

一种小型化高效率的介质光纳米天线

徐月^{1,2**}, 董涛^{1,2*}, 贺敬文^{1,2}, 万骞^{1,2}

¹天地一体化信息技术国家重点实验室, 北京 100095;

²北京卫星信息工程研究所, 北京 100095

摘要 为了实现光相控阵的大规模扩展和无栅瓣扫描, 提出了一种工作波长为 1550 nm 的小型化高效率的介质光纳米天线。设计的天线呈喇叭形, 由硅材料构成, 尺寸为亚波长量级。光通过硅波导从天线底部馈入, 之后再被天线有效地辐射到自由空间中。由于硅材料对波长为 1550 nm 的光是透明的, 因此材料吸收所造成的损耗非常小, 天线具有很高的辐射效率。利用三维电磁场仿真软件对天线进行仿真、优化, 最终得到在垂直于辐射方向的平面上投影尺寸为 $0.82\ \mu\text{m} \times 0.28\ \mu\text{m}$ 的天线。仿真、优化的结果表明, 天线在 1550 nm 处的增益为 6.1 dB, 辐射效率为 82.7%, 具有方向图对称性好、主瓣垂直辐射、无双向辐射等良好的辐射特性。

关键词 光通信; 红外光学器件; 光纳米天线; 亚波长; 硅基光电子

中图分类号 TN214

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.080601

A Miniaturized and Highly Efficient Dielectric Optical Nanoantenna

Xu Yue^{1,2**}, Dong Tao^{1,2*}, He Jingwen^{1,2}, Wan Qian^{1,2}

¹State Key Laboratory of Space-Ground Integrated Information Technology, Beijing, 100095, China;

²Beijing Institute of Satellite Information Engineering, Beijing, 100095, China

Abstract To realize a large scalable optical phased array and beam steering without grating lobes, we design a miniaturized dielectric optical nanoantenna operating at 1550 nm with high efficiency. The nanoantenna is trumpet-shaped with a footprint and composed of silicon in the subwavelength order. Light is fed from the bottom of the nanoantenna by a silicon waveguide and then radiated into free space efficiently. Because silicon is nearly transparent to the wavelength of 1500 nm, absorption loss caused by the material is very low and the nanoantenna has a high radiation efficiency. A three-dimensional electromagnetic simulation software is used for simulation and optimization. The final footprint of the designed nanoantenna vertical to the radiation direction is $0.82\ \mu\text{m} \times 0.28\ \mu\text{m}$. The results of simulation and optimization indicate that the nanoantenna has good radiation characteristics at 1550 nm with a gain of 6.1 dB, an efficiency of 82.7%, a good symmetry of radiation pattern, emitting vertically to the nanoantenna plane and no bidirectional radiation.

Key words optical communications; infrared optical devices; optical nanoantenna; subwavelength; silicon photonics

OCIS codes 060.2605; 130.3060; 050.6624

1 引言

相比传统的微波相控阵, 光相控阵(OPA)具有带宽大、通信速率高、体积小、重量轻和功耗低等优点, 在通信、成像、显示、传感和三维全息术方面的应用需求使其得到了广泛的关注^[1-8]。光天线单元是 OPA 的关键组成部分, 它的辐射特性和尺寸对天线

阵列的辐射特性具有重要影响, 常见的光天线单元有光栅型介质天线单元和等离子体天线单元。多种光栅型介质天线单元及其组成的 OPA 已经被设计和演示验证, 为了更有效地将波导中的光辐射到自由空间中, 光栅型介质天线单元的尺寸约为几倍波长到几百倍波长^[9-17]。比如, 2014 年 Sun 等^[1]设计的 OPA 中采用的光栅型介质天线单元的尺寸约为

收稿日期: 2018-03-01; 修回日期: 2018-03-04; 录用日期: 2018-03-16

基金项目: 中国航天科技集团公司科技创新研发项目(KJJGTX-17)

