

基于超构透镜结构的偏振集成红外探测器 与成像研究

黄皓瑾^{1,3}, 王琰³, 周建^{2*}, 王芳芳², 张凤^{1,2}, 应翔霄², 汤受海², 刘云猛⁴,
陈建新^{2,3}, 周易^{2,3*}

- (1. 上海理工大学理学院, 上海 200093;
2. 中国科学院上海技术物理研究所 红外探测全国重点实验室, 上海 200083;
3. 国科大杭州高等研究院 物理与光电工程学院, 浙江 杭州 310024;
4. 中国科学院上海技术物理研究所 红外探测与成像技术重点实验室, 上海 200083)

摘要: 由于分焦平面偏振集成红外探测器的像元尺寸与其工作波长接近, 衍射效应致使相邻像元不同偏振光的串扰严重, 单一传统的金属光栅结构无法实现高消光比偏振探测芯片。本文提出并设计了超表面透镜的偏振集成红外探测器结构, 研究了超构透镜对不同波长红外光波的光场汇聚能力, 制备了超构透镜及亚微米光栅结构阵列并与红外焦平面进行了集成, 器件偏振消光比超过 15:1, 选取了动态和变温物体进行了偏振成像实验, 展示了分焦平面偏振集成器件的成像优势。

关键词: 超构透镜; 红外焦平面; 偏振光场汇聚; 偏振成像

中图分类号: TN215

文献标识码: A

Polarization integrated infrared detector and imaging based on metalens structure

HUANG Hao-Jin^{1,3}, WANG Long³, ZHOU Jian^{2*}, WANG Fang-Fang², ZHANG Feng^{1,2},
YING Xiang-Xiao², TANG Shou-Hai², LIU Yun-Meng⁴, CHEN Jian-Xin^{2,3}, ZHOU Yi^{2,3*}

- (1. School of Science, Shanghai University of Technology, Shanghai 200093, China;
2. National Key Laboratory of Infrared Detection Technologies, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
3. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Hangzhou Institute of Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China;
4. Key Laboratory of Infrared System Detection and Imaging Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Due to the close pixel size and working wavelength of the focal plane polarization integrated infrared detector, diffraction effects cause severe crosstalk between adjacent pixels with different polarized light. A single traditional metal grating structure cannot achieve high extinction ratio polarization detection chips. This article proposes and de-

收稿日期: 2025-01-15, 修回日期: 2025-02-25

Received date: 2025-01-15, Revised date: 2025-02-25

基金项目: 国家自然科学基金(U24A20294, 62335017, 62222412, 62104236, 62104237); 国家重点研发计划(2022YFB3404405); 中国科学院先导项目(XDB0980000); 中国科学院青年创新促进会项目(Y202057); 上海市扬帆计划项目(22YF1455800, 21YF1455000); 上海市自然科学基金项目(23ZR1473500, 23ZR1473100); 中国科学院上海技术物理研究所创新专项(CX-513, CX-512, CX-508, CX-567); 中国博士后科学基金资助项目(2024M750687); 红外探测技术国家重点实验室基金(IRDT-23-01)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (NSFC) (U24A20294, 62335017, 62222412, 62104236, 62104237), the National Key Research and Development Program of China (2022YFB3404405), the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDB0980000), the Youth Innovation Promotion Association, CAS (Y202057), the Shanghai Sailing Program (22YF1455800, 21YF1455000); the Shanghai Natural Science Foundation Program (23ZR1473500, 23ZR1473100); the Special Innovation Program of Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences (CX-513, CX-512, CX-508, CX-567); the China Postdoctoral Science Foundation (2024M750687); the National Key Laboratory of Infrared Detection Technologies (IRDT-23-01)

作者简介 (Biography): 黄皓瑾 (1998—), 女, 广西玉林人, 硕士研究生, 主要研究领域为超表面偏振集成红外探测器. E-mail: haojin_h@163.com

*通讯作者 (Corresponding author): E-mail: zhouyi@mail. sip. ac. cn; zhoujian@mail. sip. ac. cn

signs a metasurface lens stacked polarization integrated infrared detector structure, studies the optical field convergence ability of metalens for different wavelengths of infrared light waves, prepares metastructural lenses and submicron grating structures, and integrates them with infrared focal planes. The polarization extinction ratio of the device exceeds 15:1, and dynamic and variable temperature objects are selected for polarization imaging experiments, demonstrating the imaging advantages of polarization integrated devices with focal planes.

