

# 铌酸锂基光量子器件与集成技术：机遇与挑战\*

田晓慧<sup>†</sup> 尚鸣昊 祝世宁 谢臻达<sup>††</sup>

(南京大学电子科学与工程学院 固体微结构物理国家重点实验室 南京 210093)

## Lithium niobate based photonic quantum devices and integration technology: opportunities and challenges

TIAN Xiao-Hui<sup>†</sup> SHANG Ming-Hao ZHU Shi-Ning XIE Zhen-Da<sup>††</sup>

(National Laboratory of Solid State Microstructures, School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

2023-07-15收到

<sup>†</sup> email: tianxiaohui@nju.edu.cn

<sup>††</sup> email: xiezhenda@nju.edu.cn

DOI: 10.7693/w120230802

**摘要** 铌酸锂材料具有宽的透光范围和高的非线性光学、电光、声光、热光系数，且化学性能稳定，是理想的光子集成芯片的衬底材料。在量子光学领域，人们已经发展出一系列铌酸锂基集成器件，能够实现光子态的高效率产生、调控、频率转换、存储和异质集成的单光子探测，有望实现全集成的频率态操控、确定性多光子态制备和单光子间相互作用，最终形成全功能集成的有源光量子芯片，推动量子物理基础研究和光量子信息应用发展。文章回顾了基于铌酸锂基量子集成的研究进展，并对其在未来光量子信息时代的机遇与挑战进行探讨。

**关键词** 量子光学，光量子信息，铌酸锂，光学超晶格，集成光量子芯片

**Abstract** Lithium niobate has a wide light transparency range, high nonlinear-optic, electro-optic, acousto-optic and thermo-optic coefficients, as well as stable chemical properties, which makes it an ideal substrate material for photonic integration. In the field of quantum optics, a series of lithium niobate based integrated devices have been developed, which can enable the highly efficient generation, manipulation, frequency conversion, quantum storage and integrated single-photon detection of photon states, and has the potential for fully integrated photon frequency manipulation, deterministic multi-photon state generation and photon-photon interaction. This may push forward the development of fully functional integrated quantum optical circuits, which will further promote fundamental quantum physics studies and practical applications of quantum information technology. This paper will review the progress of lithium niobate based quantum integration, and its future opportunities and challenges.

**Keywords** quantum optics, photonic quantum information, lithium niobate, optical superlattice, integrated photonic quantum chip

\* 国家重点研发计划(批准号: 2019YFA0705000)、国家自然科学基金重大研究计划(批准号: 51890861; 62293523)资助项目, 江苏省科技厅前沿引领项目(批准号: BK20192001)

# 1 迈进铌酸锂谷

近年来，量子光学得到了迅速发展，不仅仅表现在量子物理基础研究取得一系列突破，光量子信息也逐步走出实验室，并最终走向产业应用。量子光学研究的进一步深入和光量子信息实用化的关键在于光量子集成技术的突破，采用光量子集成器件替代体块光学元件，有望大大缩小量子光路的体积、重量，在有限的尺寸内完成所需的功能，最终实现集光子态产生、调控、存储、探测于一体的全功能集成光量子芯片。

为了实现这一目标，人们发展了以硅、氧化硅、氮化硅、铌酸锂等材料为衬底的光量子集成技术，演示了具有不同功能的光量子集成器件及芯片<sup>[1, 2]</sup>。其中铌酸锂材料具有透明波段宽、吸收损耗低、抗光学损伤阈值高等特点，尤其是同时具有很高的非线性光学、电光、声光、热光系数，在经典光学研究中就已经被认为是理想的光子集成衬底材料<sup>[3, 4]</sup>。经过数十年的发展，人们已经掌握了一系列基于铌酸锂的微加工技术，能够基于准相位匹配原理和畴工程技术设计制备光学超晶格等人工微结构材料<sup>[5]</sup>；通过钛扩散、质子交换等技术加工低损耗的光学波导<sup>[6]</sup>；近年来人们又基于智能剥离技术研发了铌酸锂薄膜和相关器件的加工工艺，大大缩小了铌酸锂功能器件的体积，使大规模铌酸锂光子集成成为可能<sup>[7, 8]</sup>。目前铌酸锂集成器件已经能够实现高效率光学频率转换<sup>[9, 10]</sup>、高速低功耗电光调制<sup>[11]</sup>、声光调制<sup>[12]</sup>、高性能射频滤波<sup>[13]</sup>、微腔光学频率梳产生<sup>[14]</sup>等功能集成。为此，美国哈佛大学发表了题为“Now entering, Lithium Niobate Valley”的报道<sup>[15]</sup>，指出：“铌酸锂材料对于光子学的意义，等同于硅材料对于电子学的意义。”铌酸锂集成器件不仅大大推动了经典集成光学技术的发展，对于光量子集成也具有重要意义<sup>[16, 17]</sup>，它极大地丰富了量子集成器件的“工具箱”，可以实现高码率量子光源产生、高速高保真度光子态操控、高效率单光子频率转换等功能，并有望实现全集成的光子频率

