用于非线性近红外与近可见光子学的高Q氮化铝微谐振器

Yulei Ding, [1] Yuming Huang, [1] Zhongdong Yin, [1] Yifei Wang, [1] Kewei Liu, [1] Yanan Guo, [2,3] Liang Zhang, [2,3] Qi Zhang, [2,3] Jianchang Yan, [2,3] Junxi Wang, [2,3] Changxi Yang, [1] 和 Chengying Bao[1], *[1] *State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments, Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China*
[2] *College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*[3] *Research and Development Center for Wide Bandgap Semiconductors, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China*

arXiv:2601.02842v1 [physics.optics] 6 Jan 2026

微谐振器的高Q值对非线性集成光子学至关重要，因为许多非线性动力学过程与Q值呈二次甚至三次关系。氮化铝独特的材料特性使氮化铝微谐振器在微梳生成、拉曼激射和可见光集成光子学领域具有重要价值。然而，氮化铝的损耗水平仍逊于其他集成平台。通过优化制备工艺，我们实现了创纪录的氮化铝微谐振器Q值：近红外波段为 5.4×10^6 ，近可见光波段为 2.2×10^6 。我们利用偏振模式相互作用产生反常色散，以支持明亮的氮化铝狄拉克孤子。偏振相关光谱测量揭示了狄拉克孤子的偏振杂化。在具有正常色散的微谐振器中，我们观察到拉曼辅助四波混频（RFWM）触发平顶孤子形成，为生成正常色散微梳提供了新途径。我们采用宽度变化波导设计，确保跑道型微谐振器在 780 纳米处兼具高效耦合与高Q因子。通过泵浦该微谐振器，生成了波长为 820 纳米的近可见光拉曼激光器，其基频线宽窄于 220 Hz。本研究通过提升氮化铝微谐振器的Q值并揭示其非线性动力学，为集成氮化铝光子学开辟了新的机遇。

引言。 降低波导中的传输损耗是推动光子集成电路(PICs)发展的基础，因为它直接影响从传感、量子光子学到光学频率梳和低噪声激光器[1–6]等应用。CMOS 兼容的 Si_3N_4 波导损耗已降至 0.1 dB/m 以下，对应的微谐振器 Q 因子超过 10^8[6,7]。PICs 的成功离不开各种材料平台的贡献。例如，铌酸锂 (LN) 或钽酸锂 (LT) 可实现 PICs 中高效、快速的电光调制[8–10]。氮化铝 (AlN) 还可用于压电调制[11,12]。与非晶 Si_3N_4, 不同，晶体薄膜氮化铝具有强烈的非线性光子-声子相互作用，因此适用于片上受激拉曼和布里渊相关应用[13–16]。此外，AlN 具有超宽透明窗口，带隙高达 6.2 eV，在可见光和紫外光子学领域潜力巨大[12]。AlN 已用于实现紫外波段的高Q值微谐振器[17,18] 和超连续谱[19] 。宽带隙还意味着材料色散受吸收带的影响较小，因此更容易在短波长范围内设计波导色散。得益于这种灵活性，研究人员已在氮化铝微谐振器[20,21]中实现跨倍频程孤子微梳。借助这些跨倍频程微梳，AlN 的 $\chi^{(2)}$ 非线性可实现 f-2f自参考稳频[20]。AlN 的 $\chi^{(2)}$ 非线性程度适中，因此非常适合研究普克尔斯孤子，或由 $\chi^{(2)}$ 和 $\chi^{(3)}$ 非线性共同增强的微腔同时子，因为过强的 $\chi^{(2)}$ 非线性可能会阻碍其形成[22,23]。鉴于其潜在应用，过去十年来，研究人员一直致力于优化氮化铝微谐振器的制备[14, 20, 24–32]。然而，其最高 Q 因子仅达到 3.7×10^6 （损耗为 10 dB/m）[12,14], , 远低于 Si_3N_4 和 LN 平台。此外，氮化铝微谐振器中的非线性动力学尚未得到充分研究。这些因素阻碍了氮化铝非线性光子学的广泛应用。

在本研究中，我们报告了单晶氮化铝-on-蓝宝石微谐振器，其近红外（1550 纳米）Q值创纪录地达到 5.4×10^6 ，近可见光（780 纳米）达到 2.2×10^6 。高质量氮化铝薄膜沉积与系统性的制备优化提升了 Q 因子。据我们所知，我们首次在晶体微谐振器中泵浦产生了亮狄拉克孤子[33] 以及由拉曼辅助四波混频（RFWM）触发的暗脉冲（平台子）[34,35] 。尽管氮化铝波导的基模本身具有正常色散[15,36], , 但我们利用两个偏振空间模式之间的相互作用产生反常色散，从而支持亮孤子[1, 33, 37–40]。偏振相关光谱的测量揭示了所谓亮狄拉克孤子微梳的偏振杂化[33]。我们进一步在正常色散氮化铝微谐振器中观察到 RFWM 辅助的平台子生成。我们此前的工作 [35]，通过数值模拟预测了这种生成动力学，但尚未观测到。在近可见光波段，我们采用宽度渐变设计，实现了高 Q 微谐振器，并具有高效的

