砷化镓光学相控阵光子集成电路

迈克尔·尼克森[1,*]，宋博文1，吉姆·布鲁克海瑟2，格雷戈里·欧文2，扬·克莱纳特2，乔纳森·克拉姆金[1]

[1]美国加利福尼亚州圣巴巴拉市加利福尼亚大学圣巴巴拉分校电气与计算机工程系，邮编 *93106*[2]美国俄勒冈州比弗顿市 *SW Millikan Way 14523* 号，*MKS Instruments* 光子解决方案部，邮编 *97005*[*]*nickersonm@ece.ucsb.edu*

摘要：采用低复杂度工艺，在砷化镓光子集成电路平台上制备了一个 16 通道光学相控阵。使用 1064 nm 外部激光器进行测试，该阵列实现了 0.92° 的光束宽度、15.3° 的无栅瓣扫描范围和 12 分贝的旁瓣电平。基于反向偏置 p-i-n 结构，组件相位调制器长 3 mm，直流功耗低于 5 μW，电光带宽高于 770 MHz。采用相同结构的独立 4 mm 长相位调制器，在 980 nm 至 1360 nm 波长范围内测试时，单边 V_{π}·L 调制效率为 0.5 V·cm 至 1.23 V·cm。

1. 引言

光束转向正日益受到关注，其新兴应用涵盖陆地导航激光雷达 [1] 、自由空间光通信 [2], 、气候监测 [3], , 乃至灾害救援 [4]。传统的光束转向方法通常采用旋转光源或云台，通过大幅度的物理运动来实现转向，因此系统体积庞大，转向速度也受限于赫兹范围。光学相控阵（OPAs）通过实现电子光束转向，避免使用运动部件，从而克服了这些机械限制。光学相控阵本质上是人们熟悉的射频相控阵的光学版本，自 20 世纪 40 年代以来，射频相控阵便已得到应用 [5], 。通过对齐多个子孔径的相位，使其输出在远场发生相干干涉，即可形成一个大的有效孔径。

光子集成电路（PIC）技术为光学相控阵提供了可扩展的平台。迄今为止，大多数集成光学相控阵研究都聚焦于硅光子学（SiPh）以及 1550 纳米附近的工作波段 [6–11]。SiPh 技术的不足包括：采用基于热效应的相位调制器，其调制速度受限于 MHz 级且功耗较高；或采用基于载波的相位调制器，虽然速度更快，但会产生较高的残余幅度调制（RAM）[12–15]。硅的带隙还将工作波长限制在 1100 纳米以上，因此无法覆盖 1000 纳米附近的波段，而该波段常用于地形测绘和遥感激光雷达 [16–18]。此外，SiPh 片上增益和激光器只能通过复杂的集成技术实现，例如倒装芯片或晶圆键合。相比之下，III-V 族化合物半导体平台可原生提供光增益、激光器和高效的低残余幅度调制相位调制器。

基于 III-V 族化合物半导体的光学相控阵主要集中于工作在 1300 纳米和 1550 纳米通信波段的磷化铟（磷化铟）光子集成电路平台。这些平台已实现低功率光学相控阵，其中一些还具有片上增益 [19–25]。然而，磷化铟光子集成电路不适用于更短波长，且制造成本通常较高。

砷化镓（砷化镓）是另一种 III-V 族材料，长期以来一直用于构建分立光学元件 [26–29]。尽管由于磷化铟系统支持常见的电信波长，光子集成电路技术的发展一直侧重于磷化铟系统，但砷化镓

该材料在高功率微波电子学和工作波长接近 900 nm 的二极管激光器中的广泛应用，也推动其制造方法日趋成熟。

在本研究中，我们开发了一种制造复杂度较低的砷化镓光子集成电路平台，并利用该平台展示了一种具有16个通道的光学相控阵，如图1所示。集成式相位调制器具有宽带、高速和低残余振幅调制的特点。此次展示不包含片上光学增益，但该平台能够在不牺牲光学相控阵性能的情况下，在900- 1300 nm范围内集成增益 [30–32]。

该16通道光子集成电路光学相控阵采用单输入和由相位调制器阵列汇聚至间距为4 μm的密集边缘耦合输出结构；使用1064 nm外部激光器进行表征时，其光束宽度为0.92°，无栅瓣转向范围为15.3°，旁瓣电平为12 分贝。使用1030 nm外部激光器测试时，单个长度为3 mm的相位调制器表现出单边 $V_{\pi}L$ 效率为0.7 V·cm，残余振幅调制低于0.5 分贝；在 4π 相位调制 [33], 直流功耗条件下，调制深度时的功耗低于5 μW；安装并引线键合至印刷电路板（印刷电路板）后，电光带宽超过770 MHz。

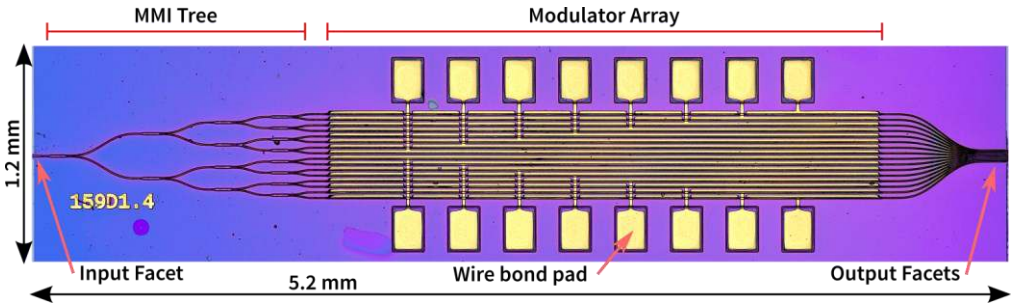


图1。 制备的光子集成电路的光学显微图。

2. 光子集成电路平台设计

2.1 光子集成电路架构

图1展示了制备的光子集成电路，其占用面积为 5.2 mm × 1.2 mm。输入端为一条宽 5 μm 的单脊形波导，带有解理端面，旨在实现与透镜光纤的高耦合效率。随后，波导逐渐收窄至 2 μm，并通过级联树状多模干涉（MMI）分束器分成 16 个相同的通道。每个通道均由相同的电光相位调制器构成，长度为 3 mm、宽度为 2 μm，且具有低功率和低残余振幅调制特性。阵列随后收敛，在输出解理端面处形成 4 μm 的密集横向间距。该光子集成电路的通道数限制为 16，以简化集成和测试；但很容易扩展到显著更高的通道数。

这款 16 通道光子集成电路专为展示该砷化镓平台上的光学相控阵而设计，适用于宽范围的中心波长，并可在典型可调谐激光器范围内持续工作。器件中不含增益材料，但其组件和外延结构经过专门设计，可兼容并便于在 880–1300 nm 范围内单片集成传统的砷化镓基量子阱或量子点 [31,32,34]。为针对特定目标波长优化设计，将开发相应的增益结构；若工作波长显著偏离本研究采用的 1030 nm，则会对多模干涉分束器几何结构进行少量调整。

2.2 相位调制器

我们特别着力开发适用于光学相控阵应用的相位调制器。低传播损耗对于通道数和输出功率扩展至关重要，而低残余振幅调制则是实现整个转向范围内连续波束成形的必要条件。低功耗

对于紧凑型便携式应用十分重要，而快速扫描光束则需要较高的电光带宽。

为满足这些要求，调制器采用基于砷化镓的反向偏置 P-p-i-n-N 双异质结构，具体结构以及仿真所用的折射率和假定材料损耗详见表 1。该结构使沿 [001] 方向近似线性的电场与光学模式高度重叠，如图 2(a) 所示，从而充分利用砷化镓对沿 [01$\bar{1}$] 方向传播的 TE 模式具有的强线性和二次电光效应 [35–37]。自由载流子效应也可用于调制，但为降低残余振幅调制（RAM），本设计不采用这些效应。图 2(b) 给出了基于该设计的调制器在 1030 nm 处预期的相位调制贡献。通过使光场与砷化镓导光区域的重叠率达到 85%，并将 -10 V 偏置下与自由载流子的重叠率控制在仅 19%，实现了低光吸收和低残余振幅调制。

表 1. 相位调制器外延层结构

材料	厚度 [nm]	掺杂 [cm^{-3}]	折射率	材料损耗 [分贝/cm]
GaAs	300	(p) 1e19	3.4653	140
$Al_{0.2}Ga_{0.8}As$	1000	(p) 1e18	3.4046	15
$Al_{0.4}Ga_{0.6}As$	200	(p) 4e17	3.3551	19
$Al_{0.4}Ga_{0.6}As$	200	(p) 2e17	3.3551	11
GaAs	100	(p) 2e17	3.4653	7.2
GaAs	500	UID	3.4653	0.04
GaAs	100	(n) 2e17	3.4653	8.0
$Al_{0.3}Ga_{0.7}As$	200	（n）2e17	3.3811	13
$Al_{0.2}Ga_{0.8}As$	400	（n）4e17	3.4046	21
$Al_{0.2}Ga_{0.8}As$	1000	（n）2e18	3.4046	100
GaAs	300	（n）3e18	3.4653	120
GaAs	衬底	（n）1e18	3.4653	40

