电光可编程光子电路

由薄膜上的晶圆级集成实现

铌酸锂

YONG ZHENG1,2, HAOZONG ZHONG1,2, HAISU ZHANG2, RONGBO WU2,7, JIAN LIU1,2, YOUTING LIANG1,2, LVBIN SONG1,2, ZHAOXIANG LIU2, JINMING CHEN2, JUNXIA ZHOU1,2, ZHIWEI FANG2, MIN WANG2, 和 *YA CHENG1,2,3,4,5,6, */*精密光谱学国家重点实验室，华东师范大学，中国上海 *200062*[2]极端光电力学实验室（*XXL*），物理与电子科学学院，华东师范大学，中国上海 *200241*[3]强场激光物理国家重点实验室和中国科学院超强激光科学卓越创新中心，中国科学院上海光学精密机械研究所（*SIOM*），中国科学院（*CAS*），中国上海 *201800*[4]极端光学协同创新中心，山西大学，中国太原 *030006*。[5]光操控与应用协同创新中心，山东师范大学，中国济南 *250358*[6]上海量子科学研究中心，中国上海 *201315*[7]*rbwu@phy.ecnu.edu.cn **

ya.cheng@siom.ac.cn

摘要：可执行通用线性光学变换的可编程光子电路，是光子量子信息处理、量子增强型传感器网络、机器学习以及许多其他引人入胜的应用中重要功能的基础。光子集成电路的最新进展促进了外部控制的马赫-曾德尔干涉仪的单片集成，此类干涉仪可对大量输入/输出模式实施任意幺正变换。在本研究中，我们展示了一种基于绝缘体上铌酸锂平台的 4×4 可编程线性光子电路，采用快速、高功效且低损耗的电光相移器，在配置速率和功耗方面展现出巨大优势。该器件能够实现快速切换，上升时间为 500 ps，下降时间为 1.7 ns；在 1 MHz 调制下工作时，芯片上总功耗仅为 15 μW，每个调制器的插入损耗为 0.15 分贝，交叉与直通路径的芯片上消光比分别为 -34 分贝。

1. 引言

得益于占用面积小、计算速度快、功耗低、可持续扩展性强以及相位稳定性高，由级联马赫–曾德尔干涉仪（MZIs）组成、用于实现 N 阶特殊酉群（即 $SU(N)$）的可编程线性光子电路，在光子量子信息处理、量子增强型传感器、光学神经网络和机器学习等新兴应用中正变得日益重要[1–8]。这些新兴应用对超大规模光子集成（VLSPI）和高性能片上组件提出了严格要求，例如具有极低损耗、超高切换速度和高功率效率的光调制器。得益于具备高可扩展性和低制造成本、日趋成熟且与互补金属氧化物半导体（CMOS）工艺兼容的超大规模集成（VLSI）工艺，包括绝缘体上硅（SOI）、氮化硅和

磷化铟（InP）在内的材料平台已得到广泛研究，并已完成概念验证演示[1–3,9–13]。尽管此类高度可扩展材料平台迄今已取得巨大进展，但随着可编程光子电路规模不断扩大，要维持合理的功耗和传输损耗正变得越来越难以实现。相对较高的功耗与相对较慢的调谐速度，源于大多数半导体材料平台缺乏固有的电光效应，因此必须采用热光或压电-光机械调谐，才能在所制造的光子电路中实现相位调制[12]。

凭借优异的电光和非线性光学特性、相对较高的折射率以及宽广的透明窗口，铌酸锂（$LiNbO_3$, LN）自20世纪60年代以来一直被视为光子应用的理想材料。数十年来，人们始终面临着严峻挑战：既要获得高质量的铌酸锂薄膜，又要在铌酸锂干法刻蚀过程中形成高质量的光子结构，以实现高密度、高性能的光子集成。随着采用离子切片制备的商用铌酸锂薄膜晶圆问世，以及铌酸锂薄膜制造技术迅速发展，绝缘体上铌酸锂（LNOI）平台[14–19], 上已开发出大量光学元件，包括传输损耗低至 3 分贝/米[20,21] 的高性能米级长波导，以及带宽达数十吉赫兹、功耗低于 1 飞焦耳/比特$^{-1}$ [16]的高速高效电光调制器。与成熟的 CMOS 兼容材料平台相比，LNOI 本身就能满足可编程光子电路提出的所有严格器件要求。利用深紫外光刻（DUV）已制造出符合 VLSPI 要求的晶圆级 LNOI 光子集成电路，同时将光传输损耗维持在较低的 27 分贝/米[22]。与此同时，光刻辅助化学机械刻蚀（PLACE）技术[23], 也已成为一种颇具前景的 VLSPI LNOI 器件制造技术。该技术通过无掩模飞秒激光直写对硬掩模进行图案化，随后采用化学机械抛光（CMP）刻蚀铌酸锂。借助高平均功率飞秒激光、大范围运动平台的协同作用，以及 CMP 工艺刻蚀出的极其平滑的界面[21]，PLACE 能够制造晶圆级器件，并实现较高的制造均匀性、有竞争力的生产速率和极低的光传输损耗（即~2.5 分贝/米）。

