

# 超紧凑硅基混合表面等离激元光场窄化器件的实验研究\*

孙鹏飞<sup>1) #</sup> 朱科建<sup>1) #</sup> 许鹏飞<sup>1)</sup> 刘兴鹏<sup>2)</sup>

孙堂友<sup>2)</sup> 李海鸥<sup>2)</sup> 周治平<sup>1) 3) †</sup>

1) (北京大学电子学院区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871)

2) (桂林电子科技大学广西精密导航技术与应用重点实验室, 桂林 541004)

3) (中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(2021 年 12 月 18 日收到; 2022 年 6 月 1 日收到修改稿)

本文设计、制备了一种基于硅基光电子技术的超紧凑混合表面等离激元光场窄化器件, 并验证了器件的纳米聚焦性能. 实验结果表明, 该光场窄化器件利用了长度约为  $1.23\ \mu\text{m}$  的锥形渐变结构, 将硅条形波导中的光场聚焦到硅基混合表面等离激元波导中, 在  $1550\ \text{nm}$  的近红外波段最高可实现约 20 倍的非谐振光场增强效应. 结构简单, 性能优异的硅基混合表面等离激元光场窄化器件, 在光场操控、光传感、非线性光学器件、光相变存储等领域中具有潜在的应用价值.

**关键词:** 硅基光电子, 硅基混合表面等离激元, 片上纳米聚焦, 大规模光电子集成

**PACS:** 62.23.-c; 73.20.Mf; 85.60.-q; 42.82.-m;

**DOI:** 10.7498/aps.71.20212340

## 1 引言

硅基光电子, 利用成熟的硅基微电子互补金属氧化物半导体 (CMOS) 制造工艺, 是备受关注的大规模光电集成平台<sup>[1-4]</sup>. 表面等离激元器件在过去几十年间也得到了广泛的关注<sup>[5-11]</sup>. 基于硅基光电子技术的表面等离激元纳米聚焦器件成为了近年的研究热点. 表面等离激元纳米聚焦器件, 是利用特殊设计的纳米尺度表面等离激元金属结构将光场汇聚到极小的区域内, 使光场强度极大地增强<sup>[12]</sup>, 满足光场操控、光传感、非线性光学器件、光相变存储等应用对较高光场强度的需求<sup>[13,14]</sup>.

典型的纳米聚焦结构有啾啾表面光栅<sup>[15]</sup>, 表面

等离激元非涅尔波带片<sup>[16,17]</sup>, 金属纳米狭缝阵列<sup>[18,19]</sup>, 以及锥形金属结构尖端<sup>[20-23]</sup>等. 如 Veronis 等<sup>[24]</sup>提出的多节锥形结构器件, 可以理论上实现很高的聚焦效率; Chen 等<sup>[25]</sup>报道的硅片上亚波长聚焦器件, 也可以达到一定程度上的表面等离激元纳米聚焦; Ono 等<sup>[26]</sup>报道的波导高度不连续的金属狭缝波导聚焦器件, 利用高精度的制备工艺实现了更显著的聚焦效果. 然而, 本段列举的器件中, 存在精细结构过于复杂难以实际加工、金属狭缝波导传输损耗太大等不可避免的问题.

本文设计并实验加工了一种绝缘体上硅片 (silicon-on-insulator, SOI) 上的硅基混合表面等离激元光场窄化器件, 实现了将光场从传统硅条形波导到硅基混合表面等离激元波导 (hybrid plasmonic

\* 国家重点研发计划 (批准号: 2019YFB2205200) 和国家自然科学基金 (批准号: 61775005, 62035001) 资助的课题.

# 同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: zjzhou@pku.edu.cn

waveguide, HPW) 的高效纳米聚焦. 该光场窄化器件不仅在片上实现了显著的光场聚焦效应, 而且与硅基光电子芯片的制备技术相兼容, 为表面等离子激元和硅基光电子的混合集成器件提供了有效的技术方案.