Key words: metalens, infrared focal plane, polarization field convergence, polarization imaging

引言

红外探测器具有全天时、抗干扰性强等独特优势,在军民领域均有不可替代的作用。然而,随着红外对抗、红外隐身等技术的快速进步,以提高强度为主要特征的红外探测技术已经不能满足复杂多变的背景环境中目标的探测需求。红外焦平面探测器正在向具有更多光谱、偏振信息以及相位等光波多维信息的选择与获取能力迈进,并朝着小尺寸(Size)、轻型化(Weight)、低功耗(Power)、高性能(Performance)和低成本(Price)的SWaP3方向发展^[1]。分焦平面像元级偏振集成探测芯片是当前多维感知芯片的主要研制方向之一。2006年,美国桑迪亚国家实验室(SNL)Kemme等人研究了亚波长金属偏振片的近场效应和衍射效应对探测器串音的影响,发现串音效果与光敏元尺寸和距离紧密相关^[2]。同年,美国空军研究实验室研制了HgCdTe长波红外分焦平面偏振集成芯片^[3],长波偏振片的消光比大于200:1,并通过钢柱与探测器互联,且四个偏振方向的线栅与光敏元一一对应,集成后覆盖0°、45°、90°、135°偏振方向消光比分别为9.5:1、8.7:1、6.3:1、9.2:1。2008年,美国雷神公司Malone等人把四个方向的亚波长金属偏振光栅单片集成到中波红外的InSb探测器和长波红外HgCdTe探测器焦平面上。集成前偏振光栅的消光比达到100以上,而集成到焦平面后由于串音的影响致使消光比低于10^[4]。2014年,东京大学Ikeda等人将独立制备好的金属铝光栅与InGaAs探测器黏贴,其中金属线栅含有两个垂直偏振方向,其周期为144 nm,厚度为185 nm,占空比为0.5,密封于两片玻璃片之间,偏振光透过率约为70%^[5]。Forrai等人研究了规模为2 k×2 k、像元中心距为20 μm的InSb中波红外偏振集成探测芯片,其偏振消光比约为10:1^[6]。2022年,笔者研究团队设计并制备了长波红外偏振集成芯片,偏振消光比超过了40:1^[7],并于2023年进行了海面舰船成像验证^[8]。2023年,美国亚利桑那州立大学设计了双层光栅滤光结构片上偏振集成

CMOS传感器,实现了可见光波段全偏振信息同时探测^[9]。综上,对偏振信息选择的微纳结构主要为金属光栅阵列,然而,红外波段的衍射效应致使面阵探测器相邻像元不同偏振光的串扰严重,单一传统的光栅结构无法实现高消光比偏振探测芯片。

超构透镜是平面光学元件,具有结构紧凑、体积小、易集成等优点,可以高自由度地设计超构透镜结构。超构透镜的单元结构种类有多样的选择,如有圆柱型、椭圆型、长方柱、正方柱、多边形柱、梯形柱、环柱等状型,可以通过亚波长单元结构组合调控光的传播相位。2011年起,哈佛大学Capasso团队开始引领超透镜的科研发展方向^[10],于2014年发表了基于纳米单元结构的超构表面透镜设计^[11],其后又陆续研究并发表了在可见、红外光谱范围内工作的光学超透镜^[12,13]。基于此,本文提出了一种像元级超表面透镜集成分焦平面光栅的偏振探测器结构,利用超构透镜优秀的聚光能力,入射光线经过超构透镜结构的汇聚光线通过金属线栅偏振光选择后到达光敏元,降低不同偏振方向像元之间的串扰,提高探测器的消光比,以期用于偏振成像系统,满足高质量偏振成像需求。

1 结构设计建模与仿真

图1(a)和1(b)分别为超构透镜集成分焦平面偏振探测器的3D结构和截面示意图,分焦平面偏振探测器从上到下的结构分别为像元级超构透镜、金属光栅、光敏元及读出电路等。本文选用圆柱型硅柱排列在正方格硅衬底上作为构建超透镜的元胞。为了红外光的抑制高阶衍射效应,超构透镜的元胞周期也应该小于整个波段的最短波长的一半。本文采用有限元(FEM)方法,通过选取不同的元胞周期 p 、硅柱高度 h_1 、硅柱半径 r_n 及有效折射率 n 构筑超构透镜实现对中红外波段入射光的波前调控。偏振滤光结构采用0°、45°、90°和135°偏振方向的金属Al光栅阵列结构。通过光栅线宽 w 、沟道槽宽 s 、高度 h_2 等参数调节实现像元空间内对不同偏振方向光的选择性透过。