态操控、确定性多光子态产生、光子态存储和探测，为全集成的有源光量子芯片提供了一种可能的方案，如图1所示。

本文将回顾铌酸锂基高性能光量子器件和光量子集成芯片的研究进展，并对其在未来光量子信息时代的机遇与挑战进行探讨。

## 2 铌酸锂基光量子集成器件：全功能集成的基石

### 2.1 铌酸锂基量子光源

量子光源是光量子信息的核心资源。目前光子态制备最常用的办法是基于自发参量下转换的双光子态制备，在这个过程中一个高频光子通过非线性光学作用转换为两个低频光子，由于能量守恒和动量守恒条件的约束，这两个光子具有内禀的非经典关联或者纠缠特性。铌酸锂材料具有很高的非线性系数，并且人们已经发展了完善的铌酸锂基光学超晶格和低损耗波导等光学微结构的制备技术，可以充分利用材料最高的非线性光学系数，实现很高的光子产率。更重要的是，利用准相位匹配原理和畴工程设计，人们能够通过光学微结构设计对光子态进行调控<sup>[18]</sup>，如图2(a)所示，光学超晶格中产生的光子态波函数可以写成

$$|\Psi\rangle = \psi_0 \sum_{\vec{k}_s, \vec{k}_i} \delta(\vec{k}_s + \vec{k}_i + \vec{G} - \vec{k}_p) \hat{a}_s^\dagger \hat{a}_i^\dagger |0\rangle. \quad (1)$$

其中 $\vec{k}_j$  ( $j = p, s, i$ ) 分别是泵浦和信号、闲频光子波矢， $\psi_0$ 是归一化常数， $\hat{a}_s^\dagger$ 和 $\hat{a}_i^\dagger$ 是产生算符， $|0\rangle$ 表示真空态， $\vec{G}$ 是畴结构对应的动量空间的倒格矢，动量守恒条件由 $\delta(\vec{k}_s + \vec{k}_i + \vec{G} - \vec{k}_p)$ 表示。因



图1 全功能集成的有源光量子芯片

此人们可以通过对微畴结构进行人工调控来改变倒格矢 $\vec{G}$ ，从而实现光子态的产生和调控集成的量子光源。光学超晶格不仅限于周期结构，南京大学、斯坦福大学、波士顿大学等团队已经成功研发了准周期<sup>[19]</sup>、多周期<sup>[20]</sup>、非周期<sup>[21]</sup>和不同结构的二维光学超晶格<sup>[22, 23]</sup>，如图2(b)所示，实现了若干时间能量纠缠光源、路径纠缠光源的高效率制备和频谱、空间分布等维度的集成化调控，展示了利用光学超晶格集成量子光源实现复杂光子态的能力。

除了体块光学超晶格之外，铌酸锂基的光学波导技术经过数十年的发展也已经完善，包括质子交换波导、钛扩散波导和铌酸锂薄膜波导等。这些波导都可以实现光场局域，使铌酸锂基光子集成芯片成为可能。对量子光源来说，波导器件的引入能够进一步提升光子产率。日内瓦大学团队在2001年首次实现了基于质子交换铌酸锂光波导的高亮度纠缠光源，光子对产率达到约 $7.5 \times 10^9$  Hz/mW<sup>[24]</sup>。南京大学、德国帕德博恩大学的团队也完成了基于质子交换和钛扩散光学超晶格波导的纠缠光源制备，纠缠维度包括路径<sup>[25]</sup>、偏振<sup>[26, 27]</sup>等多个自由度。另一方面，基于铌酸锂薄膜的光学波导具有更小的截面尺寸和更大的折射率对比度，有望进一步提升光子产率和缩小器件尺寸，实现高集成度的光量子芯片。2021年，南京大学和中山大学团队合作，制备了基

于铌酸锂薄膜波导的时间—能量纠缠光源<sup>[28]</sup>，如图2(c)所示，实现了 $2.79 \times 10^{11}$  Hz/mW的光子产率，这是目前单通非线性光学波导中产率最高的集成量子光源。此外，亚微米畴结构的光学超晶格波导能够实现反向准相位匹配，大大压窄光子对的线宽<sup>[29]</sup>，有望用于量子存储兼容的双光子源产生和远距离光子态传输。2020年德国帕德博恩大学团队完成了小周期极化的钛扩散铌酸锂光学超晶格波导制备<sup>[30]</sup>，实验验证了线宽仅GHz量级的片上双光子光源制备。

将光学超晶格波导与谐振腔相结合也能够用于窄带双光子光源制备，与单通光学超晶格波导相比，进一步提升了光子对生成的亮度(单位带宽的光子对产率)。2015年，德国帕德博恩大学团队通过在钛扩散铌酸锂波导的端面镀高反射膜形成法布里—珀罗谐振腔，实现了亮度达 $3 \times 10^4$  Hz/(mW·MHz)的非简并单纵模集成量子光源<sup>[31]</sup>。2020年，史蒂文斯理工学院团队通过在铌酸锂薄膜波导上制备小半径的微环谐振腔，制备了高亮度、高纯度、低信噪比的量子光源，实现了约 $1.4 \times 10^6$  Hz/(mW·MHz)的高亮度，并用于预知单光子源<sup>[32]</sup>，如图2(d)所示。

