用于铌酸锂热传感的非制冷低噪声薄膜光机械谐振器

Yue Yu, [1, 2, 3, *]Ran Yin, [1, 2, *]Ian Anderson, [4]Yinan Wang, [4]Jack Kramer, [4]Chun-Ho Lee, [1,2]Xinyi Ren, [1,2]Zaijun Chen, [1,2]Michelle Povinelli, [2]Dan Wasserman, [4]Ruochen Lu, [4]和 Mengjie Yu[1,2,3]

[1]*Department of Electrical Engineering and Computer Sciences,University of California, Berkeley, Berkeley, CA 94720, USA*

[2]*Ming Hsieh Department of Electrical and Computer Engineering,University of Southern California, Los Angeles, CA, 90089, USA*[3]*Materials Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA*[4]*Chandra Family Department of Electrical and Computer Engineering, The University of Texas at Austin, TX, 78712, USA*（日期：2026年1月7日）

arXiv:2601.02715v1 [physics.optics] 6 Jan 2026

光机械转换利用光场与机械运动之间的相互作用，以本征低噪声实现对微弱机械量的高灵敏度测量。铌酸锂兼具低光学损耗、强压电性、高本征 $f \times Q_m$ 因数和低热导率，因此有望用于探索面向热传感应用的光机械平台。在此，我们在薄膜铌酸锂上开发了一种集成式光机械平台，在紧凑的40 μ m $\times$ 40 μm占用面积内，精确设计光场、机械场和热场。该平台集成了带有超薄中心膜的悬空微环谐振器，在保持高光学品质因数 Q_o 和机械品质因数 Q_m 的同时，降低了机械刚度和有效质量；机械品质因数为1117，振荡后提升至 5.1×10^4 。该设计抑制热量向硅衬底耗散，并提升热灵敏度，在室温下实现了 -124 ppm/K的频率温度系数，以及在10 kHz下6.2 nW/$\sqrt{\text{Hz}}$的噪声等效功率。该紧凑且可扩展的平台为高灵敏度热传感开辟了新机遇，支持与红外吸收体进行异质集成以实现非制冷红外探测，并可实现全集成、全光片上读出，为构建大面阵、低噪声红外传感阵列铺平道路。

引言

纳米制造技术的进步使多种功能得以集成于单个芯片上，从而实现了更小、更快、更具成本效益且能效更高的平台。凭借紧密限制的场和减小的模式体积，集成平台能够促进不同物理域之间的高效转换。值得注意的是，腔光机械学利用共振光场限制来增强光与机械运动的相互作用，从而灵敏地探测和控制微弱位移 [1]。这种方法支撑着广泛的应用，包括高精度传感 [2, 3], 多物理场转换 [4, 5], 和量子技术 [6]。降低机械和光学损耗对这些应用至关重要：机械损耗决定热噪声底，并限制机械运动的相干性；而光学损耗则限制光与机械的相互作用及读出灵敏度。在集成平台上，可通过制造工艺优化将光学损耗降至最低；而机械耗散则可通过多种架构加以缓解，包括具有人工设计带隙的光机械晶体 [7, 8],声波器件 [9, 10], 以及采用狭窄支撑结构的微盘／微环谐振器 [11, 12]。在这些方案中，微盘／微环谐振器兼具占用面积小、光机械耦合强、无电极运行和制造简便等优点，因此特别适用于实际应用。

迄今为止，硅和氮化硅凭借成熟的制造生态系统和 CMOS兼容性，已在光机械系统中占据主导地位，但它们存在固有的材料局限性，例如压电性和光学非线性较弱。相比之下，铌酸锂（LN）兼具低光学损耗和强二阶光学非线性 [13], ，已推动多种应用的发展，涵盖从伏级高速调制器到电光频率梳、宽带光谱仪以及光子量子网络与计算 [14]。尽管铌酸锂具有较强的压电性（$d_{33} \sim 6$ pC/N）和固有的高 $f \times Q_m$ 乘积（7.1×10^{13} [15]），但受制造挑战影响，铌酸锂光机械学仍未得到充分探索。近期研究在薄膜铌酸锂（TFLN）上展示了压电光机械跑道形谐振器，其光学品质因数（Q_o）为 2.1×10^6，在 200K、接近 5.2 GHz 时的机械品质因数（Q_m）为5.5×10^3 [16]。结合其低热导（0.5 W/m·K）和高温度