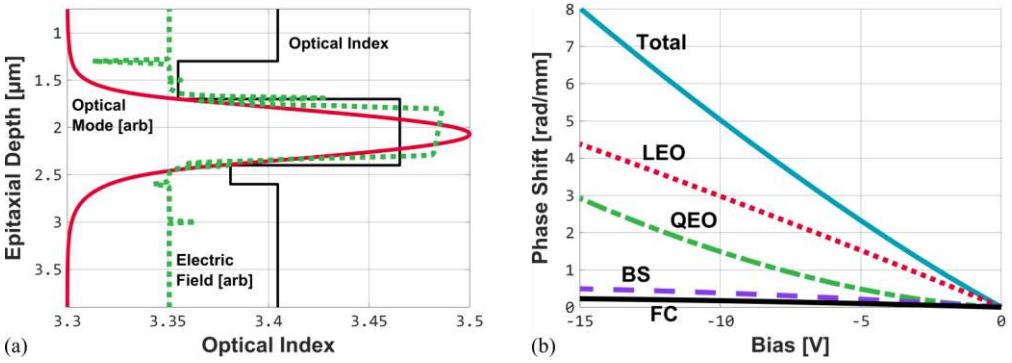


图 2。展示 (a) 光学折射率（黑色）、光学模式（红色）和电场（绿色，点线），以及 (b) 1030 nm 处相位调制的 1D 仿真（青色）；其中包括线性电光效应（LEO，红色，点线）、二次电光效应（QEO，绿色，点划线）、带隙偏移（BS，紫色，虚线）和自由载流子等离子体（FC，黑色）效应的贡献。

相位调制器实际采用宽度为 2 μm 的深脊形波导实现，顶部沉积了 P型接触，减薄后的导电衬底背面则设置了 N型接触。整个光子集成电路上覆盖着厚度为 2.5 μm 的钝化与隔离材料，该材料由二氧化硅（SiO_2）和氮化硅（SiN）交替层组成。在相位调制器脊上方开设通孔，以接入 P型接触。通过在隔离材料顶部沉积金属实现调制器之间的布线；仅在调制器上方设置的埋置金属层则确保沿调制器方向的导电性。

图 3 左半部分展示了调制器横截面和跨调制器布线示意图。

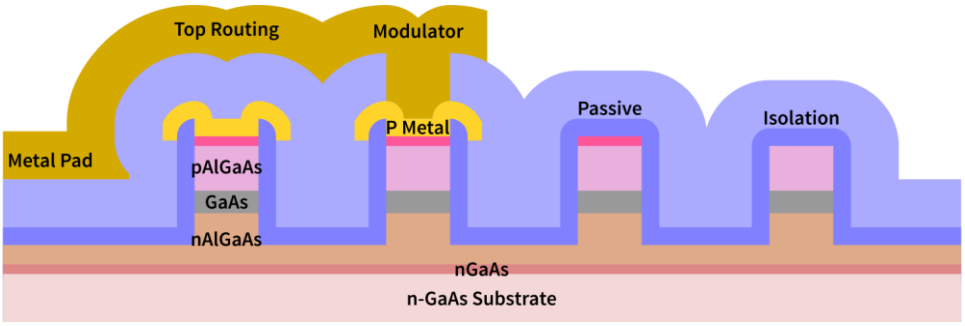


图 3。 外延结构及各种波导结构的截面示意图。

2.3 无源器件

光子集成电路的其余部分由各种无源组件组成，这些组件通过与相位调制器共用的单次深脊刻蚀形成。无源 2-µm 波导用于传输光，其结构与调制器相同，但省去了金属接触和顶部通孔。带有抗反射（AR）涂层的切割波导端面构成单个输入端和 16 个输出端。为实现调制器与其他无源组件之间的纵向电隔离，将调制器两端的短段波导通过去除顶部 p-砷化镓层，转变为电隔离区域。图 3 的右半部分展示了这些无源组件，图 4(a) 显示了仿真的基模 TE 模式。

选择 2 µm 的波导宽度是出于制造简便性和光刻分辨率限制的考虑，但这并不能天然保证单模传输。高阶模式会经历更强的弯曲损耗和 MMI 分束器附加损耗，因此可在一定程度上实现单模工作。严格的单模工作需要波导宽度约为 0.5 µm，这可以通过更高分辨率的光刻技术制造。

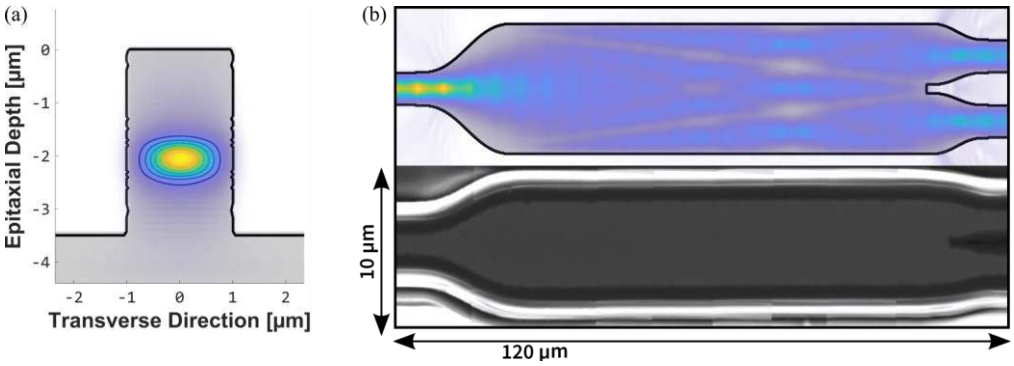


图 4。 (a) 调制器波导和无源波导的基模 TE 光学模式（彩色）及波导结构（灰色阴影）的仿真结果。(b) 1×2 MMI 分束器的仿真图像（上）和 SEM 图像（下，浅灰色，周围为明暗介电材料）。

构成 1×16 分束器的多模干涉分束器采用相同的无源波导结构，其几何尺寸最初根据标准高对比度多模干涉比值 [38] 确定。使用商业工具 [39] 对外延结构进行了三维 FDTD 仿真，并据此对几何尺寸进行了微调以优化性能，如图 4(b) 所示。

选择中心馈电的 1×2 多模干涉分束器作为宽带设计的元件，其模拟的额外光学损耗在 920 nm 至 1280 nm 范围内低于 3 分贝。1×4 多模干涉分束器

也成功实现了短280 μm的树，但带宽较窄（1000–1180 nm）；略微缩短的长度可用于换取针对特定波长的进一步几何优化。

3. 光子集成电路制造

该制造工艺旨在降低制造复杂度，包括七套掩模、两次砷化镓刻蚀和两次金属剥离步骤。图 5 展示了主要制造工艺步骤的示意图。

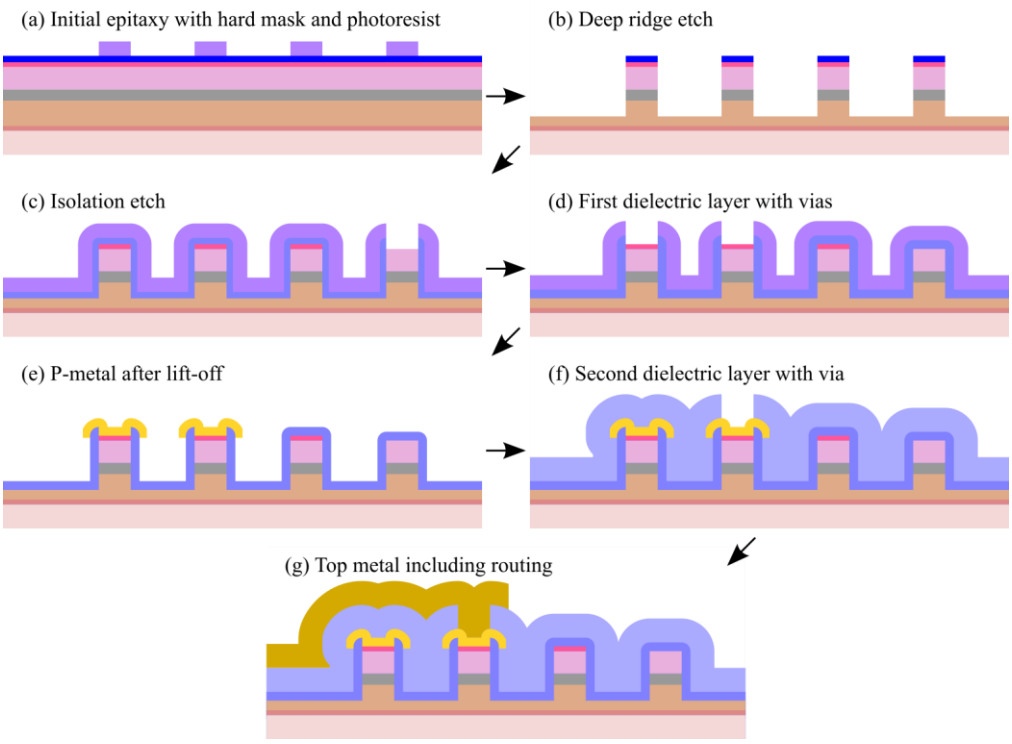


图 5. 主要制造工艺步骤示意图。(a) 初始外延结构，带有硬掩模（蓝色）和图案化光刻胶（紫色）。(b) 深脊刻蚀。(c) 隔离刻蚀。(d) 第一层介电层（浅蓝色），带有 p 通孔开口。(e) 剥离后的 p 型金属（黄色）。(f) 第二层介电层（更浅的蓝色），带有通孔开口。(g) 顶层金属（深黄色），包括布线。

