

文章编号: 1672-8785(2025)12-0047-20

量子点短波红外成像技术的发展与应用

吴之旭^{1#} 胡欣宇^{1#} 钟安东¹ 高振翔¹夏 勇^{1*} 李正阳^{2*}

(1. 南昌大学空间科学与技术研究院, 江西 南昌, 330031;

2. 中国科学院南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042)

摘 要: 短波红外(Short-Wave Infrared, SWIR)成像技术在工业、医疗以及消费电子等领域具有广泛应用前景, 但传统铟镓砷等探测器受限于成本高、光谱响应范围有限、高分辨率与小型化难以兼顾等, 难以大规模普及应用。而胶体量子点是一类溶液可加工的低维半导体纳米材料, 其独特的量子限制效应可实现 1.0~3.0 μm 波段的光谱精准调控。它与互补金属氧化物半导体(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS)工艺、柔性衬底具备良好的兼容性, 为低成本、高性能 SWIR 探测技术的发展开辟了全新路径。本文系统综述了量子点 SWIR 探测器的工作原理、性能参数以及国内外最新研究进展, 重点探讨了其在材料缺陷检测、半导体监测、农业食品分析、生物医学成像和移动设备集成等领域的应用潜力, 并对未来技术与产业化挑战进行了展望。

关键词: 红外探测器; 短波红外成像; 胶体量子点; CMOS 集成

中图分类号: TN218 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11972/j.issn.1672-8785.2025.12.005

Development and Application of Quantum Dot Short-Wave Infrared Imaging Technology

WU Zhi-xu^{1#}, HU Xin-yu^{1#}, ZHONG An-dong¹, GAO Zhen-xiang¹,XIA Yong^{1*}, LI Zheng-yang^{2*}

(1. Institute of Space Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. Nanjing Institute of Astronomical Optics and Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

Abstract: Short-wave infrared (SWIR) imaging technology has broad application prospects in industry, medicine, and consumer electronics. However, traditional detectors such as indium gallium arsenide (InGaAs) are limited by high cost, limited spectral response range, and the difficulty in balancing high resolution and minia-

收稿日期: 2025-11-19

基金项目: 江西省自然科学基金项目(20252BAC240659); 国家自然科学基金项目(62204105; 62204180); 江西省自然科学基金项目(20232BAB202042; 20252BAC250131); 江西省人才项目(jxsq2023101083); 江西省光电子与通信重点实验室开放基金项目(2022EC001)

作者简介: 吴之旭(1986-), 男, 江西南昌人, 博士研究生, 主要从事光学系统及新型光电器件研究。

#第一作者: E-mail: wuzhixu@ncu.edu.cn; 2622705936@qq.com

***通讯作者:** zyli@niaot.ac.cn(李正阳); 873853197@qq.com(夏勇)

turization, hindering their large-scale application. Colloidal quantum dots, a class of solution-processable low-dimensional semiconductor nanomaterials, possess unique quantum confinement effects that enable precise spectral tuning in the 1.0–3.0 μm wavelength range. They exhibit good compatibility with complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) processes and flexible substrates, opening a new path for the development of low-cost, high-performance SWIR detection technology. This paper systematically reviews the working principle, performance parameters, and latest research progress of quantum dot SWIR detectors both domestically and internationally. It focuses on their application potential in areas such as material defect detection, semiconductor monitoring, agricultural and food analysis, biomedical imaging, and mobile device integration, and also provides an outlook on future technological development and industrialization challenges.

Key words: infrared detector; short-wave infrared imaging; colloidal quantum dot; complementary metal-oxide-semiconductor integration

0 引言

SWIR 光通常是指 1000~3000 nm 光谱范围内的电磁波,其光子能量低于可见光,拥有多项独特的物理与应用特性。例如,它可穿透雾气、烟尘、雨雪等恶劣天气环境,实现全天候视觉增强;1550 nm 波段被公认为人眼安全波段,能支持更高功率的照明应用;它可被水、糖等选择性吸收,为物质精准识别奠定基础;同时,SWIR 光对硅材料和有机发光二极管屏幕具有透明性,使其在屏下生物识别、半导体检测领域具备天然优势。

在 SWIR 探测领域,铟镓砷(InGaAs)探测器是当前的主流技术方案。其制备通常以磷化铟(InP)为衬底,通过分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)或金属有机化学气相沉积(Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD)工艺生长 InGaAs 外延层,进而构筑 PIN 结或肖特基结器件结构^[1]。此类探测器具备量子效率高(峰值波段大于 70%,高性能器件可达 85%以上)、响应速度快(上升时间小于 10 ns,适配高频信号探测场景)、暗电流低(室温下暗电流密度小于 0.01 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, -0.5 V 偏压)等显著优势,因此在高精度光谱分析、激光通信等领域得到了广泛应用^[1-3]。

然而,InGaAs 探测器的大规模普及仍面临诸多挑战:第一,材料与制备成本居高不下。2 in 规格 InP 衬底的市场价格约为 2000

~5000 美元/片,是同等尺寸硅衬底(约 20~50 美元/片)的 50~100 倍;且 MBE/MOCVD 设备的购置成本(单台造价大于 1000 万美元)与维护费用极高,导致单颗 InGaAs 探测器芯片的制备成本可达数万元,640×512 面阵相机等完整成像系统的价格更是高达几十万元^[4]。第二,光谱响应范围受限。常规组分下 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 的截止波长约为 1.7 μm 。若要将响应波长延伸至 2.0~2.6 μm ,需提高 In 组分含量,但 In 与 Ga 的原子半径差异会导致 InGaAs 外延层与 InP 衬底产生显著晶格失配(In 组分从 53%提升至 80%时,失配度从 0.6%增至 3.2%)。这种失配会导致外延层产生大量位错缺陷,造成暗电流密度显著上升,无法满足低噪声探测需求^[5-6]。第三,制备工艺复杂且量产难度高。InGaAs 探测器需在超高真空环境(真空度小于 10^{-8} Pa)与精确温度控制(外延温度波动小于 1 $^{\circ}\text{C}$)下制备,工艺窗口狭窄,量产良率通常低于 70%,难以匹配大规模应用的产能需求^[7];加之大规模倒装焊技术的制约,InGaAs 探测器难以兼顾高分辨率与小型化,无法适配消费电子、可穿戴设备等对小型化和高集成度的需求^[8]。