目前铌酸锂基量子光源已经展示了其高亮度、高集成度等特点，为有源集成的光量子芯片制备打下了很好的基础。

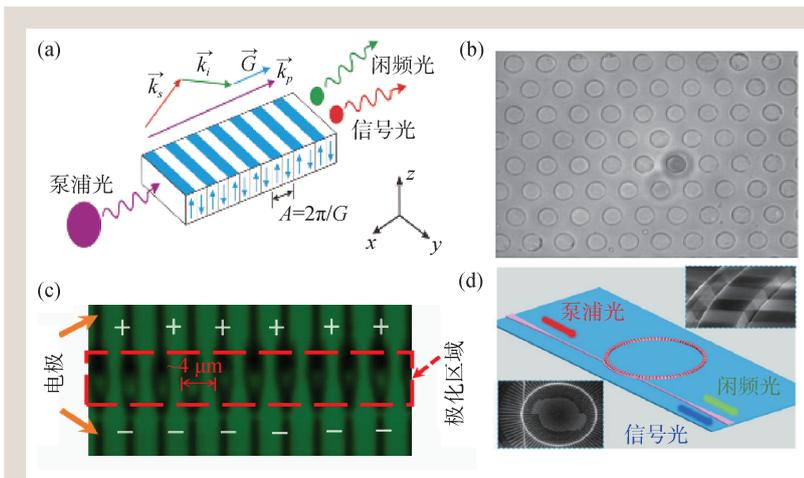


图2 基于光学超晶格的集成量子光源 (a)光学超晶格集成量子光源示意图；(b)二维光学超晶格实物照片<sup>[23]</sup>；(c)基于铌酸锂薄膜波导的单光子量子光源<sup>[28]</sup>；(d)基于铌酸锂薄膜波导微环谐振腔的集成量子光源<sup>[32]</sup>

## 2.2 铌酸锂基光子态操控

实现光子态的高速率、高保真度集成操控是光量子集成的关键。基于光量子集成器件能够实现片上路径、偏振、频率等多自由度的态操控，相比基于体块光学元件的量子光路大大缩小了体积和重量，同时实现了更高的干涉稳定度，对于提升量子态操控的集成度具有重要意义。与其他衬底材料相比，铌酸锂基的量子集成器件可以通过电光、声光、热光等效应，在不引入额外损耗

的前提下实现对光子态的高速调控,尤其是采用片上电光调制器能够实现对光子频率的调控,有望解锁具有无限维度的频率自由度并加以利用,极大地拓展光量子信息的可用资源。

早在2012年,英国布里斯托大学的研究者就已经基于钛扩散铌酸锂波导制备了可电控的量子干涉

光路,实现了光子态偏振和路径维度的动态操控<sup>[33]</sup>。此后,德国帕德博恩大学的研究者们进一步实现了基于钛扩散铌酸锂波导的片上时序动态操控<sup>[34]</sup>。今年最新的工作来自丹麦哥本哈根大学和德国明斯特大学的研究者们,他们利用铌酸锂薄膜集成平台制备了可编程量子干涉仪,可以实现包括片上双光子干涉、单光子确定性路径转换及结构更为复杂的双光子量子比特干涉在内的若干光子态快速操控功能<sup>[35]</sup>,如图3(a)所示,展示了铌酸锂基光子态操控器件的应用潜力。

光子频率调控是铌酸锂基光量子调控的一大特色。2018年,来自美国普渡大学和橡树岭国家实验室的团队利用基于铌酸锂波导的电光调制器及空间光脉冲整形器实现了首个频率自由度的单比特量子门(阿达玛门),光子态操控保真度高达0.9999以上<sup>[36]</sup>。2019年,该团队进一步完成了不同频率之间的耦合,实现了频率自由度的双比特量子门(控制非门),保真度可以达到0.91<sup>[37]</sup>。2021年,美国哈佛大学研究人员基于铌酸锂薄膜集成平台,利用一对耦合的微环实现了可调谐的全片上频率分束器,若将其应用于光量子信息,在无需外加脉冲整形器的情况下即可实现对单个量子比特的任意操控<sup>[9]</sup>,如图3(b)所示。