* 这些作者对本研究的贡献相同。

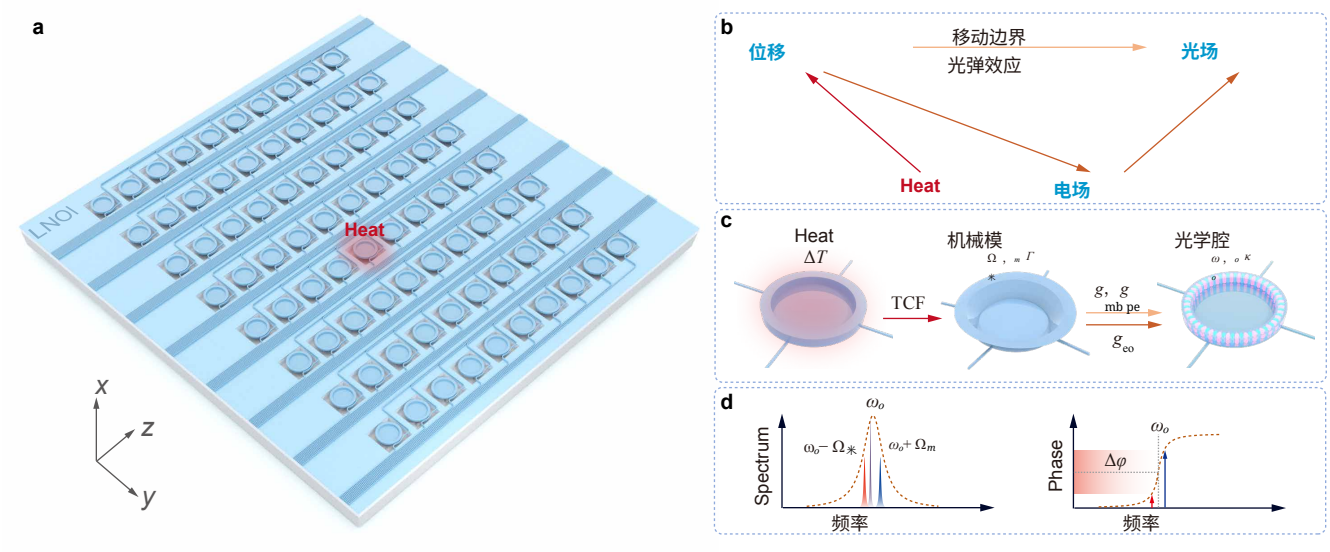


图 1 | 基于 TFLN 的室温光机械平台。a. 碗状光机械谐振器示意图。**b.** 基于 LN 上光机械转换的热传感。**c.** 热、机械和光场之间的转换及标注参数。机械频率和阻尼率（Ω_m，Γ_m）、光学频率和阻尼率（ω_o，κ_o），以及由移动边界、光弹性和电光效应引起的耦合率（g_{mb}，g_{pe}，g_{eo}）。**d.** 激光共振探测谐振腔的转换机制，其中机械运动会使反射场发生相位调制。

频率系数（$|TCF| > 70\,\text{ppm/K}$，较硅、氮化硅和氮化铝等其他材料高出 2 倍以上 [17, 18]），铌酸锂在开发室温下灵敏的非制冷光机械热传感器方面前景广阔[19, 20]。

在此，我们利用先进的纳米技术，同时调控光学、机械和热学域，展示了一种基于 TFLN 的室温低噪声光机械平台。该平台集成了悬置碗状光机械谐振器像素阵列，每个像素尺寸为 $40\ \mu$米$\times 40\ \mu$米，将微环谐振器与受二维材料系统启发的薄膜膜片结构相结合 [21–23]。外缘充当低损耗光学腔，而中心区域则被修整为厚度低于 100 纳米的超薄机械膜片，大幅降低有效质量和刚度，从而在不影响强光机械耦合的情况下提升热灵敏度。每个谐振器由四个超薄锚点支撑，这些锚点经过精心设计，既能确保机械稳定性，又能有效隔离器件与下方的硅热浴，从而抑制寄生热泄漏并保持高热灵敏度。我们的光机械谐振器经过设计，将弯曲半径最小化至 $20\ \mu$米；经过两步刻蚀和悬置后，其本征 Q_o 达到 1.0×10^6，显著优于此前的报道 [24–26]。基径向模式在 83.7 兆赫下的品质因数在室温和环境压力下达到 1117，振荡后增至 5.1×10^4。作为热传感器，该谐振器经理论表征具有 33.5 μW/K 的高热导和 440 pJ/K 的低热容；得益于较低的热质量，其热带宽达 12.2 kHz。最后，该器件展现出 -124 ppm/K 的本征温度系数，且在 10 kHz 下的噪声等效功率（NEP）为 6.2 nW/$\sqrt{\text{Hz}}$。这些结果凸显了我们可扩展的低噪声平台，可用于探索室温光机械学，并为采用频移模式、具备全光读出能力的精密热传感器提供基础。我们的谐振器可与薄膜红外（IR）吸收器异质集成 [27]，从而探索高灵敏度、大规模、非制冷光机械红外探测器的新工作区间及其突破性性能。

结果

图1a 展示了我们在薄膜铌酸锂上制备的低噪声光机械平台，其中数百个像素集成在一块 1 厘米 $\times$ 1 厘米的芯片上。在硅和氮化硅等光机械平台上，机械位移可通过移动边界（MB）和光弹效应（PE）直接耦合到光场。由于铌酸锂具有很强的电光（EO）效应和压电效应，因此产生了额外的光机械耦合路径：机械位移通过压电效应引入内部电场，进而调制