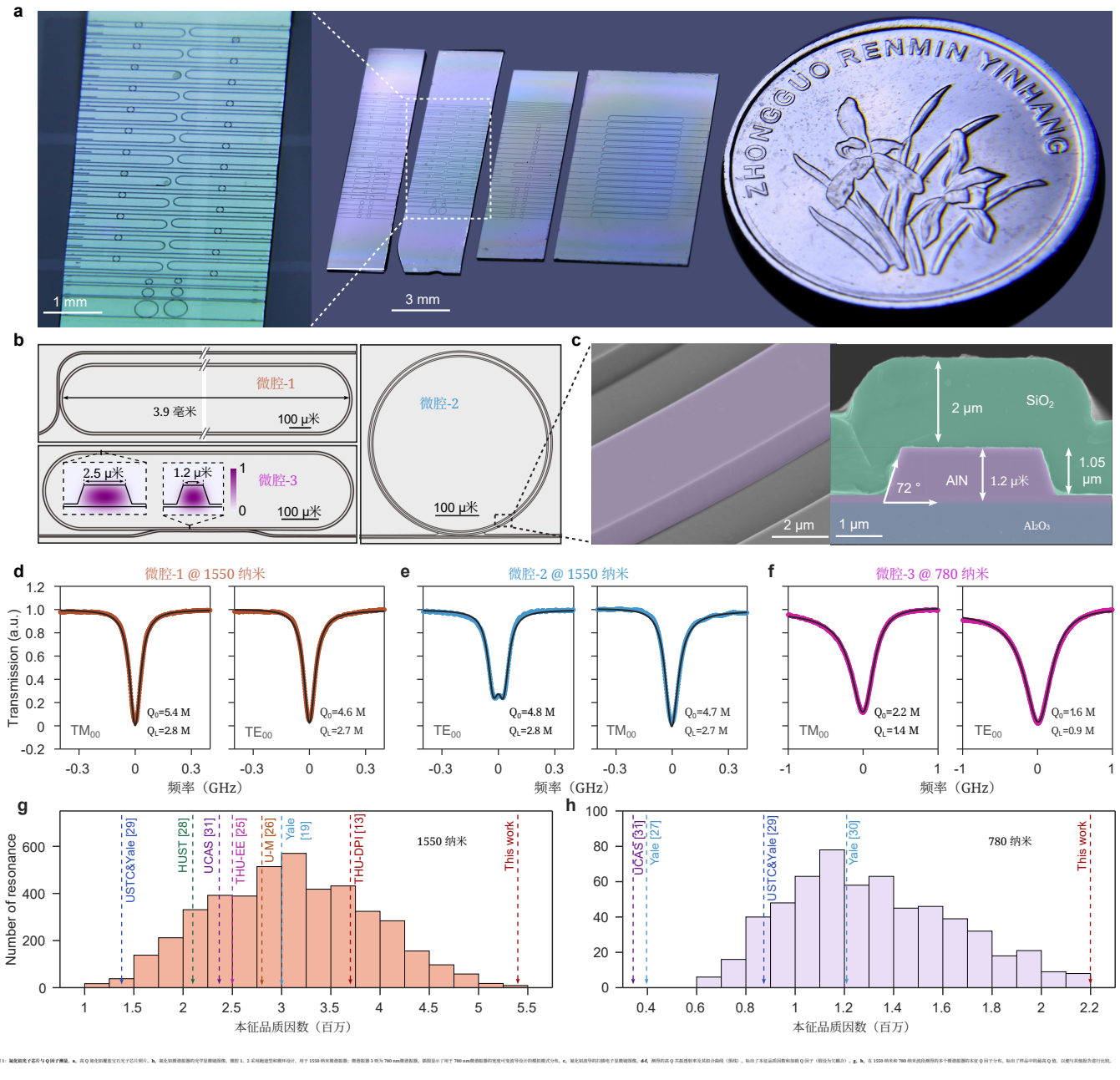

图 1：**氮化铝电子芯片与 Q 因子测量。** **a**，高 Q 氮化铝覆盖宝石光子芯片照片。**b**，氮化铝微谐振器的光学显微镜指南。微腔 1、2 采用跑道型和圆环设计，用于 1550 纳米微谐振器。微谐振器 3 则为 780 nm 微谐振器。插图显示了用于 780 nm 微谐振器的宽度可变波导设计的模拟模式分布。**c**，氮化铝波导的扫描电子显微镜指南。**d-f**，测得的高 Q 共振透射率及其拟合曲线（黑线）。标出了本征品质因数和加载 Q 因子（假设为欠耦合）。**g**，**h**，在 1550 纳米和 780 纳米波段测得的多个微谐振器的本征 Q 因子分布。标出了样品中的最高 Q 值，以便与其他报告进行比较。

耦合。高Q因子还使得在 780 纳米泵浦下，能够产生 820 纳米处基频线宽窄于 220 Hz 的低噪声受激拉曼激光器（半导体环形激光器）。据我们所知，这是继金刚石微腔受激拉曼激光器之后，集成微谐振器中的第二个近可见光受激拉曼激光器[41]，。我们的受激拉曼激光器具有片上近可见光受激拉曼激光器中最窄的基频线宽，这得益于高 Q 因子。低损耗氮化铝平台为光子集成电路带来了新的机遇，我们的实验也加深了对微梳动力学（包括狄拉克孤子和射频四波混频平台子动力学）的认识。

