

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

偏振集成红外光电探测器研究进展与应用

周建, 周易, 倪歆玥, 王芳芳, 应翔霄, 黄敏, 徐志成, 陈凡胜, 刘云猛, 陈建新

引用本文:

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.

Zhou J, Zhou Y, Ni X Y, et al. Research progress and applications of polarization integrated infrared photodetector[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(5): 230010.

<https://doi.org/10.12086/oe.2023.230010>

收稿日期: 2023-01-12; 修改日期: 2023-05-11; 录用日期: 2023-05-12

相关论文

偏振哈特曼波前探测技术研究

郭庭, 张彬, 顾乃庭, 饶长辉, 黄林海, 许多, 肖亚维

光电工程 2021, 48(7): 210076 doi: [10.12086/oe.2021.210076](https://doi.org/10.12086/oe.2021.210076)

基于邻域约束的大气偏振模式生成网络

程前, 高欣健, 高隼, 王昕, 党天一, 严圆

光电工程 2022, 49(6): 210423 doi: [10.12086/oe.2022.210423](https://doi.org/10.12086/oe.2022.210423)

基于多任务学习框架的红外行人检测算法

苟于涛, 马梁, 宋怡萱, 靳雷, 雷涛

光电工程 2021, 48(12): 210358 doi: [10.12086/oe.2021.210358](https://doi.org/10.12086/oe.2021.210358)

基于自适应梯度倒数滤波红外弱小目标场景背景抑制

李飏, 徐智勇, 王琛, 张建林, 汪相如, 樊香所

光电工程 2021, 48(8): 210122 doi: [10.12086/oe.2021.210122](https://doi.org/10.12086/oe.2021.210122)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



光电工程
Opto-Electronic Engineering

<http://cn.ojournal.org/oe>



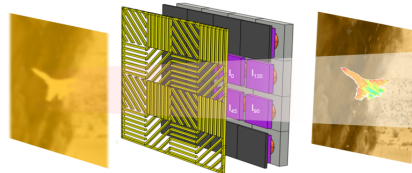
OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2023.230010

偏振集成红外光电探测器 研究进展与应用



周 建¹, 周 易^{1,3*}, 倪歆玥², 王芳芳¹, 应翔霄¹,
黄 敏¹, 徐志成¹, 陈凡胜^{2,3}, 刘云猛¹, 陈建新^{1,2*}

¹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;

²中国科学院上海技术物理研究所, 中国科学院智能红外感知
重点实验室, 上海 200083;

³国科大杭州高等研究院, 浙江杭州 310024

摘要: 偏振集成探测器具有体积小、重量轻、结构紧凑, 并且无需图像配准对动态目标同时同地同源探测与识别的优势。本文主要介绍了偏振集成光电探测器单元器件、线列焦平面、面阵焦平面的研究进展, 分析了光栅结构与仿真、亚微米偏振光栅制备、集成与测试、偏振图像数据重构等获得高消光比偏振集成探测器的关键技术, 最后介绍了偏振成像针对无人机、伪装卡车、地雷、海面舰船、面部识别、无人驾驶道路识别、海面漏油检测及医疗检测等方面的典型应用。

关键词: 偏振集成探测器; 消光比; 图像重建; 偏振成像应用

中图分类号: TN215

文献标志码: A

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

Zhou J, Zhou Y, Ni X Y, et al. Research progress and applications of polarization integrated infrared photodetector[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(5): 230010

Research progress and applications of polarization integrated infrared photodetector

Zhou Jian¹, Zhou Yi^{1,3*}, Ni Xinyue², Wang Fangfang¹, Ying Xiangxiao¹, Huang Min¹,
Xu Zhicheng¹, Chen Fansheng^{2,3}, Liu Yunmeng¹, Chen Jianxin^{1,2*}

¹National Key Laboratory of Infrared Detection Technologies, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²Key Laboratory of Intelligent Infrared Perception, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

³Hangzhou Institute for Advanced Study, UCAS, Hangzhou, Zhejiang 310024, China

Abstract: Polarization integrated detector has the advantages of small size, light weight, compact structure, and no

收稿日期: 2023-01-12; 修回日期: 2023-05-11; 录用日期: 2023-05-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61904183, 61974152, 62004205, 62104236, 62104237, 62222412); 国家重点研发计划项目 (2022YFB3606800); 上海市启明星培育项目扬帆专项 (21YF1455000, 22YF1455800); 上海市“基础研究特区计划”资助项目 (JCYJ-SHFY-2022-004); 中国科学院上海技术物理研究所创新专项基金资助项目 (CX-399, CX-455)。

*通信作者: 周易, zhouyi@mail.sitp.ac.cn; 陈建新, Jianxinchen@mail.sitp.ac.cn。

版权所有©2023 中国科学院光电技术研究所

need for image registration to detect and recognize the dynamic targets simultaneously at the same place. This article mainly introduces the research progress and applications of polarization integrated infrared detector. We analyse the key technologies for obtaining high extinction ratio polarization integrated detectors, such as grating structure design and simulation, submicron polarization grating preparation, integration and testing, polarization image data reconstruction, etc. Finally, we introduce the typical applications of polarization imaging in unmanned aerial vehicles, camouflaged trucks, landmines, sea vessels, facial recognition, road recognition, sea oil leakage detection, medical detection, etc.

Keywords: polarization integrated detector; extinction ratio; image reconstruction; polarization imaging applications

1 引言

偏振是光除了强度(振幅)、波长(频率)、相位以外的重要物理特性之一。光的偏振主要包括线偏振、圆偏振(左旋、右旋)和椭圆偏振(左旋、右旋)。地表、掩体、水面、水下或者大气中的目标在辐射、反射、透射或散射电磁波时,会产生由自身特性所决定的特有偏振信息,且这些偏振信息能用于分析和识别目标的形状轮廓、表面粗糙程度、纹理图案以及材料的物理化学特性等。红外偏振成像是在传统红外强度对应光谱信息成像的基础上,通过获得目标辐射的不同方向的偏振信息从而增加信息维度的一种成像技术,不仅能获得目标二维空间的红外强度图像,而且能获得图像上每一点偏振信息。偏振成像可以利用增加的偏振度、偏振角、偏振椭圆率和偏振旋转方向等维度,通过目标和背景的偏振差异,有效增大图像的对比度,提升雾霾和背光等复杂背景下对目标的探测与识别能力。

目前传统的红外偏振探测器主要包括分时偏振探测器、分振幅偏振探测器和分孔径偏振探测器。以上三种类型偏振探测器虽然在一定程度上满足了偏振探

测成像的需求,但是在具体应用中仍存在一些不足,主要包括:分时偏振探测器需要旋转偏振片,不能同时对同一目标进行偏振成像,旋转偏振片可能导致光束漂移,对动态目标获得的偏振图像易产生虚像拖影等,不同时刻获得的不同偏振信息的图像在信息融合处理时对图像配准度要求极高;分振幅偏振探测器分散了入射到每个偏振方向的探测器的光强,对光路对准要求极高且体积大,价格昂贵,限制了应用范围;分孔径偏振探测器存在空间分辨率低,体积、重量大,不同偏振通道信息的对准困难等缺点。

像素级(分焦平面)偏振集成红外探测器对微纳工艺的要求较高,但随着电子束光刻、全息曝光、纳米压印等纳米加工技术的进步,促进了分焦平面偏振集成红外探测器的发展,它可以在相当大地程度上克服以上系统级红外偏振探测器的缺点,可以同时同地对同一动态目标进行偏振成像,在进行偏振图像信息处理时无需进行配准直接融合,如图1所示。偏振集成探测器同时具备体积小、重量低以及能耗低的特点,极大地拓宽了其应用范围,正在成为第四代新型光电成像技术的重要载体之一。

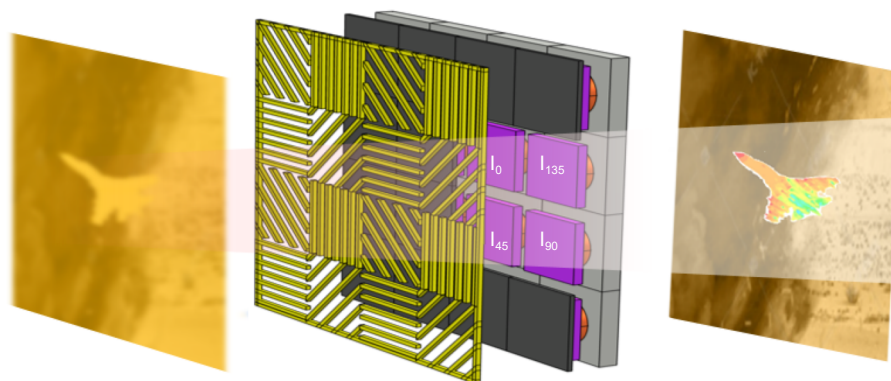


图1 偏振集成探测器成像基本概念及内涵

Fig. 1 Basic concept and connotation of polarization integrated detector imaging

2 偏振集成探测器研究进展

偏振集成探测器的分类主要包括三种。一是根据探测器的工作谱段可分为可见光、近红外、短波红外、中波红外及长波/甚长波红外偏振集成探测器；二是根据探测器的工作原理可以分为热敏型和光敏型，其中光敏型又分为光导型和光伏型；三是根据探测器的规模及阵列组成可分为单元器件、线列焦平面及面阵焦平面。本文根据探测器的规模及阵列组成介绍偏振集成探测器的研究进展。

2.1 偏振集成探测器单元器件

1993年，美国约翰斯·霍普金斯大学 Thompson 等人第一次报道了偏振集成探测器^[1-2]，将 1024 pixels × 1024 pixels CCDs 分成两个 512 pixels × 1024 pixels 区域分别接收两个方向的偏振光。2002年该机构 Andreou 等人通过片上集成聚合物薄膜分别接收 P 光和 S 光，偏振消光比约为 3:1，并对水壶成像进行了偏振对比度的分析^[3]。1999年，美国普林斯顿大学 Chen 等人于率先提出并制备了波纹型量子阱偏振集成红外探测器，在 4 个单元器件表面集成盖 0°、45°、90°、135°偏振方偏振光栅，测试 6~12 μm 波段四个偏振方向的偏振光响应不同^[4]。

2010年，美国空军实验室资助亚特兰大的乔治亚州立大学 Apalkov 等人用实验和数值方法研究了耦合在衍射网格上的量子阱红外探测器的偏振灵敏度^[5]，如图 2(a) 所示。这种系统的偏振消光比由两个因素决定：衍射光栅的偏振灵敏度和光电探测器本身的固有偏振灵敏度。这些因素的综合作用导致了偏振消光比对衍射网格参数的非单调依赖性。通过改变光栅参数，即增加高度和调整光栅周期，可以达到偏振消光比的最大值。他们还研究了正入射和背入射条件下探测器的偏振特性，研究表明在正入射条件下，偏振灵敏度最强。

2015年，韩国标准科学研究院 Kim 等人首次设计并制备了基于 II 类超晶格 (T2SL) 结构的一维亚波长金光栅 (1D-SGG) 阵列表面结构^[6]，其工作原理是依赖金属光栅的滤光实现偏振响应选择，工作波段为 2~5 μm，偏振消光比约为 5:1，如图 2(b) 所示。

2014年，中国科学院上海技术物理研究所李志锋研究员课题组提出了量子阱 (quantum well, QW) 红外探测器^[7]，该结构由量子阱和等离子体微腔 (一维金属 Au 光栅) 所组成，如图 2(c) 所示。研究结果表明：该探测器在长波 14.6 μm 的消光比达到了 65:1，

归因于其对光在等离子体微腔中传播及分布的有效人工操控，即在 TM 偏振光入射条件下，激发了局域表面等离子体 (localized surface plasmon, LSP) 模式和表面等离子体激元 (surface plasmon polariton, SPP) 模式。

除了传统的金属光栅滤光或分光，光子晶体也可以对光的偏振态传播与吸收进行有效调控。日本三菱电气公司 Shinpei Ogawa 团队提出了利用非中心对称的均匀椭圆阵列实现偏振响应度选择性地增强^[8]，如图 2(d) 所示。该结构的集成基于微机电系统的互补金属氧化物半导体 (CMOS) 非制冷红外传感器和微机械加工技术。韩国先进科学技术研究院 Jin-Kyu Yang 提出了集成非均匀光子晶体结构的 InGaAsP 量子阱光电探测器^[9]，如图 2(e) 所示。为了有效促进光子耦合到探测器吸收区中，此探测器具有偶极共振模式耦合增强特性，最大响应度为 0.28 A/W，是没有集成光子晶体探测器的 20 倍。同时该探测器对水平偏振方向和垂直偏振方向入射光响应增强分布在不同谱段，具有高度的偏振选择性。