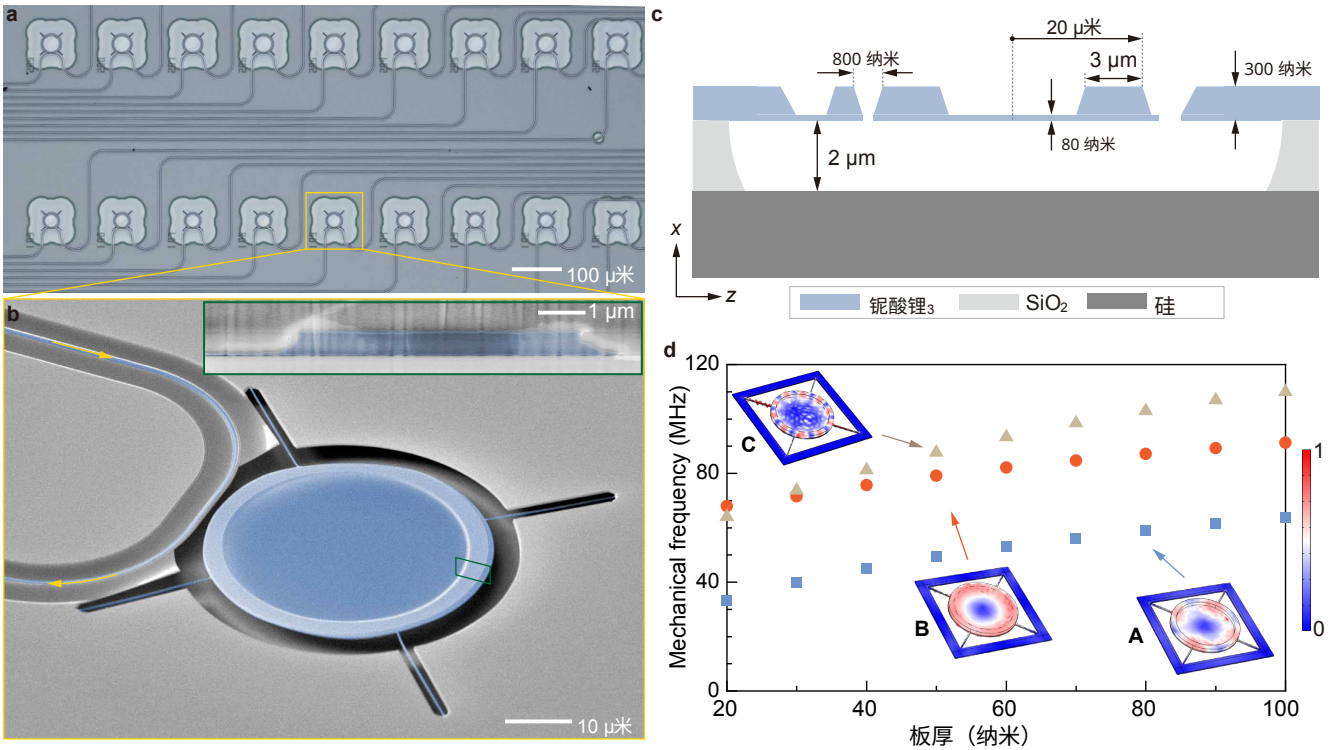


图 2 | 碗形光机械谐振器的设计与数值模拟。a. 光机像素阵列的显微镜图像，展示了其巨大的可扩展性。**b.** 制成的谐振器的扫描电子显微镜图像，插图为其横截面。**c.** 器件的侧视图，标注了尺寸。**d.** 不同薄板厚度下三种模式的模拟机械频率。插图为相应模式的机械位移分布。

光场（通过电光效应；图 ΔT 1b）。伴随温度变化的热量$_m$ 通过热机械效应转化为机械频率 $\Omega g_0 = g_{0的MB} + g_{0偏移}$。随后，在光学域中读取这一频移，其总单光子光机械耦合率为$PE + g_0$，EO定义为机械振子 [28] 的零点运动所导致的光学模式频移（图 1c）。将零失谐光泵浦耦合至谐振器后，热机械振动会强烈调制光学相位，并可在输出端使用平衡零差探测进行精确测量（图1d）。

为了实现面向未来传感应用的低噪声光机械平台，必须具备高品质的光学和机械共振，以抑制热噪声和读出噪声并保持相干性，同时还需具备较强的光机械耦合率，以实现光学和机械自由度之间的高效转换。我们在300纳米厚的绝缘体上X切铌酸锂上设计了径向模碗形光机谐振器（图 2a），该结构支持光学模式紧密约束于其外周并沿其环绕传播，同时，较薄的内膜厚度使其能够产生强烈的机械振动（图 2b）。图 2c 展示了器件的横截面及标注尺寸。谐振器的外半径和内半径分别为20和 17 μ米，以平衡光学弯曲损耗与器件占用面积。薄板层上制有四个锚点，每个锚点宽400纳米、长 20 μ米，并连接至外缘，以提供机械支撑，同时尽量减小对光学和机械约束的扰动。综合考虑器件性能与制造挑战，我们选择80纳米的锚点（及薄板）厚度进行制造，工艺包括两步电子束光刻与刻蚀、退火和悬置（详情见方法）。锚点体积较小，经过优化可降低热导，从而提升热灵敏度，使其适用于片上辐射热计应用。总线波导紧邻谐振器放置，用于将光耦合进出谐振器，并通过光机械转换检测热机械振动。接下来，我们模拟了内膜厚度不同情况下各机械模式的频率（t_{slab}）。图 2d仅绘出了三个机械模式（A、B、C）在约80兆赫处的基频及其对应的位移分布（嵌入图）。尽管高 $f \times Q_m$ 品质因数可在高阶机械模式中实现， [29, 30], 但这些模式邻近众多其他模式，会导致位移背景噪声升高。因此，优先耦合至谐振器的基机械模式可实现最佳的低噪声运行。