氮化铝芯片与 Q 因子测量。氮化铝微谐振器（图1a）采用高质量单晶氮化铝薄膜制成，该薄膜通过外延生长

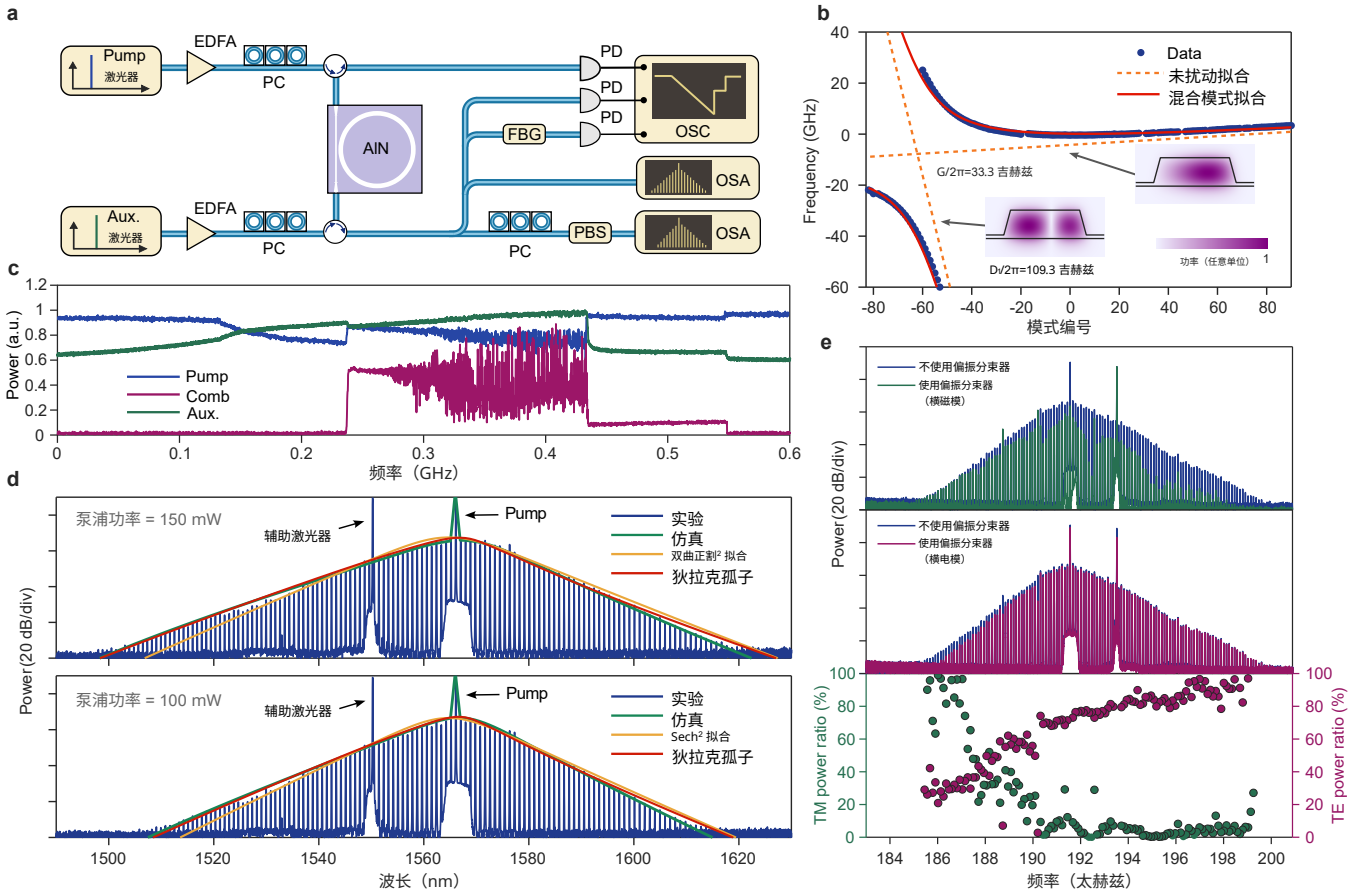

图 2： **高Q氮化铝微谐振器中的偏振混合狄拉克孤子微梳。 a,** 用于产生孤子和表征偏振态的实验装置。EDFA，掺铒光纤放大器；PC，偏振控制器；PBS，偏振分束器；FBG，光纤布拉格光栅；PD，光电探测器；OSA，光谱分析仪；OSC，示波器。**b,** 测量得到的混合模式频率（蓝点）及理论混合拟合。横电模$_{00}$ 和横磁模$_{10}$ 之间的相互作用产生反常色散（未受扰动的模式分布见插图）。**c,** 调谐泵浦激光器以触发孤子台阶时测得的透射泵浦功率、梳功率和辅助泵浦功率。**d,** 分别使用 150 mW 和 100 mW 泵浦功率测得和模拟的微梳光谱。该光谱偏离 Sech^2 拟合，但可以用狄拉克孤子理论拟合[33]。**e,** 调节偏振控制器，使偏振分束器之后的高频光谱部分最小化或最大化时测得的光学光谱。下方面板显示了整个光谱范围内的偏振成分。

在蓝宝石衬底上进行金属有机化学气相沉积（MOCVD）（表面粗糙度和X射线衍射测量见补充材料第 1 节）[42]。制备过程遵循我们此前工作[14,36]中确立的流程（方法）。

制备了微环和跑道型谐振器（图 1b）。例如，微腔-1（2）的自由光谱范围（FSR）为 17（113）吉赫兹，并通过宽度为 1.1（1.3） μm 的总线波导进行耦合，耦合间隙为 500（650）纳米。1550 纳米微腔的波导宽度均为 3。5 μm。样品中测得的最高本征品质因数为 5。4×10^6 （图 1d），对应于微腔-1中的横磁模$_{00}$ 。该微腔横电模$_{00}$ 的最高 Q 因子为 4。6×10^6。对于微腔-2，横电模$_{00}$ 和横磁模$_{00}$ 的最高 Q 因子为 4。8×10^6 和 4。7×10^6 （图1e），分别为。

考虑到近可见光波长下更强的模式限制，我们沿着跑道型谐振器改变了 780 nm微谐振器的波导宽度（图 1b）。在耦合区域，我们采用了相对较窄的 1.2μm 波导，以提高外部耦合率。线耦合区域的长度为 100 μm，微谐振器与耦合波导之间的间隙为 600 nm。在其余区域（约占微谐振器的 70%）采用了较宽的 2。5 μm 波导，以提高 Q 因子。类似的变宽度设计也应用于用于可见光光子学的碳$_3$化铝$_4$ 微谐振器[43]，，但 Q 因子未高于 0。4×10^5。对于 780 nm 氮化铝微谐振器，我们实现了最高 2。2×10^6的 Q 因子（图 1$_{00}$ f 中的横磁模）。对于横电模，最高 Q 因子为 1。6×10^6。