* E-mail: dongt@sgit.cn; ** E-mail: xubancun509@163.com

2.3 倍波长;2017 年 Poulton 等^[16]提出的另一种光栅型介质天线单元的尺寸约为 2580 倍波长。当 OPA 的天线单元间距大于一个波长时,方向图就会出现栅瓣^[18],因此由光栅型介质天线单元组成的 OPA 的辐射方向图往往会出现栅瓣。除此之外,光栅型介质天线单元还存在双向辐射的问题,当作为发射天线时,会有能量的损失,同时会对其他设备造成干扰;当作为接收天线时,又会受到其他设备的干扰。为了解决光栅型介质天线单元尺寸较大的问题,研究者提出了等离子体纳米天线单元。等离子体纳米天线单元由金属和介质构成,单元尺寸在波长量级^[19-22]。比如,2016 年 Nia 等^[20]设计了一种等离子体纳米天线,其尺寸约为 1.37 倍波长;2015 年 Iluz 等^[22]提出的另一种等离子体纳米天线,尺寸约为 2.15 倍波长。这些等离子体纳米天线与介质光栅天线相比尺寸大大减小,但其仍然大于一个波长。等离子体纳米天线同样具有良好的辐射特性,很高的增益,但由于金属材料对光有吸收作用,所以会造成能量的损失。除此之外,光栅型介质天线单元和等离子体纳米天线单元的辐射方向均不是垂直辐射^[1,6,20-21],这限制了 OPA 的波束扫描范围。

本文设计了一种工作在 1550 nm 的小型化高效率的亚波长喇叭形结构介质光纳米天线,天线由硅材料构成,其尺寸为 0.53 倍波长。与光栅型介质天线单元相比,这种喇叭形结构的介质光纳米天线

具有更小的尺寸,其辐射方向图具有更好的对称性,主瓣垂直辐射,且不产生双向辐射。与等离子体纳米天线单元相比,喇叭形介质光纳米天线的面积降低一个数量级,而且没有引入会产生吸收损耗的金属材料,有利于提高辐射效率。使用三维电磁场仿真软件进行仿真、优化,最终得到的天线不仅尺寸小还具有良好的辐射特性。

2 天线结构

硅和二氧化硅对波长为 1550 nm 的光是透明的,吸收损耗非常小,因此天线和波导使用这两种材料。天线结构为喇叭形,由波导从底部馈光,喇叭形的结构将波导模光滑过渡到自由空间模。这种光滑过渡减弱了反射而加强了行波,可以获得较好的匹配特性。由于其结构上的对称性,可以实现主瓣垂直辐射。然而,具有最佳增益的喇叭天线口面尺寸通常为几倍波长,不能满足天线小型化的要求,因此需要对喇叭天线进行改进。天线和波导的三维结构如图 1(a)所示,波导从天线底部馈光,由二氧化硅包覆。天线的长度为 L ,经过仿真、优化之后,天线在 x - o - y 面上的投影尺寸为 $0.82 \mu\text{m} \times 0.28 \mu\text{m}$,如图 1(b)所示。天线和波导的左视图和主视图分别如图 1(c)和(d)所示,波导在 x - o - y 面的横截面尺寸为 $0.45 \mu\text{m} \times 0.22 \mu\text{m}$ 。

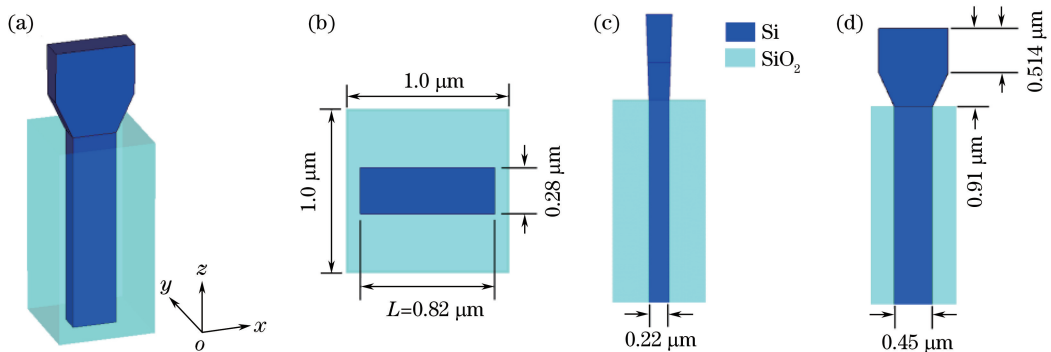


图 1 硅波导馈光的天线单元的示意图。(a)三维结构图;(b)俯视图;(c)左视图;(d)主视图

Fig. 1 Schematic of dielectric optical nanoantenna fed by a silicon waveguide. (a) Perspective view; (b) top view; (c) front view; (d) side view of the antenna

