

硅基光学相控阵扇形天线优化设计

张耀元^{1,2}, 王锐^{1*}, 姜瑞韬^{1,2}, 杜坤阳^{1,2}, 李远洋¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在光学相控阵芯片中, 天线单元的性能直接决定了波导中光波能量向外辐射的效率。在此基础上, 主要针对扇形结构天线进行优化设计, 通过对扇形天线增加浅刻蚀区域和硅薄带的设计, 对天线向下衍射损失以及背反射损失进行了抑制, 大幅提高了天线向上衍射效率。此外, 分别对提高向上衍射效率和减小设计尺寸的设计要求制定了设计方案, 对于高衍射效率方案, 天线向上衍射效率达到 81.6%, 向下衍射减少到 4%, 背反射减少到 1.4%; 对于小型化方案, 天线向上衍射效率达到 67.2%, 向下衍射减少到 5.6%, 背反射减少到 1.2%, 大幅提高了光学相控阵芯片集成度及发射效率。

关键词: 硅基光学相控阵; 扇形天线; 结构设计; 衍射效率

中图分类号: O436.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210013

Optimal design of silicon-based optical phased array sector antenna

Zhang Yaoyuan^{1,2}, Wang Rui^{1*}, Jiang Ruitao^{1,2}, Du Kunyang^{1,2}, Li Yuanyang¹

(1. Key Laboratory of Laser-Matter Interaction, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In the optical phased array chip, the performance of the antenna unit directly determines the efficiency of the light wave energy in the waveguide to radiate outward. On this basis, the optimized design was mainly for the sector antenna. By adding a shallow etching area and a thin silicon strip to the sector antenna, the downward diffraction loss and back reflection loss of the antenna were suppressed, as well as the upward diffraction of the antenna was greatly improved. In addition, design schemes were formulated for the design requirements of improving the upward diffraction efficiency and reducing the design size. For the high diffraction efficiency scheme, the upward diffraction efficiency of the antenna reached 81.6%, the downward diffraction efficiency was reduced to 4%, and the back reflection was reduced to 1.4%. For the miniaturization scheme, the upward diffraction efficiency of the antenna was 67.2%, the downward diffraction was reduced to 5.6%, and the back reflection was reduced to 1.2%, which greatly improved the integration and emission efficiency of the optical phased array chip.

Key words: silicon-based optical phased array; sector antenna; structure design; diffraction efficiency

收稿日期: 2020-12-30; 修订日期: 2021-04-13

基金项目: 吉林省重大科技攻关专项 (20190302050GX)

作者简介: 张耀元, 男, 硕士生, 主要从事激光雷达方面的研究。

导师(通讯作者)简介: 王锐, 男, 副研究员, 硕士生导师, 博士, 主要从事激光雷达方面的研究。

0 引言

光学相控阵是一种在光学波段通过控制光波相位来实现光束偏转的阵列结构,光学相控阵列中每个天线阵元都能够实现相位的独立控制,因此可以通过控制光学相控阵形成任意的远场分布,光学相控阵技术无需采用复杂的机械结构就能够实现精确的自由空间光束偏转^[1]。近年来,紧凑型高性能光子集成电路得到了迅速发展,与其他光子集成平台相比,硅光子平台具有高度先进的互补金属氧化物半导体 (CMOS) 设施和工艺,且低成本的硅光子集成电路可以通过大规模生产来实现,因此基于硅光子平台的硅基光学相控阵迅速成为研究热门^[2-6]。

目前光学相控阵实现二维扫描大多通过设计小型天线单元,将天线单元排列成二维阵列,通过控制每个单元的相位实现二维扫描。天线阵元的性能直接决定了光学相控阵的输出效率,传统的紧凑型金属天线具有高耗散损耗、依赖于波长的辐射模式等局限性,并且它们难以与 CMOS 技术集成。而 SOI 材料采用“硅-二氧化硅-硅”的三层结构,由于硅和二氧化硅的折射率差非常大,使得 SOI 材料对光的限制作用非常强,因此单个器件可以做得很小,有利于实现大规模集成。同时,为了实现 180° 光束控制范围,要求周期性光波导天线阵列的间距应为波长的一半。然而,在如此小的间距下,相邻光波导之间的串扰非常强,妨碍了天线单元进行独立的相位和幅度控制,对于目前的硅基光波导天线,往往通过牺牲转向角来实现对串扰的抑制。