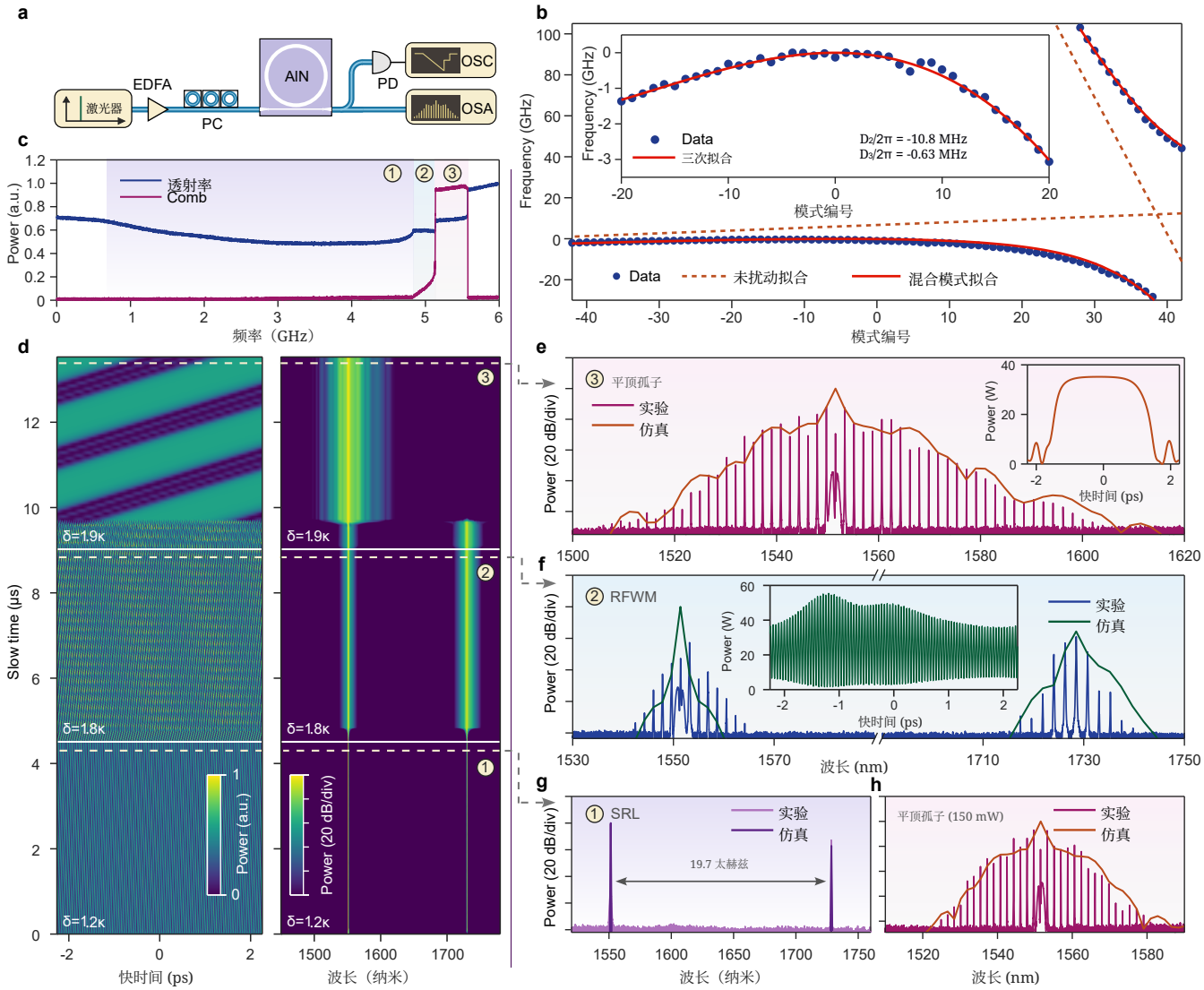

图 3：**正常色散氮化铝微谐振器中由拉曼辅助四波混频触发的平顶孤子微梳。a,** 平顶孤子微梳生成的实验装置。**b,** 受横电模 TE_{00} 与横磁模 TM_{10} 之间模式相互作用影响的测量值 D_{int}。插图显示了泵浦模附近的放大图，红色曲线为三次拟合。**c,** 扫描泵浦激光器经过共振时测得的透射功率和梳功率。**d,** 模拟的拉曼辅助四波混频平台孤子形成的时间和光谱演化，其中泵浦失谐先从 1.2κ 切换至 1.8κ，随后切换至 1.9κ（κ 为共振线宽）。**e-g,** 在不同失谐下测得的平台孤子、拉曼辅助四波混频和半导体环形激光器（SRL）态的光学光谱，分别对应于图 c、d 中标记的三种状态。模拟结果与测量结果一致，插图显示模拟得到的时间波形。**h,** 以较低泵浦功率 150 mW 生成的平顶孤子微梳测量结果。

我们对 8 个跑道型谐振器在 1530 至 1570 nm 范围内，以及对 4 个微环谐振器在 1510 至 1590 nm 范围内的本征 Q 因子进行了表征。图1g 展示了约 4400 个共振的 Q 因子测量值分布。最可能出现的 Q 因子也是广泛用于评估微腔的指标[44,45]，，对于我们的样品为 3。1×10^{6}。由于我们关注氮化铝平台可能达到的最低损耗，因此主要采用最高 Q 因子来评估样品。近可见光微谐振器的本征 Q 因子分布（测量值

4 个微谐振器在 765 纳米至 781 纳米范围内的情况绘于图 1h 中，最可能的 Q 因子为 1。1×10^{6}。

5。4×10^{6} 和 2。2×10^{6} Q值分别创下了氮化铝微谐振器在 1550 纳米波段和 780 纳米波段的纪录（其他高 Q 值报告见图 1g、h 中的标注）。未观察到 Q 因子与偏振及谐振器几何结构（跑道型或微环型）之间存在明显关联（补充材料第 2 节）。

氮化铝微谐振器中的混合偏振孤子。我们泵浦自由光谱范围为

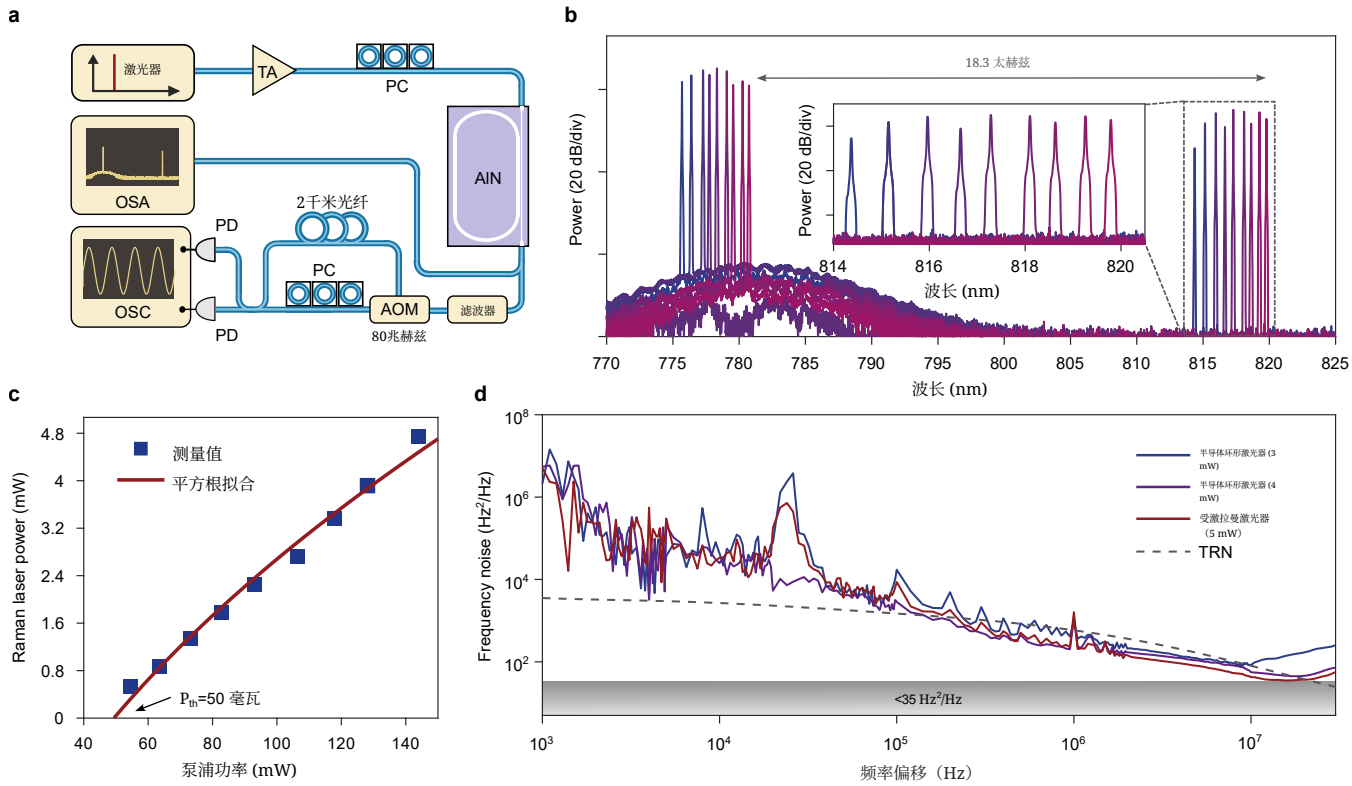

图4：**氮化铝微谐振器中的近可见光受激拉曼激光器。a,** 用于产生近可见光受激拉曼激光器并测量其频率噪声的实验装置。TA，锥形放大器。AOM，声光调制器。**b,** 使用不同泵浦波长时受激拉曼激光器的光学光谱。插图为受激拉曼激光器光谱的放大图。**c,** 测得的不同泵浦功率下芯片上受激拉曼激光器功率，呈现平方根标度关系，阈值为50 mW。**d,** 不同输出功率下受激拉曼激光器的频率噪声，其本底噪声低于35 Hz^2/Hz。

