数据段, 以及衰荡终止后基线区域的冗余数据, 获取振子振幅衰减至最大幅值  $1/e$  时对应的衰荡时间. 根据品质因子计算公式  $Q = \Omega_m \tau_e$ , 即可计算得到该振动模式的  $Q$  值. 图 5 为不同编号的机械振子不同振动模式的衰荡拟合. 共振频率及  $Q$  值如下, VI-4: 2255 Hz, 3695; VII-1: 575 Hz, 3311; VIII-2: 8895 Hz, 7997; VIII-9: 995 Hz, 2920; IX-2: 8352 Hz, 6171; X-5: 758 Hz, 2867.

#### 4 结果分析与讨论

实验同时使用压电陶瓷对机械振子进行接触式机械激励作为对比, 利用衰荡法进行  $Q$  值测量. 图 6 是对几个模式进行多次测量, 求其  $Q$  值相对标准差 (相对于平均值) 的结果, 黑色线为光激励的结果, 红色线为机械激励的结果, 可以明显看到在同一模式下, 用这两种方式激励进行多次测量, 光激励的标准差都要小于机械激励的标准差, 测量更准确. 光激励的相对标准差在 5% 附近.

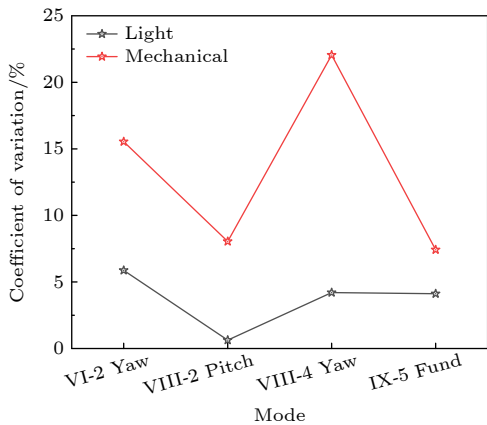


图 6 两种激励方式同一机械振子振动模式 3 次  $Q$  值测量标准差对比  
 Fig. 6. Comparison of standard deviations of three  $Q$ -value measurements for vibration modes of the same mechanical oscillator under two drive methods.

实验上对机械振子阵列测量了 17 组不同几何结构的悬臂梁的前三阶模式的  $Q$  值. 将同一振子同阶模式下取两种  $Q$  值测量方式的差值比上它们的

的平均值得到相对差值,  $Y = \frac{Q_O - Q_M}{(Q_O + Q_M)/2}$ ,  $Q_O$  和  $Q_M$  分别为光激励和机械激励的  $Q$  值. 图 7 为从高频到低频不同振子不同阶振动模式  $Q$  值的相对差值.

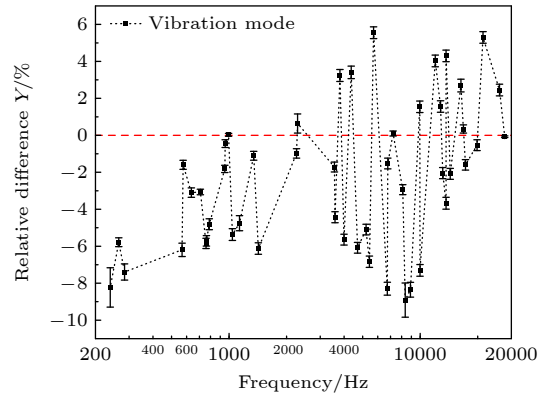


图 7 两种激励方式对于 17 个不同尺寸和形状设计的机械振子振动模式的  $Q$  值相对差值  
 Fig. 7. Relative differences of the measured  $Q$  factors of vibration modes for 17 mechanical oscillators designed with different sizes and shapes using two drive methods.

可以看出, 在 200 Hz—20 kHz 的低频频段测量范围内, 在更低频率 (低于 2 kHz) 处, 机械激励测量的  $Q$  值相对于光激励统一偏高, 而在高频处测量误差趋于分散. 初步分析可能是低频处压电陶瓷受其自身以及夹持器件的影响, 导致其存在阻尼振荡, 从而衰荡时间变长.