为了解决串扰问题,已经提出了几种方法,例如使用超材料波导^[7]、波纹波导和非均匀稀疏孔径^[8]等新型纳米光子结构。参考文献 [9] 中提出在光栅结构中插入非对称硅薄带实现了低串扰半波长间距硅波导阵列。参考文献 [10] 使用闪耀光栅结构,通过光栅变迹实现了高辐射效率。

此外,在波导阵列中产生大的相位失配是降低波导元件之间串扰的另一种解决方案。产生相位失配的一种有效方式是通过弯曲波导阵列^[11]来实现,在抑制串扰的基础上,通过使用弯曲光栅能够实现对光场的汇聚。2014 年,麻省理工学院 (MIT) 的 Sun Jie 等人^[12]展示了一个大规模 64×64 天线阵元的硅光子相

控阵,该体系中使用了扇形结构的阵列元,基于 2.8 μm×3.5 μm 尺寸,实现了向上 51%、向下 35%、向后 5% 的衍射效率。参考文献 [13] 中对弯曲结构天线进行了一定程度的改进设计,基于 2.7 μm×2.8 μm 尺寸实现了 51% 向上衍射效率,有效减小了天线设计尺寸。

对于天线的优化设计,最重要的是提高天线向上衍射效率。目前对直波导天线的设计方案中,已有通过在芯片背面嵌入反射镜结构^[14]、使用硅覆盖层、或在直波导中加入闪耀结构^[15]等方法实现了较高的向上衍射效率。文中将借鉴直波导天线设计方法,对弯曲波导天线进行优化设计,实现对天线向下衍射和背反射损失的有效抑制。

1 天线设计理论

光栅耦合器天线是通过在波导中引入周期性刻槽结构,利用光栅布拉格衍射条件将波导中的光信号输出到自由空间中。

光学相控阵远场整体能量分布取决于每个天线阵元的向上衍射效率。当输入光进入光栅结构中时,如图 1 所示,将入射光波总能量记为 P_{in} ,由于光栅为周期性结构,使得折射率不连续,光波在传播方向上会有部分的反射和透射能量,分别记为 P_{back} 和 P_t 。其余能量由于结构对称性,会分别存在向自由空间中以及衬底的衍射分量,分别记为 P_{up} 和 P_{down} 。

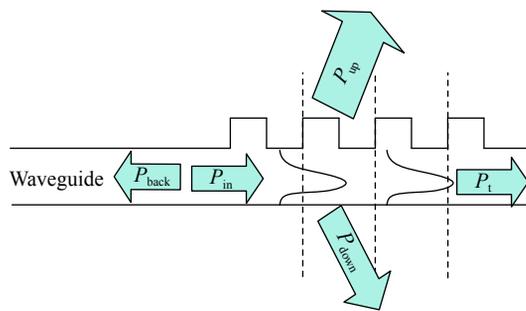


图 1 光栅能量传播示意图

Fig.1 Schematic diagram of grating energy propagation

天线单元的向上衍射效率为天线向上衍射能量与总进入能量的比值:

$$\eta = \frac{P_{up}}{P_{in}} \quad (1)$$

向上衍射效率越高,天线输出能量越大,天线性

能越好。对传统周期性刻蚀光栅结构,由于结构对称,根据布拉格衍射条件,光波向上衍射效率与向下衍射效率相同。因此,为了提高向上衍射效率,需要打破天线上下结构对称性,使得光波经天线单元后向上为相长干涉,向下为相消干涉。

又由衍射公式可知,单个天线的衍射因子为:

$$D = \text{sinc}^2\left(\frac{\pi a}{\lambda} \sin\theta\right) \quad (2)$$

式中: a 为天线的尺寸。由上式可知天线尺寸越小,天线的远场衍射角就越大。同时考虑到阵元间隔需要尽可能小,因此对天线的设计要求之一便是尽可能减小其尺寸。为了保证光栅尺寸足够小,设计时需要尽量减少光栅的周期数,但是光栅周期数若过少则会降低其向上的辐射效率。因此需要兼顾较高的辐射效率与较小的尺寸,同时光栅的辐射场需要保证较为圆整。