113 吉赫兹的微腔-2，以在电信波段产生亮孤子（图2a）。宽度为 3.$_{00}$ 米的氮化铝波导基横电模5 μ呈正常色散；在我们此前的工作中，我们泵浦反常色散横电模$_{10}$ 以产生亮孤子[36,46]。相反，在本工作中，我们泵浦混合后的基模来产生亮孤子。具体而言，我们利用横电模$_{00}$ 与横磁模$_{10}$ 之间的空间模式相互作用来实现反常色散[38]。类似方案已用于在二氧化硅[33,39] 和氮化硅$_{34}$ 平台中产生反常色散，以支持亮孤子[40]。事实上，耦合氮化硅$_{34}$ 微谐振器中不同模式之间的相互作用，也已用于产生反常色散以实现微梳生成[47,48]。据我们所知，我们首次在氮化铝平台中采用了这一方法。

微腔的色散可表示为$D_{\mathrm{int}}=\omega\left(\mu\right)-\omega\left(0\right)-\mu D_1$，其中 $\omega\left(\mu\right)$ 是模式μ 的谐振频率，$D_1/2\pi$ 是微腔的自由光谱范围。对泵浦混合模式的 $D_{\mathrm{int}}/2\pi$ 进行测量，方法是扫描可调谐激光器以绘制共振谱（图2b）。基于耦合模理论[38,49]，，我们拟合了测量得到的共振谱，并推导出两种模式之间的耦合速率为$G/2\pi$=33.3 吉赫兹（方法）。对于 $G/2\pi$ 而言，必须远大于两个相互作用模式之间的自由光谱范围差，才能产生宽带反常色散。拟合得到，这两个相互作用的横电模$_{00}$与横磁模$_{10}$ 之间的自由光谱范围差为 3.9 吉赫兹，满足这一要求。

采用双泵浦方案，以减轻氮化铝微谐振器中孤子产生期间的热不稳定性[36,50,51]（图2a）。其他技术，包括设计的快速泵浦激光扫描，也可用于稳定氮化铝微谐振器中的孤子[20,46,52]。将辅助泵浦适当设为1550.3 nm后，在1566.1 nm泵浦时可延长孤子台阶（图2c）。泵浦模的 Q 因子为3。5×10^6（补充材料第 2 节）。请注意，我们没有泵浦位于1572 nm、Q 因子为4的高 Q 模式 8×10^6，因为该波长超出了掺铒光纤放大器（EDFA）的增益带宽。我们以相对较低的芯片上泵浦功率150 mW或100 mW产生了孤子（图2d）。这也是氮化铝微梳的最低重复频率。事实上，高 Q 因子使氮化铝微梳的泵浦功率与自由光谱范围的乘积达到最低水平（见补充材料表1）。

模式相互作用诱导的色散相对较大，并且包含较大的高阶模式色散（拟合得到的二阶至四阶色散系数

为 β_2=−516 ps^2/km、 β_3=38.4ps^3/km 和 β_4=−1.74ps^4/km）。因此，生成的微梳相对较窄且不对称，偏离了传统的 sech^{2}形状，并且可以用狄拉克孤子光谱进行拟合（补充材料第3节）[33]。使用测量得到的色散，基于广义卢贾托-勒费弗方程（LLE）[1,36,53], 进行仿真时，仿真光谱与测量结果高度吻合（方法）。请注意，自由光谱范围小于拉曼增益带宽（114 吉赫兹），并且在泵浦其他模式时，观察到微梳生成过程中与拉曼增益的强烈相互作用（补充材料第4节）。通过适当设计耦合波导，提高拉曼增益带的外部耦合率，可用于减小拉曼效应对微梳生成的影响[54]。

为验证生成的微梳由偏振混杂模式支撑，我们在光谱分析仪前插入一个光纤偏振分束器（PBS），以测量偏振相关光谱。在实验中，我们调节偏振控制器（PC），使光谱高频部分（正模）的功率达到最大或最小（图2e）。这两种情况下，低频部分（负模式）的偏振成分有所不同，表明生成的孤子偏振态随光谱而变化。尽管高频部分的功率可以降至极低水平，但在这两种情况下，低频部分的功率都无法降至极低水平。这表明正模具有相对纯净的TE偏振，而负模式则存在显著的偏振混杂（见图2e底部面板中计算得到的偏振成分）。这与图2b中的测量谐振频率一致。按模式分辨的偏振测量进一步揭示了由混杂模式支撑的狄拉克孤子动力学。

氮化铝微谐振器中的平顶孤子微梳。除了亮孤子外，暗脉冲或平顶孤子微梳也很重要，因为它们能够提高输出梳功率，并实现具有大正常色散的可见光波长微梳生成[34,55]。近期已有研究在氮化铝微谐振器中实现了自注入锁定的平顶孤子微梳[15]；然而，据我们所知，传统泵浦的氮化铝平顶孤子微梳尚未得到演示。

这种传统的泵浦方案（图3a）可以实现更宽的梳状谱生成，但通常需要模式相互作用引起的局部色散扰动的辅助[34,56]。据预测，拉曼辅助四波混频可为平台子的形成提供另一条途径[35], ，但迄今尚未观测到。我们在一个样品中观测到了这种动力学，其本征品质因数为 2。4×10^6 （补充图 S3），自由光谱范围为 225.1 吉赫兹。该微腔的测量值 D_{int} 如图3b 所示。在该微腔中也观测到了横电模$_{00}$ 与横磁模$_{10}$ 之间的模式相互作用。然而，我们在 1551.5 nm 处进行泵浦（图3b 中的泵浦模0），该波长受到模式相互作用的影响较小。因此，微

该微腔中的梳状谱生成主要由平台孤子动力学决定。在 300 mW 的泵浦功率下，通过手动将泵浦调谐至共振处即可生成平台孤子，观测到的透射泵浦功率和梳状谱功率如图3c 所示。观测到三种工作状态。对这些状态进行了仿真，如图3d 所示。将泵浦调谐至共振处时，首先观测到半导体环形激光器（图3d、g）。进一步调谐至共振处后，通过拉曼辅助四波混频，在泵浦和半导体环形激光器附近产生了频率分量[35] （图3d、f）。随后，进一步增大泵浦波长，使该状态最终转变为平台孤子状态（图3d、e）。与此同时，拉曼频带中的梳齿消失。测量光谱与仿真结果基本吻合（图3e–g）。稳定的微梳呈不对称分布，短波长一侧的梳齿较少（图3e），这可能归因于模式相互作用导致正模具有更高的色散（图3b 插图）。除宽带模式相互作用外，仿真还表明，局部模式相互作用引起的共振频移（泵浦模0约为 0.13 GHz）也有助于平台孤子的形成（补充资料第 5 节）。在芯片上泵浦功率低至 150 mW 时，也能生成拉曼辅助四波混频平台孤子，但梳状谱带宽略窄（图3h）。