#### 5 总结

本文实验上采用非接触式的光辐射压力作为驱动激励, 进行了低频、高机械品质因数的精确测量, 并且与接触式的压电陶瓷激励测量方式做对比. 结果表明, 由于声频及更低频段处存在着较高的环境噪声, 极易耦合进实验系统. 利用光激励驱动的测量方式, 能有效避免低频处环境噪声的耦合, 减小测量系统的误差, 提高测量结果的准确性. 利用光激励测量, 可以对不同类型、各阶频段本征振动模式以及更多种类的机械振子进行品质因数测量. 此外, 利用振子在机械共振的高灵敏性, 利用光产生弱力, 通过对弱力引起的机械振子位移探测, 有望实现高灵敏的弱力测量.

#### 参考文献

[1] Yu H, McCuller L, Tse M, Kijbunchoo N, Barsotti L, Mavalvala N 2020 *Nature* **583** 43

- [2] Michimura Y, Komori K 2020 *Eur. Phys. J. D* **74** 126
- [3] Barzanjeh S, Xuereb A, Gröblacher S, Paternostro M, Regal C A, Weig E M 2022 *Nat. Phys.* **18** 15
- [4] Chen H J, Mi X W 2012 *Chin. J. Quantum Electron.* **29** 153 (in Chinese) [陈华俊, 米贤武 2012 量子电子学报 **29** 153]
- [5] Cupertino A, Shin D, Guo L, Steeneken P G, Bessa M A, Norte R A 2024 *Nat. Commun.* **15** 4255
- [6] Huang G, Beccari A, Engelsen N J, Kippenberg T J 2024 *Nature* **626** 512
- [7] Dania L, Bykov D S, Goschin F, Teller M, Kassid A, Northup T E 2024 *Phys. Rev. Lett.* **132** 133602
- [8] Chen X, Liu X W, Zhang K Y, Yuan C H, Zhang W P 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 164211 (in Chinese) [陈雪, 刘晓威, 张可焯, 袁春华, 张卫平 2015 物理学报 **64** 164211]
- [9] Aspelmeyer M, Kippenberg T J, Marquardt F 2014 *Rev. Mod. Phys.* **86** 1391
- [10] Engelsen N J, Beccari A, Kippenberg T J 2024 *Nat. Nanotechnol.* **19** 725
- [11] Tsuchida M, Morita T 2024 *Precis. Eng.* **91** 390
- [12] Wang D, Pan Y, Wu S, Zhao H, Qu T, Tang J Proceedings of the 2016 *Joint International Information Technology, Mechanical and Electronic Engineering Xi'an, China* pp17-23
- [13] Ciers A, Jung A, Ciers J, Nindito L R, Pfeifer H, Dadgar A, Wieczorek W 2024 *Adv. Mater.* **36** 2403155
- [14] Dalziel J W 2012 *Ph. D. Dissertation*(Pasadena: California Institute of Technology)
- [15] He D F, Xu R Z, Yang H 2020 *Electron- Opto. Technol. Appl.* **35** 60 (in Chinese) [何德方, 徐荣泽, 杨浩 2020 光电技术应用 **35** 60]
- [16] Li Z Y, Zhang Q, You X, Li Y M, Peng K C 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 191903
- [17] Cui D, Ma S, Li C Y, Ye C C 2014 *High Power Laser Part. Beams* **26** 12 (in Chinese) [崔鼎, 马社, 李才阳, 叶长春 2014 强激光与粒子束 **26** 12]
- [18] Wu L L, Ren Y C, Xue F 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 030701 (in Chinese) [武列列, 任益充, 薛飞 2025 物理学报 **74** 030701]
- [19] Corbitt T, Wipf C, Bodiya T, Ottaway D, Sigg D, Smith N, Whitcomb S, Mavalvala N 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 160801
- [20] Trowbridge A C, Wright E M, Dholakia K 2025 arXiv: 2504.18789 [physics. optics]
- [21] Cole G D 2012 *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers* San Diego pp28-38
- [22] Sharifi S, Banadaki Y M, Cullen T, Veronis G, Dowling J P, Corbitt T 2020 *Rev. Sci. Instrum.* **91** 054504

# Measurement of quality factor of low-frequency mechanical oscillators excited by optical radiation pressure\*

WANG Yijian<sup>1)</sup> GAO Xiangyu<sup>1)</sup> SUN Hengxin<sup>1)2)†</sup>  
LIU Kui<sup>1)2)</sup> GAO Jiangrui<sup>1)2)</sup>