该工艺首先通过等离子体增强化学气相沉积（PECVD），在洁净的外延结构上沉积 400 nm 厚的 SiO_2 硬掩模。随后使用 i 线步进式光刻机在其上对光刻胶（PR）进行图案化，有效分辨率为 0.8 μm，以定义波导图案。采用 CHF_3/CF_4 气体体系，通过感应耦合等离子体反应离子刻蚀（ICP-RIE）去除未受保护区域的硬掩模；再通过 4 μm 深的 Cl_2/N_2 ICP-RIE 刻蚀定义波导。图 6(a) 显示了波导刻蚀完成后的侧壁。使用缓冲 HF 去除波导硬掩模后，再沉积并图案化另一层硬掩模，然后采用 $BCl_3/SF_6/N_2$ 选择性 ICP-RIE 刻蚀，去除电隔离区域中的顶部 p+GaAs 层，同时不刻蚀顶部 AlGaAs 覆层。去除隔离刻蚀硬掩模后，通过原子层沉积在器件上沉积 5 nm 的 Al_2O_3 和 10 nm 的 SiO_2，使器件钝化；随后在其上通过 PECVD 交替沉积 SiO_2 和 SiN，形成总厚度为 550 nm 的第一层介电隔离层。

通过 PR 掩模和 CHF_3/CF_4 ICP-RIE 刻蚀，在调制器波导上方选择性地打开第一介质隔离层，并用负性 PR 定义剥离掩模。随后

采用电子束沉积 20/40/500 nm 的 Ti/Pt/Au 后，将金属剥离，形成下层金属层，从而构成调制器的顶部金属接触。另一步 PECVD 工艺形成第二介质隔离层，其总厚度为 2 μm，由 SiO_2 和 SiN 层交替构成；随后在 PR 掩模上进行另一次 ICP-RIE 刻蚀，开通至第一金属层的通孔。第二次剥离工艺使用 3 μm 的 Ti/Au，形成用于布线和引线键合焊盘的顶部金属层。图 6(b) 展示了通过这次剥离工艺形成的跨调制器走线。最后，通过光刻和 ICP-RIE 刻蚀去除选定区域的所有介质层，从而定义解理道。为完成制造，将衬底减薄至约 200 μm，在背面沉积 10/50/100/20/500 nm 的 Ni/Ge/Au/Ni/Au N 型金属，然后在成形气氛中对器件进行快速热退火，分别在 400°C 和 480°C 下各持续 10 秒。

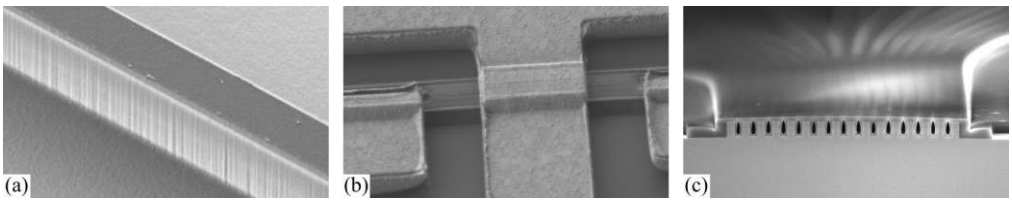


图 6。部分制造工艺步骤的 SEM 图像。(a) 首次刻蚀后的深脊。(b) 顶部金属跨调制器布线。(c) 劈裂并镀覆增透膜后的输出端面。

进行电气测试以确定初始良率后，将选定的芯片分离，通过机械劈裂形成端面，在端面上镀覆增透膜，并将单个光子集成电路切割分离。图 6(c) 展示了典型的劈裂并镀覆增透膜后的输出端面，图 7(a) 展示了切割分离后的 16 通道光子集成电路的尺寸。随后，将单个光子集成电路安装在带有电气走线的氮化铝载体上，并进行引线键合。如图 7(b) 所示，之后将安装在载体上的光子集成电路焊接并引线键合到印刷电路板上。

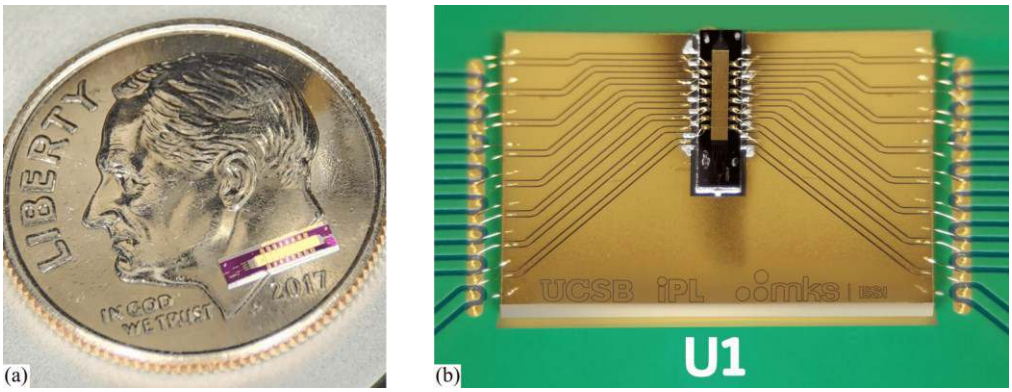


图 7。 (a) 16 通道光子集成电路与美国一角硬币的对比照片。(b) 安装在载体上的光子集成电路与印刷电路板的照片，经修饰以提高清晰度。

4. 表征

4.1 相位调制器的光学性能

光学测量通过边缘耦合方式，将透镜光纤耦合到 PIC 的解理端面输入端；PIC 安装在保持于 20°C 的热电冷却器上。光源采用封装式 980 nm 和 1030 nm 光纤耦合激光器，以及一台 O 波段可调谐激光器。

相位调制器主要使用单侧马赫-曾德尔调制器（MZM）测试光子集成电路进行表征，该电路包括一个输入端、一个 1×2 MMI、一个臂上的 4 mm 相位调制器、一个 2×1 MMI 和一个输出端。通过快速测量可获得电光调制响应。

扫描偏置，并在数字信号示波器上记录同步的偏置和马赫-曾德尔调制器传输波形，然后通过匹配时间序列数据，将其转换为传输率随偏置变化的关系。通过同时拟合多个归一化测量值与单边不平衡损耗马赫-曾德尔调制器的解析功率传输率，得到相位调制（$\Delta\phi$）和残余振幅调制（$\Delta\alpha$）随偏置变化的精确估计：

$$E_1 = (1-k)\,E_0;\; E_2 = k\,E_0\,e^{i\,\Delta\phi - \Delta\alpha/2} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} T/E_0^2 &= |E_1 + E_2|^2\,F + (1-F) \\ &= 1 + F\,k\,(-2 + k + k\,e^{-\Delta\alpha}) - 2\,F\,(k-1)\,e^{-\Delta\alpha/2}\cos(\Delta\phi) \end{aligned} \tag{2}$$

其中，k 为分光比，F 为相干比例。为减少自由度，相位调制和残余振幅调制（RAM）根据偏置进行经验参数化：

$$\Delta\phi(V) = p_1\,(V_0 - \mathrm{V}) + p_2(\mathrm{V}_0 - \mathrm{V})^2 \tag{3}$$

$$\Delta\alpha(\mathrm{V}) = \mathrm{a}_1\,(\exp[a_2(V_1 - V + dV)])\,(1 - \tanh[V - V_1 + dV])/2 \tag{4}$$

其中，$V_0 = 1.62$ V 表示 p-i-n 结两端的本征电场，其数值取自电学仿真；$dV = 1$ V 为手动选择的平滑偏移量。参数 V_1、p_1、p_2、a_1 和 a_2 在每个测得的波长下进行拟合。