在圆偏振光探测器方面，目前还仅限于单元器件的设计与实现。2015年，Valentine 等人设计了“Z”字形金属银人工手性表面超结构，可以实现对近红外左旋、右旋圆偏振光的选择性吸收增强或减弱，如图 3(a) 所示^[10]。南开大学陈树琪教授课题组通过单层金纳米棒阵列可以实现近红外圆偏振波转换为线性偏振波或与波长有关的电场偏振角为圆偏振波的线性偏振波^[11]，如图 3(b) 所示。2018年，美国亚利桑那州立大学 Bai 等人提出并建立了基于单片集成表面超材料的中波红外偏振探测器的理论模型，并进行了实验验证，该结构支持全斯托克斯参数检测任意偏振态光^[12-14]，如图 3(c) 所示。该团队获得了美国自然科学基金委员会“超小型片式集成超构表面偏振成像仪”项目的研究资助，这充分说明了美国顶尖科学家已经开始展开了研究“芯片级”偏振信息探测，凸显了研究“芯片级”偏振信息探测的重要性和紧迫性。2023年，来自新加坡国立大学电子与计算机工程学院的仇成伟教授研究团队针对现有圆偏振光探测的困难，从几何和对称性的角度提出了一种新的光电探测器设计思路，如图 3(d-g) 所示，简洁而巧妙地实现了具有极大区分度、高选择性和高响应度等特点的可片上集成圆偏振光探测器^[15,16]。目前圆偏振探测器离可以应用的高消光比的偏振集成焦平面还有一系列技术需要突破。

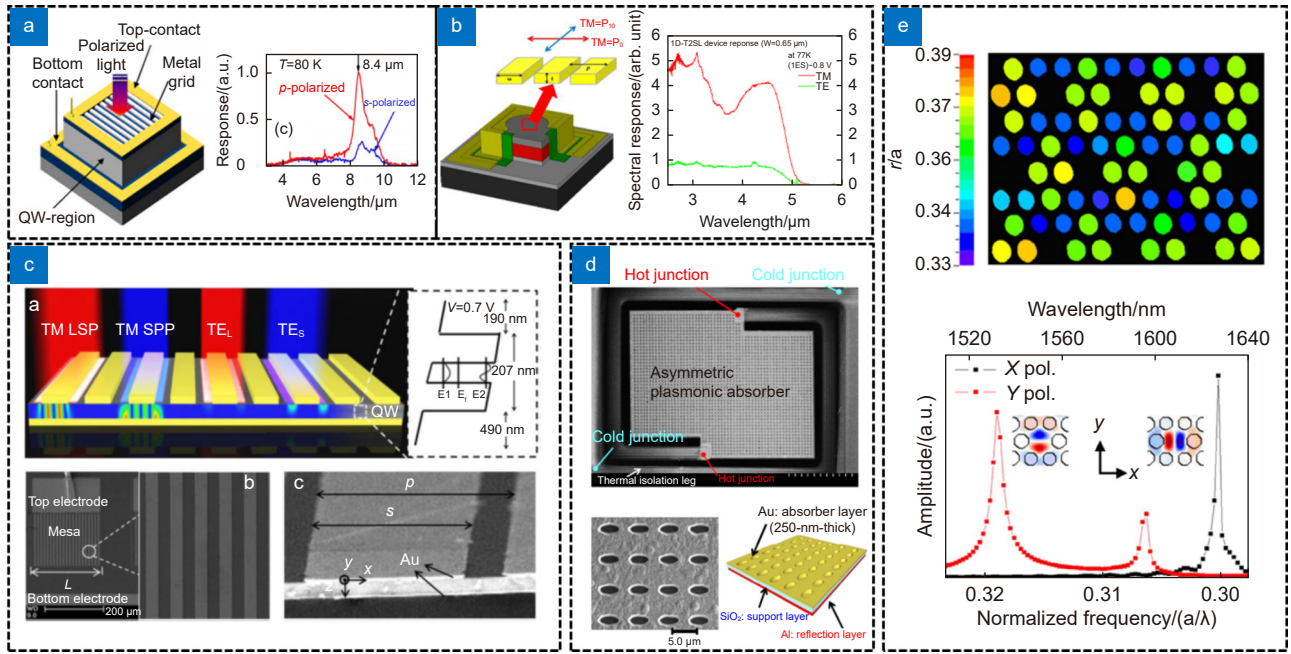


图 2 (a) 量子阱红外探测器示意图及偏振响应测试光谱^[5]; (b) II 类超晶格中红外结构示意图及偏振响应测试光谱^[6]; (c) 集成等离子体微腔量子阱红外探测器光场分布图及 SEM 图^[7]; (d) 集成非中心对称均匀椭圆阵列非制冷红外传感器结构示意图及 SEM 图^[8]; (e) 集成非均匀光子晶体结构的 InGaAsP 量子阱光电探测器结构示意图及偏振选择增强光谱^[9]

Fig. 2 (a) Schematic diagram of the quantum well infrared detector and polarization response test spectrum^[5]; (b) Schematic diagram of the mid infrared structure of type II superlattice and polarization response spectrum^[6]; (c) Optical field distribution diagram and SEM diagram of the integrated plasma microcavity quantum well infrared detector^[7]; (d) Structural diagram and SEM diagram of the integrated non centrosymmetric uniform elliptical array uncooled infrared sensor^[8]; (e) Schematic diagram and polarization selective enhanced spectrum of the InGaAsP quantum well photodetectors with the integrated non-uniform photonic crystal structure^[9]

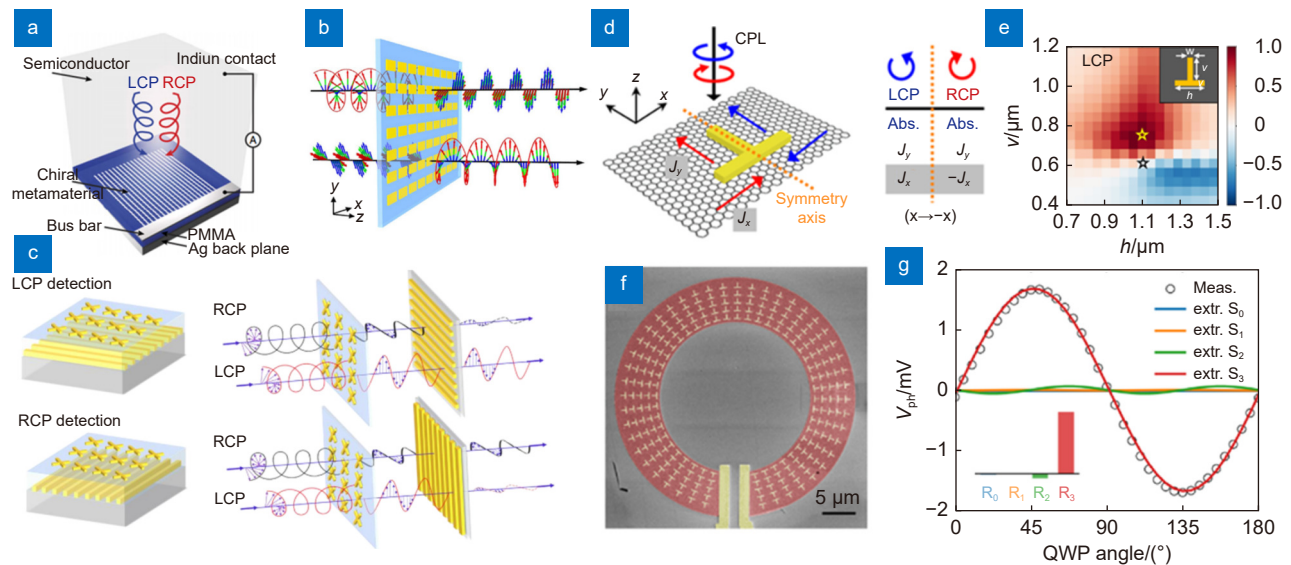


图 3 (a) 手性材料与半导体集成圆偏振光电探测器示意图^[10]; (b) 线偏振、圆偏振光相互转换超表面材料示意图^[11]; (c) 单片集成表面超材料的中波红外外偏振探测器的理论模型^[12-14]; (d) 圆偏振结构对称性设计; (e) T 型结构单元参数设计; (f) 器件几何化设计包括环形、半环形以及 L 型等; (g) 器件实现高选择性的光电响应^[15-16]

Fig. 3 (a) Schematic diagram of the circular polarization photodetector integrated with chiral materials and semiconductors^[10]; (b) Schematic diagram of the linear polarization and circularly polarized light converting each other into super surface materials^[11]; (c) Theoretical model of the MWIR polarization detector with monolithic integrated surface metamaterial^[12-14]; (d) Symmetry design of the circular polarization structure; (e) Design of the T-shaped structural unit parameters; (f) The geometric design of the devices includes annular, semi annular, and L-shaped designs; (g) Devices achieve highly selective photoelectric response^[15-16]

2.2 偏振集成探测器线列焦平面

根据获取目标辐射信息的工作方式不同, 红外成像仪主要可以分为光机扫描型 (opto-mechanical scanning) 成像仪、推扫型 (pushbroom scanning) 成像仪以及凝视型 (staring) 成像仪, 其中推扫型扫描成像仪采用长线列探测器作为敏感元件, 能够在无机械扫描情况下扩大系统的视场。

线列探测器在光学焦面上垂直于飞行方向作横向排列, 当飞行器向前飞行完成纵向扫描时, 排列的探测器如同扫帚一样可以扫出一条带状轨迹, 从而得到目标物体的二维图像。偏振集成线列芯片配合低功耗的 TDI 型红外焦平面读出电路具备实时偏振扫描成像功能, 同时可利用多级 TDI 电路选读功能进行信息互补提高有效像元率。与凝视型分焦平面偏振集成探测器相比, 偏振集成线列焦平面的结构更容易抑制不同偏振方向的光场串扰从而提升器件的消光比, 因此研制适用于推扫型的线列偏振集成探测器具有重要的实际意义。

2013 年以来, 中国科学院上海技术物理研究所龚海梅研究员团队成功研制了集成亚波长金属光栅结构的近红外 InGaAs 偏振探测器, 如图 4(a) 所示, 偏振光敏元的消光比优于 30:1, 并对建筑物、汽车等场景进行了成像测试^[17-19]。

2018 年以来, 笔者所在的中国科学院上海技术

物理研究所陈建新研究员团队通过对基于 InAs/GaSb 超晶格长波红外探测器的整体建模与仿真与参数优化, 有效抑制了不同偏振像元的串扰, 突破了亚微米偏振结构制备工艺及集成工艺, 获得了消光比大于 40:1 的线列焦平面, 如图 4(b) 所示, 并开展了对海面舰船、掩埋地雷等目标的外场成像实验。

2.3 偏振集成探测器面阵焦平面

偏振集成面阵焦平面不仅可以实现对空间目标的长时间凝视探测, 还可以获得目标与背景的信号与偏振信息, 还利用目标与背景的偏振信息, 提升信背比, 尤其对于复杂环境下动态高速危险目标的实时探测、识别与跟踪具有重要的意义。然而, 不同偏振像元的串扰是导致分焦平面偏振集成探测器的消光比较低, 因此, 提升分焦平面偏振集成探测器性能主要是围绕如何抑制不同偏振像元的串扰进行。

一是通过减小偏振结构与光敏元距离抑制偏振光串扰。2006 年, 美国空军研究实验室 (Air Force Research Laboratory, AFRL) 研制了 HgCdTe 长波红外分焦平面偏振集成芯片^[20], 如图 5(a) 所示。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。同年, 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