图 3a显示了实验　　使用平衡零拍测量热机械振动的实验装置

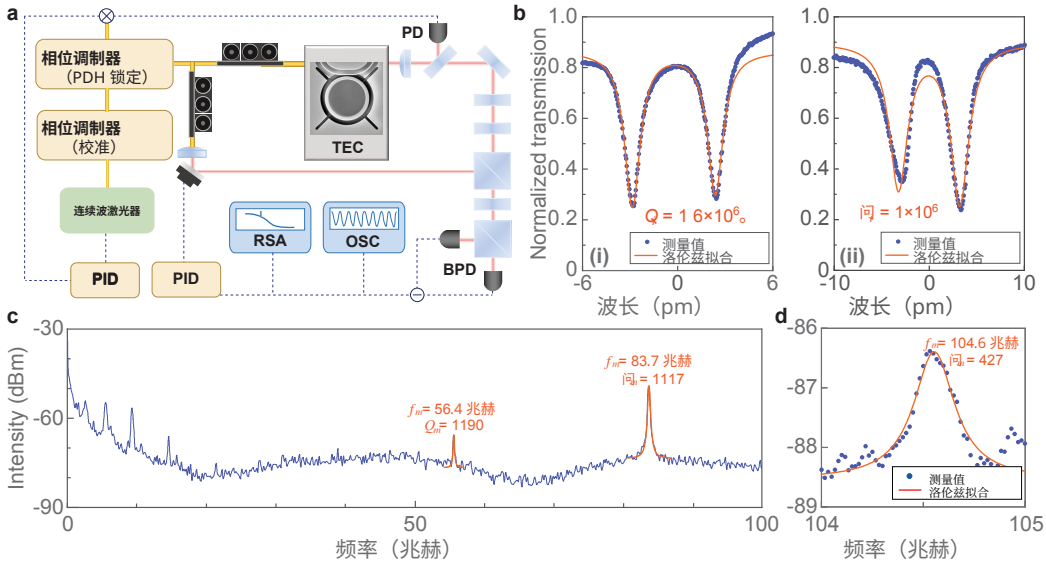


图 3 | 实验装置与光机表征。a. 实验装置；CW，连续波；PDH，庞德-德雷弗-霍尔；PID，比例-积分-微分控制器；TEC，热电制冷器；PD，光电探测器；BPD，平衡光电探测器；RSA，信号分析仪；OSC，示波器。**b.** 第一次刻蚀（i）和悬置（ii）后的测量光学共振及经洛伦兹拟合的光学Q_i 因子。**c.** 通过相位检测测量的最高达100兆赫的功率谱密度。**d.** 通过强度检测测量的104兆赫附近的功率谱密度。

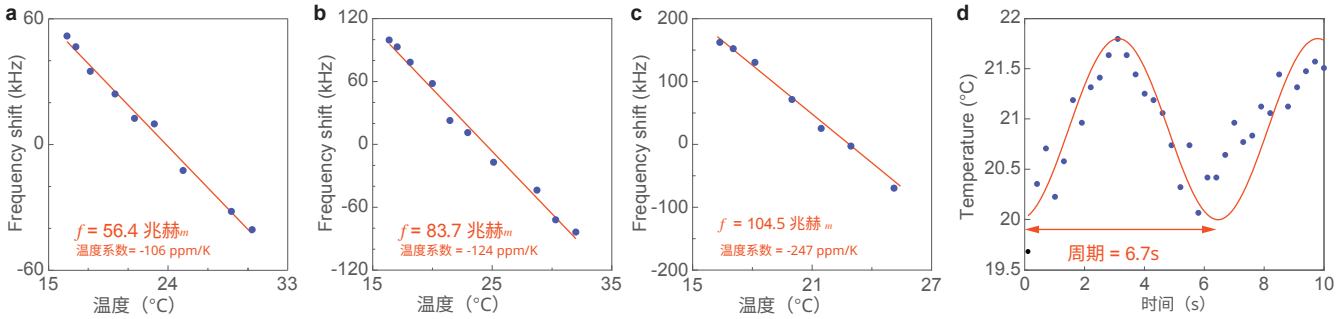


图 4 | 机械热灵敏度测量。a-c. 三个机械模式的测量温度系数如图3所示，并附有线性拟合曲线。**d.** 由时域中调制的机械频率重构的温度信号，呈现出与所施加的0.15 Hz调制频率一致的周期性行为。

借助庞德-德雷弗-霍尔锁定进行检测（详情见方法）。该方案用于抑制激光器-腔失谐噪声和激光强度噪声，从而实现稳定、精准的光学读出。除非另有说明，所有测量均在室温和大气压条件下进行。为减少刻蚀引起的光学损耗，锚点设置在远离谐振器外缘的位置（见补充材料第 1 节）。这一策略使我们即使经过两步刻蚀，也能保持较低的光学损耗；制成的器件在首次刻蚀（i）和最终悬置（ii）后，分别表现出本征品质因数 Q_o 为 1.6×10^6 和 1×10^6，如图 3b 所示。悬置后共振消光比降低，主要归因于悬置谐振器的垂直运动；锚点越薄，这种运动越明显，而大部分总线波导仍由衬底支撑。随后，我们采用相位检测测量频率低于 100 兆赫的机械模式，并采用强度检测测量频率高于 100 兆赫的机械模式的位移噪声功率谱密度（PSD）（图 3c、d）。当芯片上功率为 56 μ瓦、本地振荡功率为 388 μ瓦时，在 83.7 兆赫处实现了 24 dB 的最大信噪比，Q_m 为 1117，对应于图 2d所示的基径向模式 B。

随后，我们使用热电冷却器（TEC）将平衡温度从 289 K 调节至 306 K，以表征器件的热灵敏度 [见补充材料第 2] 节。我们的谐振器表现出较高的温度系数（TCF），不同机械模式的范围为 –106 至 –263 ppm/K，如图 4a-c 所示（另见补充材料第 3 节）。位于 83.7 兆赫的基模，其温度系数为 –124 ppm/K，优于其他集成平台（$|TCF| < 50$

