

多维度红外光电探测器

郭家祥^{1,2}, 谢润章^{1*}, 王鹏^{1*}, 张涛^{1,2}, 张坤¹, 王海露¹, 贺婷¹, 李庆¹,
王芳¹, 陈效双¹, 陆卫¹, 胡伟达^{1,2*}

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外物理国家重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 红外光电探测器可以获取目标反射和自发的红外辐射, 具有抗干扰性强、全天候观测、探测距离远、分辨率高等优点, 在国防、通信、遥感、航天等领域中扮演着不可替代的角色。从 20 世纪 40 年代第一代低像素探测器的应用到 90 年代末第三代 SWaP³ 概念的提出, 红外光电探测器正经历着变革性发展。专注于阵列规模、灵敏度、分辨率等性能指标提高的传统光电探测器利用光强度信息进行成像, 无法满足未来目标多样化、环境复杂化、任务多元化等发展需求。多维度光信息的获取为提升红外探测器性能提供了新途径, 除强度信息外, 通过红外光电探测器可以获取光的波长、动量、偏振和相位等本征信息, 也可利用光的传输时间获取光程信息。本文面向多维度红外探测发展需求, 聚焦波长、偏振、光程和相位四个方面的特征, 从新原理、新材料、新结构等方面综述了近年来多维度红外光电探测器的研究进展, 进而提出对多维度红外探测器发展方向的思考和展望。

关键词: 红外光电探测器; 多维度光信息; 波长; 偏振; 光程; 相位

中图分类号: O43

文献标识码: A

Infrared photodetectors for multidimensional optical information acquisition

GUO Jia-Xiang^{1,2}, XIE Run-Zhang^{1*}, WANG Peng^{1*}, ZHANG Tao^{1,2}, ZHANG Kun¹, WANG Hai-Lu¹,
HE Ting¹, LI Qing¹, WANG Fang¹, CHEN Xiao-Shuang¹, LU Wei¹, HU Wei-Da^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Infrared Physics, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The infrared photodetector can obtain IR radiation either reflected by or radiated from the target, which is a unique property and makes infrared photodetectors play an important role in areas such as national defense, communications, remote sensing, and aerospace along with other advantages, such as strong anti-interference, full-time detection, long detection range, and high-resolution imaging. The infrared photodetector is undergoing radical development from the application of the first generation multielement detectors in the 1940s to the striving for the proposal of SWaP³ concepts in the third generation in the late 1990s. Traditional infrared photodetectors, of which the advancement focus on improving performance indicators such as array size, sensitivity, and resolution, using light intensity information for imaging, are sluggish to meet future demanding such as recognizing diverse targets, facing environmental complexity, and dealing with multiform tasks at the same time. Infrared photodetectors for multidimensional optical information acquisition provide new routes to improve the device performance and meet future needs. Infrared photodetector obtains not only abundant intrinsic information of light besides intensity, such as phase, wavelength, polarization, and momentum, but also external information like optical path. This paper focuses on the multi-dimension infrared detection extracting information of wavelength, polarization, phase, and the optical path of the targets, which does not only summarize the research progress of infrared photodetectors from the aspects of new principles, new materials, and new

收稿日期: 2021-12-10, 修回日期: 2022-01-12

Received date: 2021-12-10, Revised date: 2022-01-12

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB2009301)

Foundation items: National Key R&D Program of China (2020YFB2009301)

作者简介(Biography): 郭家祥(1998-), 男, 陕西宝鸡人, 博士研究生, 主要研究领域为甚长波红外探测器材料研究。E-mail: guojiaxiang@mail.sitp.ac.cn

*通讯作者(Corresponding authors): E-mail: wdu@mail.sitp.ac.cn, w_peng@mail.sitp.ac.cn, xierunzhang@mail.sitp.ac.cn

structures, but also put forward the idea and outlook for the development direction of the multi-dimensional infrared photodetectors.

Key words: infrared photodetector, multidimensional optical information, wavelength, polarization, optical path, phase

引言

红外光电探测器可获取物体自发辐射信息,具有全天候观测、抗干扰能力强、高分辨能力的特点,在国防、天文、民用领域扮演着重要的角色,是当今信息化时代发展的核心驱动力之一^[1,2]。1800年,英国天文学家 Herschel 首次发现红外光,在通过分光棱镜和温度计研究太阳光时,发现温度上升最高的部分处于超出红光的范围,将该范围称为“看不见的光”。红外作为电磁波的一种,波长覆盖范围为 0.76~1000 μm 。中国科学院上海技术物理研究所从红外材料、红外探测器、遥感应用的角度出发,将波段细分为近红外(0.76~1.1 μm)、短波红外(1.1~3 μm)、中波红外(3~6 μm)、长波红外(6~25 μm)、远红外(25~100 μm)、和甚远红外(100~1000 μm)。

在红外被发现后的一百年间,光电效应的发现、黑体辐射理论和光量子理论的提出构成了当代光电理论框架,对红外光本质属性的认知在探索中不断完善,红外光电探测理论与器件技术取得了长足发展。20世纪40年代,第一代红外探测器问世,这种由单点或小线列像元组成的低像素器件可通过扫描形成二维图像;20世纪80年代,第二代低于百万级像素的红外焦平面探测器问世,可以实现凝视成像,在成像速度和质量方面相比于第一代有了质的飞跃;20世纪末,随着 SWaP³(Size-更小尺寸,Weight-更轻重量,Power-低功耗,Performance-高性能和 Price-低成本)概念的提出,第三代红外探测器已进入高速发展阶段^[3,4]。

目前,主流的红外探测器主要分为热红外探测器和光子型红外探测器两大类。热红外探测器是利用红外辐射导致材料温度变化致使材料性能改变,根据探测机制的不同又分为热敏电阻、热释电、温差电堆等。热红外探测器具有非制冷、工艺简单、成本低等优势,室温下的等效噪声温差(Noise-Equivalent Temperature Difference, NE Δ T)在 50 mK 附近,通过延长积分时间(50 ms 左右),NE Δ T 可以到达 10 mK 左右。但是,受“热-电”转换机制限制,热红外探测器的背景限性能较低(低于光子型 1~3

个数量级)、响应速度较慢(毫秒级),多用于传统医学、工业成像等性能需求不高的场景。光子型红外探测器是指基于光电效应实现“光-电”转换的器件,依据探测机制的不同主要分为光导型和光伏型两种。光伏型探测器是在内建电场下光生载流子发生分离,工作于零偏或小反偏下,而光导型红外探测器则需要通过施加电场以驱动光生载流子被电极收集。此外,根据电子跃迁类型不同,光子型红外探测器可分为带间跃迁、子带跃迁、微带跃迁、杂质带跃迁等。带间跃迁中电子通过吸收光子从价带跃迁到导带,使材料电导率发生变化从而进行探测,探测器包含碲镉汞(HgCdTe)、铟镓砷(In-GaAs)等;子带跃迁或微带跃迁的原理为根据吸收光子后的电子在子带或微带中跃迁产生电动势或电导变化从而进行探测,主要为量子阱、超晶格、量子级联这类以能带工程实现的探测器;杂质带跃迁机理为电子吸收光子后,在杂质带和导带(价带)中发生跃迁,使材料电导发生变化从而进行探测,主要包含甚长波红外阻挡杂质带(Blocked Impurity Band, BIB)探测器等。光电探测器由于具有高灵敏度、低等效噪声温差等优良性能,在弱光探测、高分辨光谱等高精度探测领域相对于热探测器具有绝对优势,得到普遍关注。

为提升在干扰、隐身、伪装等复杂环境中对目标信息有效探测与识别能力,仅通过提高器件探测灵敏度、扩大像素规模的传统强度探测模式已趋于瓶颈。多维度光信息的获取为提升红外探测器性能提供了新途径,除强度信息外,通过红外光电探测器可以获取光的波长、动量、偏振和相位等本征信息,也可利用光的传输时间获取光程信息^[5,6]。如图1所示,波长信息可以直接反映物体的温度差异,如双色探测器可以区分诱饵和导弹,降低盲元率,相对于传统红外探测器具有精准测温功能,多光谱探测获取二维灰度图像的同时还可得到光谱信息,实现“数据立方”,多波长信息探测在军事侦察、天文观测、物体测温等领域具有绝对优势;偏振信息可以通过偏振度区分光滑和粗糙物体,偏振探测具有在背景温差小的场景中辨识隐蔽目标、检测癌症

等功能,应用于环境监察、遥感、国防、生物医学等领域;光程信息可以通过主动探测反映目标物体距离、物体运动速度等信息,作为光程信息的核心部件——雪崩光电二极管(Avalanche PhotoDiode, APD),具有微光探测、快速响应物体返回脉冲信号的特点,实现对红外信号以及激光回波信号的高灵敏度、高速集成成像探测,为目标识别提供新的自由度,在自动驾驶、人脸识别、目标三维立体成像等领域具有广泛的应用前景;具有相位分布的涡旋光,携带轨道角动量(Orbital Angular Momentum, OAM)等“量子态”信息,具有抗干扰能力强、信息获取能力强等特点,在量子信息、量子通讯、信息传输等领域扮演重要角色。

随着量子点、纳米线、二维材料、狄拉克材料等新结构的涌现^[7-11],超表面、等离激元、阶梯 APD 结构等新结构的应用,体光伏效应、弹道雪崩等机理的提出,都引领着多维度红外光电探测器前沿发展。综上,本文以波长、偏振、光程、相位多维度信息为聚焦点,综述近年来新结构、新机理、新材料红外光电探测器进展,对下一代红外光电探测器发展提出思考和展望。

1 波长信息红外光电探测器

1.1 光波长维度机理与应用

构成物质的粒子振动频率与温度成正比,温度

越高,物体的特征辐射频率也越高。普朗克黑体辐射定律阐述了温度和辐射波长的关系,式(1)所示,理想黑体的光谱辐射率是关于发射波长和温度的函数^[12]:

$$M(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (1)$$

其中, $M(\lambda, T)$ 为光谱辐射出射度, λ 为波长, T 为温度, h 为普朗克常数, k 为玻尔兹曼常数, c 为光速。

传统强度维度红外光电探测器只针对单一段探测,存在目标丰富度信息获取不全、信息模糊等现象,多波长探测增加了图像处理算法的能力,场景的物体图像信息准确性得到明显提高,也可通过去除某一波段检测到的不需要的背景或目标特征,实现更高的有效信噪比,因此,拓展红外光波长维度信息,成为新型多维度红外光电探测器的重要发展方向之一。自 20 世纪 80 年代起,成像光谱仪便普遍应用于频率维度信息的获取,在天文遥感、食品安全等多领域发挥重要作用。多波长信息最终实现“数据立方”获取,获得二维灰度图像,同时也得到光谱成像信息,形成光谱切片,极大程度拓展目标信息丰富度。随着焦平面的发展,去除笨重的分光系统,实现单一焦平面获取波长信息成为发展主流。图 2 展示了 HRL 制备的焦平面规格为 1280×720 (MW/LW) 的超晶格双色器件成像,不同波段下获取的图像细节也不同^[13]。

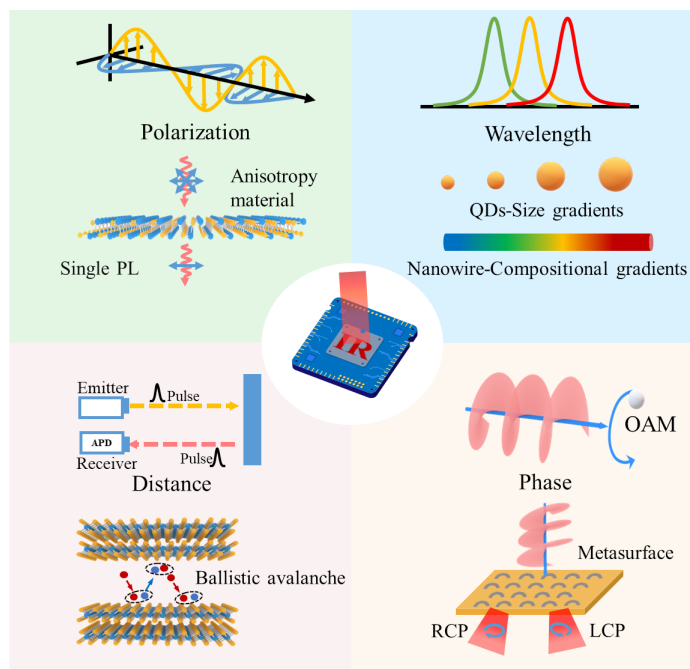


图 1 多维度红外光电探测器

Fig. 1 Infrared photodetectors for multidimensional optical information acquisition



图2 HRL 制备的 1280×720 MW/LW 器件成像(上:长波成像,下:中波成像)^[13]

Fig. 2 MWIR (top) and LWIR (bottom) 1280×720 images acquired by HRL^[13]

双色/多色焦平面红外光电探测器在军事中扮演着重要角色,通过双色探测导弹弹头和尾部火焰区域辐射出的不同的红外波段,区分辐射单一波长的干扰弹,从而提高预警率。表1中列举了军事中双色红外光电探测器的应用优势。

表1 双色红外光电探测器军事应用优势^[14, 15]