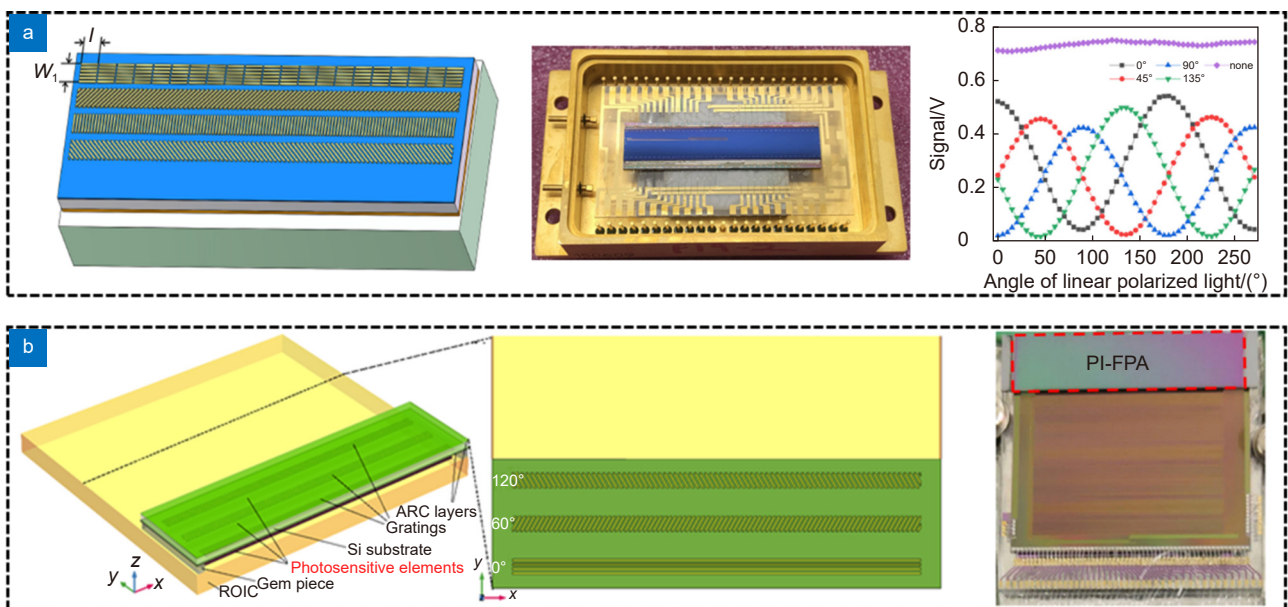


图 4 (a) 1024×4 集成亚波长金属光栅结构的近红外 InGaAs 偏振探测器^[17-19];

(b) 512×4×3 超晶格长波红外偏振集成探测器

Fig. 4 (a) 1024 × 4 near-infrared InGaAs polarization detectors integrated into the subwavelength metal grating structures^[17-19];

(b) 512 × 4 × 3 superlattice long wave infrared polarization integrated detector

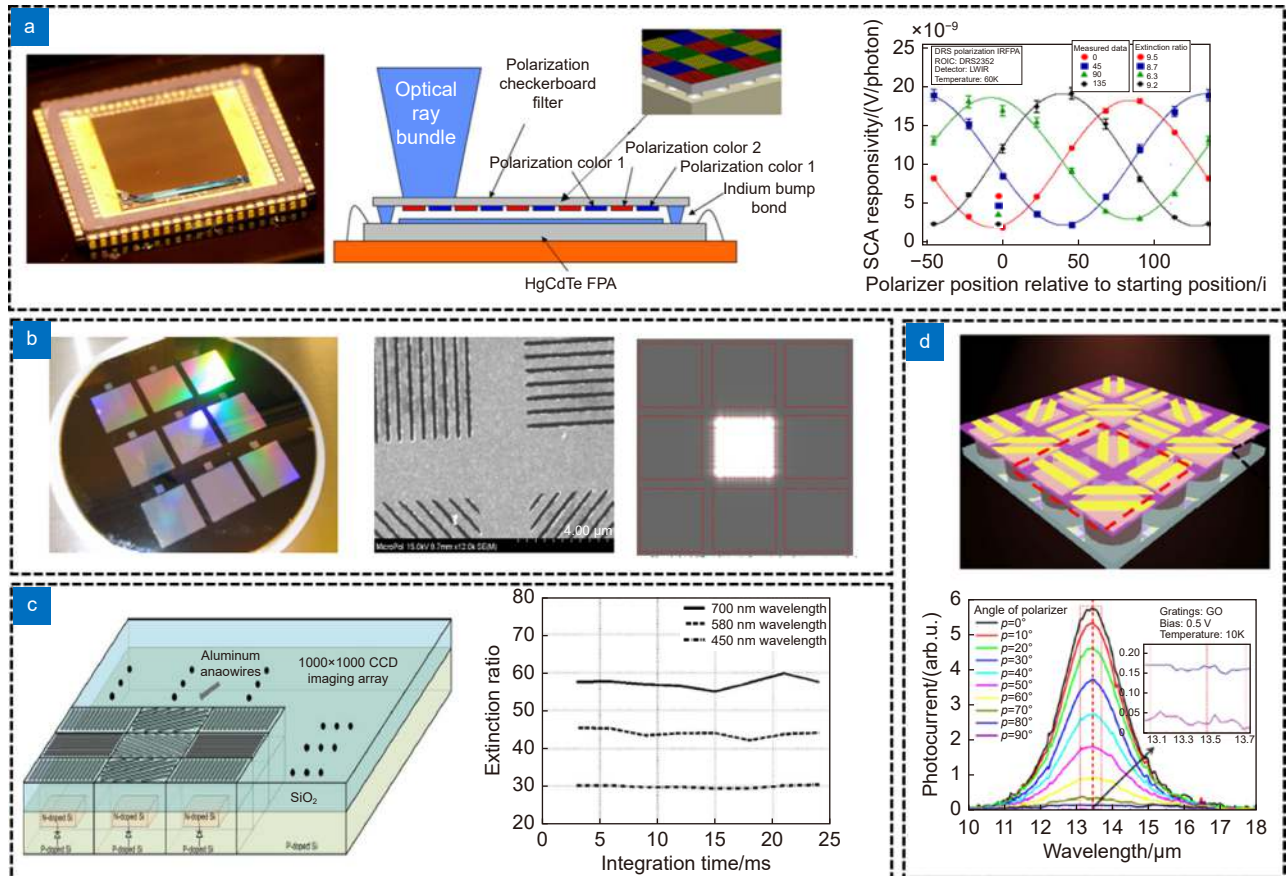


图 5 (a) HgCdTe 长波红外分焦平面偏振集成芯片实物图及结构示意图及偏振消光比测试^[20]; (b) 2 k×2 k、像元中心距为 20 μm 的 InSb 中波红外偏振集成探测芯片及微区光场分布; (c) 金属光栅直接集成的实时分焦平面 CCD 偏振成像传感器示意图及消光比测试; (d) 量子阱甚长波偏振集成探测器结构示意图及消光比测试^[30]

Fig. 5 (a) Physical diagram and structural schematic diagram of the HgCdTe long wave infrared focal plane polarization integrated chip and the polarization extinction ratio test^[20]; (b) 2 k × 2 k InSb medium wave infrared polarization integrated detection chip with a pixel center distance of 20 μm and micro area light field distribution; (c) Schematic diagram and extinction ratio test of the real-time focal plane CCD polarization imaging sensor directly integrated with the metal grating; (d) Structural diagram and extinction ratio test of the quantum well very long wave polarization integrated detector^[30]

串音的影响。发现对于 25 μm×25 μm 的像元大小, 波长是 3.39 μm 时, 把偏振片与焦平面之间的距离从 0.5 μm 增加到 1 μm 时, 消光比降低 30%。而当像元大小 60 μm×60 μm, 距离是 30 μm 时, 消光比降低 30%~50%, 可见串音效果与光敏元尺寸和距离紧密相关^[21]。2007 年, Forrai 等人研究了规模 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, 如图 5(b) 所示, 其消光比约为 10, 相比设计值低 1 到 2 个数量级, 其主要原因也是相邻像元间的衍射串扰。与背入射器件相比, 正入射器件能有效减小金属光栅到光敏区的距离, 从而降低偏振串音^[22]。2008 年, 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 20^[23]。2010 年, Gruev 等人提出了金属光栅直接集成的实时分焦平面 CCD 偏振成像传感器, 像元规模 1 k×1 k, 像元中心距 7.4 μm, 在可见光波长 700 nm 的最大消光比达到 58^[24], 如图 5(c) 所示, 其后又深入分析了不同波长在不同积分时间下的响应消光比差异, 及纳米线栅与像元尺寸不匹配导致的的光学变化, 以及图像校准的超像素模型^[25]。Baker 等人将四个方向金属线栅偏振片集成到衬底减薄的背入射 InGaAs 探测器焦平面上。为了降低串音, 金属光栅偏振片应该与探测器光敏区尽可能地接近, 即减薄或者完全去除 InP 衬底。对集成到探测器之前的金属光栅偏振片进行偏振性能测试, 平均消光比达到 125。但是把相同的金属光栅偏振片集成到背入射 InGaAs 探测器焦平面后, 消光比降低到 6, 分析其原因可能是由于不同偏振方向光敏元之间的串音造成^[26]。

2018年, 夜视集团北方广微联合西北工业大学赵永强团队推出了具有偏振探测性能的非制冷红外焦平面探测器^[27], 该探测器适用于长波红外偏振成像, 成像规模为 640×512 , 能够在红外热成像的基础上同时采集 0° 、 45° 、 90° 、 135° 四个方向热辐射的偏振信息, 但具体消光比数值没有给出。2021年, 中国科学院沈阳自动化研究所通过偏振片与探测器集成获得了可见光偏振相机、制冷型长波红外偏振相机, 消光比分别为9.8:1和23.3, 尤其针对偏振片与光敏元的距离对消光比的影响进行了分析^[28-29]。

二是利用等离子激元微腔模式的强耦合偏振分光的整体设计光栅结构提升量子阱焦平面器件的偏振消光比。由于甚长波红外探测波长与探测器像元结构尺寸接近, 其光学衍射效应导致分焦平面偏振结构的消光比低下, 如何实现甚长波段高的偏振消光比是一个挑战。针对这一难点, 中科院上海技物所陆卫研究员团队建立了基于等离子激元微腔的偏振分光解析的物理模型^[30], 如图5(d)所示。由金属线栅与金属反射镜夹持超薄介质层所形成的金属-介质-金属(MIM)结构, 上下金属层间距小于2个倏逝波的波长, 致使入射光在金属层间能够相互耦合。入射光照在上层光栅时,

与光栅中的金属等离子激元相互作用, 特定的结构尺寸与特定波长的入射光发生共振, 使其耦合进入两层金属之间的近场微腔中并形成横向驻波的局域等离子激元(LSP)模式。这种横向驻波恰好是满足量子阱子带跃迁的选择定则, 只有TM波能够被量子阱耦合吸收, 而TE波将被反射, 形成绝佳的偏振选择性, 分焦平面偏振集成探测器的消光比大于116:1。

三是通过微透镜聚光与偏振光栅分光协同减小串扰。2018年, 索尼公司推出了一款集成微透镜的可见光偏振传感器(IMX250 MZR)^[31], 像素规模 2065×1565 , 像素尺寸为 $2.5 \mu\text{m} \times 2.5 \mu\text{m}$, 帧速为120帧/秒, 如图6所示。用周期为150 nm金属线栅制作的偏振元件, 实现了单芯片化。其中, 每个微偏振片都有减反层, 透射率约为63.3%, 且被置于微透镜和光敏元之间, 微透镜结构能最大程度地减少不同方向偏振光的串扰, 消光比约为85:1。此技术有望在偏振集成探测器推广。

此外, 国内华北光电技术研究所^[32]、北京理工大学^[2,33]、大连理工大学^[34-35]、南京理工大学^[36-37]、华中科技大学^[38]等机构均开展了偏振探测器及成像方面的研究。