### 2.3 铌酸锂基单光子频率转换

在量子光学与光量子信息应用中,不同功能对于光子频率有不同的要求:1.5  $\mu\text{m}$ 附近的通信波段适合在光纤和自由空间介质中进行远距离的

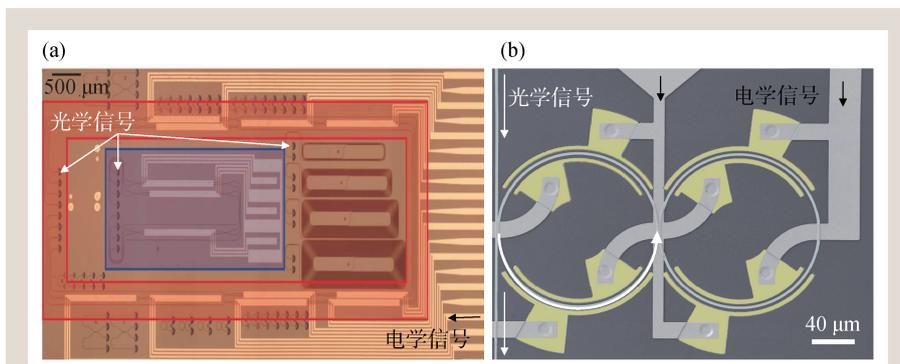


图3 铌酸锂基片上单光子操控器件 (a)基于铌酸锂薄膜的可编程量子干涉仪<sup>[35]</sup>; (b)可用于频率编码光子态操控的铌酸锂集成电光调制频率分束器<sup>[9]</sup>

传输需要;可见光到近红外波段的光子能够满足高性能、小型化的硅单光子探测器需要;量子存储需要光子波长处于对应的原子能级附近。如果能够实现高效率的单光子频率转换,就能够满足不同功能的量子光学需求,推动信息系统构建<sup>[38]</sup>。铌酸锂基集成器件高效率、低损耗的特性使其成为单光子频率转换的天然选择。这方面的研究始于体块材料的铌酸锂光学超晶格<sup>[39, 40]</sup>,近年来基于光学超晶格波导的铌酸锂基集成器件也日趋成熟,受到日益重视。更大的集成度带来了更高的转换效率,在特定泵浦激光作用下可以实现近100%的单光子频率转换。

斯坦福大学团队于2004年首次在质子交换铌酸锂波导平台上实现了通信波段到可见光波段的单光子频率上转换器件,器件有效长度4.8 cm,在片上泵浦功率约88 mW时实现了高达82%的片上频率转换效率<sup>[41]</sup>。此后,斯坦福大学、中国科学技术大学、慕尼黑大学等团队也纷纷进入这一领域,采用钛扩散和质子交换波导都实现了很高的单光子频率转换效率<sup>[42-45]</sup>,部分器件已经实用,用于近红外波段单光子探测、远距离量子存储单元的纠缠、原子-光子纠缠的远距离分发等应用。

2023年,中国科学技术大学研究团队制备了首个基于铌酸锂薄膜波导的单光子频率上转换器件,在仅5.3 mm的有效作用长度下,实现了73%的片上光子频率转换效率,片上泵浦激光强度约310 mW<sup>[10]</sup>,如图4所示。该结果表明基于铌酸锂薄膜器件进行单光子频率转换是可行的。如果能

够进一步提升器件制备质量,则有望大大降低确定性单光子频率转换所需的泵浦功率,甚至实现二极管激光器直接泵浦的确定性单光子频率转换。铌酸锂薄膜单光子频率转换器特别适合于全片上的光子频率转换,如果用做独立器件使用还需要解决输入输出损耗问题,从而实现高系统效率。

## 2.4 铌酸锂基单光子存储

量子态是光量子信息的载体,实现光子态的存储对于远距离量子通信等应用具有重大意义。单光子存储器可以分为仅提供较短存储时间的“单光子缓冲器”,及可长时间保持光子态存储状态的单光子存储器。单光子缓冲器通常无需对编码信息光子态的性质进行改变,仅利用集成可控的延时线、布拉格光栅、光学微腔等操控器件实现对光子态时序的延迟。对于光子态更长时间的存储需求,则需要将光子中编码的信息转移到相对稳定的原子中来实现。

对于单光子缓冲器,帕德博恩大学团队基于钛扩散铌酸锂波导已初步实现了全片上的可控延

时结构,可控时长约皮秒量级<sup>[34]</sup>。铌酸锂薄膜波导具有更高的集成度和更低的传输损耗,目前研究者们已实现了米级的低损耗延时波导<sup>[46]</sup>、品质因子( $Q$ )达到亿量级的光学微腔<sup>[47]</sup>等集成结构,支持实现具有实际应用价值的片上缓冲器。今年,来自丹麦科技大学和中山大学的研究者们实现了基于铌酸锂薄膜的可控延时结构,实现了纳秒量级的集成可控单光子缓冲<sup>[48]</sup>,如图5(a)所示。

对于单光子存储器,早在2007年,瑞士日内瓦大学和德国帕德博恩大学的研究人员就首次在钛扩散波导中证明了通过稀土离子掺杂实现光子态存储的可行性<sup>[49]</sup>。此后,研究者们又开发了若干种类离子掺杂的技术<sup>[50]</sup>,不同的离子拥有不同的跃迁能级,可以实现对不同波段光子态的存储。今年最新的工作,美国马里兰大学的研究人员已实现将稀土离子掺杂到铌酸锂薄膜的技术突破,研制了基于铌酸锂薄膜光芯片的单光子存储器,实现了超过100 MHz的存储带宽和长达250 ns的存储时间<sup>[51]</sup>,如图5(b)所示,为未来进一步实现全集成的铌酸锂基光量子芯片提供了技术支撑。

