arXiv:2611.30313v1 [physics.optics] 23 Nov 2026

多模铌酸锂微谐振器中的暗孤子和亮孤子

朱辉宗[1,†]、郭雨瑶[1,†]、程翔飞1、吴亦群1，以及陆娟娟[1,*]

[1]上海科技大学信息科学与技术学院，中国上海 *201210*
[†]朱辉宗和郭雨瑶对本研究的贡献相同。
lujj2@shanghaitech.edu.cn

摘要： 亮孤子和暗孤子需要不同的色散和激发条件，因此难以集成于同一个微腔中。通过空间模式工程，在固定输入偏振下，于多模绝缘体上钽酸锂（LTOI）微环中实现了波长寻址暗孤子和亮孤子微梳。高阶模式族通过与正常色散模式族的局部耦合辅助暗孤子激发，并凭借其反常色散，在光谱上分离的泵浦共振处独立支持亮孤子。该方案无需偏振切换或谐振器间调谐。这种双重作用将耦合辅助激发与独立孤子生成相结合，为多态相干光源提供了一种多模谐振器架构。

1. 引言

光学微谐振器中的耗散克尔孤子由色散、克尔非线性、外部驱动和腔内耗散之间的相互作用维持。这些系统为研究非线性波动力学和开发片上相干光源提供了平台 [1–3]。每种孤子态的时间结构和光功率分布决定了其对不同光子学应用的适用性。在反常群速度色散（群速度色散）条件下，亮孤子形成局域高强度脉冲，可用于光学频率合成、双梳光谱学和超快测距 [4–8]。在正常群速度色散条件下，暗孤子表现为连续波背景上的局域强度凹陷。其形成过程可用连接不同腔内稳态的切换波来描述 [9–12]。暗孤子微梳具有高占空比波形和更高的泵浦到梳状谱转换效率，有利于为相干通信和光子信号处理生成多波长载波 [13–15]。在单个微腔中集成这两种状态，可使一个光源提供不同的时间和光谱输出。这需要兼顾它们的

共享谐振器中的不同背景色散和激发条件。

此前的研究通过调控泵浦配置、耦合谐振器和偏振模式，实现了亮态和暗态微梳。双泵浦通过交叉相位调制产生暗亮孤子束缚态 [16]。电热调谐耦合谐振器利用莫尔加速效应重新配置色散，从而能够在亮态微梳、暗态微梳和布里渊激射之间进行选择 [17]。正交偏振模式族提供不同的色散通道，可在单个微腔中支持亮孤子和暗孤子的产生 [18]。这些方法通过腔模结构或泵浦配置改变非线性激发条件，但各自都需要相应的控制措施。对于紧凑型片上光源的集成而言，如何通过简单的驱动配置实现多模孤子态选择性，仍是一项挑战。

单个微腔中的横向模式族为配置不同的孤子激发通道提供了空间自由度，而这些通道可在固定的器件几何结构中实现。同一偏振类别中的模式具有不同的空间场分布，因此对波导几何结构的响应也不同。因此，横截面设计可以在共同的光谱范围内，使不同模式族分别呈现正常群速度色散和反常群速度色散 [19–21]。自由

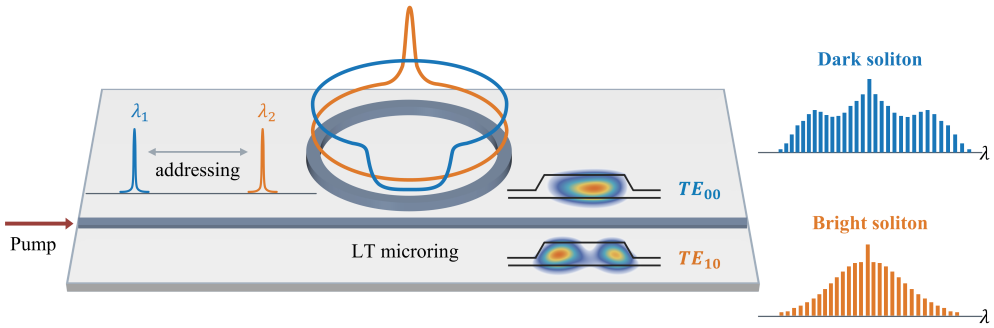


图1. $LiTaO_3$ 微环中的波长寻址暗孤子和亮孤子微梳。单个可调泵浦光可选择性地寻址 TE_{00}（蓝色）或 TE_{10}（橙色）模式族，分别对应 λ_1 或 λ_2，同时保持输入偏振不变。横截面轮廓显示了模拟得到的电场强度。腔内波形和输出光谱示意性地展示了正常色散和反常群速度色散模式族中的暗孤子和亮孤子运行。