在 SWIR 探测领域,硅锗(SiGe)探测器因与硅基 CMOS 工艺天然兼容,在成本控制上具备显著优势^[9]。然而,其性能受材料的固有物理特性制约,存在两大核心局限:第一,晶格失配引发高暗电流问题。由于硅与

锗的晶格失配度约为 4.2%，在硅衬底上外延生长 SiGe 层时，容易引入高密度位错缺陷（通常位错密度超过 10^6 cm^{-2} ）。这些缺陷会成为载流子复合中心，导致器件暗电流密度显著升高（-1 V 偏压下可达 $1 \sim 10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ），远高于 InGaAs 探测器的室温水平，进而严重劣化器件的噪声性能与探测灵敏度^[10-12]。第二，带隙特性限制光谱响应范围。SiGe 材料的带隙能量范围为 0.66~0.80 eV，对应响应波长为 1.55~1.88 μm 。即便通过应变工程或多层异质结构设计优化，其截止波长通常仍难以突破 1.7 μm ，无法覆盖 SWIR 波段的核心长波区域（2.0~3.0 μm ），从而限制了该技术在深层组织成像、长波光谱分析等场景的应用潜力^[13]。

近年来，量子点作为一类新型低维半导体纳米材料，凭借其独特的量子限制效应，在提升 SWIR 探测性能与降低成本两方面实现重要突破，为 SWIR 探测技术的产业化提供了全新路径^[14]。本文系统综述量子点 SWIR 探测器的工作原理、材料体系、器件结构、研究进展以及应用场景，深入分析当前技术发展面临的瓶颈与挑战，并展望未来发展方向。这对推动该领域的学术研究、加速技术产业化进程、拓展应用边界具有重要的学术价值与实践意义。

1 量子点短波红外成像技术原理及进展

胶体量子点是指尺寸在 1~10 nm 范围内的半导体纳米晶体。当晶体粒径小于其体相材料的玻尔激子半径时，电子与空穴会受到三维空间的量子限域作用，使原本连续的能带结构分裂为离散能级，带隙能量随粒径减小而增大。这种“尺寸-带隙”调控特性使得通过改变量子点粒径即可实现 1.0~3.0 μm 波段的连续光谱响应^[15]。此外，胶体量子点可通过旋涂、刮涂、喷墨打印等溶液加工工艺^[16]，在硅基或柔性聚合物等多种衬底上形成均匀薄膜。该特性使其与 CMOS 集成电路工艺高度兼容，为开发高集成度、低成本的

SWIR 成像芯片提供了重要基础^[17]。

1.1 核心工作原理

1.1.1 量子限制效应与光谱调控机制

量子限制效应是实现量子点短波红外波段响应的核心物理机制。该效应的本质在于半导体纳米晶体的尺寸与其玻尔激子半径之间的相对关系，直接调控电子与空穴的能级结构^[18]。玻尔激子半径是衡量半导体材料中电子-空穴相互作用强度的关键参数，其表达式为

$$a_0 = \frac{\epsilon \hbar^2}{\mu e^2} \quad (1)$$

式中， ϵ 为真空介电常数； $\hbar$ 为约化普朗克常数； μ 为电子-空穴对的约化质量； e 为电子电荷量^[19]。当量子点粒径 d 小于两倍玻尔激子半径 $2a_0$ 时，电子与空穴的运动在三维空间中受到强烈限制，原本连续的能带结构将分裂为离散能级，称为强量子限制效应；当粒径大于 $2a_0$ 时，量子限制效应较弱，能级结构趋近于体相材料^[20]。

尺寸直接影响量子点材料的吸收峰、带隙和光致发光光谱，从而影响光电设备和光电转换器的光电性能和操作范围^[21]。Weidman M C 等人^[21]基于实验拟合了尺寸与带隙之间的关系，具体表达式为

$$E_g = 0.41 + \frac{1}{0.0392d^2 + 0.114d} \quad (2)$$

式中， E_g 以电子伏特(eV)表示；量子点直径 d 以纳米(nm)表示；0.41 是 PbS 的体带隙。根据光子能量与波长的关系 $E=hc/\lambda$ (h 为普朗克常数， c 为光速)，通过调控量子点的粒径，可精确控制其响应波长 λ ，从而为构建宽波段、可定制的短波红外探测系统提供重要技术手段^[22]。

如图 1 所示，以硫化铅(PbS)量子点为例，其体相材料的带隙能量为 0.41 eV (对应波长为 3.0 μm)。当粒径从 2 nm 增加至 8 nm 时，带隙能量可从 1.03 eV (对应波长为 1.2 μm) 降低至 0.50 eV (对应波长为 2.5 μm)，不仅完整覆盖 SWIR 波段的主要应用区间，而且光谱调

