

文章编号: 1000-7032(2023)12-2250-08

用于雪崩光电探测器响应度增强的超透镜设计与仿真

初光辉^{1,2}, 杨国皓², 刘天宏², 李晋平^{2*}, 常卫杰³, 范鑫焯¹, 佟存柱^{1,2}

(1. 聊城大学 物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

3. 福州大学 机械工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 超透镜除了可以实现传统透镜的聚焦和成像功能之外, 还可通过对超构单元的设计实现对光场偏振、波长和振幅等的多维度操控, 由于体积小、重量轻、成本低、易集成, 其在光电子器件领域中开始崭露头角, 已经成为当前的研究热点和重要方向。本文采用时域有限差分算法(Finite-difference time-domain, FDTD)设计并优化了基于InGaAs雪崩探测器原位集成的超透镜, 同时估算了超透镜的聚焦效率和透射率。仿真结果表明, 超透镜将入射光会聚至探测器的光敏区中, 透射率达到82.8%, 并且在目标焦距150 μm 、超透镜半径50 μm 时聚焦效率达到84.89%。为进一步提高透射率, 在超透镜表面增加抗反射层(AR Layer)。结果表明, 300 nm的SiO₂层透射率达到最大值86.6%, 250 nm的SiN层透射率达到最大值87.6%, 透射率比未增加AR层时分别增加了3.8%和4.8%。最后计算得出集成超透镜的探测器吸收区光场能量比未集成超透镜的探测器吸收区光场能量提升了250.96倍, 将极大提升探测器的响应度。本文提出了单片集成超透镜的雪崩探测器设计方案, 将雪崩探测器光敏区之外的入射光会聚至光敏区, 在不损失带宽前提下提升探测器的量子效率, 为高响应度、带宽雪崩探测器的设计提供了新思路。

关键词: 超透镜; 探测器; 聚焦效率; 量子效率

中图分类号: TN366

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20230221

Design and Simulation of Metalens for Enhanced Responsivity of Avalanche Photodetectors

CHU Guanghui^{1,2}, YANG Guohao², LIU Tianhong², LI Jinping^{2*},CHANG Weijie³, FAN Xinye¹, TONG Cunzhu^{1,2}

(1. School of Physics Science and Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China;

2. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

3. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

* Corresponding Author, E-mail: lijinpj@ciomp.ac.cn

Abstract: In addition to the focusing and imaging functions, Metalens can also manipulate light field polarization, wavelength, and amplitude through kinds of meta-units. Due to the small size, light weight, low cost and easy integration, Metalens has become a research hotspot and important trend in optoelectronic integration area. In this paper, finite-difference time-domain (FDTD) algorithm is used to design and optimize Metalens based on *in-situ* integration of InGaAs avalanche detectors, and the focusing efficiency and transmittance of the Metalens are calculated. The simulation results show that the Metalens converges incident light into the absorption layer of detector, the transmittance reaches 82.8%, and the focusing efficiency reaches 84.89% when the target focal length is 150 μm and the Metalens radius is 50 μm . To further increase the transmittance, an anti-reflection (AR) layer is added. The results

收稿日期: 2023-09-27; 修订日期: 2023-10-17

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2201000); 国家自然科学基金(6230030591)

Supported by National Key R&D Program of China (2018YFB2201000); National Natural Science Foundation of China (6230030591)

show that the maximum transmittance is 86.6% and 87.6% for 300 nm SiO_2 and 250 nm SiN . Compared with the Metalens without AR layer, the max transmittance increased by 3.8% and 4.8%, respectively. Finally, it is estimated that the energy of the light field in the absorption region integrated with Metalens is 250.96 times higher than that of the detector without Metalens, which can greatly improve the responsivity of detector. This paper proposes a monolithic integrated method for avalanche detector with Metalens, which can concentrate the energy outside the detection area into absorption area, improves the quantum efficiency of detector without bandwidth reduction. This will provide a new sight for high responsivity and high bandwidth detectors.

