arXiv:2601.02026v1 [physics.optics] 5 Jan 2026

亚多普勒痕量气体光声光谱

Jacopo Pelini,[†,‡] Stefano Dello Russo,[¶] ChenghongZhang,[†,‡] Zhen Wang,[§]Iacopo Galli,[†,‡] Pablo Cancio Pastor,[†,‡] MariaConcetta Canino,[‖] Alberto Roncaglia,[‖] Naota Akikusa,[⊥] WeiRen,[#] MarioSiciliani deCumis,[*,¶,†] Paolo De Natale,[†,‡] 和 Simone Borri[†,‡]

†*CNR-INO* – 意大利国家光学研究所，卡拉拉街 *1* 号 – *50019* 塞斯托·菲奥伦蒂诺 *FI*，意大利。

‡*LENS* – 欧洲非线性光谱实验室，卡拉拉街 *1* 号 – *50019* 塞斯托·菲奥伦蒂诺 *FI*，意大利。

¶*ASI*，意大利航天局，特莱基亚地区，马泰拉，*75100*，意大利。

§哈尔滨工业大学（深圳），中国深圳。

‖*CNR-ISMN*，意大利国家研究委员会纳米结构材料研究所，*P.* 戈贝蒂街 *101* 号，博洛尼亚，*40129*，意大利。⊥滨松光子学株式会社，日本静冈。

#香港中文大学机械与自动化工程系，中国香港特别行政区新界。

电子邮箱：mario.sicilianidecumis@asi.it

摘要

分子正成为计量学和基础物理学研究的新基准，推动了对兼具高灵敏度和高分辨率的光谱技术的需求。光声光谱已证明能够兼具高灵敏度以及紧凑性、波长无关和无背景探测等优势。迄今为止，

光声传感主要应用于高压条件下的痕量气体分析，而低压范围则被认为不适合高效的声波传播。然而，在低压下探测气体样品是实现高分辨率光谱学的关键。在此，我们证明，利用毫瓦级中红外辐射，可以在腔增强光声传感器中对低压痕量气体进行亚多普勒饱和光谱测量。此外，我们还展示了同一装置可在较高压力下运行，以低至 35 μW 的激光功率实现灵敏度为十亿分之五的痕量气体检测。这使光声技术的独特优势得以拓展至计量学和基础物理学，并为中红外领域提供了一种兼具高灵敏度和高分辨率、经济灵活的工具。

关键词

光声光谱、亚多普勒光谱学、高分辨率、兰姆凹陷、高灵敏度、低功耗运行。

1 引言

光声（PA）传感在痕量气体分子检测领域正蓬勃发展。事实上，该技术基于探测目标分子与辐射相互作用后产生的声波，利用声机械转换而非光探测。[1,2] 这使该技术具有很强的灵活性，因为分子激发与检测相互分离：激发时可选择与最强基频吸收线共振的激光频率，而检测则完全不受波长影响。[3,4] 此外，由于只有在辐射与样品相互作用并随后生成压力波时才会检测到信号，因此该技术本质上是无背景的。这是实现动态范围远超其他直接吸收类技术的关键。近期一项成果充分体现了这一点：研究人员利用石英增强光声传感器实现了前所未有的 8 个数量级动态范围。[5]

对于声学检测，人们开发了多种不同的换能器，从传统麦克风[6,7] 和石英音叉（QTF）[8,9]（其电学读出颇具吸引力），到可依靠高灵敏度光学干涉读出的悬臂梁[10]。在我们近期的工作中，我们展示了定制悬臂梁与双管声学谐振器结合后，可在高阶谐振模式下运行，从而在标准单程[11] 运行中将检测灵敏度提升至低于十亿分之一（ppb）的最小检测限（MDL）。此外，我们还证明了可以根据具体实验要求，对悬臂梁的性能进行定制，包括形状、尺寸和质量等物理参数[12]。此外，由于光声信号与作用于分子样品的光功率成正比[13]，因此，将光声传感器与高精细度光学谐振腔耦合，还可以进一步提高最终的检测灵敏度[14]。已有研究报道了采用悬臂梁、麦克风或QTF的腔增强光声传感器，其MDL范围从10万亿分之一（ppt）[15] 下降至亚ppt水平[5,16,17]。

腔增强配置也是进入低气压范围的关键。事实上，光学谐振腔能够增强与目标分子谱线共振的信号，从而产生更强的声波。反过来，这可以补偿随着气压逐渐降低而导致的声信号损耗增加。因此，在压力与检测信号之间选择最佳折中方案，就能够进入 10^2 帕气压范围，从而观测分子饱和吸收。早期一项具有开创性的研究曾提出进入这一范围的可能性：研究人员使用高功率固定波长的一氧化碳$_2$ 激光器照射纯一氧化碳$_2$ 和甲醇$_3$气体样品，并借助笨重的光声装置记录了无多普勒分子谱线[18] 。尽管过去几十年间技术取得了显著进步，但这项工作至今未能产生后续影响。

在此，我们证明，通过采用定制的悬臂梁式腔增强光声装置，并选择合适的实验参数，使用低功率中红外量子级联激光器（QCL），即可在痕量气体样品中同时实现高灵敏度和亚多普勒分辨率。我们展示了无多普勒信号，其线宽窄至 6 兆赫，且总气压低至 60 帕。这一结果有效填补了光声技术与用于最严苛计量学和基础研究应用的最佳激光光谱技术之间最后一个重要空白，[19] 提升了高分辨率光谱学在分子指纹区的潜在影响力。此外，我们还利用该装置证明，仅改变气压，即可同时实现高达 5ppb 的灵敏度；测量对象为 N_2O（存在于 N_2 样品中），所用光功率低至 35 μV，对应的归一化噪声等效吸收系数为 $2.93\times10^{-11}\,\mathrm{cm^{-1}WHz^{-\frac{1}{2}}}$。这使我们的传感器能够使用低功耗、毫米尺寸激光器运行，同时仍保持大多数面向环境监测、人身安全和安保的应用所需的灵敏度。

2 实验装置

图1展示了我们的悬臂梁式光声传感器示意图。中红外连续波（CW）量子级联激光器（QCL）作为激发光源，照射一氧化二氮（N_2O）的一条强转振跃迁，其中心波长为4.567 μm，线强度为2.14×10^{-19} cm/molecule。激光器的所有参数，即偏置电流和工作温度（后者稳定在 20 °C），均由 ppqSense 提供的低噪声模块化控制器管理，使 QCL 能以自由运行亚兆赫兹线宽发射。光隔离器（ISO，COHERENT FM2 MID-IR 4.55 μm）可防止光学反馈，而声光调制器（AOM，ISOMET，M1208-G80-4）则用于调制光束。将 80 兆赫射频信号与指定频率f_0, 的数字调制（TTL）相结合后，AOM 会周期性偏转相互作用的激光束，从而在f_0处产生强度调制，并使填充有处于所需压力下样品气体的光声池内产生光声效应。

