

铌酸锂集成光路：孕育自主产业链的前沿基础研究

程亚^{1,2,†}

(1 华东师范大学 物理与电子科学学院 上海 200241)

(2 中国科学院上海光学精密机械研究所 上海 201800)

2020-03-30收到

† email: ycheng@phy.ecnu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20200501

Photonic integrated circuits on lithium niobate: today's fundamental research for tomorrow's industry

CHENG Ya^{1,2,†}

(1 School of Physics and Electronic Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

(2 Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

摘要 大数据、人工智能、光量子信息等变革性领域对信息处理能力提出了前所未有的要求，而集成光路技术有望实现更快速、更有效、成本更低廉的信息处理器件，由此带来新的自主产业机会。铌酸锂集成光路技术在近年获得迅猛发展，展示了优越的器件性能，已经吸引了产业界的关注。文章将介绍该领域的研究背景以及若干近期的重要突破。

关键词 集成光路，铌酸锂薄膜，光波导，光损耗，弯曲半径

Abstract The emerging applications enabled by disruptive technologies such as big data, artificial intelligence, and quantum information require unprecedented information processing capacities. Photonic integrated circuit (PIC) technology provides promising potential for realizing information processing devices and/or systems with higher speed, higher efficiency, and lower cost. In particular, the rapid development of PIC platforms based on lithium niobate on insulator (LNOI), a photonic material compatible with lithographic fabrication techniques, has significantly promoted device performance. Here we will introduce the latest breakthroughs in this area. Based on the technological advances, an industry chain built upon LNOI is beginning to take shape.

Keywords photonic integrated circuit, lithium niobate on insulator (LNOI), optical waveguides, optical loss, bend radius

1 引言

1947年，贝尔实验室的三位科学家威廉·肖克利、沃尔特·布拉顿和约翰·巴丁发明了人类历史

上第一个晶体管，并因此获得了1956年的诺贝尔物理学奖。在此工作的基础上，得克萨斯仪器公司的杰克·基尔比于1959年发明了集成电路(Electronic Integrated Circuits, 简记EICs)技术，并迅速被应用到计算机及其相关领域，使得信息处理速度能够按照每18个月翻一番的指数规律增长，也就是众所周知的摩尔定律。杰克·基尔比也因发明

* 国家科技部重大科学研究计划(批准号: 2014CB921300)、重点研发计划(批准号: 2019YFA0705000)、国家自然科学基金(批准号: 11734009)资助项目, 上海市科委重大项目(批准号: 17JC1400400)

集成电路技术获得了2000年的诺贝尔物理学奖。

以上的故事为学术界所熟知。然而,不太为人所周知的是,在半导体产业发展进程中,美国政府出于提升军事与太空力量的需求,对早期的半导体产业(主要集中在硅谷)进行了极大的扶持,确立了美国在该新兴行业的地位。一批美国著名公司,通过对大规模集成电路关键核心技术的垄断,在全球半导体产业链中占据了主导地位,这一状况延续至今。

一个产业链如同一个生态系统,包括了许多错综复杂、相互依存的节点。仅仅在某些单个节点上予以突破,对整个产业链的全局影响不会太大,这是美国能够在该领域长盛不衰的关键。因此,对于产业链中的地位竞争,通过系统性布局以期获得多点突破尤为重要。

突破传统产业链垄断格局的另一个有效策略是通过发展变革性技术来打造新的产业链。因此,各发达国家都不遗余力地通过继承和创新来大力发展新技术。集成电路技术问世后仅仅10年,通过借鉴其理念的优越性,贝尔实验室的斯图尔特·米勒就提出了集成光路(Photonic Integrated Circuits, 简记PICs)的概念^[1]。集成光路的核心原则是采用类似于集成电路中的光刻途径,在单一衬底材料上并行制作出具有各种功能的光子结构,并直接形成功能器件。集成光路的核心单元结构是光波导,其横截面的特征尺寸在光波长量级,用以实现光波的可控传输和精密操控。虽然当时大规模光纤通讯技术尚未确立,斯图尔特·米勒就已经预见到集成光路的应用前景之一就在高速光通讯领域。在随后相当长一段历史时期,贝尔实验室的一批科学家们一直对集成光路技术寄予厚望并倾注了很多心血。

虽然集成光路的概念非常美妙并至今魅力犹在,但是它的发展道路却铺满荆棘,这是由于集成光路技术所面向的应用市场和技术特性与集成电路技术完全不同。2008年,集成光路领域的先驱之一,伊万·卡米诺夫,在他的一篇回顾性论文中总结了若干阻碍集成光路技术发展的重要瓶颈^[2]:

(1) 集成光路通常同时包含无源和有源光子结构,而制备有源光子器件往往需要采用比硅更难

驾驭的二元、三元和四元衬底材料;

(2) 受衍射规律限制,集成光路中光子器件结构的最小特征尺寸约在光波长量级,而集成电路中电子器件结构的最小特征尺寸受限于远小于光波长的电子的德布罗意波长,这意味着集成光路上的器件密度通常要远低于集成电路中的电子器件密度;

