

文章编号: 1001-3806(2024)06-0832-06

基于 SiN 平板波导光栅的 128 通道光学相控阵

马鹏飞^{1,2}, 于磊^{1,2}, 王政^{1,2}, 王鹏飞^{1,2}, 张冶金^{1,2}, 潘教青^{1,2*}

(1. 中国科学院 半导体研究所 光电子材料与器件重点实验室, 北京 100083, 中国; 2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049, 中国)

摘要: 为了避免全硅光学相控阵(OPA)的输出光功率饱和现象以及氮化硅的低移相效率,采用硅与氮化硅相结合的设计思路,在实现高功率输入的同时保证了调相效率;此外,硅基集成 OPA 为了避免通道间的相互耦合所引起的相位噪声,波导间距大于半波长,导致栅瓣的存在,进而使得扫描范围受限,故采用硅波导作为天线前的输入波导,以减小阵元间距。结果表明,芯片最终实现了 $41^\circ \times 7.4^\circ$ 的扫描范围以及 10.7 dB 的芯片损耗。该研究对于 OPA 芯片的进一步改进是有帮助的。

关键词: 集成光学;衍射;光栅;光学相控阵

中图分类号: TN256

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2024.06.008

128-channel OPA based on SiN slab waveguide grating antenna

MA Pengfei^{1,2}, YU Lei^{1,2}, WANG Zheng^{1,2}, WANG Pengfei^{1,2}, ZHANG Yejin^{1,2}, PAN Jiaoqing^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Devices, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China; 2. College of Materials Science and Opto-electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to avoid the saturation phenomenon of output optical power of all silicon optical phased array (OPA) and the low phase shifting efficiency of silicon nitride, a design concept combining silicon and silicon nitride was adopted, which ensured the phase shifting efficiency while achieving high power input. In addition, in order to avoid phase noise caused by mutual coupling between channels, silicon-based integrated OPA had waveguide spacing greater than half wavelength, which led to the presence of gate lobes and limited the scanning range. To solve this problem, a silicon waveguide was used as the input waveguide in front of the antenna to reduce the array elements spacing. The results show that, the chip ultimately achieves a scanning range of $41^\circ \times 7.4^\circ$ and a chip loss of 10.7 dB. This study is helpful for further improvement of OPA chips.

Key words: integrated optics; diffraction; gratings; optical phased array

0 引言

随着无人驾驶、智能机器人等领域的迅速发展,以激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)为代表的环境感知技术逐渐发展。目前商业化的激光雷达主要采用机械结构作为旋转部件或者探测单元选取部件,使得雷达整体的寿命并不能完全满足实际应用需求^[1-3]。为此,研究者们提出了全固态架构的光学相控阵(optical phased array, OPA),其具有功耗小、成本低、分辨率高以及转向速度快等优势^[4-11]。目前各种架构形式的 OPA 已经有报道。根据扰动光栅的结构主要可以分为微扰型^[12-16]以及平板波导光栅型^[17-19]

等。根据扰动强度随着天线的分布可以分为常规均匀结构^[20-22]和啁啾光栅结构^[23-26]。根据 OPA 通道间距可以分为等间隔分布阵列以及稀疏阵列^[27-29]。

在 OPA 实际应用探索中,美国麻省理工学院的团队当前较为领先。2020 年,该团队通过将 SiN 引入 OPA,实现了更大的饱和功率输出。2022 年,报道了最大规模为 8192 个通道的 OPA,且基于调频连续波技术(frequency-modulated continuous wave, FMCW)实现了 35 m 距离内反射率为 10% 的目标检测^[30]。在这项研究中,光束出射功率为 50 mW。根据激光雷达方程,无人驾驶环境中所需的 200 m 最大探测范围需要出射功率达到 1.6 W^[31]。由于 Si 的非线性效应以硅波导损伤阈值的限制,目前常见的 OPA 无法实现上述高功率输出。