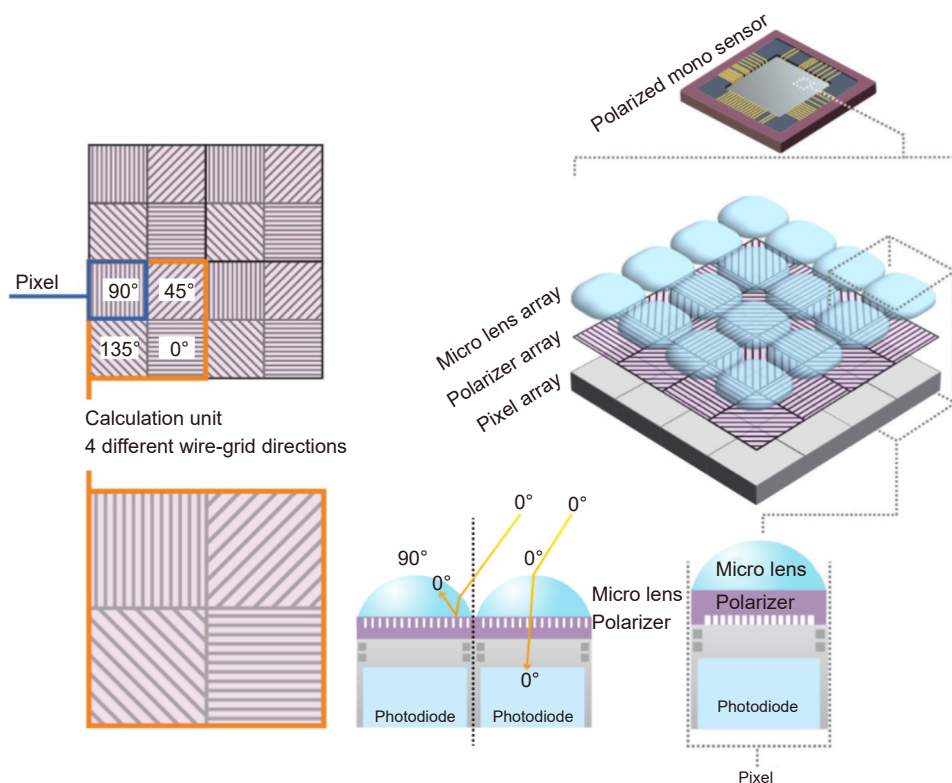


图6 分焦平面偏振传感器IMX250 MZR的结构示意图^[31]

Fig. 6 Schematic diagram of the division of focal plane polarization sensor IMX250 MZR^[31]

3 偏振集成探测器关键技术

3.1 偏振光栅结构与仿真

高消光比高透过率偏振光栅的优化设计是偏振集成探测器的基础, 不同波长(可见光、近红外、波红外、长波红外)条件下, 对周期、占空比(线宽)、高度等偏振光栅的结构参数要求不同, 当波长越短, 需要越小尺寸的光栅结构才能保证高消光比。

1) 光栅高度、占空比保持不变, 光栅周期越小, 消光比越高, 光栅的加工难度越大;

2) 光栅高度、周期保持不变, 金属线栅占空比越大, 消光比越高, 线偏振光透过率越小;

3) 光栅周期、金属线栅占空比保持不变, 线栅高度越大, 消光比越高, 光栅的加工难度越大。

因此, 需要考虑制备工艺难度、兼顾高消光比和高的透过率的前提下确立光栅结构。一方面要选择对应波长无吸收的衬底以避免吸收损耗, 另一方面为减小表面反射损耗获得高透过率的光栅需要在偏振片的双面设计并镀制宽带减反膜层以保证单一偏振光的高透过率。

在偏振光栅结构设计方面, 笔者选择对长波红外无吸收的 Si 为集成光栅的衬底, 金属线栅为 Al, 如图 7(a) 所示, 分析了长波红外波段透射光偏振消光比与金属光栅周期、光栅线宽及光栅高度的关系, 如图 7(b-d) 所示, 从仿真结果可以看到, 在 8~14 μm 长波波段, 选择光栅周期 1 μm 、占空比 0.5、高度 0.35 μm 的参数条件, 可以使偏振消光比大于 300:1。

获得光栅的参数后, 笔者从器件实际应用的角度出发进行了高消光比高透过率亚微米光栅结构与探测器结构进行耦合及一体化设计。考虑了不同方向入射光对线列器件消光比的影响。由图 8(a)、8(b) 可以发现小倾斜角度(与光敏面法线夹角 $<15^\circ$)入射光条件小对消光比的影响很小, 倾斜角度大于 20° 后消光比急剧下降, 倾斜角度大于 40° 后消光比接近于 1。

对于超像元 (0° 、 45° 、 90° 、 135°) 偏振探测器, 如图 8(c) 给出了消光比与偏振光栅和光敏元的距离的关系。与线列偏振探测器相比, 要求偏振光栅与光敏元的距离更近才能获得高的消光比, 偏振光栅与光敏元的距离需要控制在 20 μm 之内才能保证消光比优于 10:1。通过偏振光栅与光敏元不同距离 (5 μm 、50

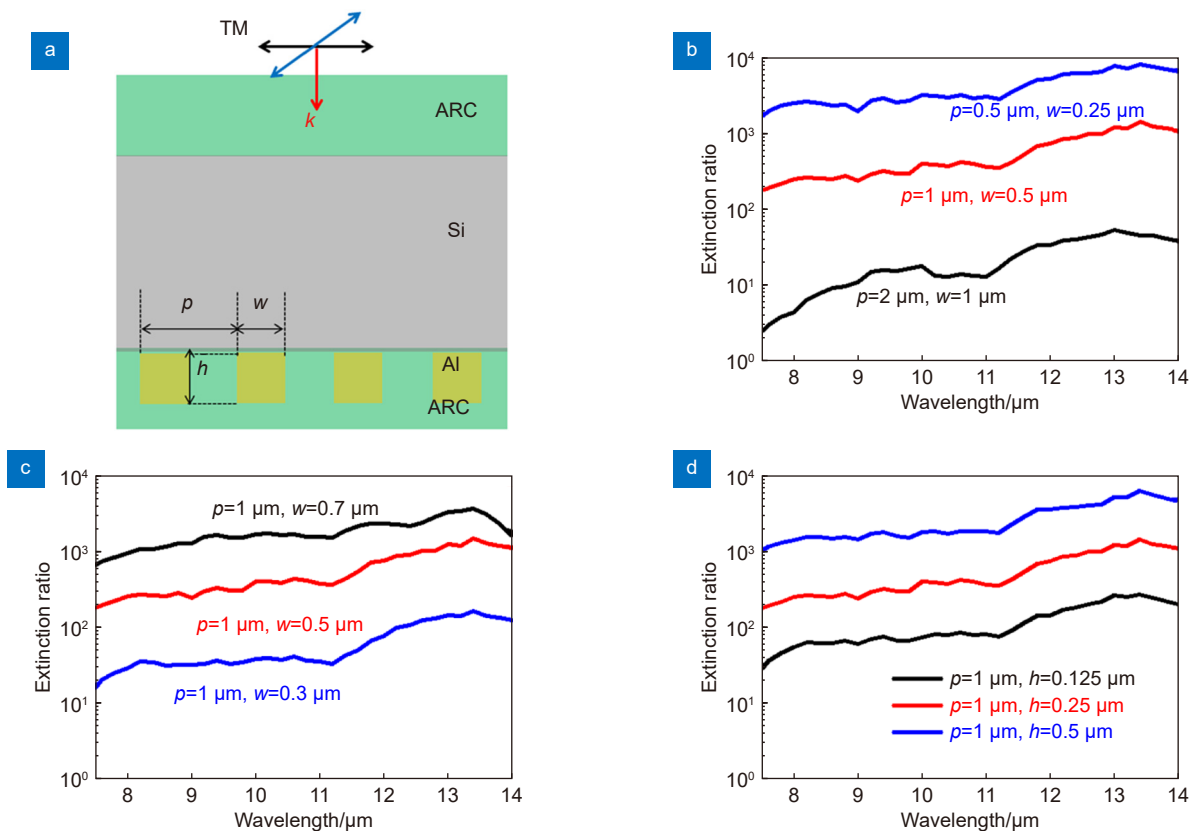


图 7 偏振光栅设计示意图以及消光比与光栅结构参数(周期、线宽、高度)的关系

Fig. 7 Schematic of the polarization grating design and the relationship between the extinction ratio and the grating structural parameters (period, linewidth, height)

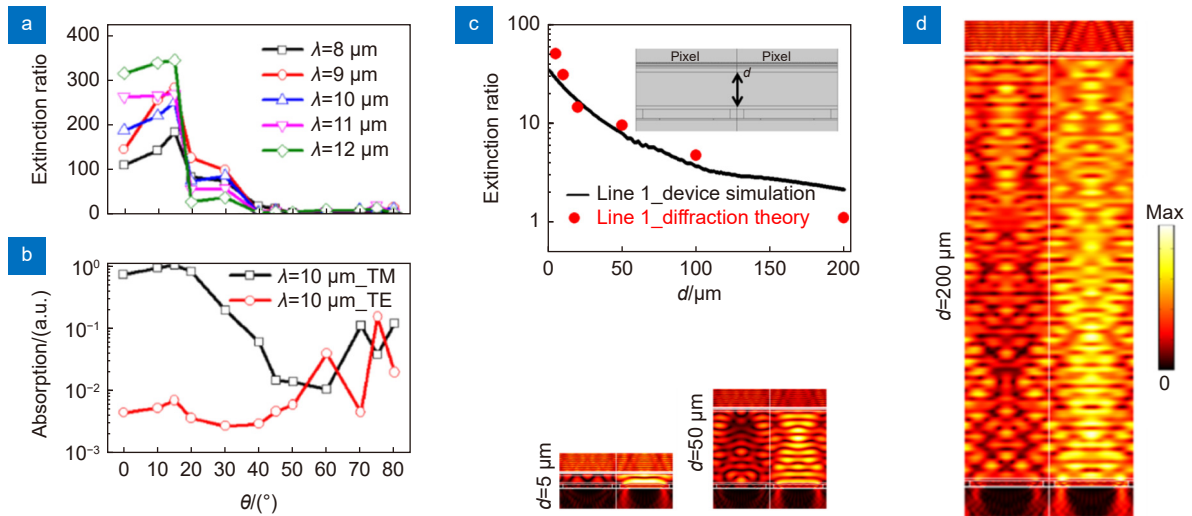


图 8 消光比 (a)、光吸收 (b) 与入射角度的关系; (c) 消光比与偏振片和光敏元距离的关系; (d) 不同距离 ($5 \mu\text{m}$ 、 $50 \mu\text{m}$ 、 $200 \mu\text{m}$) 光场分布^[39]

Fig. 8 Relationship between the extinction ratio (a) the light absorption (b) and the incident angle; (c) Extinction ratio and distance between the polarizer and photosensitizer; (d) Different distances ($5 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$) light field distribution^[39]

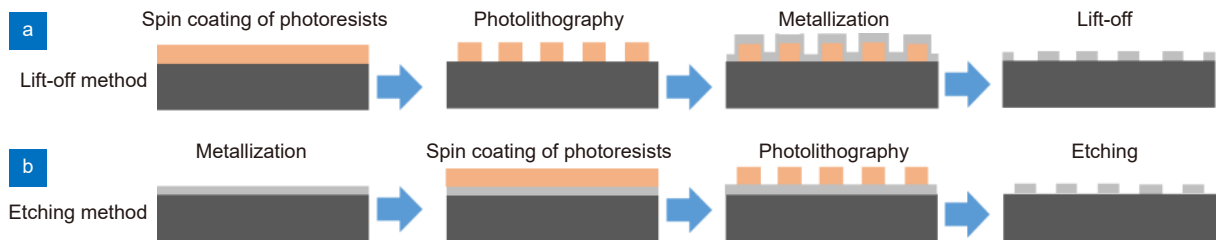


图 9 亚微米偏振光栅制备主要流程。(a) 剥离法; (b) 刻蚀法

Fig. 9 The main process of preparing the submicron polarization gratings. (a) Lift-off method; (b) Etching method