## 2.5 铌酸锂基异质集成器件

人们使用铌酸锂集成器件能够实现光子态产生、调控、频率转换和存储,全功能的量子芯片还需要将泵浦激光和单光子探测器进行片上集成,只依靠铌酸锂材料难以满足这些要求,可以引入其他材料,通过铌酸锂基异质集成的方法实现。

III-V族半导体材料是人们常用的激光增益材料,因此将半导体材料与铌酸锂异质集成能够满足量子光源泵浦光的要求。2022年,哈佛大学与剑桥大学的研究者们利用倒装芯片热压接合,将

磷化铟基的分布式反馈(DFB)激光器与铌酸锂薄膜调制器进行集成,实现了高功率、低噪声、快调谐的片上集成激光器<sup>[52]</sup>,如图6(a)所示。2023年,中山大学研究团队利用晶片键合技术,实现了晶圆级铌酸锂器件与III-V族半导

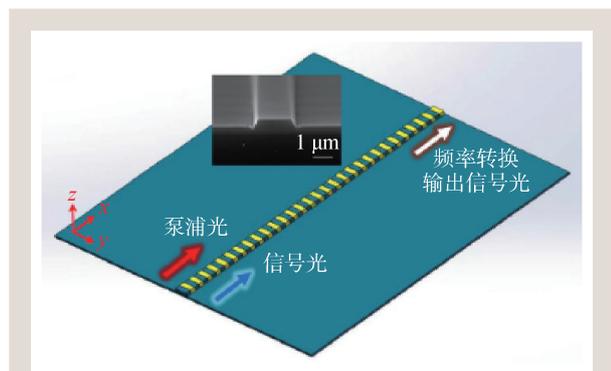


图4 基于铌酸锂薄膜波导的频率转换器件示意图,其中插图为转换波导的电镜照片

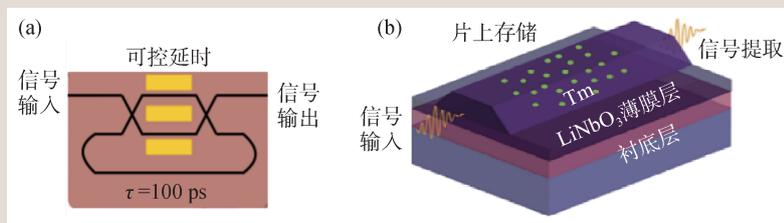


图5 基于铌酸锂薄膜的单光子缓冲器(a)<sup>[48]</sup>和单光子存储器(b)<sup>[49]</sup>

体激光器的混合集成<sup>[53]</sup>。此外，罗切斯特大学和华东师范大学等研究团队也发展了有源和无源器件的拼接技术，用于铌酸锂基的激光器制备<sup>[54, 55]</sup>。这些片上激光器为铌酸锂基量子光源的泵浦激光集成提供了新的思路。

铌酸锂基单光子探测的研究目前主要集中在超导纳米线与铌酸锂芯片的集成。2020年，耶鲁大学团队首次将NiN超导纳米线单光子探测器集成在铌酸锂薄膜波导之上，实现了46%的单光子探测效率<sup>[56]</sup>，如图6(b)所示。2021年，德国明斯特大学团队同时将NbTiN超导纳米线单光子探测器与电光调制光子态操控器件集成到了基于铌酸锂薄膜波导的网路上，在低温环境下实现了静态可重构的铌酸锂集成单光子探测器，调制速度达到了1 GHz，探测效率约27%<sup>[57]</sup>。同年，德国帕德博恩大学团队利用倏逝波耦合实现了非晶WSi纳米线与钛扩散铌酸锂波导的贴片集成，验证了基于铌酸锂弱波导体系实现集成单光子探测器的可行性<sup>[58]</sup>。上述结果证明低温下工作的铌酸锂基超导探测器是可行的，这为全集成的铌酸锂光子芯片补上了重要一环，当然低温下量子光源、光子态操控器件的性能尚有待验证。

目前，人们已经发展了若干铌酸锂基异质集成的加工方法，能够通过半导体等材料与铌酸锂的异质集成，实现片上泵浦激光和单光子探测等功能集成，进一步拓展了铌酸锂基光量子集成的能力。

### 3 铌酸锂基光量子集成芯片

综上，铌酸锂基光量子集成“工具箱”<sup>[59]</sup>已经完善，高性能的集成光源、集成光子态调控、光子频率转换器件已经发展成熟，片上单光子探测器、存储器也获得了一定发展，这为多功能有源集成的铌酸锂光量子芯片制备提供了基础。

目前，铌酸锂基光量子芯片的研究已经取得了一定的成果。2014年，南京大学团队将量子光源与路径干涉器件集成在同一个质子交换铌酸锂芯片上，制备了首个铌酸锂基光量子芯片<sup>[25]</sup>。如

