arXiv:2305.02590v1 [physics.optics] 4 May 2023

光折变辅助耗散克尔孤子的自发产生

Shuai Wan[1,2,5], Pi-Yu Wang[1,2,5], Rui Ma[3], Zheng-Yu Wang[1,2,5], Rui Niu[1,2,5], De-Yong He[1,2,5], Guang-Can Guo[1,2,5], Fang Bo[3*]、Junqiu Liu[4,5] 和 Chun-Hua Dong[1,2,5*]

[1] *CAS Key Laboratory of Quantum Information, University of Science and Technology of China,Hefei, Anhui 230026, People's Republic of China*

[2] *CAS Center For Excellence in Quantum Information and Quantum Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230088, People's Republic of China*

[3] *MOE Key Laboratory of Weak-Light Nonlinear Photonics, TEDA Applied Physics Institute and School of Physics,Nankai University, Tianjin 300457, People's Republic of China*[4] *International Quantum Academy, 518048 Shenzhen, China and*

[5] *Hefei National Laboratory, University of Science and Technology of China,Hefei, Anhui 230088, People's Republic of China**

在高Q光学微谐振器中产生的耗散克尔孤子微梳，是一种宽带光频梳，具有芯片级尺寸，重复频率处于微波至毫米波范围。对于光谱学、光学原子钟和频率合成器等频率计量应用，需要在色散优化的微谐振器中产生跨越一个倍频程的孤子微梳，以实现自参考，从而全面稳定频率。此外，现场部署应用要求这类孤子微梳的产生过程简单、确定且可重复。在此，我们展示了一种在集成铌酸锂微谐振器中产生自发形成孤子的新方案。该单孤子具有宽带光谱，并伴有双色散波，可实现 $2f$–$3f$ 自参考。通过利用铌酸锂的光折变效应，大幅扩展孤子存在范围，我们观察到单孤子自发且确定地形成。该孤子不受外部扰动影响，无需主动反馈控制即可连续运行超过13小时。最后，通过与预编程的DFB激光器集成，我们展示了即插即用的孤子产生。进一步改进微谐振器 Q 并与芯片级激光器混合集成后，可实现具有电子驱动功能的紧凑型孤子微梳器件，成为未来激光雷达、微波光子学和光通信的核心元件。

I. 引言

耗散克尔孤子（DKS）[1, 2] 是由连续波（CW）激光器驱动、在光学微谐振器中形成的自组织结构。它们通常被称为"孤子微梳" [3, 4], ，为实现小尺寸、轻重量、低功耗的宽带全相干芯片级频率梳提供了一条新途径。与商用光纤激光器频率梳不同，孤子微梳的重复频率处于微波至毫米波范围[5–8]。尤其是，随着基于多种兼容 CMOS 材料制造的超低损耗集成波导技术不断进步 [9–11], ，基于光子芯片的孤子微梳得以大批量、低成本制造。与集成光子学的融合使孤子微梳技术焕发活力，并加速了其在系统级应用中的广泛部署，包括电信 [12, 13], 天文光谱仪校准 [14, 15], 超快测距 [16, 17], 神经形态光子计算 [18, 19], 微波生成 [20, 21],双梳光谱学 [22, 23], 量子密钥分发 [24], 频率合成器 [25] 和光学原子钟 [26]。

对于频率计量应用而言，孤子微梳的自参考至关重要 [25, 26] [27–29]。这需要孤子的光谱带宽达到一个倍频程[7, 8, 30–33] ，以实现 $f-2f$ 或 $2f-3f$ 自参考。通常，在色散经过适当设计的微谐振器中可获得如此宽的带宽；双重色散波发射能够增强局部梳齿功率，并相干地拓展孤子光谱。色散波产生于与连续波泵浦相位匹配的频率位置。这些位置可经过精确设计，使其对应于自参考所需的频率分量。

此外，还需要一种简单的孤子生成方法，以适用于现场部署应用。通常，要进入孤子态，泵浦激光器需要从蓝失谐侧扫描穿过共振，并稳定在红失谐侧 [2]。然而，由于微谐振器的光吸收和热光效应，从混沌态突然跃迁到孤子态时功率会骤降，导致微谐振器迅速冷却并发生共振回弹，从而立即使孤子态消失 [8, 34]。人们开发了各种复杂的方法来管理热效应，例如功率踢升 [34, 35], 、单边带抑制载波频移器 [36], 、双激光器泵浦 [37, 38]和泵浦调制 [39, 40]。最近的一项突破表明，利用激光器自注入锁定 [20, 41, 42], ，可以确定性地生成孤子——