OPA 面临的另一个挑战是为了避免通道间串扰引起相位噪声,波导间距一般大于 OPA 工作波长

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFB2804503);
国家自然科学基金资助项目(62090053;61934007;62105324)

* 通信作者:jqpan@semi.ac.cn

收稿日期:2023-12-31;修回日期:2024-02-27

(1500 nm ~ 1600 nm), 这使得探测光束干涉之后将在相位方向(φ)出现多个栅瓣, 进而导致 OPA 的扫描范围严重受限。该问题的解决方案主要是采用稀疏阵列设计和平板波导光栅设计。在实际制造中, 考虑到由于稀疏阵列的天线间距非固定值所引起通道间的相位噪声将使得远场光斑质量较差。相比之下, 平板波导光栅设计则没有相位噪声, 同时其所能够实现的转向角也远大于稀疏阵列。因而, 平板波导光栅设计被认为是一种更好的选择。此外, 在波长方向(θ)一半通过模式复用以及视场拼接实现扫描范围的增大。

本文作者基于 Si-SiN-SiN 平台的 128 个通道平板波导光栅 OPA, 使用 SiN 作为总线波导、分光阵列和平板波导光栅天线, 使用 Si 作为热光移相器, 在 1500 nm ~ 1600 nm 波长调谐范围内, 该 OPA 实现了 $41^\circ \times 7.4^\circ$ ($\varphi \times \theta$) 的扫描范围, 展现出极大的应用潜力。

1 设计与制造

本文作者所设计的 OPA 如图 1 所示, 红色为 Si, 蓝色为 SiN。制造材料包括自上而下分布的两层间距 150 nm 的 SiN 以及一层 Si, 其中, SiN- I 层被用来制作总线波导、分光阵列和平板波导; SiN- II 层被用来制作扰动光栅; 而 Si 层则被用来制作热光移相器; 各层之间的间隔层、掩埋层以及盖层为氧化硅。此次制作的具体参数如下: SiN 波导厚度 $H_{SiN} = 200$ nm, 宽度为 $1.5 \mu\text{m}$; SiN 光栅厚度 $H_g = 200$ nm, 光栅周期 $P = 900$ nm, 占空比为 50%; 而 Si 波导厚度 $H_{Si} = 220$ nm, 宽度为 450 nm, 相邻波导间隔为 $2 \mu\text{m}$ 。此外, SiN- I 层与 Si 层之间的光互连是通过模斑转换器实现的。

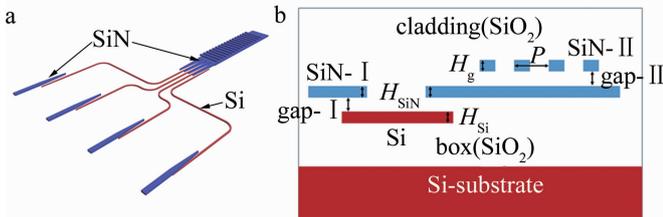


图 1 a—OPA 示意图 b—侧视图
Fig. 1 a—schematic of the OPA b—side view

该 OPA 通过移相器阵列对各通道进行相位调谐实现光在 φ 轴的光束偏转及对输入光进行波长调谐, 实现光束在 θ 轴的光束偏转。其光束转向公式为^[32]:

$$\begin{cases} \varphi = \arcsin[\lambda \Delta\phi / (2d)] \\ \theta = \arcsin[(n_{\text{eff}} - \lambda/P) / n_c] \end{cases} \quad (1)$$

式中: λ 为输入光波长; d 为 Si 波导相邻间隔, 即 $2 \mu\text{m}$; $\Delta\phi$ 为相邻通道间的相位差; n_{eff} 为天线的有效折射率; n_c 为包层折射率。 $\Delta\phi = \pm \pi$ 时, 主瓣与第

一栅瓣强度相等, 此时主瓣的转向角度即为光斑最大转向角度。之后可以得到光斑最大发散角为^[33]:

$$\begin{cases} \Delta\theta = 0.886\lambda / (L \cos \theta) \\ \Delta\varphi = 0.886\lambda / (Nd \cos \varphi) \end{cases} \quad (2)$$