痕量气体非辐射弛豫产生的声波由一根长4 mm、高6 mm、厚10 μm的矩形硅基悬臂梁（图1中的C）收集，该悬臂梁作为灵敏换能器。[12] 悬臂梁与定制声学谐振器耦合，其几何结构经过优化，可在换能器的共振频率附近有效放大声波强度。有关悬臂梁和声学谐振器结构的更详细介绍，请参见补充信息章节。此外，一个长85 mm的法布里-

佩罗光学腔可放大用于产生光声效应的光功率。它由两面平凸镜（M1和M2）组成，曲率半径为125 mm，反射率为0.9984，使光腔精细度达到 ≃1960，光功率增强达到 ≃625 。结合声学和光学两种放大策略，可实现双共振构型。如图1插图所示，光学腔与声学谐振器同轴，悬臂梁安装在谐振器中点处的一个小孔上。通过这种方式，系统旨在使腔束腰、声波振幅与悬臂梁位移尽可能实现最佳重叠。这种特殊构型既能最大限度地减小光相互作用面积，又能最大限度地增加撞击悬臂梁自由端的声波波前。

在我们的装置中，通过使用 Pound-Drever-Hall（PDH）反馈回路将激光器锁定到一个腔模上，来稳定腔内光功率。[20] 腔反射光（图中以绿色表示）由四分之一波片（λ/4）和偏振分束器（PBS）引出。该

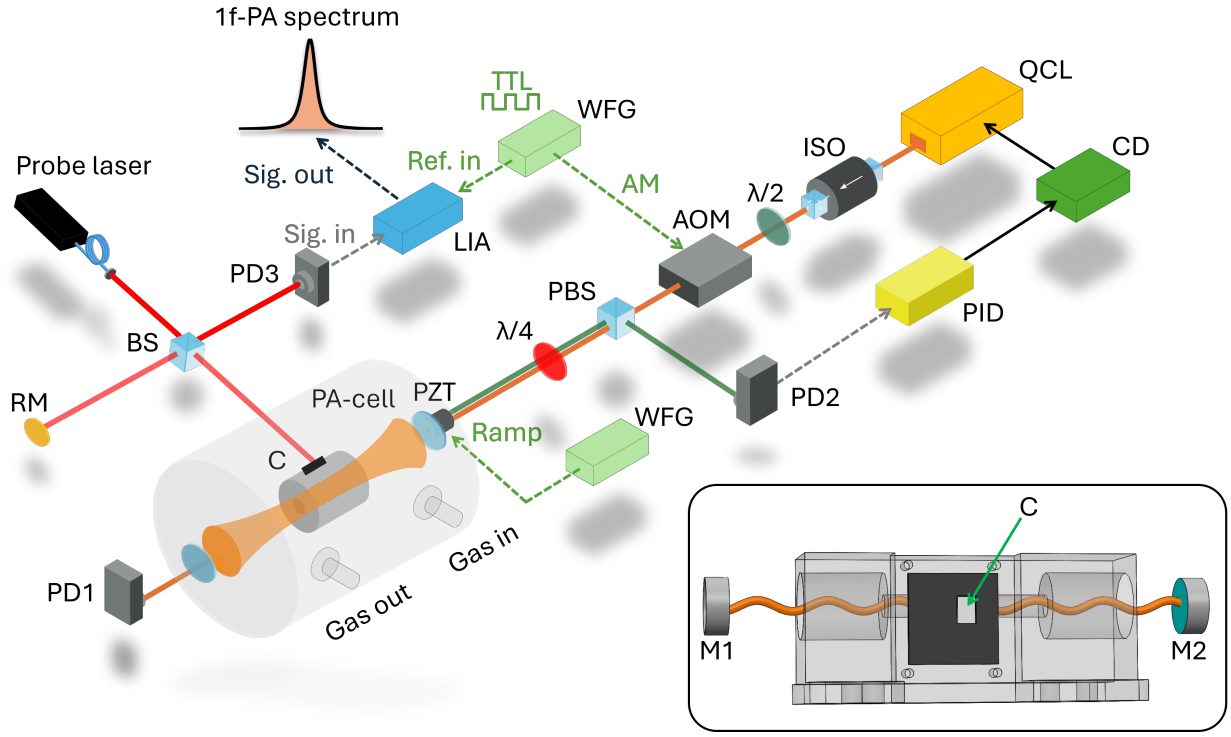


图1：实验装置示意图。CD：电流驱动器。QCL：量子级联激光器。 λ/2：半波片。AOM：声光调制器。PBS：偏振分束器。 λ/4：四分之一波片。PZT：压电致动器。C：硅基悬臂梁。PD1：腔透射光电探测器。PD2：腔反射光电探测器。PID：比例-积分-微分伺服控制器。BS：分束器。RM：参考镜。PD3：迈克耳孙干涉仪光电探测器。LIA：锁相放大器。WFG：波形发生器。1f-光声光谱：基频悬臂梁增强光声光谱。**插图**：所实现的双谐振结构三维示意图。定制声学谐振器可增强声波强度，而光学腔（由两块平凸镜M1和M2组成）可增强光功率。

信号由光电探测器 PD2（Vigo Systems，PVI-4TE-5-1x1-TO8）检测。激光载波与边带之间的拍频信号（边带由 4 兆赫本地振荡器产生）经混频器解调，以提取误差信号。误差信号经过 PID伺服控制器处理后，校正信号被发送至激光驱动器，使量子级联激光器保持与光学腔锁定。置于输出腔镜之后的光电探测器 PD1（Vigo Systems，PVI-4TE-5-1x1-TO8）仅用于对准。

通过迈克耳孙干涉读出，将悬臂梁的振荡进行光学转换，从而获取光声信号。[15,21] 氦氖探测激光器经由一个50/50分束器（BS）分成两条相同的光路：一束进入光声池并照射悬臂梁的自由端，另一束则射向参考镜。两束反射光在同一分束器处重新合并，随后送至光电探测器（PD3）。通过锁相放大器（LIA，MFLI，Zurich Instruments 500千赫兹/5兆赫）在悬臂梁的共振频率处对干涉输出进行解调，从而获取信号的同相基波R分量。通过向连接在输入腔镜上的压电陶瓷施加缓慢的斜坡信号（f = 2 毫赫兹），实现对吸收线的光谱扫描。所有分析均在高度稀释的N_2O:N_2 样品的静态条件下进行。