3 仿真结果和分析

利用三维电磁场仿真软件对天线进行仿真和优化,在 1550 nm(193.5 THz)处,硅的相对介电常数 ϵ_{r1} 为 12.11,二氧化硅的相对介电常数 ϵ_{r2} 为 2.1。仿真时,在波导下方的端口处施加激励,激励的中心频率设置为 193.5 THz,频率范围设置为 187 ~

200 THz。模型周围采用完美吸收边界条件,边界与模型之间的间距设置为 $0.25\lambda_0$ ($\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$)。计算过程中的迭代误差设置为 -30 dB 。在 193.5 THz 处,天线在 x - o - y 面和 x - o - z 面的电场矢量分布分别如图 2(a)和(b)所示。从图 2(b)中可以看出,在 x 轴方向,天线两侧的电场相位相差约 180° ,因此在天线上方的电场矢量叠加达到最强。

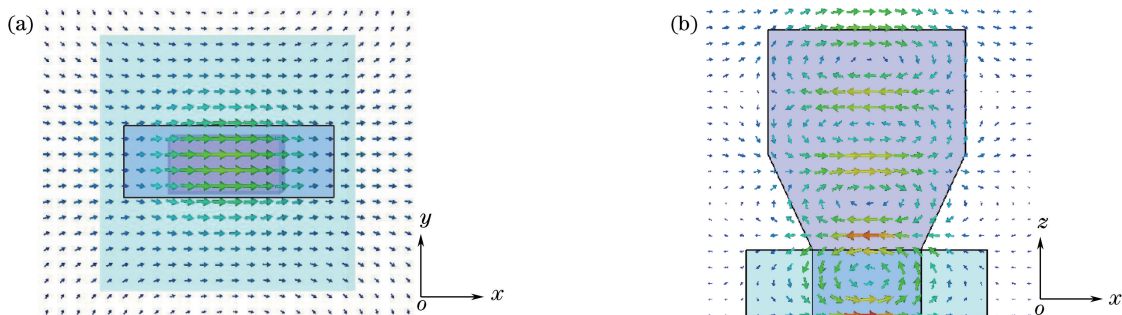


图2 193.5 THz处天线在(a) x - o - y 面和(b) x - o - z 面的电场矢量分布

Fig. 2 Numerically calculated electric field vector distributions in the (a) x - o - y and (b) x - o - z planes of the antenna at 193.5 THz

图3是193.5 THz处天线的三维辐射方向图, θ 为俯仰角, φ 为方位角。在沿 x 轴方向($\varphi=0^\circ$ 面), 天线尺寸较大, 波束较窄; 在沿 y 轴方向($\varphi=90^\circ$ 面), 天线尺寸较小, 波束较宽。天线的主瓣垂直辐射(沿 z 轴正向), 且没有产生双向辐射。

耗曲线。回波损耗即反射波与入射波能量之比, 主要受光在硅和自由空间的界面处发生的反射的影响。从图4可以看出, 当 $L=0.82 \mu\text{m}$ 时, 回波损耗较低, 在193.5 THz处, 回波损耗为 -7.58 dB 。

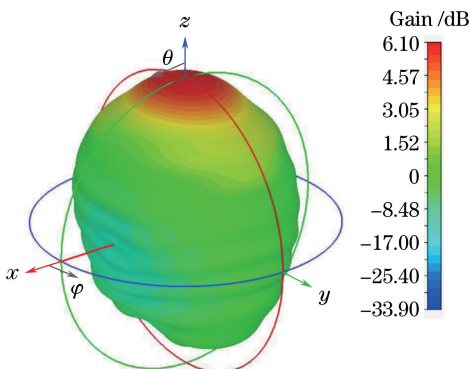


图3 193.5 THz处的天线三维辐射方向图

Fig. 3 Three dimensional radiation pattern of the antenna at 193.5 THz

图2(b)表明, 天线沿 x 轴方向两侧的光场能量比较小, 减小天线长度 L 之后, 对天线的远场方向图轮廓影响较小。天线的初始长度为 $L=1.3 \mu\text{m}$ 。对天线长度 L 进行优化, 得到如图4所示的回波损