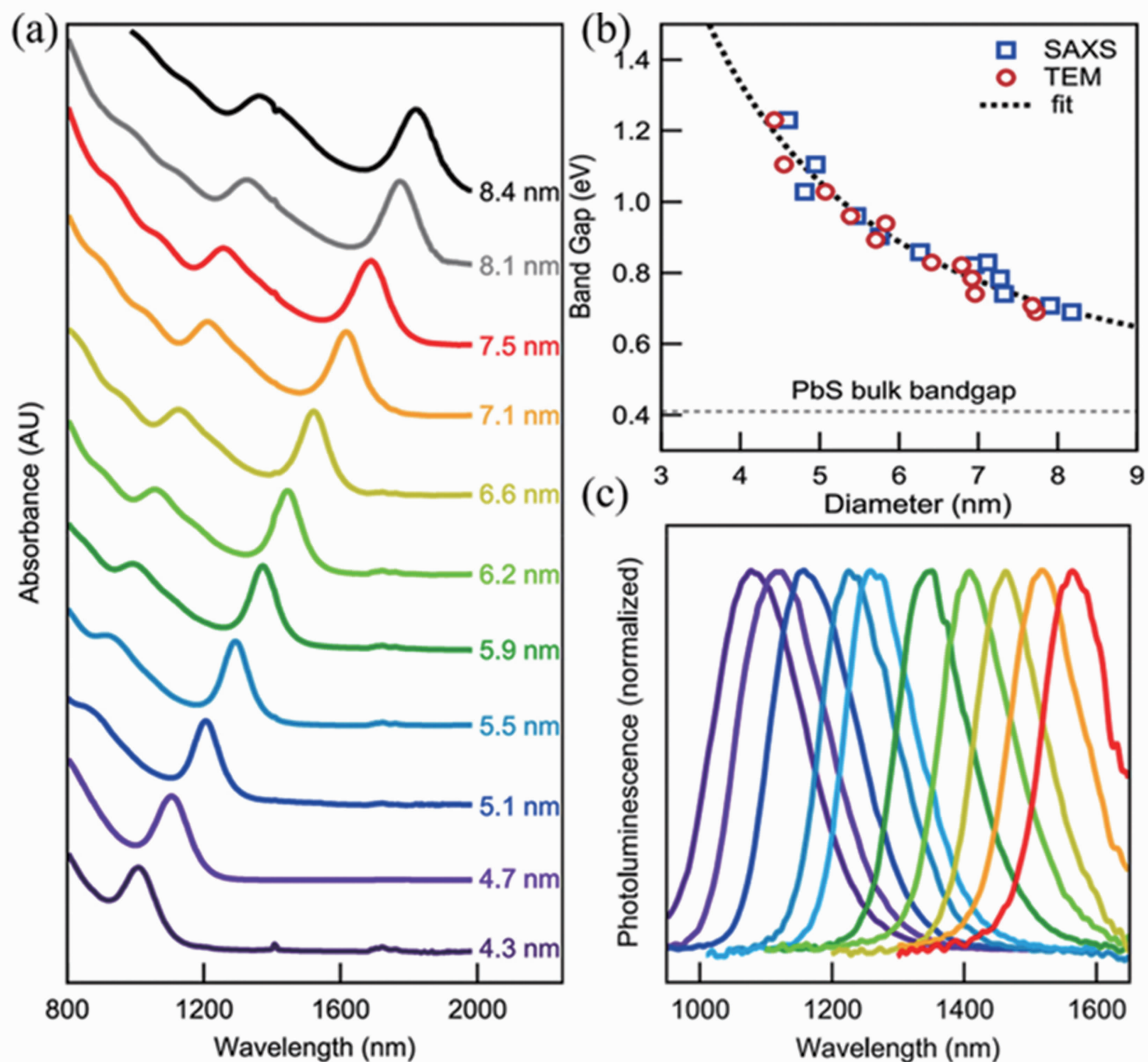


图 1 (a)在 1000~1800 nm 范围内合成的不同尺寸的 PbS CQDs 的吸收光谱；(b)带隙与 PbS CQDs 尺寸之间的关系，其中虚线是最佳拟合曲线；(c) 10 种不同尺寸 PbS CQDs 的光致发光光谱^[23]

谐精度可达 5~10 nm 粒径变化^[23]。

1.1.2 量子点红外探测器件的工作机制与性能参数

量子点 SWIR 探测器的核心功能是将入射的 SWIR 光信号高效转换为可检测的电信号。其工作过程本质上是光生载流子的产生、分离、输运与收集的动态过程。典型器件采用“衬底-底电极-功能层-量子点活性层-顶电极”的垂直堆叠结构。其中，功能层通常包含电子传输层和空穴传输层，用于调控载流子输运方向并抑制反向复合^[24]。具体而言，器件工作过程可分为以下四个关键阶段。

第一阶段为光子吸收与激子产生。当

SWIR 光垂直入射至器件表面时，大部分光子会穿透透明顶电极与功能层，最终被量子点活性层吸收。量子点对光子的吸收效率取决于其光吸收截面与薄膜厚度^[25]。通常，PbS、碲化铟(InSb)等 SWIR 量子点在 1500 nm 波段的光吸收截面约为 $10^{-14} \sim 10^{-13} \text{ cm}^2$ 。为实现 90% 以上的吸收效率，活性层厚度需控制在 100~500 nm 之间^[26]。光子被吸收后，量子点价带中的电子吸收能量跃迁至导带，形成电子-空穴对(即激子)。激子结合能通常为 10~50 meV，高于室温热能(约 26 meV)，因此需依赖外部电场或异质结界面能级差来实现激子分离^[27]。

第二阶段为激子分离。激子分离的驱动力主要来源于量子点与功能层之间的能级差^[28]。以量子点活性层与二氧化钛(TiO₂)电子传输层接触为例: TiO₂ 的导带底能级(约为-4.2 eV)低于 PbS 量子点的导带底能级(约为-4.1 eV), 而其价带顶能级(约为-7.6 eV)高于 PbS 量子点的价带顶能级(约为-5.2 eV)。这种能级排列促使激子中的电子自发向 TiO₂ 层迁移, 空穴则向空穴传输层迁移, 从而实现激子的有效分离^[29]。

第三阶段为载流子输运。分离后的电子与空穴需分别通过电子传输层与空穴传输层输运至对应电极。该过程的效率主要受载流子迁移率与陷阱态密度的影响。量子点薄膜的载流子迁移率通常较低, 主要原因是量子点之间的配体阻碍载流子隧穿, 且表面缺陷会形成载流子陷阱^[30]。

第四阶段为载流子收集。输运至电极界面的载流子通过欧姆接触被电极收集, 形成光电流。电极材料需同时满足低接触电阻与高透光性(顶电极)的要求。

用于评估量子点 SWIR 探测器性能的核心参数包括暗电流密度、外量子效率、响应时间、线性动态范围以及比探测率。它们共同决定了器件的适用场景与综合竞争力^[31]。