近可见光受激拉曼激光器。除了微梳，半导体环形激光器也是集成微谐振器的另一项重要应用。氮化铝较大的光学声子频率可以将激射频率移至难以实现的光谱区域。此外，高Q值谐振腔可借助受激拉曼激光器净化泵浦光，因为它能使肖洛-汤斯线宽变窄[14]。微谐振器半导体环形激光器通常在电信波段进行泵浦。据我们所知，片上近可见光受激拉曼激光器仅在金刚石微腔中得到演示[41], 。该研究未表征半导体环形激光器的频率噪声，但考虑到其相对较低的Q值（在 750 纳米处为 0.3×10^6 ）[41]，频率噪声可能相对较高。在此，我们通过以 780 纳米泵浦自由光谱范围为 80 吉赫兹的氮化铝微谐振器，在约 820 纳米处生成了低噪声半导体环形激光器。

在实验中，我们泵浦了$_{00}$ 微腔的TM模式以产生半导体环形激光器。TM模式的声子频率为18.3太赫兹，略低于TE模式的19.7 太赫兹[13,14]。通过泵浦微谐振器的多个模式，观察到了半导体环形激光器（图4b）。因此，半导体环形激光器的波长可以移动6纳米（图4b的插图），其范围受限于780 纳米半导体锥形放大器的带宽。测量结果显示，输出功率随泵浦功率增加；对输出功率进行平方根拟合后，得到阈值功率为50毫瓦（图4c）。

随后，我们使用延迟自外差技术测量了 820 纳米处半导体环形激光器的频率噪声[6,14] （图4a、d）。对于低于 100 kHz 的偏移频率，频率噪声可能会受到泵浦激光器的影响。在高于 100 kHz 时，考虑到较小的模式体积，半导体环形激光器的频率噪声受到热折射噪声（TRN）的限制，

积。图 4d 中的虚线表示模拟得到的热折射噪声[15,57]。实验中测得的最低频率噪声会随着半导体环形激光器功率的增加而降低（由于测量噪声底，在较高偏移频率处频率噪声会升高）。此外，5 mW 半导体环形激光器的基频线宽应窄于 220 Hz。这略大于 1750 nm 氮化铝半导体环形激光器[14,15]，，但据我们所知，这是近可见光波段片上半导体环形激光器中最窄的线宽。

讨论。总之，我们将氮化铝微谐振器的 Q 因子纪录提升至 5.4×10^6 （1550 纳米）和 2.2×10^6 （780 纳米）。我们的测量进一步表明，氮化铝平台的吸收限制品质因数（损耗）在 1550 纳米和 780 纳米处分别可达 8.0×10^6 （4.6 dB/m）和 3.0×10^6 （24.5 dB/m），详见补充材料第 6[7,58] 节。我们利用所展示的高 Q 氮化铝平台生成了狄拉克孤子、四波混频平顶微梳和低噪声近可见光半导体环形激光器。本研究揭示了模式相互作用和拉曼辅助四波混频如何拓展氮化铝平台的功能。我们还通过实验验证，拉曼辅助四波混频是形成平顶孤子微梳的可行途径。采用变宽设计的微谐振器为实现可见光氮化铝非线性光子学提供了前景广阔的途径。

高Q因子的氮化铝微梳可通过反向泵浦产生反向传播孤子，用于研究孤子相互作用物理并构建双梳传感系统[59–61]。反向泵浦的氮化铝微谐振器还可用于受激布里渊激光器和集成光学陀螺仪[62]。氮化铝的压电或电光响应可用于实现全单片激光器或微梳调制[11,12,31]。已展示的氮化铝微谐振器不适用于 $\chi^{(2)}$ 非线性光子学，因为其设计并未考虑相位匹配。可利用模间相位匹配，在氮化铝微谐振器中实现 $\chi^{(2)}$ 非线性光子学。高Q因子和相位匹配可实现纠缠光子对[63]，、压缩微梳[64]，以及基于微腔同时孤子的中红外微梳[22,23]的高效产生。观测到的动力学还可用于推动其他集成晶体平台中的非线性光子学应用，包括氮化镓、铌酸锂、钽酸锂和碳化硅。

方法

氮化铝微腔的制备。采用金属有机化学气相沉积，在 c 面蓝宝石衬底上外延生长单晶氮化铝薄膜，并以此制备氮化铝微谐振器。采用两步刻蚀工艺刻蚀氮化铝薄膜。首先，通过等离子体增强化学气相沉积（PECVD）在氮化铝薄膜上沉积一层厚度为 500 nm 的 Si_3N_4 硬掩模层。通过电子束光刻（EBL）定义器件图案。旋涂导电聚合物层，以有效抑制曝光期间的电荷积累。随后通过反应离子刻蚀（RIE）将图案转移到 Si_3N_4 硬掩模上。然后采用电感耦合等离子体（ICP）刻蚀氮化铝薄膜。去除硬掩模后，通过 PECVD 沉积一层厚度为 2 μm 的 SiO_2 包层。最后，将芯片在 1050 ℃ 下退火 2 小时。

杂化模式共振。根据耦合模理论[38]，，杂化微腔模式的共振可写为：

$$\omega_{\pm}(\mu)=\frac{\omega_1(\mu)+\omega_2(\mu)}{2}\pm\sqrt{G^2+\frac{[\omega_1(\mu)-\omega_2(\mu)]^2}{4}}, \quad (1)$$

其中，$\omega_{\pm}$（μ）表示两个杂化分支中模式-μ 的共振，G 为耦合速率，$\omega_{1(2)}$（μ）表示两个相互作用模式族的初始共振。

对于图 2b，两个相互作用模式为横电模$_{00}$ 和横磁模$_{10}$，拟合得到的耦合速率为 $G/2\pi$=33.3 吉赫兹。图 $G/2\pi$=433$_{00}$ b 中横电模$_{10}$ 和横磁模模式的耦合速率拟合值为 .0 吉赫兹。

数值模拟。我们使用广义 LLE 仿真微梳生成动力学。仿真模型写作：[36]，

$$\frac{\partial A}{\partial T}=\left(-\frac{\kappa}{2}-i\delta\omega-\frac{i\beta_2L}{2T_R}\frac{\partial^2}{\partial\tau^2}+\frac{\beta_3L}{6T_R}\frac{\partial^3}{\partial\tau^3}+\frac{i\beta_4L}{24T_R}\frac{\partial^4}{\partial\tau^4}\right)A$$
$$+i\frac{\gamma L}{T_R}|A|^2A+i\frac{\gamma_R L}{T_R}\left[A\int_{-\infty}^{\tau}h_R(\tau-\tau')|A|^2d\tau'\right]+\sqrt{\frac{\kappa_e P_{in}}{T_R}}, \quad (2)$$

其中，A 为腔内场的包络，T 为慢时间，L 为微腔长度，T_R 为往返时间；$\kappa=\kappa_0+\kappa_e$ 为总损耗率（κ_0 为本征损耗率，κ_e 为外部耦合损耗率），$\delta\omega$ 为泵浦-共振频率失谐，β_2、β_3、β_4 分别为群速度色散、三阶色散和四阶色散；γ 为克尔非线性系数，γ_R 为拉曼非线性系数，h_R 为拉曼响应函数。拉曼作用在频域中计算，采用以$-2\pi\times19.7$ 太赫兹为中心、带宽为 $2\pi\times114$ 吉赫兹的洛伦兹增益谱[36]。