光谱范围（FSR）的差异还会导致各模式族的相对谐振位置随光频率变化。当谐振在频率上相互接近且存在有效的模式族间耦合时，避免模式交叉（AMXs）会产生局部的共振频率偏移。在这些相互作用区域之外，两个模式族可以在光谱上保持分离 [19–21]。这类局部扰动已被用于辅助正常群速度色散条件下的微梳生成，包括暗孤子激发 [9, 22, 23]。参与局部耦合的高阶模式族也可以支持独立孤子生成，前提是其具备亮孤子形成所需的反常色散和足够低的损耗。这使其作用超越了辅助谐振控制，将横向多模腔转变为功能性的多模孤子谐振器。

绝缘体上钽酸锂（LTOI）推动了低损耗、高品质因数微谐振器和集成Kerr微梳的发展，为横向模式色散工程和非线性激发奠定了基础 [24–26]。反常群速度色散条件下的亮孤子生成，包括跨倍频程孤子微梳，进一步展现了该平台维持孤子形成和宽带非线性过程的能力 [26–28]。结合具有不同背景色散的横向模式族，可拓展可实现的孤子态，并使其能够在同一 LTOI 器件中进行选择。

在此，空间模式工程在单个 LTOI 微环中构建出具有正常群速度色散的 TE_{00} 和具有反常群速度色散的 TE_{10}类横向电（TE）模式族，从而在固定输入偏振下实现波长寻址的暗、亮孤子微梳 [图 1]。分辨模式的谐振和色散测量表明，高阶 TE_{10} 模式族参与了 TE_{00} 谐振序列中的局部扰动，并有助于暗孤子激发。在光谱上彼此分离的泵浦谐振处，同一模式族可独立支持亮孤子生成。只需选择相应的泵浦谐振，即可获得两种微梳，无需切换偏振或进行谐振器间调谐。据我们所知，本工作首次通过实验展示了集成LTOI微环中的暗孤子微梳，将该平台的孤子工作范围扩展至正常群速度色散区间。通过利用同一高阶模式族在不同光谱区域中的这两种作用，该设计在共享谐振器中结合了耦合辅助激发与独立孤子生成。因此，空间模式工程将内部模式结构与波长选择性非线性激发联系起来，为在多模光子器件中集成不同的非线性工作状态提供了物理依据。

2. 器件设计与谐振表征

微环横截面经过设计，可支持 TE_{00} 和 TE_{10} 横向模式族，其背景群速度色散分别为正常和反常。1560 nm处的数值色散图为几何结构选择提供了指导（补充材料1，第2节和图S1）。我们采用电子束光刻和基于 Ar^+的干法刻蚀，在z切 LTOI 上制备了部分刻蚀的微环 [26]（补充材料1，第1节）。本文研究的器件波导顶部宽度标称为 2.1 μm，半径为 80 μm [图2(a)]。$LiTaO_3$ 薄膜厚度为600 nm，残余薄板厚度为200 nm。

我们测量了表征光谱范围内的 75 个 TE_{00} 和 76 个 TE_{10} 谐振的本征线宽 [图 2(b)]。大多数 TE_{00} 谐振的本征线宽低于 300 MHz，而 TE_{10} 的分布更宽。在选用于频率梳生成的四个谐振处，TE_{00} 的本征品质因数为 (0.55–0.78) $\times 10^6$，TE_{10}的本征品质因数为 (0.62–1.22) $\times 10^6$ [图 2(c)]。因此，所选 TE_{10} 谐振的本征品质因数仍在10^6, 量级，从而能够直接泵浦高阶模式族以生成频率梳。