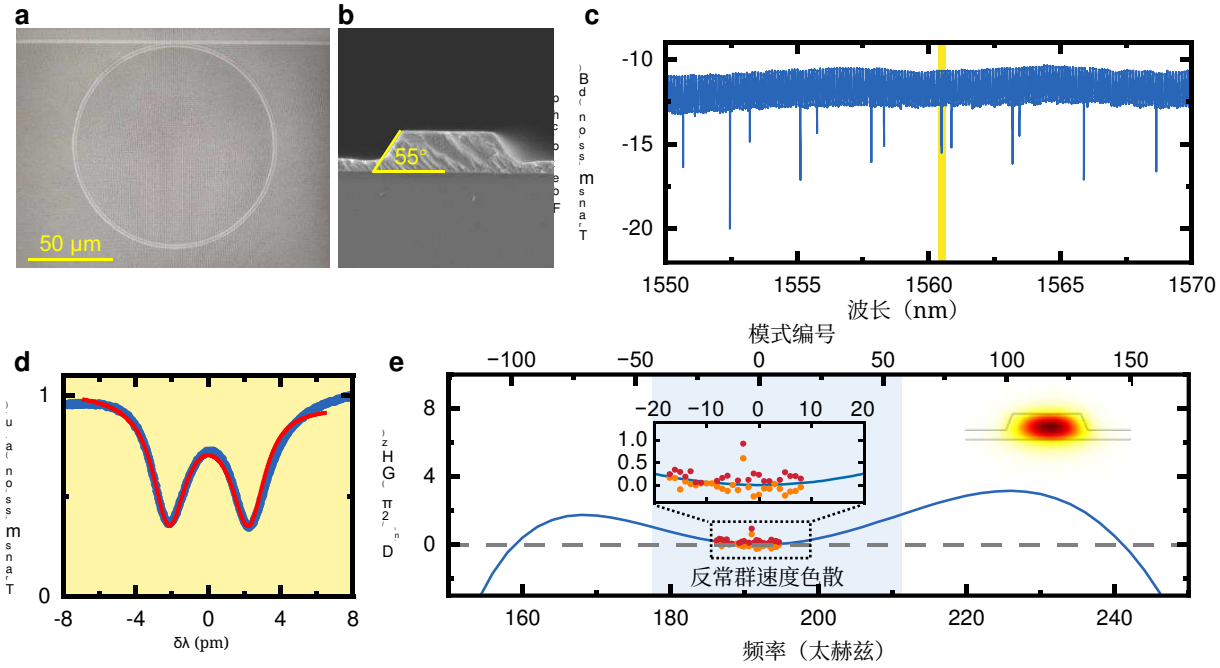

图1。a. 器件的扫描电子显微镜（SEM）图像。空气包层铌酸锂微环谐振器的半径为 60 μm。b. 波导横截面的 SEM 图像，显示其侧壁角为 55°。c. 微环中 TE 偏振的典型透射光谱。d. c 中一个发生模式分裂的 TE_{00} 共振。根据拟合结果（红色曲线），其线宽为 260 MHz，对应的加载 $Q = 7.38 \times 10^5$。e. 基于器件实际尺寸，通过数值模拟获得的集成微谐振器色散曲线。红色（橙色）点表示分裂模式中较高（较低）频率的实验结果。

通过简单的“交钥匙”操作 [43]。在此模式下，通过简单的激光器上电即可按需生成孤子，并且无需任何主动反馈控制即可维持数小时。然而，这种方法仍面临一个挑战。模拟和实验研究[44, 45] 表明，非线性激光自注入锁定限制了可实现的最大孤子失谐值。因此，单孤子，尤其是跨倍频程的单孤子，无法实现。

在此，我们克服了上述挑战，展示了一种在集成铌酸锂（$LiNbO_3$）光学微谐振器中自发产生、具有双重色散辐射的宽带孤子。我们利用 $LiNbO_3$ [46–48] – 的光折变效应——该效应通常被认为是负面效应 [49] –，显著扩展了孤子存在范围。因此，我们成功展示了自发且具有确定性的单孤子形成。

II. 器件设计与孤子产生

我们的集成微谐振器采用 Z 切、厚度为 580 nm 的铌酸锂薄膜绝缘体上晶圆（NANOLN）制备。在为孤子微梳 [11], 开发的众多集成材料平台中，铌酸锂$_3$ [50, 51] 具有特别突出的优势，因为它同时具备克尔非线性和 χ^2 非线性。克尔非线性使铌酸锂$_3$ 能够产生孤子微梳 [52, 53],，而 χ^2 非线性则使铌酸锂$_3$ 成为实现电光调制[54, 55]的理想材料。这种独特的组合使铌酸锂$_3$ 成为在单片衬底上快速调谐和调制孤子微梳的理想材料 [56, 57]。

器件的扫描电子显微镜（SEM）图像如图 1a 所示。空气包覆的 LN 微环谐振器半径为 60 μm，对应的自由光谱范围为 334 吉赫兹。如图 1b 所示，微环谐振器的横截面呈梯形，顶部宽度为 1。45 μm，刻蚀深度为 360 nm，侧壁角为 55°，留下厚度为 220 nm 的 $LiNbO_3$ 薄膜。制造工艺的详细信息见方法部分。TE 模式的透射光谱如图1c 所示，其中可以观察到基态 TE_{00} 模式和高阶 TE_{10} 模式。在 1560.6 nm 处的一个 TE_{00} 共振如图 1d 所示。该共振呈现模式分裂轮廓，通常由谐振器的粗糙度引起。采用双峰模型对共振进行拟合（红色曲线） [58], , 显示线宽为 260 MHz，对应的加载 $Q = 7.38 \times 10^5$。

