

短波红外偏振成像技术的研究进展

李子园 金伟其

Research progress of short-wavelength infrared polarization imaging technologies

LI Ziyuan, JIN Weiqi

引用本文:

李子园, 金伟其. 短波红外偏振成像技术的研究进展[J]. 应用光学, 2023, 44(3): 643–654. DOI: 10.5768/JAO202344.0304003

LI Ziyuan, JIN Weiqi. Research progress of short-wavelength infrared polarization imaging technologies[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(3): 643–654. DOI: 10.5768/JAO202344.0304003

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0304003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

短波红外成像系统对激光光斑探测能力分析

Analysis of detection capability of shortwave infrared imaging system on laser spot

应用光学. 2018, 39(4): 574–578 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0406001>

红外偏振成像系统光学设计

Optical design of infrared polarization imaging system

应用光学. 2018, 39(3): 316–320 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0301003>

光电成像系统动态调制传递函数测量装置

Dynamic modulation transfer function measuring device for photoelectric imaging system

应用光学. 2021, 42(4): 592–596 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401004>

基于信息失真的光电成像系统优化方法

Optimization method of electro-optical imaging system based on information distortion

应用光学. 2017, 38(5): 689–693 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0501002>

EMCCD集成偏振-微光一体化成像技术研究

Research on polarization-low level integrated imaging technology based on EMCCD

应用光学. 2020, 41(2): 242–247 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0201002>

水下目标物偏振成像特性研究

Experimental study on polarization imaging characteristics of underwater targets

应用光学. 2019, 40(1): 27–32 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0101005>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 03-0643-12

短波红外偏振成像技术的研究进展

李子园, 金伟其

(北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 与传统成像系统相比, 偏振成像系统通过探测目标物在不同状态下的明显偏振差异, 提高对目标物的探测和识别能力, 因而被广泛应用于复杂环境或有伪装物的目标探测。特别是短波红外谱范围的信息探测可以提供人眼所不能看见的分辨率和细节, 是目前军事和民用领域的重点研究方向之一。这篇综述归纳总结了传统偏振成像系统的结构分类及其特点, 探讨了新型微纳偏振成像系统的研究进展, 并针对目前短波红外偏振成像技术存在的主要问题提供了可行性分析和建议。

关键词: 光电成像系统; 偏振成像技术; 短波红外; 新型微纳结构; 目标探测与识别

中图分类号: TN215

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0304003

Research progress of short-wavelength infrared polarization imaging technologies

LI Ziyuan, JIN Weiqi

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System (Ministry of Education), School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Compared with the traditional imaging systems, the polarization imaging systems are capable of improving the detection and recognition ability of the target by detecting the obvious polarization differences of the target in different states. Therefore, they have been widely used in complex environments or target detection with camouflage. In particular, the information detection in the short-wavelength infrared spectrum range can provide high resolution and details that cannot be seen by the human eyes, which is one of the key research directions in the military and civilian applications. First, the structural classification and characteristics of traditional polarization imaging systems were summarized. Then, the recent research progress of new micro-nano polarization imaging systems was discussed. Finally, the feasibility analysis and suggestions for the main problems of the current short-wavelength infrared polarization imaging technologies were provided.

Key words: optoelectronic imaging system; polarization imaging technology; short-wavelength infrared; novel micro-nano structure; target detection and recognition

引言

传统成像系统一般用于探测一定光谱波段的光辐射强度, 从而对该场景进行成像。而多光谱成像系统则可以对场景进行多个光谱波段的成

像, 进而提供某目标物或场景的材料分布信息。然而, 由于地物、植被和伪装等背景可能与目标物具有相当的辐射强度和辐射纹理, 能从复杂的背景辐射中更有效地探测和识别目标物的偏振成像

收稿日期: 2022-11-11; 修回日期: 2023-01-07

基金项目: 国防基础科研项目基金 (2019-JCJQ-ZD-006-00)

作者简介: 李子园 (1987—), 女, 博士, 副教授, 主要从事微纳加工、红外探测与成像、新型微纳光电器件等研究。

E-mail: ziyuan.li@bit.edu.cn

通信作者: 金伟其 (1961—), 男, 博士, 教授/博导, 主要从事夜视与红外技术、光电图像处理、光电检测与仪器等研究。

E-mail: jinwq@bit.edu.cn

系统便成为国内外研究的热点之一。特别是,可见光、近红外和短波红外通常与中波、长波红外具有互补关系。与中长波红外成像利用室温景物自身发射的热辐射不同,短波红外成像利用的是室温景物的反射进行成像或者利用高温物体的辐射成像。与可见光和近红外相比,人造材料在短波红外波长中更是有独特的反射方式,且短波红外具有更好的大气传输特性。因此,短波红外偏振成像技术可更加有效地区分自然物和人造物,提高复杂环境中目标物的探测及成像能力,不仅更容易发现被伪装的目标物,分辨背景辐射较强而自身辐射较弱的目标物,而且可提高在烟雾环境下的目标探测距离^[1],具有高识别度、全天候适应、微光夜视、隐秘主动成像、光学配置相对简便等突出的应用特征,被广泛应用于多个军事和民用领域,例如导弹追踪^[2]、地雷探测^[1,3]、军事目标伪装^[4]、医学诊断^[5-6]、海洋环境监测^[1]、航空遥感与大气探测^[7],以及空间碎片探测^[1]。

目前,根据采用的探测器或偏振光学成像方式的不同,已发展了多种具有特色的偏振成像模式。分时偏振成像系统^[8-10]结构设计简单,但无法获得同时刻的偏振图像,不利于对运动状态的目标进行探测。分振幅偏振成像系统^[9,11-13]可同时获得目标场景的各个偏振态,但系统结构复杂,体积庞大,对配准的要求也较高^[3,9]。也有研究人员利用分孔径偏振成像光学系统^[13-15]实现同一个焦平面探测器的成像,但需要多组相同的偏心光学子系统,通过在各子系统内设置偏振滤光片或者偏振片,再通过中继透镜来实现,因此光学系统复杂,微偏振滤光片的光学损失也会降低画面的质量^[3,9,14]。因此,随着微纳加工技术的飞速发展,利用先进的工艺直接将微光学偏振元件与焦平面探测器相结合的分焦平面偏振成像系统^[16-17]应运而

生,可有效减小对前端光学系统设计的要求和偏振成像系统的体积。近几年,通过半导体微纳结构的优化^[18-19],不仅可以实现高效的光电探测和成像,而且可以直接探测光偏振信号。这些新型的微纳结构对实现小体积可便携式偏振成像系统以及扩展在遥感、机器视觉和车载自主等领域的应用至关重要。

本文首先介绍了传统偏振成像系统的结构分类和特点,以及近几十年的发展历程,然后着重讨论了新型微纳偏振成像系统的研究进展,最后指出了国内外在短波红外偏振成像技术存在的主要问题,并给出了合理的建议。