在 980 nm 至 1360 nm 的波长范围内进行测试后，MZM 测试光子集成电路中的 4 mm 相位调制器表现出单边 V_π·L 调制效率：对于 TE 光学模式，效率范围为 0.5 V·cm 至 1.23 V·cm，如图 8(a) 所示。在 Franz-Keldysh 电吸收开始之前，残余振幅调制（RAM）低于 0.5 分贝；在 980 nm（>5π rad）下反向偏置为 5.9 V、1030 nm（>8π rad）下为 12 V，以及 1260 nm（>6π rad）及更长波长下达到受设备限制的 >15 V 时，RAM 均达到 3 分贝。

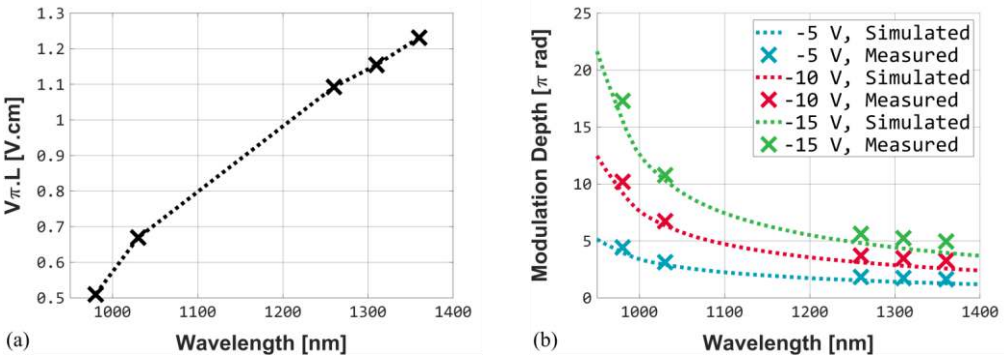


图 8。 (a) 不同波长下 4 mm 相位调制器的效率。(b) 不同波长和偏置下 4 mm 器件的相位调制模拟结果（线条）和测量结果（叉号）。

这些马赫-曾德尔调制器的结果通过在 1030 nm 波长下对 16 通道光子集成电路上的各个 3 mm 调制器进行测量得到验证。测量采用自外差技术：将调制器视为光纤马赫-曾德尔调制器的一个臂，而另一臂则通过声光调制器（AOM）偏移 150 MHz [40]。图 9 展示了该装置的示意图。激光器输出经光纤分束器分开，其中一路耦合进入光子集成电路并从一个调制器输出，另一路则通过光纤耦合的声光调制器进行频移。两路信号在光纤分束器中重新合并后，光电二极管的输出等效于一个载波频率等于声光调制器频移、相移等于调制器施加相移的相移键控（PSK）信号。随后，可以使用标准的 IQ 解调技术对 PSK 波形进行解码，以提取相对相移。通过在直流偏置附近以小幅度抖动所施加的调制偏置，可以精确测量相位

调制的一阶和二阶导数，以及残余振幅调制（RAM）对偏置的一阶导数，均可在低于 AOM 频率一半的任意交流调制频率下获得。

通过使用商用求解器模拟这些调制器的电场和光场 [39]，并采用文献中已知的各种砷化镓相位调制效应数值 [35–37,41,42],，计算出这些调制器的预期性能。无需调整任何模型参数，图 8(b) 所示的预期性能与整个偏置和波长范围内的测量结果非常吻合。略微低估的情况可能是由自由载流子效应导致的，尤其是在电光效应较弱的较长波长处；这是因为文献中关于自由载流子贡献的系数并不一致。

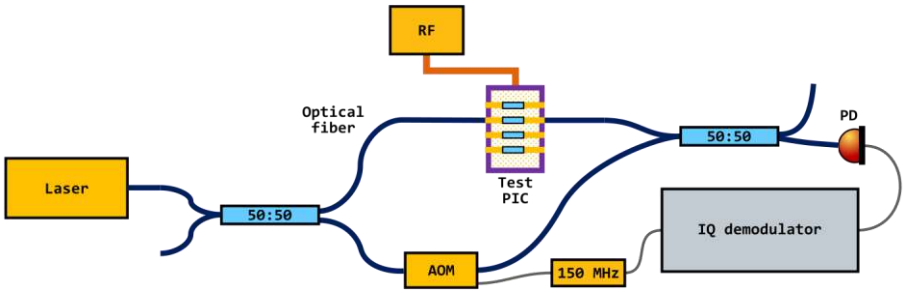


图 9。 自外差测量技术示意图。

4.2 相位调制器的电学性能

使用网络分析仪对多个安装在印刷电路板上的光子集成电路进行详细的输入反射（S11）电学测量。通过分别表征封装印刷电路板，并将集总元件模型应用于 S11 测量结果，以拟合印刷电路板、载体、光子集成电路及键合线的电阻、电容和电感，从而确定预期的电传输（S12）以及封装和光子集成电路各自的相对贡献。据此，确定光子集成电路调制器具有 $5 \pm 3\ \Omega$ 串联电阻和 3.6 ± 0.2 pF 电容。安装在光子集成电路上的相位调制器，其预期 3 分贝电学带宽为 700 MHz；经识别，对印刷电路板进行少量改动应可将带宽提高至 1.4 GHz。

直接电光响应度通过调制单个通道，并测量远场输出中所选点处的光电二极管响应来表征。如图10(a)所示，所选光子集成电路的多个通道均表现出 770 MHz 至 1 GHz 的 6 分贝带宽。这与模拟得到的电带宽一致，因为对于小信号而言，功率调制与相位调制的平方成正比。

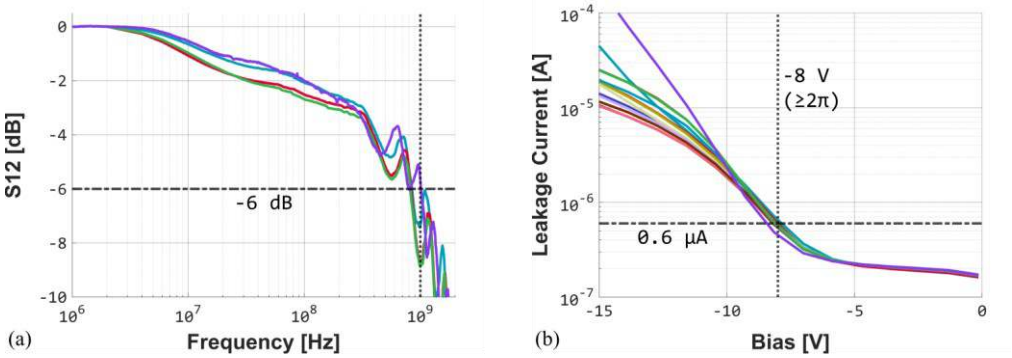


图 10。 (a) 所选光子集成电路的 4 个通道的电光响应。(b) 所选光子集成电路全部 16 个通道在反向偏置下的直流漏电流。

这些 3 mm 长相位调制器的调制带宽最终受其电容限制，因此可通过缩短调制器来提升。在 1030 nm 波长下，长度仅为 1.2 mm 的调制器即可提供完整的 2π 相移，同时残余振幅调制为 1 分贝。砷化镓也适用于行波电极设计，其带宽可超过 40 GHz [43–45]。

图10(b)所示的 3 mm 调制器直流电测试表明，在 -8 V 偏置下，漏电流低于 0.6 μA；这对应于所有测试波长下均超过 2π 的调制深度，并且同一选定光子集成电路中的所有调制器表现一致。该完整的 16 通道光子集成电路可工作至 1360 nm，因此保持任意转向角所需的功率低于 100 μW。

如表2所示，这些光学和电学指标与文献中大多数磷化铟、硅光子学和绝缘体上铌酸锂调制器相比具有竞争力，表现为速度更高、功率低于硅光子学热调制器，残余振幅调制和功率低于载波注入式调制器，效率高于绝缘体上铌酸锂调制器。