图 2 的仿真参数包括 κ=$2\pi\times98$MHz、κ_e=$2\pi\times44$MHz、L=1.26 毫米、T_R=8.8 ps、β_2=-516ps^2/km、β_3=38.4 ps^3/km 和 β_4=-1.74 ps^4/km、γ=0.55 (Wm)$^{-1}$、γ_R=0.0035 (Wm)$^{-1}$；当泵浦功率分别为 150 mW 和 100 mW 时，$\delta\omega$ 取值为 3.65κ 和3κ 。对于图 3，所用仿真参数为κ=$2\pi\times145$ MHz、κ_e=$2\pi\times65$MHz、L=0.63 毫米、T_R=4.4 ps、β_2=240ps^2/km、β_3=10ps^3/km 和 β_4=0ps^4/km、γ=0.55 (Wm)$^{-1}$、γ_R=0.0035 (Wm)$^{-1}$；泵浦功率为 P_{in}=200 mW（图 3e）或 120 mW（图 3h）。所用泵浦功率略低于实验值，这可归因于仿真中未考虑背向散射和波长相关的 Q 因子（另见补充图 S3）。请注意，我们还在图 3 的仿真中纳入了泵浦模的模式相互作用引起的共振频移。我们在频域中通过每个往返加入相移 $\Delta\phi=-2\pi\Delta fT_R$来引入这一共振频移，其中 Δf 为设定的共振频移，取值为 0.13 GHz[56]。关于模式相互作用在拉曼辅助四波混频平台孤子生成中的作用，更多讨论见补充材料第 5 节。

数据可用性。支持本文图表及其他研究发现的数据均可获取。

代码可用性 支持本研究发现的代码可根据合理请求向通讯作者获取。

致谢。本研究得到国家

自然科学基金（62250071、62175127、62375150）、国家重点研发计划（2021YFB2801200、2023YFB3211200）以及清华-丰田联合研究基金的资助。

作者贡献。氮化铝微谐振器由 Y.D.、Y.H. 和 K.L. 制作。测量与分析工作由 Y.D. 主导，Y.H.、Z.Y.、Y.W. 和 C.Y. 协助完成。氮化铝薄膜由 Y.G.、J.Y.、L.Z.、Q.Z. 和 J.W. 沉积。该项目由 C.B. 负责监督。

利益冲突。 作者声明不存在利益冲突。

* cbao@tsinghua.edu.cn

[1] Kippenberg, T. J., Gaeta, A. L., Lipson, M. & Gorodetsky, M. L. 光学微谐振器中的耗散克尔孤子。*Science* **361**, eaan8083 (2018)。[2] Kues, M. *et al.* 量子光学微梳。 *Nature Photonics* **13** 170 179 2019 , – ( )。[3] Yang, Q.-F., Hu, Y., Torres-Company, V. & Vahala, K. 高效微谐振器频率梳。 *eLight* **4**, 18 (2024)。[4] Chen, W., Kaya ¨Ozdemir, S., Zhao, G., Wiersig, J. & Yang, L. 光学微腔中的异常点增强传感。 *Nature* **548**, 192–196 (2017)。[5] Ma, X. *et al.* 采用Pound-Drever-Hall探测的集成微腔电场传感器。 *Nature Communications* **15** 1386 2024 , ( )。[6] Jin, W. *et al.* 采用CMOS兼容超高Q值微谐振器的赫兹线宽半导体激光器。 *Nature Photonics* **15** 346 353 2021 , – ( )。[7] Puckett, M. W. *et al.* 422 具有亚兆赫兹线宽的百万本征品质因数平面集成全波导谐振器。 *Nature Communications* **12**, 934 (2021)。[8] Wang, C. *et al.* 工作电压与CMOS兼容的集成铌酸锂电光调制器。 *Nature* **562** 101 104 2018 , – ( )。[9] Boes, A. *et al.* 铌酸锂光子学：开启电磁波谱。 *Science* **379**, eabj4396 (2023)。[10] Wang, C. *et al.* 面向规模化制造的钽酸锂光子集成电路。 *Nature* **629**, 784–790 (2024)。[11] Tian, H. *et al.* 集成光子学的压电驱动。 *Advances in Optics and Photonics* **16**, 749–867 (2024)。[12] Liu, X., Bruch, A. W. & Tang, H. X. 氮化铝光子集成电路：从压电光机械学到非线性光学。 *Advances in Optics and Photonics* **15**, 236 317 2023– ( )。[13] Liu, X. *et al.* 集成连续波氮化铝拉曼激光器。 *Optica* **4**, 893–896 (2016)。[14] Liu, K. *et al.* 氮化铝微腔拉曼激光器的基频线宽。 *Opt. Lett.* **47**, 4295–4298 (2022)。[15] Ding, Y. *et al.* 氮化铝微谐振器中拉曼效应下的自注入锁定动力学。 *Phys. Rev.* , ( )。 *Lett.* **135** 093801 2025 [16] Liu, Q., Li, H. & Li, M. 集成光机械波导中的机电布里渊散射。 *Optica* **6**, 778 785 2019– ( )。[17] Liu, X. *et al.* 基于单晶氮化铝平台的超高Q值紫外微环谐振器。 *Optica* **5**, 1279–1282 (2018)。[18] Shin, W., Sun, Y., Soltani, M. & Mi, Z. 展示了集成微加热器的蓝宝石衬底上绿色和紫外波段高Q值氮化铝微环谐振器。*Appl. Phys. Lett.* **118** (2021)。[19] Liu, X. *et al.* 在非中心对称晶体波导中实现跨越超过 100 THz 的紫外频率梳。 *Nature Communications* **10**, 2971 (2019). [20] Liu, X. *et al.* 用于生成超倍频程孤子微梳及自参考的氮化铝纳米光子学。*Nature Communications* **12**, 5428 (2021). [21] Weng, H. *et al.* 在氮化铝微谐振器中直接获取跨倍频程耗散克尔孤子频率梳。*Photonics Research* **9**, 1351–1357 (2021). [22] Bruch, A. W. *et al.* 普克尔斯孤子微梳。 *Nature Photonics* **15** 21 27 2021 , – ( ). [23] Ding, Y., Wei, Z., Wang, Y., Yang, C. & Bao, C. 由 χ (2) 和 χ (3)非线性增强的微腔同时子的理论分析。 *Phys. Rev. Lett.* **132**, 013801 (2024). [24] Stegmaier, M. *et al.* 工作于紫外波长的氮化铝纳米光子电路。 *Appl. Phys.* ( ). *Lett.* **104** 2014 [25] Fan, L., Fong, K. Y., Poot, M. & Tang, H. X. 多模腔光机械系统中的级联光学透明性。 *Nature Communications* **6**, 5850 (2015). [26] Liu, X. *et al.* 用于集成高Q值微谐振器的蓝宝石基氮化铝平台。 *Opt. Express* **25**, 587–594 (2017). [27] Sun, Y. *et al.* 采用单晶蓝宝石基氮化铝平台的超高Q值微环谐振器。 *Opt. Lett.* **44**, 5679–5682 (2019). [28] Bruch, A. W., Liu, X., Surya, J. B., Zou, C.-L. & Tang, H. X. 片上 χ^(2)微环光学参量振荡器。 *Optica* **6**, 1361–1366 (2019). [29] Liu, J. *et al.* 光刻技术可制备用于近倍频程频率梳和谐波生成的高Q值氮化铝微谐振器。 *Opt. Express* **28**, 19270–19280 (2020). [30] Wang, J.-Q. *et al.* 简并 χ (2)微谐振器中的高效频率转换。 *Phys. Rev. Lett.* **126**, 133601 2021( ). [31] Xie, H. *et al.* 用于自注入锁定激光器高速电光调谐的氮化铝光子学。 *Opt.* , – *Lett.* **50** 5913 5916 2025 ( ). [32] Zhang, L., Guo, Y., Wang, J., Li, J. & Yan, J. 面向超宽带光子集成电路的蓝宝石上氮化硅与氮化铝三维异质集成。 *ACS Photonics* **12**, 2538–2547 (2025). [33] Wang, H. *et al.* 光学微谐振器中的狄拉克孤子。 *Light: Science & Applications* **9**, 205 (2020). [34] Xue, X. *et al.* 正常色散微谐振器中的锁模暗脉冲克尔频率梳。 *Nature Photonics* **9**, 594 600 2015– ( ). [35] Yao, S., Bao, C., Wang, P. & Yang, C. 通过拉曼辅助四波混频在微谐振器中生成稳定呼吸型平顶孤子。 *Phys. Rev. A* **101**, 023833 2020( ).