3 结果与讨论

3.1 悬臂梁的机械响应

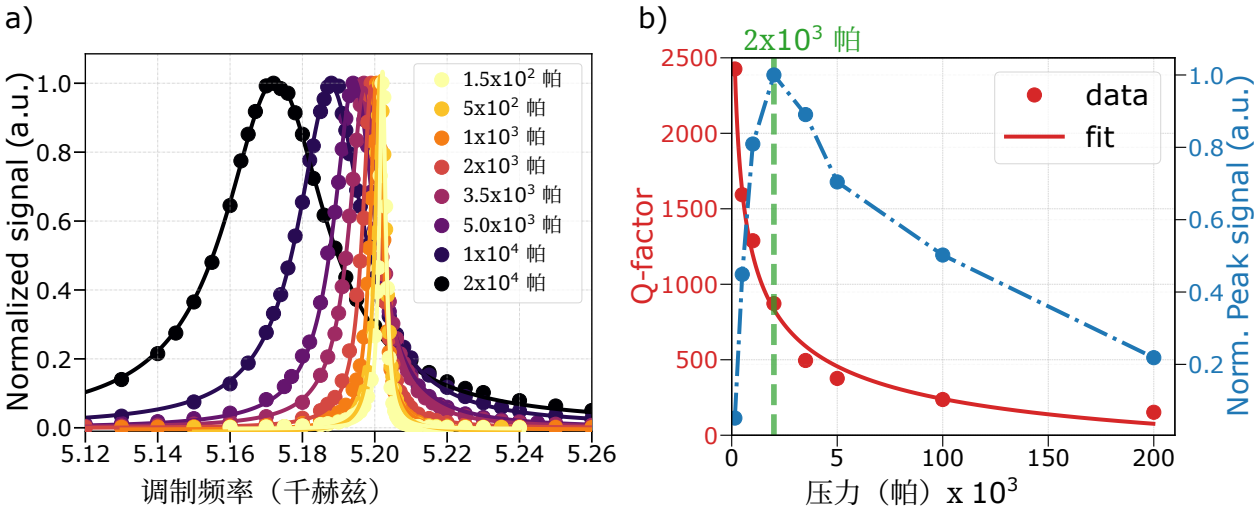


图 2：**(a)**：悬臂梁在不同工作压力（1.5×10^2 PA 至 2×10^4 Pa）下的归一化共振曲线光谱。实线表示对每组实验数据进行的洛伦兹型拟合。**(b)**：品质因数（红色数据点）和归一化峰值信号（蓝色数据点）随工作压力的变化。

作为首要的基础步骤，我们对声学换能器的机械特性进行了表征。从理论角度出发，采用有限元法（FEM）对悬臂梁进行特征频率分析，模拟其共振振荡频率以及相应共振模态的位移（即特征模态）。模拟过程的结果，

仅限于前八个模态，详见补充材料。本研究采用了第五个共振模态。该模态的估算频率为 5577.25 Hz，这一选择兼顾了较强的低频环境声学和机械噪声抗扰能力，以及高效的声波探测与转换。[12]通过对不同压力下的气体样品进行光声测量，研究了悬臂梁的机械特性，压力范围为 1.5×10^2 帕至 2×10^3 帕。对于每个工作压力，逐步采集光声信号的 R^2 分量，同时改变声光调制器调制频率。将该信号定义为共振曲线谱，并使用洛伦兹型峰函数进行拟合。提取中心频率（即悬臂梁的实验共振频率 f_0）和光谱半高全宽（Δf）作为拟合参数，并按 $Q = f_0/\Delta f$ 计算品质因数。

根据图 2**(a)**，随着压力升高，悬臂梁的共振曲线谱半高全宽增大，相关共振频率则降低。这一效应源于周围分子的黏性阻尼效应增强，导致相互作用的振荡体能量耗散增加。这两种现象共同作用，使机械品质因数随着压力升高而逐渐降低（图 2**(b)**中的红色数据点），其变化趋势通常与 $1/\sqrt{P}$[22,23] 成正比，如红色实线所示。众所周知，整体光声响应是两种不同机制共同作用的结果。一方面，悬臂梁的机械响应（即其品质因数）在样品气体压力较低时最佳；另一方面，要在气体样品中有效地产生并传播声波，则需要足够多的分子，因此需要较高的压力。这两种作用共同决定了整体光声响应。图 2**(b)** 中的蓝色数据点表示单程配置下测得的光声峰值信号幅度随压力的变化；测量时，N_2O 在 N_2 中的稀释浓度为 10 ppm。2×10^3 Pa 的最佳工作压力是在上述两种相互竞争的作用之间取得的平衡。低压下光声信号急剧下降，这清楚地说明了为何光声系统在低压范围内工作具有挑战性，因此通常不采用这种工作方式。

3.2 进入亚多普勒区

当光声系统与高精细度光腔结合时，腔内功率增强会显著提升光声信号，从而影响系统的整体响应。这不仅能够提高探测灵敏度，正如已有大量研究所展示的那样，[4,14,24–26] 还能够用于研究低压气体样品（1×10^2 帕或更低压力下），从而揭示非线性吸收效应。

图 3（**a**）和图 3（**b**）分别展示了单程配置和腔增强配置下，归一化光声峰值信号随激光入射功率变化的趋势。在单程配置下，当样品压力为 2×10^3 帕时，信号随功率线性增加，这与众所周知的特性一致。[6,13] 当光学腔发挥作用且工作压力降至 1.5×10^2 帕时，由于腔内功率增强较高导致一氧化碳吸收线出现饱和效应，测得的光声信号呈现非线性。