(3) 集成光路中往往包含多种不同功能的元器件,如激光器、探测器、调制器、多路复用器、衰减器等,而这些器件所依赖的材料特性或加工工艺往往不能相互兼容;

(4) 面向大容量、低成本的大规模光子集成应用尚未充分被发掘。

在上述四条因素中,前三条属于技术方面的障碍,而第四条则牵涉产业应用背景,这一条尤为关键。因为如果一项出色的科学技术发明长期缺乏产业应用需求,终究会被逐渐淘汰而走向消亡。幸运的是,今天看来伊万·卡米诺夫当时作出的第四条判断已经有了根本性的转机。近十年来,一批诸如大数据、人工智能、量子信息这样的变革性高技术领域快速涌现,对于大规模、大容量集成光路器件的需求越来越迫切,为集成光路技术的发展提供了前所未有的机遇和强劲的推动力。而另一方面,纳米加工技术经过了30年的厚积薄发,为突破集成光路中长期存在的一些技术瓶颈提供了丰富的手段和几乎无限可能,推动了集成光路领域的迅猛发展。

以下,我们首先简要回顾半个世纪以来集成光路领域中产生的一些典型技术途径,并分析其优点与不足。然后重点介绍一项近期产生的基于新型铌酸锂薄膜材料的集成光路技术,并展示若干典型器件和应用。

2 集成光路领域发展历程中的若干典型技术途径

自1969年集成光路的概念被提出以后,科学家们就一直为最终实现大规模的集成光路而坚持不懈的努力,但是标准化的制造路线至今仍然未确立。其主要原因是集成光路器件中的光波导,

往往需要同时具备低传输损耗和小弯曲半径这两项重要特征。对传统微纳加工技术而言，同时满足这两个方面的要求极其困难。以下我们通过几个典型事例就此加以说明。

2.1 基于离子掺杂波导的铌酸锂集成光路

铌酸锂晶体具有宽透明窗口、高非线性光学系数、高折射率，以及较强的电光、声光、压电效应等优良的光学性能，在高速电光调、全息存储、非线性频率转换等方面有着广泛的应用，是集成光学器件衬底材料的重要候选者^[3-8]。

晶体铌酸锂衬底上的光波导主要通过离子掺杂或成分调控实现^[7, 9, 10]，我们以应用较为广泛的钛扩散技术为例展开说明，如图1所示。首先，金属钛薄层被均匀地沉积在铌酸锂晶体表面。接着，使用光刻剥离技术(lithographic lift-off technique)选择性地去除金属层，形成与设计波导相同的金属钛掩膜图形；对于波导掩膜，金属条带的宽度和波导宽度一致，通常约在5—10 μm，取决于波导的工作波长。然后，将样品在1000 °C左右的高温下退火几个小时到十个小时，通过钛离子向铌酸锂晶体内部的扩散获得钛离子掺杂，在金属掩膜下方的铌酸锂近表层区域获得约 10^{-3} — 10^{-2} 的永久性折射率增加，从而形成钛扩散铌酸锂波导。

铌酸锂光波导在非线性集成光路应用中具有特殊优势，原因是铌酸锂晶体具有很高的二阶非线性光学效应，可以高效实现诸如倍频、频率下转换等功能。这里我们便介绍一个可重构铌酸锂量子光学芯片系统，如图2所示。这一代表性的器件是由南京大学祝世宁院士团队首先实现的^[11]。

这个铌酸锂光子芯片由集成在50 mm×5 mm×0.5 mm的铌酸锂晶体上的质子交换波导构成，主要结构分为三大部分。第一部分的功能被设计为对780 nm的泵浦光进行电光调控，可以通过对两路泵浦光波导上方的电极施加电压来控制两条路径之间的相位差。第二部分是在两路周期极化铌酸锂波导中通过下转换产生纠缠光子对，形成一

个路径纠缠态。第三部分通过2×2的定向耦合器实现量子干涉。经测量，该光子芯片的半波电压低至3.55 V，分离的独立光子对态在量子干涉仪中的可见度为 $92.9\pm 0.9\%$ ，光子通量约达 1.4×10^7 pairs $\text{nm}^{-1} \text{mW}^{-1}$ 。这些指标全方位地展示了铌酸锂光量子集成芯片的优越性能。

但是，基于离子掺杂改性的波导芯折射率变化较小，相应的铌酸锂波导具有较大的弯曲半径，决定了该类型的波导难以被应用于大规模的集成光路。

2.2 二氧化硅平面集成光路

回顾另一种基于二氧化硅衬底的光波导技术的发展对集成光路的未来走向也有重要启示意义。这种二氧化硅波导和集成光路通过平面技术来制造，其主要工艺流程分五步^[12]，如图3所示。首先，采用具有较高沉积速率的火焰水解沉积法(flame hydrolysis deposition)在硅片上沉积一