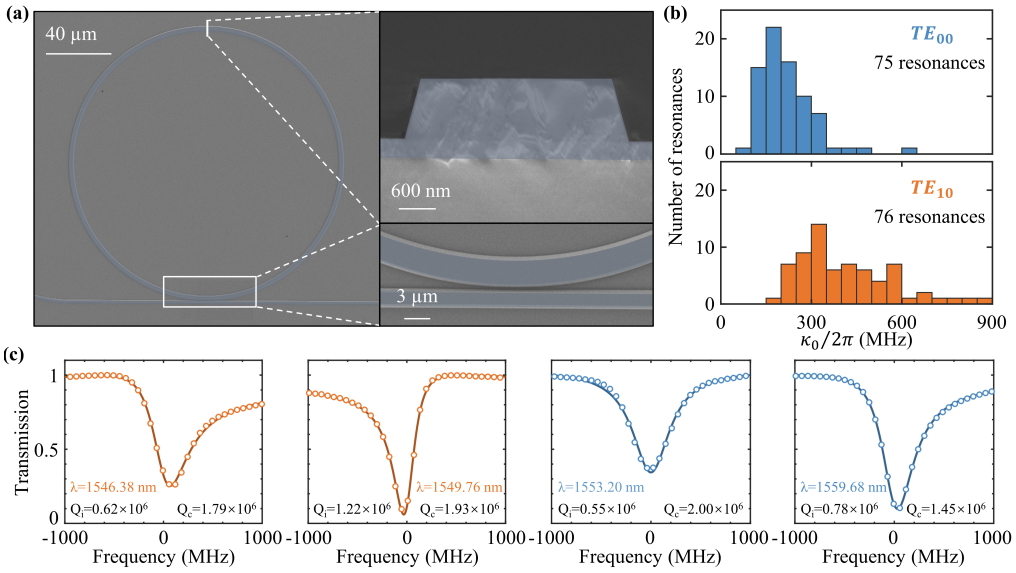


图 2. $LiTaO_3$ 微环的器件结构与谐振线宽。(a) 完整微环（左）、刻蚀波导横截面（右上）和耦合区域（右下）的扫描电子显微镜（SEM）图像。$LiTaO_3$ 波导区域以伪彩色突出显示。比例尺分别为 40 μm、600 nm 和 3 μm。(b) 75 个 TE_{00} 和 76 个 TE_{10} 谐振的本征线宽分布。另有 8 个 TE_{10} 谐振的本征线宽高于 900 MHz，未显示在图中范围内。(c) 用于频率梳生成的四个谐振的透射光谱。空心圆表示测量结果，实线表示拟合曲线。从左至右，谐振分别为波长 1546.38 和 1549.76 nm 处的 TE_{10}，以及波长 1553.20 和 1559.68 nm 处的 TE_{00}。它们的本征品质因数和耦合品质因数（Q_i，Q_c）分别为 (0.62，1.79) $\times 10^6$、(1.22，1.93) $\times 10^6$、(0.55，2.00) $\times 10^6$ 和 (0.78，1.45) $\times 10^6$。

3. 模式族分辨色散与局域相互作用

我们使用可调谐连续波激光器进行宽带透射光谱学，以分辨这两个模式族 [图 3(a)]。光纤马赫–曾德尔干涉仪（MZI）对 1480–1640 nm 范围内的频率轴进行了校准，从而能够追踪测量波段内的两组共振序列（补充材料1，图 S2）。使用洛伦兹线型拟合共振凹陷，以提取其中心频率。与模拟的自由光谱范围和积分色散趋势进行比较后，支持将蓝色和橙色序列分别归属为 TE_{00} 和 TE_{10}, 。测量和分析流程（包括候选模式比较）见补充材料1第 4 节和图 S3。

每个谐振序列均按相对模式数 μ 编序，该模式数随光频率增加，并在 1550 nm 附近指定 $\mu = 0$ 。谐振频率展开为

$$\omega_\mu = \omega_0 + D_1\mu + \frac{1}{2}D_2\mu^2 + \frac{1}{6}D_3\mu^3 + \cdots, \tag{1}$$