表2：相位调制器性能比较

Year	平台	波长 [nm]	方法[a]	长度 [mm]	$V_\pi \cdot L$ [b] [V·厘米]	残余振幅调制 @ 2π [分贝]	功率 @ 2π	EO 带宽
本工作	GaAs	980-1360	EO	4	0.5-1.23	<0.5	<5 μW	1 GHz
2020 [46]	GaAs	980	EO	5	1.15	-	-	20 MHz
2014 [47]	GaAs	780	EO	2	1.5	-	-	13 MHz
2013 [48]	GaAs	1550	EO	7	0.42	1	-	-
2008 [49]	GaAs	1550	EO	7	0.3	<1	-	-
1998 [50]	GaAs	1310	EO	2	0.52	~3	-	2.5 GHz[c]
1991 [67]	GaAs	1064	EO	1.8	1.9	-	-	2 GHz[c]
1990 [41]	GaAs	1090	EO	5.3	1.3	~3	-	-
2021 [51]	InP	1550	载波	0.8	0.2 mA·cm	-	48 毫瓦	1 GHz[c]
2013 [24]	InP	1520-1570	载波	0.2	0.2 mA·cm	1.5	20 毫安	100 MHz
2023 [19]	InP	1550	EO	3.5	1.02	-	200 μW	-
2022 [21]	InP	1480-1550	EO	2.5	1.2	<0.5	-	-
2014 [44]	InP	1550	EO	10	1.6	-	-	67 千兆赫兹
2020 [20]	InP	4600	热	2.35	53 毫瓦·厘米	-	450 毫瓦	-
2023 [52]	LNOI	850	EO	5.5	1.56	-	-	>20 吉赫兹
2023 [52]	LNOI	1550	EO	5.5	2.58	-	-	>40 吉赫兹
2023 [53]	LNOI	400-700	EO	8	0.34-0.96	-	-	>20 GHz
2021 [54]	LNOI	1064	EO	7	3.82	-	-	-
2018 [55]	LNOI	1550	EO	5	4.4	0.1	-	100 GHz
2019 [56]	绝缘体上铌酸锂 + 硅光子学	1550	EO	3	4.4	-	-	70 GHz
2018 [57]	绝缘体上铌酸锂 + 硅光子学	1550	EO	5	13.4	-	-	106 GHz
2020 [14]	SiPh	1550	载波	0.5	0.03	5	34 毫瓦	324 MHz
2013 [58]	SiPh	1550	EO	0.75	2	3.2	-	27 GHz
2008 [59]	SiPh	1550	EO	1	6	2.8	-	30 GHz
2022 [6]	SiPh	1550	热	1.5	0.7 毫瓦·厘米	-	9 mW	18 千赫兹
2020 [60]	SiPh	488	热	-	-	-	30 毫瓦	50 千赫兹
2020 [61]	SiPh	1560	热	0.5	0.8 毫瓦·cm	-	31.5 毫瓦	200 千赫兹
2019 [12]	SiPh	1550	热	-	-	2.4	5 mW	10 千赫兹
2018 [62]	SiPh	1550	热	0.44	1.1 毫瓦·厘米	-	48 毫瓦	-
2014 [9]	SiPh	1480-1580	热	-	-	~0	20 毫瓦	7.3 千赫兹
2011 [63]	SiPh	1555	热	-	-	-	430 毫瓦	-

[a] “电光” = 电光反向偏置，“载波” = 载流子注入，“热” = 热光效应 [b] 单边；报告推挽时加倍。[c] 未测量，报告预期的 RC 极限。

4.3 光学相控阵性能

光学相控阵的关键指标包括半高全宽波束宽度、无栅瓣扫描范围（在此范围内，光束可被明确转向，不会与栅瓣混淆），以及旁瓣电平（SLL）或背景电平。根据光束宽度和

转向范围内可计算出唯一可寻址点的数量，这是一种无尺度指标，不受光学透镜系统可实现的线性变换影响。对于光束质量理想的密集线性阵列，可寻址点的数量约等于通道数；通道间偏移不均匀的稀疏阵列则可以牺牲旁瓣电平，以换取更多可寻址点。

从解析角度看，转向范围可通过 $\arcsin(\lambda/d)$ 估算；光束宽度则可根据与 OPA 宽度相当的孔径计算，即 $\sim\lambda/D$，其中 λ 为空间波长，d 为发射器之间的距离，D 为 OPA 的宽度。转向后光瓣的包络由单个发射器的光束图样决定。

对于在 $\lambda = 1064$ nm、$d = 4$ μm 和 $D = (16-1)\cdot d = 60$ μm 条件下测试的该 PIC，预期转向范围为 15°，预期光束宽度为 ~1°，可寻址点数为 ~15。将仿真的输出端面光学模式直接传播至远场 [64]，可验证这些结果；仿真得到的转向范围为 15.2°，光束宽度为 0.85°，可寻址点数为 ~17 。13 分贝的 SLL 受均匀孔径 [65]，远场图样的 $sinc^2$ 函数限制；若不采用非均匀发射器间距或输出功率，则无法降低。

采用图11所示的实验装置示意图，对所选 PIC 的相控阵性能和输出图样进行评估。安装在 PCB 上的光子集成电路载体组件固定在光学平台上，安装于三轴光纤对准台的透镜光纤将 1064 nm 激光耦合至 PIC 的输入端面。根据需要，使用在线光纤偏振器调节输入，以获得最佳偏振状态。PIC 的输出由有效焦距（EFL）为 4 mm、数值孔径为 0.65 的物镜采集，随后通过一枚 EFL 为 500 mm 的中继透镜重新成像发射器平面，使有效发射器间距达到 500 μm。

在重新成像的发射器平面之后，光束由一个 3° 楔形棱镜分开；其中一个表面的反射光经过一对中继透镜，在监测相机上重现中间焦平面。另一表面的反射光传播至远场，并由一枚 EFL 为 1147 mm 的透镜准直后投射到 Ophir LT665 光束分析相机上；另一枚相同的透镜则将透射的远场光束成像到光电二极管上。采集近场数据时，可将光束分析相机移至近场位置。

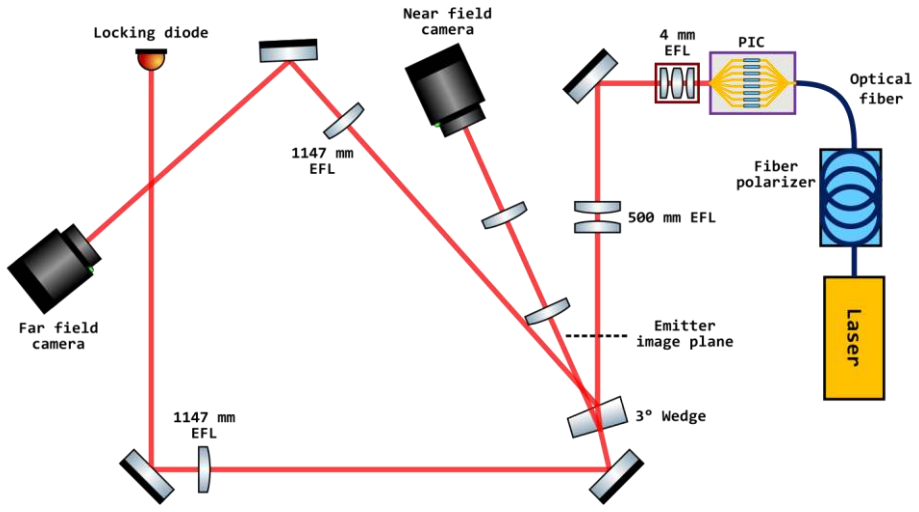


图 11。 光学相控阵光学测量装置示意图。图中比例并非按实际比例绘制。

由于光路长度不同且制造存在瑕疵，每个通道的输出相位都有未知偏移，因此使用 LOCSET算法 [66] 对每个通道施加必要的相位调制，以最大化

远场光电二极管上的信号，从而使光学相控阵输出相干。为控制输出方向，将光电二极管安装在测微仪上移动，LOCSET算法会调整发射器相位，使光束峰值移至新的位置。通过逆向还原光学变换，将位置光束轮廓转换为光学相控阵输出处的角度轮廓：$\theta_{OPA} = \frac{x_{camera}}{1147\ \text{毫米}} \cdot \frac{500}{4}$。采集数据时使用的光束轮廓仪像素间距为 4.54 μm，对应于光学相控阵输出处 0.028° 的角分辨率。

图12(a)展示了0°转向时测得的光束轮廓，并与预期性能进行了比较。测得的光束宽度为0.92°，转向范围为15.3°，旁瓣电平为12分贝；与仿真结果相比，差异分别仅为8%、0.7%和1分贝。在其他转向角下进一步采集的光束轮廓如图12(b)所示，光子集成电路输出重现了预期包络，并在整个无栅瓣扫描范围内保持性能，如图12(c)所示，光束宽度为0.93° ± 0.01°，旁瓣电平为12.1 ± 0.4分贝。

预期与测得的转向范围略有差异，可能是由于测量光学系统存在轻微误差、制造过程中图形尺度误差，或两者共同作用所致。预计制造尺度误差低于1%。光束宽度偏大、旁瓣电平较差，部分原因可能是子孔径相位略有失配（这可从难以清晰分辨均匀旁瓣看出），以及通道功率不均匀。