## 2 器件设计

硅基混合表面等离子激元光场窄化器件的结构示意如图 1 所示. 其中, 衬底的材料是二氧化硅, 作为输入和输出的是硅波导, 作为中间聚焦区域的是硅基混合表面等离子激元波导. 中间金属层的材料是金 (Au), 缝隙中填充的材料与包层的相同. 利用有限元法 (finite element method, FEM) 数值仿真, 可以计算出两侧硅波导和中间金属区域的本征模式. 仿真结果显示当 TE 模式入射时, 金属层可以将光场限制在其表面, 形成混合 TE 模式. 这种混合的 TE 模式与介质中的 TE 模式有很大的不同, 其在金属区和介质区的交界面上形成显著的反射. 此外, 金属自身对光场的限制能力使得这种混合 TE 模式的有效折射率大幅增大, 从而形成反射光栅结构.

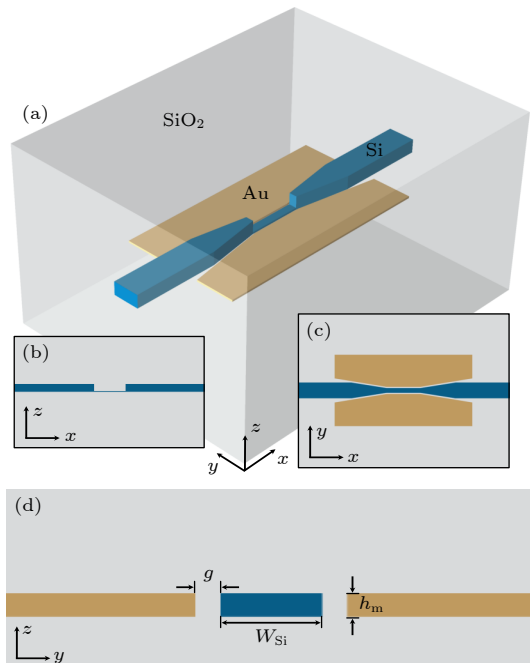


图 1 硅基混合表面等离子激元光场窄化器件的结构示意图 (a) 三维图; (b) 侧视图; (c) 俯视图; (d) 中间处的截面图

Fig. 1. Schematic of the proposed silicon hybrid plasmonic nanofocusing device: (a) 3D perspective view; (b) side view; (c) top view; (d) cross-sectional view at the center.

图 2 是硅基混合表面等离子激元光场窄化器件的光场分布的三维仿真图. 传统硅波导中的光场经过一段锥形的渐变结构, 聚焦到中间的混合表面等离子激元波导中. 由于混合表面等离子激元波导中的缝隙部分折射率较低, 对光场起到类似于容器的作用, 使得这种混合表面等离子激元光场模式具有较低的损耗, 同时又具有很好的聚焦效果.

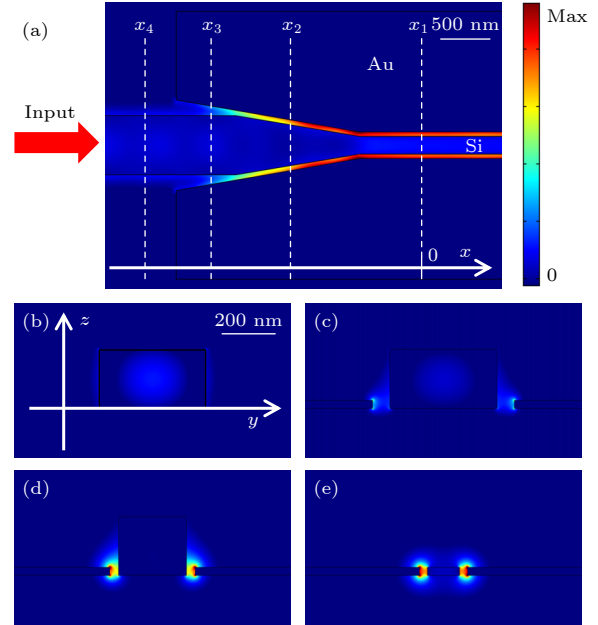


图 2 硅基混合表面等离子激元光场窄化器件 ( $W_{\text{Si}} = 120 \text{ nm}$ ,  $g = 30 \text{ nm}$ ,  $h_m = 30 \text{ nm}$ ) 的光场分布图 (a) 整体俯视图; (b)–(e) 对应于  $x_1 = 0 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $x_2 = -0.8 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $x_3 = -1.4 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $x_4 = -2 \text{ }\mu\text{m}$  的截面图

Fig. 2. Optical field distribution of the silicon hybrid plasmonic nanofocusing device ( $g = 30 \text{ nm}$ ,  $W_{\text{Si}} = 450 \text{ nm}$ ,  $h_m = 30 \text{ nm}$ ): (a) Overall top view; (b)–(e) cross-sectional view corresponding to  $x_1 = 0 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $x_2 = -0.8 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $x_3 = -1.4 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $x_4 = -2 \text{ }\mu\text{m}$ .