2 扇形天线优化设计

在 MIT 的方案中,采用五个光栅齿进行刻蚀,周期为 $0.72 \mu\text{m}$,通过第一级浅刻蚀的方法增强向上衍射效率。参考文献 [10] 中提出,在直波导天线中,利用 L 型蚀刻加矩形支柱的周期性闪耀光栅结构,实现了极高的向上衍射效率。借鉴该研究思路,提出在扇形光栅结构中插入硅薄带,增加浅刻蚀区域,以期实现高天线发射效率。具体天线模型结构参数如图 2 (a) 所示,在原有设计理念的基础上,使用厚度为 300 nm 、折射率为 3.48 的硅芯层设计,增加了光栅散射强度,可以减少实现目标效率所需的周期数。中间层和上包层使用厚度均为 $2 \mu\text{m}$ 、折射率为 1.45 的二氧化硅。硅衬底厚度对耦合性能影响极小,因此在仿真过程中使用 $2 \mu\text{m}$ 的硅材料。硅芯层天线结构如图 2 (b) 所示,光栅周期选择为 720 nm ,其中光栅齿宽 200 nm ,齿间完全刻蚀区域宽度为 370 nm 。

在确定基本结构的基础上,需要对缓冲区域半径 R 、光栅齿级数 N_1 、浅刻蚀级数 N_2 、浅刻蚀区域宽度 W 、浅刻蚀深度 D 、插入硅薄带位置 P 和硅薄带厚度 T 等七个变量进行优化。

对于光栅齿级数 N_1 、浅刻蚀级数 N_2 和硅薄带位置 P ,涉及到的数据点较少,因此采用列举法进行分析。

光栅齿级数 N_1 受限于天线尺寸,级数过多会导

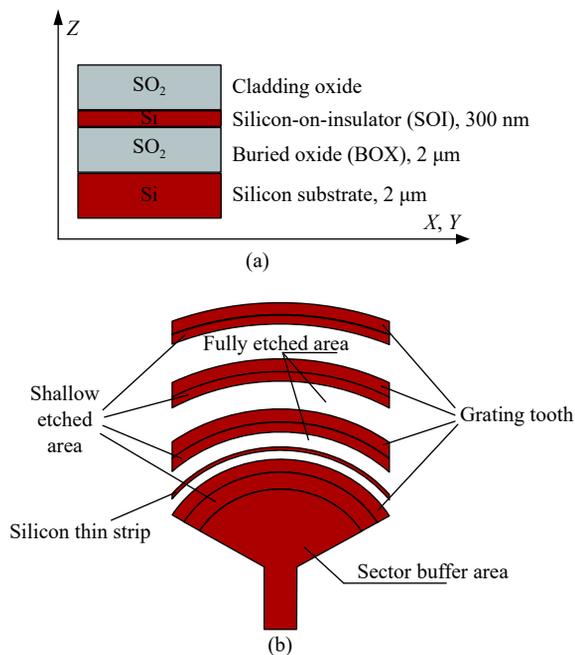


图 2 天线模型。(a) 波导结构; (b) 波导芯层天线结构

Fig.2 Schematic diagram of waveguide structure. (a) Waveguide structure; (b) Waveguide core antenna structure

致天线尺寸变大,天线远场衍射角减小,级数过少会导致光场能量逸散过多。因此分别考虑 $N_1=3$ 、 $N_1=4$ 和 $N_1=5$ 的光栅齿结构设计,分析其衍射效率变化,如表 1 所示。

表 1 光栅齿级数对衍射效率的影响

Tab.1 Influence of number of grating teeth on diffraction efficiency

Number of grating teeth	3	4	5
Upward diffraction	57.2%	69.4%	71.6%
Downward diffraction	9.6%	8.1%	8%
Back reflection	6.2%	6.1%	5.8%
Total incident energy	94%	93.7%	92.1%

根据表 1 可得,在其他参数固定的情况下,光栅齿数量越多,天线衍射效率越高。因此在对天线单元尺寸要求较高的情况下,可以考虑减少光栅齿数量,通过牺牲部分衍射效率来达到天线小型化的要求。