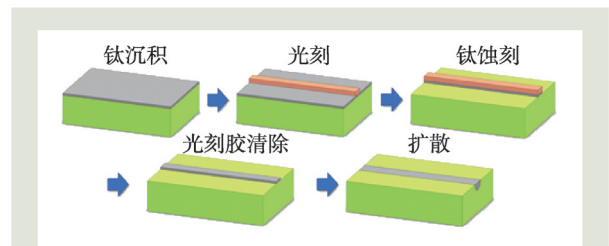


图1 钛内扩散法铌酸锂波导加工技术示意图

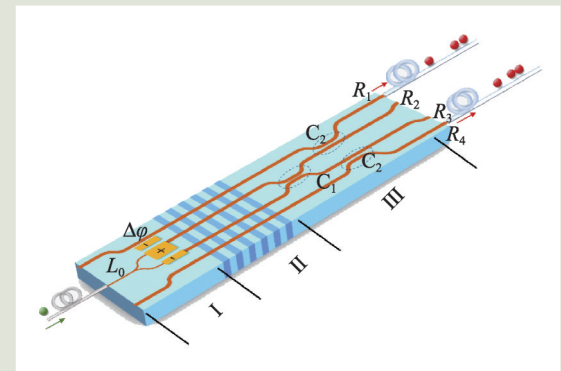


图2 用于实现芯片上纠缠光子对的生成和调控的可重构铌酸锂芯片结构单元示意图(L_0 : 经典泵浦光的单模波导; $\Delta\phi$: 泵浦模式的相位差; C_1 : 2×2定向耦合器; C_2 : 波长滤波器; $R_1 \sim R_4$: 输出波导)^[11]

层白色的二氧化硅精细颗粒，这层颗粒经高温处理后变成透明石英玻璃膜，形成厚度可大于 $30\ \mu\text{m}$ 的波导下包层。然后，再一次同样利用火焰水解沉积和高温处理，在下包层上生长出掺杂 GeO_2 的高折射率波导芯层，并在波导芯层上利用光刻与反应离子束刻蚀制备出光波导结构。最后，还是采用火焰水解沉积和高温处理来制备包覆波导芯的上包层。由于上下包层都由纯熔融石英组成，而波导芯部分则因掺杂了 GeO_2 而具有稍高的折射率，因此形成低损耗的光回路。

仔细分析一下，这样一种二氧化硅平面集成光路的设计和制造策略极其聪明：它力争使波导与单模光纤具有相同的结构设计和材料组分，从而全面继承了光纤所具有的优良特性，来获得超低的传输与耦合损耗。此外，在加工波导的工艺中，离子束干法刻蚀可以将波导侧壁的粗糙度控制在纳米量级，远远小于波导中的传输光波长；再加上波导芯和包层之间的折射率差较小，可以有效抑制由表面粗糙度引起的散射损耗。

尽管二氧化硅平面集成光路可以具有非常低的传输与散射损耗，并能与标准光纤实现高效的耦合，但存在两方面主要缺陷，一方面是二氧化硅的非线性系数和电光系数都较低，调控难度大，可实现的功能器件种类受到制约；另一方面，与以上铌酸锂波导类似，通过化学组分调控实现的波导芯结构同样具有折射率变化较小、波导弯曲半径过大的缺点，也不适用于大规模的光子集成应用。

2.3 硅基集成光路

从经济持续增长的角度看，集成光路技术需要通过不断提高集成密度来达到显著降低单元器件成本的目的，这一点与集成电路技术的发展路线图高度一致。随着半导体微纳制备技术的日益成熟，新近建立的半导体集成光路技术已经可以将传统组分调控波导的厘米量级转弯半径压缩到仅为数十微米量级，从而极大地提升了光子芯片的集成密度。下面我们以纳米硅线波导为例，讨论半导体集成光路的特点。

硅线波导的加工通常借助深紫外光刻和干法刻蚀等工艺步骤来实现，如图4所示。首先，将光刻胶旋涂在绝缘体上的硅(Silicon-On-Insulator, 简记SOI)晶片上，并进行预烘。然后，晶片被送到光刻机，通过带图案的掩膜对光刻胶曝光。在平版印刷光刻之后，对光刻胶进行后烘，并进行显影。随后，显影后的光刻胶作为硅蚀刻的掩膜，对顶部的硅薄膜层进行离子蚀刻。最后，光刻胶被剥离，留下紧贴在二氧化硅层上的硅纳米线波导结构，如图4(i)所示。通常对刻蚀产生的纳米硅线还要进行一些后处理，如再沉积一层二氧化硅作为波导的上包层等等^[13, 14]。这种硅线波导具有亚微米的模场尺寸和微米量级的弯曲半径，非常有利于实现高密度的光子集成。

得益于针对大规模集成电路应用而充分发展并已经非常成熟的半导体光刻技术及其工业化产能，硅基集成光路具有大规模、低成本的工艺优势。此外，硅的折射率很高，在 $1550\ \text{nm}$ 波长约为