设定金属Al光栅的周期为450 nm、光栅线宽为

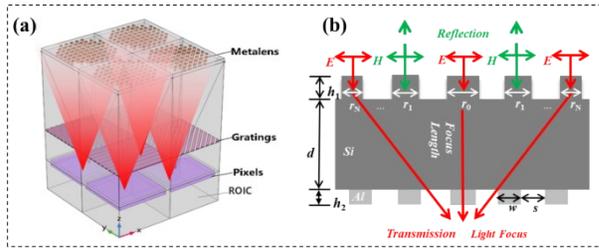


图1 超表面透镜集成分焦平面偏振探测器示意图:(a)3D图;(b)x-z截面图

Fig. 1 Schematic diagram of a metasurface lens integrated focal plane polarization detector: (a) 3D view; (b) x-z cross-sectional view

225 nm,图2(a~c)为3.7~4.8 μm 波长的TM、TE光透射率、透射偏振消光比与光栅高度 h_1 、 h_2 、 h_3 的关系。可以看到,光栅的高度越大,TM光的透射率越大,而TE光的透射情况与TM光相反;相应地,偏振消光比随着光栅高度的增大而增大,当光栅高度为0.3 μm 时,偏振消光比可以达到10 000以上。图2(d)为4 μm 波长的TM、TE偏振光入射0.2 μm 、0.3 μm 、0.4 μm 光栅高度后的光场分布。考虑到偏振集成探测器中的光栅阵列需要与探测器的像元一一对应,因此不同方向的光栅的空间分布需要与像元大小匹配。本文选取30 μm 中心距作为单个像元/单

个偏振光栅的排布的大小。由于探测器像元大小与红外入射光波长尺度接近,产生的衍射效应会导致不同偏振光的像元间串扰,降低器件的偏振消光比。图2(e)为4 μm 波长的TM偏振光入射30 μm 中心距内 90° 、 0° 排布方向的光场和能流分布。可以看出, 90° 方向排布光栅可以允许TM光透射,而 0° 方向排布光栅将绝大多数TM光反射。考虑到偏振集成探测器中的衬底或空气隔离层等,会导致偏振光栅与光敏元间存在一定的距离,因此需要考虑不同偏振光通过不同排布方向光栅后的传播及空间分布。图2(f)为TM光入射后光栅后方10 μm 、20 μm 、30 μm 、40 μm 和50 μm 距离时光强大小和能流分布。可以看到,随着传播距离的增加,TM偏振光的光场能量分布在 0° 光栅正后方的比例逐渐增大,导致对应的偏振消光比逐渐降低,归因于中波红外光入射到中心距为30 μm 的不同偏振方向像元时,会产生高阶衍射,导致其衍射光斑横向尺寸随距离增大,高阶能量逸出探测区域的比例越高。当光栅后方距离为50 μm 时,偏振消光比仅为7:1左右,这也是光栅集成分焦平面偏振探测器消光比低的核心原因之一。