在本工作中，我们展示了一种在绝缘体上铌酸锂平台上采用 PLACE 技术制备的 4×4 可编程线性光子电路。该器件能够实现快速切换，上升时间为 500 ps，下降时间为 1.7 ns；在 1 兆赫调制下运行时，芯片上总功耗仅为 15 μW；每个 MZI 单元的插入损耗为 0.15 分贝；采用米勒校准算法 [24]时，交叉与直通路径的芯片上消光比均低于 -34 分贝。所展示的基于 LNOI 的可编程光子电路，在响应时间、插入损耗和功耗等关键功能特性方面优于基于其他材料平台的同类器件，在新兴的经典与量子应用领域前景广阔。

2. 设计原理与器件实现

图 1(a) 示意性地展示了由一列 MZI单元 (1) 至 (6) 组成的可编程线性光子电路。利用四维希尔伯特空间 $[D_{MZI}]_{4\times4}$ 中的二维子空间定义马赫-曾德尔干涉仪 (1) 至 (6) 的酉变换矩阵，可以构造一个 SU(4)。图 1(a) 所示器件构造了一个变换矩阵 $[D]_{4\times4}$，可将输入信号向量 $[I]_{4\times1}$ 线性转换为输出信号向量 $[O]_{4\times1}$。图 1(b) 展示了一个 MZI 单元的实验实现，其特点是将两个 MZI 串联，并在中间设置一个相移器 (θ)，在输出端设置一个相移器 (φ)。两个 MZI（BSL 和 BSR）充当可调节定向耦合器

由内部移相器 (θ_L 和 θ_R) 控制。按照 Miller 算法，这种串联 MZI 设计能够精细调节因制造误差而导致定向耦合器分光比不完美的问题，使其达到理想的 50-50 分光比。因此，尽管存在全局传输损耗，每个 MZI 单元仍可实现理想的 $SU(2)$ 变换。

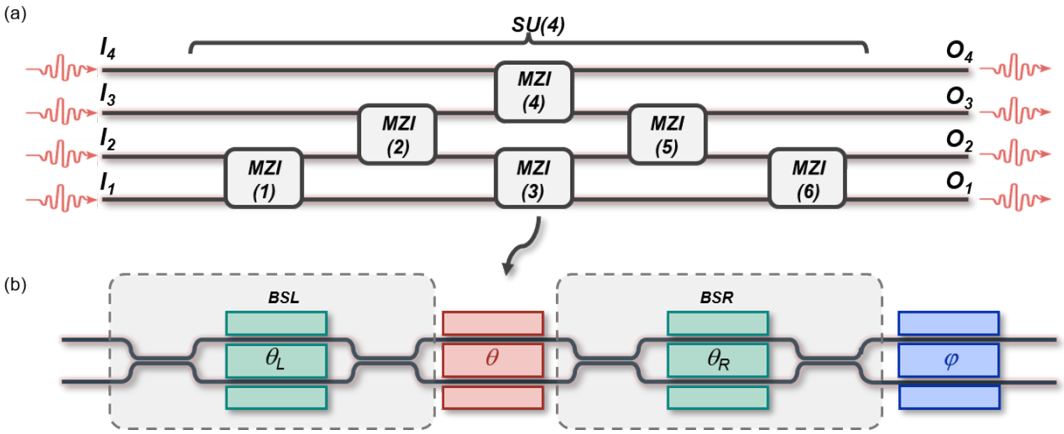

图 1. (a) 由 MZI 单元 (1) 至 (6) 构成的任意 SU(4)，构建了该4×4 可编程线性光子电路。(b) 使用 Miller 算法实现完美 SU(2) 变换的 MZI 单元示例。

我们的器件采用 PLACE 技术，制造在 X 切 4 英寸 LNOI 晶圆上。该晶圆包含一层 500 nm 厚的铌酸锂层，键合在埋置二氧化硅 (SiO_2) 层上，而该层位于 500-μm 厚的硅衬底 (NANOLN) 上。制造工艺的详细信息见我们此前的工作 [21,25]。图 2(a) 中央展示了使用数码相机拍摄的已制造可编程线性光子电路照片。该器件通过 6 个可重构 MZI 单元实现任意 $SU(4)$ 变换，其中包含 24 个可单独寻址的相位调制器。在我们的器件中，所有移相器均利用铌酸锂的电光 (EO) 驱动，晶体 Z 轴位于水平面内，并与波导垂直。采用这种配置时，施加电压后，地-信号-地 (GSG) 电极会在每个 MZI 的两条臂中产生强度相等、方向相反的电场，从而使两条臂中传输的光产生相位差。

图2(b) 进一步展示了每个MZI 单元的内部结构，其中每个相位调制器的长度约为 7mm，MZI单元的总长度为~30 mm。我们的实验测得，单个定向耦合器的光学损耗为~0.02分贝，光波导的传输损耗为~0.025 分贝/cm，使得可重构 MZI 单元的总光学损耗达到 0.15 分贝。为了将 $SU(4)$ 变换电路限制在4英寸晶圆内，该器件在 32 mm× 8 mm芯片面积上折叠了四次。与绝缘体上硅平台相比，该器件相对较大的占用面积主要是由于基于普克尔斯效应的纯线性电光调制器的电压效率相对较低，以及铌酸锂与二氧化硅的折射率差适中。这是对电光效应在配置速率和功耗方面压倒性优势的一种权衡。应当指出的是，尽管我们的MZI 长度几乎是基于绝缘体上硅的最佳性能器件中MZI长度的两倍，但传输损耗并未因此有所牺牲 [2], 这得益于铌酸锂较低的光吸收，以及 PLACE技术制备的极其平滑的波导侧壁。另一方面，借助 PLACE技术在米级连续光刻方面的独特能力，如今已经可以实现具有极低光学损耗的超大规模芯片加工。