式中: L 为天线长度, $L = mP$; m 为光栅周期数; N 为输入通道数。

首先使用时域有限差分法 (finite-difference time-domain, FDTD) 对天线性能进行评估。在天线视场计算中, 为了节省资源以及减小仿真时间, 将模型缩小为 16 通道。如图 2a 和图 2b 所示, 当输入光从 1500 nm

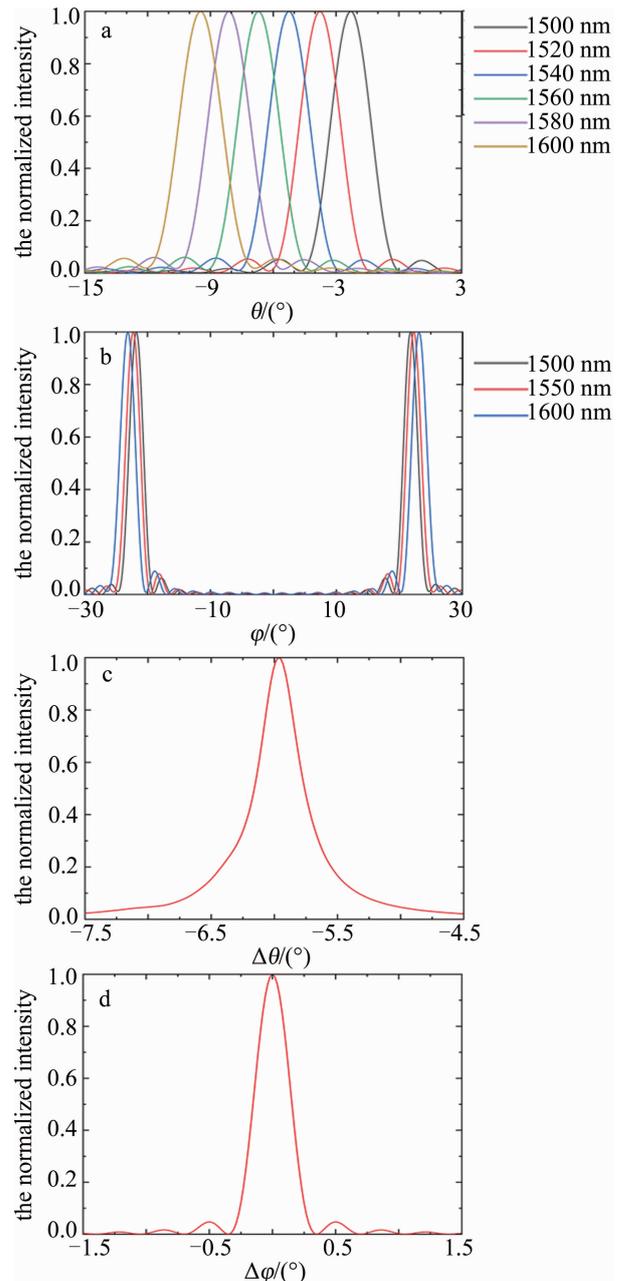


图 2 a— θ 方向扫描范围 b— φ 方向扫描范围 c— θ 方向发散角 d— φ 方向发散角
Fig. 2 a—beam steering range in θ axis b—beam steering range in φ axis c—divergence angle in θ axis d—divergence angle in φ axis

调谐至到 1600 nm 时,所设计的 OPA 在 θ 方向上的扫描范围为 7.3° ,在 φ 方向上的扫描范围随着波长增大从 43.5° 逐渐增大到 46.2° 。在发散角仿真计算时,将模型扩展到了 128 输入通道和 300 μm 的天线长度。由图 2c 和图 2d 可得,输入光波长为 1550 nm 时的发散角为 $0.3^\circ \times 0.4^\circ (\Delta\varphi \times \Delta\theta)$ 。根据式(2),可以得到天线有效长度 $L = 200 \mu\text{m}$,阵列宽度 $Nd = 256 \mu\text{m}$ 。