其中， $D_1/2\pi$ 是参考谐振 [方程（1）]处的一阶模式间隔系数。局域自由光谱范围和积分色散定义为

$$\mathrm{FSR}(\mu) = \frac{\omega_{\mu+1} - \omega_\mu}{2\pi}, \tag{2}$$

and

$$D_{\mathrm{int}}(\mu) = \omega_\mu - (\omega_0 + D_1\mu) = \sum_{n\geq 2}\frac{D_n}{n!}\mu^n. \tag{3}$$

关系式 $D_2 \simeq -(c/n_g)D_1^2\beta_2$ 将谐振器色散与波导群速度色散 [19]联系起来。因此， $D_2 < 0$ 和 $D_2 > 0$ 分别对应正常群速度色散和反常群速度色散。

TE_{00} 和 TE_{10}的平均自由光谱范围分别约为 265 GHz 和 258 GHz。在局域扰动区间之外，对积分色散背景进行多项式拟合得到$D_2/2\pi = -1.69$ MHz 和 $+14.53$ MHz，分别对应 [图 3(d)]。这些相反的符号表明，同一微环中存在正常群速度色散通道和反常群速度色散通道。背景拟合与残差分析见补充材料1第 4 节。

约 7.0 GHz 的自由光谱范围失配使两组共振序列在某些波长处彼此靠近，而在其他波长处分开。它预示着一个特征性的相遇间隔，为 $N_{\mathrm{enc}} \sim \mathrm{FSR}/|\Delta\mathrm{FSR}| \approx 37$ 个纵向阶数，即在 1550 nm 附近约为 79 nm。测得的相互作用区域——区域 I（1534.5–1539.5 nm）和区域 II（1613.5–1618.5 nm）——中心分别约为 1537 nm 和 1616 nm，与这一估算一致 [图 3(b)]。

在这些区域内，TE_{00} 和 TE_{10} 谐振彼此靠近，并交换其相对光谱顺序 [图 3(c)]。局域自由光谱范围和积分色散同时出现偏差，表明 TE_{10} 参与了对 TE_{00} 共振序列的局部扰动[图 3(d)；补充材料1，图 S3]。这些局部扰动为在正常群速度色散背景下实现模式相互作用辅助的暗孤子激发提供了一种机制 [9,22]。

在选定的四个泵浦谐振处，另一族中最近的谐振相距 31.6–72.9 GHz。这些间隔约相当于相应泵浦谐振的 75–192 个加载线宽（补充材料1，第 3 节）。因此，这两族在局部相互作用，同时在选定的泵浦谐振处保持光谱分离，从而为波长寻址激发奠定了基础。