3.5，硅和空气之间如此高的折射率差使得硅纳米线波导的弯曲半径可小到仅有几个微米，从而可以实现极高密度的光子集成。作为示例，以下展示了一个针对量子信息处理开发

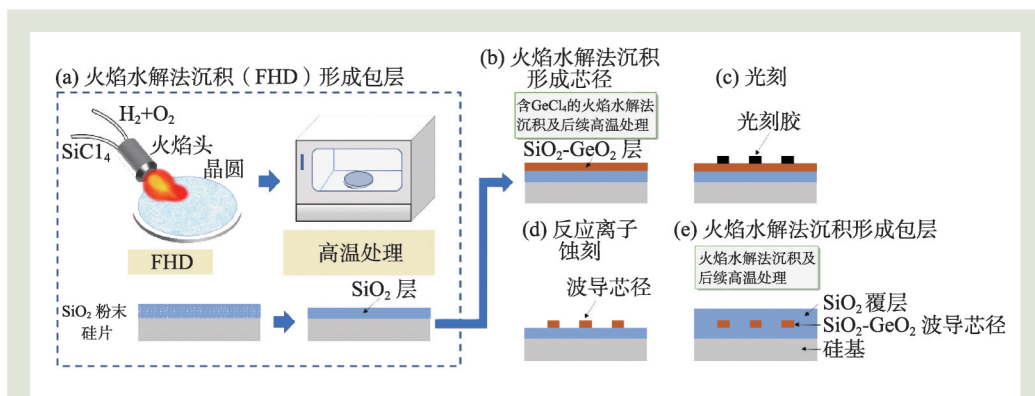


图3 二氧化硅基波导加工过程示意图

的硅基集成光路芯片，如图5所示。这是2018年北京王剑威等人报道的维度达 15×15 的可编程路径编码多维纠缠系统，能够以极高的精度、可控性和通用性实现全片上的多维纠缠的产生、操控与测量^[15]。

尽管硅纳米线波导可以实现高密度集成光路，但也存在一些与硅材料自身特性相关的缺陷。首先，由于硅晶体缺乏电光系数，因此通常只能通过热光效应对硅线波导进行调控，能耗较高且响应时间本质上较慢，通常在毫秒量级(相应的调制频率仅能达到千赫兹)；其次，此类硅线波导的损耗仍然较大，典型的传输损耗约在1 dB/cm量级。事实上，人们已经付出了巨大的努力来改善硅线波导的损耗，虽有所提高，但困难也越来越大。随着光子集成密度的逐渐增加，这两个缺点将成为阻碍硅基集成光路器件性能持续提升的关键因素。

3 铌酸锂薄膜集成光路技术

以上事例表明，实现高质量的大规模集成光路器件需要优越的材料特性和先进的加工手段完美结合。如前所述，尽管铌酸锂晶体是优良的集成光路器件衬底材料，但是基于化学组分修饰的铌酸锂波导芯中的折射率调控太弱，相应的波导弯曲半径过大，不适用于未来大规模的光子集成应用。

2005年，美国南加州大学采用离子注入和键合剥离的技术，成功研制出了厚度小于 $1 \mu\text{m}$ 的绝缘体上铌酸锂(Lithium Niobate on Insulator, LNOI)单晶薄膜材料^[16]。特别是近年来，山东大

学在铌酸锂单晶薄膜的研发与工艺改进方面贡献卓著，并在产业化方面走在了世界前列，产生了全球知名的铌酸锂薄膜品牌(NanoLN)^[17]。一旦能够在铌酸锂单晶薄膜衬底上制备出类似于硅纳米线那样的平面波导，将能够同时满足集成光路领域一直所渴望的低损耗、小弯曲半径以及高调控效率等一系列苛刻的关键要求。但是长期以来，由于铌酸锂晶体具有稳定的物理与化学特性，无

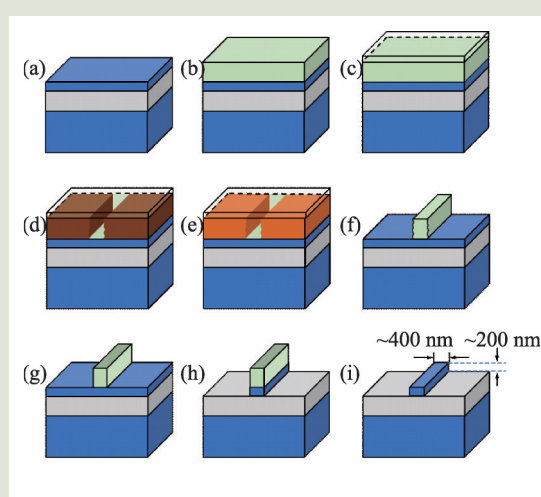


图4 基于绝缘体上硅(SOI)晶体的带状硅线波导的制备工艺流程示意图 (a) SOI晶片结构; (b) 抗蚀光刻胶旋涂和软烘; (c) 顶部减反射层旋涂; (d) 曝光; (e) 后烘; (f) 显影; (g) 光刻胶硬化; (h) 硅蚀刻; (i) 光刻胶剥除