Table 1 Advantages of two-color infrared photodetector in military application

Two-color detectors	Advantage
IR / UV (红外/紫外)	Background suppression
SW / MW (短波/中波)	Improve anti-interference ability of IR guidance
SW / LW (短波/长波)	Distinguish missiles from jammers
MW / LW (中波/长波)	Enlarge the target detection area
MW / MW (中波/中波)	Distinguish missiles from sunlight
LW / LW (长波/长波)	The high QE and low dark currents of device

传统红外光电探测器通过黑体辐射定律进行温度测量,由于现实中真实物体并非黑体,致使对温度探测产生偏差。双色/多色探测可以通过比色温度测温原理获得物体实际温度^[16, 17]。比色温度测温的原理是通过物体不同波长的辐射亮度比探测物体的真实温度。假设黑体的温度为 T_b ,对应波长 λ_1 和 λ_2 的光谱辐射亮度之比为 R ,如式(2-3)所示:

$$R = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 \exp \left[\left(\frac{hc}{\lambda_2 k T} \right) - \left(\frac{hc}{\lambda_1 k T} \right) \right], \quad (2)$$

$$T_b = \frac{\left(\frac{hc}{\lambda_2 k} \right) - \left(\frac{hc}{\lambda_1 k} \right)}{\ln R - 5 \ln \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)}. \quad (3)$$

假若温度为 T 的物体的两个不同波长辐射亮度之比和黑体在 T_b 温度时的波长辐射亮度之比相等,则 T_b 为物体的“比色温度”,如式(4)所示:

$$T = \frac{\left(\frac{hc}{\lambda_2 k} \right) - \left(\frac{hc}{\lambda_1 k} \right)}{\ln R - 5 \ln \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right) - \ln \left(\frac{\varepsilon(\lambda_1, T)}{\varepsilon(\lambda_2, T)} \right)}. \quad (4)$$

发射率 $\varepsilon(\lambda, T)$ 指物体的辐射出射度与黑体的辐射出射度之比,如下式(5)所示, $\alpha_0(\lambda, T)$ 指物体对光的吸收率,物体的光吸收率等于光发射率:

$$\alpha_0(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) = \frac{M(\lambda, T)_{source}}{M_0(\lambda, T)_{blackbody}}. \quad (5)$$

最终根据温度可以求出物体的实际温度,如式(6):

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_b} = \frac{\ln \left(\frac{\varepsilon(\lambda_2, T)}{\varepsilon(\lambda_1, T)} \right)}{\left(\frac{hc}{\lambda_2 k} \right) - \left(\frac{hc}{\lambda_1 k} \right)}. \quad (6)$$

1.2 传统光波长维度红外探测器发展

1.2.1 层叠式双色/多色红外光电探测器

通过将多波长探测集成于单一像元,层叠式成为目前主流双色/多色探测器结构。以碲镉汞(HgCdTe)双色探测器为例,2006年,美国Raytheon Vision Systems(RVS)^[18]报道1280×720焦平面双色(MW/LW)探测器,像元中心距为20 μm,为目前报道的焦平面规模最大的碲镉汞双色探测器。2019年,Finmeccanica公司报道了像元中心距可以达到12 μm的(MW/LW)双色器件,焦平面未体现。国内由于碲镉汞技术起步较晚,2012年,中科院上海技术物理研究所^[19-21]报道了焦平面规模为128×128双色(SW/MW、MW/LW)探测器,像元中心距为50 μm;之后上海技术物理研究所报道了320×256的焦平面双色(MW/LW)探测器^[22],像元间距为30 μm。2020年,昆明物理研究所^[23]报道了640×512焦平面双色(SW/MW)探测器。层叠式多色探测器结构主要分为顺序型和同时型,图3展示了典型的碲镉汞

双色探测器类型,其双色/多色基本原理在红外光电探测器中一致。

图3(a)为顺序型(LW/MW)双色探测器基本结构。当长波层处于正向偏置工作状态时,中波层处于反向偏置,从而实现中波红外波段探测,通过调控电压偏置状态实现双色探测,该结构具有读出模块少等特点。但该型探测器需要两个信号分步读出,致使其读出速率降低。此外,由于其无法实时获得最佳的偏置电压,还存在串扰等问题。

图3(b)为同时型(LW/MW)双色探测器基本结构。该结构一般需要在光敏元上引出两个读出模块,通过施加不同偏置电压,实现同时双色探测。具有读出速率高和施加最佳偏置电压的优势。但该结构需要两个读出模块,存在读出电路制备工艺难度大等问题。

由于层叠式结构存在制备工艺难度高、系统设

计复杂等问题,致使目前该结构器件多停留在双色探测阶段。Hipwood等人^[26]通过金属有机化合物化学气相沉积(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)制备层叠式碲镉汞三色(SW/MW/LW)器件,但波段之间存在较为严重的串扰问题。因此,通过层叠式实现更多波长红外探测面临严峻挑战。

1.2.2 高密度垂直集成光敏二极管双色探测器

高密度垂直集成光敏二极管^[24, 25](High Density Vertically Integrated Photodiode, HDVIP)的优势在于打破传统层叠式结构,无衬底和无需钢柱互连技术等,同时这种结构设计可以提高器件抗高低温冲击性能,因此HDVIP结构成为碲镉汞焦平面多色探测器发展的新趋势。美国DRS^[27]通过将两种单色HDVIP黏合在一起形成阵列规模为320×240(MW/LW和MW/MW)双色探测器,形成通向底层的绝缘通道,获取上层波长数据,如图3(c-d)所示。由于HDVIP双色探测器通过外延形成各自波段的单色HDVIP结构,再逐层加工、黏合实现多色探测器。这种多色探测器结构的拓展不会增加器件的制备工艺难度,被称为“理想的双色探测器结构”。但是,这种结构外延工艺需要无损去除衬底,导致工艺难度系数提高,同时还具有占空比不足的缺点,目前只有部分厂商进行研发。

1.2.3 交错式结构双色探测器

2009年,美国JPL报道了焦平面规模为1024×

表2 顺序型和同时型双色探测器对比

Table 2 Comparison of two different modes of two-color infrared detectors

	Sequential mode	Simultaneous mode
Output electrodes per unit cell	One	Two
Readout rate	Slow	Fast
Bias voltage	Change	Not change
Best bias voltage	Not best	Best
Cross talk	Exist	Exist

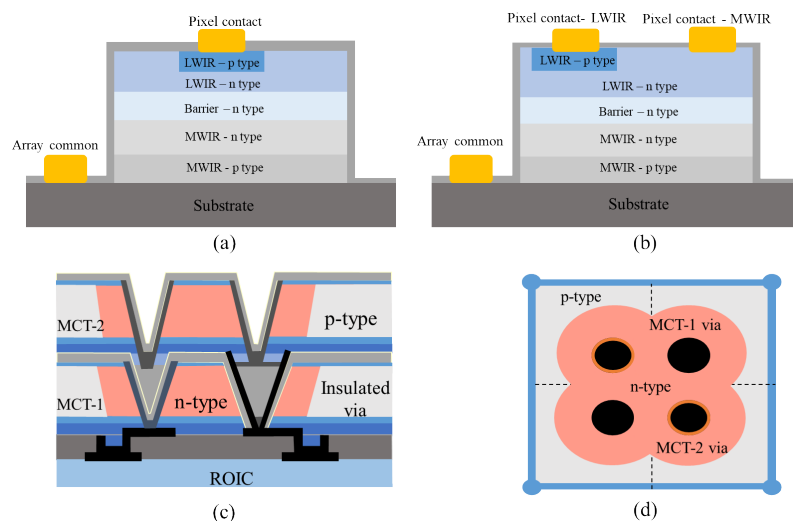


图3 (a)碲镉汞双色探测器顺序型模式,(b)碲镉汞双色探测器同时型模式,(c)HDVIP双色探测器侧视图,(d)HDVIP双色探测器俯视图^[24, 25]

Fig. 3 (a) Sequential mode of HgCdTe two-color infrared photodetector, (b) simultaneous mode of HgCdTe two-color infrared photodetector, (c) side view of HDVIP two-color photodetector, (d) top view of HDVIP two-color photodetector^[24, 25]

1024 的双色 (MW/LW) 探测器^[28]。相对于层叠结构,量子阱红外探测器提供了另一种结构思路——交错式结构,不同二维光栅与不同探测波段的量子阱探测器耦合,采用光耦合二维周期光栅,通过探测器“短路工艺”,消除特定波段以外的光谱段。如下图 4(a)所示,奇数行中二维周期光栅对长波(8~9 μm)探测器短路,在探测甚长波时,长波由于短路不会产生响应。从而实现交错式多色探测结构。1999 年, JPL^[29]推出焦平面规模为 640×486 的双色 (LWIR/VLWIR)探测器,具体结构如下图 4(a)所示。2003 年,美国 NASA^[30]推出焦平面规模为 640×512 的四色 QWIP 探测器,其中每一个探测波长阵列均为 640×128,探测波长分别为 4~6 μm , 8.5~10 μm , 10~12 μm 和 13~15 μm ,在这种探测结构中,每个成像阵列独立且同时读出, QWIP 相对于 HgCdTe 其他探测器具有自身带隙狭窄特性,不同波段探测阵列之间存在较少甚至没有光谱串扰。2009 年, NASA^[31]进一步推出实现四色 QWIP 探测的新方法,将超像素划分为传统材料的四个子像素,每个子像素区探测其中特定波长,如图 4(b)所示,其中每一个 2×2 的子像素区(Q1, Q2, Q3, Q4)最终形成一个四色探测超像素。

1.3 新型波长红外光电探测器进展

1.3.1 新材料-双色红外光电探测器

具有可扩展吸收波长、灵敏度高、成本低的多维材料为新型红外光电探测器的发展带来机遇。传统双色探测器需要复杂的制冷系统降低暗电流,同时在外延生长时存在晶格失配、串扰等问题,无法满足小型化、高性能发展需求。然而通过范德瓦尔斯力(van der Waals, vdWs)键合的层状二维(2D)材料,避免了表面悬挂键、晶格失配等影响。中国

科学院上海技术物理研究所胡伟达课题组^[32]通过二维材料设计垂直堆叠背靠背结构实现 NIR/MWIR 顺序型双色探测器,通过 BP/MoS₂结构实现 MWIR 探测, MoS₂/Si 结构实现 NIR 探测,其结构如图 5(a-c)所示。双色探测器在室温下工作,探测波长在 3.5 μm 时,比探测率 D^* 达到 $6.4 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 。并且,该双色探测器实现了低于 0.05% 的超低串扰。

量子点(CQD)红外探测器由于材料制备简单,成本低,器件灵敏度高等优势,为实现微型化双色探测器带来可能。Xin Tang 等人^[33]利用量子点在红外波段具有可调谐量子技术的特点,首次通过量子点设计了低维顺序型红外双色(SWIR/MWIR)探测器。如图 5(d-e)所示,双色量子点红外探测器为背靠背 N-P-N 结构,其中 Bi₂Se₃ 和 Ag₂Te 分别作为器件的 N 型和 P 型材料,通过制备不同尺寸的 HgTe 量子点,使其在 SWIR 和 MWIR 波段具有可调的吸收特性。在工作温度 85 K 时,测得器件短波红外探测波长小于 2.5 μm , 中波红外探测波长为 3~5 μm , 比探测率 D^* 达到 $10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 以上,调制切换频率可达 100 kHz。量子点双色探测器的出现为实现低成本、大规模制备双色红外光电探测器提供了新途径。

1.3.2 新机理-多色红外光电探测器

多色红外探测器发展一直受到结构或分光辅助系统的限制。Zongyin Yang 等^[34]通过合成具备能带渐变的复合纳米线实现多波长探测,打破传统光谱仪所需要的分光 and 探测系统,为实现微型计算光谱仪铺垫了良好基础。如下图 6 所示,利用组分工程使单根 CdSe_xS_{1-x} 纳米线一端组分以 Cd、Se 为主、另一端以 Cd、S 为主,从紫外到红外(1.74 eV~2.42

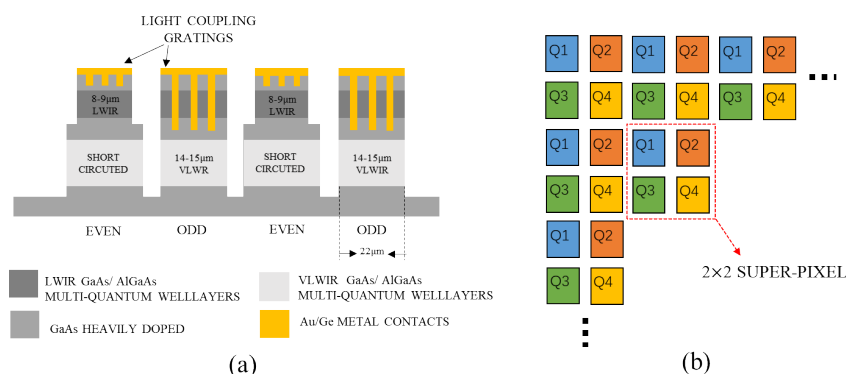


图 4 (a) 双色交错式结构, (b) 超像素四色示意图

Fig. 4 (a) Staggered structure of two-color infrared photodetector, (b) schematic of super-pixel four-color infrared photodetector