利用场增强因子  $\eta$  (field enhancement factor) 来反映聚焦效果, 其计算式为

$$\eta = \frac{\iint_{\text{HPW}} |E|^2 dS / \iint_{\text{HPW}} dS}{\iint_{\text{Si}} |E|^2 dS / \iint_{\text{Si}} dS}. \quad (1)$$

图 3 是仿真计算得到的不同间隙宽度  $g$  的硅基混合表面等离子激元光场窄化器件的场增强因子变化图. 一般来说, 由于表面等离子激元光场的局域性很高, 随着波导间隙  $g$  减小, 混合表面等离子激元波导的横截面积也逐渐减小, 相应地将光场局域在越小的范围内, 因此实现了更高的场增强. 中央细硅波导宽度  $W_{\text{Si}}$  越小, 场增强将越大, 曲线也随之升高.

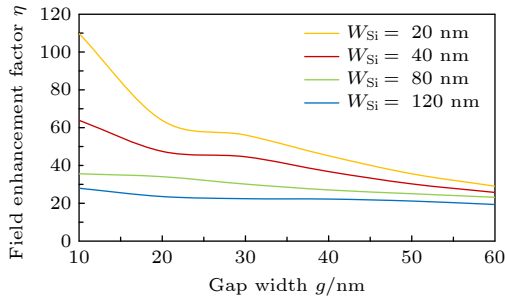


图3 仿真计算的不同波导间隙的硅基混合表面等离激元光场窄化器件的场增强因子

Fig. 3. Simulated field enhancement factor of the silicon hybrid plasmonic nanofocusing device with different gap width.

### 3 实验加工

在具有 220 nm 厚的顶层硅和 2 μm 厚的二氧化硅衬底层的绝缘体上硅的晶片上制作了样品器件. 结构图案由 Vistec EBPg-5200 型电子束曝光 (EBL) 系统在正胶上刻画形成. 首先, 通过第一次电子束曝光和 70 nm 浅刻蚀, 制作出光栅耦合器. 接着, 通过第二次电子束曝光和 220 nm 全刻蚀, 输入和输出的硅波导, 锥形耦合区以及中间聚焦区的细硅波导可以一起形成得到. 输入和输出的硅波导的宽度是 450 nm. 本文加工的中央聚焦区细硅波导的宽度  $W_{Si}$  有两种. 较细的为  $W_{Si} = 40$  nm, 以用来实现更显著的光场增强; 较宽的为  $W_{Si} = 120$  nm, 以降低加工的难度. 金属层是通过第 3 次电子束曝光, 金属沉积和 lift-off 剥离工艺制成的.

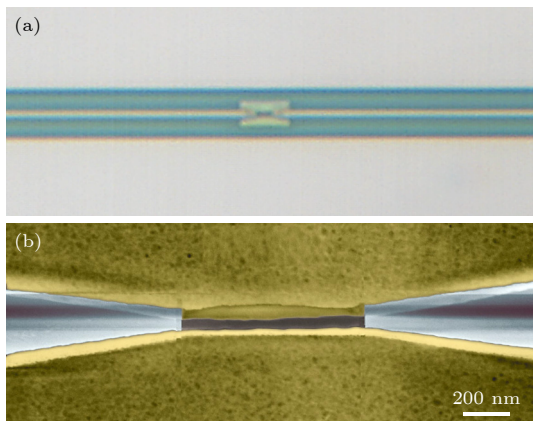


图4 实验加工的硅基混合表面等离激元光场窄化器件 ( $W_{Si} = 120$  nm,  $g = 30$  nm,  $h_m = 30$  nm) 的 (a) 光学显微镜图和 (b) SEM 图 (伪彩上色)

Fig. 4. (a) SEM image (false-colour) and (b) optical microscope image of the fabricated silicon hybrid plasmonic nanofocusing device ( $W_{Si} = 120$  nm,  $g = 30$  nm,  $h_m = 30$  nm).