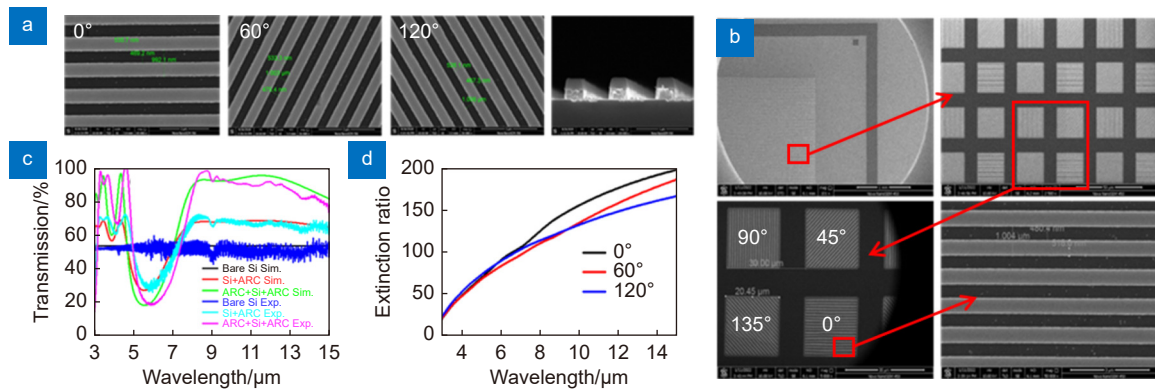


图 10 不同偏振角度光栅 SEM 图。(a) 0° 、 60° 、 120° 偏振方向光栅; (b) 0° 、 45° 、 90° 、 135° 偏振方向光栅; (c) 镀制减反膜前后光栅透射率; (d) 光栅偏振消光比^[39]

Fig. 10 SEM images of the gratings with different polarization angles. (a) 0° , 60° , 120° polarization direction grating; (b) 0° , 45° , 90° , 135° polarization direction grating; (c) Grating polarization light transmittance without and with antireflection film; (d) Polarization extinction ratio of the grating^[39]

μm 、 $200\ \mu\text{m}$) 的光场分布也可以看出, 距离增大造成了消光比的降低, 如图 8(d) 所示。

3.2 亚微米偏振光栅制备与集成工艺

偏振光栅的金属膜层材料可以选取铝、金等, 金属层的镀制有电子束蒸发、磁控溅射等。亚微米金属光栅的制备有两种方法, 一种方法是对金属层的湿法剥离, 另一种方法是对金属层进行刻蚀, 主要流程如图 9 所示。金属剥离工艺其优点是得到的亚微米图形边缘陡直, 图形尺寸精确, 但是当光栅的周期较小、金属线栅的占空比较大, 尤其是对金属层的厚度较厚时存在难以剥离的难题, 同时对光刻胶曝光厚度、显影等又提出了新的要求。金属刻蚀工艺主要包括湿法刻蚀和干法刻蚀。湿法刻蚀的优点是选择性好、重复性好、生产效率高、设备简单、成本低, 但是其缺点是钻刻现象比较严重、对图形的控制性较差, 不能用于小的特征尺寸, 同时会产生大量有毒有害的化学废液。干法刻蚀优点是各向异性较好, 选择比较高, 可控性、重复性较好, 处理过程未引入化学废液污染, 同时洁净度也较高, 但是也存在设备复杂、成本高等缺点。

在硅衬底上采用干法刻蚀法制备的金属铝光栅, 包括 0° 、 60° 、 120° 偏振方向光栅和 0° 、 45° 、 90° 、 135° 偏振方向光栅, 金属线栅均匀、陡直度好, 如图 10(a)、图 10(b) 所示。为了保证偏振光透过率, 在偏振片的正反两面镀制了宽带减反膜层, 在 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段的透过率大于 90% , 偏振消光比大于 $100:1$, 如图 10(c)、10(d) 所示。

获得高消光比偏振片后, 通过钢柱等将偏振片与探测器集成。优点是混成芯片与偏振结构可以各自制备, 可以避免偏振结构的制备工艺有可能对芯片性能造成影响, 提升偏振探测器的成品率。偏振结构与混成芯片互连时对不同偏振角度与像元的一一对应精度要求更高, 尤其对偏振片与光敏元的距离控制、偏振片和光敏面的面形控制更严格。互连结构在封装过程中有可能影响整个组件的可靠性。

3.3 偏振集成探测器的测试方法

集成后的器件进行红外偏振探测性能的测试。偏振消光比的测试是在已有的红外焦平面组件测试评价系统上增加起偏器, 起偏器需要紧贴面源黑体与被测器件窗口以减小不同偏振方向杂散光进入窗口引起串扰, 获得偏振辐射进行测试。起偏器需要采用高消光

比偏振片, 对起偏器进行 360° 旋转扫描, 同时测试不同偏振方向像元的响应值, 通过不同偏振角度对应的最大最小值的比值计算其消光比。在理想条件下, 需要将起偏器进行液氮冷却, 最大限度地减少包括起偏器自身辐射导致的杂散光串扰^[20], 如图 11(a) 所示, 以此得到更接近器件真实的消光比。

笔者所在课题组将偏振片与长波红外探测器集成获得了像元规模 $512\times 4\times 3$ 制冷型超晶格长波红外偏振集成焦平面^[39-41], 如图 11(b) 所示。组件截止波长 $10.65\ \mu\text{m}$ 、峰值探测率 $5.29\times 10^{10}\ \text{cm}\ \text{Hz}^{1/2}\ \text{W}^{-1}$ 、有效像元率 98.2% 、非均匀性 7.2% 、动态范围 $66\ \text{dB}$, 0° 、 60° 、 120° 偏振光敏元的消光比分别为 $50:1$ 、 $49:1$ 、 $45:1$, 如图 11(c) 所示。对不同方向入射光以及偏振光栅与像元间的距离对消光比的影响进行了分析, 并完成了对外场目标偏振成像效能验证^[39]。

3.4 偏振图像数据重构

对于偏振成像, 对应的斯托克斯矢量分量 (S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3)、偏振度 (DOP, 公式中写作 D_{OP}) 和偏振角 (AOP, 公式中写作 A_{OP}) 的计算公式为^[42-45]

$$s = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 + I_{90} \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \\ I_L - I_R \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$D_{OP} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}, \quad (2)$$

$$A_{OP} = \frac{1}{2} \arctan \frac{S_2}{S_1}, \quad (3)$$

其中 I_0 、 I_{45} 、 I_{90} 、 I_{135} 、 I_L 、 I_R 分别为 0° 、 45° 、 90° 、 135° 偏振方向以及左旋、右旋偏振光强度, S_0 、 S_1 、 S_2 和 S_3 分别表示四个斯托克斯向量分量。如果仅考虑线偏振, 则线偏振度则可以表示为 $D_{OLP} = \sqrt{S_1^2 + S_2^2} / S_0$ 。如果偏振方向由 0° 、 60° 、 120° 构成, 对应的斯托克斯分量可以表示为

$$s = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} I_0 + I_{60} + I_{120} \\ I_0 - I_{60} - I_{120} \\ \sqrt{3}(I_{120} - I_{60}) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

由于人类视觉无法直接感知偏振系统, 已经开发了各种映射偏振信息被呈现用于显示, 其中包括从偏振到颜色的映射。最常见的偏振颜色之一映射基于人类颜色之间的相似性视觉和昆虫偏振视觉, 因此在强度、偏振度、偏振角成像的基础上, 美国新南威尔士大学 Tyo 等人提出了偏振彩色成像^[46], 将偏振角、偏振度、强度分别与色调 (H)、饱和度 (S) 和明度 (V) 一一映射, 具体可以表示为

$$2D_{OP} \rightarrow H, \quad D_{OLP} \rightarrow S, \quad s_0 \rightarrow V. \quad (5)$$

这种映射具有正交极化的优点, 偏振度对应的信息 (s_1 和 s_2) 转化为正交颜色感知通道, 包括红色/绿色和蓝色/黄色对置。图 12 给出了不同方式的成像效果对比。

在偏振编码成像方面, 美国加州大学洛杉矶分校

的 Ozcan 教授在新的光学系统结构中引入了偏振编码机制^[47], 使用单个衍射处理器通过偏振多路复用执行一组或多个复杂的线性转换并结合深度学习等数据驱动方法进行不同的输入和输出偏振组合完成全偏振光计算与融合, 极大地增强了光学信息处理系统的图像分类、分割、加密和滤波等功能。

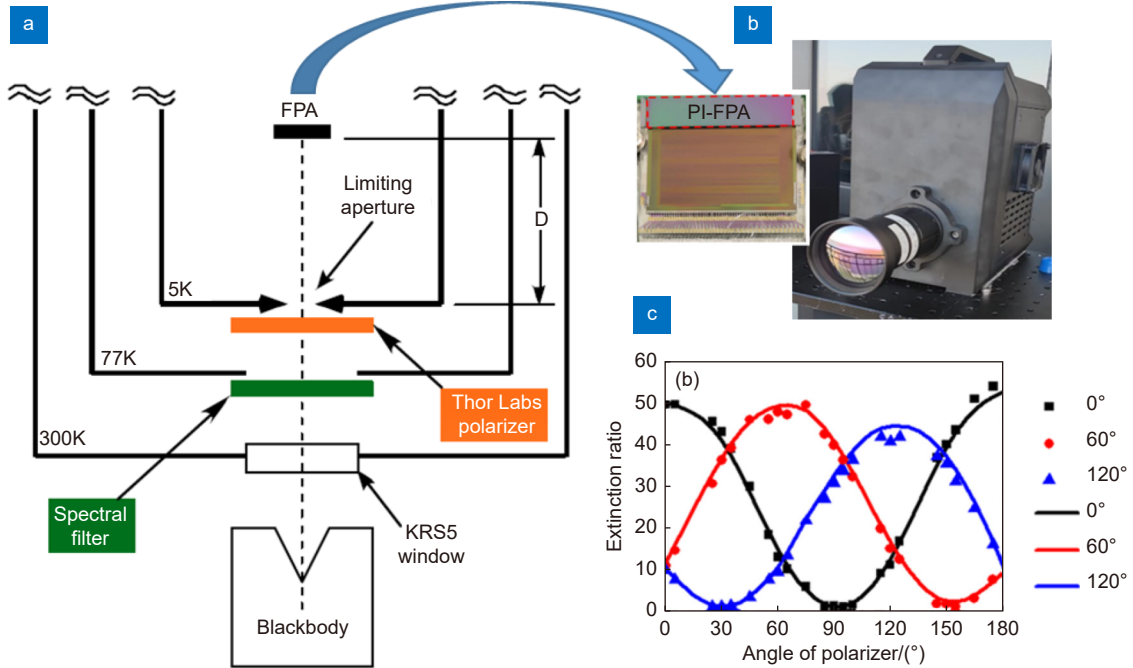


图 11 (a) 偏振集成探测器测试系统示意图^[20]; (b) 512×4×3 制冷型 InAs/GaSb 超晶格长波红外偏振集成焦平面芯片及组件; (c) 组件消光比测试^[39]

Fig. 11 (a) Schematic diagram of the polarization integrated detector testing system^[20]; (b) 512 × 4 × 3 InAs/GaSb superlattice long wave infrared polarization integrated focal plane chips and module; (c) Polarization extinction ratio test results of module^[39]

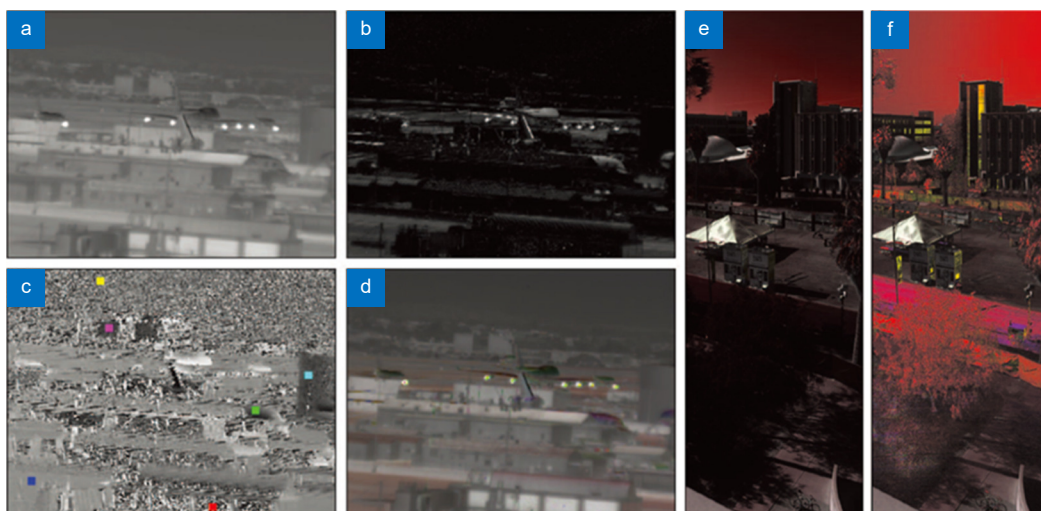


图 12 (a) 强度成像; (b) 偏振度成像; (c) 偏振角成像; (d) HSV 伪彩色成像; (e) 优化算法 HSV 伪彩色成像; (f) 最优算法 HSV 伪彩色成像^[46]