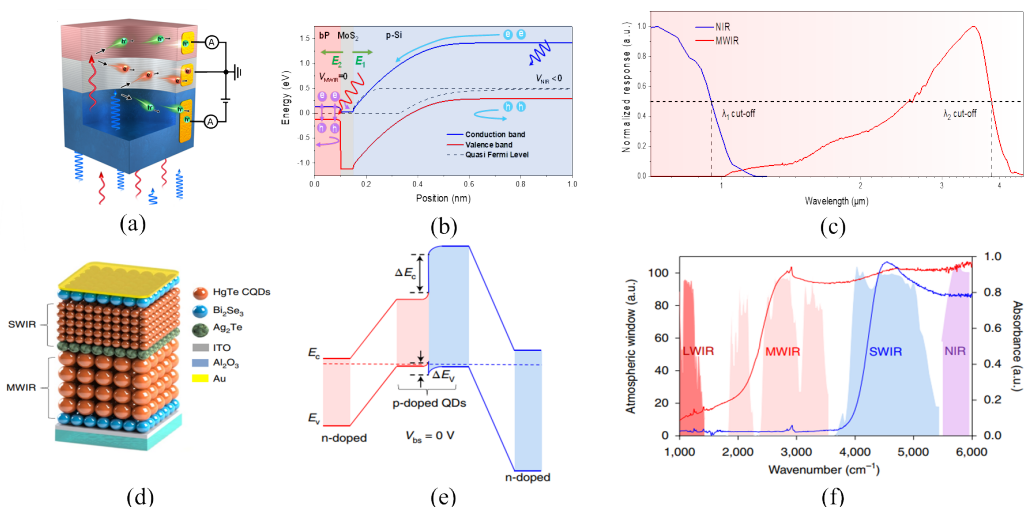


图5 (a)二维材料双色探测器结构示意图,(b)p-Si施加负电压后的模拟能带图,(c)归一化后的黑体辐射下的光谱响应,(d)量子点双色探测器结构图,(e)0V下双色探测器能带图,(f)光学吸收图^[32, 33]

Fig. 5 (a) Structure of Van der Waals two-color photodetector, (b) simulated energy band diagram with p-Si under a negative voltage, (c) normalized spectral response of the two-color photodetector during the back radiation, (d) structure of Quantum dot two-color photodetector, (e) energy band under 0 V bias of two-color photodetector, (f) optical absorption diagram^[32, 33]

eV)带隙渐变,在单一纳米线上搭建多根电极,每两根电极间为特定波长光电探测器,获取N个读出单位得到作为波长的函数的光电流,实现光谱分析仪的效果。其响应率达到 1.4×10^4 A/W,在570 nm附近分辨率达到15 nm。这种无需分光系统的能隙渐变复合纳米线为实现真正意义上多色探测拓展提供了新思路。

功能集成化成为当代探测器发展的重要方向,多色探测器发展的未来方向是去除传统光谱仪复杂的光路系统、单一焦平面实现更多波长信息获

取。传统双色/多色探测器存在高制备成本、结构限制实现更多波长探测等问题。得益于低维材料的可机械剥离和带隙可随厚度变化等特性,使该类探测器的材料制备成本骤减,采用低维材料制备双色探测器成为一种新趋势;依据材料组分工程调控材料带隙,使单一探测器即可实现多波长信息探测,这种新型技术的研发为今后多波长探测器的变革提供了有效途径。

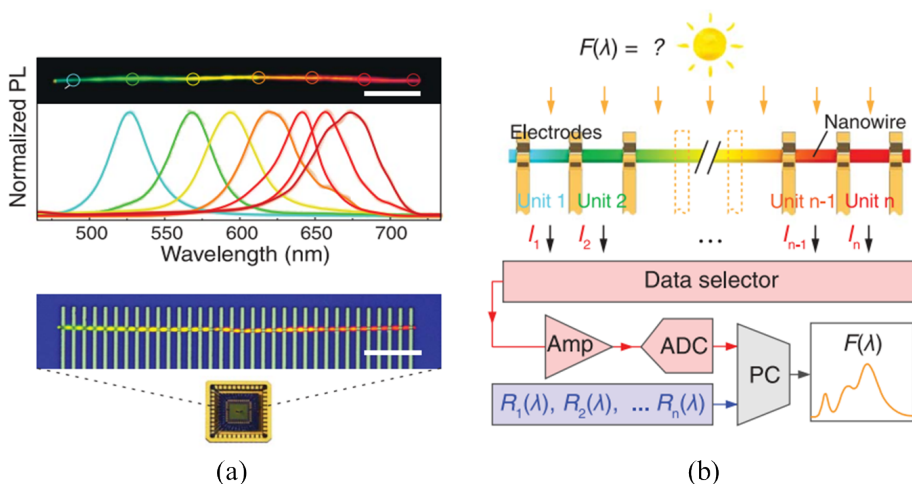


图6 (a)单纳米线光谱仪(b)探测原理图^[34]

Fig. 6 (a) Single-nanowire spectrometers, (b) schematic of photodetector^[34]

2 偏振信息红外光电探测器

2.1 光偏振维度机理与应用

传统强度维度红外探测器逐步无法满足特定场景中目标信息探测的需求,红外偏振信息应用具有识别背景温差小的目标的优势,在清晰目标轮廓、突出背景环境目标信息和降低虚警率等方面发挥重要作用,被广泛应用于军事、医学、农业、海洋监测等多个领域。比如在医学方面,通过偏振探测可以检测癌症;在仿生学中,红外偏振成功应用于器件视觉检测。在侦察方面,红外偏振可发现隐藏目标,如图7(a-b)^[35]展示了在偏振状态下可以观测火焰中的金属目标。图7(c-e)^[36]展示了利用偏振识别伪装在树后的汽车。红外偏振维度信息获取已成为近几年红外探测器的重要发展方向之一。

红外偏振成像与探测物体表面的粗糙度有关。B. Ben-Dor 等人^[37]对物体背景辐射做出了总结,发现光滑表面物体的偏振度大于粗糙表面物体。红外偏振相对于可见光较为复杂,在考虑物体反射偏振特性同时还需考虑物体的自发辐射偏振特性。Wolff 等人^[38]建立了完整的光滑表面和粗糙表面热辐射模型,通过对光滑的金属和塑料自发辐射分析,金属的自发辐射偏振度要高于塑料,表面粗糙度的增加会导致去极化效果越来越明显。同时,实验发现偏振度的变化和粗糙度的类型有关,在特殊

的粗糙表面,铝金属偏振度可能会大于光滑面偏振度。

光的偏振态表示主要分为三角函数表示法、Jones 表示法、Stokes 表示法、邦德尔球表示法四种^[39]。Stokes 矢量作为光的偏振态表示方法的一种,其具备对自然光、完全偏振光和部分偏振光都可进行表示,以及计算简单方便等优势,成为最常用的红外偏振表达。Stokes 矢量表示如下, S_0 表示自然光强度, S_1 表示水平线偏振光强度与垂直线偏振光强度差, S_2 表示 45° 线偏振光强度与 135° 线偏振光强度差, S_3 表示左旋偏振光强度与右旋偏振光强度差。如下公式(7)所示:

$$\begin{pmatrix} S_0 = I_0 + I_{(\frac{\pi}{2})} \\ S_1 = I_0 - I_{(\frac{\pi}{2})} \\ S_2 = I_{(\frac{\pi}{4})} - I_{(\frac{-\pi}{4})} \\ S_3 = I_l - I_r \end{pmatrix}. \quad (7)$$

偏振度、偏振角、偏振椭率和消光比是红外偏振探测器关注的主要性能参数。如式(8),偏振度(Degree of Polarization, DOP)为偏振光强度和总光强的比值:

$$DOP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}. \quad (8)$$

偏振角(Agree of Polarization, AOP)为椭圆偏振

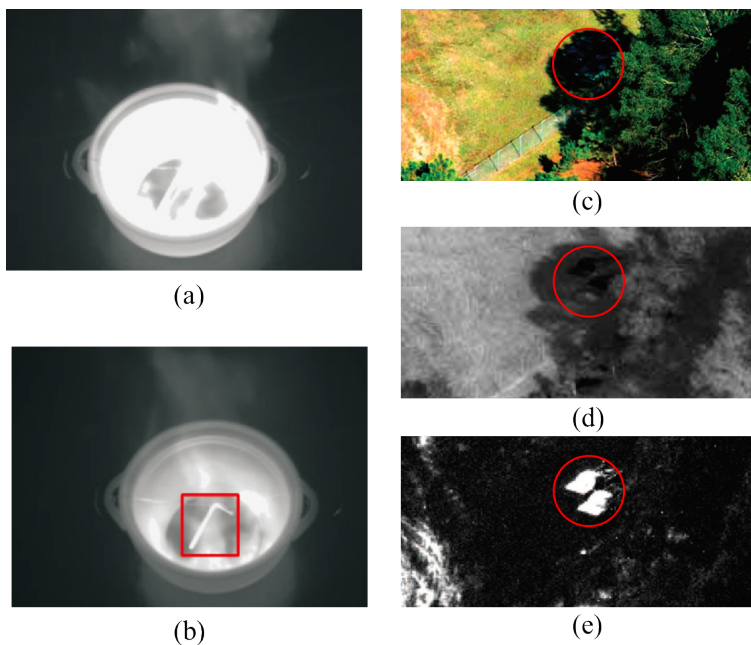


图7 (a)传统红外成像,(b)偏振成像,(c)可见光成像,(d)红外成像,(e)偏振成像^[35, 36]

Fig. 7 (a) Traditional infrared image, (b) polarization image, (c) visible image, (d) traditional infrared image, (e) polarization image^[35, 36]

光的长轴和 x 方向上的夹角:

$$\text{AOP} = \frac{1}{2} \arctan \frac{S_2}{S_1}. \quad (9)$$

偏振椭率 ε 为椭圆偏振中短轴和长轴之比:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \arctan \frac{S_3}{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}. \quad (10)$$

偏振消光比 (Extinction Ratio, ER) 为偏振片旋转一周后, 产生最大的偏振光响应率 R_{max} 与最小的偏振光响应率 R_{min} 的比值, 如式 (11) 所示。理论上偏振片消光比接近于无穷大。对于探测器而言, 通过对线偏振度校准, 消光比达到 5 以上便可以实现偏振探测功能^[40]。

$$\text{ER} = \frac{R_{max}}{R_{min}}. \quad (11)$$

2.2 传统光偏振维度红外探测器发展

传统的红外偏振成像探测类别主要分为四种。

第一种为分时成像法, 如图 8(a) 所示, 在红外成像系统前添加偏振系统, 旋转偏振片获取不同角度下的偏振成像, 旋转角度选择主要分 $(0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ)$ 和 $(0^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ)$ 两种。这种方法为偏振成像最为简单方便, 但时空一致性较差, 普遍适用于静态物体成像。同时, 旋转过程中容易产生机械振动, 导致偏振成像分辨率下降。

第二种为分振幅成像法, 如图 8(b) 所示, 通过复杂的光学系统, 将不同偏振光进行区分探测。这种成像方式具有较高的时空一致性优点, 但存在设备昂贵、高体积占比等缺点。

第三种为分孔径成像法, 如图 8(c) 所示, 通过

分孔径系统, 将不同偏振光分别对应单个焦平面的不同探测位置, 同时获得不同偏振分量图像。优点在于时空一致性, 但是该结构存在光学系统结构复杂、造价成本高、配准要求高等缺点。

第四种为分焦平面成像法, 也为目前红外偏振主流成像。图 8(d) 所示, 将微偏振光栅与红外光学系统相耦合, 每一个微结构对应不同的焦平面像元, 获取不同偏振成像。2011 年, 美国 Raytheon 公司^[40] 制备焦平面规模 256×256 中波和长波红外偏振探测器, 2013 年, Sofradia^[41] 制备焦平面规模 640×512 中波量子阱红外偏振探测器。2017 年, 昆明物理研究所^[42] 制备焦平面规模 640×512 偏振长波量子阱探测器。该方法具有体积小, 集成度高, 时空一致性强等优点, 但也具有偏振光栅精度要求高、光栅与探测器热系数匹配、制作加工难度大等不足。

2.3 新型光偏振红外光电探测器进展

2.3.1 新结构-偏振红外光电探测器

表面等离子激元近年来作为活跃的光学领域之一, 具有局域场增强和衍射极限突破等特点。中国科学院上海技术物理研究所陆卫团队^[43, 44] 通过设计表面等离子激元微腔 (Plasmonic Micro-Cavity) 结构, 如图 9 所示, 利用光子态和子带跃迁定则对入射光进行偏振选择。该结构对于横向磁场 (Transverse Magnetic Field, TM) 偏振光具有强耦合作用, 横向电场 (Transverse Electric Field, TE) 偏振光大部分能量被反射且弱吸收, 在红外波段为 $14.2 \sim 14.9 \mu\text{m}$ 时消光比高达 $65^{[45]}$, 这种等离子激元微腔结构为量子阱偏振探测器设计起到了启发作用。