金属层的厚度为 30 nm. 为了使中间聚焦区的细硅波导厚度与金属层一致, 利用了部分刻蚀. 最后, 在整个晶片沉积上了 2 μm 厚的二氧化硅保护层.

图4是电子束曝光系统制备的硅基混合表面等离激元光场窄化器件的整体光学显微镜图和中间聚焦区域的扫描电子显微镜 (SEM) 图. 可以看出, 由于结构的特征尺寸非常接近电子束曝光系统的分辨率极限, 因此间隙的边缘不够平整光滑, 这可能导致实际加工出的器件的性能与原始理论设计的之间存在较大差距. 为了尽可能地避免这个问题, 对于每个参数的器件都准备了 5—10 个相同的样品, 并进行多次测量得到平均的器件性能结果, 使结果更具有参考价值.

### 4 实验结果及分析

实验测得的硅基混合表面等离激元光场窄化器件的损耗谱线如图5(a)所示. 在 1510—1580 nm 的波段内, 中央细硅波导宽度  $W_{Si} = 40$  nm 的器件的损耗都高于  $W_{Si} = 120$  nm 的器件. 理论计算表明<sup>[9]</sup>, 在这个波长区间内损耗随波长的变化预计

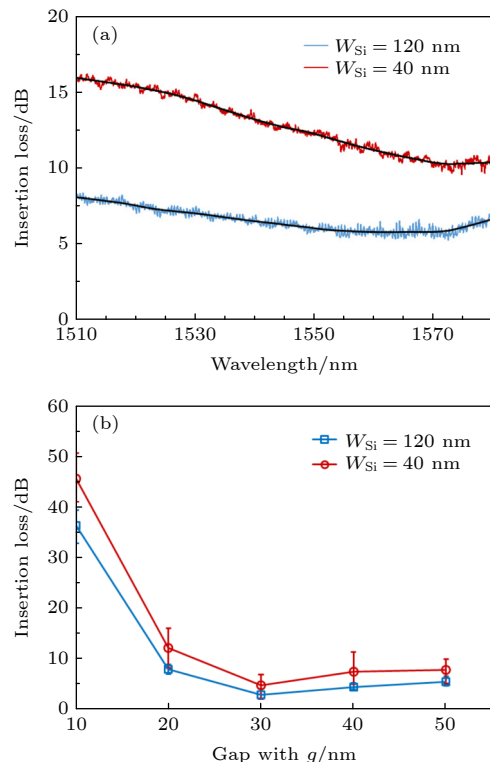


图5 (a) 实验加工的硅基混合表面等离激元光场窄化器件的损耗谱线; (b) 不同间隙宽度  $g$  对应的损耗

Fig. 5. (a) Experiment insertion loss spectra of the fabricated silicon hybrid plasmonic nanofocusing device; (b) gap width  $g$  dependence of insertion loss.

是上升的,但是对于实际实验样品,中央聚焦区域的缝隙的宽度不是均匀的,而本征模的相似度对缝隙宽度敏感度很高,所以导致偏离理论数据. 图 5(b) 是在波长为 1550 nm 时不同间隙宽度  $g$  对应的损耗. 对于  $W_{\text{Si}} = 120$  nm 的聚焦器件,当间隙宽度  $g = 30$  nm 左右时,光场窄化器件的损耗最小可达约 2.8 dB. 当间隙宽度  $g$  过小时,由于电子束曝光系统对准精度有限,在制备金属层时,很难与上一步骤的细硅波导高精度对准,导致在模式转换区和光场窄化区存在较大损耗,所以最终的损耗高于理论设计值. 而当间隙宽度  $g$  过大时,虽然结构的加工精度提高,但由于中间聚焦区域的光场限制能力减弱,导致光能量传输到聚焦区域之外,从而损耗提升. 对于  $W_{\text{Si}} = 40$  nm 的聚焦器件,其损耗均略大于  $W_{\text{Si}} = 120$  nm 的器件,在间隙宽度  $g = 30$  nm 时的损耗约为 4.6 dB,整体变化规律则与  $W_{\text{Si}} = 120$  nm 的器件基本一致.

