arXiv:2303.01184v1 [physics.optics] 2 Mar 2023

紧凑型铌酸锂光子集成电路

YanGao[1], Fuchuan Lei[1], Marcello Girardi[1], Zhichao Ye[1,2], Rapha¨elVanLaer[1], Victor Torres-Company[1], ✉, 以及 Jochen Schr¨oder[1], ✉
[1]*Department of Microtechnology and Nanoscience (MC2), Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden*[2]*Qaleido Photonics, Hangzhou, China.*✉*jochen.schroeder@chalmers.se, torresv@chalmers.se*

铌酸锂（LN）是未来复杂光子电子电路的一种极具潜力的材料，可广泛应用于通信、传感、量子光学和计算等领域。随着部分刻蚀的绝缘体上铌酸锂（LNOI）波导的发展，LN 朝着紧凑型光子集成电路（PICs）迈出了重要一步。然而，由于其波导具有部分刻蚀边缘结构，未来高紧凑度 PICs 的集成密度仍然受到限制。在此，我们展示了一种完全刻蚀的 LN PIC 平台，该平台首次同时实现了超低传播损耗和紧凑的电路尺寸。具有平滑侧壁的强约束完全刻蚀 LN 波导，使我们能够将弯曲半径降至 20 μm（对应于 1 THz 自由光谱范围）。我们实现了具有紧凑尺寸和高品质因数的Q 微环谐振器，其 Q/V 为 7.1×10^4 μm^{-3}，几乎比此前报道的结果大一个数量级。即使在40 μm 的小弯曲半径下，我们的 LN 波导的传播损耗统计平均值仍为 8.5 dB/m（对应于平均 Q因子 4.9×10^6）。我们的紧凑型超低损耗 LN 平台在未来微型化多功能集成系统中展现出巨大潜力。作为展示该平台实用性的补充证据，我们在 LN 中实现了重复频率高达 500 GHz 的孤子微梳。

铌酸锂（LN）凭借其独特性质，成为集成光子学领域一种极具前景的材料。这些性质兼具电光（EO）、非线性和声光效应，具有宽广的光学透明窗口，且折射率相对较高 [1–4]。近期已展示了多种应用，例如低驱动电压、高速电光调制器 [5, 6], 克尔效应，以及电光频率梳 [7, 8],超高效频率转换器 [9, 10], 压缩光源 [11], 光子对光源 [12], 和光学参量振荡器 [13, 14] 。

对于未来的铌酸锂集成电路，系统复杂度的提升通常需要大规模的光子器件阵列 [20]。因此，理想的铌酸锂集成波导平台应兼具高密度集成和低传播损耗。人们已提出多种铌酸锂波导结构，以构建更优的波导平台。传统上，铌酸锂波导是在块体铌酸锂中通过钛（Ti）内扩散或质子交换制成的 [21]。其主要缺点是模式面积大、弯曲半径达毫米量级，因而无法实现高密度集成。近年来，研究重点转向薄膜铌酸锂中的浅刻蚀技术，并已取得重大进展 [15]。浅刻蚀铌酸锂脊形波导的最新成果显示，在测量相对较大（∼1.4 cm）的跑道形谐振器时，直波导段的最低传播损耗已达到 2.7 dB/m [15]。然而，直接测量弯曲半径为 80 μm 的微环形谐振器时，损耗会增至 9.3 dB/m [15]。据推测，较大的损耗源于脊形波导横向限制较弱，导致粗糙度引起的散射损耗增加 [15], 这将阻碍进一步减小弯曲半径以实现紧凑型电路。