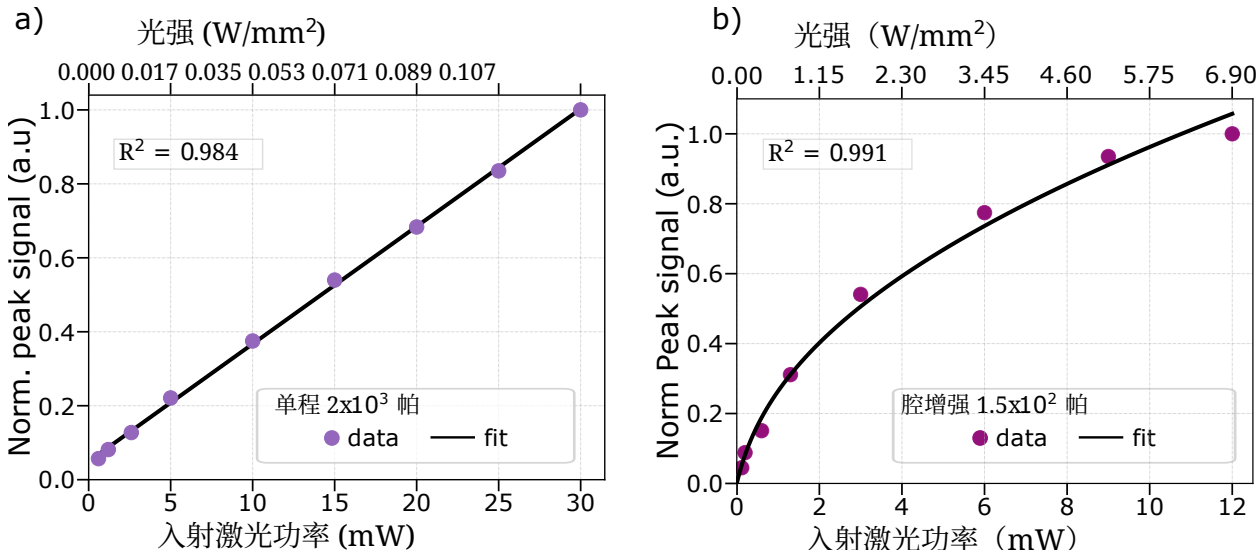


图 3：**(a)**：在最佳工作压力 2×10^3 帕下，单程配置中的归一化光声峰值信号随入射激光功率和光强的变化。**(b)**：在压力为 1.5×10^2 帕时，光腔增强配置中的归一化光声峰值信号与激光入射功率和光强的关系。

要定量分析饱和效应，首先必须考虑实验条件下的线展宽贡献。所研究的一氧化碳转振跃迁受到三种主要线展宽机制的影响。第一种是多普勒极限展宽，它取决于多普勒效应导致的入射辐射频移。其半高全宽展宽为 $\Delta_D = 2k_0\sqrt{^2k_BT\ \ln 2\ mc^2}$ ，其中，m 为分子质量（一氧化碳，44.01 g/mol），c 为光速，k_B 为玻尔兹曼常数，T 为温度。第二种与碰撞效应有关，可用压力相关系数 $\Delta_p = C_p p$ 描述，其中 C_p [兆赫 帕$^{-1}$] 为展宽系数（可从相应跃迁的 HITRAN数据库[27]中获取），p 为工作压力。第三种贡献来自渡越时间效应。[28] 其值为 $\Delta_t = v/4\pi R_c$，其中，$v = \sqrt{^8k_BT\ \pi m}$ 是温度为 T 时的分子平均速率，R_c=0.3毫米为光学腔中心处的束腰。在 1.5×10^2 帕下，结合我们的实验条件，这三种效应对应的半高全宽分别为 $\Delta_D \simeq$122.7兆赫、$\Delta_p \simeq$3.1 兆赫和 $\Delta_t \simeq$1.8兆赫。因此，在此压力范围内，多普勒效应导致的非均匀展宽占主导地位。在这种情况下，吸收信号 S(I) 表示为：

$$S(I) = \frac{S_0 I}{\sqrt{\left(1 + \frac{I}{I_s}\right)}}, \tag{1}$$

其中I 为光强，I_s 为所讨论跃迁对应的预期饱和强度，计算公式如下：

$$I_S = \frac{\hbar\omega_{LAS}}{2\pi c^2 A_E} \times (2\pi\Delta_p + 2\pi\Delta_t)^2. \tag{2}$$

这里， $\omega_{LAS} = 2\pi f_{LAS}$ 为激光角频率， $\bar{h}$ 为普朗克常数，A_E 为该跃迁的爱因斯坦系数。根据此实验工作条件下这些物理参数的取值，在 1.5×10^2 帕时，N_2O 转振跃迁的饱和强度$I_s \simeq 0.12\mathrm{W/mm^2}$。根据这一分析，图 3**(b)** 所示的实验数据采用公式1进行拟合。上方 x 轴表示腔内光强，是根据入射到光腔的激光功率换算得到的，换算公式如下：

$$I_{ic} = G_{ic} \times \frac{P_{in}}{\pi \times R_c^2}, \tag{3}$$

其中，R_c 为QCL-光腔耦合效率，表示QCL光束在光学腔中心处的束腰半径；G_{ic} 为实验工作条件下腔内增强因子。可以看出，拟合结果与实验数据吻合良好。

在低压下获得足够强的信号以进入饱和吸收区，是拓展基于光声的系统所面临的挑战性和非常规应用的基本条件，例如对痕量分子样品进行高分辨率光谱测量。这一假设的证据是实验中观察到吸收谱线上的兰姆凹陷。

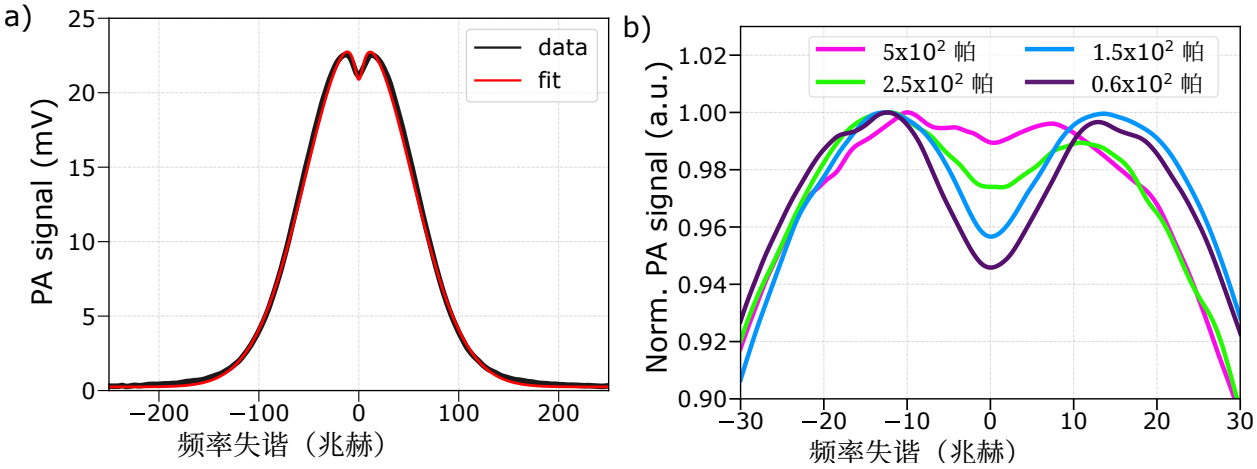


图4：**(a)**：在1.5×10^2 帕下，以0.7毫瓦的入射激光功率采集的1f-光声光谱。在此条件下，测得的兰姆凹陷对比度最高，达到13.03%。**(b)**：在固定入射激光功率为6毫瓦时，工作压力从 5×10^2 帕到0.6×10^2 帕的归一化1f-光声光谱。