本文采用超构透镜结构将入射光汇聚抑制光

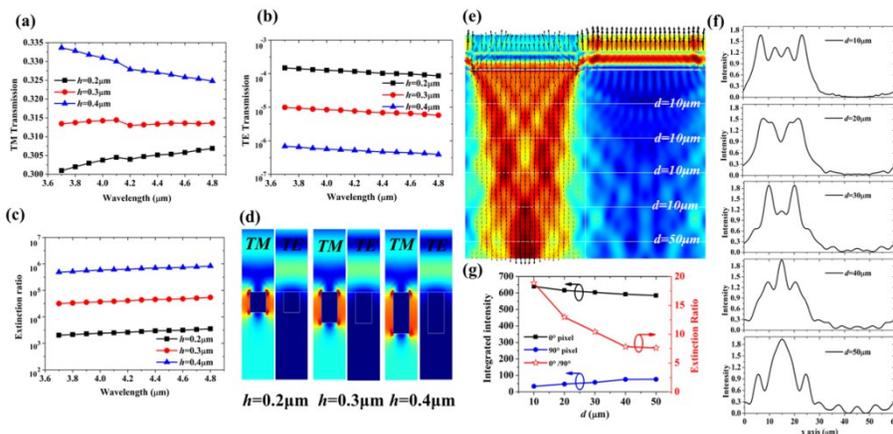


图2 偏振光栅参数优化与偏振像元光场串扰分析:(a)TM光透射率与光栅高度的关系;(b)TE光透射率与光栅高度的关系;(c)透射偏振消光比与光栅高度的关系;(d)不同光栅高度TM、TE的光场分布;(e)TM光入射30 μm 中心距内 90° 、 0° 排布方向的光场分布;(f)图(e)中光栅后方10 μm 、20 μm 、30 μm 、40 μm 和50 μm 距离光强大小分布;(g)图(f)中0~30 μm 和30~60 μm 空间范围内光场强度积分大小及透射光强消光比与光栅距离的关系

Fig. 2 Optimizing polarization grating parameters and analyzing optical crosstalk in polarization element light fields: (a) relationship between TM light transmittance and grating height; (b) relationship between TE light transmittance and grating height; (c) relationship between polarization extinction ratio and grating height; (d) TM and TE light field distributions for different grating heights; (e) light field distribution of TM light incident on a 30 μm center spacing with 90° and 0° arrangement directions; (f) light intensity distribution at distances of 10 μm , 20 μm , 30 μm , 40 μm , and 50 μm behind the grating in Fig. (e); (g) relationship between the integrated light field intensity, transmitted light intensity extinction ratio, and grating distance within the spatial ranges of 0-30 μm and 30-60 μm in Fig. (f)

敏元间不同偏振方向光的串扰,如图1(a~b)所示。为实现超构透镜的宽带消色差的汇聚效果,采用不同半径大小的硅柱结构组合,以此来精确调控等效折射率,进而实现对传播相位的有效控制,达到汇聚光的效果。元胞结构对应的最大工作波长的梯度相位空间分布通过公式(1)确定^[14]:

$$\varphi(r, \lambda) = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} \left(f - \sqrt{r^2 + f^2} \right) \quad (1)$$

其中, λ 为最大作用波长, r 是单个硅柱到超构透镜中心的径向距离, n_{eff} 为等效折射率, f 为设计焦距。

硅柱元胞周期 p 设置为 $1.1 \mu\text{m}$, 硅柱高度 h_1 为 $1 \mu\text{m}$ 。通过对硅柱半径的大小变化调节空气和硅材料之间有效折射率调控传播相位。图3(a)为 $3.7 \mu\text{m}$ 、 $4.3 \mu\text{m}$ 、 $4.8 \mu\text{m}$ 红外波长的传播相位与硅柱半径的关系图。根据公式(1)和公式(2), 图3(b)是焦距为 $180 \mu\text{m}$ 、最大最小工作波长分别为 $3.7 \mu\text{m}$ 和 $4.8 \mu\text{m}$ 及宽带相位补偿后的相位需求关系, 图3(c)为对应 $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 空间范围内的相位匹配分布。根据所需的相位选择匹配的硅柱组成超构透镜的 x - y 平面分布, 如图3(d)所示。

为了覆盖偏振集成探测的响应波长, 图4(a~b)为 $3.7 \mu\text{m}$ 、 $4.3 \mu\text{m}$ 和 $4.8 \mu\text{m}$ 波长入射光通过超构透镜后的汇聚(x - z 平面)光场分布, 对应光汇聚焦距分别为 $185 \mu\text{m}$ 、 $183 \mu\text{m}$ 和 $177 \mu\text{m}$, 位置如白色虚线所示。考虑到超构透镜阵列与焦平面集成后的距离固定, 因此选取光通过超构透镜后相同距离($z=181 \mu\text{m}$)处的光场, 如图4(a)的黄色曲线位置所示, 对应不同波长的 x - y 平面的光场分布如图4(c)所示, 在 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 平面范围内的汇聚效率分别为 83.2% 、 79.4% 、 75.3% 。图4(d)为 $y=0$ 时的光场强度分布曲线, 可以看到最大光强是入射光强度的 1.5 倍, 随着波长增大, 光场汇聚的最大强度降低。

超表面透镜阵列、偏振光栅与探测器的像元耦合后不同波长 ($3.7 \mu\text{m}$ 、 $4.3 \mu\text{m}$ 和 $4.8 \mu\text{m}$) 的光场汇聚效果如图4(e)所示。当集成距离为 $30 \mu\text{m}$ 时, 器件偏振消光比较未集成超表面透镜的结构时提升了近 2.4 倍, 实现了偏振消光比达到 $25:1$, 如图4(f)所示。