1 传统偏振成像系统

传统的偏振成像方法与光谱成像相似,需要采集 3 个或 4 个图像^[1,3,9]来表征一个场景的偏振状态。由于分时获取多帧偏振成像中场景的任何运动都会导致伪影,可能掩盖真正的两极分化特征,因而存在时间图像配准问题,必须同时获取图像或尽快获取以尽量减少平台或场景运动引起的伪影。减小伪影的方法是同时获取多个图像,但空间配准就变成了需要解决的问题。由于分离引起的畸变光路,多重空间配准需要校正机械错位以及光学“错位”,故而变得复杂。虽然简单的测量极化信息的方法是使用单独的相机以及配备的独立光学元件来实现图像的共视,但是这种策略很难执行得当,因此许多新的集成技术逐渐被研发和使用。

1.1 分时偏振成像系统

一种常用的偏振成像方法,如图 1 所示,在摄像头系统前安装旋转偏振元件。通过旋转偏振元件可以调制从场景入射到焦平面的偏振光,并通过数据约简矩阵技术(data reduction matrix techni-

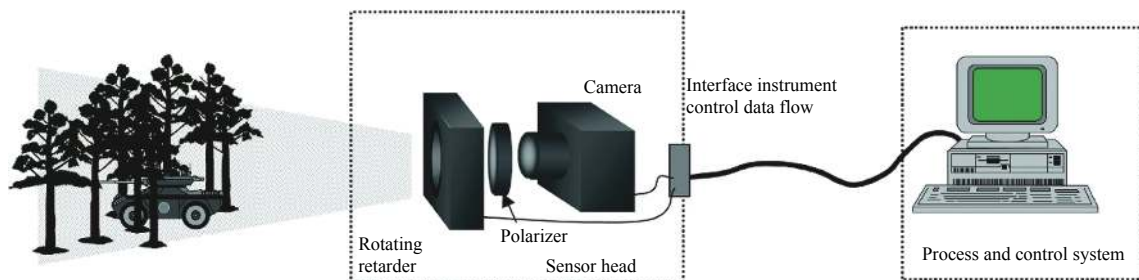


图 1 使用旋转偏振元件的偏振传感器^[9]

Fig. 1 Schematic diagram of polarization sensor using rotating polarization elements^[9] (reproduced with permission, copyright 2006, Optical Society of America)

ques) 重塑斯托克斯 (Stoke) 图像, 可用于产生线性极化、圆极化度或其他派生量 (例如方向或椭圆率) 的图像^[9]。2005 年美国的 Polaris Sensor Technologies 公司就利用旋转延迟器将红外光的偏振信息传送到偏振器传感头和液氮冷却的 MTC 焦平面阵列上, 用于探测水面游泳运动员^[8]。使用线性偏振对比度探测水上的目标物, 然后根据辐射对比度即可对目标物进行分类^[8]。2009 年, Lavigne 等人则研发了一套如图 2 所示的四波段偏振成像系统, 对长波红外、中波红外、短波红外以及可见光进行探测^[10]。通过在四波段成像系统前面安装同步旋转的偏振片, 按特定时间间隔可依次获得 0° 、 45° 、 90° 和 135° 的偏振图像。这种系统可以实现校准、数据采集和数据处理的全面自动化, 整个图像的捕获过程只需不到 2 min 30 s。

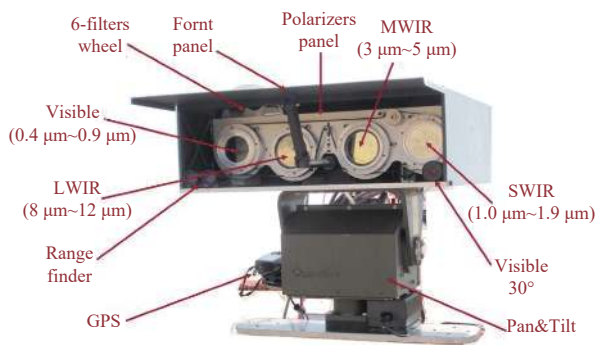


图 2 可见红外光谱偏振成像仪^[10]

Fig. 2 Visible and infrared spectral polarization imager^[10] (reproduced with permission, copyright 2009, SPIE)

这种方法虽然系统设计和数据分析方面都非常简单, 但存在一些明显的缺点。大多数情况下,

旋转元件已经是一个偏振器, 因而只能检测线性偏振态。此外, 场景和测试平台必须是静止的, 以避免引入帧间运动^[9]。为了保证图像的质量, 旋转速度要么太慢而无法实现更高的帧速率, 要么偏光片需要跟着场景逐步移动来获取运动间的图像。即使最近在连续旋转偏振器方面已取得一定成功^[8, 10], 在采集期间如果有较多场景传感器移动时, 仍会因为旋转元件引起的光束漂移而产生伪影。如果旋转中存在楔子或者元件有震颤, 也会导致光束漂移。

因此, 基于声光可调谐滤光片 (acousto-optic tunable filter, AOTF) 的偏振成像仪得到大力发展^[1, 20]。AOTF 利用声光衍射原理制成滤光片, 既是分光器件又是偏振器件, 可同时获得两个偏振方向互相垂直的衍射图像和一个未发生衍射的图像。2002 年, 美国陆军研究实验室 (U. S. army research laboratory, ARL) 设计了主要由 AOTF 和液晶相位可变延迟器 (liquid crystal variable retarder, LCVR) 组合而成的偏振光谱成像系统^[21], 如图 3 所示。通过 AOTF 前放置的 LCVR 对每个波长产生两个相位延迟, 即可以用一个相机对两个正交偏振的衍射光束进行成像。它不仅覆盖了 $0.4 \mu\text{m} \sim 11.5 \mu\text{m}$ 的宽光谱范围, 而且是电子控制, 可实现更快的响应和更好的时效性。随后, 该小组对基于 AOTF 的成像偏振光谱系统 (imaging spectropolarimeter, ISP) 进行了更深入地研究, 研制出了宽波段、小型化、稳定的、可进行编程的 ISP 型号, 并于 2007 年研制了基于两个 LCVR 和 AOTF 的全 Stokes ISP^[22-24], 如图 4 所示。