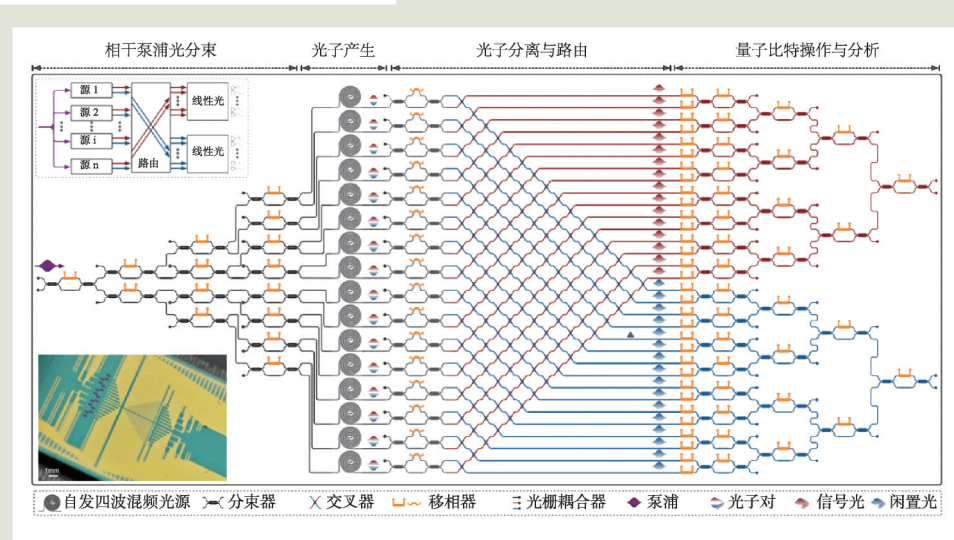


图5 多维量子光子线路示意图(左上插图:二分多维纠缠态的产生和操控示意图;左下插图:器件的照片)^[15]

法采用类似半导体光刻的技术对其进行精密刻蚀。因此,实现低损耗铌酸锂光波导的制备技术直至最近才获得突破^[18-21],并导致了一系列革命性器件的诞生^[7, 21-36]。

最近,我们提出了一种飞秒激光直写辅助化学机械抛光(CMP)的铌酸锂光子结构加工技术,实现了具有超高品质因子的铌酸锂微盘腔与超低损耗铌酸锂光波导等核心光子器件^[37, 38]。利用该技术,我们将铌酸锂微腔的品质因子提高到 4.7×10^7 的新记录,波导损耗可低至 0.027 dB/cm 。该技术具体流程可以分5步^[38, 39],如图6所示。

我们采用铌酸锂薄膜晶圆作为基片,其剖面结构如图6(a)所示,其中最上层铌酸锂薄膜厚度约 700 nm ,其下的二氧化硅隔离层厚度 $2 \mu\text{m}$,底部的铌酸锂晶体衬底厚度约 $500 \mu\text{m}$ 。首先,利用磁控溅射技术在铌酸锂薄膜晶片上镀一层约 600 nm

厚的铬膜。这是由于铬的硬度远高于铌酸锂,因此可作为一种很好的高硬度掩膜材料,在后续化学机械抛光时保护其下方的铌酸锂薄膜。其次,利用聚焦飞秒激光直写扫描刻蚀铬膜,制备出宽度约 $1 \mu\text{m}$ 的铬条带掩膜图案。飞秒激光直写系统的三维平台位移精度约 100 nm ,确保了极高的加工精度和分辨率。接着,用抛光机对样品进行化学机械抛光处理,没有被铬膜覆盖的铌酸锂薄膜将被去除,仅留下被铬掩膜保护的脊形波导结构。该技术可获得平均粗糙度低于 0.2 nm 的平滑侧壁,为降低波导侧壁的散射损耗提供了保障。最后,将化学抛光处理后的样品在铬腐蚀溶液中浸泡4分钟,去除铌酸锂薄膜上残余的铬金属。此时获得的铌酸锂波导仍为多模波导。对于单模波导应用,可以在加工好的波导样品上通过电子束蒸发沉积一层 $3.5 \mu\text{m}$ 厚的超低损耗氧化钽(Ta_2O_5)

薄膜,构成具有适当折射率差的包层,最终获得稳定的铌酸锂单模波导。

我们用电子束显微镜表征了覆盖氧化钽后的铌酸锂薄脊形波导形貌,如图7(a)所示,其中突起的亮线即为脊形波导,可以看出波导边缘是非常均匀和平滑的。通过将不同偏振的 1550 nm 激光耦合入脊形波导,并用红外CCD相机观测输出端的成像,我们激发并测量了铌酸锂薄膜脊形波导在 1550 nm 的TE和TM波的空间模式分布,如图7(b), (d)所示。可以看出这种波导既能支持TE波的单模传输,也能支持TM波的单模传输,这与模拟计算的结果(图7(c), (e))完全一致。通过测量,我们得到TE和TM单模的模场半高