对于浅刻蚀级数 N_2 ,在 MIT 的方案中,仅使用一级浅刻蚀结构实现了对向下衍射损失的有效抑制,增加了向上衍射效率。考虑利用多级浅刻蚀的方式来分析对天线衍射效率的影响,分别针对 $N_2=1$ 、 $N_2=2$ 、 $N_2=3$ 和 $N_2=4$ 的光栅结构进行了如图 3 所示的分析。

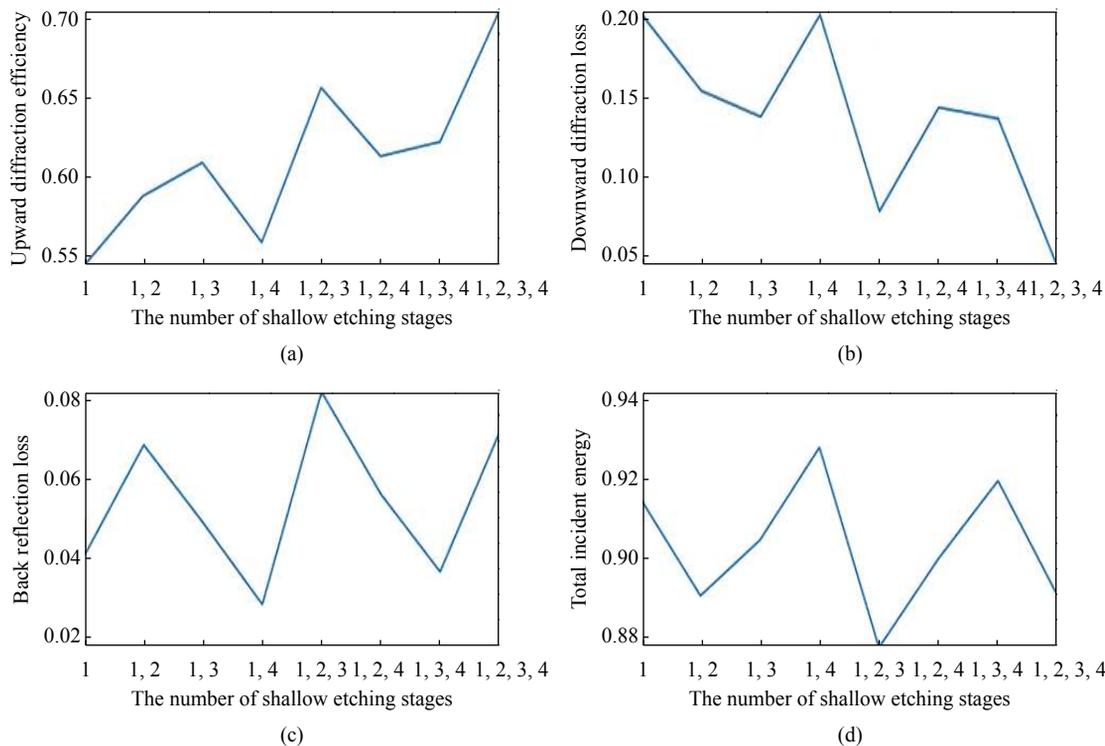


图 3 不同级数浅刻蚀对衍射效率的影响。(a) 向上衍射; (b) 向下衍射; (c) 背反射; (d) 总入射

Fig.3 Effect of different orders of shallow etching on diffraction efficiency. (a) Upward diffraction; (b) Downward diffraction; (c) Back reflection; (d) Total incidence

根据图 3 中数据分析得出, 加入光栅浅刻蚀可以显著减少天线向下衍射损失, 且浅刻蚀级数越多, 天线向上衍射的效率就越高。

在此基础上, 在其他参量固定的情况下考虑插入硅薄带, 不同硅薄带位置对天线衍射效率的影响如表 2 所示。

从表 2 中的数据得出, 插入硅薄带能够显著抑制天线背反射, 增加向上衍射效率。然而插入多级硅薄带后, 天线向上衍射效率相比于插入一级硅薄带出现了一定程度的下降, 这里提取光信号传播过程进行分析。