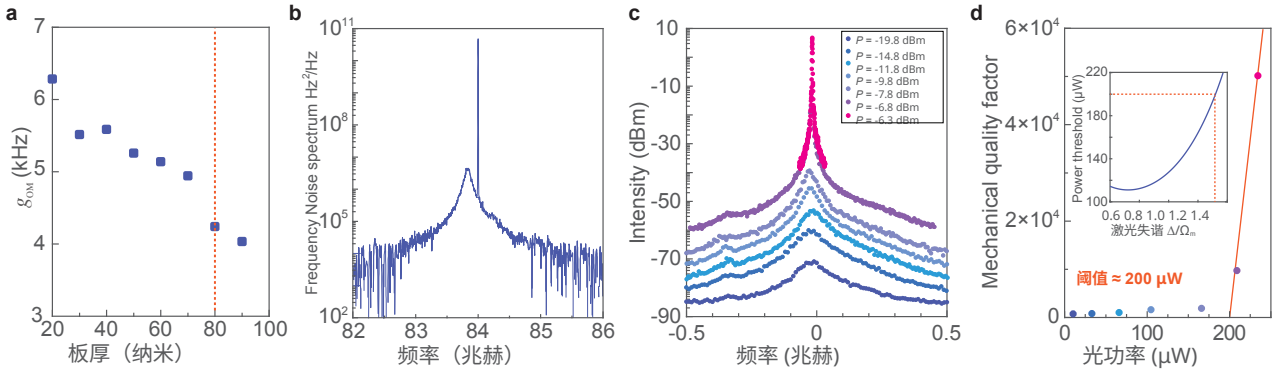


图 5 | 光机械耦合表征。a. 不同板厚下模拟的光机械耦合率，显示板厚为 80 nm 时， g_{OM} 为 4.3 kHz。**b.** 在 84 MHz 处施加校准峰，该频率接近目标频率，用于提取光机械耦合率。**c.** 测量随光功率增加而变化的机械放大，结果显示，超过功率阈值后，线宽大幅降低，同时振荡强度显著增加。**d.** 不同光功率下测得的 Q_m ，插图显示了依赖于激光失谐的激射阈值。

ppm/K [18]）。为进一步展示动态响应，我们向热电冷却器施加正弦电压，并使用示波器在时域中采集机械频率响应。根据测量得到的温度系数，我们可以提取温度变化（图 4d），其频率为 0.15 Hz，变化范围为 2 °C。为进一步研究器件的热带宽，需要更快地调制热源，例如构建辐射热计器件，将吸收带内调制的辐射信号转换为温度变化。

我们进一步表征基径向模式的单光子光机械耦合率 g_0 ，方法是向输入光添加另一相位调制信号，并在目标频率附近产生校准边带，如图 5b所示。通过比较校准边带功率与机械边带功率，我们得到实验测量值 g_{OM} 为 4.3 kHz，与图 5a 中板厚为 80 nm 时的模拟结果一致。还可以通过测量机械线宽随泵浦功率的变化来量化光机械谐振器的性能。图 5c 绘出了不同泵浦功率下腔透射的射频光谱测量值。当泵浦功率低于振荡阈值时，机械光谱与热机械振动的光谱十分相似，如图 5b 所示。随着泵浦功率增加，机械模被驱动进入振荡态，机械光谱强度的峰值提高了 80 dB。同时，机械线宽大幅收窄至 1.6 kHz，对应的有效 Q_m 为 5×10^4 （图 5d）。这一行为清楚地展示了机械激射；通过用线性曲线拟合阈值以上的数据，我们提取出阈值功率 200 μW。光机械激射的功率阈值为 [31]

$$P_{\mathrm{th}}=\frac{m_{\mathrm{eff}}\omega_o\Gamma_i\Gamma_m}{2g_{\mathrm{OM}}^2\Gamma\Delta}\left[(\Delta-\Omega_m)^2+(\Gamma/2)^2\right]\left[(\Delta+\Omega_m)^2+(\Gamma/2)^2\right]\frac{4\Delta^2+\Gamma^2}{4\Gamma_i\Gamma_e} \tag{1}$$

其中， P_{th} 是芯片上的阈值光功率， m_{eff} 是有效运动质量， Γ_i、 Γ_e和 Γ 分别是内禀、外部和总光子衰减率。 Γ_m 是机械模的能量衰减率， Δ 是激光-腔失谐。利用测量得到的谐振器参数，我们可以推导出器件在不同失谐量下的理论功率阈值，如图5d插图所示。这表明我们的实验失谐量约为1.3 Ω_m；由于实验中采用的激光-腔失谐未经过优化，该值并非最优值。进一步优化激光-腔失谐后，功率阈值可达到110 μW的最优值。

光机械系统中的噪声会限制其在传感、计时和转换应用中的性能。现在，我们分析光机械系统中的噪声源，并使用噪声等效功率（NEP）对其进行量化。热涨落噪声NEP_T 和热机械位移噪声$\mathrm{NEP}_{\mathrm{thermo}}$ 是我们平台上的两种基本噪声源，可表示为 [32]

$$\mathrm{NEP}_T=\frac{1}{\mathrm{TCF}}\frac{df}{dT}\sqrt{\frac{4k_BT^2G_{\mathrm{th}}}{\omega^2\tau_c^2+1}}\quad\text{and}\quad\mathrm{NEP}_{\mathrm{thermo}}=\frac{G_{\mathrm{th}}}{\mathrm{TCF}}\frac{df}{dx}\sqrt{\frac{k_BT}{m_{\mathrm{eff}}\,\omega_m^2\,Q_m}}, \tag{2}$$

其中， T、 G_{th}、 τ_c、 ω_m和 m_{eff} 分别为绝对温度、热导、时间常数、机械谐振频率和有效质量。请注意，此处 $\tau_c=C/G_{\mathrm{th}}$，其中 C 为热容。通过精心设计热质量和散热，该器件实现了高达 33.5 μ W/K 的 G_{th} ，以及低至