本文中所展示的 OPA 由新加坡 Advanced Micro Foundry 代工,图 3a 为设计的版图,图 3b 为封装后的芯片。

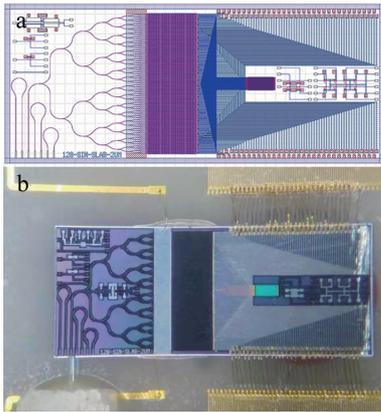


图 3 a—设计版图 b—封装后的芯片
Fig. 3 a—design layout b—packaged chip

2 表征结果

图 4a 为热光移相器件测试结构。编号为 SIN-MZI-2 的测试结构用于测试芯片中使用的热光移相器的效率。图 4b 为位于中间的第 2 组 5 级级联 1×2 多模干涉耦合器结构,用于测试光学相控阵中使用的 1×2 多模干涉耦合器损耗。红框中的 3 组波导结构用于测试 Si 波导和 SiN 波导的模斑转换器,其自上而下分别有 0 对、1 对和 3 对 Si-SiN-Si 模斑转换器过渡。OPA 中使用的热光移相器电阻为 11 $\text{k}\Omega$,测试得到的 2π 相移电压约为 18 V,对应的电功耗为 30 mW。由此得到该 128 通道光学相控阵的驱动电路需要保证每

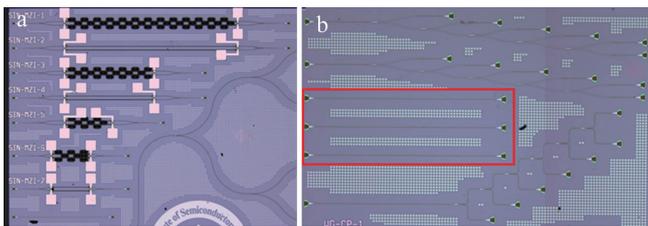


图 4 a—热光移相器测试结构 b— 1×2 多模干涉耦合器测试结构
Fig. 4 a—test structure of thermo-optic phase shifter b—test structure of 1×2 multimode interferometric coupler

一个通道都要能够提供至少 18 V 的电压和 30 mW 的

电功率。SiN 的热光系数约为 Si 的 1/5,如果使用 SiN 热光移相器,所需要的电功率将超过 100 mW。

图 5a 为基于 Si 热光移相器的马赫-曾德尔调制器特性。图 5b 为从第 1 级 ~ 第 5 级多模干涉耦合器的各个输出端口得到的光功率。去掉端口 2 的大偏差数据点后,对端口 1 ~ 端口 5 得到的光功率做线性拟合得到直线斜率为 -3.34,即 1 级多模干涉耦合器的单端口插损为 3.34 dB。最后 1 级多模干涉耦合器的输出端口功率分别为 -24 dBm 和 -23.9 dBm,得到其分光比为 49.4% : 50.6%。图 5c 表示了相同输入功率下,Si-SiN 模斑转换器的耦合损耗。