如图 4 所示, 光信号在传播过程中, 能量主要集

中在一、二级光栅齿, 因此在其他齿间插入硅薄带会使得插入的其他能量损失大于增益, 反而使得衍射效率降低, 综合考虑仅在一、二级光栅齿间插入硅薄带。

对于缓冲区域半径 R 、浅刻蚀区域宽度 W 、浅刻蚀深度 D 和硅薄带厚度 T , 涉及到数据点较多, 采用梯度下降算法原理进行优化分析。

定义天线向上衍射效率为函数 η , η 为 R 、 W 、 D 、 T 的函数, 首先确定基础值 $\theta^0 = (R_0, W_0, D_0, T_0)$, 初始学习率 α , 梯度 $\nabla = \left(\frac{\partial \eta}{\partial R}, \frac{\partial \eta}{\partial W}, \frac{\partial \eta}{\partial D}, \frac{\partial \eta}{\partial T} \right)$, 由此推出下一个数据点 $\theta^1 = \theta^0 + \alpha \nabla \eta(\theta^0)$, 依次迭代, 结合仿真分析推导最大向上衍射效率对应的最优解。

表 2 硅薄带位置对天线衍射效率影响

Tab.2 Influence of the position of the silicon ribbon on the diffraction efficiency of the antenna

Silicon ribbon position	Don't insert	Among 1, 2 teeth	Among 1, 2, 3 teeth	Among 1, 2, 3, 4 teeth
Upward diffraction	68.2%	78.8%	77.8%	75.1%
Downward diffraction	5.8%	4.1%	5.2%	4.6%
Back reflection	6.2%	1.5%	1.23%	1%
Total incident energy	91.3%	95.2%	95.7%	95.9%

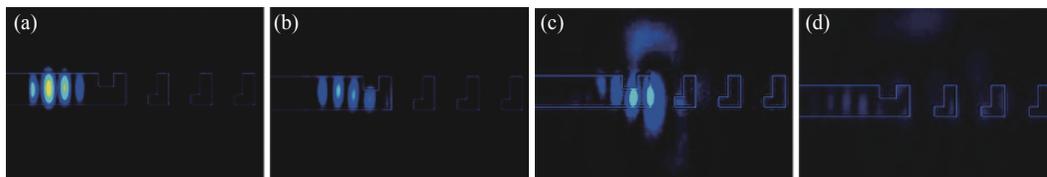


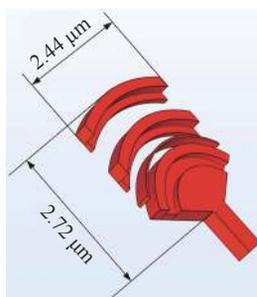
图 4 光场能量传播过程

Fig.4 Light field energy propagation process

在优化过程中,发现在一定范围内,天线单元向上衍射效率与光栅齿长度成正比关系,但是增加光栅齿长度意味着要增大天线单元尺寸,因此在实际应用过程中可以根据对天线尺寸以及衍射效率的不同需求进行取舍。文中在保证相对优越天线性能的前提下,分别针对该天线单元减小设计尺寸和提高向上衍