为了实现高密度集成，深刻蚀条形波导是最佳选择，因为与浅刻蚀脊形波导相比，它能够显著增强水平方向和垂直方向的光场限制，从而缩小电路尺寸。完全刻蚀还可避免浅刻蚀固有的刻蚀深度不确定性，这有利于精确进行色散工程。然而，迄今为止，超低损耗、尺寸紧凑的深刻蚀铌酸锂波导仍难以实现，主要原因是铌酸锂深刻蚀本身难度很大。其困难主要源于铌酸锂与刻蚀掩膜之间的刻蚀选择比不佳，掩膜包括聚合物或有机软光刻胶，以及介质或金属硬掩膜 [22, 23]。深刻蚀还会增强波导模式与粗糙侧壁之间的相互作用，因此若要获得相近的传播损耗，就需要提高制造质量。最近，研究人员采用类金刚石碳（DLC）硬掩膜进行铌酸锂深刻蚀，以提高刻蚀选择比 [17]。研究人员已在强多模波导（3300×700nm）中实现低损耗的完全刻蚀铌酸锂波导，但尚未通过实验展示弯曲半径仅为几十微米的紧凑型电路 [17]。研究 [18] 表明，薄膜铌酸锂的材料吸收损耗相对较低，而铌酸锂波导的传播损耗主要受侧壁粗糙度引起的散射损耗限制。因此，为构建未来紧凑、低损耗的铌酸锂集成平台，仍需要侧壁粗糙度更低的深刻蚀条形波导。

我们展示了一种紧凑型、超低损耗、深刻蚀铌酸锂条形波导平台，其平均传播损耗低至 8.5 dB/m（根据 500 GHz 微环的统计本征平均值 $Q \sim 4.9 \times 10^6$ 计算得出）。得益于平滑的波导侧壁和强光场限制，铌酸锂波导的弯曲半径首次可缩小至 20 μm（自由光谱范围为 1 THz），同时仍能保持约 11.9 dB/m 的低传播损耗。

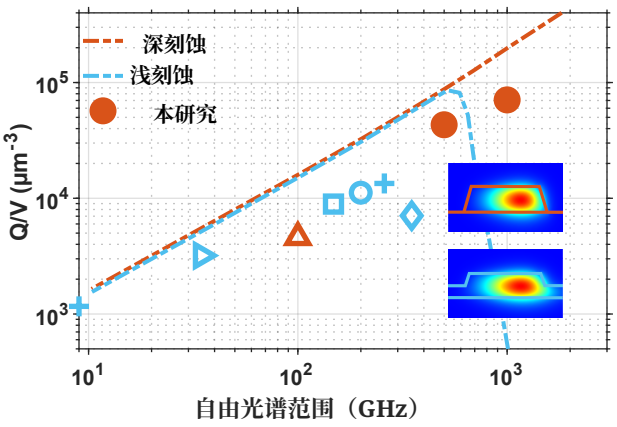

图 1. 低损耗铌酸锂集成平台概览。红色表示采用全刻蚀的器件，蓝色表示采用浅刻蚀的器件。模式体积通过有限元仿真（COMSOL）计算， Qs 为文献中的测量结果。虚线表示对于典型波导尺寸 2000×600nm 和 2000×300(600) nm 可实现的最高品质因数体积比预测值 Q/V。预测中的 Qs 是通过假设直波导传输损耗为 2.7 dB/m（Q = 10 million），并仿真弯曲引起的辐射损耗计算得出的。由左至右用于比较的参考文献分别为：十字形 [15], 直角三角形 [16], 顶部三角形 [17], 正方形 [18], 圆形 [7], 菱形 [19]。请注意，用于比较的 Qs 对于 [17], [18] 和本研究采用的是统计平均值Qs；其余则采用单共振值。

据我们所知，我们的深刻蚀铌酸锂平台实现了最高的 Q/V，达到 7.1× 10^4 μm^{-3}，比其他成果高出近一个数量级（见图 1）。腔体模式体积 V 定义为：$V = \frac{\int \varepsilon E^2 dV}{max\ \varepsilon E^2}$ ()。我们的高 Q/V 器件在时间域和空间域均具有出色的光场限制。与当前最先进的成果相比 [15], ，我们的紧凑型铌酸锂平台在保持光损耗处于同一水平的同时，将弯曲半径缩小至四分之一，并将集成密度提高了 16 倍。这些低损耗紧凑型器件在未来多功能、小型化光集成系统中展现出巨大潜力。我们利用这些新型紧凑、高品质因数Q 铌酸锂器件，展示了迄今为止重复频率最高的铌酸锂孤子微梳。