Key words: Metalens; detector; focusing efficiency; quantum efficiency

1 引言

随着科学技术的不断发展,光学领域在近年来取得了重大突破与进展。超透镜(Metalens)^[1]作为一种具有特殊光学性质的材料或结构,能够克服传统透镜的分辨极限,实现超分辨成像。在过去的几十年里,传统透镜的分辨能力受到了亚波长光的限制,无法实现超分辨成像。然而,随着纳米材料和纳米技术的迅猛发展,超透镜的概念得以提出,并在纳米尺度上实现了超分辨成像^[2]。与传统透镜相比,超透镜可以通过控制光的传播方式和波前形状,绕过光的衍射极限,实现远超传统透镜的分辨率,从而在光学成像、纳米光子学、生物医学等领域具有重要的应用前景^[3]。InGaAs 光电探测器具有高灵敏度、高速度以及高分辨率等优点,其在通信、医学成像以及卫星遥感等方面有着非常重要的地位。近年来,随着光纤通讯系统的迅猛发展,其对探测器性能的要求与日俱增,目前 InGaAs 雪崩探测器正在朝着高带宽、高响应度的方向快速发展^[4-6]。响应度是评估光电探测器性能的一个重要参数,通常用于表征光电探测器的光电转换效率,其定义为每单位入射光功率产生的光电流,单位是 A/W。雪崩光电探测器(APD)提升带宽的方法之一是减小光敏区的厚度,但较薄的光敏区会导致光子的吸收减少,进而降低器件的响应度^[7-9]。超透镜^[10-12]能够将光敏区以外的入射光会聚至光敏区中,增强光子吸收,从而在保持带宽不下降的前提下,提高响应度。

2018年,哈佛大学 Capasso 教授团队^[13]将超透镜原位集成于 GaSb 衬底,工作波长 3~5 μm ,采用该透镜的红外焦平面探测器阵列响应度较原来增强接近 3 倍。2020 年,中国科学院上海技术物理研究所周靖研究团队^[14]在传统 HgCdTe 红外探测器的衬底上刻蚀出不同直径的 CdZnTe 纳米柱

阵列,形成背面入射的全介质超透镜,实现原位集成,且该器件在 3~5 μm 范围内表现出良好色散公差,平均探测能力增强 3 倍。2022 年,武汉光电国家实验室赵彦立研究团队^[15]设计了基于 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 材料的超透镜,用于弥补 InGaAs/InP 雪崩光电二极管(APD)光敏尺寸减小导致的吸收效率损失。结果表明,与无特殊表面结构的 APD 阵列相比,在 1 550 nm 吸收效率提高了 4.28 倍,1 310 nm 波长吸收率提高了 2.61 倍;该结构偏振不敏感,信噪比性能好,使探测器在提高宽带光响应的同时暗电流可维持较小水平。本文 APD 为三台面背面入射结构,且衬底 InP 具有较高折射率,相较于其他材料,更加易于超透镜的集成。目前,关于 InGaAs APD 超透镜集成提升性能的报道相对较少,本文则针对高速 APD 响应度低的问题,在 APD 衬底上进行超透镜的原位集成,以期获得更好探测。

2 仿真

2.1 超透镜设计原理

超透镜^[16-19]是由亚波长尺度单元按特定空间排布所构成的器件。它能够对入射光的振幅、相位和偏振态等特性进行灵活有效的调控。通过对入射光相位的调控,可以任意控制入射光波前。超透镜有三种基本相位调控方法:共振相位调控、几何相位调控和传播相位调控。共振相位调控是通过改变共振频率来实现相位突变,共振频率调控由纳米级结构的几何形状控制。共振相位超表面通常由金、银、铝等金属材料制成,不可避免地引起欧姆损耗,难以实现高效率的光场调控。几何相位调控^[20]是通过调整具有相同尺寸微纳结构的旋转角度来实现光波的相位突变,从而对相位梯度或分布进行控制。传播相位调控是利用电磁波在传播过程中产生的光程差来对相位进行调

控,相位调控 φ 由光程差调节,其电磁波积累的传播相位可以表示为:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} d,$$

(1)

其中, λ 为工作波长, n_{eff} 为等效折射率, d 为材料厚度, φ 为波长 λ 的电磁波在折射率 n_{eff} 的介质中传播距离 d 之后的累积相位。传播相位调控是在微纳结构高度固定后,通过改变单元形状和尺寸来调节相位分布。该种超透镜通常由各向同性的微纳结构构成,其结构高度对称,具有偏振不敏感性^[21],本文的超透镜采用传播相位调控。

2.2 超透镜整体相位分布设计

本文集成超透镜的功能是将更大范围的入射光聚焦至APD吸收区中,从而增强光吸收。为达到聚焦效果,位置 (x,y) 处的微纳单元相位必须满足下式:

$$\phi(x,y) = \frac{2\pi}{\lambda} (f - \sqrt{f^2 + x^2 + y^2}),$$

(2)

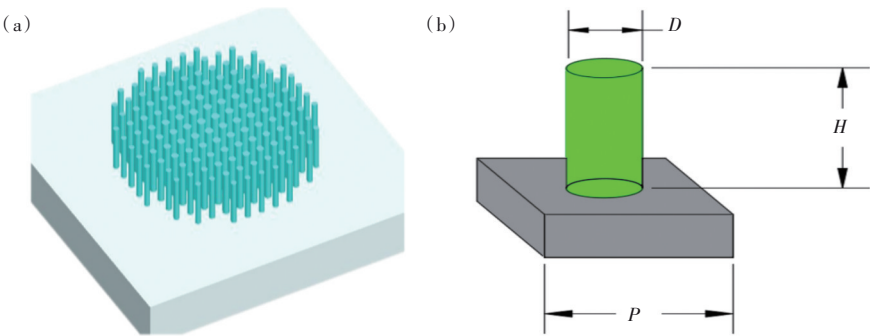


图1 (a)超透镜整体结构图;(b)单元结构示意图。

Fig.1 (a)Overall structure of the Metalens. (b)Unit structure diagram.