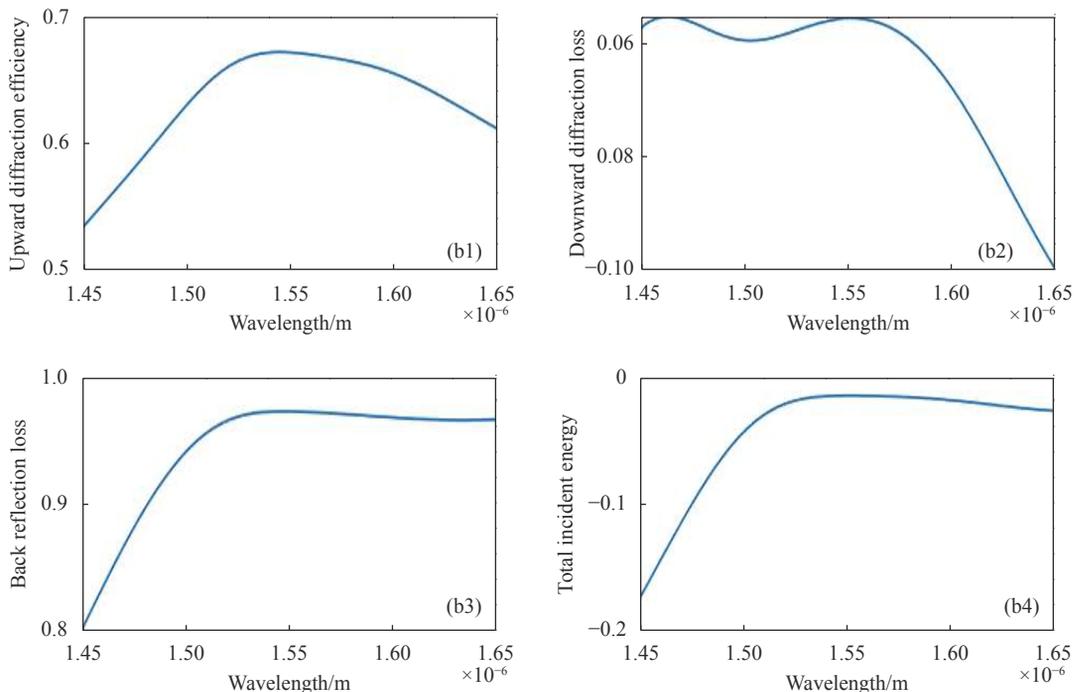
射效率的设计要求提出了两种设计方案。

第一种方案为天线小型化设计,如图 5 所示,该结构使用三级光栅结构,同时减小了光栅齿长度,以 $2.44\ \mu\text{m}\times 2.72\ \mu\text{m}$ 的尺寸实现了在 $1550\ \text{nm}$ 波段 67.2% 的向上衍射效率,向下能量损失为 5.6% ,向后背反射损失为 1.2% 。



(a) 天线结构

(a) Antenna structure



(b) 衍射效率

(b) Diffraction efficiency

图 5 减小天线尺寸设计方案

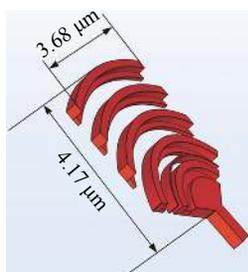
Fig.5 Design scheme to reduce antenna size

第二种方案为天线高衍射效率实现方案, 结构如图 6 所示, 该结构使用五级光栅, 同时增加了光栅齿长度, 以 $3.68 \mu\text{m} \times 4.17 \mu\text{m}$ 的尺寸实现了在 1550 nm 波段 81.6% 的向上衍射效率, 向下衍射损失为 4% , 背反射损失为 1.1% 。

影响天线输出耦合效率的一个关键因素是天线出射光场的聚焦度, 在光学相控阵芯片与光纤进行耦合的过程中, 光场能量越集中, 与光纤耦合效率就越高, 而弯曲波导光栅可以使光聚焦到光子线上, 实现对光场的有效聚焦。将小型化天线结构与高衍射效

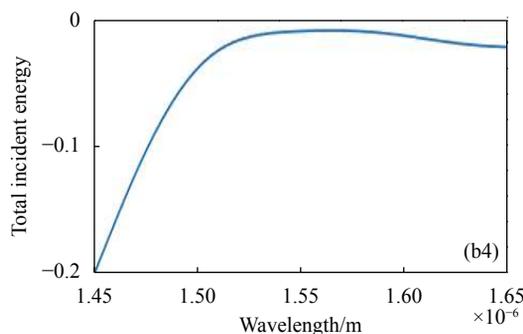
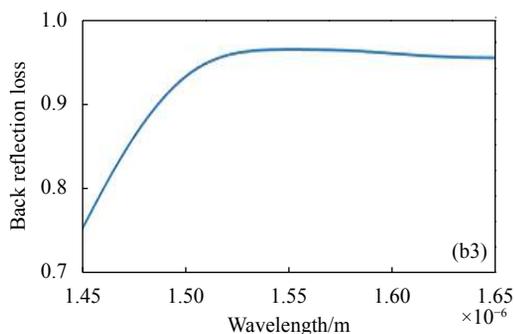
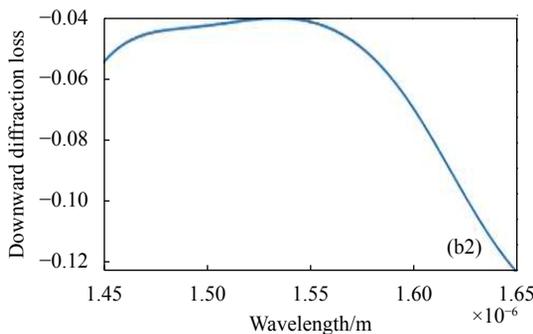
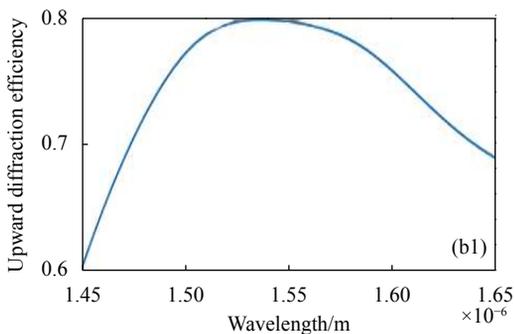
率结构的远场光斑形态和能量分布进行了对比分析, 如图 7 所示。