孤子形成必须具备反常微腔色散 [2]。基于器件的实际几何结构进行数值模拟，得到的集成微腔色散 D_{int} 如图1e所示。两个

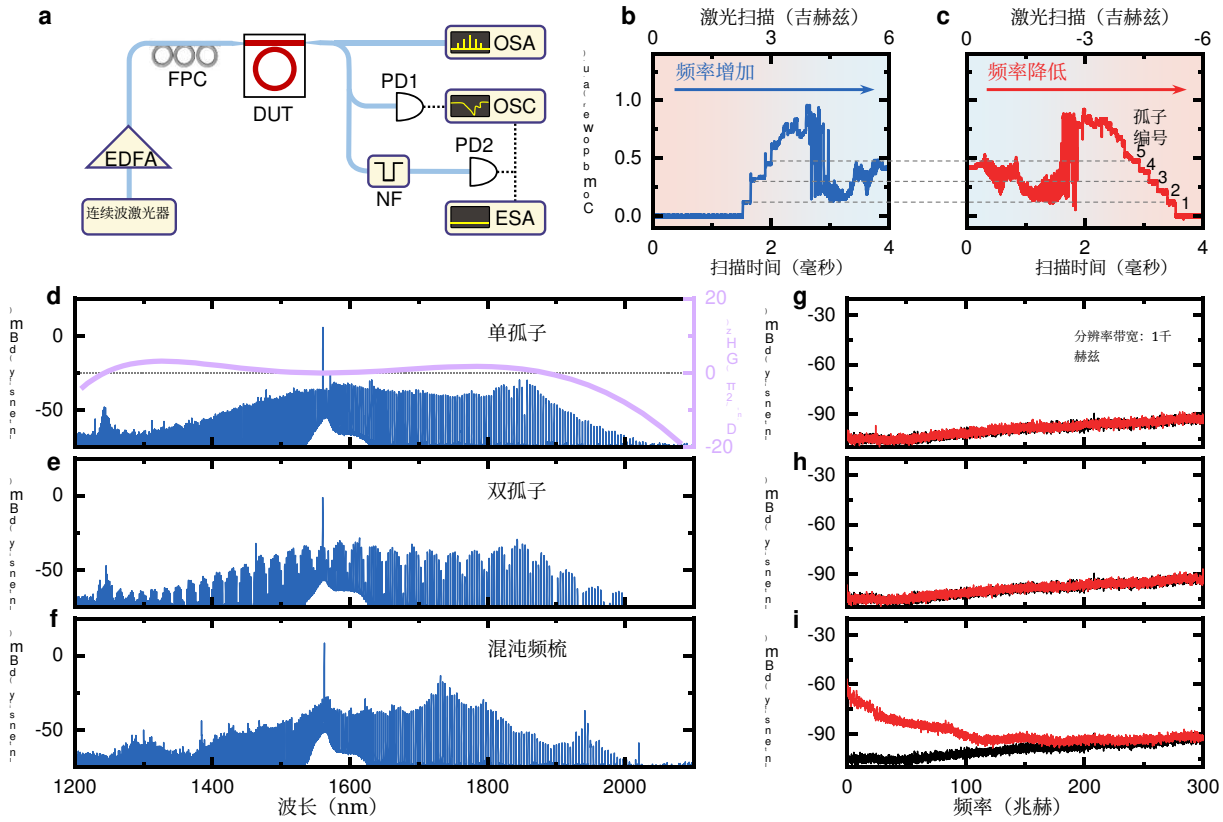

图 2。a. 孤子产生的实验装置。EDFA，掺铒光纤放大器；FPC，光纤偏振控制器；DUT，被测器件；NF，陷波滤波器；PD，光电探测器；OSA，光谱分析仪；OSC，示波器；ESA，电频谱分析仪。b-c. 当泵浦激光器的频率在 1560.6 nm 附近共振模式的红失谐侧反复来回扫描时，梳状谱功率的演变。d-f. 单孤子、双孤子和混沌梳状谱态的光谱。g-i：与 (d-f) 对应的低频射频 (RF) 噪声光谱（红色）。黑线为探测器的噪声光谱。

相位匹配点，即 $D_{\mathrm{int}} = 0$ 模拟曲线上约 160 太赫兹和 240 太赫兹处的点，表明存在色散波发射 [30, 59, 60], ，这些色散波可相干地拓展孤子的光谱带宽 [31–33]图1e中的圆点显示了测量结果 D_{int}，其中红色（或橙色）圆点表示分裂共振的高频（或低频）凹陷。实验结果与模拟曲线吻合，提取出的数值为 $D_2/2\pi \sim 1.4$兆赫。图1e的插图展示了模拟的光学模式分布。

图中展示了孤子产生实验装置的示意图。2a。向芯片耦合 600 mW 的泵浦功率，而片上泵浦功率约为 150 mW。由于 $LiNbO_3$ [46–49], ，孤子态的双向切换是可行的 [52], ，如图所示。2（b-c）。当激光频率在 1560.6 nm 附近共振模式的红失谐侧反复来回扫描时，梳状谱功率呈现一系列离散阶跃，表明孤子数量逐渐发生变化。腔内孤子数量可通过阶跃高度推断。因此，可以实现具有不同数量的孤子态

通过简单地将激光频率调谐至相应的孤子台阶，即可确定性地访问2。图 d 展示了泵浦激光器停留在孤子台阶时单孤子态的光谱。在 1242 nm（$\sim$ 241 太赫兹）和 1851 nm（$\sim$ 162 太赫兹）处观测到两个色散波，与预测的D_{int} 曲线（紫色曲线）一致。提高激光频率后，观测到双孤子态，如图2e 所示。进一步将激光频率提高至共振频率后，孤子态坍塌为噪声杂乱的混沌态。该状态由克尔非线性和拉曼散射共同作用形成， [61], 如图2f 所示。图2(g-i) 展示了低频射频（RF）噪声谱，分辨率带宽为 1 kHz，分别对应图2(d-f) 中的梳状态。图2(g、h) 中延伸至直流的平坦谱验证了孤子态的相干性。

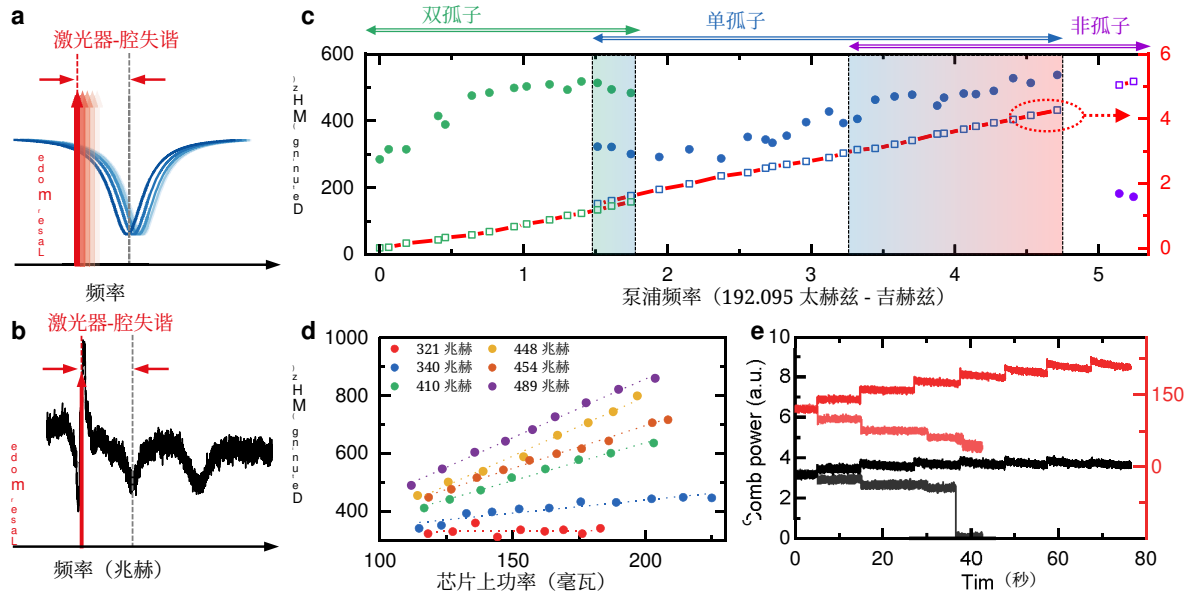

图3. a. 稳定孤子运行期间，光折变诱导的共振频率（蓝色）与激光频率（红色）锁定示意图。b. 实验中使用的 1560.6 nm 共振。c. 共振频率（空心方块）和激光器-腔失谐（实心圆点）随泵浦频率变化而产生的变化。d. 激光器-腔失谐随片上泵浦功率变化而产生的变化。不同颜色表示不同的初始激光器-腔失谐。e. 泵浦功率逐渐变化时，透射功率和梳状谱功率的变化。透射功率的每个阶跃对应 20 mW 的泵浦功率变化。