暗电流密度 J_{dark} 是指无光照条件下器件单位面积所产生的电流, 主要来源于热激发载流子、隧道电流以及表面缺陷态引起的泄漏电流。它是影响探测器噪声水平和微弱信号探测能力的关键因素。高性能 SWIR 探测器在室温以及 -1 V 偏压下的暗电流密度通常低于 $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 部分先进器件可达到 $100 \text{ nA}/\text{cm}^2$ 以下^[32]。暗电流的主要来源是表面缺陷态。比如, PbS 量子点表面的 Pb^{2+} 悬空键和 S^{2-} 空位会形成深能级陷阱, 导致载流子非辐射复合和泄漏^[33]。

响应度 R 是描述器件光电转换能力的物理量(单位为 A/W), 即输出电信号光响应电

流大小与输入光信号功率大小之比。它是决定光电探测器性能的一个非常重要的指标^[34], 可以表示为

$$R = \frac{I_l - I_d}{PA} \quad (3)$$

式中, I_l 为光电流; I_d 为暗电流; P 为入射光功率; A 为有效光照面积。响应度与器件的材料、入射光波长、光照功率密度有关。

外量子效率(External Quantum Efficiency, EQE)的定义为探测器收集到的光电子数与入射光子数的比值, 反映了器件将光子转换为有效电子的整体效率。其计算公式为

$$\text{EQE} = \frac{n_{\text{electron}}}{n_{\text{photon}}} = \frac{AJ_{\text{ph}}/q\lambda}{P/hc} = R \frac{hc}{q\lambda} \quad (4)$$

式中, h 为普朗克常数; c 为光速; J_{ph} 为光电流密度; q 为电子电荷量; λ 为入射光波长; P 为入射光功率密度^[35]。

响应时间 τ 包括上升时间(光电流从 10% 升至 90% 所需时间)和下降时间(光电流从 90% 降至 10% 所需时间), 主要受激子分离速度、载流子输运时间和陷阱态寿命的影响^[36]。

线性动态范围(Linear Dynamic Range, LDR)是指探测器能够线性响应的最大光功率与最小可探测光功率之比, 通常用分贝(dB)表示, 可表示为

$$\text{LDR} = 20\lg \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{min}}} = 20\lg \frac{J_{\text{max}}}{J_{\text{min}}} \quad (5)$$

式中, P_{max} 为线性响应的最大光功率; P_{min} 为线性响应的最小光功率; J_{max} 为线性响应的最大光电流密度; J_{min} 为线性响应的最小光电流密度^[37]。

比探测率 D^* 是衡量探测器探测微弱信号能力的核心指标, 综合考虑了噪声、探测面积与带宽的影响, 可表示为

$$D^* = \frac{(A\Delta f)^{1/2}R}{in} \quad (6)$$

式中, A 为探测器的有效面积(cm^2); Δf 为测量带宽(Hz); in 是从噪声谱密度在 1 Hz 处读取的暗电流^[38]。

1.2 量子点短波红外成像技术的发展现状

近五年来,国内外研究团队围绕量子点材料优化、器件结构设计及性能提升等核心方向,开展了大量创新性研究,斩获了一系列突破性成果。例如,Chen S 等人通过设计混合尺寸 PbS 量子点空穴传输层,融合小尺寸(2~3 nm)量子点的高载流子迁移率与大尺寸(6~8 nm)量子点的高光吸收系数,成功构建梯度能带结构,有效抑制了载流子复合。该结构使探测器的暗电流密度降至传统单一尺寸量子点器件的 50% 以下(室温、-1 V 偏压下小于 $5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$),1500 nm 波段的 EQE 提升至 65%, D^* 达到 2.4×10^{12} Jones,性能跻身国际先进水平^[38]。

另一方面,Liu P 等人则基于溶液法异质集成技术,成功研制出 30 万像素(640×480) PbS 胶体量子点 SWIR 成像芯片。该芯片的暗电流密度低于 $50 \text{ nA}/\text{cm}^2$ (-0.5 V 偏压下),峰值波段的 EQE 超过 60%,成像分辨率达到 $5 \mu\text{m}$,且制备成本仅为数美元,远低于相同分辨率 InGaAs 成像芯片(数千美元级别),为 SWIR 成像技术的规模化普及奠定了关键基础^[39]。

Chang J 等人通过巯基丙酸配体交换工艺钝化 PbS 量子点表面缺陷,有效优化表面态,将器件室温暗电流密度降至 $20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$,相较于 2022 年水平实现了一个数量级的性能提升;在此基础上,该团队于 2024 年进一步引入原子层沉积制备的氧化铝超薄绝缘层作为电子阻挡层,通过钝化界面缺陷、抑制载流子复合,将暗电流密度稳定控制在 $15 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以下。对应的室温 D^* 在 1550 nm 波长、-0.2 V 偏压下提升至 2×10^{12} Jones,完全满足中低精度工业检测与安防监控的应用需求^[40]。

与此同时,Vafaie M 等人通过卤化物钝化剂优化配体交换策略,在钝化量子点表面缺陷、提升量子效率的同时,将器件的 D^* 稳定在 8×10^{11} Jones,为高响应速度场景下的灵敏度调控提供了全新技术路径^[41]。

2 量子点短波红外相机在工业检测领域的应用展望

工业检测是保障产品质量、提升生产效率和实现智能制造的关键环节。传统机器视觉主要依赖于可见光(400~700 nm)成像,不仅极易受到环境光照、物体颜色以及表面反光的影响,而且无法对物体内部缺陷、化学成分和湿度含量等“隐性”指标进行检测。SWIR 光与物质相互作用时,能引发分子振动能级跃迁,从而对包含 O-H、C-H、N-H 等化学键的物质具有特征吸收谱线,使其具备“成分分析”的能力。同时,SWIR 光子能穿透硅、某些塑料和烟雾,为观察产品内部结构提供了可能。