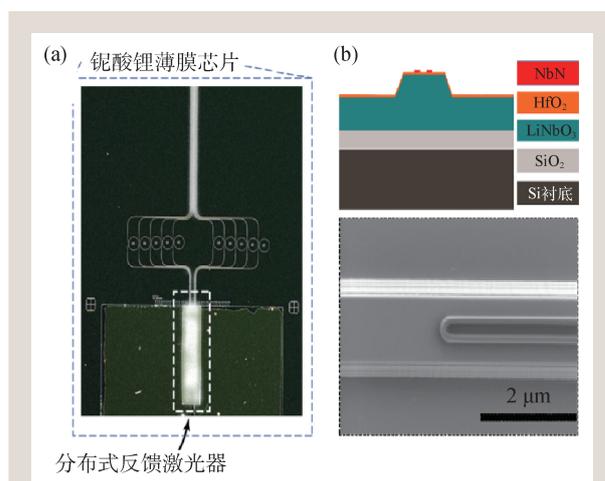


图6 铌酸锂基异质集成器件 (a)异质集成的铌酸锂基窄线宽激光器<sup>[52]</sup>；(b)铌酸锂基单光子探测器<sup>[56]</sup>，其中上图为NbN与铌酸锂薄膜的异质集成结构示意图，下图为器件电镜图

图7(a)所示，该芯片通过纠缠光源、光子干涉仪、电光调制等功能器件的同片集成，实现了两种路径纠缠光子态的高效率产生及快速切换功能演示。2018年，帕德博恩大学团队利用钛扩散铌酸锂波导，实现了集纠缠光子对产生和电控偏振态调控为一体的集成光量子芯片<sup>[34]</sup>，如图7(b)所示。利用片上光子态偏振切换传输，该团队实现了动态可调光延迟，可调范围达12 ps，并以此为基础演示了全集成的片上双光子干涉实验。

今后，铌酸锂薄膜器件等技术的发展为更大规模的铌酸锂光量子集成提供了基础，而铌酸锂基光量子芯片中电光、声光、热光等丰富的光子态高速调控方式也将在可重构的量子光路构建中发挥巨大作用，推动光计算、微波光学和量子光学等应用的突破。除了这些可以预见的发展之外，未来铌酸锂光量子集成还有望突破单光子相互作用这一根本难题。南京大学团队最近发表的一项理论研究表明<sup>[60]</sup>，基于铌酸锂薄膜的光量子芯片有可能实现基于级联确定性单光子下转换的确定性多光子光源，所需器件的指标处于现有铌酸锂薄膜器件加工的能力范围之内，如图7(c)所示。该方案也为确定性的光子间相互作用乃至确定性双光子逻辑门的构建提供了理论依据，一旦实验上成功实现，就有望对光量子信息的应用产生重要影响。

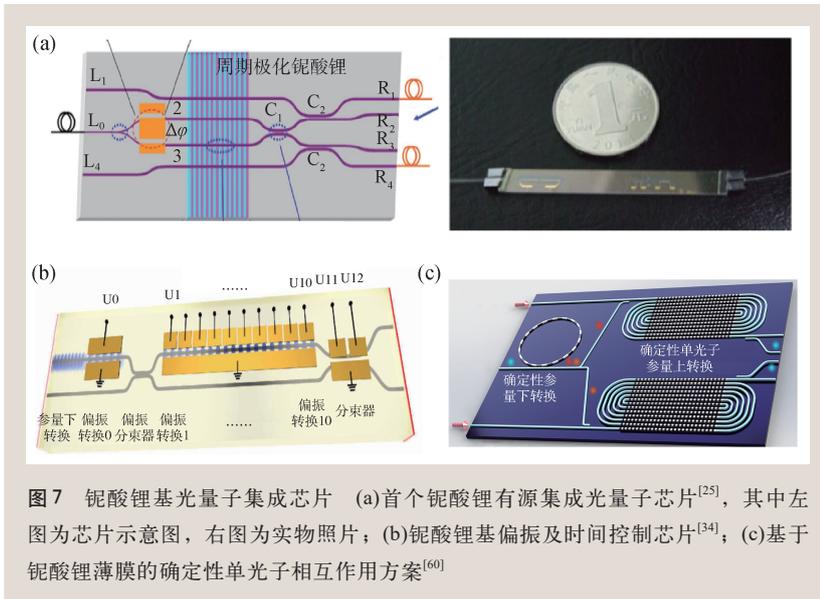


图7 铌酸锂基量子集成芯片 (a)首个铌酸锂有源集成光量子芯片<sup>[25]</sup>,其中左图为芯片示意图,右图为实物照片;(b)铌酸锂基偏振及时间控制芯片<sup>[34]</sup>;(c)基于铌酸锂薄膜的确定性单光子相互作用方案<sup>[60]</sup>

“硅”。目前,铌酸锂薄膜器件在高效率光学频率转换、高速低功耗电光调制、声光调制、高性能射频滤波、微腔光学频率梳产生等经典领域已取得重要突破,引起了学术与产业界的广泛关注。在光量子集成方向,铌酸锂薄膜器件有望实现片上光子频率态的直接调控,解锁具有无限维度的光子频率自由度的开发应用;实现确定性的多光子态制备和确定性的光子间相互作用,突破片上多光子比特产生和调控;并最终实现全功能集成的量子芯片。