III. 孤子存在范围

接下来，我们探究光折变效应对孤子形成的影响。除了能够双向访问孤子态之外，光折变效应还可以有效拓宽孤子存在范围，如图3a 所示。当泵浦激光器红失谐至共振时，由于 $LiNbO_3$ 微腔中的光折变过程较慢，共振频率会发生偏移并锁定至激光频率。这种锁定抑制了有效激光器-腔失谐的变化，从而拓宽孤子存在范围。实验中采用弱探测光实时追踪有效激光器-腔失谐[62, 63]。如图3b 所示，实验采用约 1560.6 nm 处的共振，泵浦激光器的位置由干涉信号指示，并以红色箭头标出。

图 3c 展示了泵浦频率逐渐降低时共振频率和激光器-腔失谐的变化。这里我们将激光频率调谐间隔设为 125 兆赫（~ 1 pm），并使用波长计测量激光频率。在系统稳定之前，均获取每个激光器-腔失谐值。初始激光频率为 192.095 太赫兹（~ 1560.645nm），此时系统处于双孤子态。随着激光频率降低，由于光折变效应，共振频率也随之降低，如图 3c 中的红线所示。值得注意的是，其频移速率略小于激光频率的变化速率。因此，随着激光频率降低，激光器-腔失谐逐渐增大。当激光频率降低 1.5 吉赫兹时，系统开始在双孤子态和单孤子态之间交替，如图 3c 中的蓝框所示。当激光频率降低 1.94 吉赫兹时，双孤子态不再能够存在，系统保持在单孤子态。在激光频移为 1.28 吉赫兹的范围内，单孤子态保持稳定，而激光器-腔失谐偏移了 135 兆赫。显然，当激光频率降低 3.22 吉赫兹时，腔内态开始在单孤子态和非孤子态之间交替。直到泵浦频率降低 5.14 吉赫兹时，腔内功率已无法再实现孤子形成，系统保持在非孤子态。在该状态下，由于腔内功率进一步降低，与孤子态相比，失谐显著减小。

此外，我们进一步探究了泵浦功率变化时单孤子的稳定存在范围。图 3d 展示了单孤子态的激光器-腔失谐随片上泵浦功率增加而发生的变化。不同颜色表示不同的初始激光器-腔失谐值。片上泵浦功率从 120 mW 起，每次增加 20 mW。显然，激光器-腔失谐随片上泵浦功率的增加而增大，并且初始失谐值越大，

失谐随片上泵浦功率变化的线性速率越大。图 3e 展示了初始失谐为 400 兆赫时，片上功率在 120 mW 附近变化时的梳状谱功率。当片上泵浦功率降至 60 mW 以下时，梳状谱功率骤降至零，表明单孤子态消失。泵浦功率增加时，由于光纤到芯片边缘耦合不稳定，片上功率会低于预期。根据传输功率，当片上功率达到 220 mW 时，单孤子态仍然存在。随着泵浦功率继续增加，由于边缘耦合的影响，片上功率几乎不再变化。因此可以得出结论，单孤子态至少在 60 mW 至 220 mW 之间保持稳定。关于孤子的抗扰能力及其长期稳定性的详细研究见补充信息。结果表明，当孤子态受到扰动甚至被破坏时，得益于光折变效应，它能够恢复到初始状态。无需任何主动控制，孤子态即可维持 13 小时。

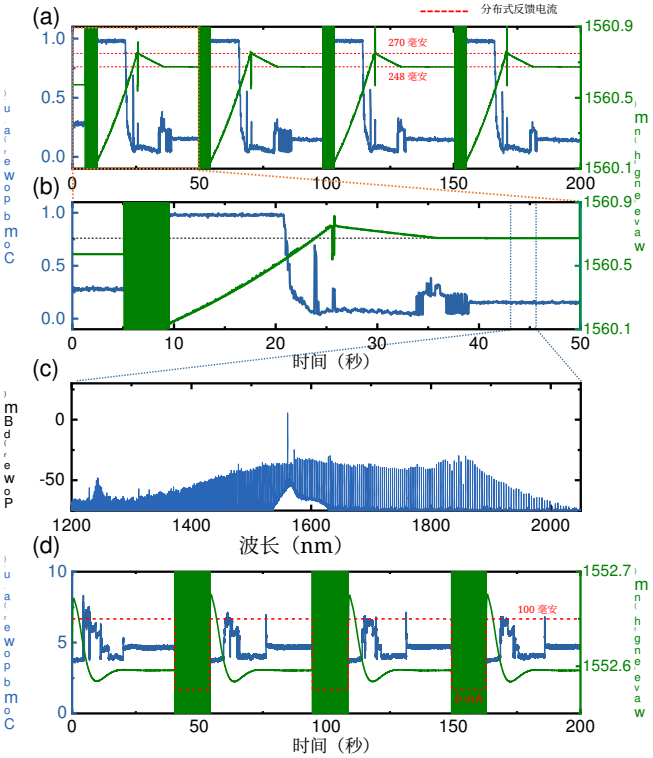

图 4. a. 可重复的一键式孤子产生。分布式反馈电流从 0 毫安升至 270 毫安，然后降至 248 毫安。电流为 248 毫安时对应的波长 1560.675 纳米，处于 c 中所示的单孤子存在范围内。b. 在没有任何主动控制的情况下，同一单孤子的产生与稳定过程详解。c. 单孤子的光谱。d. 重复产生相同的单孤子态。

IV. 孤子微梳的一键式生成

如上所述，无需复杂技术即可确定性地进入单孤子态。因此，接下来我们使用分布式反馈激光器代替商用可调谐激光器作为泵浦激光器。我们通过预设程序控制分布式反馈激光器的电流来调节激光频率。实验中使用的分布式反馈激光器参数列于图 4中。实验的关键在于两个电流值（270 mA 和 248 mA），分别将初始波长设定在冷腔模式附近（1560.753 nm），并将目标波长设定在孤子存在范围内（1560.675 nm），如图 4a 所示。分布式反馈激光器的电流在 17 秒内升至 270 mA，随后在 10 秒内降至 248 mA。开始时，电流较低，功率不足以供波长计测量，因此信号出现振荡且杂乱无序。如图 4b 所示，这使泵浦激光器能够经过冷腔共振模式，并稳定在能够产生稳定单孤子态的波长处。梳状谱功率经过短暂振荡后，最终稳定在单孤子功率水平。只要设定好主要电流值，无论分布式反馈激光器电流的上升和下降时间如何，系统都能始终进入相同的单孤子态（见补充信息）。如图 4a 所示，通过反复运行该程序，无需任何主动控制即可反复产生并稳定在相同的单孤子态。稳定单孤子态的光谱如图 4c 所示。系统也可以在双孤子态下运行或具有不同分布式反馈电流值的其他孤子态。