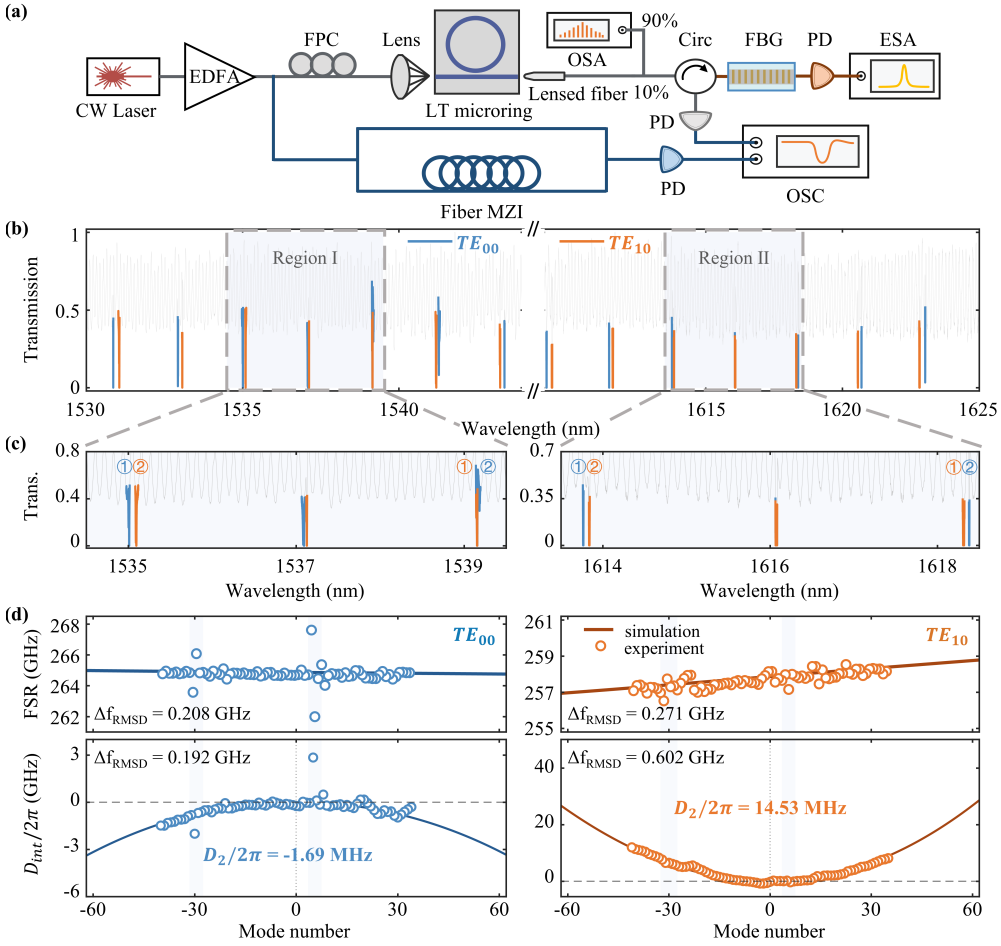


图 3. 模式族分辨光谱学、色散和局域相互作用。（a）用于色散表征和微梳生成的实验装置。公共泵浦/器件光路与光谱读出、抑制泵浦的射频检测以及器件透射/MZI参考同步采集相结合。CW，连续波；RF，射频；EDFA，掺铒光纤放大器；FPC，光纤偏振控制器；lens，自由空间聚焦透镜；OSA，光谱分析仪；Circ，光环行器；FBG，光纤布拉格光栅；PD，光电探测器；ESA，电频谱分析仪；MZI，马赫–曾德尔干涉仪；OSC，示波器。（b）校准透射光谱的两个窗口。灰色曲线表示测得的透射率；蓝色和橙色标记分别标出 TE_{00} 和 TE_{10} 共振序列。阴影标示区域I和II，坐标轴断裂处分隔不连续的波长区间。（c）阴影区域内的放大光谱。编号标签表示所分配的谐振及其相对光谱顺序的变化。（d）两个模式族的局域自由光谱范围和积分色散 $D_{int}/2\pi$。圆圈表示测量结果，实线曲线表示仿真结果。标注的均方根偏差（RMSD）量化了测量结果与仿真结果之间的差异，具体定义见补充材料1第4节和图S3。