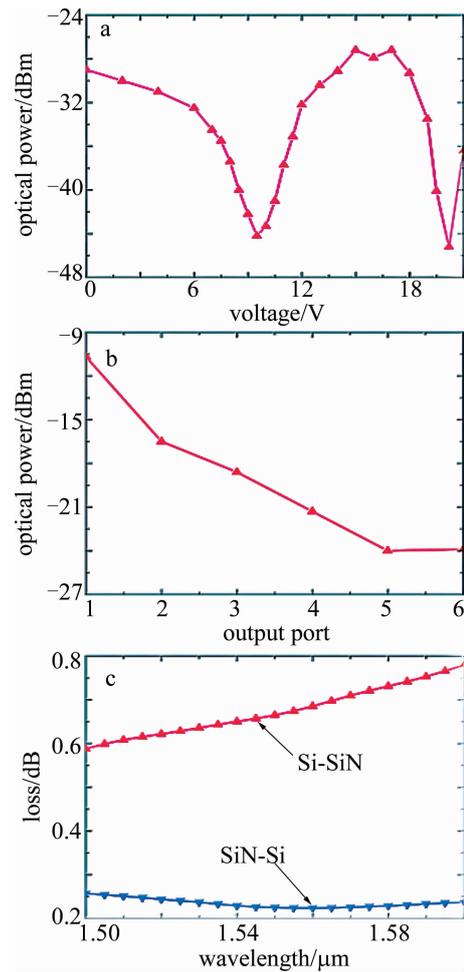


图 5 a—基于 Si 热光移相器的马赫-曾德尔调制器特性 b—级联 SiN 多模干涉耦合器各端口输出功率 c—Si 和 SiN 波导模斑转换器的损耗

一对模斑转换器完成一次 Si-SiN-Si 的光功率转移,其耦合损耗 L 计算方式为:

$$L = \frac{1}{3} \left(L_1 - L_0 + \frac{L_3 - L_0}{3} + \frac{L_3 - L_1}{2} \right) \quad (3)$$

式中： L_0 、 L_1 和 L_3 分别为图 4b 红框中 3 个 Si-SiN 模斑转换器测试结构的损耗； L_0 为自上而下第 1 个结构（包含 0 对模斑转换器）的损耗； L_1 为第 2 个结构（包含 1 对模斑转换器）的损耗； L_3 为第 3 个结构（包含 3 对模斑转换器）的损耗。通过式(3)等效取多次平均，降低随机误差的影响。由此得到，在 1550 nm 时，一对模斑转换器的耦合损耗为 0.52 dB。

图 6 为输入光波长 1550 nm 时，芯片在 φ 方向上的转向结果。对应扫描范围为 43.2° ，与仿真结果一致。此外，从图中可以看出，转向中远场存在大量杂散光，测试结果表明所设计的芯片旁瓣电平抑制比(side-lobe level, SLL) 仅为 8 dB，小于理论的 12 dB 左右。这是由于此次设计的芯片电极较为密集，封装技术难度大，最终 128 个热光移相器中大约 100 个正常工作，故障率约为 21%。图中的杂散光就是由上述故障的通道所导致的。在接下来的工作中，将优化设计以消除负面结果。

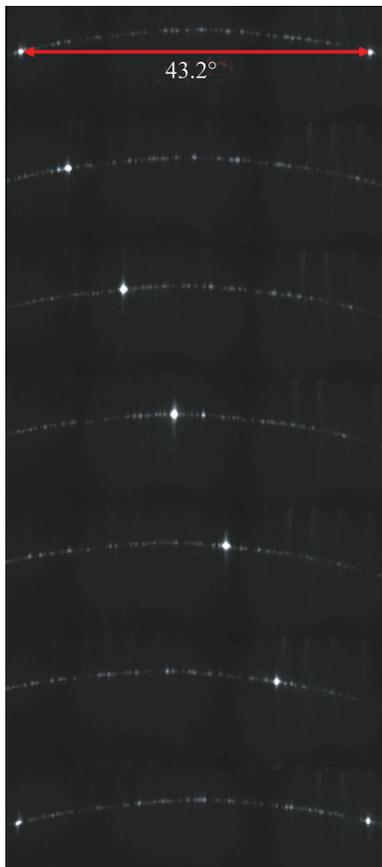


图 6 输入光波长为 1550 nm 时 φ 方向扫描图
Fig. 6 Beam steering in φ axis ($\lambda = 1550$ nm)