Fig. 12 (a) Intensity imaging; (b) Degree of polarization imaging; (c) Angle of polarization imaging; (d) HSV pseudo color imaging; (e) Optimization algorithm HSV pseudo color imaging; (f) Optimal algorithm HSV pseudo color imaging^[46]

4 偏振探测典型应用

偏振成像可用于反伪装、抗干扰、提高复杂背景下目标的探测识别能力。近年来, 美国空军实验室(AFRL)、美国亚利桑那大学、英国国防科技实验室等机构分别针对小型遥控无人机、伪装卡车、地雷等典型目标开展了偏振成像测试与应用。此外, 偏振集成探测器在面部识别^[48-49]、无人驾驶道路识别^[50-51]、海面漏油检测^[52-53]、水下成像^[33]及医疗检测^[54-56]等领域也显示出巨大的优势与前景。

1) 低小慢目标探测

美国空军实验室开展了对空目标偏振成像跟踪实验^[57]。对小型遥控无人机在多云天空、树林、草地等不同背景下进行长波红外偏振成像实验, 如图13所示。与长波红外强度成像相比, 长波红外偏振成像信背比提升了3.4~35.6倍, 最大虚警率由0.52降低为0.01。在多云、雾霾、树林等的天空背景下, 长波红外偏振成像可以有效抑制杂波, 更能凸显出目标。

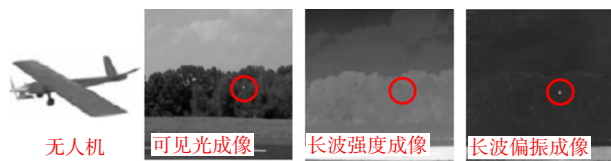


图13 小型遥控无人机长波红外偏振成像与可见光、红外强度成像结果对比^[57]

Fig. 13 Comparison of the long wave infrared polarization imaging with the visible and infrared intensity imaging results for small remote control unmanned aerial vehicles^[57]

2) 丛林背阴伪装目标探测

美国亚利桑那大学 Tyo 等人对草地背阴下卡车进行了可见光及长波红外强度成像和偏振成像对比实验^[58], 如图14所示。在目标与背景辐射强度相近或者目标被半遮挡/遮挡时, 传统强度成像技术很难分辨出树荫下的两辆卡车, 而偏振成像可以清晰地将目标从背景中凸显出来。

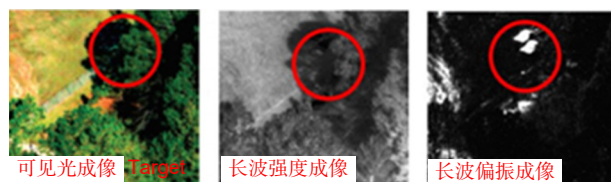


图14 树荫下的两辆卡车红外偏振成像与红外强度成像结果对比^[58]

Fig. 14 Comparison of the infrared polarization imaging and the infrared intensity imaging results between two trucks under tree shade^[58]

3) 地下掩体目标探测

英国国防科技实验室利用红外偏振技术开展扫雷实验^[59]。长波红外偏振成像利用地下掩体目标辐射产生的扰动偏振信息以区分识别目标与背景。图15为地雷的传统成像和偏振成像对比图, 由图中可以看出, 红外偏振成像可以在杂乱的草丛、沙砾中清晰地分辨出掩埋在地下的地雷, 该技术在掩体、遮蔽目标检测方面相对于强度成像呈现出更大的优势。

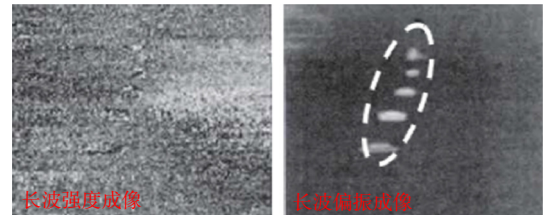


图15 地雷长波红外偏振成像与红外强度成像结果对比^[59]

Fig. 15 Comparison of the long wave infrared polarization imaging and infrared intensity imaging for landmines^[59]

4) 海面杂波背景舰船目标探测

笔者所在课题组利用研制的高消光比长波偏振探测组件开展了海面舰船目标的成像实验。图16为薄雾等天候条件下对海面舰船的偏振成像与强度成像对比。在薄雾等天候条件下目标表面温度与水温相近, 由此单一的强度探测会产生热交叉现象。在红外热成像中, 往往会受到水杂波的影响导致信背比降低, 很难从强度图像中分辨出目标。但舰船目标和海面的红外偏振特性具有较大差异, 可以通过获得红外偏振度和偏振角图像显著提升信背比, 偏振信背比较强度信背比提升120倍, 有助于解决在海面背景下热交叉目标的探测难题, 提升目标探测识别能力。

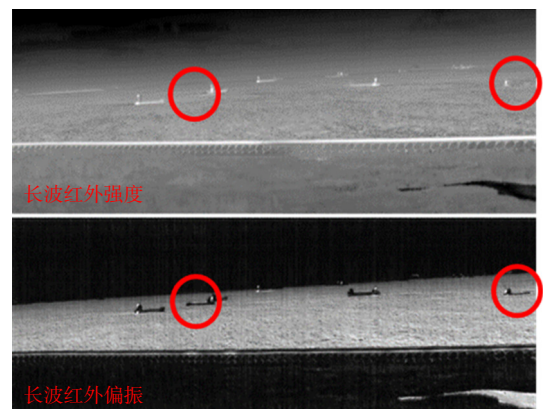


图16 水面舰船目标长波红外偏振成像与红外强度成像结果对比

Fig. 16 Comparison of the long wave infrared polarization imaging and the infrared intensity imaging for the ship targets

5) 面部偏振成像识别

夜间观察人类的唯一途径是利用传统的热成像技术, 但其成像质量会受鬼影效应的影响, 导致人体识别所需的详细面部特征丢失。然而当强度图像中包含偏振信息时, 人们便可获得精细的面部细节, 以供面部识别算法使用。近年来, 美国陆军研究实验室 (ARL) 计算与信息科学部的实验物理学家 Gurton 课题组在偏振成像面部识别方面做了大量工作, 并主要集中在用于合成增强可视化图像的机器学习算法上, 以便更好地对可见光图像、传统热图像及偏振图像进行信息匹配融合^[48-49], 旨在另辟蹊径为处在黑暗复杂环境中的士兵带来性能更高的视觉技术, 占据战场主动权。图 17 给出了传统红外热成像和偏振成像面部识别对比, 显示了偏振成像在面部识别方面的优势。

6) 无人驾驶道路偏振探测识别

目前, 在无人驾驶场景识别中, 采集的大多数样本都是基于 RGB 图像并涉及少许热图像。传统的基于视觉的道路检测技术通常应用颜色和纹理信息, 其

在夜间低照明条件下往往表现不佳。因为偏振图像是非常可靠地描述物体的重要物理特性, 根据道路的红外偏振特征及道路与背景的偏振特性差异, 实现对道路的单目、实时、全天检测。西北工业大学赵永强教授团队提出了一种基于分焦平面红外偏振成像的全时道路检测装置与方法, 如图 18 所示。通过偏振成像建立了一个长波红外分焦平面探测器对道路场景下的数据集 (LDDRS) 并进行了伪彩成像, 设计了一个道路区域感知特征融合模块, 充分发挥深度学习网络的

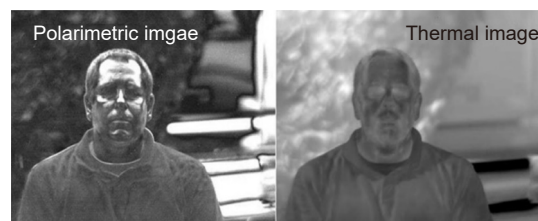


图 17 传统红外热成像和偏振成像面部识别对比

Fig. 17 Comparison facial recognition of the traditional infrared thermal imaging and the polarization imaging

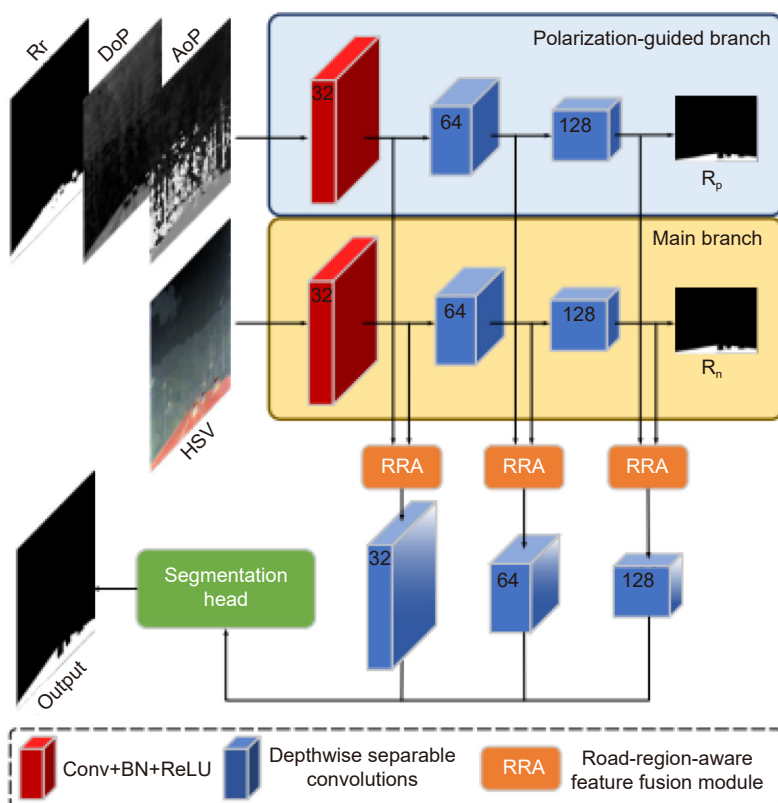


图 18 偏振识别网络示意图。偏振导向分支和主分支与道路区域特征模块感知融合,

并将其馈送到控制头部中枢进行智能决策

Fig. 18 Schematic diagram of the polarization recognition network. Polarization oriented branches and main branches are perceived and fused with the road area feature module, and fed back to the control head center for intelligent decision-making

优势, 具有更快的识别速度和更高的识别精度^[51,60]。

7) 海面漏油偏振成像检测

由于海面油的温度与水温相差极小, 区分油的温差对传统的热成像仪的灵敏度要求极高。偏振成像利用油与水的偏振特性差异, 意大利那不勒斯帕泰诺佩大学 Nunziata 教授团队开展了海面漏油检测, 图 19 分别给出了偏振成像与传统热成像的对比, 偏振成像对比度提升明显^[53]。另外, 中国地质大学陈启浩教授团队^[61]、中国石油大学宋冬梅教授团队^[62]也分别进行了海面漏油的偏振成像检测实验研究。

8) 医疗偏振成像检测

癌症的术中划定是肿瘤学中的一个重要问题。一种可靠的对恶性乳腺组织的界定检测方法将降低模糊阳性边缘而导致的再次切除率。美国罗切斯特大学 Yaroslavsky 教授团队提出了一种识别乳腺癌边缘的荧光偏振成像和偏振敏感 (PS) 光学相干断层扫描 (OCT) 新方法^[63]。与标准 OCT 相比, 由偏振敏感光学相干断层扫描和荧光偏振成像相结合显示了癌症与结缔组织之间更高的对比度, 如图 20 所示。此技术有望用于术中乳腺癌的划定。