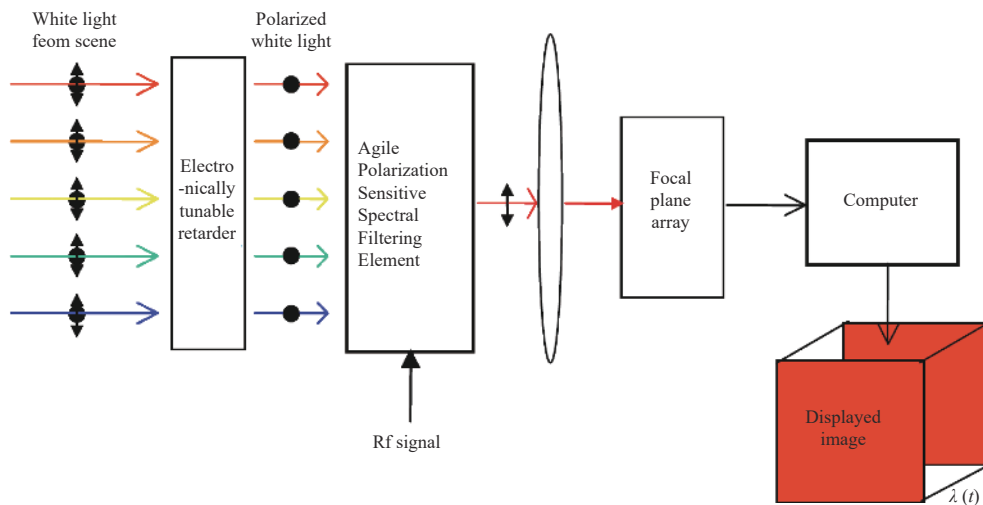
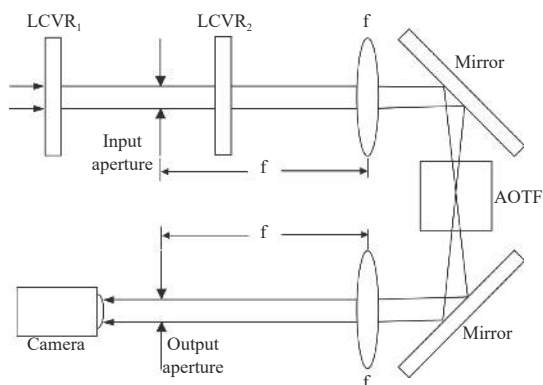


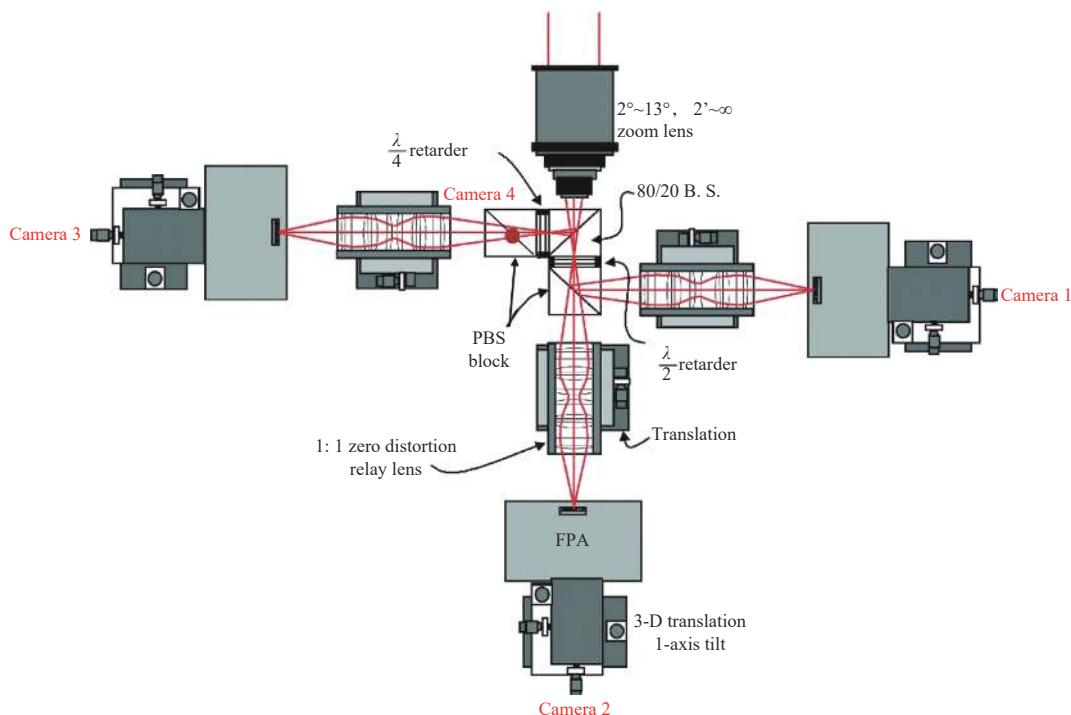
图 3 AOTF 偏振光谱成像仪设计原理^[21]

Fig. 3 Design principles of AOTF polarization spectral imager^[21] (reproduced with permission, copyright 2002, SPIE)

图4 基于AOTF的全StokesISP系统^[23]Fig. 4 AOTF-based full Stokes ISP system^[23] (reproduced with permission, copyright 2007, OSA)

1.2 分振幅偏振成像系统

分振幅偏振成像系统最初由 Garlick 等人提出并建造的双通道系统^[25], 逐渐发展成为图5所示的全斯托克振幅旋光仪^[11-12], 其第4个相机位于四分之一波片后方的分光镜之上。这样的旋光仪一般由4个独立的焦平面阵列组成^[9, 26]。4个独立的相机分别与一系列偏振分束器、减速器和中继透镜组成一条光路, 以实现偏振成像。刚性机械支架用于将摄像头支撑在面向4个光路的出口位置。偏振分束光路用于实现直线和圆形偏振, 而4个摄像机可同时捕捉4幅图像, 以计算完整斯托克斯图像, 并消除由采集过程中场景变化引发的虚假偏振效应。

图5 振幅旋光仪^[26]Fig. 5 Schematic diagram of amplitude polarimeter^[26] (reproduced with permission, copyright 2002, SPIE)

这里分束块包括3个分光镜(一个80/20分光镜和两个50/50分光镜)、一个四分之一波片和一个半波片减速器。分束块的每条路径可用于分析入射极化的不同方面, 从而用于测量完整的斯托克斯矢量^[26]:

$$S = \begin{bmatrix} H+V \\ H-V \\ 45-135 \\ R-L \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: H 、 V 、 45 和 135 是水平、垂直、 45° 、 135° 的线偏振态; R 、 L 的强度是左右圆极化状态下的

强度。这样的设计可以有效地利用偏振光而几乎无光吸收或反射的损耗。此外, 被分析的偏振态尽可能接近正交, 并均匀地分布在各个可能的入射极化上。

但是, 这种系统一般尺寸都过大, 且需要严格的系统校准, 以达到机械和光学对准所需的要求。此外, 中继镜头的位置偏差也可能导致4个通道中的每个通道的畸变, 因而需要进行后期处理来共同注册这4幅图像^[27]。只有在需要完整的空间分辨率, 而大小和成本不是问题时, 这种方法是合适的选择。