纳米天线具有提高灵敏和偏振选择性, 受到偏

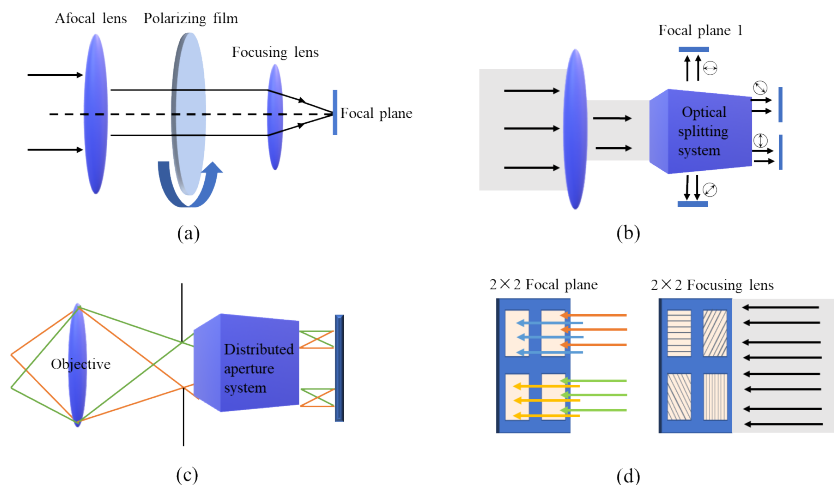


图 8 常见的红外偏振成像类型

Fig. 8 Common types of infrared polarization imaging

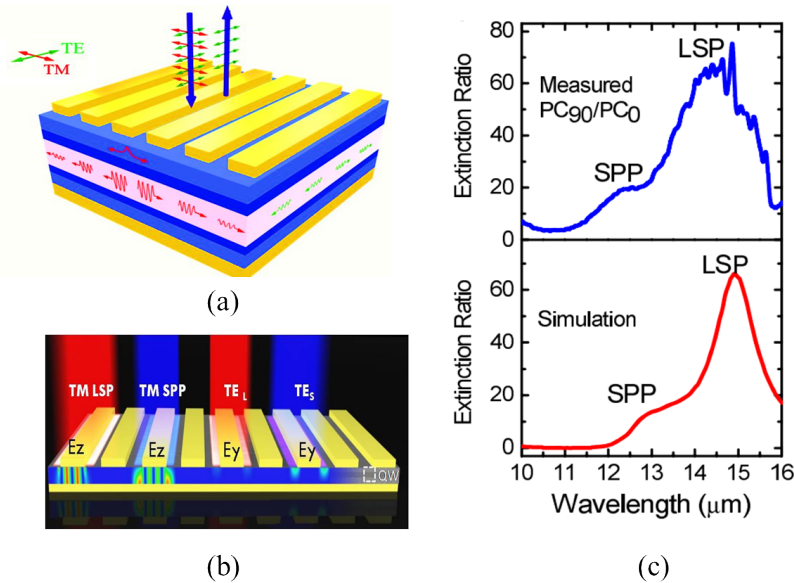


图9 (a)光子态偏振选择模式,(b)子带跃迁定则偏振选择模式,(c)消光比谱线^[43, 44]

Fig. 9 (a) Selection mode of Photo state polarization, (b) Polarization selection mode of subband transition law, (c) extinction ratio line^[43, 44]

振探测领域的关注。针对各向异性材料消光比普遍小于10, Jingxuan Wei 等人^[46]通过利用半金属的矢量和非局域光响应性质,实现中波红外纳米天线介导的半金属光电探测器。如下图10(a-c)所示,装置由周期性定向的金属纳米天线和石墨烯晶试管构成,通过调节纳米天线取向,使其发生单极化偏振响应和双极化偏振响应相互转化,其在极化转变处,消光比趋近无穷大,超越传统消光比关系,实现 $1 \rightarrow \infty / -\infty \rightarrow -1$ 范围变化。针对等离子体纳米天线对光的特定偏振态敏感超表面的现象, Evgeniy Panchenko 等人^[47]制备了铝纳米天线的硅光电探测器,一对正交偏振敏感的纳米天线集成于背对背肖特基结构(MSM)中,如图10(d-f)所示,两个独立MSM通道,由于集成不同方向的纳米天线,分别对入射偏振光产生不同的光响应,获得差分电信号,最终实现圆偏振光探测。通过差分探测方法在信号输出时去除器件暗电流,不被光学系统信号波动所影响,获得稳定电流信号,这种差分信号的新方法,在红外光电领域具有应用价值。偏振纳米天线在偏振探测器上的使用为新型紧凑型偏振探测器提供新可能。

2.3.2 新材料—偏振红外光电探测器

传统的四种红外偏振探测方法都需要辅助偏振系统,低维材料内禀特性——各向异性,突破了传统探测器需要的偏振辅助成像系统,极大地降低

了制作成本和难点。偏振敏感材料已成为新红外偏振成像方向之一。自2004年石墨烯的发现至今,二维材料特有的物理性能使之成为热门材料之一,研究发现,具有各向异性的敏感二维材料在红外偏振探测方面具有潜在的应用价值,其中硫化铯^[48]、黑磷^[49]、二硒化铯^[50, 51]、砷化镓^[52]等诸多具有各向异性的偏振敏感二维材料被用于制备场效应晶体管 and 异质结器件,如2016年,复旦大学修发贤和中国科学院上海技术物理研究所胡伟达两课题组联合^[48]制备的硫化铯偏振敏感场效应晶体管,室温下呈现了稳定的电流饱和特性和超高的开关比(10^7)。图11显示硫化铯场效应器件在不同偏振光照射下产生不同的光电流强度。这种各向异性的二维材料自身的偏振属性为突破传统偏振体系提供了可能。

2.3.3 新机理—偏振红外光电探测器

体光伏效应(Bulk PhotoVoltaic Effect, BPVE)零偏下具有均匀光响应的特征,其光电器件效率方面可能超越 Schckley-Queisser 极限,在光电探测领域备受瞩目。Jingxuan Wei 等人^[53]通过制备人工体光伏材料,设计超表面结构,首次实现非制冷级联极化超表面介导石墨烯中红外偏振光探测器,如图12所示。实验设计非对称性金属纳米天线使其规律性地附着在石墨烯表面,在外部偏压为0V且均匀光照条件下,光载流子在非对称结构中随光偏振

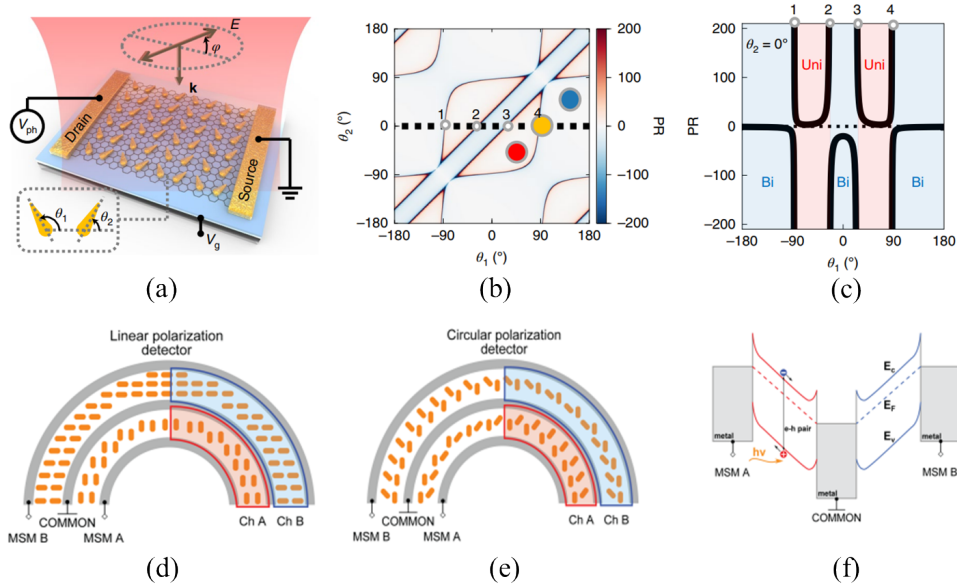


图 10 (a)纳米天线介导的半金属光电探测器的原理图,(b)计算 PR 作为 (θ_1, θ_2) 值的映射,(c)b 中的虚线的 PR 的切线图,(d)探测线偏振和圆偏振的 MSM 原理图,(e)光电探测器的偏置能带图^[46, 47]

Fig. 10 (a) Schematic of the nanoantenna-mediated semimetal photodetector, (b) calculated PRs as a mapping of (θ_1, θ_2) values, (c) cutline plot of the PRs along the dashed line in b, (d) schematic of MSM to sense the linear (left) or circular (right) polarization states, (e) band diagram under bias^[46, 47]

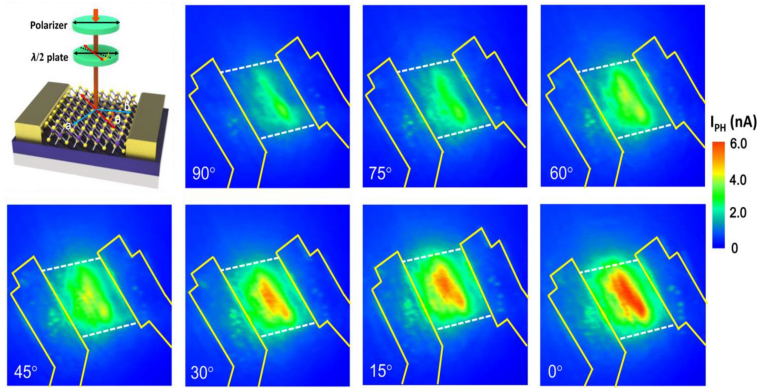


图 11 硫化铼光电探测器在不同偏振光下产生的电流强度^[48]

Fig. 11 Current intensity response of ReSe₂ photodetectors under different light polarizations^[48]

定向移动,最终产生不同方向大小的光电流,从而实现中波红外偏振探测。同时,实验团队根据超表面的设计灵活特点,针对偏振角和入射功率两个自变量,设计具有三次旋转对的三端口,如图 12(e),无需校准入射功率就能检测偏振角的器件结构,单个设备就可准确探测偏振光。

针对传统红外偏振探测器进展主要集中于偏振片的研究和开发,无法真正意义上实现偏振焦平面一体化集成的问题。本文从新结构、材料和机理三方面进行综述,打破传统光栅结构限制,为红外偏振探测开辟新途径。如表面等离子激元微腔结构

的设计,对偏振光进行选择吸收,同时也具有强耦合作用,大幅度提高器件偏振消光比;自身具有各向异性特性的二维材料成为未来偏振高集成发展的主要方向之一;打破传统偏振探测器定式思维,通过纳米天线与 MSM、半金属等结合,实现红外偏振探测新理念。新思想的融入为今后集成化偏振红外探测器发展提供新的思考。

3 光程维度红外光电探测器

3.1 光程维度机理与应用

光程信息具备测量物体距离的信息特点,使机

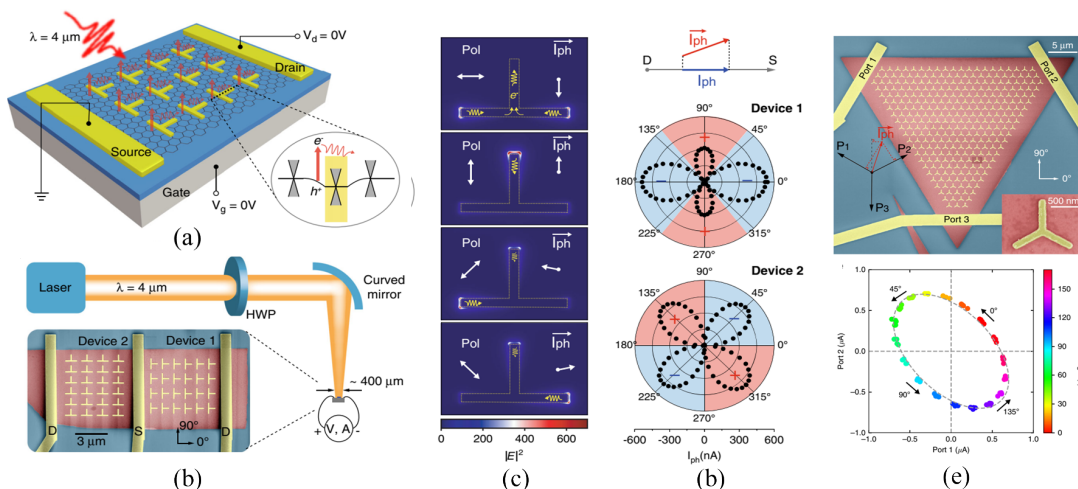


图 12 (a)超表面介导的石墨烯光电探测器,(b)控制线偏振状态的实验装置图,(c)矢量光电流模拟图,(d)光电流 I_{ph} 极图,(e)三端口设计图和偏振二维图^[53]

Fig. 12 (a) Metasurface-mediated graphene photodetector, (b) the experiment diagram of controlling the linear polarization state, (c) simulation diagram of vectorial photocurrent, (d) polar plot of measured I_{ph} , (e) the diagram of three-port device and polarization 2D plot^[53]

器视觉成像从二维(2D)迈向三维(3D)。三维成像目前主要分为立体视觉、结构光和飞行时间(Time of Flight, TOF)三种。立体视觉又称为被动成像,基于视差原理,通过相机捕获两幅或多幅图像信息完成三维成像;结构光三维成像为主动成像,主要是向物体投影特定的光照明图案,再用相机获取被目标调制后的图像,最终通过图像处理和视觉模型获取目标三维成像;飞行时间三维成像为主动成像,通过对发射和反射光信息进行处理获取探测器与物体之间的距离。目前,该技术已经广泛商用化,索尼、微软、三星等厂商已有使用,在国防、航天和人工智能等领域也得到了广泛应用。