2 实验及数据分析

超构透镜和铝光栅的制备采用步进式光刻技术((PAS 5500/350C))和等离子体刻蚀工艺相结合的方法进行制备。光刻设备的套刻对准精度为 $\pm 300 \text{ nm}$, Si衬底的厚度为 $380 \mu\text{m}$ 。铝光栅结构首

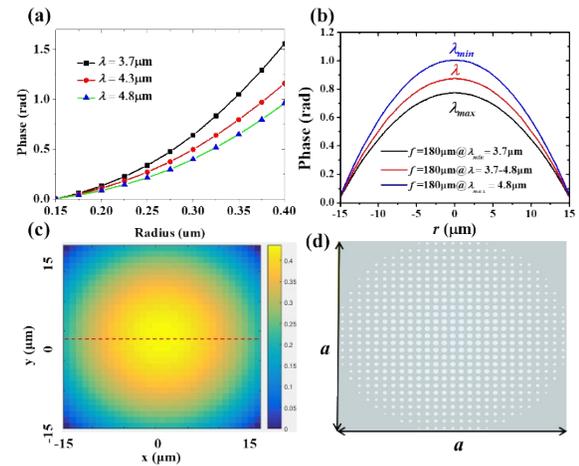


图3 超构透镜结构参数优化:(a)传播相位与纳米硅柱半径的关系图;(b)设计焦距为 $180 \mu\text{m}$ 、最大最小工作波长分别为 $3.7 \mu\text{m}$ 和 $4.8 \mu\text{m}$ 及宽带的相位需求关系;(c) $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 空间范围内的相位匹配分布相位随空间分布图;(d) $30 \mu\text{m}$ 中心距元超构透镜 x - y 平面图

Fig. 3 Optimizing geometric parameters of metalens: (a) relationship between propagation phase and the radius of the nano-silicon pillar; (b) phase requirement relationship of maximum/minimum working wavelengths of $3.7 \mu\text{m}$ and $4.8 \mu\text{m}$ and broadband phase compensation, respectively, with a designed focal length of $180 \mu\text{m}$; (c) phase matching distribution and spatial phase distribution within a $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ spatial range; (d) x - y plane diagram of the metalens with a $30 \mu\text{m}$ center-to-center pixel spacing

先采用磁控溅射在 Si 片表面镀铝膜, 而超构透镜结构是直接进行 Si 柱刻蚀。工艺流程包括匀胶、烘烤 ($100 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 10 min)、光刻(曝光能量密度为 $15\sim 21 \text{ mJ/cm}^2$)、显影、和刻蚀等工艺流程, 采用 ICP-RIE 干法刻蚀系统对光刻后的结构进行刻蚀, 刻蚀气体选用 SF_6/CF_4 作为化学反应气体, 同时引入 Ar 作为物理轰击气体。在刻蚀过程中通过系统调节气体流量、射频功率、气体压强等关键工艺参数, 不断优化光刻和刻蚀工艺条件。铝光栅结构制备完成后进行衬底减薄, 再进行超构透镜结构的套刻、刻蚀等工艺制备。金属光栅结构的样品形貌如图5(a~b)所示, 规模为 320×256 , 像元中心距为 $30 \mu\text{m}$, 包含 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四个偏振方向, 光栅周期为 450 nm , 平均线宽约为 $w=230 \text{ nm}$, 高度为 $h_2=335 \text{ nm}$; 超表面透镜聚光结构样品形貌及 SEM 分别如图5(d)和图5(e)所示, 阵列规模同样为 320×256 , 像元中心距为 $30 \mu\text{m}$, 工作波长为 $3.7\sim 4.8 \mu\text{m}$ 。聚光效果的测试结果如图5(f)所示, $4.3 \mu\text{m}$ 波长的汇聚焦距聚焦约