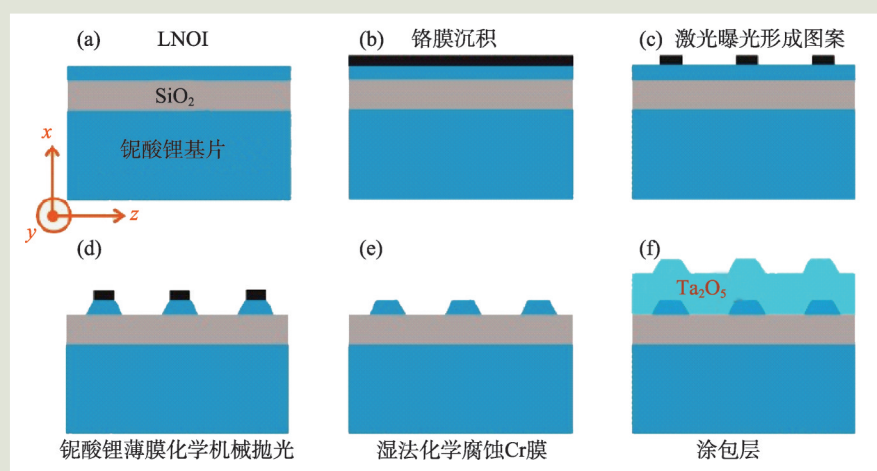


图6 铌酸锂薄膜波导加工流程示意图 (a)铌酸锂薄膜结构示意图;(b)铌酸锂薄膜上沉积Cr膜;(c)飞秒激光直写烧蚀Cr膜制备波导掩膜;(d)通过化学机械抛光将掩膜图案转移到铌酸锂薄膜;(e)湿法化学腐蚀去除残余Cr膜;(f)在铌酸锂波导上镀一层氧化钽薄膜构成包层

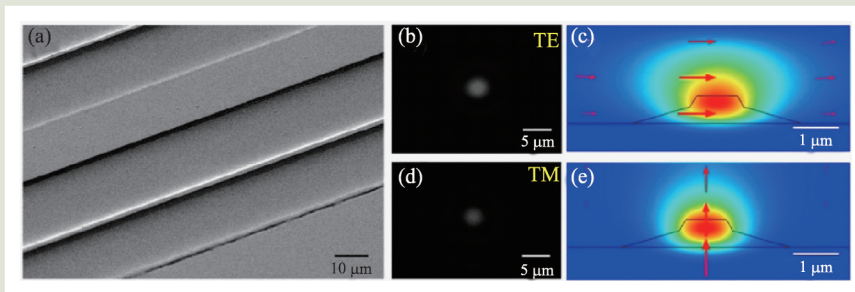


图7 铌酸锂单模波导及其导波特性的SEM图;(b)测量与(c)模拟的TE波输出空间模式;(d)测量和(e)模拟的TM波输出空间模式

全宽(FWHM)分别约为 $2.5\ \mu\text{m}$ 和 $2.3\ \mu\text{m}$ 。该技术可以支持实现损耗低至 $0.027\ \text{dB/cm}$ 的多模波导和损耗低至 $0.042\ \text{dB/cm}$ 的单模波导^[38, 39]。

作为该新型铌酸锂波导在集成光路器件中的应用演示,我们加工了一个可电光调控的多功能芯片^[40],如图8所示。这个多功能集成光子芯片包含了7个马赫—曾德尔干涉仪(MZI)、4个外控电光相移器和1个微电极阵列,所有结构被布局在一个 $6.5\ \text{cm} \times 0.2\ \text{cm}$ 的区域内,设计示意如图8(a)所示。在马赫—曾德尔干涉臂和电光相移器附近设计了12个金电极的阵列,用于器件实时调控与重构。图8(b)是加工完成的器件照片,其尺寸大小可通过与硬币对比来获得。值得一提的是,在整个器件所覆盖的可谓非常庞大的芯片面积内,我们自主研发的微纳加工系统都可保持 $\sim 500\ \text{nm}$ 的均匀制备精度。这是现有的商业化设备无法做到的。

得益于铌酸锂优良的电光性质,我们可以通过电光效应对铌酸锂集成光子芯片的功能进行快速重构,在单一芯片上分别可以实现高消光比($\sim 28\ \text{dB}$)的马赫—曾德尔干涉仪、 1×6 光开关和 3×3 均衡干涉