## 4 机遇与挑战

经过近20年的发展,铌酸锂基集成器件已经展示了其在光量子集成应用的突出优势,实现了目前最高亮度的双光子光源、多自由度和高维度的光子态高速动态调控和最高效率的单光子频率转换,在量子光学、光量子信息等领域的研究与应用中发挥了重要的作用;利用掺杂、异质集成等技术,人们实现了铌酸锂基单光子探测器、存储器、激光器等集成器件的突破,为进一步实现铌酸锂基量子集成芯片奠定了基石。

近年来,随着铌酸锂薄膜器件的成功制备和飞速发展,铌酸锂基集成器件迎来了新的机遇,有望在光信息时代发展中成为下一代的光学

为了实现上述目标,关键在于高质量铌酸锂集成器件的设计、制备和多器件大规模集成。铌酸锂薄膜有望实现低损耗、高集成的光量子芯片,其制备依赖于高精度的微纳加工技术,需要进一步完善器件制备技术并实现针对性的薄膜器件优化设计。未来,晶圆级光量子芯片制备是一大挑战,需要从大尺寸铌酸锂晶体生长、高品质铌酸锂薄膜制备及晶圆级光量子器件加工的全链条进行工艺优化与技术拓展。铌酸锂基量子集成技术的未来发展道路曲折且具有挑战,但材料优异的光电特性为未来高性能量子芯片,特别是多光子、高维度量子芯片的实现提供了一种极佳的可能。

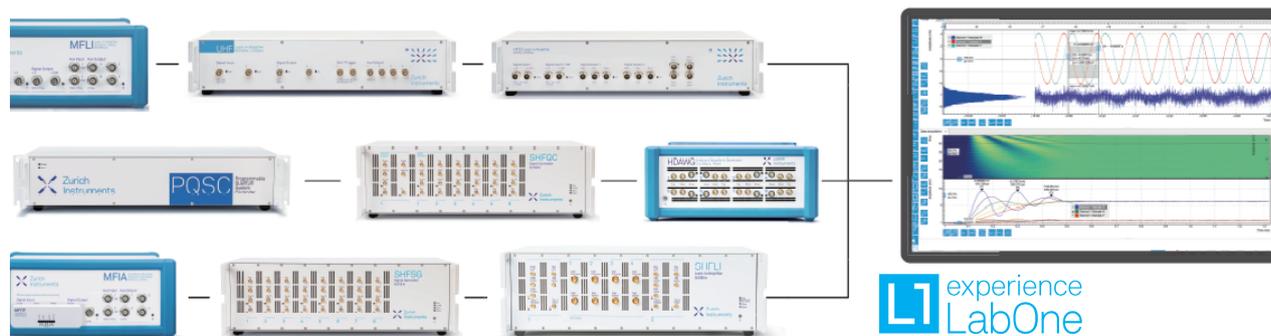
致谢 感谢南京大学刘雨辰、王晨宇、陈梦雯同学在本文准备过程中的帮助。

## 参考文献

- [1] Wang J, Sciarrino F, Laing A *et al.* Nat. Photon., 2020, 14: 273
- [2] Moody G, Sorger V J, Blumenthal D J *et al.* J. Phys. Photonics, 2022, 4: 012501
- [3] Sun J, Hao Y, Zhang L *et al.* J. Synth. Cryst., 2020, 49: 947
- [4] Gao B, Ren M, Zheng D *et al.* J. Synth. Cryst., 2021, 50: 1183
- [5] Zhu S N, Zhu Y Y, Ming N B. Science, 1997, 278: 843
- [6] Bazzan M, Sada C. Appl. Phys. Rev., 2015, 2: 040603
- [7] Jia Y, Wang L, Chen F. Appl. Phys. Rev., 2021, 8: 011307
- [8] Boes A, Chang L, Langrock C *et al.* Science, 2023, 379: eabj4396
- [9] Hu Y, Yu M, Zhu D *et al.* Nature, 2021, 599: 587
- [10] Wang X, Jiao X, Wang B *et al.* npj Quantum Inf., 2023, 9: 1
- [11] Zhang M, Wang C, Kharel P *et al.* Optica, 2021, 8: 652
- [12] Cai L, Mahmoud A, Khan M *et al.* Photon. Res., 2019, 7: 1003
- [13] Yang Y, Lu R, Gao L *et al.* J. Microelectromech. S., 2019, 28: 575
- [14] Gong Z, Liu X, Xu Y *et al.* Optica, 2020, 7: 1275
- [15] <https://seas.harvard.edu/news/2017/12/now-entering-lithium-niobate-valley>
- [16] Saravi S, Pertsch T, Setzpfandt F. Adv. Opt. Mater., 2021, 9: 2100789
- [17] Xie Z, Zhu S. Adv. Photon., 2022, 4: 030502
- [18] Xu P, Zhu S N. AIP Advances, 2012, 2: 041401