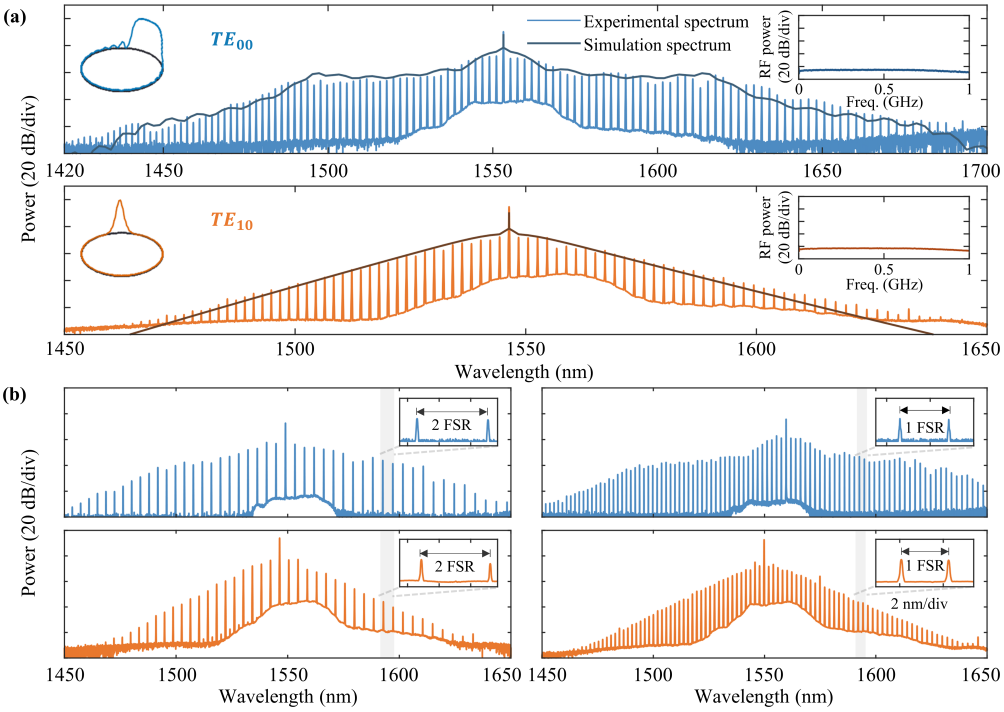


图 4. 固定输入偏振下波长寻址的暗孤子和亮孤子微梳。（a）泵浦 TE_{00}（1553.20 nm，上图）和 TE_{10}（1546.38 nm，下图）获得的实测光谱。较深色曲线显示相应的单模式族卢吉亚托–莱费弗方程（LLE）仿真结果。左侧插图以圆形表示法展示一个往返一周内仿真的腔内强度波形；右侧插图展示抑制泵浦后的基带射频功率谱。（b）在 TE_{00}（上图）和 TE_{10}（下图）泵浦下获得的其他微梳态，其间隔分别为相应模式族的两个自由光谱范围（左）和一个自由光谱范围（右）。插图解析了局部梳齿间隔。（a）和（b）中 1546.38 nm 处的 TE_{10} 光谱对应于同一谐振下不同的工作条件。

4. 波长寻址的暗孤子与亮孤子微梳

保持输入偏振不变，通过泵浦相应模式族的谐振，实现了两种微梳态 [图 4(a)]。泵浦频率从红失谐侧缓慢扫描至各自选定的腔谐振；生成和检测过程详见补充材料1第 5 节。泵浦 TE_{00}（1553.20 nm）产生了暗孤子微梳，而泵浦 TE_{10}（1546.38 nm）产生了亮孤子微梳。

分别采用受驱耗散单模式族 Lugiato– Lefever 方程（LLE） [1, 4, 29–31]模拟两种梳态。对于每个模式族，利用测得的 D_2 将背景色散近似为 $D_{\mathrm{int}}(\mu) = D_2\mu^2/2$，并单独表示局部谐振频移 [9, 32]。方程、归一化形式和数值参数见补充材料1第 6 节及表 S1。

TE_{00} 暗孤子微梳的波长范围约为 1420–1690 nm。采用实测的正常群速度色散和局域共振位移进行建模的单族卢吉亚托–莱费弗方程（LLE）仿真，重现了其宽带光谱包络。仿真得到的腔内

波形包含由切换前沿连接的高强度区和低强度区，在一个腔往返过程中形成暗孤子结构 [图 4(a)，左上角插图]。局域共振位移代表正常群速度色散通道中模式相互作用引入的扰动。

相比之下，TE_{10} 亮孤子微梳的跨度约为 1480–1620 nm，呈现平滑的 $sech^2$状包络。基于测得的反常群速度色散进行的相应 LLE 仿真再现了这一包络，并得到了具有局域强度峰值的亮脉冲波形 [图 4(a) 左下插图]。这一结果表明，除参与局部模式相互作用外，高阶 TE_{10} 模式族还可作为直接泵浦亮孤子通道。

抑制泵浦后，在 0–1 GHz 的测量基带射频（RF）功率谱中，两种微梳均未出现明显的噪声峰 [图 4(a) 右侧插图]。这些观察结果与其在测量频率范围内的低噪声运行相符。两种态的仿真形成动力学分别见补充材料1第 7 节和第 8 节。