此外，当 DFB 电流的上升速度未受控制、电流瞬间升高时，由于 DFB 激光器的温度变化存在滞后，DFB 的实际波长会超出与当前电流值对应的波长，随后逐渐回落至对应波长。利用这一特性，只需将电流设定为孤子态稳定时对应的波长值。DFB 激光器可通过温度变化进入冷腔模式。图 4d 展示了利用该方法重复产生相同单孤子态的过程。孤子的稳定泵浦波长为 1552.59 nm。由于 DFB 温度升高，其实际波长会升至 1552.67 nm，随后回落。回落过程中，波长经过共振波长 1552.62 nm，并使共振蓝移，从而达到稳定孤子态。

V. 结论

总之，我们展示了在色散优化的集成式 $LiNbO_3$光学微谐振器中实现孤子的自发产生。该单孤子具有宽带宽和双色散波的特性，非常适合用于 $2f-3f$自参考。我们发现，通过利用 $LiNbO_3$，的光折变效应，孤子存在范围显著扩大。与以往激光频移和激光器-腔失谐偏移大致相同的方案不同，[64], 此处 $LiNbO_3$ 中的孤子失谐偏移仅为激光频移的十分之一，这是由光折变效应导致的。单孤子在 1.28 GHz 的激光频率范围和 60 mW 至 220 mW 的芯片上功率范围内稳定运行，并且不受频率和功率扰动的影响。我们展示了系统从扰动中恢复的能力、长达 13 小时的长期运行，以及利用预编程 DFB 激光器实现的即插即用式孤子产生。进一步改进微谐振器 Q并与 DFB 激光器芯片进行混合集成后，[65—67],即可制造出带有电子调谐功能的紧凑型孤子微梳器件。这些坚固、稳定且便携的器件可成为激光雷达、微波光子学和光通信的核心元件。

方法

器件制备 该器件制备于一层厚度为580 nm、Z切割铌酸锂$_3$ 薄膜上，该薄膜键合于硅衬底，其上具有厚度为500μμm的硅和厚度为2μμm的湿法氧化二氧化硅（SiO_2）。采用电子束光刻技术，使用氢倍半硅氧烷（HSQ）光刻胶对器件进行图案化。图案显影后，在电感耦合等离子体（ICP）刻蚀机中，通过基于氩离子的反应离子刻蚀对薄膜进行部分刻蚀，形成深度为360 nm、剩余220 nm厚板层的梯形波导横截面，如图1b所示。随后，使用缓冲氢氟酸溶液和RCA1清洗液（NH3:H2O2:H2O = 1:1:5）对器件进行清洗，以去除残留的HSQ光刻胶和刻蚀过程中形成的再沉积物。最后，对芯片端面进行切割，以实现良好的光纤到芯片耦合。

孤子产生 使用可调谐激光器（Toptica CTL）作为泵浦激光器，其功率由掺铒光纤放大器（EDFA）放大。放大后的光随后通过光纤偏振控制器（FPC），调节光的偏振态，使其与波导的 TE模式匹配，最终经由透镜光纤耦合至芯片上。光纤到芯片的耦合损耗约为每个端面 6 dB。输出光由另一根透镜光纤收集，并分成三路。其中 45% 的光被送往进入光谱分析仪（OSA），以表征微梳光谱。百分之十的光由光电探测器1（PD1）记录，用于监测泵浦光的透射光谱。其余光通过光纤布拉格光栅（FBG），以衰减泵浦分量的功率，随后由另一个光电探测器（PD2）记录，分别用于监测梳状谱功率和测量低频噪声谱。

积分色散积分色散定义为 $D_{\mathrm{int}} = \omega_\mu - \omega_0 - \mu D_1$, 决定了孤子微梳的光谱宽度。这里，$\mu$ 是模式编号，ω_0 是参考共振模式的频率，D_1 是参考模式的自由光谱范围，而ω_μ 是相对于参考模式的第 μ个模式的频率。图1f 中的红点和橙点表示通过使用光纤马赫-曾德尔干涉仪校准电信波段附近的透射光谱所测得的 D_{int} 值。

数据可用性

本研究中生成或分析的所有数据均可在论文及其补充信息中获取。更多源数据可应要求提供。

代码可用性

用于求解补充信息中所列方程的代码可应要求提供。

* bofang@nankai.edu.cn;chunhua@ustc.edu.cn

[1] F. Leo, S. Coen, P. Kockaert, S.-P. Gorza, P. Emplit, 和 M. Haelterman, “一维克尔介质中的时间腔孤子：全光缓存器中的比特，”《自然·光子学》**4**，471 (2010)。[2] T. Herr, V. Brasch, J. D. Jost, C. Y. Wang, N. M. Kondratiev, M. L. Gorodetsky, 和 T. J. Kippen-berg, “光学微谐振器中的时间孤子，”《自然 · 光子学》 **8**，145 (2013)。[3] 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)。[4] A. Pasquazi, M. Peccianti, L. Razzari, D. J. Moss, S. Coen, M. Erkintalo, Y. K. Chembo, T. Hansson, S. Wabnitz, P. Del’ Haye, X. Xue, A. M. Weiner, 和 R. Morandotti, “微梳：新一代光源，” *Micro-combs: A novel generation of optical sources* **729**, 1 2018 ，《物理学报告》( )。[5] X. Yi, Q.-F. Yang, K. Y. Yang, M.-G. Suh, 和 K. Vahala, “高Q值二氧化硅微谐振器中微波频率的孤子频率梳，”《光学》 **2**，1078 (2015)。[6] M.-G. Suh 和 K. Vahala, “ 吉赫兹重复频率孤子微梳，”《光学》**5**，65 (2018)。[7] M. H. P. Pfeiffer, C. Herkommer, J. Liu, H. Guo, M. Karpov, E. Lucas, M. Zervas, 和 T. J. Kippen-