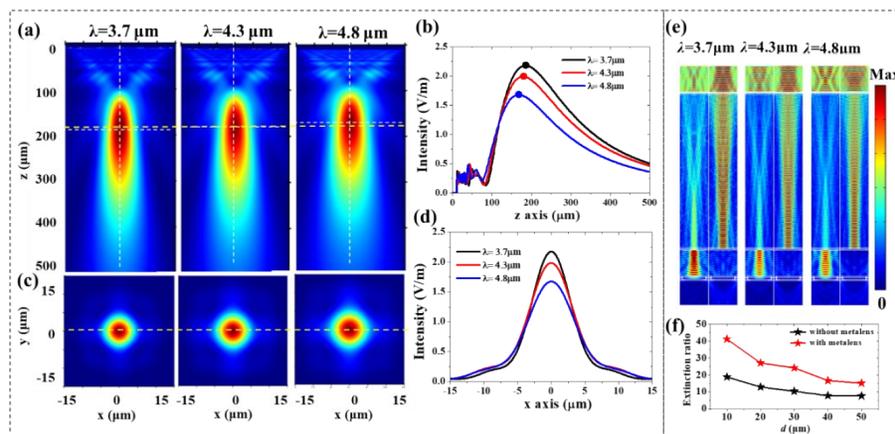


图4 超构透镜光场汇聚及一体化集成仿真结果:(a)波长分别为 $3.7\ \mu\text{m}$ 、 $4.3\ \mu\text{m}$ 和 $4.8\ \mu\text{m}$ 的TM光入射超构透镜后的 x - z 平面光场汇聚图;(b) $x=0$ 时不同波长沿 z 方向的光场强度分布;(c)对应图(a)黄色虚线处 $z=181\ \mu\text{m}$ 处的 x - y 平面光场分布;(d)图(c)中黄色虚线 $y=0$ 时光场强度沿 x 坐标方向的分布;(e)超构透镜与探测器像元集成后不同波长入射光场的分布;(f)有无超透镜阵列偏振集成探测器消光比与集成距离的关系

Fig. 4 Metalens light field focusing and monolithic integration simulation results: (a) light field focusing diagrams in the x - z plane for TM light with wavelengths of $3.7\ \mu\text{m}$, $4.3\ \mu\text{m}$, and $4.8\ \mu\text{m}$ incident on the metalens; (b) light field intensity distribution along the z -direction at $x=0$ for different wavelengths; (c) light field distribution in the x - y plane at $z=181\ \mu\text{m}$ corresponding to the yellow dashed line in Fig. (a); (d) light field intensity distribution along the x -coordinate direction at $y=0$ (yellow dashed line in Fig. (c)); (e) light field distribution for different wavelengths incident on the integrated metalens and detector pixel; (f) relationship between the extinction ratio of the polarization-integrated detector with and without the metalens array and the integration distance

为 $189\ \mu\text{m}$,与仿真结果焦距 $183\ \mu\text{m}$ 基本吻合;焦距处 $20\ \mu\text{m}\times 20\ \mu\text{m}$ 平面范围内光场汇聚效率为73.8%,与上一节相同平面范围内光场汇聚效率79.4%的仿真结果及传统微透镜阵列衍射效率83.6%^[15]比较接近,为后续超表面偏振结构与探测

器集成提供了基础。

偏振结构加工完成后,与衬底厚度小于 $1\ \mu\text{m}$ 的红外芯片通过钢柱互连等工艺流程进行耦合集成, x - y 平面集成对准精度约为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$, z 方向集成距离约为 $20\sim 25\ \mu\text{m}$ 。图6(a)为分焦平面偏振集成探测