1.3 分孔径偏振成像系统

2005年, Polaris Sensor Technologies 公司研发了一套如图 6(a) 所示的中波红外分孔径偏振成像系统^[14]。2014年, 苏州大学贺虎成也研制了可见光的分孔径偏振成像光学系统^[15]。这样的系统一般由一个焦平面阵列 (FPA) 和一套成像系统组成, 可以将多个图像投影到一个焦平面上。一个标准相机物镜用于在孔径上形成场景图像, 准直光学系统再将该图像均匀投射到几个微型透镜阵列上。在每个微型透镜阵列后面放置不同的偏振器, 就可以在焦平面阵列上形成不同偏振态图像 (见图 6(b))。对于这种偏振仪设计, 不仅可以使

以使用其他偏振元件来测量圆偏振状态。精准的定位既可以同时获取所有极化数据, 又可以确保所有极化通道是共视的。因为光路较短, 一旦光学元件被固定后, 光路的对准相对于分振幅旋光仪也会更稳定。因此, 该系统拥有结构简单、数据处理速度快等优点, 而且在被动传感器 (宽光谱照明) 和有源单色传感器中都可以应用。其主要缺点是空间分辨率的损失 (每个线性尺寸的系数为 2) 以及附加成像光学元件的体积和重量^[9]。此外, 匹配传输、变迹、放大和通道之间的失真等方面的问题都不容忽视。还应该指出的是, 由于连续光源的相干散射和干涉, 这种策略更难在连续光源照明的情况下使用^[9]。

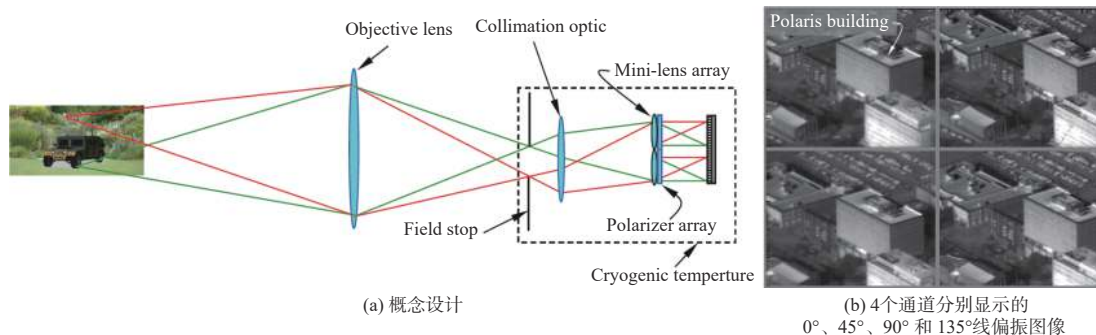


图 6 分孔径偏振成像系统^[14]

Fig. 6 Aperture-divided polarization imaging system^[14] (reproduced with permission, copyright 2005, SPIE)

总体来说, 传统偏振成像系统主要利用各种光路 and 传统探测器实现偏振探测, 搭建过程较为简单, 无需进行特殊加工工艺, 但通常系统体积较大、光路复杂、校准要求高且光损失较大。

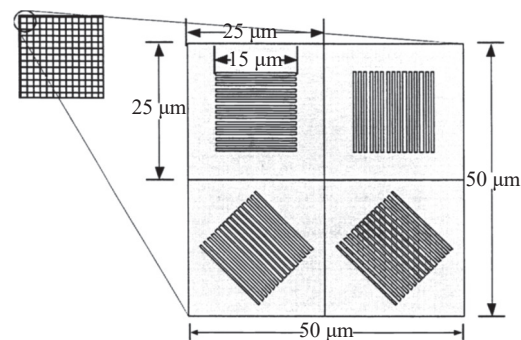
2 新型微纳偏振成像系统的研究进展

短波红外成像技术也促进了短波红外偏振成像技术的发展, 从原理上讲, 短波红外焦平面探测器配置相应的偏振光学系统, 可以实现上述分时、分孔径和分振幅的偏振成像模式。但是, 由于目前 InGaAs 短波红外焦平面探测器的灵敏度有限, 分焦平面偏振模式或一些新型短波红外偏振探测器的模式更吸引人们的关注。

2.1 分焦平面偏振成像系统

由于焦平面阵列 (focal plane array, FPA) 技术的最新进展, 可将微光偏振元件直接集成在焦平面阵列上^[13, 16, 28], 从而实现图 7 所示的分焦平面偏振成像系统^[1, 9], 在每个图像帧里都能获取所需的极化数据。1999年, Nordin 等人将包含偏振滤波器阵列的衍射光学元件 (diffractive optical element,

DOE) 集成在 InSb 焦平面上, 实现了全斯托克斯偏振成像系统^[16]。该 DOE 由 256×256 的极化滤波器单元阵列组成, 每个单元由一个基于线栅偏振片的 2×2 极化滤波器阵列组成, 分别用于水平、垂直、 45° 和顺时针圆偏振光。图 7(b) 则展示了每个单元中两个偏振滤波器的横截面图。基于 DOE 的偏振滤波器阵列随后集成在 512×512 像素的 FPA 上。因为每一个极化滤波单元用于测量最终图像中单个像素的偏振信息, 该 DOE/FPA 系统最终生成的图像将含有 256×256 个像素。



(a) 2×2 滤光片单元的偏振滤光片阵列

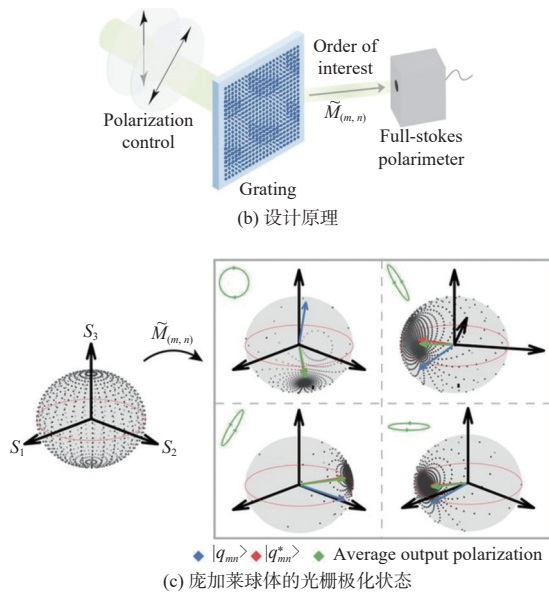


图8 基于TiO₂超表面光栅的紧凑型全斯托克斯偏振照相机^[17]
 Fig. 8 TiO₂ metasurface-based compact full Stokes polarization camera^[17] (reproduced with permission, copyright 2019, The American Association for the Advancement of Science)