分束器等多种不同光子学功能^[40]。

这一自主研发的化学机械抛光光刻技术具有加工效率高、可制备样品尺寸大、器件光损耗低等特性,由此带来的芯片扩展能力将有利推动大规模集成光路的应用和扩展性。为了展示该技术的潜力,我们设想了一个能够在目前已商用的4英寸铌酸锂晶片上制备的马赫—曾德尔干涉仪大规模阵列器件^[41],如图9所示。经计算,铌酸锂晶体矫顽阈值电场所允许的单个马赫—曾德尔干涉仪最小尺寸可达到 $0.2\ \text{mm} \times 2.5\ \text{mm}$,如图9(a)所

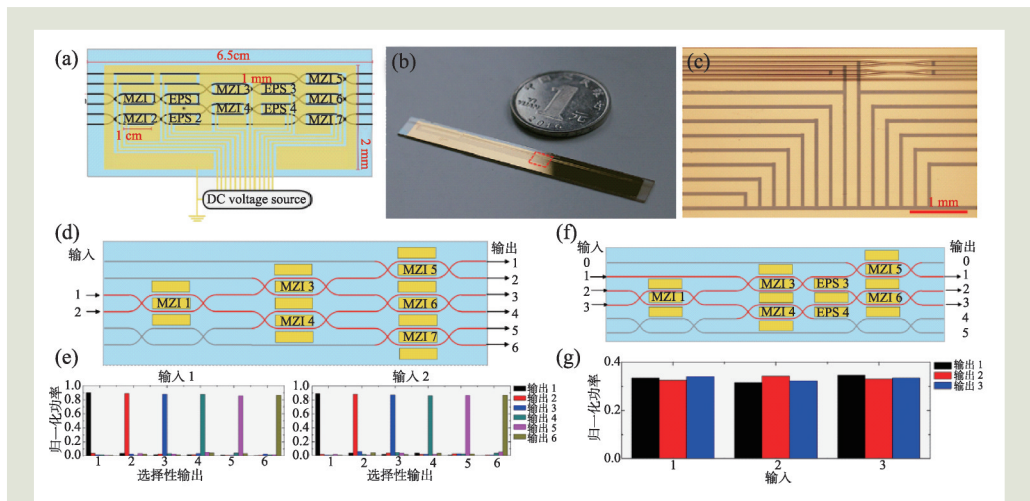


图8 基于铌酸锂薄膜的可重构多功能集成光子芯片 (a)多功能集成光子芯片设计示意图;(b)制备的芯片样品;(c)金电极显微图;(d)重构为 1×6 光开关的波导布线示意图;(e)光开关的测试结果图;(f) 3×3 均衡干涉分束器的波导布线示意图;(g)均衡干涉分束器的测试结果图

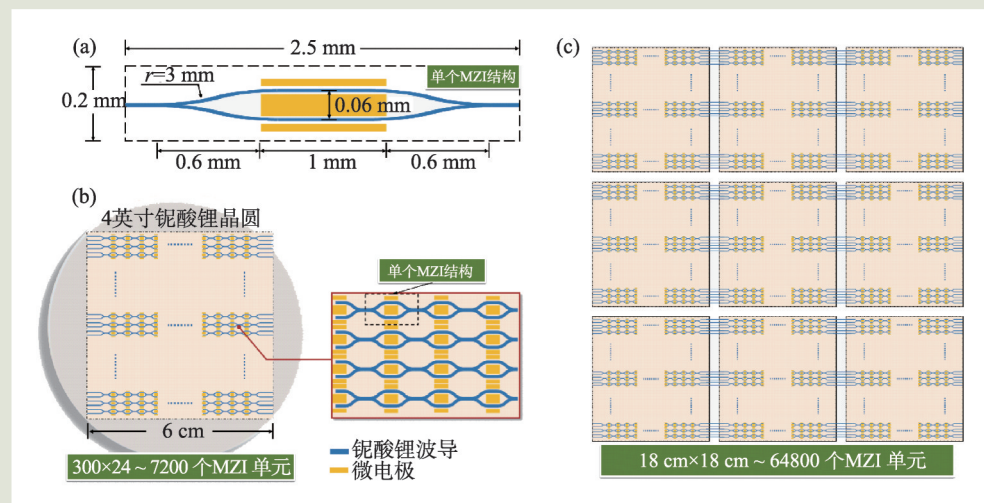


图9 铌酸锂OI集成光路构想 (a)单个MZI结构示意图;(b)4英寸铌酸锂OI晶圆上布局7200个MZI单元的集成光路器件示意图;(c)9块铌酸锂OI芯片平铺构建更大规模的集成光路器件示意图

示。在此条件下,单片4英寸铌酸锂晶片已可支撑7200个马赫—曾德尔干涉仪,如图9(b)所示。特别让人兴奋的是,该芯片上的总传输损耗将低于0.3 dB,甚至有望进一步降低到0.1 dB以下。如需进一步扩展芯片规模,虽然无法获得面积更大的单片铌酸锂晶圆,但是可以通过平铺9块铌酸锂薄膜来达到该目的,如图9(c)所示。这一芯片平铺技术将使可集成的马赫—曾德尔干涉仪总数提升到64800个,而芯片上的总传输损耗仍低于1 dB,这一前景将为光通讯和光计算、计量学、微波光子学和光互联等开辟出新的可能。