以厚度为 600 nm 的铌酸锂薄膜和 4.7 μm 热氧化 SiO_2 为起始材料，选用 Z切铌酸锂晶圆（NANOLN），样品在旋涂 MaN 2400 光刻胶前，先进行溶剂清洗和标准清洗（SC1）。随后通过 100 kV 电子束曝光（Raith EBPG 5200）在光刻胶上定义图形，并采用多次曝光以降低波导侧壁粗糙度。然后，使用反应离子束刻蚀设备（IBE，Oxford Ionfab 300 Plus），仅以氩等离子体对样品进行干法刻蚀。侧壁角度估计约为 70 度。LN 的刻蚀速率约为 14 nm/min，需要 45 分钟才能实现对 600 nm 铌酸锂薄膜的轻微过刻蚀。随后，通过再次进行溶剂清洗和 SC1 清洗去除光刻胶。刻蚀后的 SC1 清洗还有助于去除离子束刻蚀产生的副产物，而清洗液对 LN 的轻微侵蚀可能有助于改善其波导侧壁粗糙度。不同于某些基于硬掩模的刻蚀工艺，这里的 LN 制备流程仅包括一次曝光/刻蚀（见图 2（a））。

图 2(b) 展示了典型制备铌酸锂环形谐振器的后着色扫描电子显微图（SEM），其弯曲半径为 20 μ米。即使在高倍放大（80k）下，SEM 图中也几乎看不到结构缺陷（图 2(c)–(d)）。所获得的光滑波导侧壁显著降低了散射损耗。我们制备了具有不同波导宽度的微环谐振器，并对 Q进行了表征，以展示深刻蚀铌酸锂波导的高品质。环形谐振器通过具有 5° Pully耦合器 [24]与总线波导耦合。环形波导宽度选在2 μ米附近，使色散接近于零，从而能够获得正常色散和反常色散波导。采用激光扫描光谱法 [25, 26]测量透射光谱，并使用共振分裂模型 [27] 对谐振进行拟合，以提取 Q和色散。不同波导宽度下的统计平均值 Q及误差条如图 3(c) 所示。在 1500–1600 nm 波长范围内，使用若干个具有相同波导宽度的不同环形谐振器（半径为40 μ米）测量谐振的 Q。误差条根据统计中所有谐振的标准差计算得出。对于更宽的波导，传播损耗（Q）将降低（增加），因为模式将更好地限制在中心区域内，并且对于较宽的波导宽度，与侧壁粗糙度的相互作用更少。我们器件的平均 Q为 380 万至 490 万，对应的波导宽度范围为 1.8–2.1 μ米。对于波导宽度为 2.1 μ米的器件，平均Q 为 490 万，对应的平均传播损耗仅为 8.5 dB/m，测得的群折射率为 $n_g = 2.378$。图 3(a) 展示了波导宽度为 2.1 μ米时谐振的统计本征线宽 κ_i，得到的最可能本征线宽为 35 MHz。此类器件的典型光谱如图 3(d) 所示，其在约 1503.7 nm 处的共振分裂拟合放大峰如图 3(b) 所示，表明典型品质因数Q为 550 万。图 3(f) 展示了该器件随波长变化的 Q，由此可见，在 100 nm 的测量波长范围内， Q均较高。1 THz（半径为 20 μ米）环形谐振器的类似光谱和 Q如图 3(e)、(g) 所示。与 40 μ米的微环相比， 20 μ米微环的 Q略有降低，这是因为较小的弯曲半径会将光模式推向外侧侧壁，从而增加散射损耗。