图 7 为输入光波长从 1500 nm 调谐至 1600 nm 时的扫描结果。从图中可以看出， θ 方向上的扫描范围为 7.4° 。同时， φ 方向上的扫描范围随着波长的增加逐渐从 41° 增加到 45.5° 。

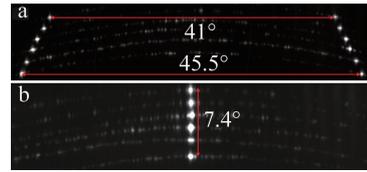


图 7 a—输入光波长从 1500 nm 调谐至 1600 nm 时 φ 方向扫描图
b—输入光波长从 1500 nm 调谐至 1600 nm 时 θ 方向扫描图
Fig. 7 a—beam steering angle in φ axis ($\lambda = 1500$ nm ~ 1600 nm) b—beam steering angle in θ axis ($\lambda = 1500$ nm ~ 1600 nm)

图 8 为输入光波长为 1550 nm 时的光斑。图 9 则显示了当输入光波长为 1550 nm 时 θ 轴和 φ 轴的发散角，对应值为 $0.33^\circ \times 0.37^\circ$ ($\Delta\varphi \times \Delta\theta$)。

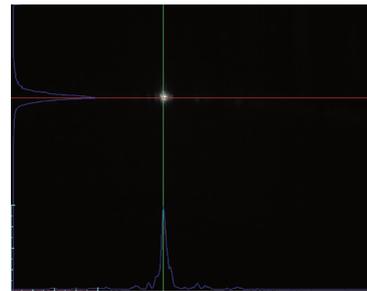


图 8 输入光波长为 1550 nm 时的光斑
Fig. 8 Spot at input light wavelength of 1550 nm

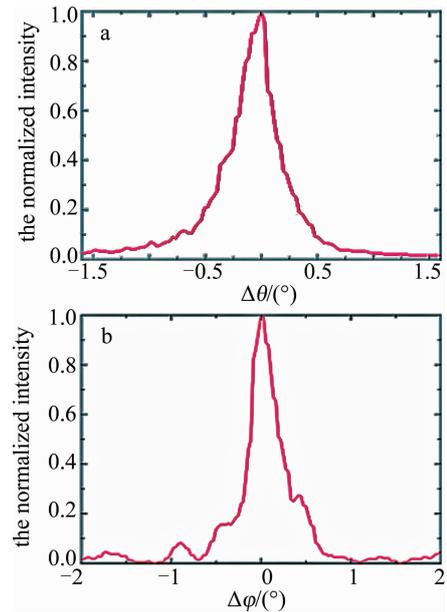


图 9 a— θ 轴发散角 b— φ 轴发散角
Fig. 9 a—divergence angle in θ axis b—divergence angle in φ axis

图 10 中为芯片输出光功率和输入光功率的关系。对数据进行拟合可以得到芯片的整体损耗为 10.8 dB。其中 SiN 波导的损耗为 1.2 dB/cm，SiN 的端面耦合器损耗为 3.6 dB，7 级光分束阵列的损耗为 2.38 dB，SiN-Si-SiN 的波导过渡结构损耗为 0.52 dB，从而得到天线的损耗约为 3 dB。同时随着输入光功率增加，未出现输出光功率趋于饱和的现象，很好地满足了高功率输入的需求，达到设计预期。