飞行时间测量主要分为两大类^[54-56],第一类为间接飞行时间(Indirect Time of Flight, ITOF)测量,探测器主要使用 CCD/ICCD 面阵探测器,优势在于制作成本低,系统集成容易。ITOF 测量方法为相位法测距,激光器首先向物体发射调制光,再接受物

体反射光,通过曝光时间所累积的积分电荷,获取发射光和接收光之间的相位差 $\Delta\varphi$,间接得到物体距离探测器的距离。如公式(12)所示,其中 d 为探测器到传感器之间的距离, c 为光速, f 为发射激光频率。

$$d = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \cdot \frac{c}{2f} \quad (12)$$

第二类为直接飞行时间(Direct Time of flight, DTOF)测量法,如下图 13 所示,通过获得发射光和脉冲光之间的时间,直接计算探测器和物体之间的距离 d ,如式(13)所示,DTOF 具有低功耗、高时间分辨、抗干扰能力强等优点,成为距离探测的主要方向之一。

$$d = \frac{TOF \times c}{2} \quad (13)$$

3.2 传统光程维度红外探测器发展

直接飞行时间(DTOF)成像具有灵敏度高,可以实现长距离探测、低功耗、多个像素同时探测、无需

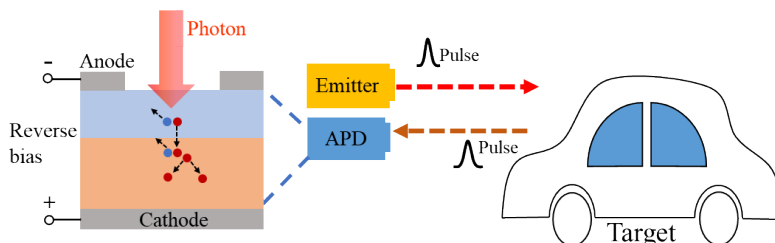


图 13 DTOF 和传统雪崩光电探测器 APD 原理图

Fig. 13 Schematic of Direct Time of Flight (DTOF) and traditional Avalanche Photodiode (APD)

调制等优点,成为新型三维成像技术的核心主力。雪崩光电二极管(Avalanche PhotoDiode, APD)^[57]作为当下 DTOF 发展中的核心探测部件之一而备受关注。雪崩光电二极管原理是在施加较高的反向偏压下,空穴电子对在高电场作用下,与晶格发生碰撞,产生新的载流子通过再次碰撞,使 APD 载流子密度迅速增加,起到对光生载流子的放大作用,最终实现弱光探测。

APD^[58]根据施加工作电压的不同分为线性模式(LM-APD)和盖格模式(GM-APD)两种^[59]。在线性模式(LM-APD)下,输出电流和施加电压成线性变化,施加电压一般都小于雪崩电压,在电压恒定下,内增益一般小于 1×10^3 。在盖格模式下,施加电压高于雪崩电压,APD 增益通常达到 1×10^5 ,在耗尽层中一个自由载流子就会被无限放大,实现真正意义上单光子探测,但是 GM-APD 由于施加电压往往大于雪崩电压,雪崩一旦发生,雪崩效应会一直持续导致器件永久损坏,因此需要猝灭电路停止器件继续雪崩,通过复位偏置电压再进行下次探测,致使 GM-APD 需要中途等候时间。

InGaAs、Si、HgCdTe 等成为目前主流红外雪崩光电探测器材料,2012 年,Princeton Lightwave 公司^[60]制备了阵列规模为 32×128 的 InGaAs APD 探测器。2012 年,Sofradir 公司^[61, 62]制备了焦平面 384×288 的 HgCdTe 中波红外 APD。2018 年,中电 44

所^[63]制备了面阵规模 64×64 的 InGaAs/InP APD 探测器。2019 年,中国科学院上海技术物理研究所^[64]首次报道了具有器件性能参数的面阵规模 16×16 HgCdTe 雪崩焦平面器件,其截止波长达到 $3.56 \mu\text{m}$,有效像元率大于 90%。雪崩光电二极管的发展一直严重制约着国内三维成像技术发展,目前存在材料制备工艺难、制备成本高、雪崩导致高过剩噪声因子等问题,本文接下来将通过多功能、新机理两方面对未来 APD 发展提供思路。

3.3 新型光程红外光电探测器进展

3.3.1 新机理-雪崩光电探测器

传统 APD 在发生碰撞电离需要一个长倍增区的高外加电场,阻碍了器件高增益、低偏置和低噪声性能的发展。南京大学王肖沐与缪峰两课题组^[65]合作利用弹道雪崩效应解决了这一难题,通过构建亚平均自由程垂直 BP/InSe 异质结,对其进行源漏电压、栅极电压调控,实现了低噪声新机理雪崩光电探测器。

如图 14 所示,在背栅 10 V 时,器件在功率为 $30 \mu\text{W}$ 和波长为 $4 \mu\text{m}$ 的激光照射下,源漏端施加反偏电压 4.3 V,器件发生雪崩效应,倍增因子达到 3×10^4 。如图 14(b)所示,弹道雪崩 APD 噪声不仅低于传统 APD 器件噪声而且低于 $1/f$ 噪声,其雪崩阈值电压显示出负温度系数,而非传统 APD 正温度系数特性,研究表明该 APD 器件工作机理是一种全新的雪

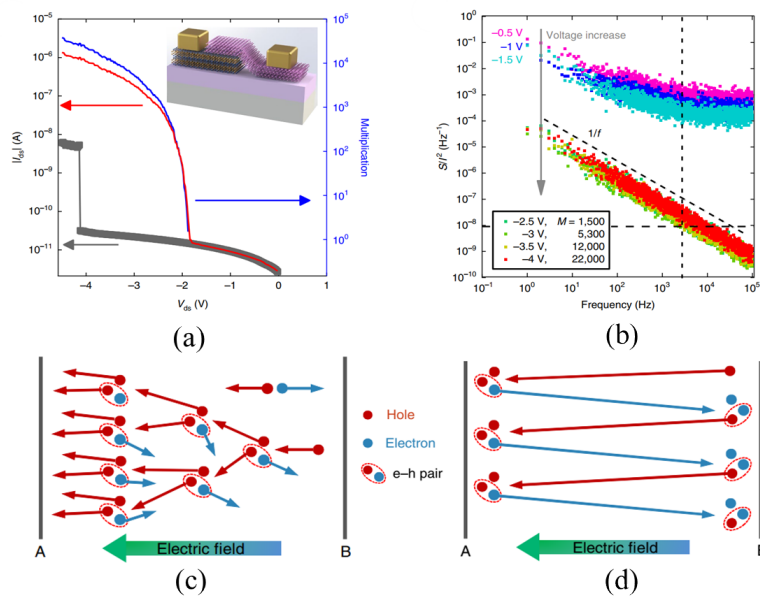


图 14 (a)BP/InSe 异质结, (b)APD 噪声, (c)传统雪崩机理, (d)弹道雪崩机理^[65]

Fig. 14 (a) BP/InSe heterostructure, (b) the noise of APD, (c) traditional ionizing collision process, (d) ballistic avalanche of BP/InSe heterostructure^[65]

崩击穿机制——弹道雪崩。这种新型雪崩机理拓展了人们对 APD 机理认知,为实现新型原理 APD 提供新思路。

3.3.2 多功能-雪崩光电探测器

传统 InGaAs/InP APD 为了提高量子效率通常需要扩大光敏元面积,这种做法导致器件存在暗计数大、后脉冲等问题,突破光敏元和量子效率的相互制约机制一直是传统 APD 待解决的问题。如图 15(a-b)所示,中国科学院上海技术物理研究所陆卫团队^[66-68]研制的金属绝缘层金属(Metal-Insulator-Metal, MIM)等离子激元结构实现了光敏元缩小而量子效率保持不变,同时使器件具有偏振选择特性,为偏振 APD 的实现提供了借鉴意义。

通过单一探测器实现多维度信息获取,是未来新型红外光电探测器发展方向之一,Sandra J. Gibson 等人^[69]制备锥形纳米线,其锥形结构使器件具有从紫外到近红外的宽光谱探测能力,如图 15(c-d)所示,最终器件增益超过 10^5 ,量子效率达到 85% 以上,为实现 APD 宽光谱探测提供了可能。

3.3.3 新结构-雪崩光电探测器

Gabriele Bulgarni 等人^[70]通过一维纳米线和零维量子点的结合,如图 16 所示,实现双色 APD 结构,其电子和空穴的放大倍数大于 10^4 。这种 APD 结构打破传统纳米线和碳纳米管雪崩单光子器探测灵

敏度的极限在 100 光子左右,最终实现单光子探测。通过 MOCVD 外延生长方法将 InAsP 量子点原位掺杂入 InP 纳米线的耗尽层中实现单光子探测。当 $V_{sd}=8$ V 时,单光子在量子点 p 壳层共振吸收并隧穿到纳米线倍增区产生雪崩,其增益大小为 1.3×10^4 ,最终实现单光子探测。这种多维度结合结构极大拓展了原有单光子探测器的结构类型。

针对传统 APD 结构存在电路耦合困难的问题,Orlial Lopez-Sanchez 等人^[71]尝试通过搭建垂直 MoS₂/Si 异质结形成雪崩光电探测器,如图 17(a-b)所示,其中垂直单层 n 型 MoS₂ 搭建在 P 型 Si 上,在异质结的突变结区形成倍增区,实现雪崩倍增效应,倍增因子达到 1000 以上,且暗电流低于传统 APD。这种 2D/3D 结合结构为今后实现红外波段 APD 提供了可能。

传统 APD 雪崩器件雪崩倍增区主要发生在 p-i-n 结区,肖特基结雪崩光电探测器提供了新思路。黑磷(BP)作为光-物质相互作用强的材料,一直是二维材料研究的热点,其能带可以通过调控材料层厚度实现 0.3 eV 到 2 eV 的变化。Mahamoud R. M. 等人^[72]首次报道在红外波段 1.55 μm 实现具有高量子效率和高增益的 APD 器件,其原理如图 17(c)所示,在 BP 两端搭建金属电极,形成肖特基结,沟道长度在微米级,在高偏压下整个沟道成为耗尽区,电

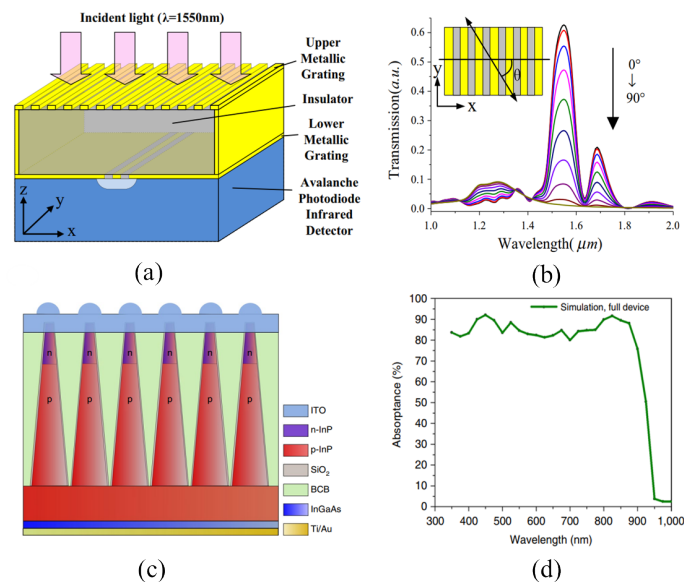


图 15 (a)MIM 腔的结构图, (b) MIM 结构在不同偏振度入射光下的投射特性, (c) 锥形 InP 纳米线 APD 结构图, (d) 模拟吸收率^[69]

Fig. 15 (a) Schematic diagram of MIM cavity, (b) transmission of MIM cavity with varying the polarization of incident light, (c) structure diagram of tapered InP nanowires APD, (d) simulated absorption^[69]

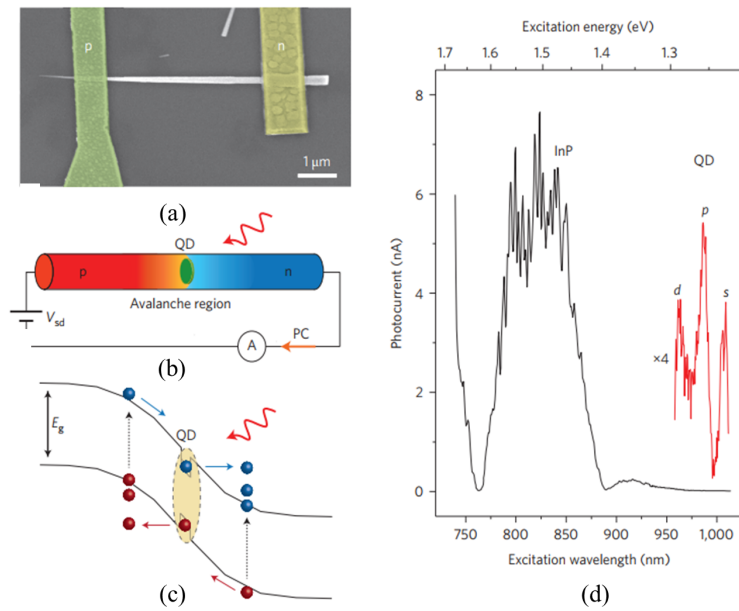


图 16 新机理纳米线单光子探测器^[70]
 Fig. 16 New single photodetectors of nanowire^[70]