两种模式族还支持具有不同梳齿间隔的微梳态，代表性光谱如图 4(b) 所示。在 TE_{00} 暗孤子和 TE_{10} 亮孤子通道中，均获得了间隔分别为相应模式族一个和两个自由光谱范围的梳。两种微梳均在多个泵浦谐振处生成，同时也能在同一谐振处获得不同的态。例如，图 4(a,b) 中的 TE_{10} 光谱是在不同工作条件下泵浦 1546.38 nm 处的谐振获得的。因此，双模式族架构支持波长寻址的暗、亮孤子生成，并且两个通道均可获得不同的梳齿间隔。

5. 结论

空间模式工程已在固定输入偏振下的多模LTOI微环中，实现了波长寻址暗孤子和亮孤子微梳。正常群速度色散TE_{00} 和反常群速度色散TE_{10} 模式族提供了不同的激发通道，可通过泵浦波长进行选择，无需偏振切换或谐振器间调谐。两个模式族均支持在多个泵浦谐振处具有不同梳齿间隔的微梳态。暗孤子演示将LTOI微梳的工作范围扩展到了正常群速度色散区间。

高阶TE_{10} 模式族参与局域TE_{00} 谐振扰动，从而辅助暗孤子激发，同时支持在光谱分离的泵浦谐振处独立亮孤子生成。这种双重作用将耦合辅助激发与同一模式族不同光谱区域中的独立孤子形成结合起来。横向模式色散与局域族间耦合的这种组合还可扩展至其他克尔平台，包括铌酸锂和氮化硅 [9, 12]。更广泛地说，这些结果连接了横向空间模式工程与非线性微谐振器中的功能性多模性。利用内部模式自由度，将耦合辅助和独立孤子区间统一起来，为紧凑型多模相干光源提供了一种可推广的策略。

资助。 本工作得到了中国国家重点研发计划（2024YFB2807400）、国家自然科学基金委员会（62305214、92576113）以及上海市科学技术委员会（25JD1405800）的资助。