对于实验制得的硅基混合表面等离子元光场窄化器件,采用截面平均光强之比的方法来计算其中的场增强因子:

$$\eta = \frac{P_{\text{HPW}}}{A_{\text{effHPW}}} \bigg/ \frac{P_{\text{in}}}{A_{\text{effSi}}}, \quad (2)$$

其中,  $P_{\text{in}}$  和  $P_{\text{HPW}}$  分别是输入硅波导和中央硅基混合表面等离子元波导中的光功率,  $A_{\text{effSi}}$  和  $A_{\text{effHPW}}$  分别是硅波导和中央硅基混合表面等离子元波导的有效模式面积<sup>[13]</sup>. 根据实验测试数据,硅基混合表面等离子元波导的中间位置的光功率可以写成:

$$P_{\text{HPW}} = P_{\text{in}} \times 10^{(IL/2)/10}, \quad (3)$$

则场增强因子为:

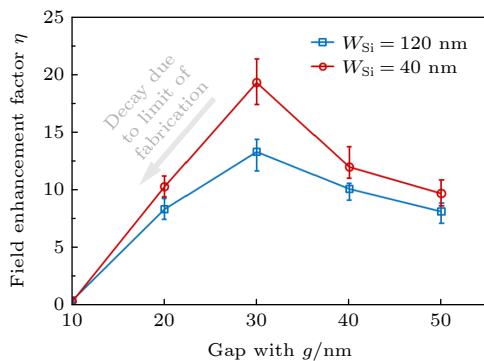


图 6 实验加工的不同波导间隙的硅基混合表面等离子元光场窄化器件的场增强因子

Fig. 6. Field enhancement factor of the fabricated silicon hybrid plasmonic nanofocusing device with different gap width.

$$\eta = (A_{\text{effSi}}/A_{\text{effHPW}}) \times 10^{(IL/2)/10}. \quad (4)$$

图 6 是根据样品的实验测试数据所得到的不同间隙宽度的硅基混合表面等离子元光场窄化器件的场增强因子. 对于  $W_{\text{Si}} = 40$  nm 的聚焦器件,当间隙宽度  $g = 30$  nm 时,可实现约 20 倍的场增强. 与图 3 中理论仿真计算得到的场增强因子相比,实际加工样品的场增强因子并不能实现随着波导间隙  $g$  的减小不断增大,这也就是由于实验条件所限,当间隙宽度  $g$  过小时,加工得到的混合表面等离子元波导损耗过高,不再能够实现聚焦效果.

## 5 总结和展望

本文设计、制备并表征了一种片上超小型硅基混合表面等离子元光场窄化器件. 该器件仅利用了长度约为 1.23  $\mu\text{m}$  的锥形渐变结构,将传统硅条形波导中的光场聚焦到硅基混合表面等离子元波导中,在 1550 nm 附近的近红外波段中的非谐振光场增强最高可达约 20 倍,器件的整体损耗约为 4.6 dB,模式面积约为  $(\lambda/n)^2/640$ ,减小为原来硅波导的 1/300 左右,有效地大幅度缩小器件尺寸. 同时这是基于硅基混合表面等离子元的光场窄化器件的首次报道. 对于中央细硅波导宽度  $W_{\text{Si}} = 120$  nm 的设计,损耗最小可达约 2.8 dB. 表面等离子元波导相比于硅波导,主要的劣势就是由于存在金属欧姆损耗,光场在其中的传输距离较短. 在本文工作中,采用了硅基混合表面等离子元波导的设计,这种设计在金属层和硅层之间插入了一层较低折射率的材料来起到类似于光场“容器”的作用,使得这种硅基混合表面等离子元波导比传统的金属表面等离子元波导的损耗小,而且仍然可以保证较高的光场局域性,这也是表面等离子元的优势. 受限于微纳加工的设备 and 工艺条件,实验测试结果低于理论预测,但通过不同参数器件和多次测量,获得了在电子束曝光下不同波导间隙光场窄化器件的平均性能,使结果具有较高的参考价值. 这种结构简单,性能优异的硅基混合表面等离子元光场窄化器件,对未来纳米尺度高精度光场操控、单分子级光电传感、非谐振高次谐波产生等应用提供了新的可行思路.