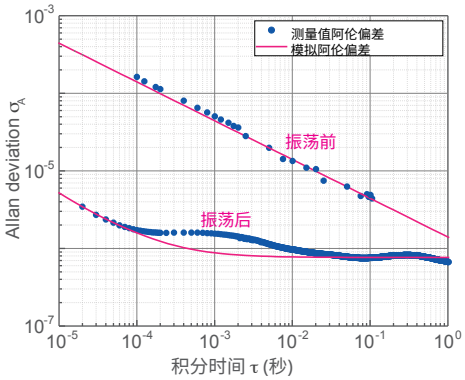


图 6 | 阿伦偏差测量。 测量了振荡前后的 σ_A。蓝色点表示实验数据，粉色线表示相应的拟合结果。振荡前，频率不稳定性主要由热机械噪声主导，得到 $\sigma_A \propto \tau^{-1/2}$。振荡后，整体噪声降低，但由于闪烁噪声和随机游走频率噪声的出现，在较长积分时间下标度关系发生偏离。

440 pJ/K 的，因此 τ_c 为 13 μ s，热带宽为 12.2 kHz。进一步降低 G_{th} 可同时降低 NEP_T 和 $\mathrm{NEP}_{\mathrm{thermo}}$，而提高 TCF 和 Q_m 可降低 $\mathrm{NEP}_{\mathrm{thermo}}$ （另见补充材料第 5 节）。得益于悬浮铌酸锂谐振器的低损耗和高度隔离特性，与前两种噪声相比，光学读出噪声最低，因此未予考虑。

我们使用阿伦偏差（σ_A）表征器件的频率稳定性，随后通过器件响应度将其转换为噪声等效功率。图 6 对比了振荡前后测得的 σ_A 随积分时间 τ 的变化。振荡前，由于信号强度相对较低（~ -48 dBm），我们使用示波器捕获输出信号并提取阿伦偏差（见方法）。在这种情况下，可测量 τ 的上限受示波器存储深度的限制。在测量范围内，σ_A 按 $\tau^{-1/2}$标度变化，表明热机械噪声主导频率不稳定性。在积分时间为10^{-4} s 时，测得 σ_A 为 1.6×10^{-4}，对应的噪声等效功率为 610 nW/$\sqrt{\mathrm{Hz}}$。振荡后，信号强度显著增加，因此可以使用商用频率计数器直接检测。在较短积分时间下，热机械噪声仍是主要贡献因素，在 $\tau = 10^{-4}$ s 时测得 σ_A 为 1.6×10^{-6}，对应的噪声等效功率为 6.2 nW/$\sqrt{\mathrm{Hz}}$。在较长时间尺度下，闪烁噪声和随机游走噪声占主导（见补充图 S4）；这可能源于高光功率下的激光器不稳定性，可通过添加平衡零差探测或 PDH 锁定加以抑制。在真空中运行器件可使热导进一步降低三个数量级，从而显著降低噪声底。此外，优化锚固结构或引入反馈回路 [11, 33–35] 也可能进一步提高灵敏度并抑制噪声（另见补充材料第 4 和第 5 节）。

结论

我们通过协同结合超低损耗光学腔与充当高 Q 机械腔的超薄薄膜，展示了基于 TFLN 的室温低噪声光机械平台。我们证明，采用此类高度隔离、超低质量谐振器，可将热量直接转换为机械模的频移，其热导和热容分别为 33.5 μ W/K 和 440 pJ/K，TCF 为 -124 ppm/K，优于硅、氮化硅、碳化硅和氮化铝等其他集成平台（-20 至 -50 ppm/K [18]）。该器件还采用全光学读出，输入和输出光学接口无缝集成于同一芯片上，并利用近红外光源和光电探测技术实现散粒噪声极限测量，大幅降低了传统热传感器中的电子读出噪声。此外，无需电信号布线，进一步抑制了杂散噪声和串扰，从而支持大规模传感器阵列稳定、可扩展地运行。低热机械噪声与强环境隔离相结合，使器件在 10 kHz 下的 NEP 达到 6.2 nW/$\sqrt{\mathrm{Hz}}$。通过采用曲折系绳几何结构 [36] 和声学带隙工程 [8], ，还可进一步改善这些性能；这两种方法能降低有效热质量，并使热导趋近辐射极限，从而实现超快响应并提升热灵敏度。得益于铌酸锂强压电响应，可通过机电驱动 [37] 实现外部光电子反馈回路，以抑制相位噪声，类似于此前在光电子振荡器中展示的技术 [38]。更重要的是，光失谐敏感自振荡可由此类反馈实现

，并通过热光效应显著提升有效 TCF [39]。减压运行还提供了另一种噪声抑制途径：在 1 mbar 的环境压力下，G_{th} 预计噪声将降低三个数量级，使 NEP 有望低至 6.2 pW/$\sqrt{\text{Hz}}$。凭借紧凑的占用面积、可扩展性和材料多样性，该平台可轻松扩展，并与可调谐中红外吸收体集成，从而实现兼具高灵敏度、低噪声以及低成本、低尺寸、低重量和低功耗（C-SWaP）特点的多光谱探测器。这些能力使该平台有望成为大规模光机械系统的重要构件，可用于高光谱遥感、热成像和多功能片上传感等应用。