berg，“氮化硅微谐振器中的倍频程宽带耗散克尔孤子频率梳”，《光学》4，684（2017）。[8] Q. Li、T. C. Briles、D. A. Westly、T. E. Drake、J. R. Stone、B. R. Ilic、S. A. Diddams、S. B. Papp 和 K. Srinivasan，“在孤子状态下稳定访问倍频程宽带微谐振器频率梳”，《光学》4，193（2017）。[9] D. J. Moss、R. Morandotti、A. L. Gaeta 和 M. Lipson，“基于氮化硅和 Hydex、兼容 CMOS 的新型非线性光学平台”，《自然·光子学》7，597（2013）。[10] A. L. Gaeta、M. Lipson 和 T. J. Kippenberg，“基于光子芯片的频率梳”，《自然·光子学》13，158（2019）。[11] A. Kovach、D. Chen、J. He、H. Choi、A. H. Dogan、M. Ghasemkhani、H. Taheri 和 A. M. Armani，“用于集成光学克尔频率梳的新兴材料体系”，《先进光学与光子学》12，135（2020）。[12] P. Marin-Palomo、J. N. Kemal、M. Karpov、A. Kordts、J. Pfeifle、M. H. P. Pfeiffer、P. Trocha、S. Wolf、V. Brasch、M. H. Anderson、R. Rosenberger、K. Vijayan、W. Freude、T. J. Kippenberg 和 C. Koos，“用于大规模并行相干光通信的微谐振器孤子”，《自然》546，274（2017）。[13] S. Fujii、S. Tanaka、T. Ohtsuka、S. Kogure、K. Wada、H. Kumazaki、S. Tasaka、Y. Hashimoto、Y. Kobayashi、T. Araki、K. Furusawa、N. Sekine、S. Kawanishi 和 T. Tanabe，“用于 100 通道以上无 FEC 光通信的耗散克尔孤子微梳”，《光学快报》30，1351（2022）。[14] E. Obrzud、M. Rainer、A. Harutyunyan、M. H. Anderson、J. Liu、M. Geiselmann、B. Chazelas、S. Kundermann、S. Lecomte、M. Cecconi、A. Ghedina、E. Molinari、F. Pepe、F. Wildi、F. Bouchy、T. J. Kippenberg 和 T. Herr，“微光子天文梳”，《自然·光子学》13，31（2019）。[15] M.-G. Suh、X. Yi、Y.-H. Lai、S. Leifer、I. S. Grudinin、G. Vasisht、E. C. Martin、M. P. Fitzgerald、G. Doppmann、J. Wang、D. Mawet、S. B. Papp、S. A. Diddams、C. Beichman 和 K. Vahala，“利用微谐振器天文梳搜寻系外行星”，《自然·光子学》13，25（2019）。[16] P. Trocha、M. Karpov、D. Ganin、M. H. P. Pfeiffer、A. Kordts、S. Wolf、J. Krockenberger、P. Marin-Palomo、C. Weimann、S. Randel、W. Freude、T. J. Kippenberg 和 C. Koos，“利用微谐振器孤子频率梳进行超快光学测距”，《科学》359，887（2018）。[17] M.-G. Suh 和 K. J. Vahala，“孤子微梳测距”，《科学》359，884（2018）。[18] J. Feldmann、N. Youngblood、M. Karpov、H. Gehring、X. Li、M. Stappers、M. Le Gallo、X. Fu、A. Lukashchuk、A. S. Raja、J. Liu、C. D. Wright、A. Sebastian、T. J. Kippenberg、W. H. P. Pernice 和 H. Bhaskaran，“利用集成光子张量核心进行并行卷积处理”，《自然》589，52（2021）。[19] X. Xu、M. Tan、B. Corcoran、J. Wu、A. Boes、T. G. Nguyen、S. T. Chu、B. E. Little、D. G. Hicks、R. Morandotti、A. Mitchell 和 D. J. Moss，“用于光学神经网络的 11 TOPS 光子卷积加速器”，《自然》589，44（2021）。[20] W. Liang、D. Eliyahu、V. S. Ilchenko、A. A. Savchenkov、A. B. Matsko、D. Seidel 和 L. Maleki，“高频谱纯度克尔频率梳射频光子学】【。

振荡器”，《自然·通讯》6, 7957 (2015)。[21] J. Liu, E. Lucas, A. S. Raja, J. He, J. Riemensberger, R. N. Wang, M. Karpov, H. Guo, R. Bouchand, 和 T. J. Kippenberg，“利用集成孤子微梳在 X 波段和 K 波段产生光子微波”，《自然·光子学》14, 486 (2020)。[22] Q.-F. Yang, B. Shen, H. Wang, M. Tran, Z. Zhang, K. Y. Yang, L. Wu, C. Bao, J. Bowers, A. Yariv, 和 K. Vahala，“利用反向传播孤子微梳的游标光谱仪”，《科学》363, 965 (2019)。[23] D. Avik, J. Chaitanya, J. Xingchen, C. Jaime, O. Yoshitomo, L. Kevin, G. A. L., 和 L. Michal，“用于光谱学的片上双梳光源”，《科学进展》4, e1701858。[24] F.-X. Wang, W. Wang, R. Niu, X. Wang, C.-L. Zou, C.-H. Dong, B. E. Little, S. T. Chu, H. Liu, P. Hao, S. Liu, S. Wang, Z.-Q. Yin, D.-Y. He, W. Zhang, W. Zhao, Z.-F. Han, G.-C. Guo, 和 W. Chen，“利用片上耗散克尔孤子的量子密钥分发”，《激光与光子学评论》14, 1900190 (2020)。[25] D. T. Spencer, T. Drake, T. C. Briles, J. Stone, L. C. Sinclair, C. Fredrick, Q. Li, D. Westly, B. R. Ilic, A. Bluestone, N. Volet, T. Komljenovic, L. Chang, S. H. Lee, D. Y. Oh, M.-G. Suh, K. Y. Yang, M. H. P. Pfeiffer, T. J. Kippenberg, E. Norberg, L. Theogarajan, K. Vahala, N. R. Newbury, K. Srinivasan, J. E. Bowers, S. A. Diddams, 和 S. B. Papp，“利用集成光子学的光频合成器”，《自然》557, 81 (2018)。[26] Z. L. Newman, V. Maurice, T. Drake, J. R. Stone, T. C. Briles, D. T. Spencer, C. Fredrick, Q. Li, D. Westly, B. R. Ilic, B. Shen, M.-G. Suh, K. Y. Yang, C. Johnson, D. M. S. Johnson, L. Hollberg, K. J. Vahala, K. Srinivasan, S. A. Diddams, J. Kitching, S. B. Papp, 和 M. T. Hummon，“光学原子钟光子集成架构”，《光学》6, 680 (2019)。[27] J. D. Jost, T. Herr, C. Lecaplain, V. Brasch, M. H. P. Pfeiffer, 和 T. J. Kippenberg，“利用自参考光学微谐振器计数光的周期”，《光学》2, 706 (2015)。[28] P. Del' Haye, A. Coillet, T. Fortier, K. Beha, D. C. Cole, K. Y. Yang, H. Lee, K. J. Vahala, S. B. Papp, 和 S. A. Diddams，“利用自参考微梳实现相位相干的微波至光链路”，《自然·光子学》10, 516 (2016)。[29] V. Brasch, E. Lucas, J. D. Jost, M. Geiselmann, 和 T. J. Kippenberg，“自参考光子芯片孤子克尔频率梳”，《光：科学与应用》6, e16202 (2017)。[30] V. Brasch, M. Geiselmann, T. Herr, G. Lihachev, M. H. P. Pfeiffer, M. L. Gorodetsky, 和 T. J. Kippenberg，“基于光子芯片的光频梳：利用孤子切伦科夫辐射”，《科学》351, 357 (2016)。[31] S.-P. Yu, T. C. Briles, G. T. Moille, X. Lu, S. A. Diddams, K. Srinivasan, 和 S. B. Papp，“将克尔孤子频率梳调谐至原子共振”，Phys. Rev. Applied 11, 044017 (2019)。[32] X. Liu, Z. Gong, A. W. Bruch, J. B. Surya, J. Lu, 和 H. X. Tang，“用于超倍频程孤子微梳产生和自参考的氮化铝纳米光子学”，《自然·通讯》12, 5428 (2021)。[33] Z. Gong, X. Liu, Y. Xu, 和 H. X. Tang，“近倍频程铌酸锂孤子微梳”，《光学》7, 1275 (2020)。[34] V. Brasch, M. Geiselmann, M. H. P. Pfeiffer, 和