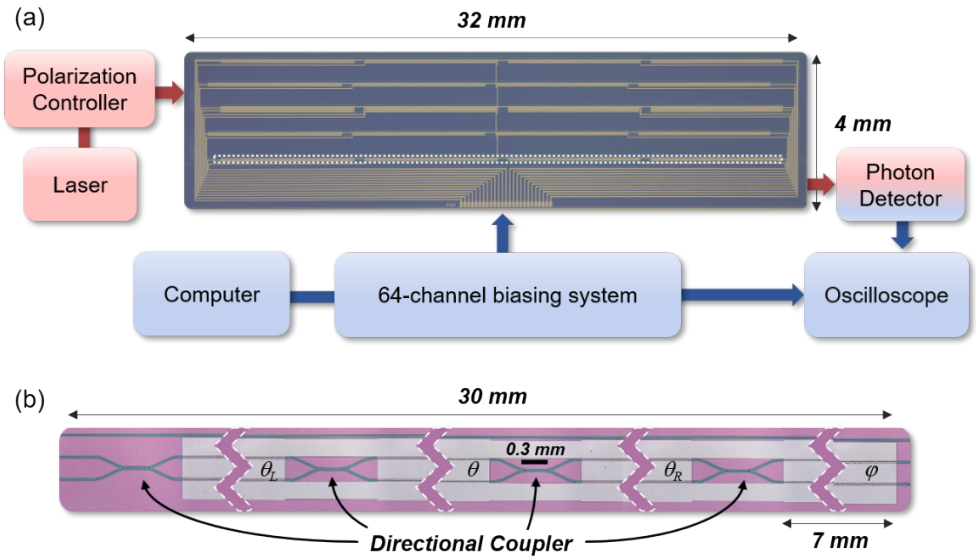

图 2. (a) 任意 SU(4) 变换，由 24 个可单独调谐的相位调制器和 6 个可重构的 MZI 单元组成。(b) 带有额外移相器 θ_L 和 θ_R 的完整可编程 MZI 单元的显微照片。

3. 器件校准与表征

制造完成的可编程光子电路通常会因不可避免的制造工艺波动而出现随机相位偏移和非理想分光比。因此，在为特定应用进行编程之前，必须对器件中的所有马赫-曾德尔干涉仪进行校准。校准过程依据器件中 MZI单元的拓扑结构和排列顺序进行，实验装置如图2(a)所示。实验装置的详细信息见“方法”。如图3(a)所示，内部移相器的校准过程从 MZI单元 (4)、(5) 和 (6)（红色方框）开始，接着校准 MZI单元 (2) 和 (3)（蓝色方框），最后校准 MZI单元 (1)（绿色方框）。校准过程的详细信息同样见“方法”。表1列出了 4×4 可编程线性光子电路中 MZI单元处于交叉态和直通态配置时所需的偏置电压。

表 1. 4x4 可编程线性光子电路中 MZI单元处于交叉态和直通态配置时所需的偏置电压。

MZI单元		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
θ	$V_{B.S.}$ (V)	-8.08	-1.03	-3.97	-2.51	1.87	-5.68
	$V_{C.S.}$ (V)	-2.38	4.00	2.81	3.12	6.51	-1.09
φ	$V_{B.S.}$ (V)	-2.46	-0.52	-5.66	4.03	-1.28	-
	$V_{C.S.}$ (V)	4.78	4.46	-0.52	8.99	3.21	-

为表征所制造器件的重构速度，我们选择了路径 I_4-O_3 和 MZI 单元（5），并测量了透射率随电压变化的曲线，如图 3(b) 所示。结果显示，半波电压（V_π）为 4.64 V，直通路径（I_4-O_3）和交叉路径（I_4-O_2）的消光比分别为 -36 分贝和 -34 分贝。当 MZI 单元（4）设为交叉态时，任意波形发生器（AWG）产生并经电子放大器放大的 100 兆赫方波电压（峰峰值为 4.4 V）施加到 MZI 单元（5）的内部相移器上。图 3(c) 显示了测得的透射率随时间变化的曲线，表明上升时间为 500 ps，下降时间为 1.7 ns，分别如图 3(d) 和 (e) 所示。高-

与基于绝缘体上铌酸锂的类似器件相比，频率响应较差，主要是由于所用电极存在阻抗失配和较大的微波损耗。这些电极通过飞秒激光微加工直接制备，以保持较高的制备效率和较大的占用面积。所制备电极的厚度仅为 100 nm，且并非专为高频工作设计；微波信号还需要沿电线传输 20 mm 的长距离才能到达调制器。已有充分研究表明，采用精心设计的行波电极，绝缘体上铌酸锂器件的带宽可轻松达到 100 GHz 以上[16,18,19], ，这为未来通过提高马赫-曾德尔干涉仪的调谐速度来提升计算能力提供了充足空间。

EO 移相器的功耗可以通过分析由 GSG 电极和光波导构成的电容器的充放电过程来确定。每次充放电过程所耗散的能量可估算为 $\Delta E_{DISS} = CV_{DD}^2/2$ [26], ，其中 C 是移相器的电容，V_{DD} 是充电电压。在我们的器件中，电容 C 计算为 21 fF，而 V_{DD} 与移相器的平均半波电压（V_π）相同，根据表 1，该电压为 5.38 V，因此每次 π 相移的功耗为 304 fJ。因此，在 1 兆赫调制速率下工作时，单个移相器的功耗可估算为 0.6 μW，而总共包含 24 个移相器的矩阵变换器件的功耗可估算为 15 μW。值得注意的是，通过精心设计 GSG 电极和波导，在 70 Gbit s^{-1} [16] 下工作时，每个移相器的功耗还可进一步降低至 ~0.37 fJ bit^{-1} 。