图 4**(a)** 中的黑色曲线给出了从浓度为 200 ppm 的 N_2O/N_2，混合气体样品中获得的 1f-光声光谱，样品压力为 1.5×10^2 帕，入射激光功率为 0.7 mW。在谱线中心可以清晰地观察到兰姆凹陷。整体光谱采用叠加于多普勒展宽高斯线型上的洛伦兹型线形进行拟合。图 4**(a)**中的红色实线表示拟合结果，由此可得到 13.03% 的兰姆凹陷对比度，非常接近腔内泵浦-探测方案所能达到的最大值（即 13.3%[29]），以及等于 (6.2 ± 0.2) 兆赫的兰姆凹陷半高全宽。作为比较，预期的兰姆凹陷半高全宽为 $\Delta = \left(\sqrt{\Delta_p^2 + \Delta_t^2}\right)\sqrt{1+S} = 5.02$ 兆赫，其中考虑了压力展宽和渡越时间展宽（Δ_p和 Δ_t）以及功率展宽贡献（$\sqrt{1+S}$）。此处，$S = 0.95$ 是测量实验条件下的饱和参数。图 4**(b)** 给出了 1f-光声光谱

在固定 6 mW 入射功率和不同样品压力下获取的光谱。如预期，随着压力升高，兰姆凹陷对比度迅速降低，在5×10^2 帕时便已几乎不可见。

3.3 光声装置的高灵敏度性能

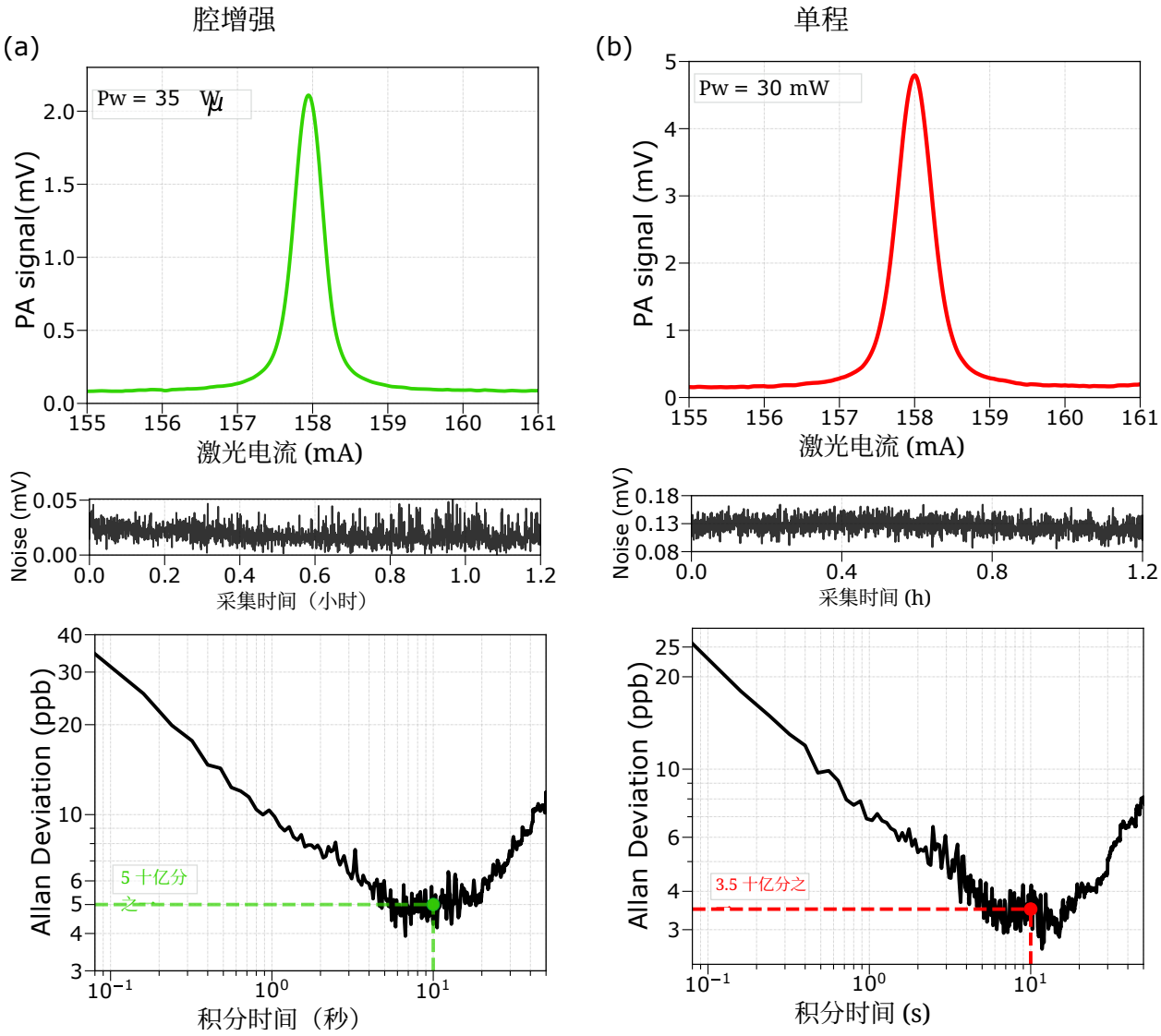


图 5：**(a)**：压力为 2×10^3 帕、入射激光功率为 35 μW 时，腔增强配置下的 1f-光声光谱（上图）、长期噪声轨迹（中图）和 Allan-Werle偏差分析（下图）。**(b)**：压力为 2×10^3 帕、入射激光功率为 30 mW 时，单程配置下的 1f-光声光谱（上图）、长期噪声轨迹（中图）和 Allan-Werle偏差分析（下图）。

为证明我们的传感器兼具 –分辨率和灵敏度–，我们在最佳压力条件下进行了光声痕量气体测量（即，2×10^3 帕）。我们以腔增强

配置运行装置，显著降低激光功率（35 μW），并在全激光功率（30 mW）下使用同一传感器，以标准单程配置重复测量，从而比较所达到的性能。图 5**(a)** 总结了腔增强配置下的结果，展示了一个 1f-光声光谱示例（上图）、长期噪声采集结果（中图）以及相应的 Allan-Werle偏差分析结果（下图）。使用光衰减器将入射到光腔上的光功率降至 35 μW。在此条件下，腔内功率强度远未达到饱和区。使用 10 ppm N_2O:N_2 样品记录了 1f-光声光谱。为避免目标分子与激发激光束发生任何残余相互作用，在腔室中充入纯 N_2（压力为 2×10^3 帕），以测量长期噪声。根据测量结果，得益于腔内功率增强，检测限达到 ppb 级（≃5十亿分之一），平均时间为 10 秒。如图 5**(b)**所示，为获得相近的灵敏度，标准单程光声传感器必须在全激光功率（30 mW）下运行。两次测量使用的痕量气体样品条件相同。