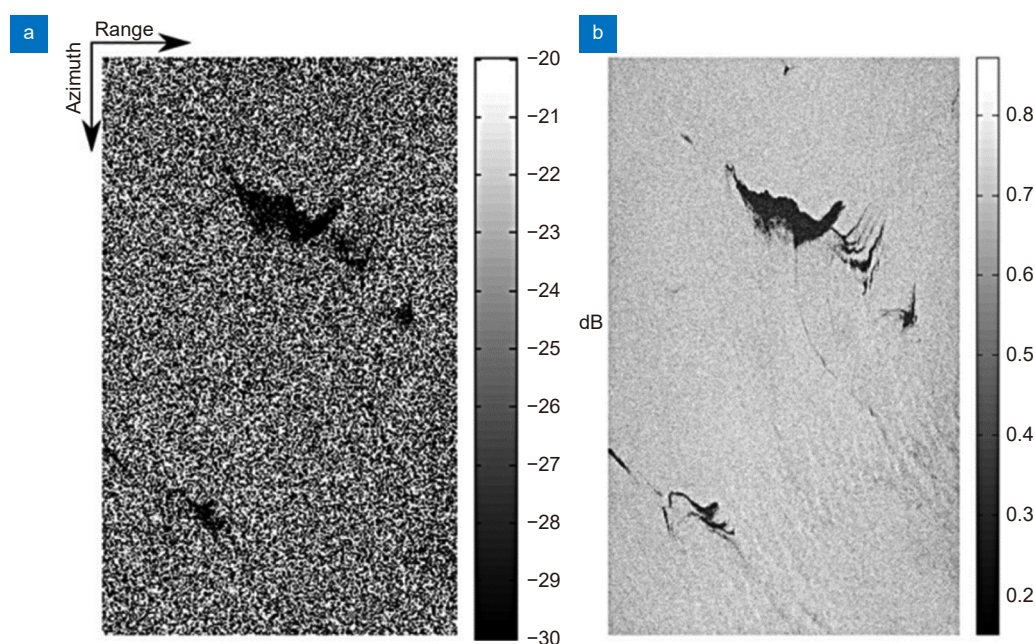


图 19 传统红外热成像和偏振成像海面漏油检测对比^[53]

Fig. 19 Comparison of the traditional infrared thermal imaging and the polarization imaging for detecting oil spills on the sea surface^[53]

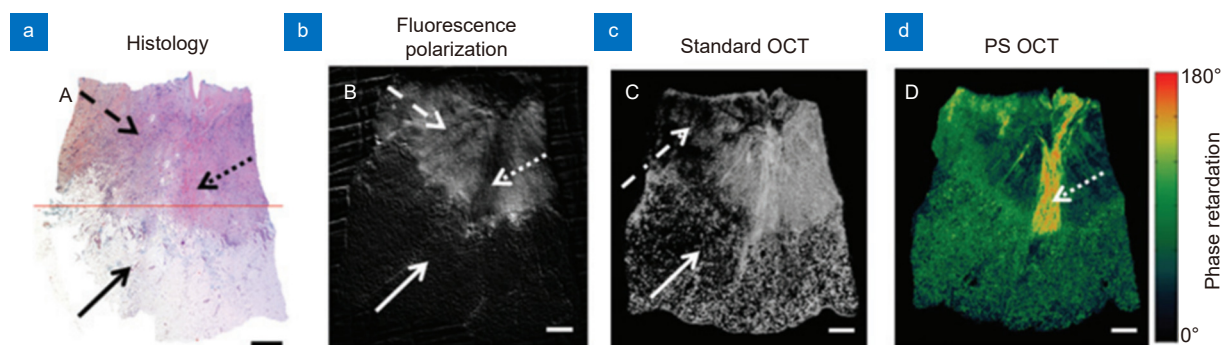


图 20 传统 OCT 成像与荧光偏振成像和偏振敏感光学相干断层扫描成像对比^[63]

Fig. 20 Comparison of the traditional OCT imaging with the fluorescence polarization imaging and the polarization sensitive optical coherence tomography imaging^[63]

5 结论与展望

片上集成的红外偏振探测芯片作为下一代新型光电成像技术的重要载体之一,可以同时获取到红外辐射的强度和偏振等多维信息,且具有体积小、可靠性高等优势,是未来红外偏振成像系统的发展方向。本文第一、二部分介绍了红外偏振集成探测器概念内涵与研究进展,从最早的区域偏振集成探测器到像元级偏振集成探测器,从线列偏振集成探测器到面阵偏振集成探测器的发展历程。第三部分介绍了红外偏振集成探测器关键技术,主要包括偏振集成探测器一体化结构设计及相关参数对器件性能的影响,介绍了亚微米偏振光栅结构的制备方法、集成工艺以及偏振性能测试系统等。第四部分主要介绍了红外偏振集成探测器成像的伪彩色图像重构方法以及其在复杂场景下典型目标探测与识别中的应用。第五部分介绍了上海技物所长波红外偏振焦平面组件的研制及偏振成像效能验证的新进展。

红外偏振成像基于某些场景下的应用需求表现出较大的优势,但同时也面临着接受辐射能量偏振信号过滤导致的信噪比降低以及空间分辨率降低的巨大挑战,需要在硬件和软件两方面持续努力突破现有的技术瓶颈。在偏振集成器件性能方面,需要协同超表面结构调控光场继续提高偏振集成探测器的消光比;在图像重构与融合方面,需要通过偏振编码算法理清目标和背景的偏振特性以及不同媒介中偏振的传输特性等,并在相关的应用场景中体现其对典型目标成像探测中信背比大幅提升的重要价值。

利益冲突:所有作者声明无利益冲突

参考文献

- [1] Rust D M, Thompson K E. An integrated imaging detector of polarization and spectral content[J]. *Remote Sens Rev*, 1994, 8(1-3): 215-225.
- [2] Wang X, Su Z H, Zhao J B, et al. Sequence-interleaving mapping method for direction of polarization[J]. *Journal of Applied Optics*, 2021, 42(5): 877-883.
王霞, 苏子航, 赵家碧, 等. 基于交织序列的偏振方向映射方法[J]. *应用光学*, 2021, 42(5): 877-883.
- [3] Andreou A G, Kalayjian Z K. Polarization imaging: principles and integrated polarimeters[J]. *IEEE Sens J*, 2002, 2(6): 566-576.
- [4] Chen C J, Choi K K, Rokhsinon L, et al. Corrugated quantum well infrared photodetectors for polarization detection[J]. *Appl Phys Lett*, 1999, 74(6): 862-864.
- [5] Apalkov V, Ariyawansa G, Perera A G U, et al. Wasilewski. Polarization sensitivity of quantum well infrared photodetector coupled to a metallic diffraction grid[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2010, 46(6): 877-883.
- [6] Kim J O, Yoon S, Kang B, et al. Linear polarization detection of Type II InAs/GaSb superlattice infrared photodetectors[C]// *Asia Communications and Photonics Conference 2015*, Hong Kong, China, 2015: ASu5A. 5. <https://doi.org/10.1364/ACPC.2015.ASu5A.5>.
- [7] Li Q, Li Z F, Li N, et al. High-polarization-discriminating infrared detection using a single quantum well sandwiched in plasmonic micro-cavity[J]. *Sci Rep*, 2014, 4(1): 6332.
- [8] Ogawa S, Masuda K, Takagawa Y, et al. Polarization-selective uncooled infrared sensor with asymmetric two-dimensional plasmonic absorber[J]. *Opt Eng*, 2014, 53(10): 107110.
- [9] Yang J K, Seo M K, Hwang I K, et al. Polarization-selective resonant photonic crystal photodetector[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 93(21): 211103.
- [10] Li W, Coppens Z J, Besteiro L V, et al. Circularly polarized light detection with hot electrons in chiral plasmonic metamaterials[J]. *Nature Commun*, 2015, 6(1): 8379.
- [11] Li Z C, Liu W W, Cheng H, et al. Realizing broadband and invertible linear-to-circular polarization converter with ultrathin single-layer metasurface[J]. *Sci Rep*, 2016, 5(1): 18106.
- [12] Bai J, Wang C, Chen X H, et al. Chip-integrated plasmonic flat optics for mid-infrared full-Stokes polarization detection[J]. *Photonics Res*, 2019, 7(9): 1051-1060.
- [13] Basiri A, Chen X H, Bai J, et al. Nature-inspired chiral metasurfaces for circular polarization detection and full-Stokes polarimetric measurements[J]. *Light Sci Appl*, 2019, 8(1): 78.
- [14] Bai J, Wang C, Chen X H, et al. Chip-integrated plasmonic flat optics for mid-infrared polarization detection[C]// *Applications and Technology, CLEO_AT 2018*, San Jose, 2018: JW2A. 19.
- [15] Wei J X, Xu C, Dong B W, et al. Mid-infrared semimetal polarization detectors with configurable polarity transition[J]. *Nat Photonics*, 2021, 15(8): 614-621.
- [16] Wei J X, Chen Y, Li Y, et al. Geometric filterless photodetectors for mid-infrared spin light[J]. *Nat Photonics*, 2023, 17(2): 171-178.
- [17] Wang R, Li T, Shao X M, et al. Subwavelength gold grating as polarizers integrated with InP-based InGaAs sensors[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2015, 7(26): 14471-14476.
- [18] Feng B, Chen Y F, Sun D, et al. Precision integration of grating-based polarizers onto focal plane arrays of near-infrared photovoltaic detectors for enhanced contrast polarimetric imaging[J]. *Int J Extreme Manuf*, 2021, 3(3): 035201.
- [19] Sun D, Li T, Yang B, et al. Research on polarization performance of InGaAs focal plane array integrated with superpixel-structured subwavelength grating[J]. *Opt Express*, 2019, 27(7): 9447-9458.
- [20] Hubbs J E, Gramer M M, Maestas-Jepson D, et al. Measurement of the radiometric and polarization characteristics of a microgrid polarizer infrared focal plane array[J]. *Proc SPIE*, 2006, 6295: 62950C.
- [21] Cruz-Cabrera A A, Kemme S A, Wendt J R, et al. Edge termination effects on finite aperture polarizers for polarimetric imaging applications at mid-wave IR[J]. *Proc SPIE*, 2006, 6126: 61260K.
- [22] Forrai D P, Endres D W, Devitt J W, et al. Development of a MWIR polarimetric FPA[J]. *Proc SPIE*, 2007, 6660: 666007.
- [23] Malone N R, Hampf A, Gordon E E, et al. Detection comparisons between LWIR and MWIR polarimetric sensors[J]. *Proc SPIE*, 2008, 6972: 69720P.