感谢比利时微电子研究中心 (Interuniversity Microelectronics Centre, IMEC) 邓清中博士对研究工作的指导,和给予的各方面的关照、帮助和支持!



## 参考文献

- [1] Zhou Z, Yin B, Deng Q, Li X, Cui J 2015 *Photonics Res.* **3** B28
- [2] Zhou Z, Yin B, Michel J 2015 *Light Sci. Appl.* **4** e358
- [3] Dai D, Bowers J E 2014 *Nanophotonics* **3** 283
- [4] Dai D, Bauders J, Bowers J E 2012 *Light Sci. Appl.* **1** e1
- [5] Zhou Z, Bai B, Liu L 2019 *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron* **25** 4600413
- [6] Bai B, Yang F, Zhou Z 2019 *Photonics Res.* **7** 289
- [7] Chen R, Bai B, Yang F, Zhou Z 2020 *Optics Lett.* **45** 803
- [8] Chen R, Bai B, Zhou Z 2020 *Photonics Res.* **8** 1197
- [9] Zhu K, Xu P, Sun P, Liu X, Li H, Zhou Z 2020 *An Ultra-compact Broadband TE-pass Nanofocusing Structure* (Beijing: Optical Society of America)
- [10] Zhu K, Xu P, Sun P, Liu X, Li H, Zhou Z 2020 *Low Loss, High Extinction Ratio Plasmonic Spot Size Converter* (Beijing: Optical Society of America)
- [11] Sun P F, Xu P F, Zhu K J, Zhou Z P 2021 *Photonics* **8** 482
- [12] Gramotnev D K, Bozhevolnyi S I 2014 *Nat. Photonics* **8** 13
- [13] Diaz F J, Li G, de Sterke C M, Kuhlmeij B T, Palomba S 2016 *J. Opt. Soc. Am. B* **33** 957
- [14] Diaz F J, Hatakeyama T, Rho J, Wang Y, O'Brien K, Zhang X, Martijn De Sterke C, Kuhlmeij B T, Palomba S 2016 *Optics Express* **24** 545
- [15] Kim S, Lim Y, Kim H, Park J, Lee B 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 13103
- [16] Fu Y, Zhou W, Lim L E N, Du C L, Luo X G 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 61124
- [17] Mote R G, Yu S F, Ng B K, Zhou W, Lau S P 2008 *Optics Express* **16** 9554
- [18] Shi H, Wang C, Du C, Luo X, Dong X, Gao H 2005 *Optics Express* **13** 6815
- [19] Min C, Wang P, Jiao X, Deng Y, Ming H 2008 *Appl. Phys. B* **90** 97
- [20] Stockman M I 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 137404
- [21] Babadjanyan A J, Margaryan N L, Nerkararyan K V 2000 *J. Appl. Phys.* **87** 3785
- [22] Issa N A, Guckenberger R 2007 *Plasmonics* **2** 31
- [23] Gramotnev D K, Vogel M W, Stockman M I 2008 *J. Appl. Phys.* **104** 34311
- [24] Veronis G, Fan S 2007 *Optics Express* **15** 1211
- [25] Chen L, Shakyia J, Lipson M 2006 *Optics Letters* **31** 2133
- [26] Ono M, Taniyama H, Xu H, Tsunekawa M, Kuramochi E, Nozaki K, Notomi M 2016 *Optica* **3** 999

# Experimental research on ultracompact silicon hybrid plasmonic nanofocusing device<sup>\*</sup>

Sun Peng-Fei<sup>1) #</sup>    Zhu Ke-Jian<sup>1) #</sup>    Xu Peng-Fei<sup>1)</sup>    Liu Xing-Peng<sup>2)</sup>

Sun Tang-You<sup>2)</sup>    Li Hai-Ou<sup>2)</sup>    Zhou Zhi-Ping<sup>1) 3) †</sup>

1) (*State Key Laboratory of Advanced Optical Communications Systems and Networks, School of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China*)

2) (*Guangxi Key Laboratory of Precision Navigation Technology and Application, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China*)

3) (*Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

( Received 18 December 2021; revised manuscript received 1 June 2022 )