T. J. Kippenberg，“使微谐振器中短寿命的耗散克尔孤子态进入稳态”，《光学快报》24, 29312 (2016)。[35] X. Yi, Q.-F. Yang, K. Y. Yang, 和 K. Vahala，“微谐振器中时间孤子的主动捕获与稳定”，《光学快报》41, 2037 (2016)。[36] J. R. Stone, T. C. Briles, T. E. Drake, D. T. Spencer, D. R. Carlson, S. A. Diddams, 和 S. B. Papp，“克尔微谐振器频率梳中的热效应与非线性耗散孤子动力学”，Phys. Rev. Lett. 121, 063902 (2018)。[37] H. Zhou, Y. Geng, W. Cui, S.-W. Huang, Q. Zhou, K. Qiu, 和 C. Wei Wong，“辅助谐振腔辅助微腔中的孤子爆发与确定性耗散克尔孤子产生”，《光：科学与应用》8, 50 (2019)。[38] Z. Lu, H.-J. Chen, W. Wang, L. Yao, Y. Wang, Y. Yu, B. E. Little, S. T. Chu, Q. Gong, W. Zhao, X. Yi, Y.-F. Xiao, 和 W. Zhang，“合成孤子晶体”，《自然·通讯》12, 3179 (2021)。[39] T. Wildi, V. Brasch, J. Liu, T. J. Kippenberg, 和 T. Herr，“通过缓慢泵浦调制实现对微谐振器孤子的热稳定接入”，《光学快报》44, 4447 (2019)。[40] K. Nishimoto, K. Minoshima, T. Yasui, 和 N. Kuse，“利用光学边带对克尔微谐振器孤子频梳进行热控制”，《光学快报》47, 281 (2022)。[41] N. G. Pavlov, S. Koptyaev, G. V. Lihachev, A. S. Voloshin, A. S. Gorodnitskiy, M. V. Ryabko, S. V. Polonsky, 和 M. L. Gorodetsky，“利用普通激光二极管实现窄线宽激射与孤子克尔微梳”，《自然·光子学》12, 694 (2018)。[42] N. M. Kondratiev, V. E. Lobanov, A. E. Shitikov, R. R. Galiev, D. A. Chermoshentsev, N. Y. Dmitriev, A. N. Danilin, E. A. Lonshakov, K. N. Min’kov, D. M. Sokol, S. J. Cordette, Y.-H. Luo, W. Liang, J. Liu, 和 I. A. Bilenko，“高 Q 微谐振器激光自注入锁定的最新进展”，Frontiers of Physics 18, 21305 (2023)。[43] B. Shen, L. Chang, J. Liu, H. Wang, Q.-F. Yang, C. Xiang, R. N. Wang, J. He, T. Liu, W. Xie, J. Guo, D. Kinghorn, L. Wu, Q.-X. Ji, T. J. Kippenberg, K. Vahala, 和 J. E. Bowers，“集成式即插即用孤子微梳”，《自然》582, 365 (2020)。[44] A. S. Voloshin, N. M. Kondratiev, G. V. Lihachev, J. Liu, V. E. Lobanov, N. Y. Dmitriev, W. Weng, T. J. Kippenberg, 和 I. A. Bilenko，“光学微谐振器中孤子自注入锁定的动力学”，《自然·通讯》12, 235 (2021)。[45] T. C. Briles, S.-P. Yu, L. Chang, C. Xiang, J. Guo, D. Kinghorn, G. Moille, K. Srinivasan, J. E. Bowers, 和 S. B. Papp，“ 倍频程跨度频率梳的磷化铟与氮化硅混合集成 ”，APL Photonics 6, 026102 (2021)。[46] A. A. Savchenkov, A. B. Matsko, D. Strekalov, V. S. Ilchenko, 和 L. Maleki，“ 增强回音壁模式谐振器中的光折变效应”，Phys. Rev. B 74, 245119 (2006)。[47] M. Leidinger, C. S. Werner, W. Yoshiki, K. Buse, 和 I. Breunig，“铌酸锂中光折变效应和热释电-电光效应对回音壁模式的影响”，《光学快报》41, 5474 (2016)。[48] H. Jiang, R. Luo, H. Liang, X. Chen, Y. Chen, 和 Q. Lin