2.2 基于半导体微纳结构的偏振成像系统

近年来, 基于微纳结构的新型光电探测器

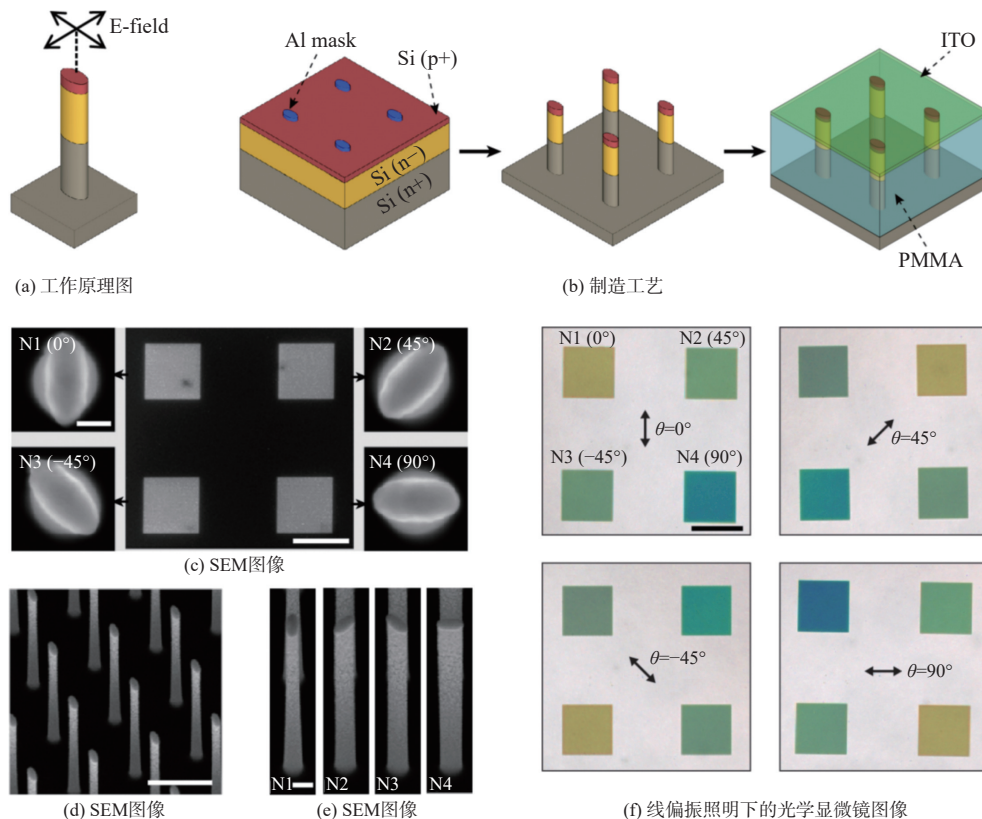


图9 基于椭圆纳米线阵列的偏振成像仪^[18]

Fig. 9 Schematic of polarimeter based on elliptical nanowire array^[18] (reproduced with permission, copyright 2015, OSA)

已引起国际上广泛的关注, 比如纳米线(nanowire)^[39-43]、纳米管(nanotube)^[44-46]、纳米片(nanosheet)^[19]和二维(2D)材料^[47-48]。这些器件采用独特的几何结构和物理特性, 具有优异的光学和电学性能、量子效应以及增强光、生物或化学敏感度^[49]。特别是, III-V族半导体纳米线更是具有直接和宽光谱的可调谐性带隙、高吸收系数和载流子迁移率, 以及形成异质结构的灵活性, 使其成为光电探测的优秀候选者。相比于传统探测器, 垂直排列的纳米线阵列具有低反射和强宽带吸收, 可用作有源和减反射层, 将光更有效地耦合到高折射率半导体中; 也可减少材料使用量, 以降低成本, 同时生产更多功能性设备。2015年, 哈佛大学Park等提出如图9所示的半导体纳米线偏振探测器^[18], 在无需偏振滤镜的情况下, 利用硅纳米线形状可调制光吸收的特点, 将光信号转化成不同偏振态对应的光电流, 实现偏振探测。这种技术可以减少光损耗, 缩小器件体积, 而且纳米结构的设计可有效提高相机的光吸收效率。但基于椭圆形纳米线形状的偏振器消光比较低, 目前的设计也只能检测线偏振态。硅相对于III-V族半导体的光电转化效率也有待提高^[41, 50-51], 且只应用于可见光和近红外

波段。2022 年,澳大利亚国立大学 Li 等制备了基于 InAs 纳米片阵列的室温短波宽光谱红外探测器^[19],如图 10 所示。通过与中南大学合作得到的仿真结果看来,纳米片阵列沿长轴方向有较高的光吸收率,而在其垂直的方向几乎无吸收。通过

结构优化后,在 $2\ \mu\text{m}\sim 3\ \mu\text{m}$ 波长范围内,在保证高于 67% 的吸收率同时,可获得大于 50 的偏振消光比^[52]。因此,该结构极有希望应用于红外宽光谱偏振成像,在无需微纳偏振片的情况下,即可实现偏振探测。

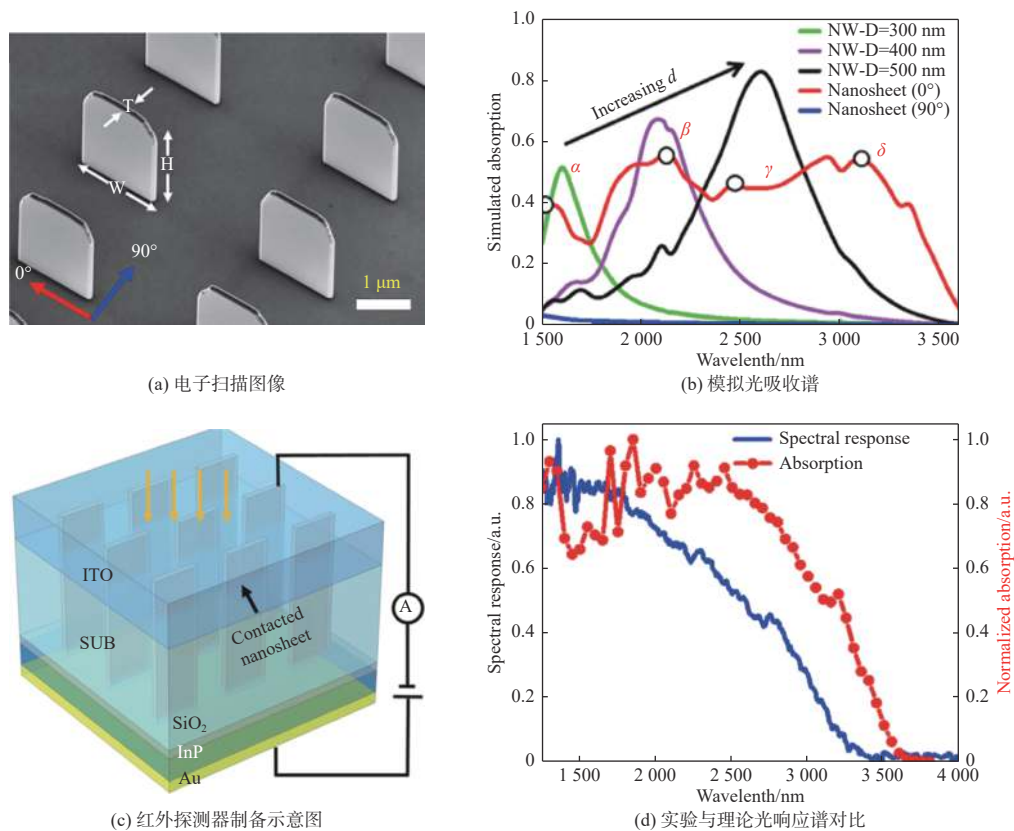


图 10 基于 InAs 纳米片阵列的短波红外偏振探测器^[19]