为定量评估光学腔带来的改进，我们根据发射功率对检测限进行了归一化，从而得到噪声等效吸收系数（NNEA）。单程配置下，NNEA 为 1.86×10^{-8} $cm^{-1}WHz^{-\frac{1}{2}}$；采用光学腔后，NNEA 可降至 2.93×10^{-11}，使灵敏度提高 ≃630，这与预期的腔内增强因子一致。

最后，表1将我们的结果与光谱范围相同（4.5–4.6 μm）内最先进的光声测量结果进行了比较，这些测量针对的是 N_2O。比较结果表明，我们的装置实现了 2.93×10^{-11} $cm^{-1}WHz^{-\frac{1}{2}}$的最佳归一化噪声等效吸收系数，尽管正如预期，最低检测限是在激光功率和压力高出数个数量级时观测到的。

表1：用于检测 N_2O 的先进基于光声的传感器。最后一行报告了本研究在腔增强配置下取得的结果。

波长 (μm)	压力（帕）	功率（毫瓦）	最小检测限和积分时间	NNEA ($cm^{-1}WHz^{-\frac{1}{2}}$)
4.56[30]	1×10^5	15	210秒时为0.25十亿分之一	1.50×10^{-8}
4.53[31]	1×10^5	17.5	600秒时为1十亿分之一	5.69×10^{-9}
4.52[32]	6×10^4	25	0.1秒时为7十亿分之一	5.40×10^{-9}
4.61[33]	1.33×10^4	987	1秒时为23十亿分之一	2.90×10^{-9}
4.56[11]	2×10^4	16	10秒时为0.34十亿分之一	1.3×10^{-9}
4.59[34]	4.9×10^4	19.5	10秒时为0.75十亿分之一	1.70×10^{-10}
4.56[15]	3×10^4	16	20秒时为17万亿分之一	5.98×10^{-11}
4.56[16]	6.66×10^4	65	200秒时为0.7万亿分之一	3.10×10^{-11}
4.56 [这工作]	$\mathbf{2}\times10^3$	**0.035**	**10秒时为5十亿分之一**	$\mathbf{2.93}\times\mathbf{10}^{-11}$

4 结论

本研究采用基于悬臂梁的光声光谱学装置，针对 N_2O 痕量气体样品，实现了兰姆凹陷分辨光谱学和极低功率运行下的高灵敏度检测。具体而言，我们证明，同时实现声学放大和光学腔增强，使光声传感器能够在低压下运行，压力低至 60 Pa，并首次得以研究痕量气体样品中的非线性现象。通过获得高信噪比光谱，我们证实，这种非常规的声波产生机制仍可与高效光声检测兼容。针对一个强的基态 N_2O 转振跃迁，我们观测到兰姆凹陷，其对比度高达 13%，与理论极限相符，展现出其在高分辨率痕量气体光谱学应用中的巨大潜力。此外，得益于腔增强配置，我们的传感器能够在 μW 功率水平下实现高灵敏度痕量气体检测。在最佳样品压力（即 2×10^3 Pa）下运行时，使用低至 35 μW 的入射光功率，以 10 秒积分时间实现了 5 ppb 的最低检测限，对应的归一化噪声等效吸收系数为 $2.93\times10^{-11}\,\mathrm{cm^{-1}WHz^{-\frac{1}{2}}}$。据我们所知，这是基于光声传感器检测 N_2O 所达到的最佳归一化噪声等效吸收系数。

因此，我们证明了，在同一套装置中，利用来自毫米级量子级联激光器、功率介于0.035至1 mW之间的红外激光器，可以快速将工作模式从高分辨率切换至高灵敏度。我们认为，这不仅是基于光声的传感器领域的突破性成果，也为分子中红外精密光谱学带来了突破。事实上，如果说亚多普勒分辨率填补了其与最佳激光光谱技术之间的最后一项差距，那么光声技术仍保留了其所有固有优势，即紧凑性、与波长无关的无背景探测、低功耗电池供电运行，以及实现光子集成的可能性。目前，由于缺乏质量相当的器件和探测器，最先进的光谱技术大多只能在可见光-近红外光谱区运行。然而，光声装置不依赖于对红外辐射的直接检测，因此能够更容易地探测分子的基频及最强吸收。此外，由于其零背景检测的特性，亚多普勒光声可以实现超宽动态范围检测；通过优化MEMS换能器和采用新型中红外技术，预计灵敏度和分辨率还将进一步提升。因此，这些成果为光声装置在最先进的分子传感应用中实现突破，并为在最具挑战性的实验中利用分子铺平了道路，例如那些以超冷样品为基础、用于基础物理和化学研究、计量学及量子技术的实验。