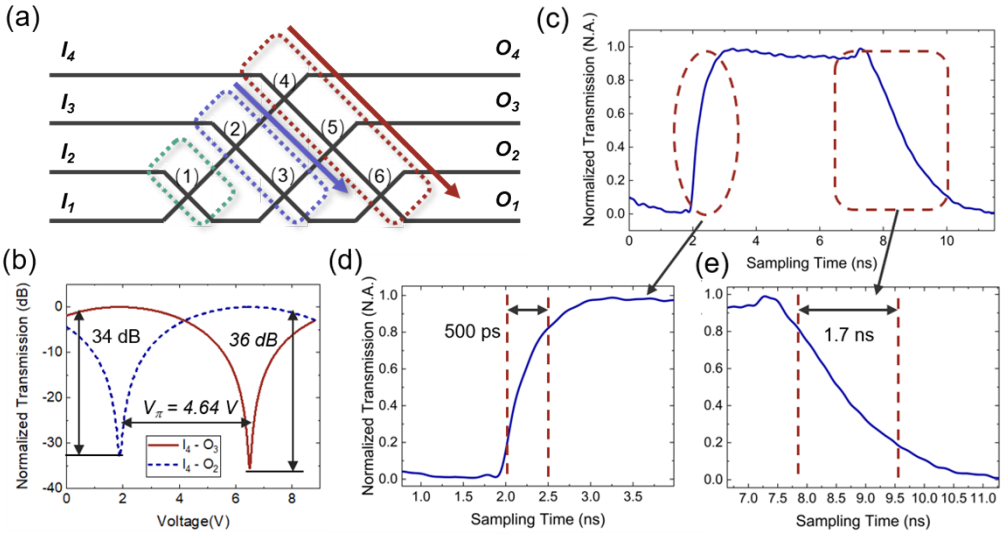

图 3. (a) *SU*(*4*) 中MZI单元的表征顺序示意图。(b) 2×2 可重构 MZI单元(5)从I_4 输入端口到 O_3 和 O_2 输出端口的归一化光功率随偏置电压的变化。(c)在MZI 单元(5) 上施加100 兆赫、4.4V峰峰值（pk–pk）方波时，路径I_4-O_3 的归一化传输。(d) 和 (e)传输曲线上升沿和下降沿的放大视图，突出显示 500 ps 的上升时间和 1.7 ns 的下降时间。

4. 线性矩阵变换的演示与讨论

基于 4×4 可重构 MZI 的线性光学处理器的编程过程，是将线性变换矩阵 $[T_{SU(4)}]$ 分解为器件中相应 MZI单元的酉矩阵，从而实现任意 *SU*(*4*)。分解过程通过以下方式完成。

依次从右侧开始按照特定顺序将 $[T_{SU(4)}]$ 与 $[D_{MZI}^{(i)}]_{H_{4\times4}}^{-1}$ 相乘，其中 $[D_{MZI}^{(i)}]_{H_{4\times4}}^{-1}$ 是特定 MZI 单元的酉变换矩阵的逆矩阵。如图 4(a)所示，分解过程从 MZI单元(1)、(2)和 (4) 开始（见图 4(a) 中的红框），将分解矩阵第四行和第四列中的所有非对角元素归零，从而使有效维数减少一维。随后，将MZI单元(3)、(5)（图 4(a)中的蓝框）以及最后的 (6)（图 4(a) 中的绿框）的传输矩阵相乘，将所有非对角元素归零，最终得到一个单位矩阵。分解过程的详细信息请参见方法部分。作为示例，考虑使用两个随机线性变换矩阵对两个不同的 SU(4) 进行编程：

$$T_{SU(4)_1} = \begin{pmatrix} -0.076 - 0.82j & -0.059 - 0.361j & -0.097 - 0.214j & -0.251 + 0.264j \\ -0.249 - 0.105j & 0.665 + 0.209j & -0.209 - 0.584j & -0.055 + 0.231j \\ -0.356 + 0.313j & -0.142 - 0.514j & 0.274 - 0.299j & -0.500 - 0.277j \\ \#(1) & 0.041 - 0.15j & -0.249 + 0.183j & -0.518 - 0.358j \end{pmatrix}$$

$$T_{SU(4)_2} = \begin{pmatrix} 0.073 - 0.692j & 0.085 + 0.05j & 0.214 - 0.681j & -0.552 - 0.418j \\ -0.034 + 0.016j & -0.546 - 0.529j & 0.405 + 0.166j & -0.369 + 0.241j \\ 0.152 + 0.118j & \cdots & & \\ 0\ 011 & 0\ 537j & 0\ 019 & 0\ 387j \\ 0 & 111j & 0\ 515 & 0\ 383j \\ 0\ 352 & 0 & 0\ 346 + 0 & 0\ 135 \\ 0 & 235 & 0 & \\ \cdots & & & \\ \#(2) & & & \end{pmatrix}$$