2.1 材料缺陷检测

工业材料的内部缺陷(如裂纹、气孔、夹杂、层间剥离等)是影响产品服役安全性与使用寿命的核心隐患。量子点 SWIR 相机凭借 SWIR 光在材料内部的高穿透能力与成像对比度优势,为内部缺陷的快速、精准、非接触检测提供了新的解决路径,并在灵敏度与成本控制之间实现了良好平衡^[42]。

在金属材料检测中,SWIR 光可有效穿透表面氧化层、防护涂层乃至 1~3 mm 厚的金属基体。量子点 SWIR 相机通过捕捉缺陷区域与正常基体之间的红外辐射差异,能够将内部裂纹、微小气孔等隐蔽缺陷可视化,显著提升检测的可靠性与效率。在复合材料领域,碳纤维增强复合材料因具备高比强度与轻量化特性,被广泛应用于航空航天与高端装备制造;然而复合材料层间剥离等内部缺陷难以通过常规手段识别。量子点 SWIR 成像技术能够有效识别此类结构内部的界面脱粘与层间缺陷,为复合材料的质量评估提供了有力的无损检测工具。

未来,量子点 SWIR 相机可进一步向高端材料定制化方向发展,针对高温合金、先进复合材料等特殊材料的检测需求,开发定制化光谱响应的量子点相机;同时结合机器学习算

法, 实现缺陷类型的自动分类、尺寸量化与风险评级, 推动工业检测向全流程智能化、无人化升级。

2.2 半导体制造监测

半导体制造正朝着高密度、超小型化、多芯片集成的方向快速演进, 从晶圆制造到芯片封装、可靠性测试的全流程, 均需要非接触、高分辨率、宽光谱、实时响应的监测技术支持。量子点 SWIR 相机凭借光谱可调谐、硅基兼容、低成本集成以及高穿透性的核心优势, 突破了传统监测技术在检测范围、成本控制与在线适配性上的局限, 有望成为半导体全制造流程质量管控的新型关键技术。

2.2.1 键合晶圆内部结构与对准标记检测

晶圆制造是半导体制造的核心环节, 其缺陷检测与工艺控制直接决定器件良率。量子点 SWIR 相机利用 SWIR 光对硅基材料的高穿透性, 可清晰观察键合晶圆的对准标记、凸点结构以及传统可见光无法识别的边缘微裂纹和崩角。这些裂纹会通过阻断 SWIR 光传输形成明显暗信号特征, 便于快速定位。

2023 年, 谭伊玫等人开发的 640×512 碲化汞(HgTe)量子点焦平面阵列($15 \mu\text{m}$ 像元间距), 利用 SWIR 波段对硅基材料的高穿透性, 可观察硅晶圆的内部缺陷(晶格畸变、杂质颗粒等), 如图 2(a)和图 2(b)所示。他们还利用了不同半导体材料(如硅、氮化镓、碳化硅)在 SWIR 波段的吸收系数不同, 且材料缺陷(如划痕、空洞)会导致局部吸收异常, 因此可通过灰度差异识别这些缺陷^[43]。

2.2.2 芯片封装与键合质量监测

在芯片封装的键合、塑封、切筋成型等关键工序中, 量子点 SWIR 相机可实现非接触式在线监测。晶圆级封装时, 底部填充胶流动状态与气泡缺陷会直接影响器件的可靠性。2024 年, Liu Y 等人用电磁干扰钝化 PbS 量子点薄膜晶体管成像仪, 覆盖 $0.35 \sim 1.8 \mu\text{m}$ 波段, 线性动态范围为 100 dB, 对 $0.5 \mu\text{m}$ 气泡的检出率达 99.7%, 已用于底部填充工艺的实时

监控^[44]。器件性能如图 2(c)所示。

同时, 封装环节的键合缺陷、引线偏移等问题也会直接影响器件的可靠性。若使用量子点 SWIR 相机则可实现封装过程的实时质控。在混合键合质量评估中, Li L 等人提出基于连续域束缚态超表面增强方案, 通过硅基亚波长结构激发高 Q 导波模式, 使 PbS 量子点在 1408 nm 处的荧光发射增强, Q 值达到 251, 显著提升了键合界面空洞的识别灵敏度^[45]。

2.2.3 器件的可靠性评估

量子点 SWIR 相机为半导体器件的可靠性测试提供了多维度解决方案, 覆盖热稳定性、密封性与长期老化等关键测试场景。在热稳定性测试中, 通过 $-40 \sim 85 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 热循环实验, 相机可实时(成像)观察封装结构缺陷的演化过程, 评估材料的热疲劳性能, 同时同步监测器件不同区域的温度分布, 精准识别热集中问题。在密封性检测中, 基于 SWIR 光对水蒸气的敏感特性, 通过分析局部光谱响应变化定位漏点位置, 使得检测灵敏度较传统方法提升一个数量级。在长期老化监测方面, 可在高温高湿加速老化实验中定期检测器件内部缺陷的生长情况, 为器件寿命预测提供精准的数据支撑。

未来, 半导体制造对检测技术的要求将进一步提升, 需开发高帧率(大于 1000 fps)的量子点 SWIR 相机, 以适配半导体高速生产线的检测需求; 同时结合近场光学技术, 实现纳米级分辨率的缺陷检测, 满足 3 nm 以下先进制程的制造质控要求。

2.3 高温过程监控

在石油化工领域, 精炼炉、燃气轮机等设备的内部温度高达数百度甚至上千度。传统接触式测温方法易受高温环境腐蚀, 且响应滞后; 常规红外测温则受环境烟雾、粉尘干扰较大。量子点 SWIR 相机不仅在高温环境中穿透性强, 且对高温物体的辐射信号具有高响应灵敏度, 可实现高温过程的非接触式精准测温与实时监控。