对比两种结构的远场分布图, 得出扇形天线结构的远场分布均呈现规整的圆形或椭圆形分布, 实现了对光波能量较好的汇聚作用。小型化方案中远场呈圆形分布, 光场主要集中在 20° 远场范围内。而高衍射效率方案远场呈椭圆分布, 长轴光场主要集中在远场 15° 范围内, 短轴光场主要集中在 10° 远场范围内。高的能量集中度为天线与光纤的高耦合效率提供了可靠的保障。



(a) 天线结构

(a) Antenna structure



(b) 衍射效率

(b) Diffraction efficiency

图 6 高效率天线设计方案

Fig.6 High diffraction efficiency design structure

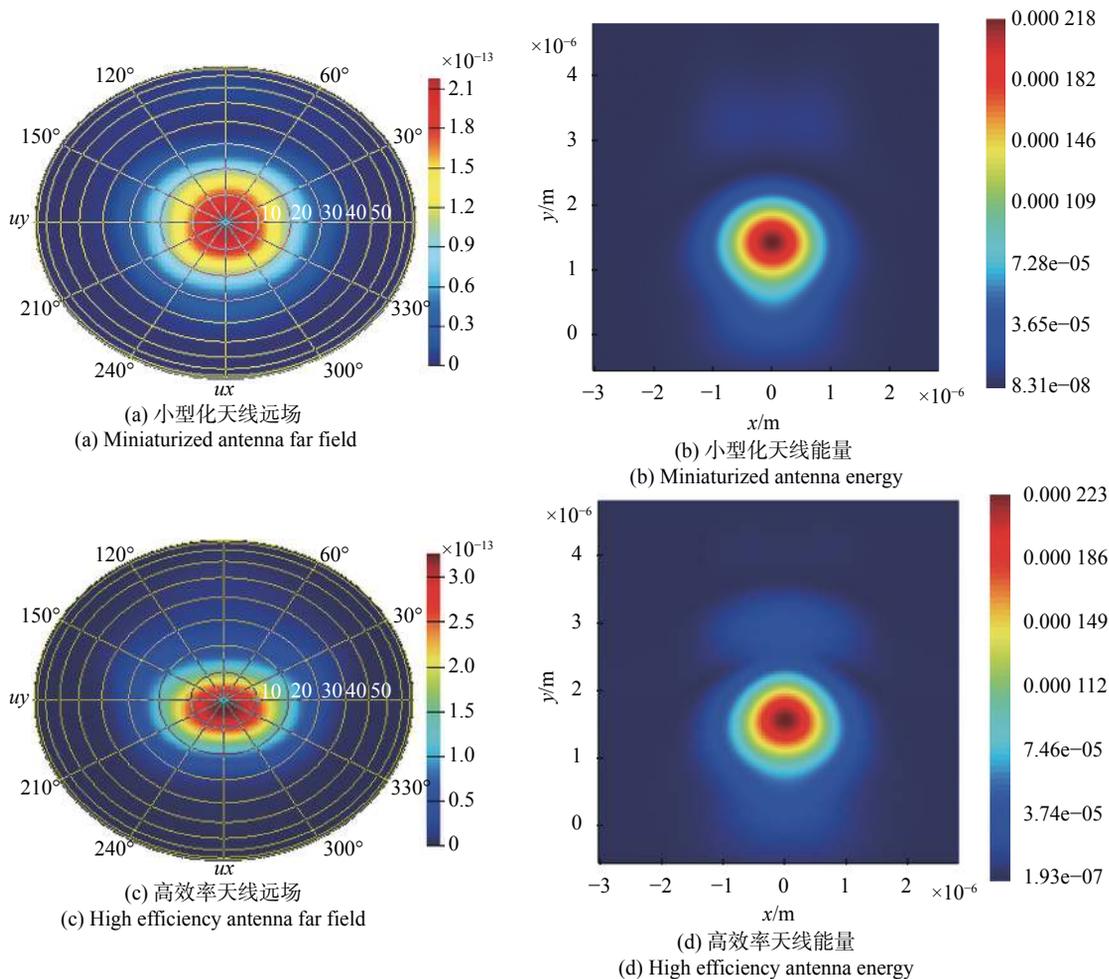


图 7 天线远场及能量分布图

Fig.7 Antenna far field and energy distribution

3 结 论

对于二维光学相控阵天线设计,难点在于难以兼顾大远场衍射角、高天线衍射效率以及良好的远场分布。增大远场衍射角需要减小设计尺寸,而提高天线辐射效率的关键在于对基底衍射损失与背反射损失的有效抑制。扇形波导天线对光场有一定汇聚作用,能够提供较好的远场分布,因此文中在该研究思路的基础上,结合近年来直波导天线的研究理念,针对扇形天线进行了优化设计。通过在各级光栅齿前加入浅刻蚀区域,同时在光栅全刻蚀区域插入硅纳米薄带,实现了对向下衍射损失以及背反射损失的有效抑制,得到了较高的向上衍射效率。基于该模型,针对减小天线设计尺寸与高向上衍射效率的性能指标分别进行了优化设计,在小型化方案中使得天线向上衍射效率达到 67.2%,向下衍射减少到 5.6%,背反射减

少到 1.2%。在高向上衍射效率方案中使得天线向上衍射效率达到 81.6%,向下衍射减少到 4%,背反射减少到 1.1%,为光学相控阵天线设计提供了新的研究思路。

参考文献:

- [1] Ma Yanxing, Wu Jian, Su Rongtao, et al. Overview of the development of optical phased array technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(10): 20201042. (in Chinese)
- [2] Zhao Bin, Zhao Changming, Yang Suhui, et al. Performance analysis of optical phased array scanning using phase blazed grating [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 341-346. (in Chinese)
- [3] Michaels A, Wu M C, Yablonovitch E. Hierarchical design and optimization of silicon photonics [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 26(2): 1-12.

- [4] Kwong D, Hosseini A, Covey J, et al. On-chip silicon optical phased array for two-dimensional beam steering [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 941-944.
- [5] Hutchison D N, Jie S, Doylend J K, et al. High-resolution aliasing-free optical beam steering [J]. *Optica*, 2016, 3(8): 887-890.