1) (*State Key Laboratory of Quantum Optics Technologies and Devices, Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

2) (*Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

( Received 23 October 2025; revised manuscript received 27 November 2025 )

## Abstract

High-quality-factor ( $Q$ -factor) mechanical resonators are indispensable components in quantum optomechanical experiments, including optomechanical cooling, quantum sensing, precision metrology, and the generation of entanglement and squeezing. Although  $Q$ -factor measurements have been performed on high-frequency resonators with low  $Q$ -factors, measuring the  $Q$ -factors of low-frequency resonators with high  $Q$ -factors is still challenging. It is difficult to identify the mechanical modes from other noise sources in the environment, such as audio noise of air fans and mechanical modes of clamps. Furthermore, the response speed of traditional piezoceramic transducer for driving the mechanical resonator is limited. In this study, we use the optical radiation pressure to directly drive the mechanical oscillator. The  $Q$ -factor is measured by the ring-down technique. With the aid of precisely controllable electrical current, radiation pressure can be precisely regulated, thereby providing faster response times and a broader operational bandwidth, especially in the acoustic and sub-acoustic frequency ranges. Furthermore, this approach reduces the low-frequency noise caused by environmental vibrations and experimental equipment, which are difficult to isolate. In the experiment, we measure the  $Q$ -factor of a mechanical resonator array composed of tens of individual mechanical resonators of different sizes and different structures. A single resonator consists of a single-crystal GaAs cantilever integrated with a micromirror. A laser beam, modulated by an acousto-optic modulator (AOM) acting as a fast optical switch, serves as a radiation pressure driving source. Another probe beam is reflected by the high-reflectivity micromirror of the resonator and detected by a quadrant photodetector (QPD) to obtain the ring-down signal from which the  $Q$ -factor is obtained. The results are compared with those obtained using traditional piezoceramic drive. The results show that in a low-frequency region (below  $\sim 2$  kHz), where environmental noise coupling is pronounced, the optical drive method effectively suppresses low-frequency noise. The relative error of  $Q$ -factor measurements using optical drive is approximately 5%, lower than that obtained with piezoelectric drive. This optical radiation-pressure driving technique provides a robust and fast-response method for measuring the  $Q$ -factors of massive low-frequency mechanical resonators.

**Keywords:** optical radiation pressure, low-frequency band,  $Q$ -factor, ring-down measurement

DOI: [10.7498/aps.75.20251443](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251443)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251443](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251443)

\* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2021YFC2201802).

† Corresponding author. E-mail: [hxsun@sxu.edu.cn](mailto:hxsun@sxu.edu.cn)

## 基于光辐射压激励的低频机械振子品质因数测量

王义建 高翔宇 孙恒信 刘奎 郭江瑞

### Measurement of quality factor of low-frequency mechanical oscillators excited by optical radiation pressure

WANG Yijian GAO Xiangyu SUN Hengxin LIU Kui GAO Jiangrui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 050001 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251443

CSTR: 32037.14.aps.75.20251443

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251443>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

品质因数对 $TM_{02}$ 模相对论返波管工作模式影响

Influence of quality factor on operating mode of  $TM_{02}$  mode relativistic backwave oscillator

物理学报. 2024, 73(3): 035202 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231577>

用于光腔衰荡光谱测量的多支路掺铒光纤飞秒光梳系统

Multi-branch erbium fiber-based femtosecond optical frequency comb for measurement of cavity ring-down spectroscopy

物理学报. 2022, 71(8): 084203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212162>

$Ga_2O_3$ 纳米机电谐振器机械能量耗散途径研究

Mechanical energy dissipation pathways in  $Ga_2O_3$  nanoelectromechanical resonators

物理学报. 2025, 74(7): 078501 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241706>

$CO_2/CO$ 干扰下基于腔衰荡吸收光谱的痕量 $H_2S$ 浓度测量

Accurate measurement of trace  $H_2S$  concentration based on cavity ring-down absorption spectroscopy under  $CO_2/CO$  disturbance

物理学报. 2023, 72(4): 043302 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221851>

磁电机械天线的阻抗特性分析

Impedance characteristics of magnetoelectric antennas

物理学报. 2022, 71(24): 247502 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220591>

基于里德伯原子天线的低频电场波形测量

Measurement of low-frequency electric field waveform by Rydberg atom-based sensor

物理学报. 2024, 73(7): 070201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231778>