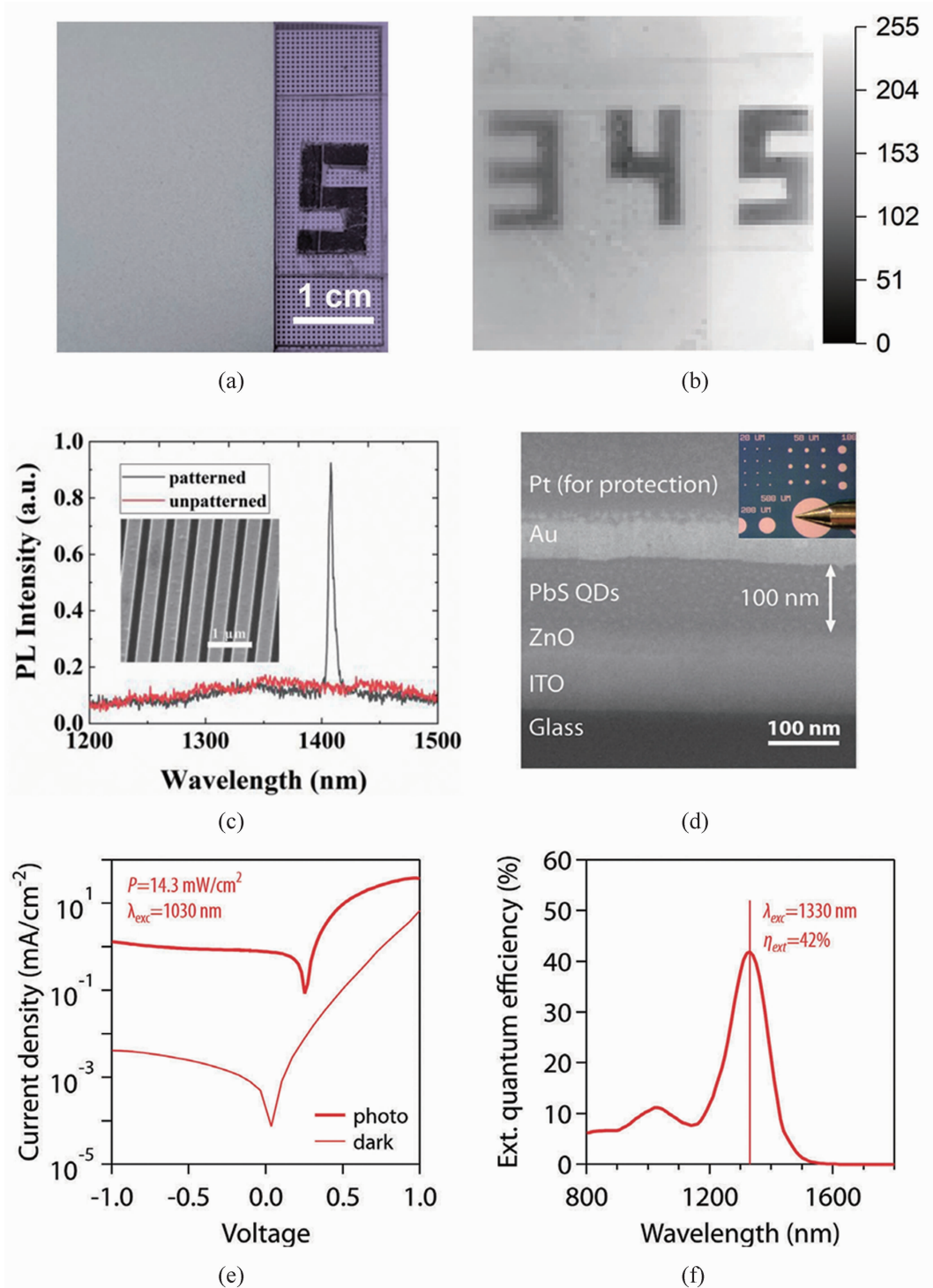
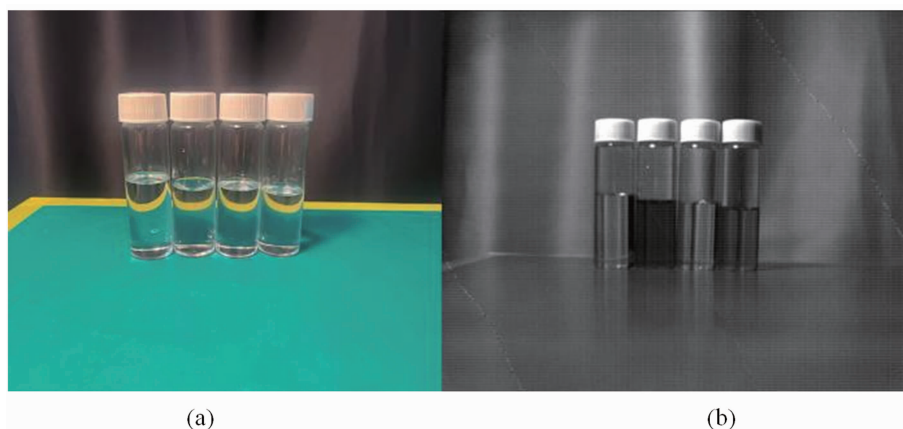


图 2 (a)~(b)可见光硅成像仪和量子点薄膜晶体管成像仪分别拍摄硅晶圆的透视图^[43]；(c)同一芯片上图案化超表面(黑色曲线)与未图案化区域的测量光致发光光谱对比(红色曲线)^[44]；(d)拟建量子点光电探测器堆叠结构的横截面示意图与实际扫描电镜图像；(e)黑暗和光照条件下的电流-电压特性曲线与量子点光电探测器堆叠结构的外量子效率光谱^[47]

例如, 2024 年, Deng H Y 等人^[46]开发了一种超薄 PbS 量子点探测器, 通过 100 nm 超薄吸收层设计实现了 4 ns 的响应时间。该探

测器在 1330 nm 处的外部量子效率为 42%, 可监测燃气轮机叶片高温变形。器件及其性能如图 2(d)和图 2(e)所示。

图 3 基于 CQD SWIR 相机的液体颜色分选成像^[48]