器件中 MZI 单元的移相器实现这两个$SU(4)$s 所需的相移，是通过上述分解过程获得的。表 2 列出了各 MZI 单元所需的相移及相应的偏置电压。

表 2 编程实现 SU(4)s 所需的马赫-曾德尔干涉仪的计算得到的相移及相应偏置电压

	$SU(4)_1$						$SU(4)_2$					
MZI	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
θ (弧度)	-2.68	2.08	-0.34	1.76	-1.85	-0.65	1.73	1.16	-1.36	-1.69	-2.67	1.63
V_θ (V)	4.16	7.32	2.08	6.27	3.78	7.15	0.75	5.85	13.43	0.10	4.82	1.29
φ (弧度)	0.92	-0.21	-0.79	0.17	0.61	-0.53	0.11	0.97	-0.27	-0.55	-1.74	-0.09
V_φ (V)	6.91	4.13	8.46	9.26	4.09	-	5.04	6.00	9.32	8.12	0.73	-

通过根据表 2 中列出的参数设置偏置电压，并测量入射光依次从输入端口(1)-(4) 进入时各输出端口处的光功率，进一步考察了我们器件的性能。来自所有不同光路的归一化光功率可表示为一个4×4 传输矩阵，其中矩阵的每个元素应等于目标SU(4) 的传输矩阵中相应元素的模。理论结果和实验结果均绘制于图4(b)-4(e) 中。图4(f) 显示了所有光路的理论结果与实验结果之间的差异。从图4(f) 可以清楚地看出，实验值相对于理论预测的最大偏差为 ~8%。实验偏差的最大贡献来自校准和测试过程中透镜光纤振动引起的波动，通过在可编程光子电路的输入端和输出端集成模式转换器，可以进一步优化这一问题。

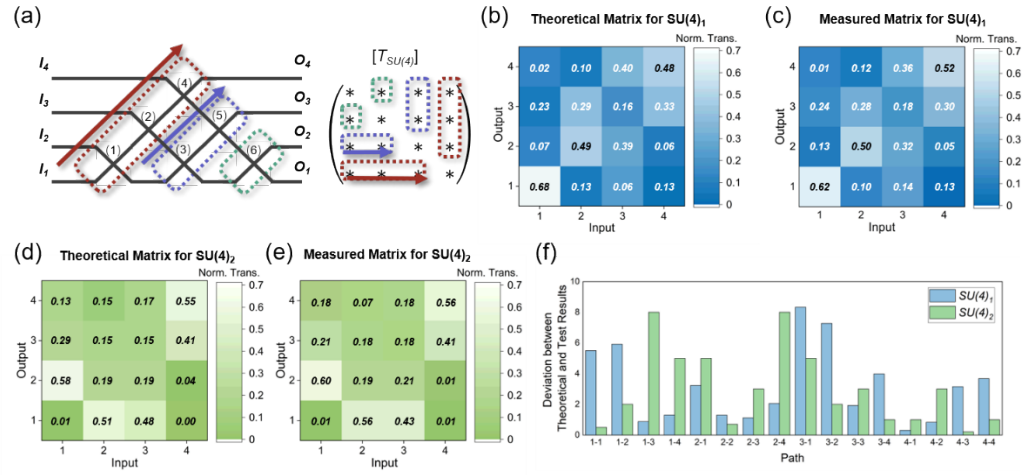

图 4。（a）SU(4)部分中用于分解酉变换矩阵 [$T_{SU(4)}$] 的 MZI 单元排列示意图。（b）和（c） 器件中构建 $SU(4)_1$ 所有可能路径的归一化光功率传输矩阵的理论值和测量值。（d）和（e）器件中构建 $SU(4)_2$ 所有可能路径的归一化光功率传输矩阵的理论值和测量值。（f）所有可能路径的理论结果与实验结果之间的差异。

表3 对比了我们的器件与现有基于SOI和氮化硅平台的先进器件的性能。可以清楚地看到，在光学损耗、消光比、功耗和重构时间方面，基于LNOI 的可编程集成电路优于现有基于 SOI 和氮化硅平台构建的器件。此外，值得注意的是，即使器件较大的占用面积带来了相对较大的制造误差，我们的器件仍能够利用米勒校准算法实现超过34 分贝的消光比。制造缺陷的高容忍度对于与 VLSPI相关的实际应用尤其有利，因为在这些应用中，高精度制造未必始终可行。最后但同样重要的是，我们的方法具有良好的可扩展性：通过增加马赫-曾德尔干涉仪的数量，在芯片上构建更大的光网络，并采用行波电极以实现数百GHz的工作带宽，器件的性能可以得到可靠提升。这两种方法都将使器件在量子和经典光计算方面达到前所未有的性能水平。

表 3 不同材料平台上可编程集成电路关键性能指标的比较 **s.**

	SOI			**SiN**	**LNOI**
	[2]	[10]	[11]	[12]	**本研究**
模式数	26	8	4	4	4
相移器编号	176	56	20	12	24
占用面积	4.9 × 2.4 毫米²	-	-	1.3 × 0.6 毫米²	32×4 毫米²
MZI损耗	0.1 分贝	0.4 分贝	1.5 分贝	3.5 分贝	0.15 分贝
消光比	-60 分贝	-27 分贝	-43 分贝 @ B.S. -15 分贝 @ C.S.	-30 分贝	-34 分贝 @ C.S -36 分贝 @ B.S.
π-移位功耗 功耗	55 毫瓦	3 mW	21 毫瓦	200 μW @ 1兆赫	0.6 μW @ 1兆赫
切换时间	10 μs	50 μ秒	30 μ秒	5 ns	500 ps 上升 1.7 ns 下降