首先仿真了纳米柱单元周期介于500~900 nm、半径介于0.1~0.25 μm 、高度介于1.0~1.5

μm 的透射率,结果如图2所示。可以发现随着周期的增大,透射率逐渐减小,且只有周期为500

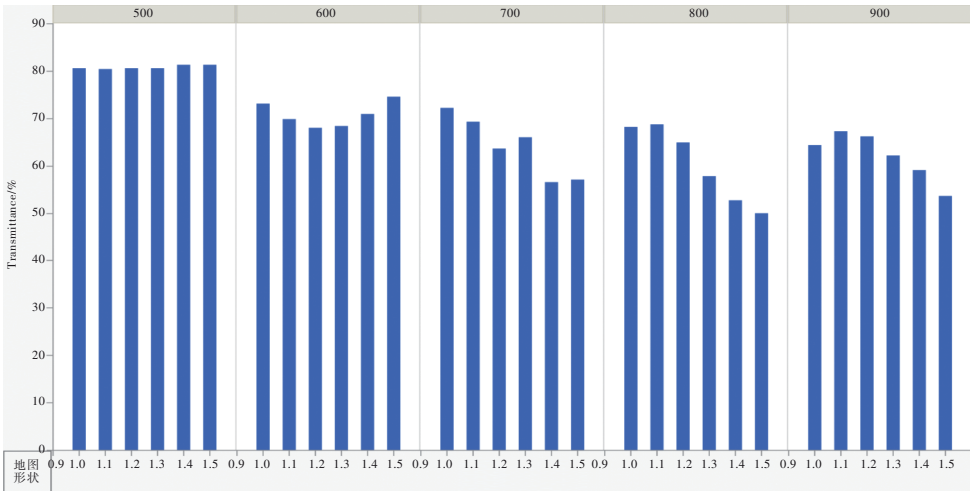


图2 不同周期不同高度下的透射率分布

Fig.2 Transmission rate distribution under different cycles

nm 时透射率才能全部保持在 80% 以上, 故选择 500 nm 作为纳米柱单元的周期。继续扫描纳米柱单元的半径和高度, 考虑到后期工艺制备的制造约束和鲁棒性, 这里扫描半径最小 0.1 μm , 最大 0.25 μm ; 纳米柱高度最小 1 μm , 最大 1.5 μm 。图 3 为纳米柱高度和半径的相位和透射率的 2D 图。可以发现在半径范围为 0.11 ~ 0.22 μm 的相

位变化相对于 1.3 μm 或更高的高度值变得大于 2π 。在这个高度的透射率很高(超过 0.8)。图 4 为在纳米柱单元高度 1.3 μm 时半径与相位和透射率的关系图, 可知在所选取的参数范围内, 相位能够完全覆盖 $0 \sim 2\pi$, 平均透射率达到 82.8%, 后续提及的透射率均为平均透射率, 同时纳米柱单元的深宽比最大 5.9, 最小 2.95。