补充信息：声学换能器

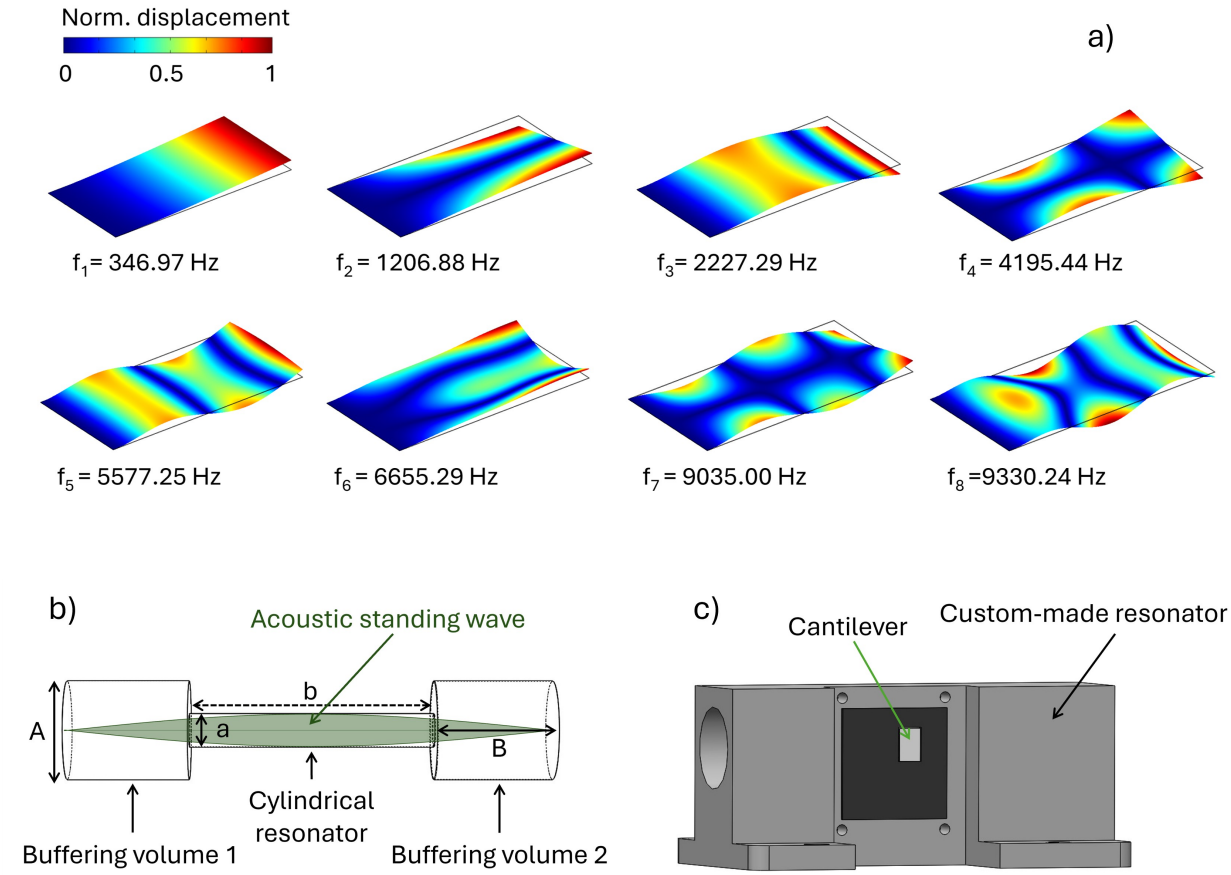


图 6：**(a)**：矩形悬臂梁前八种共振模态的模拟结果。对于每种模态，色彩图表示位移振幅分布。模拟结果给出了各模态的固有振荡频率。**(b)**：所开发声学谐振器的几何特征。**(b)**：安装在定制声学谐振器上的悬臂梁三维草图

图6**(a)** 展示了悬臂梁的特征频率分析结果，给出了前八个共振频率的预测值及相应模式的位移。正如论文正文中已经讨论的那样，悬臂梁工作在第五阶共振状态。正如文献中所熟知的，在适当的几何结构中限制传播声波，可以显著放大其强度。[35] 进一步增大光声信号振幅的一种策略，是将光学共振（由光腔诱导）与声学共振（通过采用声学谐振器实现）耦合起来，从而获得所谓的双共振构型。[5] 基于这些假设，研究人员设计并制造了一种定制的透射式声学谐振器，其几何结构经过理论优化，可与所用悬臂梁的窄带宽频率响应相匹配。

如图 6（**b**）所示，该装置由一个圆柱形谐振器和两侧的两个缓冲腔体组成。圆柱形谐振器的长度和内直径分别为$b = 37$ 毫米和$a = 5$毫米，而两侧缓冲腔体的长度为

B = 18.5毫米，直径为A = 15 毫米。理论上选择这些尺寸，是为了在 5 千赫兹频段实现最佳声学放大，使其与所选悬臂梁的共振相匹配。悬臂梁位于谐振器的中点，对应于所产生驻波（以绿色显示）的波腹位置。为在极小的体积内最大限度地增强悬臂梁与入射声波之间的相互作用，谐振器在与悬臂梁自由端相对应的位置开有一个小矩形孔径，如图 6（**c**）所示。

致谢 本研究部分得到了欧洲防务局（EDA）Cat-B 项目 Q-LAMPS（EDA 合同编号 B-PRJ-RT-989）的支持；获得了欧盟下一代欧盟计划 I-PHOQS 基础设施 [IR0000016、ID D2B8D520], 、欧洲激光实验室项目[G.A. n.871124], 以及 MUQUABIS 项目 [G.A. n.101 070546], 的支持；获得了欧盟 EDF 项目 ADEQUADE（ID 101103417）和 CASSATA（ID 101121447）的支持；获得了“国家自然科学基金委员会（NSFC）（62305279、52122003）”以及“香港中文大学科研直接资助”的支持；此外，还获得了由欧盟下一代欧盟（PNRR-MUR）PE0000023 - NQSTI（国家量子科学与技术研究所）资助的 QOSTRAD 项目（ID 59182/2024）的支持。

数据可用性声明 本研究的研究结果所依据的数据可根据合理请求向通讯作者索取。

利益冲突 作者声明不存在利益冲突。

参考文献

(1) Bell, A. G. 光电话。《科学》1880年，130–134。(2) Rosencwaig, A. 光声光谱。《生物物理学与生物工程年度评论》1980年，9，31–54。(3) Sun, J.; Liu, B.; Liu, L.; Huan, H.; Zhang, L.; Zhang, X.; Yang, J.; Shao, X. 基于光声光谱技术的多组分气体传感器：综述。《微波与光学技术快报》2024年，66，e34039。(4) Qiao, S.; He, Y.; Sun, H.; Patimisco, P.; Sampaolo, A.; Spagnolo, V.; Ma, Y. 利用长波长、高功率、宽调谐、单纵模固态激光器实现超高灵敏度双气体检测的光声光谱方法。《光：科学与应用》2024年，13，100。(5) Wang, Z.; Wang, Q.; Zhang, H.; Borri, S.; Galli, I.; Sampaolo, A.; Patimisco, P.; Spagnolo, V. L.; De Natale, P.; Ren, W. 采用双重共振实现具有八个数量级动态范围的亚 ppt 光声气体检测。《光声学》2022年，27，100387。(6) Haisch, C. 用于分析测量的光声光谱。《测量科学与技术》2011年，23，012001。