此外, Raytron 公司的热成像相机提供从 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的广泛测量范围, 且精度保持在 $\pm 2\%$ 或 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。通过将不可见的热能转化为清晰的热图像, 手持式热像仪能够在几秒钟内全面扫描大范围区域, 显著提高检查效率并降低操作风险。这种非接触式测温方法适用于高风险环境, 比如高压电力系统、正在运行的炼油装置以及危险化学品区域。

在航空发动机监测领域, 其高速旋转机械的轴承系统在运行中会产生显著温升, 因此对其内部旋转部件的温度监测是评估设备状态和预防故障的关键。张盼等人^[47]开发了一种基于碲化镉(CdTe)量子点的温度传感器。通过控制制备 CdTe 量子点的试验条件(制备时间与配体), 他们利用结构表征探讨量子点的微观形态和平均粒径对其荧光特性的影响机制, 最终制备的 CdTe/聚乙烯醇高稳定性传感器实现了量子点荧光强度、最高耐受温度、灵敏性以及稳定性的显著提升。这种耐高温量子点传感器的优势在于可实现非接触式测温, 且响应速度快, 能够捕捉旋转部件的瞬态温度变化, 及时发现异常温升, 避免设备损坏。

2.4 液体分拣

SWIR 相机在“物质感知”领域的典型应用可通过液体分拣场景直观体现: 实验中的 4 瓶透明液体分别为三氯乙烯、去离子水、聚羧酸减水剂和双对氯苯基三氯乙烷, 在可见光成像视角下, 因外观均呈透明状态而无法区分;

但切换至量子点 SWIR 相机成像时(见图 3(b)), 由于不同液体的分子结构存在差异, 液体对 SWIR 光的吸收能力各不相同, 这种吸收差异直接转化为图像中明显不同的灰度值, 最终使 4 瓶原本难以辨别的液体可清晰区分, 为高效分拣提供了精准技术支持^[48]。

3 量子点短波红外相机在食品/农业领域的应用展望

食品/农业领域对产品品质与安全的要求持续升级, 传统检测方法(如感官评价和化学分析)存在主观性强、耗时久、破坏性大等局限, 难以满足规模化生产与精准管控的需求。量子点 SWIR 相机利用物质在 SWIR 波段的特征光谱响应, 实现快速、非接触、无损检测, 为食品品质分级、成分分析、安全监测以及农业生产精准管控提供了全新技术路径。

3.1 农产品品质检测

农产品(水果、谷物、肉类等)的水分含量、糖分、成熟度以及损伤程度等品质参数直接决定其商品价值。不同品质的农产品在 SWIR 波段具有独特的光谱特征, 这为量子点 SWIR 相机的快速分级提供了基础。该技术结合化学计量学模型, 可同时检测多项品质参数, 实现多维度、高效率的品质评估, 已在水果分拣、蔬菜新鲜度检测等场景中得到实际应用。