5. 结论

总而言之，我们展示了采用 PLACE 技术在 LNOI平台上制造并表征 4×4 可编程线性光子电路。该器件性能优异，切换速度快，上升时间为 500 ps，下降时间为 1.7 ns；每个 MZI单元的插入损耗为 0.15 分贝，交叉与直通路径的片上消光比均低于 -34 分贝。在 1 兆赫调制下运行时，片上总功耗仅为 15 μW。我们的结果表明，在光学损耗、消光比、功耗和重构时间方面，LNOI可编程集成电路的性能优于绝缘体上硅和氮化硅器件。这项工作为实现面向前沿经典与量子应用的大规模、低功耗、高性能光子电路迈出了重要一步。

6. 方法

利用级联*MZI*构造任意特殊酉群。

与输入和输出信号相关的 MZI 单元在相应波导通道 m 和 n 中的酉变换矩阵，在 $SU(N)$ 内可表示为：

$$[D_{MZI}(m,n)]_{H_{N\times N}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \cdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & je^{j\frac{\theta}{2}}e^{j\phi}sin\left(\frac{\theta}{2}\right) & je^{j\frac{\theta}{2}}e^{j\phi}cos\left(\frac{\theta}{2}\right) & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & cos\left(\frac{\theta}{2}\right) & -sin\left(\frac{\theta}{2}\right) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \cdots & \cdots & \cdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ m \\ n \\ \vdots \\ N \end{matrix} .\#(1)$$

酉变换矩阵 $[D]_{4\times4}$ 可由 MZI (1) 至 (6) 的酉变换矩阵 $[D]_{MZI}$ 相乘得到，其数学形式由光子电路中 MZI 的排列顺序决定。因此，酉变换矩阵 $[D]_{4\times4}$ 定义如下：

$$[D]_{4\times4} = \left[D_{MZI}^{(6)}\right]_{H_{4\times4}} \cdot \left[D_{MZI}^{(5)}\right]_{H_{4\times4}} \cdot \left[D_{MZI}^{(4)}\right]_{H_{4\times4}} \cdot \left[D_{MZI}^{(3)}\right]_{H_{4\times4}} \cdot \left[D_{MZI}^{(2)}\right]_{H_{4\times4}} \cdot \left[D_{MZI}^{(1)}\right]_{H_{4\times4}} .\#(2)$$

实验装置详情

使用偏振控制器（Polarization Synthesizer，PSY-201，General Photonics Corp.，美国加利福尼亚州奇诺）将连续激光器（CTL 1550，TOPTICA Photonics Inc.，美国纽约州法明顿）在 1550 nm 波长下提供的光场方向旋转为横电（TE）偏振，因为该器件专为 TE 偏振光设计，以实现最佳电光调制效率。光通过透镜光纤锥形端耦入并耦出所制备的器件，随后使用光子探测器（APD-2M-A-100K，Luster，中国北京）转换为电信号，并可在高速实时示波器（MSO64B，Tektronix Inc.，美国比弗顿）上显示和分析。该器件通过由模拟输出模块（PXIe-6739，National Instruments Corp.，美国得克萨斯州奥斯汀）控制的 64 通道偏置系统进行电子编程。

校准过程的详细信息

内部移相器的整个校准流程从MZI单元(4)、(5)和(6)（红框）开始，随后校准MZI单元(2)和(3)（蓝框），最后校准MZI单元(1)（绿框），如图3(a)所示。举例来说，我们首先通过对MZI单元(4)的内部移相器θ_4以及相应的额外移相器θ_{4L}和θ_{4R}施加偏置电压，来校准该单元。记录路径I_4-O_4和I_4-O_3上的光传输功率，并观察其随施加于内部移相器的偏置电压的变化。路径I_4-O_4（直通路径）和I_4-O_3（交叉路径）的消光比均可通过反复调整施加于额外移相器θ_{4L}和θ_{4R}的电压进行优化。直通态电压$V_{B.S}$定义为使直通路径传输最大时施加的电压。同样，交叉态电压$V_{C.S.}$定义为使交叉路径传输最大时施加的电压。随后，产生所需相移θ所需的内部移相器偏置电压可计算如下：

$$V(\theta) = V_{C.S.} + \frac{\theta|V_{B.S.} - V_{C.S.}|}{\pi} \#(3)$$

为校准外部移相器，将相应的MZI单元和后续的MZI单元设为50:50分束器，以构成另一个MZI；新构成的MZI两臂上的MZI单元则工作在直通态。例如，在校准移相器φ_2的过程中，将MZI单元(2)和(5)设为50:50分束器，并使MZI单元(4)和(3)工作在直通态。考虑到推挽电极的配置，也可以采用相同方案校准相移器φ_4。采用相同的方法，使MZI单元(5)工作在直通态，即可在由MZI单元(3)和(6)构成的MZI中校准φ_3和φ_5。尽管在我们的器件中无法校准φ_6，但这不会影响最终测试结果，因为它只会给输出光引入一个未知的恒定相位。