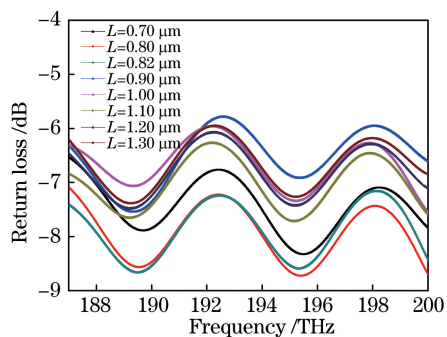


图4 L 取不同值天线的回波损耗曲线

Fig. 4 Return loss of the antenna as a function of L

方位角 $\varphi=0^\circ$ 面和 $\varphi=90^\circ$ 面的二维辐射方向图分别如图5(a)和(b)所示。在天线长度 $L=0.82 \mu\text{m}$ 时, 3 dB波束宽度为 $46.0^\circ \times 53.8^\circ$, 主瓣增益达到最大值6.1 dB, 后瓣增益为0.7 dB。与主瓣相比, 后瓣相对较小, 一般认为这是单向辐射, 天线的辐射效率达到82.7%。由图4和图5可得, 在 $L=0.82 \mu\text{m}$ 时天线具有较好的匹配特性和辐射特

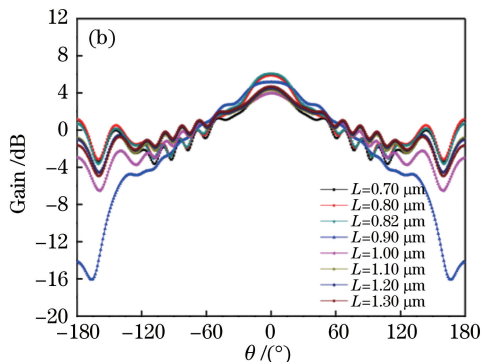
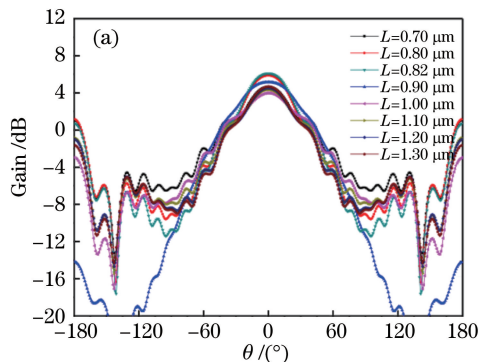


图5 天线在(a) $\varphi=0^\circ$ 面和(b) $\varphi=90^\circ$ 面的二维辐射方向图

Fig. 5 Two dimensional radiation patterns of the dielectric optical nanoantenna in the planes of (a) $\varphi=0^\circ$ and (b) $\varphi=90^\circ$

性,因此最终选择天线长度为 $L = 0.82 \mu\text{m}$ 。相比 $L = 1.3 \mu\text{m}$ 时,天线增益提高了 1.4 dB,回波损耗降低了 0.68 dB,面积减小了 37%。通过减小天线的长度,不仅可以有效地减小面积,还可以提高匹配特性和辐射特性。

4 结 论

使用硅材料设计了工作于 1550 nm 的亚波长尺寸的喇叭形介质光纳米天线,利用硅波导进行馈光,通过优化喇叭形结构天线,将波导模光滑过渡到自由空间模。利用三维电磁场仿真软件进行仿真和优化,得到天线在垂直于辐射方向的平面上投影尺寸为 $0.82 \mu\text{m} \times 0.28 \mu\text{m}$ 。在 1550 nm 处,天线的 3 dB 波束宽度为 $46.0^\circ \times 53.8^\circ$,增益达到了 6.1 dB,辐射效率达到了 82.7%。喇叭形介质光纳米天线尺寸小,方向图对称性好,主瓣垂直直射,没有产生双向辐射。除此之外,喇叭形介质光纳米天线采用底馈的方式,应用于 OPA 中,功分网络、移相器和衰减器等光电子设备将向下集成,不与天线阵列在同一平面,因此天线单元的间距可以达到亚波长量级,便于实现 OPA 方向图宽范围无栅瓣扫描,以及进行大规模扩展。