## Abstract

Silicon-based optoelectronics, using the mature silicon-based microelectronic complementary metal oxide semiconductor (CMOS) manufacturing process, is a large-scale optoelectronic integration platform that has attracted much attention. Surface plasmonic devices have also received extensive attention in the past decades, and especially the silicon-based surface plasmonic nanofocusing devices have become a research hotspot. Typical nanofocusing structures include chirped surface gratings, plasmonic Fresnel zone plate, nano-slit array, tapered metal tips. However, there occur some inevitable problems in these devices, such as the fine structure being too complex to be fabricated and too large transmission loss of metal slot waveguide. In this work, an ultra-compact hybrid surface plasmon nanofocusing device is designed and fabricated by the silicon-based optoelectronic technology, and the nanofocusing performance of the device is also experimentally verified. The hybrid surface plasmon nanofocusing devices are fabricated on a silicon-on-insulator (SOI) wafer by electron beam lithography (EBL) system. The silicon wire waveguides, tapers and the thin silicon strips in the middle of nanofocusing regions are patterned in only one step EBL. The gold layer is formed by a deposition and lift-off process, and then a partially etching process is introduced to make the thickness of the middle thin silicon strips the same as that of the gold layer. With a 1.23- $\mu\text{m}$ -long tapered structure, our nanofocusing devices focus the light field of a silicon strip waveguide into a hybrid surface plasmon waveguide, making non-resonant optical field increase 20 times in the 1550 nm near-infrared band experimentally. The entire insertion loss is about 4.6 dB, and the mode area of the nanofocusing area is about  $(\lambda/n)^2/640$  which is over 300 times smaller than that of the input silicon waveguide. When the middle slot silicon waveguide width  $W_{\text{Si}} = 120$  nm, the insertion loss reaches a minimum value of 2.8 dB. In our design, we adopt the design of silicon-based hybrid plasmonic waveguides. In this design, a layer of material with low refractive index is inserted between the metal layer and the silicon layer to act as a “container” of light field, which makes this silicon-based hybrid plasmonic waveguides have less loss than the traditional metal plasmonic waveguides, and can still maintain high optical field localization. Such silicon-based hybrid surface plasmon nanofocusing devices with simple structures and excellent performances are promising alternatives for future applications in optical field manipulation, optical sensing, nonlinear optical devices, and optical phase-change storage.

**Keywords:** silicon-based optoelectronics, silicon hybrid plasmonics, on-chip nanofocusing, large-scale optoelectronic integration

**PACS:** 62.23.-c; 73.20.Mf; 85.60.-q; 42.82.-m;

**DOI:** 10.7498/aps.71.20212340

<sup>\*</sup> Project supported by National Key Research and Development Program of China (2019YFB2205200) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61775005, 62035001).

<sup>#</sup> These authors contributed equally.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [zjzhou@pku.edu.cn](mailto:zjzhou@pku.edu.cn)

## 超紧凑硅基混合表面等离激元光场窄化器件的实验研究

孙鹏斐 朱科建 许鹏飞 刘兴鹏 孙堂友 李海鸥 周治平

### Experimental research on ultracompact silicon hybrid plasmonic nanofocusing device

Sun Peng-Fei Zhu Ke-Jian Xu Peng-Fei Liu Xing-Peng Sun Tang-You Li Hai-Ou Zhou Zhi-Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 196201 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20212340

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212340>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 硅基光电子器件的辐射效应研究进展

Progress of radiation effects of silicon photonics devices

物理学报. 2019, 68(20): 204206 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190543>

#### 表面等离激元纳米聚焦研究进展

Research progress of plasmonic nanofocusing

物理学报. 2019, 68(14): 146201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190564>

#### 表面等离激元传播的调制

Modulation of propagating surface plasmons

物理学报. 2019, 68(14): 147302 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190802>

#### 拓扑表面等离激元

Topological surface plasmon polaritons

物理学报. 2019, 68(22): 224101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191085>

#### 基于塔姆激元-表面等离极化激元混合模式的单缝加凹槽纳米结构的增强透射

Enhanced optical transmission by exciting hybrid states of Tamm and surface plasmon polaritons in single slit with multi-pair groove nanostructure

物理学报. 2018, 67(10): 107104 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180117>

#### 表面等离激元光热效应研究进展

Research progress of surface plasmons mediated photothermal effects

物理学报. 2019, 68(14): 144401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190476>