分解过程的详细说明

必须指出，我们总能找到一个$[D_{MZI}^{(i)}]_{H_{4\times4}}^{-1}$，使得在$[T_{SU(4)}]$与$[D_{MZI}^{(i)}]_{H_{4\times4}}^{-1}$连续相乘的每一步中，结果矩阵下三角中的一个非对角元素变为零，即任意$[T_{SU(4)}]$与$[D_{MZI}^{(1)}]_{H_{4\times4}}^{-1}$的乘积可表示如下：

$$\left[T_{SU(4)}\right]\cdot\left[D_{MZI}^{(1)}\right]_{H_{4\times4}}^{-1} = \begin{pmatrix} U_{11} & U_{12} & U_{13} & U_{14} \\ U_{21} & U_{22} & U_{23} & U_{24} \\ U_{31} & U_{32} & U_{33} & U_{34} \\ U_{41} & U_{42} & U_{43} & U_{44} \end{pmatrix} \#$$
$$\cdot -je^{-j\frac{\theta_1}{2}} \begin{pmatrix} e^{-j\varphi_1}sin\left(\frac{\theta_1}{2}\right) & cos\left(\frac{\theta_1}{2}\right) & 0 & 0 \\ e^{-j\varphi_1}cos\left(\frac{\theta_1}{2}\right) & -sin\left(\frac{\theta_1}{2}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \#(4)$$
$$= \begin{pmatrix} * & * & * & * \\ * & * & * & * \\ * & * & * & * \\ 0 & * & * & * \end{pmatrix}, \qquad if: \theta_1 = 2arctan\left(\frac{-U_{42}}{U_{41}}\right).$$

如图4(a)所示，分解过程从马赫-曾德尔干涉仪(1)、(2)和(4)（图4(a)中的红框）开始，它们将分别消去分解矩阵第四行中的第一个、第二个和第三个元素。由于分解矩阵具有酉性质，当所有非对角元素

变为零时，每一行中对应列的非对角元素也会变为零。因此，分解矩阵的有效维数可按如下方式减一：

$$\left[T_{SU(4)}\right]\cdot\left[D_{MZI}^{(1)}\right]_{H_{4\times4}}^{-1}\cdot\left[D_{MZI}^{(2)}\right]_{H_{4\times4}}^{-1}\cdot\left[D_{MZI}^{(4)}\right]_{H_{4\times4}}^{-1}=\begin{pmatrix}\begin{pmatrix}T_{SU(3)}\end{pmatrix} & \begin{matrix}0\\0\\0\end{matrix}\\ \begin{matrix}0&0&0\end{matrix} & 1\end{pmatrix}\#(5)$$

下一步是将马赫-曾德尔干涉仪 (3)的传输矩阵与(5) 的传输矩阵相乘，从而将结果矩阵的有效维数降至二维（图4(a)中的蓝色框）。最后，将分解矩阵乘以 $[D_{MZI}^{(6)}]_{H_{4\times4}}^{-1}$ 将使所有非对角元素归零，从而得到一个单位矩阵（图 4(a) 中的绿色框）。因此，

$$\left[T_{SU(4)}\right]\cdot\left[D_{MZI}^{(1)}\right]_{H_{4\times4}}^{-1}\cdot\left[D_{MZI}^{(2)}\right]_{H_{4\times4}}^{-1}\#$$
$$\cdot\left[D_{MZI}^{(4)}\right]_{H_{4\times4}}^{-1}\cdot\left[D_{MZI}^{(3)}\right]_{H_{4\times4}}^{-1}\cdot\left[D_{MZI}^{(5)}\right]_{H_{4\times4}}^{-1}\cdot\left[D_{MZI}^{(6)}\right]_{H_{4\times4}}^{-1}=\left[I\right]_{4\times4}\#(6)$$

方程（5）等价于方程（1），因此，在分解过程之后，即可获得实现任意 *SU*(*4*) 所需的全部相移。

资助。 国家重点研发计划（2019年YFA0705000）、国家自然科学基金（项目编号：12004116、12104159、11874154、11734009、11933005、12134001、61991444、12204176）、上海市科学技术委员会（编号：21DZ1101500）、上海市科技重大项目（项目编号：2019年SHZDZX01）、上海市扬帆计划（21YF1410400）和上海市浦江人才计划（21PJ1403300）。量子科学与技术创新计划（2021年ZD0301403）。

披露。作者声明不存在利益冲突。

数据可用性。 本文所述结果的相关数据目前尚未公开，但可能会ETwitter

可在合理请求下向作者索取。

参考资料

1. Y. Shen、N. C. Harris、S. Skirlo、M. Prabhu、T. Baehr-Jones、M. Hochberg、X. Sun、S. Zhao、H. Larochelle、D. Englund 和 M. Soljačić, 《利用相干纳米光子电路进行深度学习》, Nature Photonics **11**(7), 441–446（2017年）。2. N. C. Harris、G. R. Steinbrecher、M. Prabhu、Y. Lahini、J. Mower、D. Bunandar、C. Chen、F. N. C. Wong、T. Baehr-Jones、M. Hochberg、S. Lloyd 和 D. Englund, 《可编程纳米光子处理器中的量子传输模拟》, 《自然·光子学》**11**(7), 447–452（2017年）。3. D. Pérez、I. Gasulla、L. Crudgington、D. J. Thomson、A. Z. Khokhar、K. Li、W. Cao、G. Z. Mashanovich 和 J. Capmany, 《多用途硅光子信号处理器核心》, Nature Communications **8**(1),（2017年）。4. G. Wetzstein、A. Ozcan、S. Gigan、S. Fan、D. Englund、M. Soljačić、C. Denz、D. A. B. Miller 和 D. Psaltis, 《利用深度光学与光子学进行人工智能推理》, Nature **588**(7836), 39–47（2020年）。5. B. J. Shastri、A. N. Tait、T. Ferreira de Lima、W. H. P. Pernice、H. Bhaskaran、C. D. Wright 和 P. R. Prucnal, 《面向人工智能与神经形态计算的光子学》, 《自然·光子学》**15**(2), 102–114（2021年）。6. X. Xu、L. Zhu、W. Zhuang、D. Zhang、P. Yuan 和 L. Lu, 《基于相干纳米光子电路的光电混合卷积神经网络》, 《光学工程》**60**(11),（2021年）。7. R. Shao、G. Zhang 和 X. Gong, 《针对具有不精确组件的光学神经网络，采用遗传算法的广义鲁棒训练方案》, 《光子学研究》**10**(8), 1868（2022年）。8. N. C. Harris、J. Carolan、D. Bunandar、M. Prabhu、M. Hochberg、T. Baehr-Jones、M. L. Fanto、A. M. Smith、C. C. Tison、P. M. Alsing 和 D. Englund, 《线性可编程纳米光子处理器》, Optica **5**(12), 1623（2018年）。