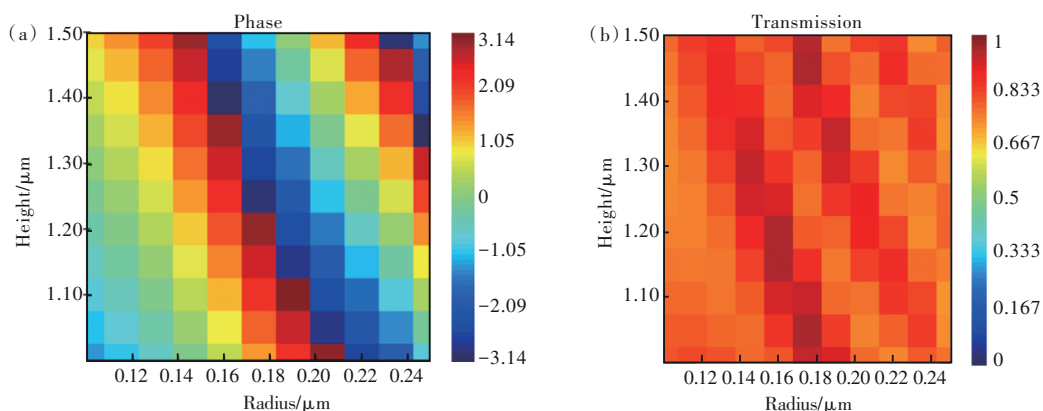


图 3 相位分布和透射率仿真图

Fig. 3 Phase distribution and transmittance simulation graph

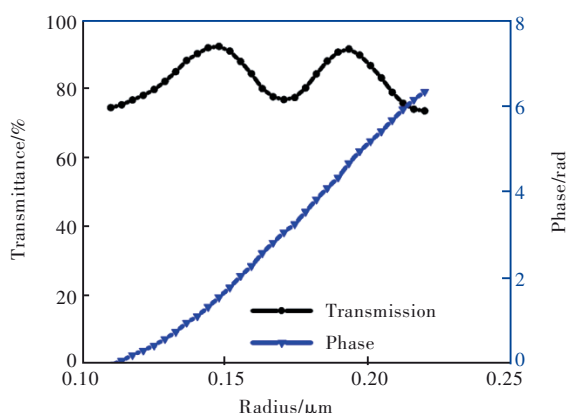


图 4 相位分布和透射率分布折线图

Fig. 4 Phase distribution and transmittance simulation graph

2.4 超透镜整体设计与仿真

根据设计好的波前相位分布, 参照目标相位分布和 FDTD 仿真的单元结构相位与尺寸变化关系, 利用插值或人工建库等方法构建超透镜。本仿真中, APD 衬底与吸收区的垂直距离为 150 μm , 为将入射光聚焦至吸收区中, 超透镜目标焦距设为 150 μm , 超透镜半径为 30 μm , 光源类型为平面波, 仿真边界条件 Z 方向为 PML, X/Y 方向边界条件通常为 PML, 超透镜仿真采用三维建模仿真。图 5 为超透镜聚焦原理示意图。

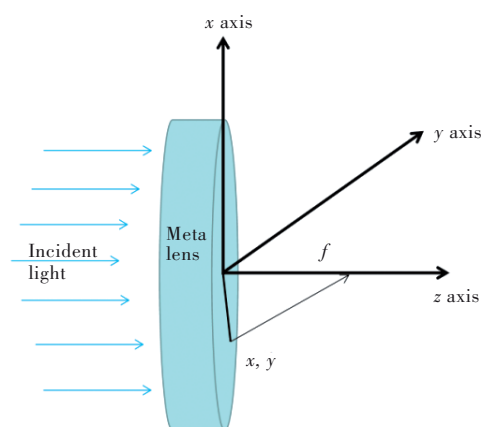


图 5 超透镜聚焦原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of Metalens focusing principle

3 仿真结果分析

3.1 增加抗反射层

光照射到光学器件表面时会发生反射, 这种反射会导致光吸收的损失, 抗反射层 (Anti-reflection layer) 简称 AR 层, 是一种应用于光学器件表面的薄膜涂层, 旨在减少反射并提高透射率。上节仿真的纳米柱单元透射率为 82.8%, 本节则对增加 AR 层的纳米柱单元进行仿真, 以确认其对透射率分布的影响, 这里选用 SiO_2 或 SiN , 图 6 为增加 AR 层的单元结构图。

选取 AR 层厚度范围为 50 ~ 400 nm, 其对应

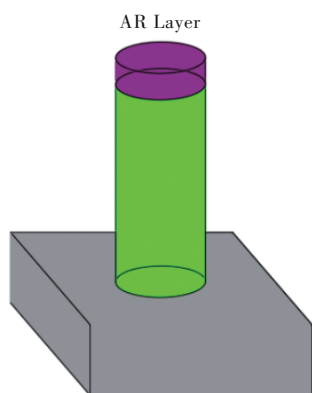


图 6 增加 AR 层的纳米柱单元示意图

Fig.6 Schematic diagram of the nano-pillar unit with AR layer

的透射率分布如图 7 所示。可以发现,当 SiO_2 厚度为 300 nm 时,透射率达到最大值 86.6%;当 SiN 厚度为 250 nm 时,透射率达到最大值 87.6%。图 8 为未增加 AR 层、增加 AR 层(SiO_2)和增加 AR 层(SiN)的透射率分布曲线。可以发现与无 AR 层的单元结构相比,加入 SiO_2 的单元透射率提升了 3.8%,加入 SiN 的单元透射率提升了 4.8%。虽然加入 AR 层能够显著提升透射率,但制备工艺更加复杂。