芯片上的相干泵浦孤子引起了广泛关注，并在材料平台中得到了广泛研究。

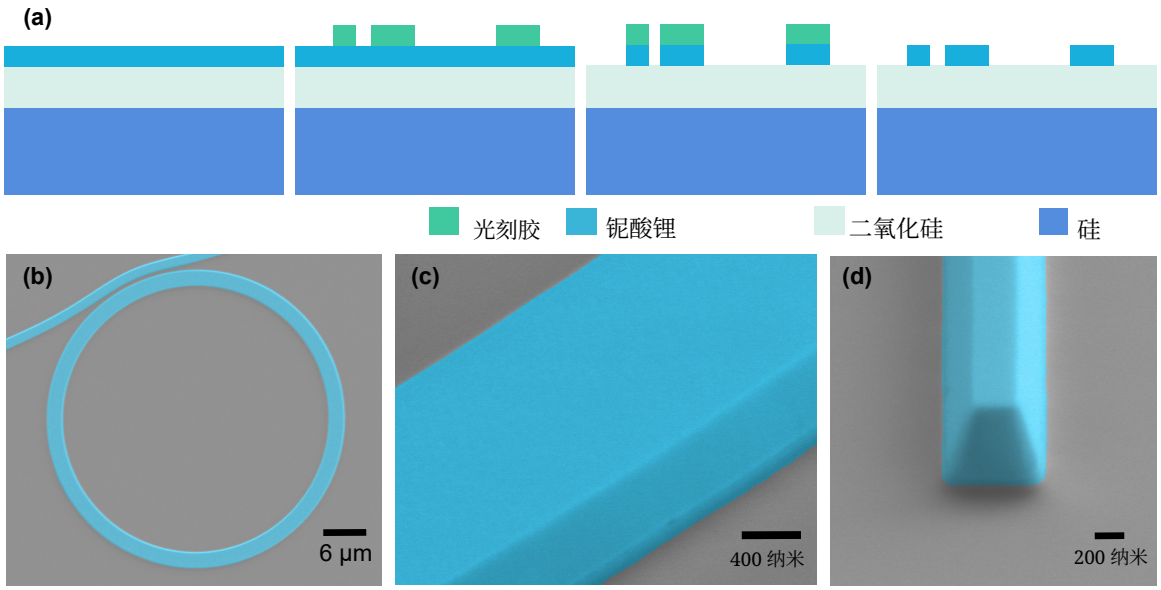

图 2 μ 80 20 。（a）全刻蚀铌酸锂的制备流程图。（b）铌酸锂环形谐振器的俯视扫描电子显微镜图像，弯曲半径为 m。（c）、（d）铌酸锂波导的高倍（k）彩色扫描电子显微镜图像，可观察到较小的粗糙度。