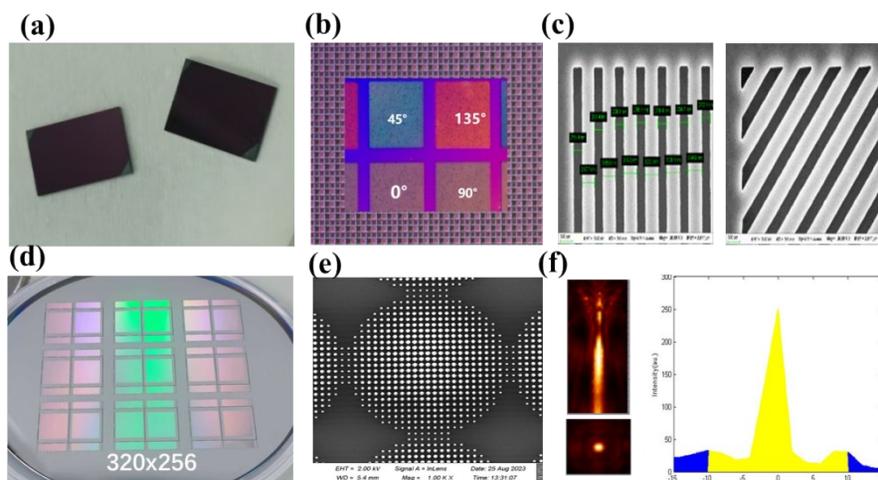


图5 偏振光栅和超构透镜照片、SEM图及光场测试图:(a)偏振光栅阵列样品;(b)偏振光栅阵列样品照片;(c)偏振光栅阵列样品SEM图;(d)超透镜阵列样品;(e)超透镜阵列样品SEM图;(f)超透镜阵列样品聚光效果测试图

Fig. 5 Structural and optical performance of polarization gratings and metalens: (a) polarization grating array sample; (b) photograph of the polarization grating array sample; (c) SEM image of the polarization grating array sample; (d) metalens array sample; (e) SEM image of the metalens array sample; (f) light focusing effect test image of the metalens array sample

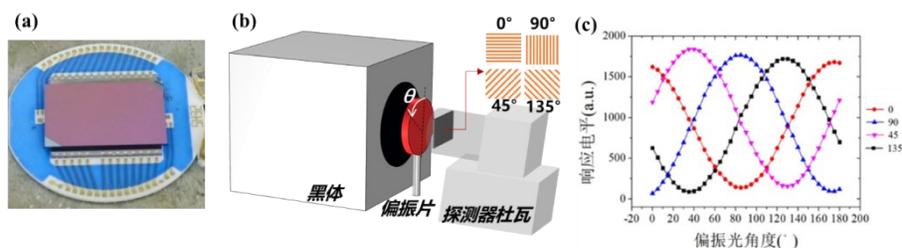


图6 分焦平面偏振集成探测器实物图及测试结果:(a)偏振集成探测器实物图;(b)探测器偏振性能测试示意图;(c)偏振集成探测器偏振响应图

Fig. 6 Photograph and test results of the division of focal plane polarization-integrated detector: (a) photograph of the focal plane polarization integrated detector; (b) schematic diagram of detector polarization performance; (c) polarization response diagram of polarization integrated detector

器实物图。 0° 、 45° 、 90° 、 180° 分焦平面偏振像元对不同偏振方向光的响应如图6(b)所示,通过最大最小响应的比值计算对应的消光比分别为13.2、12.03、19.43和17.53,平均消光比为15.5,为偏振成像提供了基础。

利用 320×256 中波红外分焦平面偏振集成探测器芯片对实验室内物体进行了成像实验,分焦平面探测器可以实时同时获取 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四个方向的偏振信息,计算得到对应的斯托克斯矢量分量和偏振度等信息^[16]。分别选取了静止和转动中的风扇和液氮变温漏斗进行了强度和偏振度成像对比。图7(a~b)分别为静止和转动中风扇的强度和偏振度成像对比,结果显示分焦平面偏振器件对动态物体的边缘等具有良好的成像效果。对于温度快速变化的物体成像,选取了装满液氮的金属漏斗进行了连续成像,得到不同时刻对应不同温度分布状态下的强度和偏振度图像,如图7(c~d)所示。成像结果展示了分焦平面偏振集成器件对动态及变温物体成像的优势。

3 结论

本文设计并制备了一种基于超表面的偏振集成红外探测器,分析了超构透镜对不同波长红外光的光场调控特性,成功制备了具有金属光栅和超构透镜的阵列样片,并将其与红外焦平面阵列进行了集成,具备 0° 、 45° 、 90° 和 135° 四个偏振方向。测试结果表明,该器件实现了15:1的偏振消光比。为进一步验证器件性能,开展了动态目标及变温目标的偏振成像实验,充分展示了分焦平面偏振集成器件在红外成像领域的显著优势。