Fig. 10 Schematic of short-wavelength infrared polarization detector based on InAs nanosheet array^[19] (reproduced with permission, copyright 2022, AIP Publishing)

与传统偏振成像系统相比,新型偏振成像系统通过焦平面探测器耦合微纳偏振元件或直接改变探测器表面结构,可实现快速、像素多、体积小、光路简单、光损耗较小的偏振成像。目前,微纳结构加工和器件制备工艺均有待改进,针对短波红外偏振成像的研究尚不足。

3 短波红外偏振成像技术存在的主要问题与建议

决定偏振成像系统工作波段的关键因素之一即所用探测器的工作波谱范围。目前市场上先进的短波红外光电探测器主要是基于焦平面探测器。经过多年来的探索,它们的加工工艺日益稳定,材料实现多元化,性能也得到了明显的提高,

因此获得了日益广泛的应用。因此,短波红外偏振成像系统可基于短波红外焦平面探测器,比如 InGaAs ($1.1\ \mu\text{m}\sim 1.7\ \mu\text{m}$)、Ge ($0.7\ \mu\text{m}\sim 1.8\ \mu\text{m}$),制冷红外焦平面探测器 InSb ($3\ \mu\text{m}\sim 5\ \mu\text{m}$)、($2\ \mu\text{m}\sim 10.6\ \mu\text{m}$)^[49]或非制冷红外焦平面探测器 Vox、 α -Si 等。但大部分短波红外焦平面探测器的暗电流较高,工作温度要求高,光吸收效率也较低,因此限制了它们的工作效率。而 HgCdTe 很难实现大面积成像。因此,随着纳米技术的发展,基于微纳结构及材料的光电探测器逐渐崭露头角,为实现高性能室温光电探测器提供了更多可能性。利用它们的特殊尺寸不仅可以显著提高光吸收,而且有可能减少暗电流,从而提供较大的响应率和探测率^[43, 49]。比如窄带隙二元纳米线材料,如 InAs^[53-55]、

GaSb^[56-57] 和 InSb^[58-59], 可以提供从可见光到红外区域的宽谱光探测。InAs 纳米线已被证明具有高载流子迁移率, 易于形成欧姆接触, 以及优异的光电性能。具有可调带隙的三元 III-V 纳米线, 如 GaAsSb^[39-41]、InGaAs^[42, 60] 和 InAsP^[61-62] 也被广泛研究。Li 等人通过调谐 GaAsSb 的带隙, 在 1.3 μm 和 1.55 μm 通信波长以及 0.15 V 的低工作偏置电压下, 展示了一种具有良好响应率和探测率的室温单根 GaAs_{0.56}Sb_{0.44} 纳米线光电探测器^[39]。通过表面钝化, 载流子迁移得到很大提高, 从而获得更高的响应率^[40]。利用半导体纳米线阵列几何形状可调控其内部光共振模式的机理, 更是实现了基于 GaAsSb 纳米线阵列的无滤光片多光谱高效探测^[41]。

将微纳偏振元件直接集成在焦平面阵列的分焦平面偏振成像系统虽然得到了大力的发展, 但大部分研究仍聚焦在可见光范围^[17, 37-38], 除了可见光探测器已成熟高效, 微纳偏振元件与短波红外探测器耦合的设计和加工工艺均有待开发和优化也是原因之一。由于偏振元件的加工误差和极大的光损耗, 该系统的消光比和透射率也都有待提高。特别是, 偏振消光比作为偏振成像系统的一个关键指标, 直接决定了系统的检偏能力、抗干扰能力以及偏振信息的利用效率。若消光比较低, 获得的偏振信息则可能是伪偏振, 这也是当前微纳阵列型偏振成像体制普遍存在的共性问题。为了提高消光比, 获得目标场景更为真实的偏振特性, 可从以下几个方面进行改进: 1) 通过优化设计参数和加工工艺, 增强微纳偏振元件自身的偏振探测性能; 2) 通过提高对准精度减小偏振元件和探测器间的间距, 改善分焦平面偏振成像系统的装配工艺; 3) 通过对图像进行定标操作和后期图像处理减少相机量子噪声和偏振元件消光不彻底导致的偏振探测误差; 4) 根据非理想偏振成像模型, 通过数字计算成像方法重构出更准确的等效消光比, 实现场景偏振特性的有效重构。

具有特殊形态的微纳结构, 比如纳米片^[19]和椭圆形纳米线^[18], 不仅能够实现光电高效转化, 而且直接拥有偏振效应, 因此可实现无需偏振滤光片耦合的偏振成像, 有效地提高了光吸收和光电转换效率, 是实现紧凑型偏振成像系统的优选者。但目前制备基于窄带隙 III-V 半导体的微纳结构, 无论是使用自上而下的刻蚀方法还是自下而上的生长方法^[49, 63], 都存在诸多问题。比如纳米结

构表面杂质多, 形状无法精确控制, 高浓度 p 型掺杂难以实现等, 都是目前纳米材料的研究难点。因此, 基于纳米结构的半导体探测器值得并急需更多的关注和研究, 在加工工艺日益成熟后, 可制备成多像素焦平面探测器, 用于高分辨率短波红外偏振成像。

由此可见, 短波红外探测器采用传统的偏振成像模式可实现短波红外偏振成像, 但光路较复杂且系统体积庞大。因此, 随着微纳加工技术的日益成熟, 微纳偏振元件与短波红外焦平面探测器耦合的分焦平面探测成像技术成为新的发展方向, 而利用半导体表面微纳结构直接实现偏振探测更是值得探索的前沿领域。

4 结论

本文介绍了传统偏振成像系统的类型和特点, 并讨论了基于微纳结构的新型偏振成像系统的发展进程。针对目前短波红外偏振成像技术的重要问题, 也给出了一些可行性建议。目前, 基于焦平面探测器的短波红外偏振成像技术已展现了体积小、校准要求低、响应快等独特优势, 但如何实现高效率、工作温度要求低, 与微纳结构有效耦合仍是亟待解决的问题。而具有高效光电转化和偏振探测功能的微纳半导体结构虽然可以直接实现偏振高效探测, 但目前无论是材料和焦平面探测器的制备都处于起步阶段, 仍有待科研者的深入研究和开发。因此, 随着偏振成像设备在国内外市场的需求量不断增加, 实现高精度、小体积、快响应、高分辨率的偏振成像仪器是值得国内外重点研究的方向之一。

参考文献:

- [1] 周强国, 黄志明, 周炜. 偏振成像技术的研究进展及应用[J]. 红外技术, 2021, 43(9): 817-828.
ZHOU Qiangguo, HUANG Zhiming, ZHOU Wei. Research progress and application of polarization imaging technology[J]. Infrared Technology, 2021, 43(9): 817-828.
- [2] 刘珂, 李丽娟, 王军平. 红外偏振成像技术在空空导弹上的应用展望[J]. 航空兵器, 2016, 23(4): 47-51.
LIU Ke, LI Lijuan, WANG Junping. Application and prospect of infrared polarization imaging technology in air-to-air missile[J]. Aero Weaponry, 2016, 23(4): 47-51.