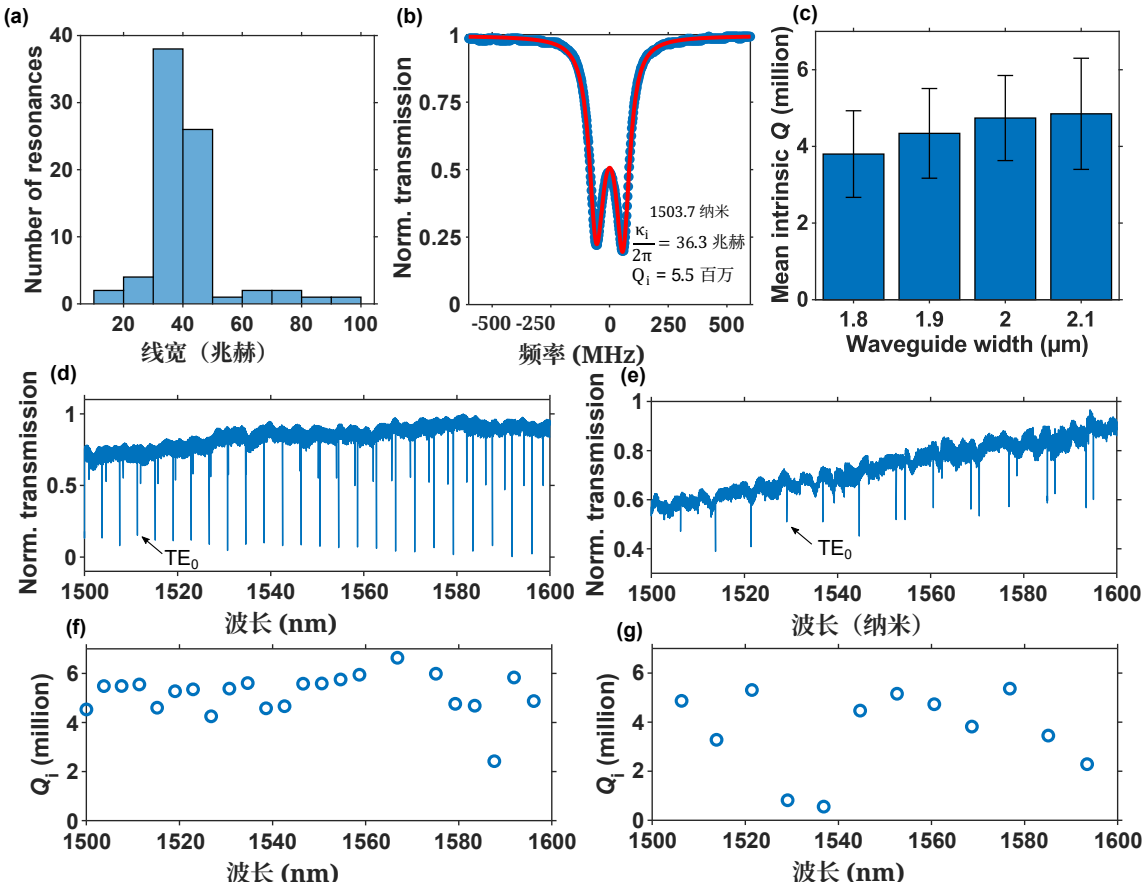

图 3。（a）若干器件中谐振本征线宽的直方图，这些器件的波导宽度均为 2.1 μm，半径为 40 μm。（b）图（d）中 1503.7 nm 处典型谐振的拟合光谱。（c）波导宽度为 1.8–2.1 μm、半径为 40 μm 的器件的统计本征 Q及误差条。（d）自由光谱范围为 500 GHz（半径 40 μm）的环形谐振器的典型透射光谱，以及（f）其本征 Q。（e）、（g）自由光谱范围为 1 THz（半径 20 μm）的环形谐振器的类似光谱及 Q。