方法

制造。 所测试的薄膜铌酸锂样品制作于 NanoLN 提供的 X切铌酸锂绝缘体上晶圆，其顶层铌酸锂厚 300 nm，底层二氧化硅厚 2 μm，位于硅衬底上。首先，采用电子束光刻（EBL）在正性光刻胶（聚甲基丙烯酸甲酯）中制备微环谐振器和总线波导图案，再通过倾斜氩离子铣削将图案转移至铌酸锂层，留下厚 80 nm 的薄板。通过优化刻蚀配方，我们显著减轻了沟槽效应，从而能够制备更薄且更均匀的薄板。去除光刻胶后，进行彻底的酸洗，以清除重新沉积的非晶铌酸锂。随后，第二次电子束光刻在聚甲基丙烯酸甲酯中定义锚点和空气孔，再采用基于 Ar^+ 的电感耦合等离子体反应离子刻蚀（ICP-RIE）进行完全刻蚀。重复清洗流程后，将芯片在 500 °C 下退火 3 小时，以恢复铌酸锂材料的品质。最后，通过 49% 氢氟酸湿法刻蚀释放光机械谐振器，并使用临界点干燥机进行干燥。

测量。 可调谐连续波激光器（Santec TSL-570）通过透镜光纤耦合至片上边缘耦合器，并由准直器收集，总耦合损耗为 18.8 dB，主要源于手工劈裂造成的端面粗糙度。待测器件（DUT）安装在商用热电制冷器上，用于进行温度相关测量。采用零差测量装置测量机械振动引起的输出光相移，同时抑制激光噪声。输入激光被分为两路：一路耦合进入谐振器以提取机械信号，另一路作为相位稳定的本地振荡器。两路光的干涉将相位调制转换为强度信号，由平衡光电探测器进行探测，从而提高信噪比。同时，采用庞德-德雷弗-霍尔锁定将激光锁定在谐振波长处，此处具有最大的相位响应斜率，因此能够实现最灵敏的相位读出。使用信号分析仪直接捕获机械模式的功率谱密度，并使用示波器在时域内监测机械频率稳定性。

在此，我们使用示波器在较长的时域内测量机械信号，并推导出机械信号的阿伦偏差。需要注意的是，要分辨 83.7 兆赫信号的 10 kHz 频率变化，测量的时间窗应大于 1 ms，且采样率应高于 200 MS/s。图 S5a 绘出了由高速光电探测器探测并由示波器采集的 1 s 内的输出信号。随后，将记录的信号划分为相等的 1 ms 时间片，并对每个片段应用傅里叶变换，以提取时域中的瞬时机械频率，如图 S5b 所示。然后，我们可以利用上述方程得出不同积分时间下的阿伦偏差，如图 S5c 所示。

致谢

本研究由美国国防高级研究计划局通过光机械热成像（OpTIm）计划（HR00112320022）资助。M.Y. 和 Y.Y. 获美国能源部科学办公室基础能源科学部材料科学与工程部支持，合同编号 DE-AC02-05CH11231，项目属于量子相干系统计划 KCAS26。I.A. 获美国国家航空航天局空间技术研究生研究机会（NSTGRO）项目资助，编号 80NSSC24K1369。器件在南加州大学约翰·奥布莱恩纳米制造实验室制造。文中表达的观点、意见和/或研究结果均属于作者，不应被视为美国国防部或美国政府的官方观点或政策。

---

[1] M. Aspelmeyer、T. J. Kippenberg 和 F. Marquardt，腔光机械学，《现代物理评论》**86**，1391（2014）。[2] W. Yu、W. C. Jiang、Q. Lin 和 T. Lu，单分子腔光机械弹簧传感，《自然·通讯》**7**，12311（2016）。