子和空穴在耗尽区中发生雪崩,最终实现肖特基结雪崩光电探测。

传统的 APD 通过产生碰撞电离来实现雪崩增益,雪崩增益变化为随机过程,导致器件由于过高的噪声,存在灵敏度降低等问题。为实现在倍增区均匀发生雪崩, Capasso 等人^[73]提出了异质碰撞电离结构。2016 年, Min Ren 等人^[74]通过合成 $Al_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ 新材料首次制备了这种阶梯 APD 结构,如图

17(d) 所示,其碰撞电离发生在两个异质结构形成的尖锐带隙,在制备的一阶阶梯 APD 结构测试中实现稳定增益,抑制了传统 APD 噪声的产生。

APD 在光程维度探测中扮演着至关重要的角色,针对传统 APD 存在着高质量材料制备要求、高噪声等缺点,本章从新机理、新结构、多功能三方面对新型 APD 进行了讨论。采用二维材料 APD 弹道雪崩效应、冲击电离结构异质结等实现低噪声特

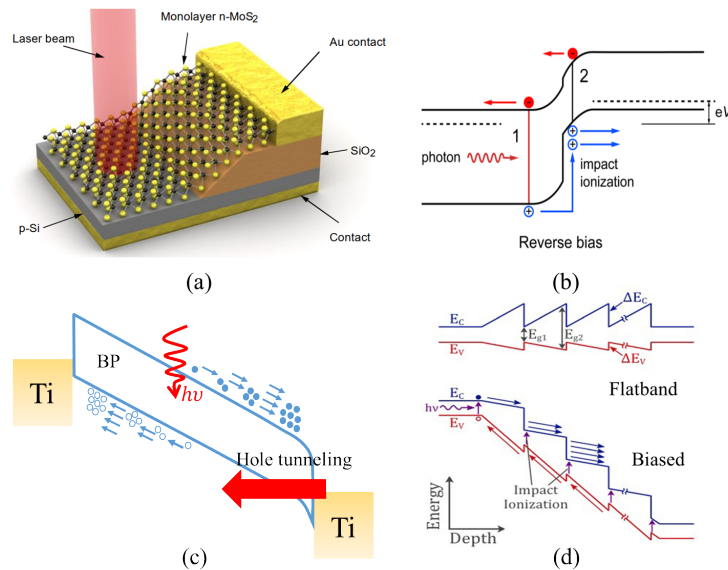


图 17 (a) 三维/二维异质结结构图, (b) 三维/二维异质结原理图, (c) 肖特基结构原理图, (d) 阶梯 APD 结构原理图^[71-74]

Fig. 17 (a) Structure diagram of 3D/2D heterojunction, (b) schematic of 3D/2D heterojunction, (c) schematic of heterojunction, (d) schematic of staircase APD structure^[71-74]

性;通过 2D/3D 异质结、肖特基结构等降低 APD 制备成本;制备 MIM 结构、锥形纳米线 APD 等实现偏振信息、宽广谱信息获取;通过零维量子点和一维纳米线结合突破传统 APD 雪崩结构认知,实现单光子探测。新型 APD 器件的提出,为获取光程维度信息的发展提供新思路。

4 相位维度红外光电探测器

4.1 相位维度机理与应用

传统被动目标识别中,由于能量在路径中存在非矢量叠加,导致在目标信息获取中容易受到路径气候等其他因素干扰,使其在弱目标、高速目标观测中出现精度下降等问题。具有相位分布、携带轨道角动量 (Orbital Angular Momentum, OAM) 信息的涡旋光,得到主动探测领域的关注,因其具有以下三个特点:远超现有物体运动的飞行速度;识别隐身目标,具有极强的抗干扰能力;不受传播途径中水汽、云雾等环境因素干扰,具有高的适应性能。相对于传统目标探测,“量子态”光子能够更好地对目标进行识别、成像,在关联成像、量子雷达成像、量子通信等领域具有很强的应用潜力^[75, 76]。

作为高斯光的一种,涡旋光和普通的高斯光束仍存在差异,其波前相位呈现螺旋形,在相位奇点处光强为 0,传播方向为绕光轴旋转方向。涡旋光束的携带轨道角动量,其大小与拓扑荷数 (l) 相关, l 为一个波长传播距离中波阵面扭转次数。拓扑荷数的表达方式如式 (14),其中 $\varphi(r)$ 表示相位。 C 为围绕相位奇点逆时针旋转的闭合曲线,当围绕相位奇点旋转一圈时,相位增加 $2l\pi$ 。逆时针旋转时 $l > 0$,顺时针旋转时, $l < 0$ 。

$$l = \frac{1}{2\pi} \oint_C \nabla \varphi(r) dr. \quad (14)$$

由于拓扑荷数的不同,如式 (15) 所示,沿 z 轴传播的涡旋光束在柱坐标下,其光场表达式^[77]为:

$$E(r, \theta, z) = E_0(r, z) \exp(il\theta) \exp(-ikz), \quad (15)$$

其中 E 为柱坐标下的涡旋光束电场强度, E_0 为振幅强度, r 为横向半径, $\exp(il\theta)$ 为光束涡旋相位, $\exp(-ikz)$ 为传播相位因子。

目前研究较多的涡旋光主要分为拉盖尔-高斯光束 (LG 光束)、厄米-高斯光束 (HG 光束)、贝塞尔光束等。拉盖尔-高斯光束是在柱坐标下求解标量的本征值,沿传播方向做傍轴近似的涡旋光束,其横截面上光强分布满足高斯函数,沿传播方向呈现空心旋转对称结构;厄密-高斯光束为亥姆霍兹方

程在笛卡尔坐标系下的傍轴近似解,光强分布为瓣状结构;贝塞尔光束在传播过程中不发生衍射扩展,传播方向垂直的横截面内光场强度不变,传播路径上遇到物体的一段时间后,光场强度分布又恢复原样。目前有多种方法制备涡旋光,如计算全息图法、空间光调制器法和 Q-板法等。

4.2 传统相位维度红外探测器发展

涡旋光的检测主要是通过识别拓扑荷数的大小和方向的不同,目前主要通过光路干涉或衍射成像,进而获得 OAM 检测结果。最为常见的是通过 Mach-Zehnder 干涉仪进行探测,其原理为通过两束相反拓扑荷数的涡旋光进行干涉,呈现中心对称的干涉条纹,根据条纹个数判断拓扑荷数。杨氏双缝干涉实验过程为涡旋光通过双缝后,根据干涉条纹的弯曲程度和形状判断拓扑荷数。除此之外,还有平面波干涉、球面波干涉、镜像干涉等对涡旋光干涉后产生的图像进行分析,从而获得拓扑荷数。如 2008 年,华侨大学陈子阳等人^[78]通过双缝干涉法研究涡旋光束在干涉场中的干涉分布情况,通过干涉条纹变化确定不同拓扑荷数 l 的涡旋光。

孔径光阑也是获取涡旋光拓扑荷数的常用手段,基于衍射理论,通过不同形状的光阑孔径对涡旋光拓扑荷数进行探测,如圆形孔径、矩形孔径、三角孔径等。2014 年, Hailong Zhou 等人^[79]通过夹缝夹角和中心输出强度变化实现 OAM 检测。2018 年, Leandro A. Melo 等人^[80]通过实现设计三角孔径的衍射直接测试涡旋光束的拓扑荷数。

4.3 新型相位维度红外光电探测器

传统相位维度红外光电探测器由于存在精度校准、光学系统复杂等问题,实现涡旋光探测的表面微结构备受关注,如人工微结构超表面。Shentao Mei 等人^[81]设计了一种由多个半环等离子体纳米缝组成的探测器,结构如图 18(a) 所示,该器件可以将不同模式的涡旋光映射到不同的焦点,其空间间隔为 120 nm,可以识别不同拓扑荷数的涡旋光。2017 年, Ji Chen 等人^[82]提出了一种片上等离子体纳米光栅,如图 18(b-c) 所示,涡旋光与等离子体光栅耦合后,分裂成两束表面等离子激元 (Surface Plasmon Polaritons, SPP),根据携带不同拓扑荷数产生的两束 SPP 夹角不同,检测不同的涡旋光束。

由于传统的涡旋光在和等离激元光栅耦合产生的 SPP 模式时会发生衍射现象,致使空间分辨率无法得到提升。Xuesi Zhao 等人^[83]提出一种复合相

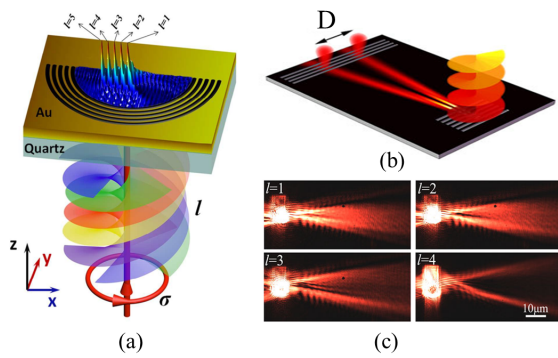


图 18 (a)半环等离子体纳米缝结构图,(b)片上等离子体纳米光栅结构图,(c)不同拓扑荷数的 OAM 光转换为不同的 SPP 波^[81, 82]

Fig. 18 (a) Schematic of semi-ring plasmonic nano-slit, (b) diagram of on-chip plasmonic nanogratings, (c) OAM light with different topological charges is converted to different SPP waves^[81, 82]

位调制角动量分束器(Compound Phase-Modulated Angular Momentum Beam Splitter, Compound PM-AMBS)解决了这一问题,其结构如图 19(a)所示,用于区分光束的自旋角动量和轨道角动量。OAM 光束耦合形成的 SPP 为不发生衍射、直线传播的局域化余弦高斯光束(Localized Cosine-Gauss Beam, LCGB),极大程度提高了空间分辨率。由于不同拓扑荷数的相位梯度不同,耦合后的 LCGB 沿不同方向传播,最终实现了拓扑荷数探测。当探测位置为 $30\ \mu\text{m}$ 时,其相邻 OAM (拓扑电荷 l 间隔为 2) 的空间间隔大于 $1.1\ \mu\text{m}$ 。

最近,基于自旋霍尔元光栅,Fu Feng 等人^[84]提出了一种片上等离子体涡旋光探测器,如图 19(b)所示,该金属表面设计双光栅结构,其光栅线由自旋霍尔狭缝代替,该结构将不同拓扑电荷的涡旋光与表面等离激元(SPP)耦合,传播方向因拓扑电荷不同而改变,两边的耦合光栅将 SPP 耦合到远场,可以实现圆柱矢量光束(Cylindrical Vector Beam, CVB)的偏振奇点和相位奇点检测。

光学复用在高通量数据存储、高速通讯、高灵敏度生物传感等领域^[85-87]扮演着重要角色。通过人工超表面微结构实现解复用功能,可以消除传统探测系统大尺寸等问题。如图 19(c)所示,Yanan Fu 等人^[88]设计了一种同时检测相位和偏振奇点的“自旋多路复用”超表面结构。该金属表面基于迂回相位(Detour Phase)原理设计超表面半圆光阑结构,可以实现自旋奇点和相位奇点同时检测,具有不同拓

扑荷数的涡旋光通过超表面后变为明亮的高斯点,且分别对应于远场 2 个 3×3 阵列,根据阵列中高点的位置判断拓扑荷数,实验中选择了三种不同的波长,分别为 $473\ \text{nm}$ 、 $532\ \text{nm}$ 、 $633\ \text{nm}$,以证明该超表面具有宽谱响应特性。Si Zhang 等人^[89]设计了一种全介质超表面的平面纳米光子解复用器实现 OAM、自旋角动量(Spin Angular Momentum, SAM)和波长信息的同时检测,如图 19(d)所示。该器件由于介电材料具有低损耗特性,表现出高效率,带有多个 OAM 和 SAM 信息的同轴光束通过解复用器后,成为沿不同特定波矢量传播的一系列涡旋光束。由于宽带响应和动量守恒使超表面能够实现波长解复用,该设计同时具有平面结构和超薄厚度的优点,较大程度推动了紧凑型光学平台的发展。

涡旋光束在光镊、非线性光学、量子信息处理、光数据存储与传输等方面的应用前景,使其得到了广泛的研究。但是传统的涡旋光检测需要依赖繁琐且体积庞大的光学系统,人工微结构的出现,为涡旋光探测面向小型化、高效化发展提供了新的发展方向。其超表面人工微结构具有紧凑且小型的设备尺寸(微米级)、宽带响应(可见光到红外)、高效率($>80\%$)等优点,是作为涡旋光检测未来发展的主要途径之一。

5 总结和展望

多维度信息红外光电探测器成为信息化、智能化时代的主要发展方向,本文针对传统强度维度探测器无法满足复杂环境需求等问题,从新结构、新机理、新材料等方面论述了近年来多维度红外光电探测器的发展,具体体现在以下三点。