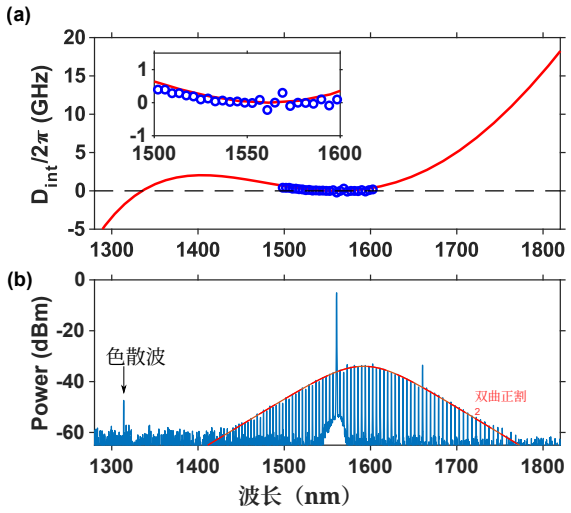

图 4. (a) 波导宽度为 1.8 μm 时积分色散的模拟结果（红色）和测量结果（蓝色）。(b) 重复频率为 500 GHz 的单孤子光谱。

形式包括二氧化硅 [28]，硅 [29]，和氮化硅[30, 31]。最近，基于铌酸锂的孤子微梳也已得到展示，并观察到了双向切换和自启动 [7, 32]等新现象。我们的低损耗、高紧凑度铌酸锂波导适用于孤子梳的生成，并能显著提高孤子脉冲列的频率间隔/重复频率。为展示紧凑型铌酸锂全刻蚀波导平台的潜力，我们展示了一个 0.5 THz 孤子微梳。我们采用半径为 40 μm、环形波导宽度为 1.8 μm 的微环谐振器生成频率梳。这些器件的平均 Q因子（如图 3(c) 所示）为 3.8×10^6。图 4(a) 展示了模拟和测得的积分色散$D_{\mathrm{int}} = \omega_\mu - \omega_0 - \mu D_1$，提取出的群速度色散 β_2 为 -10 ps^2/km。器件经过设计，可实现较小的反常色散，从而获得明孤子态 [33]。采用 Toptica 激光器（CTL 1550），经掺铒光纤放大器放大后，在波长 1560.7 nm 处泵浦环形谐振器。手动将激光器波长调过谐振峰，即可获得宽带孤子微梳，无需快速调谐技术或外部触发；这归因于铌酸锂中的光折变效应 [7, 19]。单孤子频率梳通过光谱分析仪测得，结果如图 4(b) 所示。图 4(b) 中，频率梳光谱呈现平滑的 sech^2 形包络；此外，在接近 1300 nm 处还观察到一个色散波，这与图 4(a) 中模拟的色散预测相符。

总之，我们展示了一种用于集成光子学的全刻蚀条形铌酸锂波导平台，该平台兼具超低传播损耗和超小电路尺寸的优势。其制备工艺仅需使用常见的电子束光刻胶进行一次曝光/刻蚀。高品质铌酸锂波导具有光滑的侧壁（低侧壁粗糙度）和强约束的深刻蚀结构，使我们能够实现尺寸空前紧凑且传播损耗超低的器件。与具有相同低损耗水平的最新成果相比，我们通过实验展示了集成密度提高 16 倍。因此，得以实现并首次在铌酸锂中展示太赫兹级高-Q 微环谐振器，其弯曲半径为 20 μm。与其他研究结果相比，我们的环形谐振器的 Q/V 几乎提升了一个数量级。高-Q/V 微环谐振器还可实现宽带孤子微梳的产生，其在铌酸锂中的重复频率最高可达 0.5 THz。低损耗铌酸锂波导平台可用于电光器件、非线性频率转换和通信等大多数应用场景。凭借其高度紧凑的特点，该平台尤其适用于需要大量元件才能实现复杂功能的场景，例如大规模光开关阵列 [34]、集成光子激光雷达 [35], 和光学人工智能 [36]。此外，我们具有优异时空光场约束能力的高 Q/V 光学谐振器，也有助于实现高效非线性过程、高精细度光学生物化学传感器以及腔量子电动力学（cQED）研究 [37]。未来，为了实现损耗更低、尺寸更紧凑的铌酸锂光子集成电路，还应进一步优化制备流程，以降低侧壁粗糙度。

资助：瑞典研究理事会（VR-2017-05157、VR-2021-04241、VR-2016-06077）；
致谢：作者感谢查尔姆斯纳米制造实验室 Myfab 的洁净室工作人员提供讨论和培训。