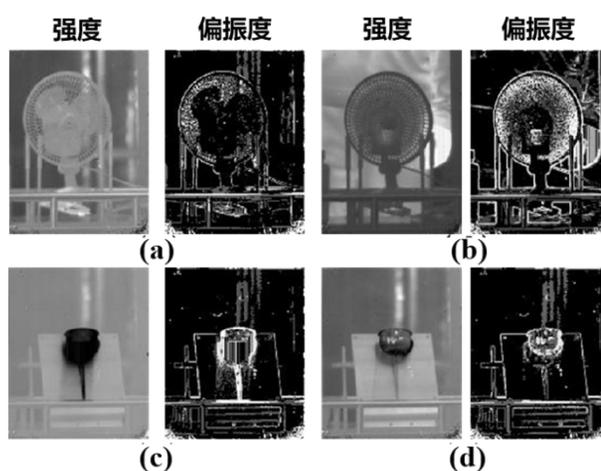


图7 中波红外分焦平面偏振集成探测器实验室成像演示图:(a)静止风扇;(b)转动风扇强度与偏振度成像对比;(c) T_1 时刻;(d) T_2 时刻变温状态下漏斗强度与偏振度成像对比

Fig. 7 Laboratory imaging results of the mid-wave infrared division-of-focal-plane polarization-integrated detector: (a) static fan; (b) imaging comparison of rotating fan intensity and polarization degree; (c) comparison of intensity and polarization imaging of variable temperature funnel at T_1 time; (d) T_2 time

References

- [1] Rogalski A, Martyniuk P, Kopytko M, et al. Trends in performance limits of the HOT infrared photodetectors[J]. Applied Sciences, 2021, 11(2): 501.
- [2] Cruz-Cabrera A, Kemme S, Wendt J, et al. Edge termination effects on finite aperture polarizers for polarimetric imaging applications at mid-wave IR[J]. Integrated Optoelectronic Devices, 2006, SPIE 6126.
- [3] Hubbs J, Gramer M, Maestas-Jepson D, et al. Measurement of the radiometric and polarization characteristics of a microgrid polarizer infrared focal plane array[J]. SPIE Optics + Photonics, 2006, SPIE 6295.
- [4] Malone N, Hampp A, Gordon E, et al. Detection compari-

- sons between LWIR and MWIR polarimetric sensors [J]. SPIE Defense and Security Symposium, 2008, SPIE 6972.
- [5] Ikeda S, Higurashi E, Suga T, et al. Miniaturized polarization sensors integrated with wire-grid polarizers [C]. 2014 International Conference on Electronics Packaging (ICEP), 2014.
- [6] Forrai D, Endres D, Devitt J, et al. Development of a MWIR polarimetric FPA [J]. Photonic Devices + Applications, 2007, SPIE 6660.
- [7] Zhou J, Zhou Y, Shi Y, et al. A compact polarization-integrated long wavelength infrared focal plane array based on InAs/GaSb superlattice [J]. Science China Information Sciences, 2022, 65(2): 122407.
- [8] Zhou J, Zhou Y, Ni X Y, et al. Research progress and applications of polarization integrated infrared photodetector [J]. Opto-Electronic Engineering, 2023, 50(5): 230010-1-230010-18.
(周建,周易,倪歆玥,等. 偏振集成红外光电探测器研究进展与应用[J]. 光电工程), 2023, 50(5): 230010-1-230010-18.
- [9] Zuo J, Bai J, Choi S, et al. Chip-integrated metasurface full-Stokes polarimetric imaging sensor [J]. Light: Science & Applications, 2023, 12(1): 218.
- [10] Yu N, Genevet P, Kats M A, et al. Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction [J]. Science, 2011, 334(6054): 333-337.
- [11] Yu N, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces [J]. Nature Materials, 2014, 13(2): 139-150.
- [12] Zhang S, Kim M H, Aieta F, et al. High efficiency near diffraction-limited mid-infrared flat lenses based on metasurface reflectarrays [J]. Optics Express, 2016, 24(16): 18024-18034.
- [13] Zaidi A, Rubin N A, Dorrah A H, et al. Generalized polarization transformations with metasurfaces [J]. Optics Express, 2021, 29(24): 39065-39078.
- [14] Wang S, Wu P C, Su V C, et al. A broadband achromatic metalens in the visible [J]. Nature Nanotechnology, 2018, 13(3): 227-232.
- [15] Hou Z J, Wang X D, Chen Y, et al. Preparation and performance of integration device between Si microlens array and infrared focal plane array (Invited) [J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(7): 44-50.
(侯治锦,王旭东,陈艳,等. 硅微透镜阵列与红外焦平面阵列的集成器件的制备与性能(特邀)[J]. 光子学报), 2024, 53(7): 44-50.
- [16] Ahmed A, Zhao X, Gruev V, et al. Residual interpolation for division of focal plane polarization image sensors [J]. Optics Express, 2017, 25(9): 10651-10662.