1) 红外光电探测器的未来发展应结合新型材料,利用材料内禀特性,实现多维度信息获取。如本文中提到的二维材料具有各向异性特性,通过二维材料制备偏振光电探测器,去除传统偏振探测中需要偏振微栅辅助结构,降低成本。利用无悬挂键和晶格失配的二维材料制备双色探测器,实现室温和微型化器件的发展。

2) 传统红外光电探测器发展趋于集成化、规模化发展。突破定式思维,推动新机理研发,成为未来光电探测器发展的重要趋势之一。如本文提到,利用体光伏效应,实现新型偏振光信息获取模式;利用组分工程实现带隙渐变纳米线,突破传统光谱探测复杂的分光系统;制备弹道雪崩效应光电探测器,解决传统 APD 需要较长的雪崩通道产生过高的

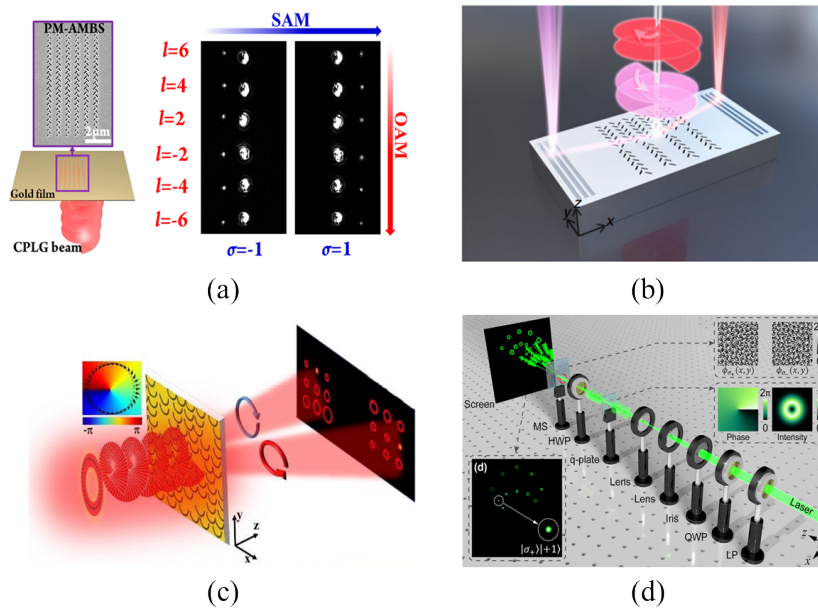


图 19 (a)左图:相位调制 OAM 分束器的示意图和 SEM 图像,右图:不同角动量入射光束的散射强度分布图,(b) 等离子体自旋霍尔纳米光栅原理图,(c) 基于“自旋多路复用”超表面确定光学奇点的原理图和模拟结果,(d) 自由空间光学奇点测定的实验示意图 [83, 84, 88, 89]

Fig. 19 (a) Left: schematic and SEM image of the phase modulation OAM beam splitter, right: scattered intensity profiles of the device for incident beams with different angular momentum, (b) schematic of the plasmonic spin-Hall nanograting, (c) schematic illustration and simulated results for determining the optical singularities by the spin-multiplexed metasurface, (d) schematic for determination of free space optical singularities [83, 84, 88, 89]

噪声等问题。

3) 针对传统探测器结构发展趋于瓶颈、器件成本高、器件性能仍待改善等问题,新结构的发展成为解决问题的主要途径之一。如本文中论述的,为解决传统红外 APD 器件面临成本高、读出电路耦合困难等难点,肖特基结构和 2D/3D 异质结构 APD 相继提出;通过设计表面等离激元微腔结构获得局域场增强、高消光比偏振探测器;通过量子点\纳米线融合实现单光子探测;利用人工微结构超表面检测涡旋光,实现设备小型化、高性能化发展。

红外光电探测器呈现集成化、低成本、微型化的发展趋势。如图 20 所示,新材料、新原理、新结构之间存在密不可分的联系,相辅相成。材料的内禀性质是成为新机理产生的奠基石,弹道雪崩效应发生在低维材料构建的亚平均自由程垂直异质结中;通过能带设计,将多维度材料结合,形成新型 APD 结构;纳米天线对光生载流子的局域特性为偏振探测新结构提供了新思路;构建低对称的异质结构,实现差分电流信号,最终实现偏振探测等。针对新一代红外探测器的发展,这三个方向仍需持续探索。新材料的发展最终需面向大面积、高质量制

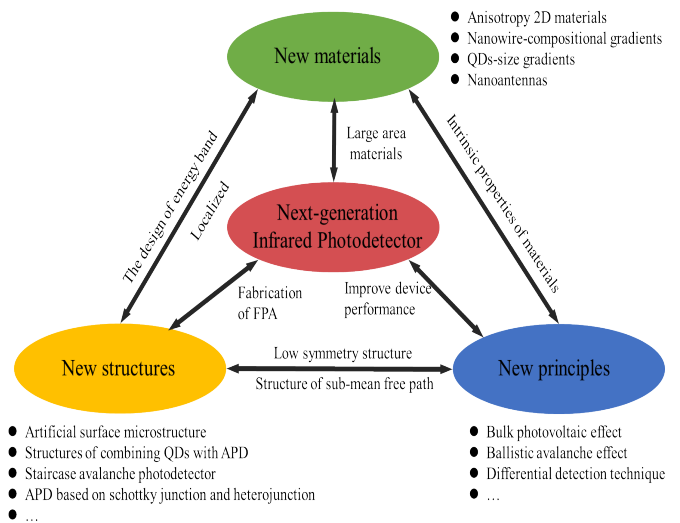


图 20 新材料、新结构、新理念的总结和新一代探测器的发展展望

Fig. 20 Summary of new materials, new structures, new concepts and development prospects of next generation infrared detectors

备。现大多数结构的实现只局限于单元器件,新结构焦平面器件制备发展成为未来发展的目标之一。

新原理的提出,在器件上成功实现后,普遍存在器件综合性能薄弱等问题,未来需面向提高器件综合性能的方向发展。通过将新机理、新材料、新结构融合,实现多维度信息同时获取成为红外光电探测器主流发展方向之一,如MIM等离激元结构与APD结合实现偏振/光程的多维度信息同时获取,最终真正意义上实现新型多维度红外光电探测器。

References

- [1] W.D. Hu, Q. Li, X.S. Chen, *et al.* Recent progress on advanced infrared photodetectors [J]. *Acta Physica Sinica* (胡伟达,李庆,陈效双,等.具有变革性特征的红外光电探测器.物理学报), 2019, **68**(12):42-76.
- [2] M. Long, P. Wang, H. Fang, *et al.* Progress, Challenges, and Opportunities for 2D Material Based Photodetectors [J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, **29** (19) : 1803807.
- [3] A. Rogalski. Next decade in infrared detectors [C]. Proceedings of SPIE – Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIV. 2017. DOI: 10.1117/12.2300779.
- [4] A. Rogalski, J. Antoszewski, L. Faraone. Third-generation infrared photodetector arrays [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, **105**(9):091101.
- [5] X. Ouyang, Y. Xu, M. Xian, *et al.* Synthetic helical dichroism for six-dimensional optical orbital angular momentum multiplexing [J]. *Nature Photonics*, 2021, **15** (12) : 901-907.
- [6] S. Wen, Y. Liu, F. Wang, *et al.* Nanorods with multidimensional optical information beyond the diffraction limit [J]. *Nat Commun*, 2020, **11**(1) : 6047.
- [7] Lei T, Zhui P, Runfeng L, *et al.* 2D materials-based homogeneous transistor-memory architecture for neuromorphic hardware[J]. *Science*, 2021, **373**(6561):1353-1358.
- [8] Y. Chen, Y. Wang, Z. Wang, *et al.* Unipolar barrier photodetectors based on van der Waals heterostructures [J]. *Nature Electronics*, 2021, **4**(5) : 357-363.
- [9] W. Luo, Q. Weng, M. Long, *et al.* Room-Temperature Single-Photon Detector Based on Single Nanowire [J]. *Nano Lett*, 2018, **18**(9) : 5439-5445.
- [10] L. Tong, X. Huang, P. Wang, *et al.* Stable mid-infrared polarization imaging based on quasi-2D tellurium at room temperature [J]. *Nat Commun*, 2020, **11**(1) : 2308.
- [11] Z. Zhang, S. Wang, C. Liu, *et al.* All-in-one two-dimensional retinomorphic hardware device for motion detection and recognition [J]. *Nat Nanotechnol*, 2021. DOI: 10.1038/s41565-021-01003-1.
- [12] W. R. McCluney, Introduction to radiometry and photometry [M]. Artech House, MA, 1993.
- [13] B. F. Andresen, G. F. Fulop, C. M. Hanson, *et al.* Advances in III-V based dual-band MWIR/LWIR FPAs at HRL [C]. Proceedings of SPIE – Infrared Technology and Applications XLIII. 2017. DOI:10.1117/12.2266278.
- [14] B. F. Andresen, Y. Reibel, G. F. Fulop, *et al.* Infrared dual-band detectors for next generation [C]. Proceedings of SPIE-Infrared Technology and Applications XXXVII. 2011. DOI:10.1117/12.885583.
- [15] D. A. Huckridge, Y. Reibel, R. R. Ebert, *et al.* MCT (HgCdTe) IR detectors: latest developments in France [C]. Proceedings of SPIE – Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications VII. 2010. DOI:10.1117/12.868355.
- [16] XING Ji-Chuan, LIU Guang-rong, JIN Wei-qi, *et al.* Dual waveband chromatic thermometry and its analysis [J]. *J. Infrared Technology* (邢冀川,刘广荣,金伟其,等.双波段比色测温方法及其分析.红外技术), 2002, **24** (6):73-76.
- [17] ZHEGN Zhong, HE La-mei. Infrared temperature measurement technology and its application to steel-making process [J]. *J. Industrial Heating* (郑忠,何腊梅.红外测温技术及在钢铁生产中的应用.工业加热), 2005, **34** (3): 25-29..
- [18] B. F. Andresen, D. F. King, G. F. Fulop, *et al.* 3rd generation 1280 x 720 FPA development status at Raytheon Vision Systems [C]. Proceedings of SPIE – Infrared Technology and Applications XXXII. 2006. DOI: 10.1117/12.673241.
- [19] W. Hu, Z. Ye, L. Liao, *et al.* 128 x 128 long-wavelength/mid-wavelength two-color HgCdTe infrared focal plane array detector with ultralow spectral cross talk [J]. *Opt Lett*, 2014, **39**(17) : 5184-5187.
- [20] YE Zhen-hua, DING Rui-jun, HE Li, *et al.* 128x128 SW/MW two-color HgCdTe IRFPAs [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (叶振华,丁瑞军,何力,等.128x128短波/中波双色红外焦平面探测器.红外与毫米波学报), 2012, **29**(6): 415-418.
- [21] YE Zhen-hua, HE Li, LI Yang, *et al.* Simultaneous mode MW/LW two color HgCdTe infrared detector [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (叶振华,何力,李杨,等.同时模式的中波/长波碲镉汞双色红外探测器.红外与毫米波学报), 2012, **31**(6): 497-500.
- [22] Chen Y , Ye Z , Peng Z , *et al.* Processing window broadened by a barrier structure in dual-band HgCdTe IRFPAs [C]. 2015 International Conference on Numerical Simulation of Optoelectronic Devices (NUSOD). IEEE, 2015:59-60.
- [23] YANG Chun-zhang, QIN Gang, LI Yan-hui, *et al.* Research on growth of M/L-wavelength dual-band IR-MCT on CZT substrate by MBE [J]. *J. Infrared Technology* (杨春章,覃钢,李艳辉,等.碲镉汞衬底上中波长双色红外碲镉汞分子束外延生长研究.红外技术), 2018, **40** (1):1-5.
- [24] D 'Souza A I, Stapelbroek M G, Bryan E R, *et al.* HgCdTe HDVIP detectors and FPAs for strategic applications [J]. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2003, **5074**:146-156.
- [25] B. Jeff, W. Milton, S. Richard, *et al.* Gated IR imaging with 128 x 128 HgCdTe electron avalanche photodiode FPA [C]. Infrared Technology and Applications XXXIII. 2007. DOI:10.1117/12.719358.
- [26] C. L. Jones, N. T. Gordon. Multi-color IRFPAs made from HgCdTe grown by MOVPE [J]. *Proceedings of SPIE*, 2007, **6542**(1) : 654210-654210-654218.
- [27] F. Aqariden, P. D. Dreiske, M. A. Kinch, *et al.* Development of Molecular Beam Epitaxially Grown Hg_{1-x}Cd_xTe for