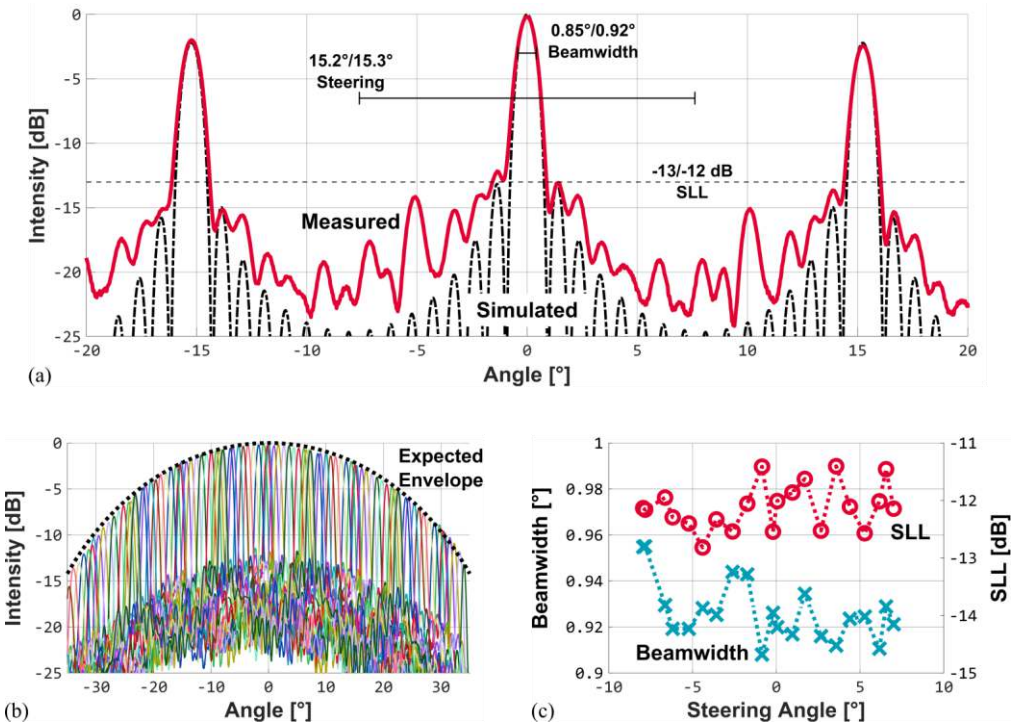


图 12。(a) 仿真（黑色虚线）和实测（红色实线）光束轮廓，并标出了仿真/实测的光束宽度、转向范围和旁瓣电平。(b) 21 个不同转向角下实测的光束轮廓（彩色实线），与预期包络（黑色点线）进行比较。(c) 实测转向角下的光束宽度（左侧，叉号）和旁瓣电平（右侧，圆圈）。

同时还采集了零偏置下的近场光束轮廓。典型的输出图像（图13(a)）显示，各通道的功率分布并不均匀。均匀性取决于输入光纤位置；比较图13(b)中12种不同输入对准位置下各通道的输出功率，整个阵列的平均发射器间标准差为1.2分贝，而单个发射器在不同输入对准位置下的平均偏差为0.76分贝。输入对准位置变化和中心区域功率过高这两种现象综合表明，功率很可能通过多模耦合进入多模干涉树。

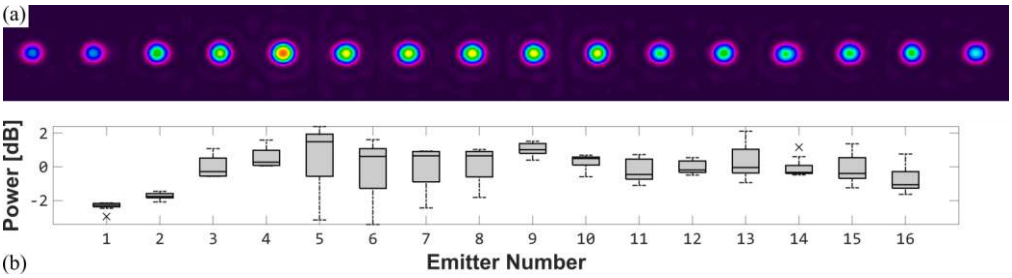


图 13。 (a) 光子集成电路输出端面的典型图像。(b) 12 次独立输入光纤对准时各通道输出功率的分布，其中中位数（线）、25th 至 75th 百分位数范围（箱体）、10th 至 90th 百分位数范围（须）以及离群值（叉号）。

该光学相控阵的性能与文献中的大多数结果相当或更优，汇总见表3。其12分贝的旁瓣电平接近均匀线性阵列13分贝的理论极限性能，并优于已报道结果中的大多数。对于均匀阵列，可通过比较可寻址点数量与通道数量来评估光束质量；该光子集成电路与其他均匀阵列相比表现出色。非均匀阵列则可通过牺牲旁瓣电平来实现更多可寻址点。该光子集成电路展示了在1064 nm下的运行性能；这一波长尚未在光学相控阵中得到广泛验证，并且有望拓展光学相控阵的潜在应用。

表 3：光学相控阵性能比较

Year	平台	波长 [nm]	通道	转向范围 [°]	光束宽度 [°]	可寻址点	SLL [dB]
本研究	GaAs	980 – 1360[a]	16	15.3	0.92	16	12
2020 [46]	GaAs	980	15	30	4.7	6	8
1991 [67]	GaAs	1064	10	20	2	10	-
2023 [19]	InP	1550	32	35	0.46	76	8.2
2022 [23]	InP	1550	30	17	1.49	11	-
2022 [21]	InP	1480 – 1550	8	17.8	2.5	7	12.8
2021 [51]	InP	1550	100	8.88	0.11	80	6.3
2020 [20]	InP	4600	32	23	0.6	38	-
2013 [24]	InP	1520-1570	8	1.7	0.2	8	10
2023 [68]	SiPh	1550	16	120	≥6.6[b]	<18[b]	10.9
2022 [8]	SiPh	1550	8192	100	0.01	10000	10
2022 [6]	SiPh	1550	256	45.6	0.154	296	10.8
2020 [61]	SiPh	1560	32	18	0.63	28	10
2020 [60]	SiPh	488	64	50	0.17	294	6.05
2020 [69]	SiPh	1525-1600	512	70	0.15	467	7.5
2020 [14]	SiPh	1550	8×8	8.9×2.2	0.92×0.32	66	8.8
2019 [70]	SiPh	1550	128（二维）	16×16	0.8×0.8	400	12
2018 [62]	SiPh	1550	1024	22.5	0.03	750	9
2016 [71]	SiPh	1260 – 1360	128	80	0.14	570	-
2014 [9]	SiPh	1480 – 1580	16	19.6	1.1	17	10
2014 [72]	SiPh	1550	16	51	3.3	15	-
2011 [63]	SiPh	1555	16	14	1.6	8	10

[a] 报告的结果对应于 1064 nm。[b]数据提取自已报告的图表。

5. Conclusion

本研究成功展示了一种基于砷化镓的16通道光学相控阵，其光束宽度为0.92°，无栅瓣扫描范围为15.3°，旁瓣电平为12分贝，与理论结果高度吻合。在980纳米至1360纳米范围内测试的各个相位调制器，表现出单边V_{π}·L调制效率为1.23 V·cm或更高，残余振幅调制低于0.5分贝，少于

20 μW 直流电功率，安装在载波和印刷电路板上时，电光带宽大于 770 MHz。

目前正在开展将增益与这种外延结构集成的工作。早期设计包括片上 1030 nm 分布式布拉格反射激光源，以及用于提升功率的输出端附近半导体光放大器，从而构成一种无外部光学元件的高发射功率全单片集成光学相控阵。未来的研究将提供其他波长的设计，并探索二维输出。

资助。无资助机构。

利益披露。作者声明不存在利益冲突。

致谢。作者感谢 Demis John、Paul Verrinder 和 Lei Wang 提供技术讨论，并感谢 MKS Instruments 提供资金支持。本研究部分工作在 UCSB 纳米制造设施（一所开放式实验室）完成。