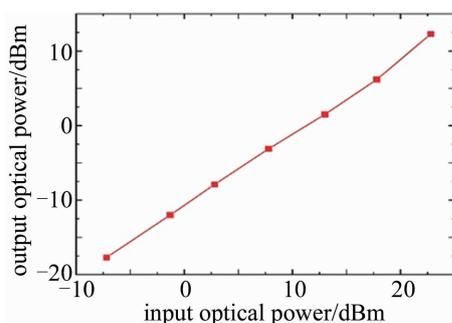


图10 芯片输出-输入光功率的关系

Fig. 10 Chip output & input optical power

3 结论

本文中基于 Si-SiN 体系的 128 个通道平板波导光栅 OPA 芯片,通过使用平板波导光栅设计,成功实现了 φ 方向扫描范围增大。测试结果表明,所设计的芯片视场角为 $41^\circ \times 7.3^\circ$ ($\varphi \times \theta$),发散角为 $0.33^\circ \times 0.37^\circ$ ($\Delta\varphi \times \Delta\theta$)。受限于移相器控制通道 21% 的故障率, SLL 仅为 8 dB。此外, SiN 的引入也成功实现了高功率输入的目标。在接下来的工作中,将会通过增大天线口径来降低发散角,改善设计和封装工艺以实现 SLL 的提高,探索基于色散光学的光真延时线代替光学移相器的可行性^[34]。总体而言,本文中所设计的 OPA 展示出在提高输出功率以及增大扫描范围等方面的优势。

参考文献

- [1] POULTON C V, BYRD M J, RUSSO P, *et al.* Long-range LiDAR and free-space data communication with high-performance optical phased arrays[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019, 25(5): 1-8.
- [2] BHARGAVA P, KIM T, POULTON C V, *et al.* Fully integrated coherent LiDAR in 3D-integrated silicon photonics/65 nm CMOS[C]//2019 Symposium on VLSI Circuits. New York, USA: IEEE Press, 2019: C262-C263.
- [3] BABA T, TAMANUKI T, ITO H, *et al.* Silicon photonics FMCW LiDAR chip with a slow-light grating beam scanner[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2022, 28(5): 1-8.
- [4] ABIRI B, FATEMI R, HAJIMIRI A. A 1-D heterodyne lens-free optical phased array camera with reference phase shifting[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(5): 1-12.
- [5] BYRD M J, POULTON C V, KHANDAKER M, *et al.* Free-space communication links with transmitting and receiving integrated optical phased arrays[C]//Frontiers in Optics/Laser Science. New York, USA: IEEE Press, 2018: FTu4E.1.
- [6] CLEVENSON H A, SPECTOR S J, BENNEY L, *et al.* Incoherent light imaging using an optical phased array[J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(3): 031105.
- [7] BHANDARI B, WANG ChX, GWON J Y, *et al.* Integrated optical phased array enabling wavelength-tuned line scanning[C]//2022 27th Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and 2022 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC). New York, USA: IEEE Press, 2022: 1-3.
- [8] KIM J Y, YOON J, KIM J, *et al.* Demonstration of beam steering using a passive silica optical phased array with wavelength tuning[J]. Optics Letters, 2022, 47(19): 4857-4860.
- [9] YU L, WANG P, MA P, *et al.* Two-dimensional beam scanning of passive optical phased array based on silicon nitride delay line[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(9): 2756-2764.
- [10] MISUGI Y, OKAYAMA H, KITA T. Demonstration of 2D beam steering using large-scale passive optical phased array enabled by multimode waveguides with reduced phase error[J]. Applied Physics Express, 2022, 15(10): 102002.
- [11] MISUGI Y, OKAYAMA H, KITA T. Compact and low power-consumption solid-state two-dimensional beam scanner integrating a passive optical phased array and hybrid wavelength-tunable laser diode[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(11): 3505-3512.
- [12] POULTON C V, BYRD M J, RAVAL M, *et al.* Large-scale silicon nitride nanophotonic phased arrays at infrared and visible wavelengths[J]. Optics Letters, 2017, 42(1): 21-24.
- [13] IM C S, BHANDARI B, LEE K P, *et al.* Silicon nitride optical phased array based on a grating antenna enabling wavelength-tuned beam steering[J]. Optics Express, 2020, 28(3): 3270-3279.
- [14] LI Y, CHEN B, NA Q, *et al.* Wide-steering-angle high-resolution optical phased array[J]. Photonics Research, 2021, 9(12): 2511-2518.
- [15] WANG Q, WANG S, JIA L, *et al.* Silicon nitride assisted 1×64 optical phased array based on a SOI platform[J]. Optics Express, 2021, 29(7): 10509-10517.
- [16] LUO G, YU L, MA P, *et al.* A large-scale passive optical phase array with 1024 channels[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2023, 35(17): 927-930.
- [17] WANG P F, LUO G Zh, XU H Y, *et al.* Design and fabrication of a SiN-Si dual-layer optical phased array chip[J]. Photonics Research, 2020, 8(6): 06000912.
- [18] LUO G, WANG P, MA J, *et al.* Demonstration of 128-channel optical phased array with large scanning range[J]. IEEE Photonics Journal, 2021, 13(3): 1-10.
- [19] LIU Y, HU H. Silicon optical phased array with a 180-degree field of view for 2D optical beam steering[J]. Optica, 2022, 9(8): 903-907.
- [20] TYLER N A, FOWLER D, MALHOUITRE S, *et al.* SiN integrated optical phased arrays for two-dimensional beam steering at a single near-infrared wavelength[J]. Optics Express, 2019, 27(4): 5851-5858.
- [21] CHUL S M, MOHANTY A, WATSON K, *et al.* Chip-scale blue light phased array[J]. Optics Letters, 2020, 45(7): 1934-1937.
- [22] HSU C P, LI B, SOLANO-RIVAS B, *et al.* A review and perspective on optical phased array for automotive LiDAR[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2021, 27(1): 1-16.
- [23] SHANG K, QIN C, ZHANG Y, *et al.* Uniform emission, constant wavevector silicon grating surface emitter for beam steering with ultra-sharp instantaneous field-of-view[J]. Optics Express, 2017, 25(17): 19655.
- [24] RAVAL M, POULTON C V, WATTS M R. Unidirectional waveguide grating antennas with uniform emission for optical phased arrays[J]. Optics Letters, 2017, 42(13): 2563-2566.
- [25] YU L, MA P, LUO G, *et al.* Adoption of large aperture chirped grating antennas in optical phase array for long distance ranging[J]. Optics Express, 2022, 30(15): 28112-28120.