- [24] Gruev V, Perkins R, York T. CCD polarization imaging sensor with aluminum nanowire optical filters[J]. *Opt Express*, 2010, **18**(18): 19087–19094.
- [25] POWELL S B, GRUEV V. Calibration methods for division-of-focal-plane polarimeters[J]. *Opt Express*, 2013, **21**(18): 21039–21055.
- [26] Baker G, Wilson M, Coulter P. Development and results of NIR polarization camera[J]. *Proc SPIE*, 2007, **6567**: 65671L.
- [27] Zhao Y Q, Li N, Zhang P, et al. Infrared polarization perception and intelligent processing[J]. *Infrared Laser Eng*, 2018, **47**(11): 1102001.
赵永强, 李宁, 张鹏, 等. 红外偏振感知与智能处理[J]. *红外与激光工程*, 2018, **47**(11): 1102001.
- [28] Zhang J C, Luo H B, Liang R G, et al. Sparse representation-based demosaicing method for microgrid polarimeter imagery[J]. *Opt Lett*, 2018, **43**(14): 3265–3268.
- [29] Luo H B, Zhang J C, Gai X Q, et al. Development status and prospects of polarization imaging technology (Invited)[J]. *Infrared Laser Eng*, 2022, **51**(1): 20210987.
罗海波, 张俊超, 盖兴琴, 等. 偏振成像技术的发展现状与展望(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2022, **51**(1): 20210987.
- [30] Zhou Y W, Li Z F, Zhou J, et al. High extinction ratio super pixel for long wavelength infrared polarization imaging detection based on plasmonic microcavity quantum well infrared photodetectors[J]. *Sci Rep*, 2018, **8**(1): 15070.
- [31] Rebhan D, Rosenberger M, Notni G. Principle investigations on polarization image sensors[J]. *Proc SPIE*, 2019, **11144**: 111440A.
- [32] Lin G H, Zhang M, Meng L W, et al. Polarizer fabricated onto infrared focal detector[J]. *Laser Infrared*, 2019, **49**(10): 1234–1238.
林国画, 张敏, 孟令伟, 等. 集成式偏振红外焦平面探测器的制备[J]. *激光与红外*, 2019, **49**(10): 1234–1238.
- [33] Xue F D, Jin W Q, Qiu S, et al. Airborne optical polarization imaging for observation of submarine Kelvin wakes on the sea surface: imaging chain and simulation[J]. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2021, **178**: 136–154.
- [34] Chu J K, Zhang R, Wang Z W, et al. Progress on bio-inspired polarized skylight navigation sensor[J]. *Chin Sci Bull*, 2016, **61**(23): 2568–2577.
褚金奎, 张然, 王志文, 等. 仿生偏振光导航传感器研究进展[J]. *科学通报*, 2016, **61**(23): 2568–2577.
- [35] Li J S, Chu J K, Zhang R, et al. Bio-inspired attitude measurement method using a polarization skylight and a gravitational field[J]. *Appl Opt*, 2020, **59**(9): 2955–2962.
- [36] Wan M J, Gu G H, Qian W X, et al. Stokes-vector-based polarimetric imaging system for adaptive target/background contrast enhancement[J]. *Appl Opt*, 2016, **55**(21): 5513–5519.
- [37] Zhou X J, Gu G H, Ren K, et al. Single-incidence polarimetry for optical characteristics[J]. *Optik*, 2019, **188**: 308–315.
- [38] Li J Y, Bao L, Jiang S, et al. Inverse design of multifunctional plasmonic metamaterial absorbers for infrared polarimetric imaging[J]. *Opt Express*, 2019, **27**(6): 8375–8386.
- [39] Zhou J, Zhou Y, Shi Y, et al. A compact polarization-integrated long wavelength infrared focal plane array based on InAs/GaSb superlattice[J]. *Sci China Inf Sci*, 2022, **65**(2): 122407.
- [40] Zhou J, Zhou Y, Shi Y, et al. The light crosstalk suppression between adjacent pixels in polarization-integrated infrared detectors[J]. *Proc SPIE*, 2020, **11427**: 1142738.
- [41] Zhou J, Zhou Y, Wang F F, et al. Design and analysis high extinction ratio monolithic polarization-integrated super pixel long wavelength infrared detectors[J]. *Proc SPIE*, 2021, **11763**: 117638G.
- [42] Pors A, Nielsen M G, Bozhevolnyi S I. Plasmonic metagratings for simultaneous determination of Stokes parameters[J]. *Optica*, 2015, **2**(8): 716–723.
- [43] Ahmed A, Zhao X J, Gruev V, et al. Residual interpolation for division of focal plane polarization image sensors[J]. *Opt Express*, 2017, **25**(9): 10651–10662.
- [44] Yang Z Y, Wang Z K, Wang Y X, et al. Generalized Hartmann-Shack array of dielectric metalens sub-arrays for polarimetric beam profiling[J]. *Nat Commun*, 2018, **9**(1): 4607.
- [45] Rubin N A, D'Aversa G, Chevalier P, et al. Matrix Fourier optics enables a compact full-Stokes polarization camera[J]. *Science*, 2019, **365**(6448): eaax1839.
- [46] Tyo J S, Ratliff B M, Alenin A S. Adapting the HSV polarization-color mapping for regions with low irradiance and high polarization[J]. *Opt Letters*, 2016, **41**(20): 4759–4762.
- [47] Li J X, Hung Y C, Kulce O, et al. Polarization multiplexed diffractive computing: all-optical implementation of a group of linear transformations through a polarization-encoded diffractive network[J]. *Light Sci Appl*, 2022, **11**(1): 153.
- [48] Short N, Hu S W, Gurram P, et al. Improving cross-modal face recognition using polarimetric imaging[J]. *Opt Lett*, 2015, **40**(6): 882–885.
- [49] Gurton K P, Yuffa A J, Videen G. LWIR polarimetry for enhanced facial recognition in thermal imagery[J]. *Proc SPIE*, 2014, **9099**: 90990G.
- [50] Li N, Zhao Y Q, Pan Q, et al. Full-time monocular road detection using zero-distribution prior of angle of polarization[C]//*European Conference on Computer Vision*, Glasgow, 2020: 457–473. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58595-2_28.
- [51] Li N, Zhao Y Q, Pan Q, et al. Illumination-invariant road detection and tracking using LWIR polarization characteristics[J]. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2021, **180**: 357–369.
- [52] Zhang B, Perrie W, Li X F, et al. Mapping sea surface oil slicks using RADARSAT-2 quad-polarization SAR image[J]. *Geophys Res Lett*, 2011, **38**(10): L10602.
- [53] Nunziata F, Gambardella A, Migliaccio M. On the degree of polarization for SAR sea oil slick observation[J]. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2013, **78**: 41–49.
- [54] Anderson R R. Polarized light examination and photography of the skin[J]. *Arch Dermatol*, 1991, **127**(7): 1000–1005.
- [55] Jacques S L, Ramella-Roman J C, Lee K. Imaging skin pathology with polarized light[J]. *J Biomed Opt*, 2002, **7**(3): 329–340.
- [56] Salomatina-Motts E, Neel V A, Yaroslavskaya A N. Multimodal polarization system for imaging skin cancer[J]. *Opt Spectrosc*, 2009, **107**(6): 884–890.
- [57] Ratliff B M, LeMaster D A, Mack R T, et al. Detection and tracking of RC model aircraft in LWIR microgrid polarimeter data[J]. *Proc SPIE*, 2011, **8160**: 816002.
- [58] Tyo J S, Goldstein D L, Chenault D B, et al. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. *Appl Opt*, 2006, **45**(22): 5453–5469.
- [59] Wang X, Xia R Q, Jin W Q, et al. Technology progress of infrared polarization imaging detection[J]. *Infrared Laser Eng*, 2014, **43**(10): 3175–3182.
王霞, 夏润秋, 金伟其, 等. 红外偏振成像探测技术进展[J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(10): 3175–3182.
- [60] Li N, Zhao Y Q, Wu R Y, et al. Polarization-guided road

detection network for LWIR division-of-focal-plane camera[J]. *Opt Lett*, 2021, **46**(22): 5679–5682.

- [61] Tong S W, Liu X G, Chen Q H, et al. Multi-feature based ocean oil spill detection for polarimetric sar data using random forest and the self-similarity parameter[J]. *Remote Sens*, 2019, **11**(4): 451.
- [62] Song D M, Zhen Z J, Wang B, et al. A novel marine oil spillage

identification scheme based on convolution neural network feature extraction from fully polarimetric SAR imagery[J]. *IEEE Access*, 2020, **8**: 59801–59820.

- [63] Patel R, Khan A, Quinlan R, et al. Polarization-sensitive multimodal imaging for detecting breast cancer[J]. *Cancer Res*, 2014, **74**(17): 4685–4693.

作者简介



周建 (1986-), 男, 博士, 中国科学院上海技术物理研究所副研究员, 主要研究方向为新型红外光电探测器。在超表面物理、微纳光子学、多物理场建模与仿真、偏振集成红外探测器件制备与测试等方面开展了深入的研究工作。作为项目负责人主持国家自然科学基金、基础加强等项目 6 项, 相关成果在 *Nano Energy*、*Optics Express*、*SCIENCE CHINA Information Sciences*、*Applied Physics Letters* 等国际期刊或会议上发表 20 余篇。

E-mail: zhoujian@mail.sitp.ac.cn



【通信作者】周易 (1986-), 男, 博士, 中国科学院上海技术物理研究所研究员、博士生导师。获国家优青、JW 科技委青年托举计划、上海市青年科技启明星、中科院青年创新促进会优秀会员等人才项目资助。主要从事量子结构超晶格红外探测器材料与器件方面的研究工作, 目前承担自然科学基金、重点基金、科技部重点专项、ZF 预研、JW 科技委主题项目等多个课题的研究工作, 在 *Small*、*APL*、*SST*、*JVST* 等国际期刊或会议发表论文 40 余篇。

E-mail: zhouyi@mail.sitp.ac.cn



【通信作者】陈建新 (1968-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 中国科学院上海技术物理研究所副所长。在半导体电子和光电子领域, 如量子级联激光器、量子阱激光器、异质结晶体管、高电子迁移率晶体管等方面有长期的研究积累。目前主要从事 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器及新型红外光电器件研究, 包括材料与器件结构设计、外延生长、器件制备及性能表征。

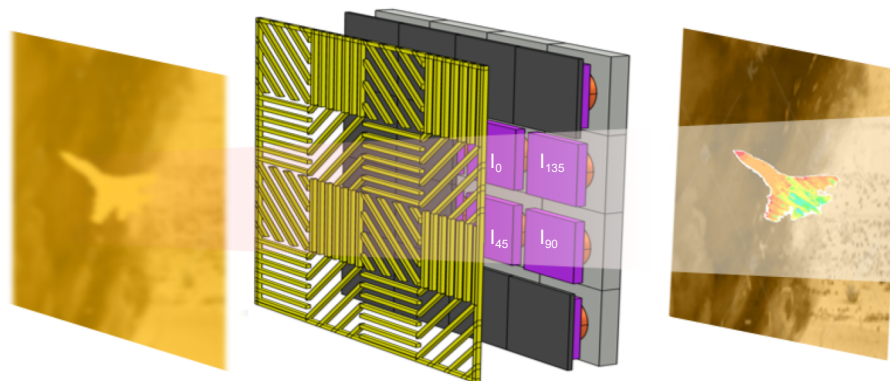
E-mail: Jianxinchen@mail.sitp.ac.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Research progress and applications of polarization integrated infrared photodetector

Zhou Jian¹, Zhou Yi^{1,3*}, Ni Xinyue², Wang Fangfang¹, Ying Xiangxiao¹, Huang Min¹,
Xu Zhicheng¹, Chen Fansheng^{2,3}, Liu Yunmeng¹, Chen Jianxin^{1,2*}



Basic concepts and connotations of polarization integrated detector imaging

Overview: As one of the important platforms of the fourth generation new photoelectric imaging technology, the polarization integrated detector can simultaneously obtain multi-dimensional information such as the intensity and polarization of infrared radiation, and has the advantages of small size and high reliability. It is the development direction of the future infrared polarization imaging system. We first introduce the concept and research progress of the polarization integrated detectors, from the earliest regional polarization integrated detectors to pixel level polarization integrated detectors, and from the linear polarization integrated detectors to the focal planar array polarization integrated detectors. The second part mainly introduces the key technologies of the polarization integrated detector, mainly including the integrated structure design and the influence of related parameters on device performance, the method of the submicron polarization grating structure integration process, and the performance testing system. The third part mainly introduces the pseudo color image reconstruction method of the polarization integrated detector imaging and its application to typical targets in complex scenes. The last part introduces the new progress of the long-wave infrared polarization focal plane of Shanghai Institute of Technical Physics.

Infrared polarization imaging shows great advantages based on the application requirements in some scenarios, but it also faces the huge challenge of reducing the signal-to-noise ratio and the spatial resolution caused by halving the received radiation energy. It needs to make continuous efforts to break through the existing technical bottlenecks in both hardware and software. In terms of the performance of polarization integrated devices, it is necessary to continue to improve the extinction ratio of the polarization integrated detector by cooperating with the metasurface structure to control the light field. In the aspect of image reconstruction and fusion, it is necessary to clarify the polarization characteristics of the target and background and the transmission characteristics of polarization through the polarization coding algorithm, and reflect its important value of significantly improving the signal-to-background ratio in the imaging detection of typical targets in relevant application scenarios.

Zhou J, Zhou Y, Ni X Y, et al. Research progress and applications of polarization integrated infrared photodetector[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(5): 230010; DOI: 10.12086/oe.2023.230010

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61904183, 61974152, 62004205, 62104236, 62104237, 62222412), National Key Research and Development Program of China (2022YFB3606800), Shanghai Rising-Star Program Sailing Program (21YF1455000, 22YF1455800), Shanghai Pilot Program for Basic Research-Chinese Academy of Sciences, Shanghai Branch (JCYJ-SHFY-2022-004) and Special Fund for Innovation of SITP, CAS (CX-399, CX-455)

¹National Key Laboratory of Infrared Detection Technologies, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; ²Key Laboratory of Intelligent Infrared Perception, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China; ³Hangzhou Institute for Advanced Study, UCAS, Hangzhou, Zhejiang 310024, China

* E-mail: zhouyi@mail.sitp.ac.cn; Jianxinchen@mail.sitp.ac.cn