数据可用性。本文所述结果的基础数据目前尚未公开，但可应合理请求向作者索取。

参考文献

1. S. Royo 和 M. Ballesta-Garcia，《自动驾驶汽车激光雷达成像系统综述》，Appl. Sci. **9**, 4093 (2019)。2. J. Chang、C. M. Schieler、K. M. Riesing、J. W. Burnside、K. Aquino 和 B. S. Robinson，《小型卫星激光通信的本体指向、捕获与跟踪》，载于自由空间激光通信 *XXXI*（国际光学与光子学学会，2019），第 10910 卷，第 109100P 页。3. J. Fridlander、F. Sang、V. Rosborough、F. Gambini、S. T. Šuran-Brunelli、J. R. Chen、K. Numata、M. Stephen、L. A. Coldren 和 J. Klamkin，《用于集成路径差分吸收激光雷达的双激光器磷化铟光子集成电路》，《IEEE 量子电子学精选主题期刊》**28**, 1–8 (2022)。4. S. Mehta、J. Peach 和 A. Weinert，《加快灾害救援公共援助中的道路识别与损伤评估：基于 LiDAR 三维图像》，Infrastructures **7**, 39 (2022)。5. Y. Blanchard 和 P. van Genderen，《德国雷达链：二战期间与英国 Chain Home 雷达链相抗衡》，载于*2014* 年第 *11* 届欧洲雷达会议（2014），第 29–32 页。6. Z. Zhang、H. Yu、B. Chen、P. Xia、Z. Zhou、Q. Huang、T. Dai、Y. Wang 和 J. Yang，《具有高角分辨率的三层 Si3N4-on-Si 光学相控阵》，《IEEE 光子技术快报》1–1 (2022)。7. Y. Xue、Q. Zhang、Y. Ren、Y. Lei、X. Sun 和 L. Zhang，《采用非均匀大间距阵列设计、使用最少天线的二维单旁瓣硅光学相控阵》，《应用光学》**61**, 7158–7162 (2022)。8. C. V. Poulton、M. J. Byrd、P. Russo、B. Moss、O. Shatrovoy、M. Khandaker 和 M. R. Watts，《采用 8,192 单元光学相控阵和驱动激光器的相干 LiDAR》，《IEEE 量子电子学精选主题期刊》1–8 (2022)。9. D. Kwong、A. Hosseini、J. Covey、Y. Zhang、X. Xu、H. Subbaraman 和 R. T. Chen，《用于二维光束转向的片上硅光学相控阵》，《光学快报》**39**, 941 (2014)。10. H. Hashemi，《硅基单片光学相控阵》，载于*2017* 年第 *22* 届微光学会议 *(MOC)*（IEEE，2017），第 26–27 页。11. Y. Liu 和 H. Hu，《具有 180 度视场、用于二维光束转向的硅光学相控阵》，Optica **9**, 903–907 (2022)。12. S. Chung、M. Nakai 和 H. Hashemi，《面向大规模光子集成系统的低功耗热光硅调制器》，《光学快报》**27**, 13430–13459 (2019)。13. J. Mulcahy、F. H. Peters 和 X. Dai，《硅光子学中的调制器——异质集成及更多》，Photonics **9**, 40 (2022)。14. H. Zhang、Z. Zhang、J. Lv、C. Peng 和 W. Hu，《基于芯片级光学相控阵实现的快速光束转向，具有 8 × 8 个单元》，Opt. Commun. **461**, 125267 (2020)。15. F. Gao、W. Xie、J. Y. S. Tan、C. P. Leong、C. Li、X. Luo 和 G.-Q. Lo，《多层 SiN-on-SOI 平台上热光相移器的全面研究》，J. Light. Technol. 1–7 (2023)。16. A. W. Yu、M. A. Krainak、D. J. Harding、J. B. Abshire、X. Sun、L. Ramos-Izquierdo、J. Cavanaugh、S. Valett、T. Winkert、M. Plants、C. Kirchner、B. Kamamia、R. Faulkner、P. Dogoda、W. Hasselbrack 和 T. Filemyr，《一种 16 光束非扫描式条带测绘激光高度计仪器》，载于固态激光器 *XXII*：技术与器件（SPIE，2013），第 8599 卷，第 147–161 页。17. H. Zhou、Y. Chen、J. Hyyppä 和 S. Li，《空间激光高度计激光测距方法概述》，Infrared Phys. Technol. **86**, 147–158 (2017)。18. J. Guo、X. Fei、P. Ge、Z. Li、Y. Lv 和 L. Sheng，《用于三维成像的 1064 nm 单光子激光雷达》，J. Phys. Conf. Ser. **1983**, 012093 (2021)。

19. S. Tan、X. Dai、J. Lou、L. Song、C. Liu、Y. Gu、Q. Chen、C. Jiang、X. Yu、Q. Lu、M. Lu、S. Tong 和 W. Guo，《基于磷化铟平台、采用非均匀间距输出波导的低功耗光学相控阵》，《光学快报》**31**，3199–3211 (2023)。20. J. Midkiff、K. M. Yoo、J.-D. Shin、H. Dalir、M. Teimourpour、R. T. Chen 和 R. T. Chen，《基于磷化铟平台的中红外光学相控阵光束转向》，Optica **7**, 1544–1547 (2020)。21. M. Gagino、M. B. J. Van Rijn、E. A. J. M. Bente、M. K. Smit 和 V. Dolores-Calzadilla，《磷化铟光学相控阵的宽带运行》，《IEEE 光子技术快报》1–1 (2022)。22. L. Jisan、S. Kyunghyun、L. Changbum、H. Inoh、J. Bongyong、L. E. Kyung、S. Dongshik、B. Hyunil、S. Changgyun、T. Otsuka、C. Yongchul、H. Kyoungho、C. Hyuck、S. Kyunghyun、L. Changbum、H. Inoh、J. Bongyong、L. E. Kyung、S. Dongshik、B. Hyunil、S. Changgyun、T. Otsuka、C. Yongchul、H. Kyoungho 和 C. Hyuck，《通过固态单芯片光束扫描器实现实时激光雷达成像》，Electron. Imaging **34**, 1–4 (2022)。23. C.-W. Chow、Y.-C. Chang、S.-I. Kuo、P.-C. Kuo、J.-W. Wang、Y.-H. Jian、Z. Ahmad、P.-H. Fu、J.-W. Shi、D.-W. Huang、T.-Y. Hung、Y.-Z. Lin、C.-H. Yeh 和 Y. Liu，《利用集成光学相控阵实现主动可控光束转向的光无线通信 (OWC)》，J. Light. Technol. 1–7 (2022)。24. W. Guo、P. R. A. Binetti、C. Althouse、M. L. Mašanović、H. P. M. M. Ambrosius、L. A. Johansson 和 L. A. Coldren，《基于磷化铟光子集成电路的二维光束转向》，《IEEE 量子电子学精选主题期刊》**19**, 6100212–6100212 (2013)。25. Y. Guo、Y. Guo、C. Li、H. Zhang、X. Zhou 和 L. Zhang，《用于波束成形与转向的集成光学相控阵》，Appl. Sci. **11**, 4017 (2021)。26. R. N. Hall、G. E. Fenner、J. D. Kingsley、T. J. Soltys 和 R. O. Carlson，《来自砷化镓结的相干光发射》，Phys. Rev. Lett. **9**, 366–368 (1962)。27. C. D. Dobson、J. Franks 和 F. S. Keeble，《接近室温时砷化镓激光器的特性》，IEEE J. Quantum Electron. **4**, 151–154 (1968)。28. F. E. Goodwin，《工作中的激光通信系统综述》，Proc. IEEE **58**, 1746–1752 (1970)。29. I. Hayashi，《半导体激光器最新进展——连续波砷化镓激光器已可用于新应用》，Appl. Phys. **5**, 25–36 (1974)。30. M. Nickerson、B. Song、L. Wang、P. Verrinder、J. Brookhyser、G. Erwin、J. Kleinert 和 J. Klamkin，《面向光束转向应用的宽带低残余幅度调制相位调制器阵列》，载于激光与电光学会议 *(2022)*，论文 *SS1D.4*（Optica 出版集团，2022）。31. P. A. Verrinder、L. Wang、J. Fridlander、F. Sang、V. Rosborough、M. Nickerson、G. Yang、M. Stephen、L. Coldren 和 J. Klamkin，《面向可调谐激光器应用的砷化镓光子集成电路平台》，《IEEE 量子电子学精选主题期刊》**28**, 1–9 (2022)。32. L. Wang、H. Zhao、B. Shi、S. Pinna、S. S. Brunelli、F. Sang、B. Song 和 J. Klamkin，《通过金属有机化学气相沉积生长的高性能 1.3 μm 无铝量子点激光器》，载于*2020* 年光纤通信会议暨展览会 *(OFC)*（2020），第 1–3 页。33. M. Nickerson、P. Verrinder、L. Wang、B. Song 和 J. Klamkin，《低残余幅度调制宽带光学相位调制器》，载于*Optica* 高级光子学大会 *(2022)*，论文 *IW4B.4*（Optica 出版集团，2022）。34. J. J. Coleman，《应变层铟镓砷量子阱异质结构激光器》，《IEEE 量子电子学精选主题期刊》**6**, 1008–1013 (2000)。35. J. G. Mendoza-Alvarez、L. A. Coldren、A. Alping、R. H. Yan、T. Hausken、K. Lee 和 K. Pedrotti，《耗尽层边缘平移光波调制器分析》，J. Light. Technol. **6**, 793–808 (1988)。36. J. Faist 和 F. K. Reinhart，《砷化镓/铝镓砷双异质结构中的相位调制。I. 理论》，J. Appl. Phys. **67**, 6998–7005 (1990)。37. S. S. Lee、R. V. Ramaswamy 和 V. S. Sundaram，《高速、高效率砷化镓-砷化铝镓双异质结构波导相位调制器的分析与设计》，IEEE J. Quantum Electron. **27**, 726–736 (1991)。38. L. B. Soldano 和 E. C. M. Pennings，《基于自成像的光学多模干涉器件：原理与应用》，J. Light. Technol. **13**, 615–627 (1995)。39.《光子学仿真软件 | Ansys Lumerical》，https://www.ansys.com/products/photonics。40. B. Arar、M. Schiemangk、H. Wenzel、O. Brox、A. Wicht、A. Peters 和 G. Tränkle，《电光相位调制器的深度表征方法》，《应用光学》**56**, 1246–1252 (2017)。41. J. Faist 和 F. K. Reinhart，《砷化镓/铝镓砷双异质结构中的相位调制。II. 实验》，J. Appl. Phys. **67**, 7006–7012 (1990)。42. C. A. Berseth、C. Wuethrich 和 F. K. Reinhart，《砷化镓的电光系数：1.32 和 1.52 μm 处的测量及其在 0.9 至 10 μm 范围内的色散研究》，J. Appl. Phys. **71**, 2821–2825 (1992)。43. R. Spickermann、N. Dagli 和 M. G. Peters，《带宽为 >40 GHz 的砷化镓/砷化铝镓电光调制器》，Electron. Lett. **31**, 915–916 (1995)。44. S. Dogru 和 N. Dagli，《驱动电压为 0.77 V、带宽超过 67 GHz 的电光调制器》，《光学快报》**39**, 6074–6077 (2014)。45. R. G. Walker 和 Y. Zhou，《用于卫星通信系统的 50 GHz 砷化镓电光调制器阵列设计》，Front. Phys. **9**, (2021)。46. Z. Wang、J. Liao、Y. Sun、Y. Sun、X. Han、Y. Cao 和 R. Zhao，《用于高速光束转向的芯片级砷化镓光学相控阵》，《应用光学》**59**, 8310–8313 (2020)。