[3] B.-B. Li、L. Ou、Y. Lei 和 Y.-C. Liu，腔光机械传感，《纳米光子学》10，2799（2021）。[4] J. T. Hill、A. H. Safavi-Naeini、J. Chan 和 O. Painter，通过腔光机械学实现相干光波长转换，《自然·通讯》3，1196（2012）。[5] K. Fang、M. H. Matheny、X. Luan 和 O. Painter，腔光机械电路中微波声子的光学转换与路由，《自然·光子学》10，489（2016）。[6] S. Barzanjeh、A. Xuereb、S. Gr¨oblacher、M. Paternostro、C. A. Regal 和 E. M. Weig，面向量子技术的光机械学，《自然·物理》18，15（2022）。[7] J. Chan、A. H. Safavi-Naeini、J. T. Hill、S. Meenehan 和 O. Painter，带有声辐射屏蔽结构的优化光机械晶体腔，《应用物理快报》101（2012）。[8] G. S. MacCabe、H. Ren、J. Luo、J. D. Cohen、H. Zhou、A. Sipahigil、M. Mirhosseini 和 O. Painter，具有超长声子寿命的纳米声学谐振器，《科学》370，840（2020）。[9] K. C. Balram、M. I. Davan̊co、J. D. Song 和 K. Srinivasan，压电光机械电路中射频波、光波与声波之间的相干耦合，《自然·光子学》10，346（2016）。[10] H. H. Diamandi、Y. Luo、D. Mason、T. B. Kanmaz、S. Ghosh、M. Pavlovich、T. Yoon、R. Behunin、S. Puri、J. G. Harris 等，量子区间中对长寿命体声波声子的光机械控制，《自然·物理》21，1482（2025）。[11] G. Anetsberger、R. Rivi`ere、A. Schliesser、O. Arcizet 和 T. J. Kippenberg，芯片上的超低耗散光机械谐振器，《自然·光子学》2，627（2008）。[12] J. Zhang、B. Peng、S. Kim、F. Monifi、X. Jiang、Y. Li、P. Yu、L. Liu、Y.-x. Liu、A. Al`u 等，光机械耗散孤子，《自然》600，75（2021）。[13] R. Weis 和 T. Gaylord，铌酸锂：物理性质与晶体结构综述，《应用物理A辑》37，191（1985）。[14] A. Boes、L. Chang、C. Langrock、M. Yu、M. Zhang、Q. Lin、M. Lonˇcar、M. Fejer、J. Bowers 和 A. Mitchell，铌酸锂光子学：拓展电磁波谱，《科学》379，eabj4396（2023）。[15] I. Bajak、A. McNab、J. Richter 和 C. Wilkinson，铌酸锂中的声波衰减，《美国声学学会杂志》69，689（1981）。[16] M. Shen、J. Xie、C.-L. Zou、Y. Xu、W. Fu 和 H. X. Tang，高频铌酸锂薄膜厚度模光机械谐振器，《应用物理快报》117（2020）。[17] Y. Kim 和 R. Smith，钽酸锂和铌酸锂单晶的热膨胀，《应用物理学杂志》40，4637（1969）。[18] W. Sui、S. J. Pearton 和 P. X.-L. Feng，谐振微机电系统（MEMS）中的频率温度系数（TCF）综述，《应用物理评论》12（2025）。[19] Y. Yu、R. Yin、I. Anderson、J. Kramer、C.-H. Lee、X. Ren、C. Cheung、R. Lu 和 M. Yu，基于薄膜铌酸锂光机械谐振器的室温热传感器，载于 CLEO：科学与创新（Optica出版集团，2025），第 SS190 1 页。[20] C. Qian、L. He、S. Xue、Q. Lin 和 B. Zhen，通过光机械弹簧传感实现灵敏红外探测，《ACS光子学》12，3609（2025）。[21] X.-Q. Zheng、J. Lee 和 P. X.-L. Feng，具有温度依赖多模态运行特性的六方氮化硼（h-BN）纳米机械谐振器，载于2015年传感器与执行器会议（IEEE，2015），第1393–1396页。[22] A. Blaikie、D. Miller 和 B. J. Alem´an，一种快速且灵敏的室温石墨烯纳米机械测辐射热计，《自然·通讯》10，4726（2019）。[23] C. Li、Y. Zhang 和 K. Hirakawa，利用微机电系统谐振器的太赫兹探测器，《传感器》23，5938（2023）。[24] C. Wang、M. J. Burek、Z. Lin、H. A. Atikian、V. Venkataraman、I.-C. Huang、P. Stark 和 M. Lonˇcar，集成式高品质因数铌酸锂微盘谐振器，《光学快报》22，30924（2014）。[25] W. C. Jiang 和 Q. Lin，铌酸锂中的芯片级腔光机械学，《科学报告》6，36920（2016）。[26] W. Jiang、C. J. Sarabalis、Y. D. Dahmani、R. N. Patel、F. M. Mayor、T. P. McKenna、R. Van Laer 和 A. H. Safavi-Naeini，微波频率与光学频率之间高效的双向压电光机械转换，《自然·通讯》11，1166（2020）。[27] S. Guadagnini、Z. Sakotic、Y. Yu、M. Yu、D. Wasserman 和 M. L. Povinelli，用于中红外测辐射热的悬置式、偏振依赖、亚波长穿孔金属吸收器，《纳米快报》25，15182（2025）。[28] L. Shao、M. Yu、S. Maity、N. Sinclair、L. Zheng、C. Chia、A. Shams-Ansari、C. Wang、M. Zhang、K. Lai 等，利用铌酸锂薄膜声学谐振器实现微波到光的转换，《光学》6，1498（2019）。[29] D. J. Wilson、C. A. Regal、S. B. Papp 和 H. J. Kimble，化学计量比氮化硅薄膜的腔光机械学，《物理评论快报》103，207204（2009）。[30] S. Chakram、Y. S. Patil、L. Chang 和 M. Vengalattore，超高品质因数氮化硅薄膜谐振器中的耗散，《物理评论快报》112，127201（2014）。[31] W. C. Jiang、X. Lu、J. Zhang 和 Q. Lin，具有超低阈值的高频硅光机械振荡器，《光学快报》20，15991（2012）。[32] L. Laurent、J.-J. Yon、J.-S. Moulet、M. Roukes 和 L. Duraffourg，用于热传感的 12-μm 节距机电谐振器，《物理评论应用》9，024016（2018）。[33] Y. Yu、X. Xi 和 X. Sun，在光机械微谐振器中观测到连续体中的机械束缚态，《光：科学与应用》11，328（2022）。[34] X. Feng、C. White、A. Hajimiri 和 M. L. Roukes，一种自持超高频纳米机电振荡器，《自然·纳米技术》3，342（2008）。

[35] M. Rossi、D. Mason、J. Chen、Y. Tsaturyan 和 A. Schliesser，基于测量的机械运动量子控制，《自然》**563**，53（2018）。[36] R. Perell´o-Roig、S. Barcel´o、J. Verd、S. Bota 和 J. Segura，通过折叠锚点实现温度补偿的几何工程化质量传感 CMOS-MEMS 谐振器，《传感器与执行器A：物理》**373**，115435（2024）。[37] X. Han、K. Y. Fong 和 H. X. Tang，10 GHz 薄膜厚度模腔光机械谐振器，《应用物理快报》**106**（2015）。[38] Y. K. Chembo、D. Brunner、M. Jacquot 和 L. Larger，具有时延反馈的光电子振荡器，《现代物理评论》**91**，035006（2019）。[39] R.Horvath、G. Modica、I. Ghorbel、G. Beaudoin、K. Pantzas、I. Sagnes、A. Martin、A. De Rossi、S. Combrie 和 R. Braive，集成于绝缘体上硅电路中的磷化镓光子晶体亚赫兹闭环电光机械振荡器，《ACS光子学》**10**，2540（2023）。