- [3] 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.
WANG Xia, XIA Runqiu, JIN Weiqi, et al. Technology progress of infrared polarization imaging detection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(10): 3175-3182.
- [4] 李广德, 刘东青, 王义, 等. 热红外伪装技术的研究现状与进展[J]. 红外技术, 2019, 41(6): 495-503.
LI Guangde, LIU Dongqing, WANG Yi, et al. Research status and progress of the thermal infrared camouflage technology[J]. Infrared Technology, 2019, 41(6): 495-503.
- [5] SOKOLOV K, DREZEK R, GOSSAGE K, et al. Reflectance spectroscopy with polarized light: is it sensitive to cellular and nuclear morphology[J]. *Optics Express*, 1999, 5(13): 302-317.
- [6] ZHAO Yongqiang, ZHANG Lei, PAN Quan. Spectropolarimetric imaging for pathological analysis of skin[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(10): D236-D246.
- [7] FROST J W, NASRADDINE F, RODRIGUEZ J, et al. A handheld polarimeter for aerosol remote sensing[J]. SPIE, 2005, 5888: 269-276.
- [8] HARCHANKO J, CHENAULT D, FARLOW C, et al. Detecting a surface swimmer using long wave infrared imaging polarimetry[J]. SPIE, 2005, 5780: 138-144.
- [9] GOLDSTEIN D L, CHENAULT D B, et al. Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5453-5469.
- [10] LAVIGNE D A, BRETON M, FOURNIER G, et al. A new passive polarimetric imaging system collecting polarization signatures in the visible and infrared bands[J]. SPIE, 2009, 7300: 353-361.
- [11] AZZAM R A. Arrangement of four photodetectors for measuring the state of polarization of light[J]. *Optics Letters*, 1985, 10(7): 309-311.
- [12] BARTER J D, LEE P H, THOMPSON H R Jr, et al. Stokes parameter imaging of scattering surfaces[C]//Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing, SPIE Proceedings. San Diego, CA, USA: SPIE, 1997: 3121.
- [13] ANDREOU A G, KALAYJIAN Z K. Polarization imaging: principles and integrated polarimeters[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2002, 2(6): 566-576.
- [14] LARRY PEZZANITI J, CHENAULT D B. A division of aperture MWIR imaging polarimeter[C]//SPIE Proceedings, Polarization Science and Remote Sensing II. San Diego, California, USA: SPIE, 2005: 5888.
- [15] 贺虎成. 分孔径同时偏振成像光学系统的研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2014.
HE Hucheng. Study on optical system of simultaneous and complete polarization imaging[D]. Suzhou: Soochow University, 2014.
- [16] NORDIN G P, MEIER J T, DEGUZMAN P C, et al. Diffractive optical element for Stokes vector measurement with a focal plane array[J]. SPIE, 1999, 3754: 169-177.
- [17] 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.
- [18] PARK H, CROZIER K B. Elliptical silicon nanowire photodetectors for polarization-resolved imaging[J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7209-7216.
- [19] ZUO Xinrong, LI Ziyuan, WONG W W, et al. Design of InAs nanosheet arrays with ultrawide polarization-independent high absorption for infrared photodetection[J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(7): 071109.
- [20] 王新全, 相里斌, 黄旻, 等. 成像光谱偏振仪研究进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(7): 1968-1974.
WANG Xinquan, XIANG LI Bin, HUANG Min, et al. Advance in imaging spectropolarimeter[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(7): 1968-1974.
- [21] GUPTA N. Remote sensing using hyperspectral and polarization images[C]//Environmental and Industrial Sensing. [s.l.]: SPIE, 2002: 4574.
- [22] GUPTA N. Acousto-optic tunable filters for infrared imaging[J]. SPIE, 2005, 5953: 190-199.
- [23] GUPTA N, SUHRE D R. Acousto-optic tunable filter imaging spectrometer with full Stokes polarimetric capability[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(14): 2632-2637.
- [24] GUPTA N. Acousto-optic tunable filter based spectropolarimetric imagers[C]//SPIE Proceedings, Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing VIII. Orlando, FL: SPIE, 2008: 6972.
- [25] GARLICK G F J, ALBERT STEIGMANN G, LAMB W E. Differential optical polarization detectors: US3992571[P]. 1976-11-16.
- [26] FARLOW C A, CHENAULT D B, PEZZANITI J L, et al. Imaging polarimeter development and applications [C]//SPIE Proceedings, Polarization Analysis and Measurement IV. San Diego, CA, USA: SPIE, 2002: 4481.
- [27] LI Shuo, JIN Weiqi, XIA Runqiu, et al. Radiation correction method for infrared polarization imaging system with