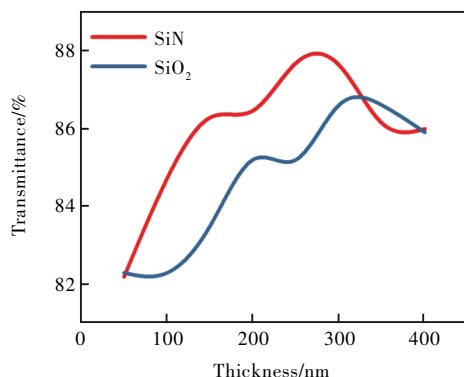


图 7 不同厚度下的 AR 层对应的透射率

Fig.7 Transmittance of AR layer under different thicknesses

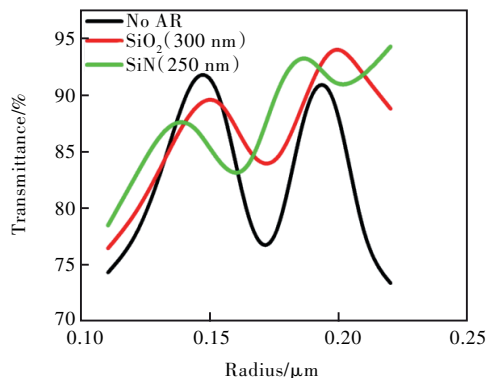
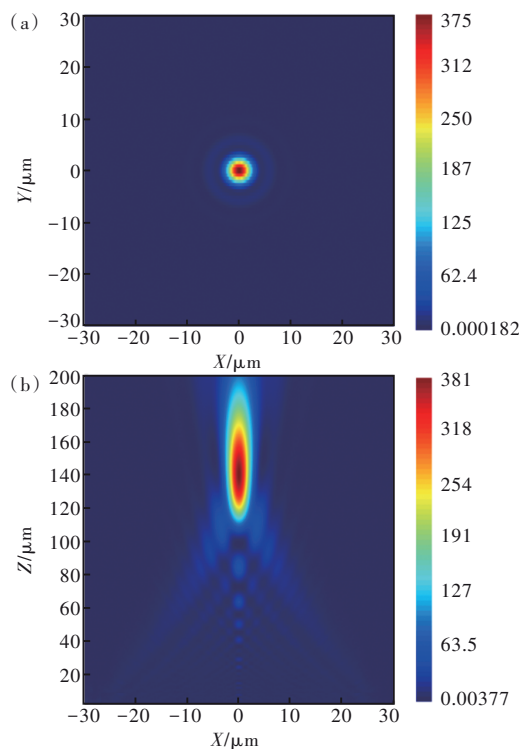


图 8 不同单元半径下的透射率曲线

Fig.8 Transmittance under different unit

3.2 超透镜的聚焦效率与焦距

为表征超透镜在 APD 吸收区聚焦的性能,这里采用聚焦效率的概念,聚焦效率的定义为:焦平面以焦点为中心、3 倍半高宽(Full width at half maximum, FWHM)为直径区域内能量与输入超透镜的总能量之比^[23-24]。图 9(a)为 X - Y 方向焦平面远场图,使用电场积分计算聚焦效率为 85.49%,图 9(b)为 X - Z 方向焦平面远场图。

图 9 超透镜远场分布图。(a) X - Y 方向远场仿真图;(b) X - Z 方向远场仿真图。Fig.9 Far-field distribution diagram of Metalens. (a) X - Y direction far-field simulation. (b) X - Z direction far-field simulation.

接着对超透镜焦距进行分析,图 10(a)为 X - Y 方向远场分布曲线,半高全宽(FWHM)3.82 μm 。图 10(b)为 Z 轴远场分布,最强点为焦点,焦距为 141.4 μm ,与目标焦距 150 μm 相差 8.6 μm ,偏差为 5.7%,可能由相位采样间隔及相邻超构原子的临近耦合效应造成。

为了验证上述分析,继续仿真了超透镜半径为 30~50 μm 的 Z 轴远场分布。如图 11 所示,随着超透镜半径的增加,焦点的光强越强,焦距也越大。对应的焦距和聚焦效率分布如图 12 所示,可知当超透镜半径为 50 μm 时,聚焦效率达到 84.89%。由图 13(a)可知,当超透镜半径为 50 μm 时,焦距为 148.8 μm ,偏差为 0.8%,非常接近目标焦距。

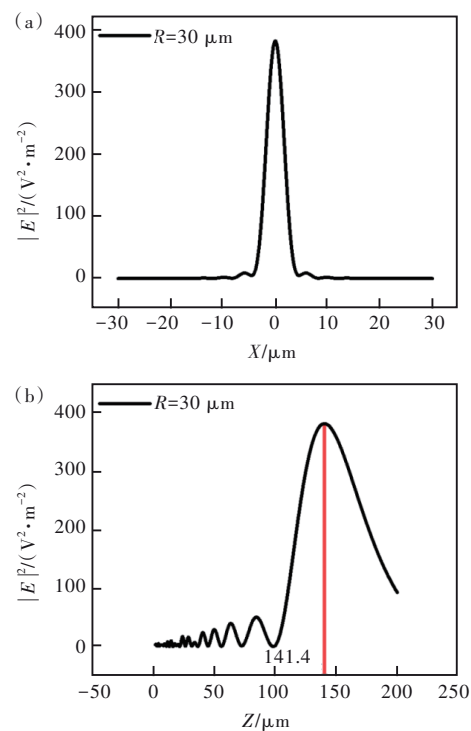


图 10 超透镜远场分布曲线。(a)X方向;(b)Z方向。
Fig.10 Far-field distribution curve of Metalens. (a)X direction. (b)Z direction.