4 尾声

至此,我们情不自禁地要感叹:当前可能是集成光路最好的时刻。一方面,一批长久未得到

解决的重大技术障碍正在被逐步扫除,研发过程因此走入快通道;另一方面,军事、高科技产业以及前沿基础研究等各个领域对光路集成技术的应用需求层出不穷,将为该领域吸引更多的研发力量与资金投入;最后,铌酸锂光子技术的巨大发展空间还留下了重要且有意义的课题等待我们去探索。最为幸运的是,中国目前在这一条正在逐渐成形的新型产业链上仍不落下风,应该尽最大努力以谋求未来最好的格局。

综上,我们回顾了集成光路发展过程中的一些典型的技术途径,并分析了各自的优缺点。随后介绍了我们自主研发的化学机械抛光光刻技术,以及由此获得的一些铌酸锂集成光路的关键结构与器件进展。

致谢 对帮助制图的汪旻博士、协助编辑文字的王振华副教授、乔玲玲博士一并表达谢意。

参考文献

- [1] Miller S E. *Bell System Technical Journal*, 1969, 48(7): 2059
- [2] Kaminow I P. *Journal of Lightwave Technology*, 2008, 26(9-12): 994
- [3] Weis R S, Gaylord T K. *Appl. Phys. A*, 1985, A37(4): 191
- [4] Arizmendi L. *Physica Status Solidi A- Applied Research*, 2004, 201(2): 253
- [5] Sohler W *et al.* *Optics and Photonics News*, 2008, 19(1): 24
- [6] Carrascosa M *et al.* *Applied Physics Reviews*, 2015, 2(4): 040605
- [7] Bazzan M, Sada C. *Appl. Phys. Rev.*, 2015, 2(4): 040603
- [8] Kong Y F *et al.* *Advanced Materials*, 2019, 32(3): 1806452
- [9] De Micheli M *et al.* *Optics Communications*, 1982, 42(2): 101
- [10] Armenise M N. *IEE Proceedings J (Optoelectronics)*, 1988, 135(2): 85
- [11] Jin H *et al.* *Physical Review Letters*, 2014, 113(10): 103601
- [12] Takahashi H. *Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2003, 5246(1): 520
- [13] Bogaerts W *et al.* *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, 8(4): 928
- [14] Bogaerts W *et al.* *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(1): 401
- [15] Wang J W *et al.* *Science*, 2018, 360(6386): 285
- [16] Rabiei P, Steier W H. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(16): 161115
- [17] Poberaj G *et al.* *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 6(4): 488
- [18] Lin J T *et al.* Second harmonic generation in a high-Q lithium niobate microresonator fabricated by femtosecond laser micromachining. 2014, arXiv: 1405.6473
- [19] Lin J T *et al.* *Sci. Rep.-UK*, 2015, 5: 08072
- [20] Wang C *et al.* *Optics Express*, 2014, 22(25): 30924
- [21] Wang J *et al.* *Optics Express*, 2015, 23(18): 23072
- [22] Cai L T *et al.* *Optics Express*, 2015, 23(22): 29211
- [23] Wang C *et al.* *Nature*, 2018, 562: 101
- [24] He M *et al.* *Nature Photonics*, 2019, 13: 359
- [25] Geiss R *et al.* *Optics Letters*, 2015, 40(12): 2715
- [26] Jiang W C, Lin Q. *Scientific Reports*, 2016, 6: 36920
- [27] Alibart O *et al.* *Journal of Optics*, 2016, 18(10): 104001
- [28] Volk M F *et al.* *Optics Express*, 2016, 24(2): 1386
- [29] Cai L T, Zhang S M, Hu H. *Journal of Optics*, 2016, 18(3): 035801
- [30] Jin S L *et al.* *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(7): 736
- [31] Lin J T *et al.* *Physical Review Applied*, 2016, 6(1): 014002
- [32] Wang C *et al.* *Optics Express*, 2017, 25(6): 6963
- [33] Liang H X *et al.* *Optica*, 2017, 4(10): 1251
- [34] Luo R *et al.* *Optics Letters*, 2017, 42(7): 1281
- [35] Boes A *et al.* *Laser & Photonics Reviews*, 2018, 12(4): 1700256
- [36] Pohl D *et al.* *Nature Photonics*, 2020, 14: 24
- [37] Wu R B *et al.* *Optics Letters*, 2018, 43(17): 4116
- [38] Wu R B *et al.* *Nanomaterials*, 2018, 8(11): 910
- [39] Lin J T *et al.* *Micromachines*, 2019, 10(9): 612
- [40] Wu R B *et al.* *Optics Letters*, 2019, 44(19): 4698
- [41] Min W *et al.* *Quantum Engineering*, 2019, 1(1): e9