9. H. Zhou, Y. Zhao, G. Xu, X. Wang, Z. Tan, J. Dong, and X. Zhang, “用于 PageRank 算法的芯片级光学矩阵计算”, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics **PP**, 1–1（2019年）。10. H. Zhang, M. Gu, X. D. Jiang, J. Thompson, H. Cai, S. Paesani, R. Santagati, A. Laing, Y. Zhang, M. H. Yung, Y. Z. Shi, F. K. Muhammad, G. Q. Lo, X. S. Luo, B. Dong, D. L. Kwong, L. C. Kwek, and A. Q. Liu, “用于实现复值神经网络的光学神经芯片”, Nat Commun **12**(1), 457（2021年）。11. F. Shokraneh, M. S. Nezami, and O. Liboiron-Ladouceur, “4 × 4可重构基于 MZI 的线性光学处理器的理论与实验分析”, Journal of Lightwave Technology **38**(6), 1258–1267（2020年）。12. M. Dong, G. Clark, A. J. Leenheer, M. Zimmermann, D. Dominguez, A. J. Menssen, D. Heim, G. Gilbert, D. Englund, and M. Eichenfield, “采用低温兼容、可见光至近红外 200 mm CMOS 架构的高速可编程光子电路”, Nat. Photon. **16**(1), 59–65（2022年）。13. W. Ma, Z. Liu, Z. A. Kudyshev, A. Boltasseva, W. Cai, and Y. Liu, “利用深度学习设计光子结构”, Nat. Photonics **15**(2), 77–90（2021年）。14. 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, and M. Lončar, “薄膜铌酸锂上的集成光子学”, Adv. Opt. Photon.**13**(2), 242（2021年）。15. Y. Jia, L. Wang, and F. Chen, “离子切割铌酸锂绝缘体上技术：最新进展与展望”, Applied Physics Reviews **8**(1), 011307（2021年）。16. C. Wang, M. Zhang, X. Chen, M. Bertrand, A. Shams-Ansari, S. Chandrasekhar, P. Winzer, and M. Lončar, “工作于兼容 CMOS 的电压下的集成铌酸锂电光调制器”, Nature **562**(7725), 101–104（2018年）。17. M. Xu, M. He, H. Zhang, J. Jian, Y. Pan, X. Liu, L. Chen, X. Meng, H. Chen, Z. Li, X. Xiao, S. Yu, S. Yu, and X. Cai, “基于薄膜铌酸锂平台的高性能相干光调制器”, Nat Commun **11**(1), 3911（2020年）。18. 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, and X. Cai, “用于 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”, Nature Photonics **13**(5), 359–364（2019年）。19. P. Kharel, C. Reimer, K. Luke, L. He, and M. Zhang, “利用微结构电极突破集成铌酸锂调制器的电压–带宽限制”, Optica **8**(3), 357（2021年）。20. J. Zhou, R. Gao, J. Lin, M. Wang, W. Chu, W. Li, D. Yin, L. Deng, Z. Fang, and J. Zhang, “采用光刻辅助化学机械刻蚀在绝缘体上铌酸锂上制备的米级长度电光可切换光学真时延线”, Chinese Physics Letters **37**(8), 084201（2020年）。21. L. Song, J. Chen, R. Wu, Y. Zheng, Z. Liu, G. Wang, C. Sun, M. Wang, and Y. Cheng, “薄膜铌酸锂中连续调谐范围为 ~220 fs 的电光可调光学延迟线”, Optics Letters **48**(8)（2023年）。22. K. Luke, P. Kharel, C. Reimer, L. He, M. Loncar, and M. Zhang, “晶圆级低损耗铌酸锂光子集成电路”, Optics Express **28**(17), 24452–24458（2020年）。23. M. Wang, R. Wu, J. Lin, J. Zhang, Z. Fang, Z. Chai, and Y. Cheng, “化学机械抛光光刻：在绝缘体上铌酸锂上实现低损耗、大规模光子集成的途径”, Quantum Engineering **1**(1), e9（2019年）。24. D. A. B. Miller, “采用非理想元件实现完美光学”, Optica **2**(8), 747（2015年）。25. R. Wu, L. Gao, Y. Liang, Y. Zheng, J. Zhou, H. Qi, D. Yin, M. Wang, Z. Fang, and Y. Cheng, “利用光刻辅助化学机械刻蚀（PLACE）高速率制造低损耗铌酸锂电光调制器”, Micromachines **13**(3), 378（2022年）。26. D. A. B. Miller, “互连用光调制器的能耗”, Opt. Express **20**(S2), A293（2012年）。