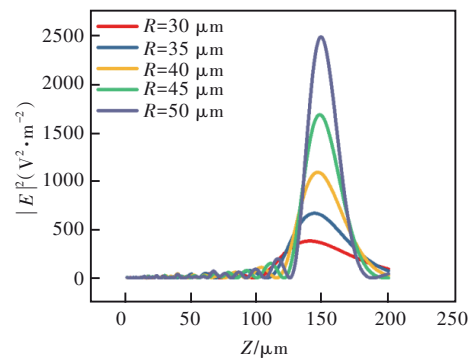


图 11 不同半径下Z方向远场分布曲线
Fig.11 Far-field distribution in the Z direction at different radius

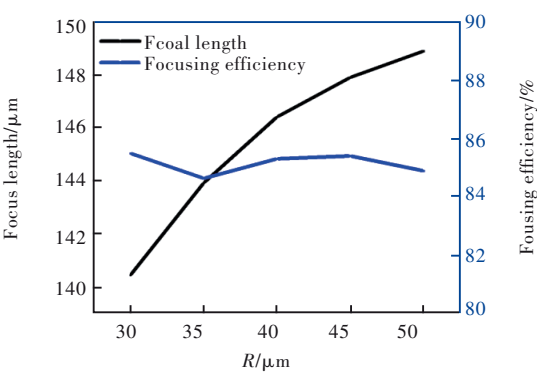


图 12 焦距与聚焦效率
Fig.12 Focal length and focusing efficiency

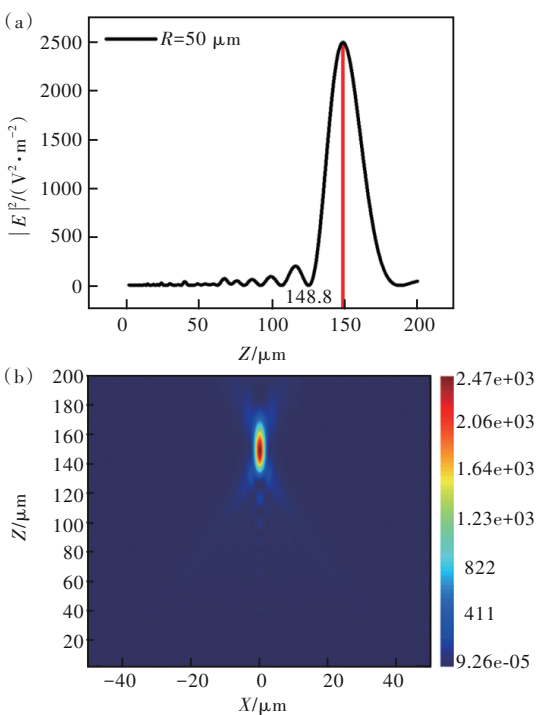


图 13 半径 50 μm 超透镜 Z 方向焦平面。(a)分布曲线;
(b)仿真 2D 图。
Fig.13 Far-field distribution in the Z direction with radius of 50 μm. (a)Distribution curve. (b)Simulated two-dimensional graph.

3.3 集成超透镜与未集成超透镜的光敏区域能量比值计算

为探究超透镜的聚焦能力,对聚焦和未聚焦时探测器吸收区的能量进行对比。如图 14 所示,这里选取超透镜半径为 50 μm(即入射平面光的半径),APD 第一台面半径为 10 μm,传输距离为 150 μm。

在光源设置中,集成超透镜和未集成超透镜

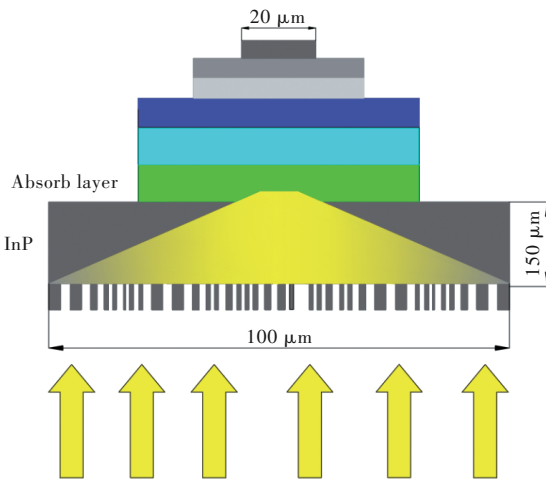


图 14 超透镜聚焦光路示意图
Fig.14 Focusing light path diagram of Metalens

时的输入光场条件一致。在探测器上设置功率监视器计算能量分布。集成超透镜和未集成超透镜时吸收区的光场分布如图 15 所示。计算吸收区能量相对于输入光源的能量占比的表达式如下:

$$\eta = P_{\text{absorb}} / P_{\text{total}}, \quad (3)$$

其中 η 表示吸收区能量相对于输入光源的能量占

比, P_{absorb} 表示吸收区的总能量, P_{total} 表示输入光源区域的总能量。计算得到集成超透镜的 $\eta = 78.55\%$, 未集成超透镜的 $\eta = 0.313\%$, 即两种情况下雪崩探测器吸收区上分别接收了 78.55% 和 0.313% 的输入光源的能量。将两者作比, 得到集成超透镜时的探测器吸收区能量是未集成时探测器吸收区能量的 250.96 倍。

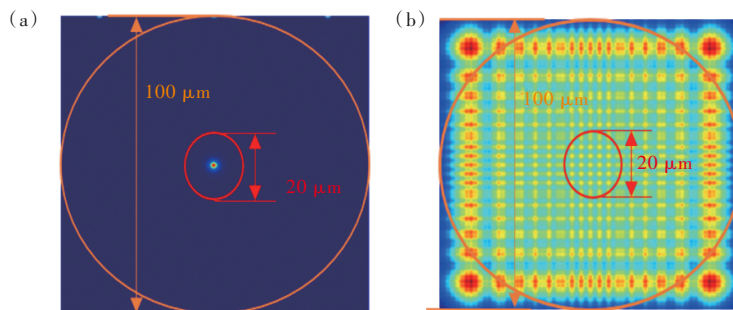


图 15 探测器平面监视器所获得的远场分布图, 橙色圆圈表示输入光源区域, 红色圆圈表示探测器的有效吸收区域。

(a) 集成超透镜时的光强分布图; (b) 未集成超透镜时的光强分布图。

Fig.15 Far field distribution obtained by the detector plane monitor, with orange circles representing the input light source area and red circles representing the effective absorption area of the detector. (a) Distribution of light intensity with Metalens. (b) Distribution of light intensity without Metalens.

4 总 结

针对光纤通讯系统对 InGaAs APD 高响应度的需求, 本文在探测器衬底上原位集成了半径 50 μm 的超透镜, 将光敏区域之外的能量会聚到光敏区, 在不损失带宽的前提下提升了光电探测器的量子效率。纳米柱单元周期选择 500 nm, 高度为 1.3 μm , 半径选取 0.11 ~ 0.22 μm 。仿真结果表明, 当超透镜半径为 50 μm 时, 仿真焦距为 148.8 μm , 与目标焦距基本相符, 同时聚焦效率达到 84.89%, 透射率为 82.8%。加入 AR 层来进一步提高透射率。仿真结果表明, 当覆盖 300 nm 厚的 SiO_2 , 透射率达到 86.6%; 当覆

盖 250 nm 厚的 SiN, 透射率达到 87.6%; 比未增加 AR 层的超透镜透射率分别增加了 3.8% 和 4.8%。最后计算得出集成超透镜的 APD 的吸收区光场能量比未集成时提升了 250.96 倍。本文提出的单片集成超透镜的雪崩探测器设计方案, 将光电探测器光敏区之外的能量会聚至光敏区, 在不损失带宽前提下提升探测器的量子效率, 为高响应度、带宽雪崩探测器设计提供了新思路。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址: <http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20230221>.

参 考 文 献:

- [1] 程强. 红外超透镜设计与性能研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
CHENG Q. *Research on the Design and Performance of Infrared Metalenses* [D]. Xi'an: Xidian University, 2020. (in Chinese)
- [2] YU N F, FEDERICO C. Flat optics with designer metasurfaces [J]. *Nat. Mater.*, 2014, 13(2): 139-150.
- [3] LI T, CHEN C, XIAO X, et al. Revolutionary meta-imaging: from superlens to metalens [J]. *J. Photonics Insights.*, 2023, 2: R01 - R01.
- [4] NADA M, YOSHIMATSU T, NAKAJIMA F, et al. A 42-GHz bandwidth avalanche photodiodes based on III-V compounds for 106-Gbit/s PAM4 applications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2019, 37(2): 260-265.