(7) Meng, Z.; Xiang, J.; Li, W.; Xia, L.; Guo, W.; Xia, M.; Yang, K. 基于微型化、可扩展多谐振器光声光谱的多组分气体测量方法。《分析化学》2025年，97，4158–4165。(8) Kosterev, A. A.; Bakhirkin, Y. A.; Curl, R. F.; Tittel, F. K. 石英增强光声光谱。《光学快报》2002年，27，1902–1904。(9) Wang, R.; Guan, X.; Qiao, S.; Jia, Q.; He, Y.; Wang, S.; Ma, Y. 基于涂覆三层超薄完美吸收体的T形头石英音叉的超高灵敏度激光诱导热弹光谱传感器。《激光与光子学评论》2025年，2402107。(10) Wilcken, K.; Kauppinen, J. 光声光谱麦克风的优化。《应用光谱学》2003年，57，1087–1092。(11) Russo, S. D.; Pelini, J.; Garcia, I. L.; Canino, M. C.; Roncaglia, A.; Pastor, P. C.; Galli, I.; De Natale, P.; Borri, S.; de Cumis, M. S. 用于亚 ppb 中红外光声气体检测的双管式微机电系统光谱麦克风。《光声学》2024年，100644。(12) Pelini, J.; Russo, S. D.; Garcia, I. L.; Canino, M. C.; Roncaglia, A.; Pastor, P. C.; Galli, I.; Ren, W.; De Natale, P.; Wang, Z.; 等。用于光声痕量气体检测的新型硅基微机电系统。《光声学》2024年，38，100619。(13) Patimisco, P.; Scamarcio, G.; Tittel, F. K.; Spagnolo, V. 石英增强光声光谱：综述。《传感器》2014年，14，6165–6206。(14) Borri, S.; Patimisco, P.; Galli, I.; Mazzotti, D.; Giusfredi, G.; Akikusa, N.; Yamanishi, M.; Scamarcio, G.; De Natale, P.; Spagnolo, V. 腔内石英增强光声传感器。《应用物理快报》2014年，104。(15) Pelini, J.; Russo, S. D.; Wang, Z.; Galli, I.; Pastor, P. C.; Garcia, I. L.; Canino, M. C.; Roncaglia, A.; Akikusa, N.; Ren, W.; 等。一种用于 ppt级痕量气体检测的腔增强微机电系统光声传感器。《传感器与执行器B辑：化学》2025年，137313。(16) Nie, Q.; Wang, Z.; Duan, K.; Hu, M.; Du, M.; Ren, W. 利用中红外双重共振光声光谱实现一氧化碳和一氧化二氮的亚 ppt 级检测。《光学快报》2024年，49，3648–3651。(17) Tomberg, T.; Hieta, T.; Vainio, M.; Halonen, L. 腔增强悬臂梁增强光声光谱。《分析家》2019年，144，2291–2296。(18) Di Lieto, A.; Minguzzi, P.; Tonelli, M. 亚多普勒光声光谱。《光学通讯》1979年，31，25–27。(19) Maddaloni, P.; Bellini, M.; De Natale, P. 基于激光的时域和频域应用测量：手册；泰勒-弗朗西斯出版社，2016年。(20) Black, E. D. Pound–Drever–Hall激光频率稳频简介。《美国物理学杂志》2001年，69，79–87。

(21) Siciliani de Cumis, M.; Borri, S.; Canino, M. C.; Cancio Pastor, P.; De Natale, P.; Lopez Gar- cia, I.; Roncaglia, A. 用于痕量气体检测的光声光谱传感器及痕量气体检测方法。2024年；WO2023126455A1。(22) Blom, F.; Bouwstra, S.; Elwenspoek, M.; Fluitman, J. 微加工硅梁谐振器的品质因数对压力和几何结构的依赖性。《真空科学与技术杂志*B*辑：微电子与纳米结构的加工、测量及现象》**1992年**，*10*，19–26。(23) Patimisco, P.; Sampaolo, A.; Dong, L.; Giglio, M.; Scamarcio, G.; Tittel, F.; Spagnolo, V. 用于光声气体传感的定制石英音叉电弹性性质分析。《传感器与执行器*B*辑：化学》**2016年**，*227*，539–546。(24) Patimisco, P.; Borri, S.; Galli, I.; Mazzotti, D.; Giusfredi, G.; Akikusa, N.; Yamanishi, M.; Scamarcio, G.; De Natale, P.; Spagnolo, V. 与石英增强光声光谱传感器耦合的高精细度光学腔。《分析家》**2015年**，*140*，736–743。(25) Nie, Q.; Wang, Z.; Borri, S.; Natale, P. D.; Ren, W. 使用石英音叉的中红外扫描腔增强光声光谱。《应用物理快报》**2023年**，*123*。(26) Zheng, K.; Luo, W.; Duan, L.; Zhao, S.; Jiang, S.; Bao, H.; Ho, H. L.; Zheng, C.; Zhang, Y.; Ye, W.; others 采用双锁定方案的高灵敏度、高稳定性腔增强光声光谱。《传感器与执行器*B*辑：化学》**2024年**，*415*，135984。(27) Rothman, L. S.; Gordon, I. E.; Babikov, Y.; Barbe, A.; Benner, D. C.; Bernath, P. F.; Birk, M.; Bizzocchi, L.; Boudon, V.; Brown, L. R.; others HITRAN2012分子光谱数据库。《定量光谱学与辐射传输杂志》**2013年**，*130*，4–50。(28) Gotti, R. 高精度和高灵敏度的光频梳辅助腔增强分子光谱。博士论文，米兰理工大学，2018年。(29) 非线性激光光谱学；施普林格，第4卷。(30) Yang, M.; Wang, Z.; Sun, H.; Hu, M.; Yeung, P. T.; Nie, Q.; Liu, S.; Akikusa, N.; Ren, W. 使用紧凑型蝶形封装量子级联激光器进行亚ppb级N_2O检测的高灵敏度QEPAS传感器。《应用物理*B*辑》**2024年**，*130*，6。(31) Cao, Y.; Wang, R.; Peng, J.; Liu, K.; Chen, W.; Wang, G.; Gao, X. 使用4.53 μm量子级联激光器和卡尔曼滤波器的湿度增强型N_2O光声传感器。《光声学》**2021年**，*24*，100303。(32) Zifarelli, A.; De Palo, R.; Patimisco, P.; Giglio, M.; Sampaolo, A.; Blaser, S.; Butet, J.; Landry, O.; Müller, A.; Spagnolo, V. 利用基于游标效应的量子级联激光器进行环境监测的多气体石英增强光声传感器。《光声学》**2022年**，*28*，100401。(33) Ma, Y.; Lewicki, R.; Razeghi, M.; Tittel, F. K. 使用高功率连续波分布反馈量子级联激光器，通过QEPAS实现一氧化碳和N 2 O的ppb级检测。《光学快报》**2013年**，*21*，1008–1019。

(34) Hayden, J.; Giglio, M.; Sampaolo, A.; Spagnolo, V.; Lendl, B. 使用T 形定制音叉实现具有pptv级灵敏度的中红外腔内石英增强光声光谱。《光声学》**2022年**，*25*，100330。

(35) Miklós, A.; Hess, P.; Bozóki, Z. 声学谐振器在光声痕量气体分析和计量学中的应用。《科学仪器评论》**2001**，*72*，1937–1955。