- High-Density Vertically-Integrated Photodiode-Based Focal Plane Arrays [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2007, **36**(8): 900-904.
- [28] S. D. Gunapala, S. V. Bandara, J. K. Liu, *et al.* 1024×1024 Format pixel co-located simultaneously readable dual-band QWIP focal plane [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2009, **52**(6): 395-398.
- [29] Gunapala S D, Bandara S V, Singh A, *et al.* 8-9 and 14-15 Micron Two-Color 640x486 GaAs/AlGaAs Quantum Well Infrared Photodetector (QWIP) Focal Plane Array Camera [J]. *NTRS*, 1999:687-697.
- [30] S. D. Gunapala, S. V. Bandara, K. L. John, *et al.* 640 x 512 pixel long-wavelength infrared narrowband, multi-band, and broadband QWIP focal plane arrays [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2003, **50**(12): 2353-2360.
- [31] A. Soibel, S. D. Gunapala, S. V. Bandara, *et al.* Large format multicolor QWIP focal plane arrays [C]. Proceedings of SPIE - Infrared Technology and Applications XXXV. 2009. DOI:10.1117/12.819084.
- [32] P. Wu, L. Ye, L. Tong, *et al.* Van der Waals two-color infrared photodetector [J]. *Light: Science & Applications*, 2022, **11**(1): 6.
- [33] X. Tang, M. M. Ackerman, M. Chen, *et al.* Dual-band infrared imaging using stacked colloidal quantum dot photodiodes [J]. *Nature Photonics*, 2019, **13**(4): 277-282.
- [34] Z. Yang, T. Albrow-Owen, H. Cui, *et al.* Single-nanowire spectrometers [J]. *Science*, 2019, **365**(6457): 1017-1020.
- [35] Zhao Yongqiang, Li Ning, Zhang Peng, *et al.* Infrared polarization perception and intelligent processing [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, **47**(11):1102001.
- [36] 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.
- [37] Ben-Dor B, Oppenheim U P, Balfour L S. Polarization properties of targets and backgrounds in the infrared [C]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 1993, **1971**:68-77.
- [38] Wolff L B, Lundberg A J, Tang R J. Image understanding from thermal emission polarization [C]. 1998 IEEE Computer-Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 1998:625-631.
- [39] ZHAO Yong-qiang, MA Wei-min, LI Lei-lei. Progress of infrared polarimetric imaging detection [J]. *J. Flight Control & Detetion* (赵永强, 马位民, 李磊磊. 红外偏振成像进展. 飞控与探测), 2019, **2**(3):77-84.
- [40] M. Strojnik, N. R. Malone, G. Paez, *et al.* Staring MWIR, LWIR and 2-color and scanning LWIR polarimetry technology [C]. Proceedings of SPIE - Infrared Remote Sensing and Instrumentation XIX. 2011. DOI: 10.1117/12.897345.
- [41] A. Berurier, A. Nedelcu. Optimization of light polarization sensitivity in QWIP detectors [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, **59**: 118-124.
- [42] Zhou Xuchang, Li Dongsheng, Mu Yingchun, *et al.* Study on 640×512 polarimetric LWIR QWIP FPA [J]. *Infrared and Laser Engineering* (周旭昌, 李东升, 木迎春, 等. 640x512 偏振长波量子阱红外焦平面探测器研制. 红外与激光工程), 2017, **46**(01): 84-89.
- [43] Y. Jing, Z. Li, Q. Li, *et al.* Angular dependence of optical modes in metal-insulator-metal coupled quantum well infrared photodetector [J]. *AIP Advances*, 2016, **6**(4): 045205.
- [44] Y. L. Jing, Z. F. Li, Q. Li, *et al.* Pixel-level plasmonic microcavity infrared photodetector [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**(1): 25849.
- [45] Q. Li, Z. Li, N. Li, *et al.* High-Polarization-Discriminating Infrared Detection Using a Single Quantum Well Sandwiched in Plasmonic Micro-Cavity [J]. *Scientific Reports*, 2014, **4**(1): 6332.
- [46] J. Wei, Y. Li, L. Wang, *et al.* Zero-bias mid-infrared graphene photodetectors with bulk photoresponse and calibration-free polarization detection [J]. *Nature Communications*, 2020, **11**(1): 6404.
- [47] E. Panchenko, J. J. Cadusch, T. D. James, *et al.* Plasmonic Metasurface-Enabled Differential Photodetectors for Broadband Optical Polarization Characterization [J]. *ACS Photonics*, 2016, **3**(10): 1833-1839.
- [48] E. Zhang, P. Wang, Z. Li, *et al.* Tunable Ambipolar Polarization-Sensitive Photodetectors Based on High-Anisotropy ReSe2 Nanosheets [J]. *ACS Nano*, 2016, **10**(8): 8067-8077.
- [49] F. Xia, H. Wang, Y. Jia. Rediscovering black phosphorus as an anisotropic layered material for optoelectronics and electronics [J]. *Nature Communications*, 2014, **5**(1): 4458.
- [50] F. Liu, S. Zheng, X. He, *et al.* Highly Sensitive Detection of Polarized Light Using Anisotropic 2D ReS2 [J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, **26**(8): 1169-1177.
- [51] E. Liu, Y. Fu, Y. Wang, *et al.* Integrated digital inverters based on two-dimensional anisotropic ReS2 field-effect transistors [J]. *Nature Communications*, 2015, **6**(1): 6991.
- [52] Z. Zhou, M. Long, L. Pan, *et al.* Perpendicular Optical Reversal of the Linear Dichroism and Polarized Photodetection in 2D GeAs [J]. *ACS Nano*, 2018, **12**(12): 12416-12423.
- [53] J. Wei, C. Xu, B. Dong, *et al.* Mid-infrared semimetal polarization detectors with configurable polarity transition [J]. *Nature Photonics*, 2021, **15**(8): 614-621.
- [54] CAO Jie, HAO Qun, ZHANG Fang-hua, *et al.* Research progress of APD three-dimensional imaging lidar [J]. *J. Infrared and Laser Engineering* (曹杰, 郝群, 张芳华, 等. APD 三维成像激光雷达研究进展. 红外与激光工程), 2020, **49**(9): 264-273.
- [55] YANG Xing-yu, LI Chen, HAO Li-ting, *et al.* Research progress and trend analysis of advanced 3D Imaging lidar technology [J]. *J. Laser Journal* (杨兴雨, 李晨, 郝丽婷, 等. 先进激光三维成像雷达技术的研究进展与趋势分析. 激光杂志), 2019, **40**(5): 1-9.
- [56] SONG Yu-zhi, LU Chun-qing, YU Li. Application research of 3D-TOF camera for detection of space short range targets [J]. *J. Aerospace Control and Application* (宋玉志, 卢纯青, 王立. 3D-TOF 相机在空间近距离目标探测中的应用研究. 空间控制技术与应用), 2019, **45**(1): 53-59.
- [57] Lu Chunqing, Song Yuzhi, Wu Yanpeng, *et al.* 3D infor-

- mation acquisition and error analysis based on TOF computational imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering* (卢纯青, 宋玉志, 武延鹏, 等. 基于 TOF 计算成像的三维信息获取与误差分析. *红外与激光工程*), 2018, **47**(10): 160–166.
- [58] R. Xie, Q. Li, P. Wang, *et al.* Spatial description theory of narrow-band single-carrier avalanche photodetectors [J]. *Opt Express*, 2021, **29**(11): 16432–16446.
- [59] SONG Shu-fang, WANG Xiao-ju, TIAN Zhen. The theory and research advancement of HgCdTe avalanche photodiode arrays [J]. *J. Laser & Infrared* (宋淑芳, 王小菊, 田震. HgCdTe 雪崩光电二极管的研究进展. *激光与红外*), 2021, **29**(21): 1159–1164.
- [60] M. Entwistle, M. Itzler, J. Chen, *et al.* Geiger-mode APD camera system for single-photon 3D LADAR imaging [J]. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2012, 8375.
- [61] J. Rothman, E. De Borniol, O. Gravrand, *et al.* HgCdTe APD-focal plane array development at DEFIR [C]. *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications VII*. 2010. DOI:10.1117/12.865482.
- [62] A. Kerlain, G. Bonnouvrier, L. Rubaldo, *et al.* Performance of Mid-Wave Infrared HgCdTe e-Avalanche Photodiodes [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2012, **41**(10): 2943–2948.
- [63] Song H Z. Avalanche Photodiode Focal Plane Arrays and Their Application to Laser Detection and Ranging [M]. 2018.
- [64] LI Hao, LIN Chun, ZHOU Song-min, *et al.* HgCdTe avalanche photodiode FPA [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (李浩, 林春, 周松敏, 等. 碲镉汞雪崩焦平面器件. *红外与毫米波学报*), 2019, **38**(5): 41–44.
- [65] A. Gao, J. Lai, Y. Wang, *et al.* Observation of ballistic avalanche phenomena in nanoscale vertical InSe/BP heterostructures [J]. *Nat Nanotechnol*, 2019, **14**(3): 217–222.
- [66] J. Wen, W. J. Wang, X. R. Chen, *et al.* Origin of large dark current increase in InGaAs/InP avalanche photodiode [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, **123**(16): 161530.
- [67] J. Wen, W. J. Wang, N. Li, *et al.* Light enhancement by metal-insulator-metal plasmonic focusing cavity [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2016, **48**(2): 150.
- [68] J. Wen, W. J. Wang, N. Li, *et al.* Plasmonic optical convergence microcavity based on the metal-insulator-metal microstructure [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, **110**(23): 231105.
- [69] S. J. Gibson, B. van Kasteren, B. Tekcan, *et al.* Tapered InP nanowire arrays for efficient broadband high-speed single-photon detection [J]. *Nat Nanotechnol*, 2019, **14**(5): 473–479.
- [70] G. Bulgarini, M. E. Reimer, M. Hocevar, *et al.* Avalanche amplification of a single exciton in a semiconductor nanowire [J]. *Nature Photonics*, 2012, **6**(7): 455–458.
- [71] O. Lopez-Sanchez, D. Dumcenco, E. Charbon, *et al.* arXiv preprint 2014, arXiv:1411.3232
- [72] M. R. M. Atalla, S. J. Koester. Black phosphorus avalanche photodetector, *2017 75th Annual Device Research Conference (DRC)*, 2017, pp. 1–2, DOI: 10.1109/DRC.2017.7999500.
- [73] Capasso F. Avalanche Photodiodes with Enhanced Ionization Rates Ratio: Towards a Solid State Photomultiplier [J]. *Nuclear Science IEEE Transactions on*, 1983, **30**(1): 424–428.
- [74] M. Ren, S. Maddox, Y. Chen, *et al.* AllInAsSb/GaSb staircase avalanche photodiode [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, **108**(8): 081101.
- [75] Mair A, Vaziri A, Weihs G, *et al.* Entanglement of the orbital angular momentum states of photons. *Nature*. 2001, **412**(6844):313–6. DOI: 10.1038/35085529.
- [76] J. Leach, B. Jack, J. Romero, *et al.* Quantum Correlations in Optical Angle Orbital Angular Momentum Variables [J]. *Science*, 2010, **329**(5992): 662–665.
- [77] LI Yang-yue, CHEN Zi-yang, LIU Hui, *et al.* Generation and interference of vortex beams [J]. *JACTA Physica Sinica* (李阳月, 陈子阳, 刘辉, 等. 涡旋光束的产生与干涉. *物理学报*), 2010, **59**(3): 1740–1748.
- [78] Z. Y. Chen, G. W. Zhang, L. Z. Rao, *et al.* Determining the Orbital Angular Momentum of Vortex Beam by Young's Double-Slit Interference Experiment [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, **35**(7): 1063–1067.
- [79] H. Zhou, L. Shi, X. Zhang, *et al.* Dynamic interferometry measurement of orbital angular momentum of light [J]. *Opt Lett*, 2014, **39**(20): 6058–6061.
- [80] L. A. Melo, A. J. Jesus-Silva, S. Chavez-Cerda, *et al.* Direct Measurement of the Topological Charge in Elliptical Beams Using Diffraction by a Triangular Aperture [J]. *Sci Rep*, 2018, **8**(1): 6370.
- [81] S. Mei, K. Huang, H. Liu, *et al.* On-chip discrimination of orbital angular momentum of light with plasmonic nanoslits [J]. *Nanoscale*, 2016, **8**(4): 2227–2233.
- [82] J. Chen, X. Chen, T. Li, *et al.* On-Chip Detection of Orbital Angular Momentum Beam by Plasmonic Nanogratings [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2018, **12**(8).
- [83] X. Zhao, X. Feng, F. Liu, *et al.* A Compound Phase-Modulated Beam Splitter to Distinguish Both Spin and Orbital Angular Momentum [J]. *ACS Photonics*, 2019, **7**(1): 212–220.
- [84] F. Feng, G. Si, C. Min, *et al.* On-chip plasmonic spin-Hall nanograting for simultaneously detecting phase and polarization singularities [J]. *Light: Science & Applications*, 2020, **9**(1): 95.
- [85] X. Li, T. H. Lan, C. H. Tien, *et al.* Three-dimensional orientation-unlimited polarization encryption by a single optically configured vectorial beam [J]. *Nature Communications*, 2012, **3**(1): 998.
- [86] Y. Lu, J. Zhao, R. Zhang, *et al.* Tunable lifetime multiplexing using luminescent nanocrystals [J]. *Nature Photonics*, 2013, **8**(1): 32–36.
- [87] L. W. Luo, N. Ophir, C. P. Chen, *et al.* WDM-compatible mode-division multiplexing on a silicon chip [J]. *Nat Commun*, 2014, **5**: 3069.
- [88] Y. Fu, C. Min, J. Yu, *et al.* Measuring phase and polarization singularities of light using spin-multiplexing metasurfaces [J]. *Nanoscale*, 2019, **11**(39): 18303–18310.
- [89] S. Zhang, P. Huo, W. Zhu, *et al.* Broadband Detection of Multiple Spin and Orbital Angular Momenta via Dielectric Metasurface [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, **14**(9): 2000062.