参 考 文 献

- [1] Sun J, Hosseini E S, Yaacobi A, *et al.* Two-dimensional apodized silicon photonic phased arrays [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(2): 367-370.
- [2] Shi J P, Dong K X, Huang Y, *et al.* Scanning near-field optical probe based nano-antennas [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(5): 1459-1463.
石建平,董可秀,黄圆,等.基于纳米光学天线的扫描近场光学探针研究[J].*光学学报*, 2010, 30(5): 1459-1463.
- [3] Xu Z C, Li N, Duan B Y. Design of broadband spiral nanoantenna based on solar energy harvesting [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0826003.
徐志超,李娜,段宝岩.基于太阳能收集的宽频螺旋纳米天线单元设计[J].*光学学报*, 2017, 37(8): 0826003.
- [4] Yan A M, Zhi Y N, Sun J F, *et al.* Recent development of optical phased arrays canning technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(10): 102801.
闫爱民,职亚楠,孙建锋,等.光学相控阵扫描技术研究进展[J].*激光与光电子学进展*, 2011, 48(10): 102801.

- [5] Xu J H, Wang X R, Huang Z Q, *et al.* PID tracking method of space laser communication based on liquid crystal optical phased array [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(2): 021202.
许剑华,汪相如,黄子强,等.基于液晶光学相控阵的空间激光通信 PID 跟踪算法[J].*激光与光电子学进展*, 2017, 54(2): 021202.
- [6] Abediasl H, Hashemi H. Monolithic optical phased-array transceiver in a standard SOI CMOS process [J]. *Optics Express*, 2015, 23(5): 6509-6519.
- [7] 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.
- [8] Mcmananon P F, Dorschner T A, Corkum D L, *et al.* Optical phased array technology [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1996, 84(2): 268-298.
- [9] van Acoleyen K, Rogier H, Baets R. Two-dimensional optical phased array antenna on silicon-on-insulator [J]. *Optics Express*, 2010, 18(13): 13655-13660.
- [10] Guclu C, Boyraz O, Capolino F. Theory of optical leaky-wave antenna integrated in a ring resonator for radiation control [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(1): 10-18.
- [11] Zhao C, Zhang H, Zheng Z, *et al.* Silicon optical-phased-array prototypes using electro-optical phase shifters [C] // *Conference on Lasers and Electro-Optics*, May 14-19, 2017, San Jose, California. Washington: Optical Society of America, 2017: SM1O.4.
- [12] Yoo B W, Megens M, Sun T, *et al.* A 32×32 optical phased array using polysilicon sub-wavelength high-contrast-grating mirrors [J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19029-19039.
- [13] Poulton C V, Yacobi A, Su Z, *et al.* Optical phased array with small spot size, high steering range and grouped cascaded phase shifters [C] // *Integrated Photonics Research, Silicon and Nanophotonics*, July 18-20, 2016, Vancouver, Canada. Washington: Optical Society of America, 2016: IW1B.2.
- [14] Doylend J K, Heck M J R, Bovington J T, *et al.* Two-dimensional free-space beam steering with an optical phased array on silicon-on-insulator [J]. *Optics Express*, 2011, 19(22): 21595-21604.
- [15] Kim M H, Li Z, Yu N. Controlling light propagation in optical waveguides using one dimensional phased antenna arrays [C] // *Conference on Lasers and Electro-Optics*, June 08-13 2014, San Jose,

- California. Washington: Optical Society of America, 2014: FW3C.4.
- [16] 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.
- [17] Hutchison D N, Sun J, Doyle J K, *et al.* High-resolution aliasing-free optical beam steering [J]. *Optica*, 2016, 3(8): 887-890.
- [18] Eibert T F, Volakis J L. *Antenna engineering handbook*[M]. New York: McGraw-Hill Education, 2009: 29.
- [19] Huang C J, Chen C, Wang S W. An introduction to performance of optical nano-antennas [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6):060005.
- 黄彩进, 陈成, 王顺文. 纳米光学天线性能研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 060005.
- [20] Nia B A, Yousefi L, Shahabadi M. Integrated optical-phased array nanoantenna system using a plasmonic Rotman lens [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(9): 2118-2126.
- [21] Yousefi L, Foster A C. Waveguide-fed optical hybrid plasmonic patch nano-antenna [J]. *Optics Express*, 2012, 20(16): 18326-18335.
- [22] Iluz Z, Boag A. Wide-angle scanning optical linear phased array [C] // *International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems*, November 02-04, 2015, Tel Aviv, Israel. New York: IEEE, 2015: 1-2.