- [5] LI Y, YUAN W F, LI K, *et al.* InGaAs/InAlAs SAGCMCT avalanche photodiode with high linearity and wide dynamic range [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2022, 20(2): 022503.
- [6] ZHAO Y L, TU J J, LI Q, *et al.* Monolithic integrated InGaAs/InAlAs WDM-APDs with partially depleted absorption region and evanescently coupled waveguide structure [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2020, 38(16): 4385-4396.
- [7] WANG H, YANG X H, WANG R, *et al.* Low dark current and high gain-bandwidth product of avalanche photodiodes: optimization and realization [J]. *Opt. Express*, 2020, 28(11): 16211-16229.
- [8] NADA M, YAMADA Y, MATSUZAKI H. Responsivity-bandwidth limit of avalanche photodiodes: toward future Ethernet systems [J]. *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.*, 2018, 24(2): 3800811.
- [9] JONES A H, MARCH S D, DADEY A A, *et al.* AlInAsSb separate absorption, charge, and multiplication avalanche photodiodes for mid-infrared detection [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2022, 58(4): 4500306.
- [10] 唐剑雄, 龚岩栋, 庞恺. 二维超构表面: 超透镜应用及研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(21): 2100004.
TANG J X, GONG Y D, PANG K. Two-dimensional metasurfaces: application and research progress of metalenses [J]. *Laser Optoelectron. Progress*, 2023, 60(21): 2100004. (in Chinese)
- [11] KIM J W, KIM Y J. Design of a polarization insensitive achromatic metalens with a high NA and uniform focusing efficiency based on a double layer structure of silicon and germanium [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2022, 39(4): 1216-1221.
- [12] LI Z H, CHEN Z Q, OULTON R F, *et al.* Solid immersion metalens for directional single molecule emission with high collection efficiency [J]. *arXiv: 2201.04120*, 2022.
- [13] ZHANG S Y, SOIBEL A, KEO S A, *et al.* Solid-immersion metalenses for infrared focal plane arrays [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2018, 113(11): 111104.
- [14] LI F Z, DENG J, ZHOU J, *et al.* HgCdTe mid-Infrared photo response enhanced by monolithically integrated meta-lenses [J]. *Sci. Rep.*, 2020, 10(1): 6372.
- [15] ZHANG H W, ZHAO Y L, LI Q, *et al.* Metalens array for InGaAs/InP avalanche photodiodes at optical-communication wavelengths [J]. *Opt. Commun.*, 2022, 514: 128159.
- [16] SHRESTHA S, OVERVIG A C, LU M, *et al.* Broadband achromatic dielectric metalenses [J]. *Light Sci. Appl.*, 2018, 7: 85.
- [17] JIANG L, CHEN C, WANG Y Q, *et al.* High-efficiency all-dielectric metalenses for multi-focus with arbitrary polarization [J]. *Results Phys.*, 2021, 23: 103981.
- [18] KAMALI S M, ARBABI E, ARBABI A, *et al.* A review of dielectric optical metasurfaces for wavefront control [J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(6): 2192-8614.
- [19] MENG Y, LYU Y, YU Z Y, *et al.* Visible-light metalens far-field nanofocusing effects with active tuning of focus based on MIM subwavelength structures used in an integrated imaging array [J]. *Appl. Opt.*, 2022, 61(5): B339-B344.
- [20] CHEN W T, ZHU A Y, KHORASANINEJAD M, *et al.* Immersion meta-lenses at visible wavelengths for nanoscale imaging [J]. *Nano Lett.*, 2017, 17(15): 3188-3194.
- [21] YANG H, LI G H, CAO G T, *et al.* Polarization-independent metalens constructed of antennas without rotational invariance [J]. *Opt. Lett.*, 2017, 42(19): 3996-3999.
- [22] HOU H W, ZHANG Y Y, LUO Z D, *et al.* Design and fabrication of monolithically integrated metalens for higher effective fill factor in long-wave infrared detectors [J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2022, 150: 106849.
- [23] 王杰, 黎相孟, 吉卓琪, 等. 面向近红外成像超透镜的设计与仿真 [J]. *激光与红外*, 2023, 53(1): 114-119.
WANG J, LI X M, JI Z Q, *et al.* Design and simulation of metalens for the NIR imaging [J]. *Laser Infrared*, 2023, 53(1): 114-119. (in Chinese)
- [24] KHORASANINEJAD M, ZHU A Y, ROQUES-CARMES C, *et al.* Polarization-insensitive metalenses at visible wavelengths [J]. *Nano Lett.*, 2016, 16(11): 7229-7234.



初光辉(1988-),男,山东潍坊人,硕士研究生,2021年于济南大学获得学士学位,主要从事高速雪崩光电探测器的研究。

E-mail: 178656762@qq.com



李晋平(1989-),男,山西朔州人,博士,副研究员,博士生导师,2017年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事高速光电探测器等研究。

E-mail: lijinpj@ciomp.ac.cn