[1] D. Zhu、L. Shao、M. Yu、R. Cheng、B. Desiatov、C. Xin、Y. Hu、J. Holzgrafe、S. Ghosh、A. Shams- Ansari、E. Puma、N. Sinclair、C. Reimer、M. Zhang 和 M. Lon˘car，《薄膜铌酸锂上的集成光子学》，《Adv. Opt. Photonics》**13**，242（2021）。[2] Y. Qi 和 Y. Li，《集成铌酸锂光子学》，《纳米光子学》**9**，1287（2020）。[3] A. Honardoost、K. Abdelsalam 和 S. Fathpour，《重焕多功能光子材料的活力：薄膜铌酸锂铌酸锂，《Laser Photonics Rev.》**14**，2000088（2020）。[4] R. Weis 和 T. Gaylord，铌酸锂：物理性质与晶体结构概述，《Appl. Phys. A》**37**，191（1985）。[5] C. Wang、M. Zhang、X. Chen、M. Bertrand、A. Shams-Ansari、S. Chandrasekhar、P. Winzer 和 M. Lon˘car，工作电压兼容 CMOS 的集成铌酸锂电光调制器，《Nature》**562**，101（2018）。

[6] 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，用于 100 gbit s- 1 及更高速率的高性能混合集成硅和铌酸锂马赫–曾德尔调制器，《自然·光子学》**13**，359（2019）。[7] 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）。[8] M. Zhang、B. Buscaino、C. Wang、A. Shams-Ansari、C. Reimer、R. Zhu、J. M. Kahn 和 M. Lonˇcar，铌酸锂微环谐振器中的宽带电光频率梳产生，《Nature》**568**，373（2019）。[9] J. Lu、J. B. Surya、X. Liu、A. W. Bruch、Z. Gong、Y. Xu 和 H. X. Tang，具有 250,000%/W 二次谐波产生效率的周期性极化薄膜铌酸锂微环谐振器，《光学》**6**，1455（2019）。[10] J.-Y. Chen、Z.-H. Ma、Y. M. Sua、Z. Li、C. Tang 和 Y.-P. Huang，准相位匹配铌酸锂微环中的超高效频率转换，《光学》**6**，1244（2019）。[11] R. Nehra、R. Sekine、L. Ledezma、Q. Guo、R. M. Gray、A. Roy 和 A. Marandi，纳米光子学中的少周期真空压缩，arXiv 预印本 arXiv:2201.06768（2022）。[12] J. Zhao、C. Ma、M. R¨using 和 S. Mookherjea，周期性极化薄膜铌酸锂波导中的高质量纠缠光子对产生，《物理评论快报》**124**，163603（2020）。[13] J. Lu、A. Al Sayem、Z. Gong、J. B. Surya、C.-L. Zou 和 H. X. Tang，超低阈值薄膜铌酸锂光学参量振荡器，《光学》**8**，539（2021）。[14] T. P. McKenna、H. S. Stokowski、V. Ansari、J. Mishra、M. Jankowski、C. J. Sarabalis、J. F. Herrmann、C. Lan- grock、M. M. Fejer 和 A. H. Safavi-Naeini，芯片上的超低功耗二阶非线性光学，《Nat. Com- mun.》**13**，4532（2022）。[15] M. Zhang、C. Wang、R. Cheng、A. Shams-Ansari 和 M. Lonˇcar，单片超高品质因数铌酸锂微环谐振器，《光学》**4**，1536（2017）。[16] R. Zhuang、J. He、Y. Qi 和 Y. Li，采用湿法刻蚀制备的高品质因数薄膜铌酸锂微环，《先进材料》，2208113（2022）。[17] Z. Li、R. N. Wang、G. Lihachev、Z. Tan、V. Sni- girev、M. Churaev、N. Kuznetsov、A. Siddharth、M. J. Bereyhi、J. Riemensberger、 *et al.*，紧密限制光场的铌酸锂光子集成电路与激光器，arXiv 预印本 arXiv:2208.05556（2022）。