[36] Yao, S. *et al.* 蓝宝石上氮化铝克尔孤子的自频移。 *Opt. Lett.* **46**, 5312–5315 (2021). [37] Herr, T. *et al.* 光学微谐振器中的时间孤子。 *Nature Photonics* **8**, 145 (2014). [38] Haus, H. A. & Huang, W. 耦合模理论。 *Proceedings of the IEEE* **79** 1505 1518 2002 , – ( ). [39] Lee, S. H. *et al.* 迈向可见光孤子微梳生成。 *Nature Communications* **8**, 1295 (2017). [40] Karpov, M., Pfeiffer, M. H., Liu, J., Lukashchuk, A. & Kippenberg, T. J. 覆盖生物成像窗口的基于光子芯片的孤子频率梳。 *Nature Communications* **9** 1146 2018 , ( ). [41] Latawiec, P., Venkataraman, V., Shams-Ansari, A., Markham, M. & Lončar, M. 近可见光泵浦的集成金刚石拉曼激光器。 *Opt. Lett.* **43**, 318–321 (2018). [42] Yan, J. *et al.* 采用组分渐变 p型氮化铝镓的紫外发光二极管性能改进。 *Phys. Status Solidi C* **8**, 461–463 (2011). [43] Corato-Zanarella, M. *et al.* 从近紫外到近红外波长范围的宽调谐、窄线宽芯片级激光器。*Nature Photonics* **17**, 157–164 (2023). [44] Liu, J. *et al.* 高良率、晶圆级制备超低损耗、色散工程氮化硅光子电路。*Nature Communications* **12**, 2236 (2021). [45] Ye, Z., Twayana, K., Andrekson, P. A. & Torres-Company, V. 基于减材加工、用于克尔非线性光学的高Q值 Si_3N_4 微谐振器。*Opt. Express* **27**, 35719 35727 2019– ( ). [46] Liu, K. *et al.* 通过优化激光扫描抑制氮化铝孤子微梳生成中的快速热不稳定性。*Photonics Research* **11**, A10–A18 (2023). [47] Kim, S. *et al.* 薄氮化硅同心微谐振器中的色散工程与频率梳生成。 *Nature Communications* **8**, 372 (2017). [48] Yuan, Z. *et al.* 正常色散微谐振器中的多色孤子脉冲对。 *Nature Photonics* **17**, 977 983 2023– ( ). [49] Yang, Q.-F., Yi, X., Yang, K. Y. & Vahala, K. 微谐振器中由空间模相互作用引发的色散波及其主动调谐。 *Optica* **3**, 1132–1135 (2016). [50] Zhou, H. *et al.* 孤子突发与确定性耗散克尔孤子在辅助激光器辅助微腔中的产生。 *Light: Science & Applications* **8**, 50（2019）。[51] Zhang, S. *et al.* 利用辅助激光器，在更宽的可调范围内实现亚毫瓦级微谐振器孤子。 *Optica* **6** 206 212 2019 , – () 。 [52] Stone, J. R. *et al.* 克尔微谐振器频率梳中的热与非线性耗散孤子动力学。*Phys. Rev. Lett.* **121**, 063902（2018）。[53] Coen, S.、Randle, H. G.、Sylvestre, T. 与 Erkintalo, M. 使用广义平均场 Lugiato–Lefever 模型对倍频程跨度的克尔频率梳进行建模。 *Opt. Lett.* , – () 。 **38** 37 39 2013 [54] Song, Y.、Hu, Y.、Zhu, X.、Yang, K. 与 Lončar, M. 色散与耗散工程化铌酸锂微谐振器中的倍频程跨度克尔孤子频率梳。 *Light: Science & Applications* **13**, 225（2024）。[55] Xue, X.、Wang, P.-H.、Xuan, Y.、Qi, M. 与 Weiner, A. M. 高转换效率微谐振器克尔频率梳。 *Laser & Photonics Reviews* **11**, 1600276（2017）。 [56] Bao, C. *et al.* 在正常色散光学微谐振器中观测到呼吸暗脉冲。 *Phys. Rev. Lett.* , () 。 **121** 257401 2018 [57] Huang, G. *et al.* 氮化硅微谐振器中的热折射噪声。 *Phys. Rev. A* **99**, 061801（2019）。[58] Gao, M. *et al.* 探测集成光子材料的材料吸收与光学非线性。 *Nature Communications* **13** 3323 2022 , () 。 [59] Wang, Z. *et al.* 用于集成双微梳光谱学的节律性孤子相互作用。 *Phys. Rev. X* **15**, 011061（2025）。[60] Yang, Q.-F.、Yi, X.、Yang, K. Y. 与 Vahala, K. 微谐振器中的反向传播孤子。 *Nature Photonics* **11** 560 2017 , () 。 [61] Bao, C. *et al.* 微腔孤子的量子扩散。*Nature Physics* **17**, 462–466（2021）。[62] Lai, Y.-H. *et al.* 利用芯片级环形激光陀螺仪测量地球自转。 *Nature Photonics* **14**, 345–349（2020）。[63] Guo, X. *et al.* 纳米光子芯片上的参量下转换光子对光源。 *Light: Science & Applications* **6** 16249 16249 2017 , e –e () 。 [64] Yang, Z. *et al.* 芯片上的压缩量子微梳。 *Nature Communications* **12**, 4781（2021）。