47. B. Arar、H. Wenzel、R. Güther、O. Brox、A. Maaßdorf、A. Wicht、G. Erbert、M. Weyers、G. Tränkle、H. N. J. Fernando 和 A. Peters，“用于 780 纳米激光器的双异质结构脊形波导 GaAs/AlGaAs 相位调制器”，《应用物理 B》**116**，175–181（2014）。48. J. H. Shin 和 N. Dagli，“1550 纳米超低驱动电压去衬底 GaAs/AlGaAs 电光调制器”，《IEEE 量子电子学精选主题期刊》**19**，150–157（2013）。49. J. Shin、Y.-C. Chang 和 N. Dagli，“0.3V 驱动电压 GaAs⁄AlGaAs 去衬底马赫–曾德尔强度调制器”，《应用物理快报》**92**，201103（2008）。50. Y. T. Byun、K. H. Park、S. H. Kim、S. S. Choi、J. C. Yi 和 T. K. Lim，“具有低传播损耗的高效单模 GaAs/AlGaAs W 形波导相位调制器”，《应用光学》**37**，496–501（1998）。51. K. Komatsu、Y. Kohno、Y. Nakano 和 T. Tanemura，“大规模单片集成基于磷化铟的光学相控阵”，《IEEE 光子技术快报》**33**，1123–1126（2021）。52. Y. Li、T. Lan、D. Yang、J. Bao、M. Xiang、F. Yang 和 Z. Wang，“基于薄膜铌酸锂且具有低电压长度积的高性能马赫–曾德尔调制器”，《ACS 欧米伽》**8**，9644–9651（2023）。53. S. Xue、Z. Shi、J. Ling、Z. Gao、Q. Hu、K. Zhang、G. Valentine、X. Wu、J. Staffa、U. A. Javid 和 Q. Lin，“全光谱可见光电光调制器”，Optica **10**，125–126（2023）。54. N. Jagatpal、A. J. Mercante、A. N. R. Ahmed 和 D. W. Prather，“用于 1064 纳米波长的薄膜铌酸锂电光调制器”，《IEEE 光子技术快报》**33**，271–274（2021）。55. C. Wang、M. Zhang、X. Chen、M. Bertrand、A. Shams-Ansari、S. Chandrasekhar、P. Winzer 和 M. Lončar，“工作于兼容 CMOS 的电压下的集成铌酸锂电光调制器”，《自然》**562**，101–104（2018）。56. 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硅与铌酸锂混合集成马赫–曾德尔调制器”，《自然·光子学》**13**，359–364（2019）。57. P. O. Weigel、J. Zhao、K. Fang、H. Al-Rubaye、D. Trotter、D. Hood、J. Mudrick、C. Dallo、A. T. Pomerene、A. L. Starbuck、C. T. DeRose、A. L. Lentine、G. Rebeiz 和 S. Mookherjea，“在硅光子平台上实现的键合薄膜铌酸锂调制器，超过 100 GHz 3 分贝电调制带宽”，《光学快报》**26**，23728–23739（2018）。58. X. Xiao、H. Xu、X. Li、Z. Li、T. Chu、Y. Yu 和 J. Yu，“采用掺杂优化的高速低损耗硅马赫–曾德尔调制器”，《光学快报》**21**，4116–4125（2013）。59. A. Liu、L. Liao、D. Rubin、J. Basak、Y. Chetrit、H. Nguyen、R. Cohen、N. Izhaky 和 M. Paniccia，“基于硅波导中反向偏置 pn 二极管的高速硅光调制器的最新进展”，《半导体科学与技术》**23**，064001（2008）。60. M. C. Shin、A. Mohanty、K. Watson、G. R. Bhatt、C. T. Phare、S. A. Miller、M. Zadka、B. S. Lee、X. Ji、I. Datta 和 M. Lipson，“芯片级蓝光相控阵”，《光学快报》**45**，1934–1937（2020）。61. W. Ma、S. Tan、K. Wang、W. Guo、Y. Liu、L. Liao、L. Zhou、J. Zhou、X. Li、L. Liang 和 W. Li，“采用集成可调谐激光器和光学相控阵的实用二维光束转向系统”，《应用光学》**59**，9985 9994 2020–（）。62. S. Chung、H. Abediasl 和 H. Hashemi，“绝缘体上硅 CMOS 中的单片集成大规模光学相控阵”，《IEEE 固态电路期刊》**53**，275–296（2018）。63. J. K. Doylend、M. J. R. Heck、J. T. Bovington、J. D. Peters、L. A. Coldren 和 J. E. Bowers，“采用绝缘体上硅上的光学相控阵实现二维自由空间波束转向”，《光学快报》**19**，21595–21604（2011）。64. S. A. Shakir、D. L. Fried、E. A. Pease、T. J. Brennan 和 T. M. Dolash，“光波传播和线性典范变换的高效矩阵方法”，《光学快报》**23**，26853–26862（2015）。65. “相控阵天线方向图——第 3 部分：旁瓣和加权渐变 ｜亚德诺半导体”，https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/phased-array-antenna-patterns-part3.html。66. B. Pulford，“LOCSET 相位锁定：操作、诊断与应用”，《光学科学与工程学位论文》（2012）。67. D. R. Wight、J. M. Heaton、B. T. Hughes、J. C. H. Birbeck、K. P. Hilton 和 D. J. Taylor，“采用 GaAs/AlGaAs 技术实现的新型相控阵光学扫描器件”，《应用物理快报》**59**，899–901（1991）。68. D. Liang、W. Li、X. Wang、X. Zhao、Z. Guo、X. Han、J. Chen、D. Dai 和 Y. Shi，“通过对密集天线进行周期性弯曲调制实现的无栅瓣硅光学相控阵”，《光学快报》**31**，11423–11430（2023）。69. S. A. Miller、Y.-C. Chang、C. T. Phare、M. C. Shin、M. Zadka、S. P. Roberts、B. Stern、X. Ji、A. Mohanty、O. A. J. Gordillo、U. D. Dave 和 M. Lipson，“采用低功耗多程硅光子平台的大规模光学相控阵”，Optica **7**，3–6（2020）。70. R. Fatemi、A. Khachaturian 和 A. Hajimiri，“采用低功耗 PWM 驱动的非均匀稀疏二维大视场光学相控阵”，《IEEE 固态电路期刊》1–16（2019）。71. D. N. Hutchison、J. Sun、J. K. Doylend、R. Kumar、J. Heck、W. Kim、C. T. Phare、A. Feshali 和 H. Rong，“高分辨率无混叠光学波束转向”，Optica **3**，887–890（2016）。72. A. Yaacobi、J. Sun、M. Moresco、G. Leake、D. Coolbaugh 和 M. R. Watts，“用于宽角度波束转向的集成式相控阵”，《光学快报》**39**，4575–4578（2014）。