致谢。 器件制造所使用的设施得到了上海科技大学材料器件实验室（SMDL）的支持。J. Lu 感谢中国上海交通大学光子与通信国家重点实验室的支持。

利益披露。 作者声明不存在利益冲突。

数据可用性。 本文所呈现结果的数据目前尚未公开，但可根据合理请求向作者获取。

补充文件。 支持内容请参见补充材料1。

参考文献。

1 T. J. Kippenberg、A. L. Gaeta、M. Lipson 和 M. L. Gorodetsky，“光学微谐振器中的耗散克尔孤子”，《科学》361，eaan8083（2018年）。2. S. A. Diddams、K. Vahala 和 T. Udem，“光学频率梳：相干连接电磁频谱”，《科学》369，eaay3676（2020年）。3. B. Shen、L. Chang、J. Liu 等，“集成式即插即用孤子微梳”，《自然》582，365–369（2020年）。4. T. Herr、V. Brasch、J. D. Jost 等，“光学微谐振器中的时间孤子”，《自然·光子学》8，145–152（2014年）。5. V. Brasch、M. Geiselmann、T. Herr 等，“利用孤子切伦科夫辐射的基于光子芯片的光学频率梳”，《科学》351，357–360（2016年）。6. D. T. Spencer、T. Drake、T. C. Briles 等，“利用集成光子学的光学频率合成器”，《自然》557，81–85（2018年）。7. M.-G. Suh、Q.-F. Yang、K. Y. Yang 等，“微谐振器孤子双梳光谱学”，《科学》354，600–603（2016年）。8. P. Trocha、M. Karpov、D. Ganin 等，“利用微谐振器孤子频率梳进行超快光学测距”，《科学》359，887–891（2018年）。9. X. Xue、Y. Xuan、Y. Liu 等，“正常色散微谐振器中的锁模暗脉冲克尔梳”，《自然·光子学》9，594–600（2015年）。10. P. Parra-Rivas、D. Gomila、E. Knobloch 等，“正常色散谐振器中暗脉冲克尔梳的起源与稳定性”，《Optics Letters》41，2402–2405（2016年）。11. S.-P. Yu、E. Lucas、J. Zang 和 S. B. Papp，“光子晶体谐振器中亮脉冲和暗脉冲态的连续谱”，《自然·通讯》13，3134（2022年）。12. X. Lv、B. Nie、C. Yang 等，“耗散工程铌酸锂$_3$微谐振器中的宽带微波重复频率暗脉冲微梳”，《自然·通讯》16，2389（2025年）。13. X. Xue、P.-H. Wang、Y. Xuan 等，“具有高转换效率的微谐振器克尔频率梳”，Laser & Photonics Rev. 11，1600276（2017年）。14. A. Fülöp、M. Mazur、A. Lorences-Riesgo 等，“利用微谐振器产生的锁模暗脉冲克尔梳实现高阶相干通信”，《自然·通讯》9，1598（2018年）。15. B. Bai、Q. Yang、H. Shu 等，“基于微梳的集成光子处理单元”，《自然·通讯》14，66（2023年）。16. S. Zhang、T. Bi、G. N. Ghalanos 等，“微谐振器中的暗亮孤子束缚态”，Phys. Rev. Lett. 128，033901 2022年（ ）。17. Q.-X. Ji、P. Liu、W. Jin 等，“利用莫尔加速效应实现多模态集成微谐振器”，《科学》383，1080–1083（2024年）。18. D. Xia、Z. Yang、P. Zeng 等，“用于微谐振器孤子梳的集成硫系光子学”，Laser & Photonics Rev. 17，2200219（2023年）。19. T. Herr、V. Brasch、J. D. Jost 等，“光学微谐振器中的模式谱与时间孤子形成”，Phys. Rev. Lett. 113，123901（2014年）。20. Q.-F. Yang、X. Yi、K. Y. Yang 和 K. Vahala，“空间模式相互作用诱导的色散波及其在微谐振器中的主动调谐”，Optica 3，1132–1135（2016年）。21. X. Yi、Q.-F. Yang、X. Zhang 等，“单模色散波与孤子微梳动力学”，《自然·通讯》8，14869（2017年）。22. Y. Liu、Y. Xuan、X. Xue 等，“正常色散氮化硅微谐振器中模式耦合对克尔频率梳产生的研究”，Optica 1，137–144（2014年）。23. Y. Song、Z. Li、X. Zhu 等，“正常色散X切铌酸锂微谐振器中的高效率宽带克尔梳产生”，Sci. Adv. 12，eaeb5758（2026年）。24. J. He、X. Zhao、J.-B. Xu 和 X. Sun，“Q因子超过一千万的钽酸锂微环腔”，Photonics Res. 13，1385–1389（2025年）。25. J. Cai、P.-Y. Wang、J. Li 等，“用于片上梳状频谱产生的高Q值集成钽酸锂微环谐振器”，《Optics Letters》49，5921–5924（2024年）。26. H. Zhu、S. Yu、J. Qian 等，“ z **12**, 切 4703 4708 2025 钽酸锂微环中的倍频程孤子微梳”，ACS Photonics –（ ）。27. C. Wang、Z. Li、J. Riemensberger 等，“面向规模化制造的钽酸锂光子集成电路”，《自然》629，784–790（2024年）。28. J. Cai、S. Wan、B. Chen 等，“通过热辅助光折变抑制在X切钽酸锂中实现稳定孤子微梳产生”，Photonics Res. 13，1955–1963（2025年）。29. L. A. Lugiato 和 R. Lefever，“被动光学系统中的空间耗散结构”，Phys. Rev. Lett. 58，2209 2211 1987年–（ ）。30. Y. K. Chembo 和 C. R. Menyuk，“回音壁模式谐振器中用于克尔梳产生的时空卢吉亚托–勒费弗形式”，Phys. Rev. A 87，053852（2013年）。

31. S. Coen, H. G. Randle, T. Sylvestre, and M. Erkintalo, 《使用广义平均场Lugiato–Lefever模型对跨倍频程克尔频率梳进行建模》, 《Optics Letters》**38**, 37–39（2013年）。32. V. E. Lobanov, G. Lihachev, T. J. Kippenberg, and M. L. Gorodetsky, 《正常群速度色散光学微谐振器中的频率梳和塑料锥》, 《Optics Express》**23**, 7713–7721（2015年）。