- [6] Dostart N, Zhang B, Khilo A, et al. Serpentine optical phased arrays for scalable integrated photonic LIDAR beam steering [J]. *Optica*, 2020, 7(6): 726-733.
- [7] Jahani S, Kim S, Atkinson J, et al. Controlling evanescent waves using silicon photonic all-dielectric metamaterials for dense integration [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 1893.
- [8] 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.
- [9] Wang Liping, Chen Ze, Wang Hongfei, et al. Design of a low-crosstalk half-wavelength pitch nano-structured silicon waveguide array [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(13): 3266-3269.
- [10] Melati D, Dezfouli M K, Grinberg Y, et al. Design of compact and efficient silicon photonic micro antennas with perfectly vertical emission [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2021, 27(1): 1-10.
- [11] Gatdula R, Abbaslou S, Lu M, et al. Guiding light in bent waveguide superlattices with low crosstalk [J]. *Optica*, 2019, 6(5): 585-591.
- [12] Sun Jie, Timurdogan E, Yaacobi A, et al. Large-scale nanophotonic phased array [J]. *Nature*, 2013, 493(7431): 195-199.
- [13] Du Shujian. Research on two-dimensional optical phased array on silicon substrate[D]. Shannxi: University of Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese)
- [14] Roelkens G, Thourhout D V, Baets R. High efficiency Silicon-on-Insulator grating coupler based on a poly-Silicon overlay [J]. *Optics Express*, 2006, 14(24): 11622-11630.
- [15] Watanabe T, Ayata M, Koch U, et al. Perpendicular grating coupler based on a blazed anti-back-reflection structure [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(21): 4663-4669.