- [26] ZHANG L, WANG Y, HOU Y, *et al.* Uniform rectangular distribution of far-field intensity by optical phased array[J]. *Optics Communications*, 2022, 507: 127661.
- [27] KOMLJENOVIC T, HELKEY R, COLDREN L, *et al.* Sparse aperiodic arrays for optical beam forming and LiDAR[J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 2511-2528.
- [28] FATEMI R, KHACHATURIAN A, HAJIMIRI A. A nonuniform sparse 2-D large-FOV optical phased array with a low-power PWM drive[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2019, 54(5): 1200-1215.
- [29] POLKOO S S, RENSHAW C K. Hybrid imaging-based beam steering system using a sparse photonic integrated circuit outcoupling array[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics. New York, USA: IEEE Press, 2020: JTh2B. 25.
- [30] POULTON C V, BYRD M J, RUSSO P, *et al.* Coherent LiDAR with an 8, 192-element optical phased array and driving laser[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2022, 28(5): 6100508.
- [31] SAYYAH K, SARKISSIAN R, PATTERSON P, *et al.* Fully integrated FMCW LiDAR optical engine on a single silicon chip[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(9): 2763-2772.
- [32] WANG P F, LUO G Z, YU H Y, *et al.* Improving the performance of optical antenna for optical phased arrays through high-contrast grating structure on SOI substrate[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 2703-2712.
- [33] HAN K, YURLOV V, YU N E. Highly directional waveguide grating antenna for optical phased array[J]. *Current Applied Physics*, 2018, 18(7): 824-828.
- [34] ZHENG W, WANG Ch, YANG W L, *et al.* An optical beamforming network based on dispersing optics[J]. *Laser Technology*, 2022, 46(2): 188-192(in Chinese).
郑伟, 王超, 杨文丽, 等. 基于色散光学的光波束形成网络[J]. *激光技术*, 2022, 46(2): 188-192.