，“铌酸锂中光折变的快速响应-

微腔谐振器，《光学快报》42，3267（2017）。[49] Y. Xu、M. Shen、J. Lu、J. B. Surya、A. A. Sayem 和 H. X. Tang，《抑制薄膜铌酸锂微环谐振器中的光折变效应》，《光学快报》29，5497（2021）。[50] A. Boes、B. Corcoran、L. Chang、J. Bowers 和 A. Mitchell，《绝缘体上铌酸锂（LNOI）在光子集成电路中的现状与潜力》，《激光与光子学评论》12，1700256（2018）。[51] D. Zhu、L. Shao、M. Yu、R. Cheng、B. Desiatov、C. J. Xin、Y. Hu、J. Holzgrafe、S. Ghosh、A. Shams-Ansari、E. Puma、N. Sinclair、C. Reimer、M. Zhang 和 M. Lonˇcar，《薄膜铌酸锂上的集成光子学》，《先进光学与光子学》13，242（2021）。[52] Y. He、Q.-F. Yang、J. Ling、R. Luo、H. Liang、M. Li、B. Shen、H. Wang、K. Vahala 和 Q. Lin，《自启动双色铌酸锂孤子微梳》，《光学》6，1138（2019）。[53] A. W. Bruch、X. Liu、Z. Gong、J. B. Surya、M. Li、C.- L. Zou 和 H. X. Tang，《泡克尔斯孤子微梳》，《自然·光子学》15，21（2021）。[54] M. He、M. Xu、Y. Ren、J. Jian、Z. Ruan、Y. Xu、S. Gao、S. Sun、X. Wen、L. Zhou、L. Liu、C. Guo、H. Chen、S. Yu、L. Liu 和 X. Cai，《面向 100 Gbit s-1 及更高速率的高性能硅与铌酸锂混合集成马赫–曾德尔调制器》，《自然·光子学》13，359（2019）。[55] C. Wang、M. Zhang、X. Chen、M. Bertrand、A. Shams-Ansari、S. Chandrasekhar、P. Winzer 和 M. Lonˇcar，《工作电压兼容 CMOS 的集成铌酸锂电光调制器》，《自然》562，101（2018）。[56] C. Wang、M. Zhang、M. Yu、R. Zhu、H. Hu 和 M. Loncar，《用于克尔频率梳产生和调制的单片集成铌酸锂光子电路》，《自然·通讯》10，978（2019）。[57] Z. Fang、H. Luo、J. Lin、M. Wang、J. Zhang、R. Wu、J. Zhou、W. Chu、T. Lu 和 Y. Cheng，《单片集成高 Q 铌酸锂微盘上光学频率微梳的高效电光调谐》，《光学快报》44，5953（2019）。[58] M. L. Gorodetsky、A. D. Pryamikov 和 V. S. Ilchenko，《高 Q 微球中的瑞利散射》，《美国光学学会杂志 B》17，1051（2000）。[59] C. Mili´an 和 D. Skryabin，《零群速度色散附近微环谐振器中的孤子族与共振辐射》，《光学快报》22，3732（2014）。[60] J. K. Jang、M. Erkintalo、S. G. Murdoch 和 S. Coen，《时间腔孤子色散波发射的观测》，《光学快报》39，5503（2014）。[61] M. Yu、Y. Okawachi、R. Cheng、C. Wang、M. Zhang、A. L. Gaeta 和 M. Lonˇcar，《铌酸锂微谐振器中的拉曼激射与孤子锁模》，《光：科学与应用》9，9（2020）。[62] R. Niu、M. Li、S. Wan、Y. R. Sun、S.-M. Hu、C.-L. Zou、G.-C. Guo 和 C.-H. Dong，《基于可重构微孤子的千赫兹精度波长计》，《自然·通讯》14，169（2023）。[63] J. Li、S. Wan、J.-L. Peng、Z.-Y. Wang、R. Niu、C.-L. Zou、G.-C. Guo 和 C.-H. Dong，《氮化硅微谐振器中模式交叉与完美孤子晶体的热调谐》，《光学快报》30，13690（2022）。[64] H. Guo、M. Karpov、E. Lucas、A. Kordts、M. H. P. Pfeiffer、V. Brasch、G. Lihachev、V. E. Lobanov、M. L. Gorodetsky

’ 和 T. J. Kippenberg ，“通用动力学

以及光学微谐振器中耗散克尔孤子的确定性切换，”《自然·物理》**13**，94（2017）。[65] A. Shams-Ansari、D. Renaud、R. Cheng、L. Shao、L. He、D. Zhu、M. Yu、H. R. Grant、L. Johansson、M. Zhang 和 M. Lonˇcar，“集成于薄膜铌酸锂上的电泵浦激光发射器”，《光学》**9**，408（2022）。[66] M. Li、L. Chang、L. Wu、J. Staffa、J. Ling、U. A. Javid、S. Xue、Y. He、R. Lopez-rios、T. J. Morin、H. Wang、B. Shen、S. Zeng、L. Zhu、K. J. Vahala、J. E. Bowers 和 Q. Lin，“集成式电光效应激光器”，《自然·通讯》**13**，5344（2022）。[67] V. Snigirev、A. Riedhauser、G. Lihachev、M. Churaev、J. Riemensberger、R. N. Wang、A. Siddharth、G. Huang、C. M¨ohl、Y. Popoff、U. Drechsler、D. Caimi、S. H¨onl、J. Liu、P. Seidler 和 T. J. Kippenberg，“利用铌酸锂集成光子学实现超快可调谐激光器”，《自然》**615**，411（2023）。

致谢

本研究得到量子科学与技术创新计划（2021ZD0303203）、国家自然科学基金（12293052、11934012、12104442、92050109 和 92250302）以及中国科学院青年科学家项目的资助。基础研究（YSBR-069）、中央高校基本科研业务费。本研究的部分工作在中国科学技术大学微纳研究与制造中心完成。

作者贡献

S.W. 和 P.-Y.W. 对本研究的贡献相同。S.W.、P.-Y. W. 和 C.-H. D. 构思了实验。S.W.、P. -Y. W.、R.M. 和 F. B. 制备了器件。S.W. 和 P.-Y.W. 搭建了实验装置并开展了实验，Z.-Y. W.、R. N.、D. Y. H. 和 J. L. 提供了协助。S.W.、J. L. 和 C.-H.D. 在所有合著者的意见基础上撰写了论文。C.-H.D. 和 G.-C.G. 负责监督项目。所有作者均为本文所述研究作出了重要贡献。

竞争性经济利益

作者声明不存在竞争性经济利益。

补充信息

本文的补充信息可在在线版本中获取。有关通信和材料索取的事宜，请联系 Fang Bo 或 Chun-Hua Dong。