[18] A. Shams-Ansari、G. Huang、L. He、Z. Li、J. Holzgrafe、M. Jankowski、M. Churaev、P. Kharel、R. Cheng、D. Zhu、N. Sinclair、B. Desiatov、T. Kippenberg 和 M. Lonˇcar，降低薄膜铌酸锂波导中的材料损耗，《APL光子学》**7**，081301（2022）。[19] Z. Gong、X. Liu、Y. Xu 和 H. X. Tang，近倍频程带宽的铌酸锂孤子微梳，《光学》**7**，1275（2020）。[20] 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：开启电磁波谱，《科学》**379**，eabj4396（2023）。[21] M. Bazzan 和 C. Sada，铌酸锂中的光波导：近期发展与应用，应用物理评论 **2**，040603（2015）。[22] P. G. Gl¨oersen，离子束刻蚀，真空科学与技术杂志 A **12**，28（1975）。[23] F. Kaufmann、G. Finco、A. Maeder 和 R. Grange，面向集成光子学的铌酸锂无再沉积电感耦合等离子体刻蚀，纳米光子学（2023）。[24] E. S. Hosseini、S. Yegnanarayanan、A. H. Atabaki、M. Soltani 和 A. Adibi，在可见光波长下高 Q 单模滑轮耦合平面氮化硅微盘谐振器的系统设计与制造，光学快报 **18**，2127（2010）。[25] P. Del'Haye、O. Arcizet、M. L. Gorodetsky、R. Holzwarth 和 T. J. Kippenberg，用于测量微腔色散的频率梳辅助二极管激光光谱学，《自然·光子学》**3**，529（2009）。[26] K. Twayana、Z. Ye、´O. B. Helgason、K. Vijayan、M. Karlsson、 *et al.*，频率梳校准的扫波长干涉测量，光学快报 **29**，24363（2021）。[27] 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）。[28] X. Yi、Q.-F. Yang、K. Y. Yang、M.-G. Suh 和 K. Vahala，高 Q 二氧化硅微谐振器中微波速率的孤子频率梳，《光学》**2**，1078（2015）。[29] M. Yu、Y. Okawachi、A. G. Griffith、M. Lipson 和 A. L. Gaeta，硅微谐振器中的锁模中红外频率梳，《光学》**3**，854（2016）。[30] V. Brasch、M. Geiselmann、T. Herr、G. Lihachev、M. H. Pfeiffer、M. L. Gorodetsky 和 T. J. Kippenberg，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（2016）。[31] Z. Ye、F. Lei、K. Twayana、M. Girardi、P. A. Andrekson 和 V. Torres-Company，面向低重复频率孤子微梳的集成式超紧凑高 Q 氮化硅微谐振器，《Laser Photonics Rev.》**16**，2100147（2022）。[32] Z. Gong、X. Liu、Y. Xu、M. Xu、J. B. Surya、J. Lu、A. Bruch、C. Zou 和 H. X. Tang，z 切铌酸锂微环谐振器中的 $2\ \mu$m 孤子微梳生成，光学快报 **44**，3182（2019）。[33] T. Herr、V. Brasch、J. D. Jost、C. Y. Wang、N. M. Kondratiev、M. L. Gorodetsky 和 T. J. Kippenberg，光学微谐振器中的时间孤子，《自然·光子学》**8**，145（2014）。[34] T. J. Seok、K. Kwon、J. Henriksson、J. Luo 和 M. C. Wu，超越芯片尺寸限制的晶圆级硅光子开关，《光学》**6**，490（2019）。[35] X. Zhang、K. Kwon、J. Henriksson、J. Luo 和 M. C. Wu，大规模基于微机电系统的硅光子激光雷达，《Nature》**603**，253（2022）。[36] H. Zhang、M. Gu、X. Jiang、J. Thompson、H. Cai、S. Paesani、R. Santagati、A. Laing、Y. Zhang、M. Yung、 *et al.*，用于实现复值神经网络的光学神经芯片，《自然·通讯》**12**，457（2021）。[37] K. J. Vahala，光学微腔，《Nature》**424**，839（2003）。