- [19] Tanzilli S, Tittel W, Halder M *et al.* Nature, 2005, 437: 116
- [20] Yu X Q, Xu P, Xie Z D *et al.* Phys. Rev. Lett., 2008, 101: 233601
- [21] Nasr M B, Carrasco S, Saleh B E A *et al.* Phys. Rev. Lett., 2008, 100: 183601
- [22] Leng H Y, Yu X Q, Gong Y X *et al.* Nat. Commun., 2011, 2: 1
- [23] Jin H, Xu P, Luo X W *et al.* Phys. Rev. Lett., 2013, 111: 023603
- [24] Tanzilli S, Riedmatten H D, Tittel W *et al.* Electronics Letters, 2001, 37: 26
- [25] Jin H, Liu F M, Xu P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2014, 113: 103601
- [26] Sun C W, Wu S H, Duan J C *et al.* Opt. Lett., 2019, 44: 5598
- [27] Sansoni L, Luo K H, Eigner C *et al.* npj Quantum Inf., 2017, 3: 5
- [28] Xue G T, Niu Y F, Liu X *et al.* Phys. Rev. Appl., 2021, 15: 064059
- [29] Gong Y X, Xie Z D, Xu P *et al.* Phys. Rev. A, 2011, 84: 053825
- [30] Luo K H, Ansari V, Massaro M *et al.* Opt. Express, 2020, 28: 3215
- [31] Luo K H, Herrmann H, Krapick S *et al.* New J. Phys., 2015, 17: 073039
- [32] Ma Z, Chen J Y, Li Z *et al.* Phys. Rev. Lett., 2020, 125: 263602
- [33] Bonneau D, Lobino M, Jiang P *et al.* Phys. Rev. Lett., 2012, 108: 053601
- [34] Luo K H, Brauner S, Eigner C *et al.* Sci. Adv., 2019, 5: eaat1451
- [35] Sund P I, Lomonte E, Paesani S *et al.* Sci. Adv., 2023, 9: eadg7268
- [36] Lu H H, Lukens J M, Peters N A *et al.* Phys. Rev. Lett., 2018, 120: 030502
- [37] Lu H H, Lukens J M, Williams B P *et al.* npj Quantum Inf., 2019, 5: 24
- [38] Ma L, Slattery O, Tang X. Phys. Rep., 2012, 521: 69
- [39] Vandevender A P, Kwiat P G. J. Mod. Opt., 2004, 51: 1433
- [40] Albota M A, Wong F N C. Opt. Lett., 2004, 29: 1449
- [41] Roussev R V, Langrock C, Kurz J R *et al.* Opt. Lett., 2004, 29: 1518
- [42] Pelc J S, Ma L, Phillips C R *et al.* Opt. Express, 2011, 19: 21445
- [43] Liao S K, Yong H L, Liu C *et al.* Nat. Photon., 2017, 11: 509
- [44] Van Leent T, Bock M, Garthoff R *et al.* Phys. Rev. Lett., 2020, 124: 010510
- [45] Yu Y, Ma F, Luo X Y *et al.* Nature, 2020, 578: 240
- [46] Zhu S. Chin. Phys. Lett., 2020, 37: 080102
- [47] Gao R, Yao N, Guan J *et al.* Chin. Opt. Lett., 2022, 20: 011902
- [48] Ekici C, Yu Y, Adcock J C *et al.* 2023, arXiv: 2301.04140
- [49] Staudt M U, Hastings-Simon S R, Nilsson M *et al.* Phys. Rev. Lett., 2007, 98: 113601
- [50] Dutta S, Goldschmidt E A, Barik S *et al.* Nano Lett., 2020, 20: 741
- [51] Dutta S, Zhao Y, Saha U *et al.* ACS Photonics, 2023, 10: 1104
- [52] Shams-Ansari A, Renaud D, Cheng R *et al.* Optica, 2022, 9: 408
- [53] Zhang X *et al.* Appl. Phys. Lett., 2023, 122: 081103
- [54] Wang M *et al.* Jpn. J. Appl. Phys., 2023, 62: SC0801
- [55] Li M, Chang L, Wu L *et al.* Nat. Commun., 2022, 13: 5344
- [56] Sayem A A *et al.* Appl. Phys. Lett., 2020, 116: 151102
- [57] Lomonte E *et al.* Nat. Commun., 2021, 12: 6847
- [58] Höpker J P *et al.* J. Phys. Photonics, 2021, 3: 034022
- [59] Sharapova P R *et al.* New J. Phys., 2017, 19: 123009
- [60] Liu H Y *et al.* Adv. Photon. Nexus, 2023, 2: 016003

## 全面升级你的实验室



锁相放大器 | 阻抗分析仪 | 量子测控系统 | 任意波形发生器  
多频解调 | 调频调幅 | 锁相环 | PID 控制器 | Boxcar 平均器



www.zhinst.cn  
info.cn@zhinst.com  
021-64870287

扫码了解详情