- front-mounted polarizer[J]. *Optics Express*, 2016, 24(23): 26414-26430.
- [28] RUST D M, THOMPSON K E. An integrated imaging detector of polarization and spectral content[J]. *Remote Sensing Reviews*, 1994, 8(1/2/3): 215-225.
- [29] YANG Jie, QIU Su, JIN Weiqi, et al. Polarization imaging model considering the non-ideality of polarizers[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(2): 306-314.
- [30] YANG Jie, JIN Weiqi, QIU Su, et al. Residual interpolation integrated pixel-by-pixel adaptive iterative process for division of focal plane polarimeters[J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2022, 22(4): 1529.
- [31] GRUEV V, PERKINS R, YORK T. CCD polarization imaging sensor with aluminum nanowire optical filters[J]. *Optics Express*, 2010, 18(18): 19087-19094.
- [32] CHU Jinkui, WANG Zhiwen, GUAN Le, et al. Integrated polarization dependent photodetector and its application for polarization navigation[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(5): 469-472.
- [33] 张志刚, 董凤良, 程腾, 等. 基于像素偏振片阵列的实时动态相位测量技术[J]. *中国科学:技术科学*, 2015, 45(5): 491-497.
- ZHANG Zhigang, DONG Fengliang, CHENG Teng, et al. Real-time dynamic phase measurement based on pixelated micropolarizer array[J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2015, 45(5): 491-497.
- [34] LU Bin, WANG Haitao, SHEN Jun, et al. A high extinction ratio THz polarizer fabricated by double-bilayer wire grid structure[J]. *AIP Advances*, 2016, 6(2): 025215.
- [35] SIEFKE T, KLEY E B, TÜNNERMANN A, et al. Design and fabrication of titanium dioxide wire grid polarizer for the far ultraviolet spectral range[J]. *SPIE*, 2016, 9927: 22-27.
- [36] 陈星, 于森, 曹亮, 等. 周期性微偏振片阵列特性研究[J]. *现代物理*, 2019, 9(1): 23-31.
- CHEN Xing, YU Miao, CAO Liang, et al. Study on characteristics of periodic micropolarizer array[J]. *Modern Physics*, 2019, 9(1): 23-31.
- [37] SONG Q, KHADIR S, VÉZIAN S, et al. Bandwidth-unlimited polarization-maintaining metasurfaces[J]. *Science Advances*, 2021, 7(5): eabe1112.
- [38] REN Yongze, GUO Shihao, ZHU Wenqi, et al. Full-stokes polarimetry for visible light enabled by an all-dielectric metasurface[J]. *Advanced Photonics Research*, 2022, 3(7): 2100373.
- [39] LI Ziyuan, YUAN Xiaoming, FU Lan, et al. Room temperature GaAsSb single nanowire infrared photodetectors[J]. *Nanotechnology*, 2015, 26(44): 445202.
- [40] LI Ziyuan, YUAN Xiaoming, GAO Qian, et al. In situ passivation of GaAsSb nanowires for enhanced infrared photoresponse[J]. *Nanotechnology*, 2020, 31(24): 244002.
- [41] LI Ziyuan, TRENDAFILOV S, ZHANG Fanlu, et al. Broadband GaAsSb nanowire array photodetectors for filter-free multispectral imaging[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(17): 7388-7395.
- [42] ZHANG Fanlu, ZHANG Xutao, LI Ziyuan, et al. A new strategy for selective area growth of highly uniform InGaAs/InP multiple quantum well nanowire arrays for optoelectronic device applications[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(3): 2103057.
- [43] LI Ziyuan, LI Li, WANG Fan, et al. Investigation of light-matter interaction in single vertical nanowires in ordered nanowire arrays[J]. *Nanoscale*, 2022, 14(9): 3527-3536.
- [44] LIU Yang, WEI Nan, ZENG Qingsheng, et al. Photodetectors: room temperature broadband infrared carbon nanotube photodetector with high detectivity and stability[J]. *Advanced Optical Materials*, 2016, 4(2): 188.
- [45] AN Qinwei, MENG Xianquan, XIONG Ke, et al. A high-performance fully nanostructured individual CdSe nanotube photodetector with enhanced responsivity and photoconductive gain[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(28): 7057-7066.
- [46] KUMAR R, KHAN M A, ANUPAMA A V, et al. Infrared photodetectors based on multiwalled carbon nanotubes: insights into the effect of nitrogen doping[J]. *Applied Surface Science*, 2021, 538: 148187.
- [47] KRISHNAMURTHI V, KHAN H, AHMED T, et al. Liquid-metal synthesized ultrathin SnS layers for high-performance broadband photodetectors[J]. *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla)*, 2020, 32(45): 2004247.
- [48] PAN Wenwu, LIU Junliang, ZHANG Zekai, et al. Large area van der Waals epitaxy of II-VI CdSe thin films for flexible optoelectronics and full-color imaging[J]. *Nano Research*, 2022, 15(1): 368-376.
- [49] LI Ziyuan, ALLEN J, ALLEN M, et al. Review on III-V semiconductor single nanowire-based room temperature infrared photodetectors[J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2020, 13(6): 1400.
- [50] PARK H, DAN Yaping, SEO K, et al. Filter-free image sensor pixels comprising silicon nanowires with selective

- color absorption[J]. *Nano Letters*, 2014, 14(4): 1804-1809.
- [51] UM H D, SOLANKI A, JAYARAMAN A, et al. Electrostatically doped silicon nanowire arrays for multispectral photodetectors[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(10): 11717-11725.
- [52] HE J, HUANG Z, LI Z, et al. Design of InAs nanosheet arrays for high-performance polarization-sensitive infrared photodetection[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2023, 56(1): 015105.
- [53] MIAO Jinshui, HU Weida, GUO Nan, et al. Single InAs nanowire room-temperature near-infrared photodetectors [J]. *ACS Nano*, 2014, 8(4): 3628-3635.
- [54] REN Dingkun, MENG Xiao, RONG Zixuan, et al. Uncooled photodetector at short-wavelength infrared using InAs nanowire photoabsorbers on InP with p-n heterojunctions[J]. *Nano Letters*, 2018, 18(12): 7901-7908.
- [55] ZHANG Xutao, LI Ziyuan, YAO Xiaomei, et al. Light-induced positive and negative photoconductances of InAs nanowires toward rewritable nonvolatile memory[J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2019, 1(9): 1825-1831.
- [56] LUO T, LIANG B, LIU Z, et al. Single-GaSb-nanowire-based room temperature photodetectors with broad spectral response[J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(1): 101-108.
- [57] SA Zixu, LIU Fengjing, LIU Dong, et al. Ag-catalyzed GaSb nanowires for flexible near-infrared photodetectors[J]. *Journal of Semiconductors*, 2022, 43(11): 112302.
- [58] KUO C H, WU J M, LIN S J, et al. High sensitivity of middle-wavelength infrared photodetectors based on an individual InSb nanowire[J]. *Nanoscale Research Letters*, 2013, 8(1): 327.
- [59] SHAF A M, WU Di, CHEN Xi, et al. Flexible infrared photodetector based on indium antimonide nanowire arrays[J]. *Nanotechnology*, 2021, 32(27): 1-8.
- [60] TAN Huang, FAN Chao, MA Liang, et al. Single-crystalline InGaAs nanowires for room-temperature high-performance near-infrared photodetectors[J]. *Nano-Micro Letters*, 2016, 8(1): 29-35.
- [61] REN Pinyun, HU Wei, ZHANG Qinglin, et al. Band-selective infrared photodetectors with complete-composition-range InAs(x)P(1-x) alloy nanowires[J]. *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla)*, 2014, 26(44): 1402945.
- [62] KARIMI M, ZENG Xulu, WITZIGMANN B, et al. High responsivity of InP/InAsP nanowire array broadband photodetectors enhanced by optical gating[J]. *Nano Letters*, 2019, 19(12): 8424-8430.
- [63] LI Z Y, TAN H H, JAGADISH C, et al. III-V semiconductor single nanowire solar cells: a review[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2018, 3(9): 1800005.