光谷实验室的研究团队已将量子点 SWIR 成像芯片应用于水果自动化分拣, 通过穿透表

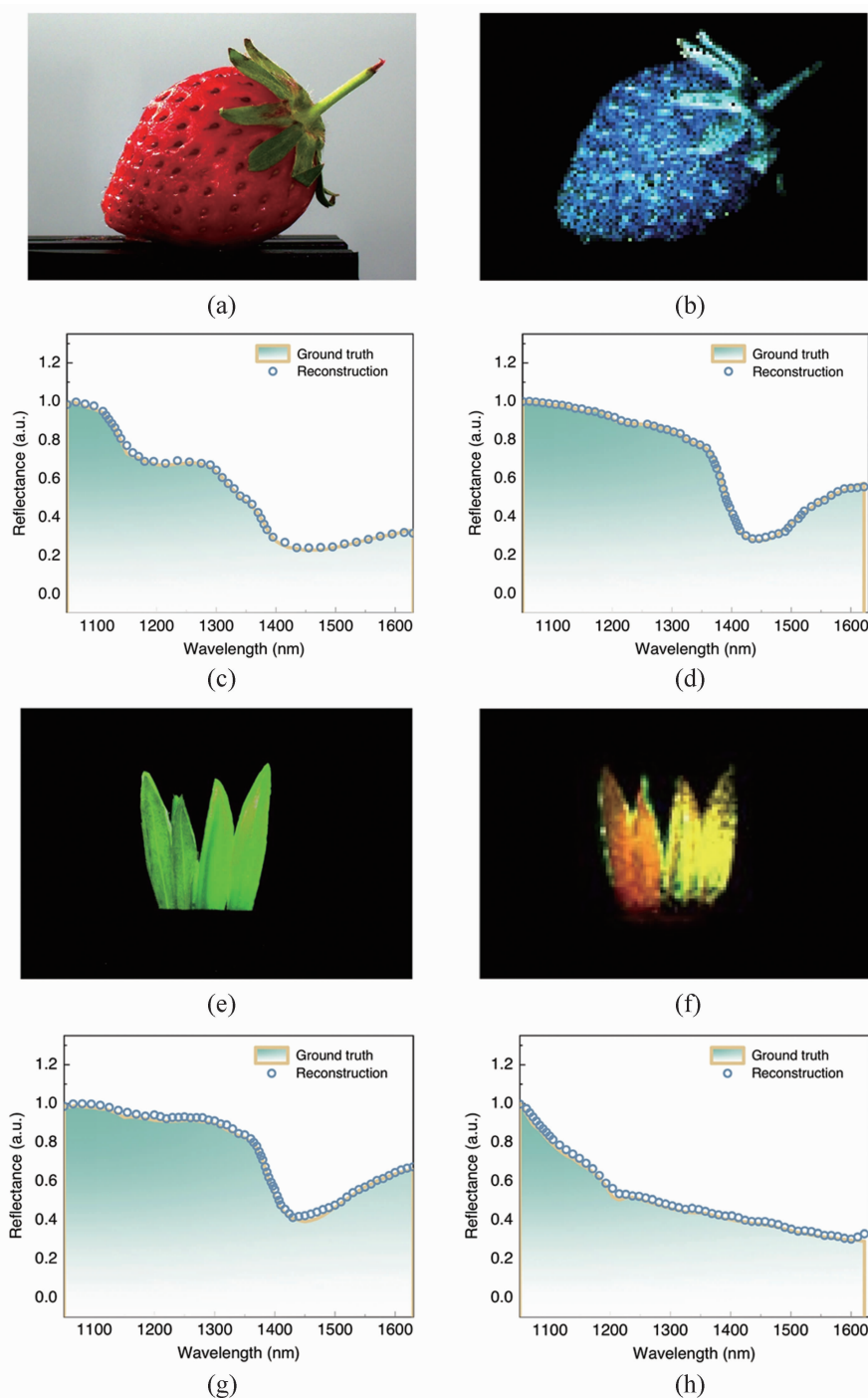


图4 反射物体的高光谱图像：(a)新鲜草莓的彩色照片；(b)新鲜草莓的高光谱图像；(c)~(d)草莓果肉与草莓萼片的重建反射光谱；(e)~(f)真草与塑料草混合物的彩色照片；(h)塑料草的高光谱图像；(g)真草的重建反射光谱^[49]

皮探测内部缺陷，解决了传统视觉检测难以识别的水心病变、褐变等问题。2024 年，Meng H Y 等人开发了一种基于 PbS 量子点自组装滤光片的单像素 SWIR 高光谱成像系统，通过数字微镜阵列进行光谱编码，结合压缩感知算

法实现低成本、微型化光谱成像。在草莓检测中，该系统对新鲜草莓成像，可区分果肉（高水分，反射谱类似水）、萼片（叶绿素特征峰）和种子（低水分，反射率高）；提取的反射谱与商用光谱仪偏差小于 2%，证明其非破坏性检

测能力;另外还能通过光谱特征差异量化检测糖酸比、叶绿素含量等成熟度指标。与传统检测方法相比,该技术在成本降低 90% 以上的同时,仍可保持 99% 以上的检测准确率,大幅提升了农产品分拣的效率与经济性^[49]。

3.2 食品成分分析与安全筛查

量子点 SWIR 成像技术在食品成分分析和真伪鉴别方面具有独特优势。不同食品成分(如水、蛋白质、脂肪、碳水化合物)在 SWIR 波段具有特征吸收谱,使得通过 SWIR 光谱成像技术进行定量成分分析成为可能。与传统化学成分分析方法相比,SWIR 成像无需样品前处理,可同时获取空间分布信息,实现成分分布可视化。比如,在肉制品分析中,可以同时测定水分、蛋白质和脂肪含量,并可直观展示大理石花纹脂肪的分布情况;在谷物品质检测中,能够同步测定蛋白质、淀粉和水分含量,从而全面评估品质指标^[50]。

在食品安全检测方面,食品在生产、加工、储存和运输过程中可能受到多种污染,包括物理污染(异物)、化学污染(农兽药残留、重金属)和生物污染(微生物、霉菌)等。SWIR 光的穿透能力使其能够探测到食品内部异物,如塑料、玻璃、石块等。这些异物在可见光下往往被食品本身遮盖,但在特定 SWIR 波段则会呈现明显的对比度差异^[50]。

例如,在包装食品检测中,量子点 SWIR 相机可以穿透包装材料,直接探测产品内部的异物夹杂,大大提高了检测的全面性和准确性。2023 年,Sultana S T 等人研制出一种基于 InGaAs 的 SWIR 相机。它可检测谷物中的玻璃碎片(尺寸大于等于 0.5 mm),总体检测准确率能达到 99%,误判率小于 0.8%。不管是 0.5 mm 的细小杂质还是透明塑料,该相机都能精准识别,并且还能适应不同种类的蔬菜^[51]。

在农药残留与添加剂检测方面,量子点高光谱成像技术可捕捉特定污染物的特征吸收峰。Meng H Y 等人开发了一种基于 PbS 量子

点自组装滤光片的单像素探测系统,其工作波段覆盖 1050~1630 nm,光谱分辨率达到 8.59 nm,抗噪性优于传统阵列探测器。而且该系统支持非破坏性检测,波段范围可匹配有机磷等农药(如甲基对硫磷)的特征吸收峰(如 P=O 键 1250~1300 nm、P-O-C 键 950~1100 nm);利用高灵敏度特性可捕捉微量农药残留导致的微弱光谱变化,为后续拓展至食品中农药残留的精准检测(如低至 0.1~1 ppm 的检测限)提供了技术基础^[52]。

3.3 农业生产精准管控

量子点 SWIR 成像技术同时在作物生理状态监测方面展现出巨大的潜力。作物在生长过程中受到环境胁迫(如干旱、病虫害、营养缺乏等)时,其叶片和冠层的光学特性会在 SWIR 波段呈现规律性变化。这些变化肉眼不可见,但可通过 SWIR 相机精确捕捉。研究表明,基于 SWIR 的光谱监测模型能够快速无损地探测作物冠层和叶片水平的反射光谱变化,解析不同条件下作物的高光谱响应模式和时空变化规律,为作物生长状态的实时评估提供科学依据^[53]。例如,通过提取作物主要生长指标的特征光谱波段和敏感光谱参数,可以构建叶片、冠层、区域等多尺度的作物生长指标光谱监测模型,从而实现对作物生长状况的精准诊断。

量子点 SWIR 相机的宽波段探测能力(400~1700 nm)使其能够捕捉到可见光相机无法检测的植物生理变化。在作物受到病虫害侵袭的初期,叶片内部结构和水分分布会发生细微的改变。这些变化在 SWIR 影像中表现为特定的反射特征,从而允许农民在症状肉眼可见前采取干预措施,显著减少作物损失^[50]。

例如,2025 年,Sandhya M 等人利用量子点来追踪和研究植物与病原体(如真菌、细菌、病毒)之间的相互作用,从而实现对病害的早期诊断。它为利用量子点纳米材料构建高灵敏度传感器提供了理论基础和技术背景^[54],推动其在 SWIR 探测方面的应用。该方法无需破

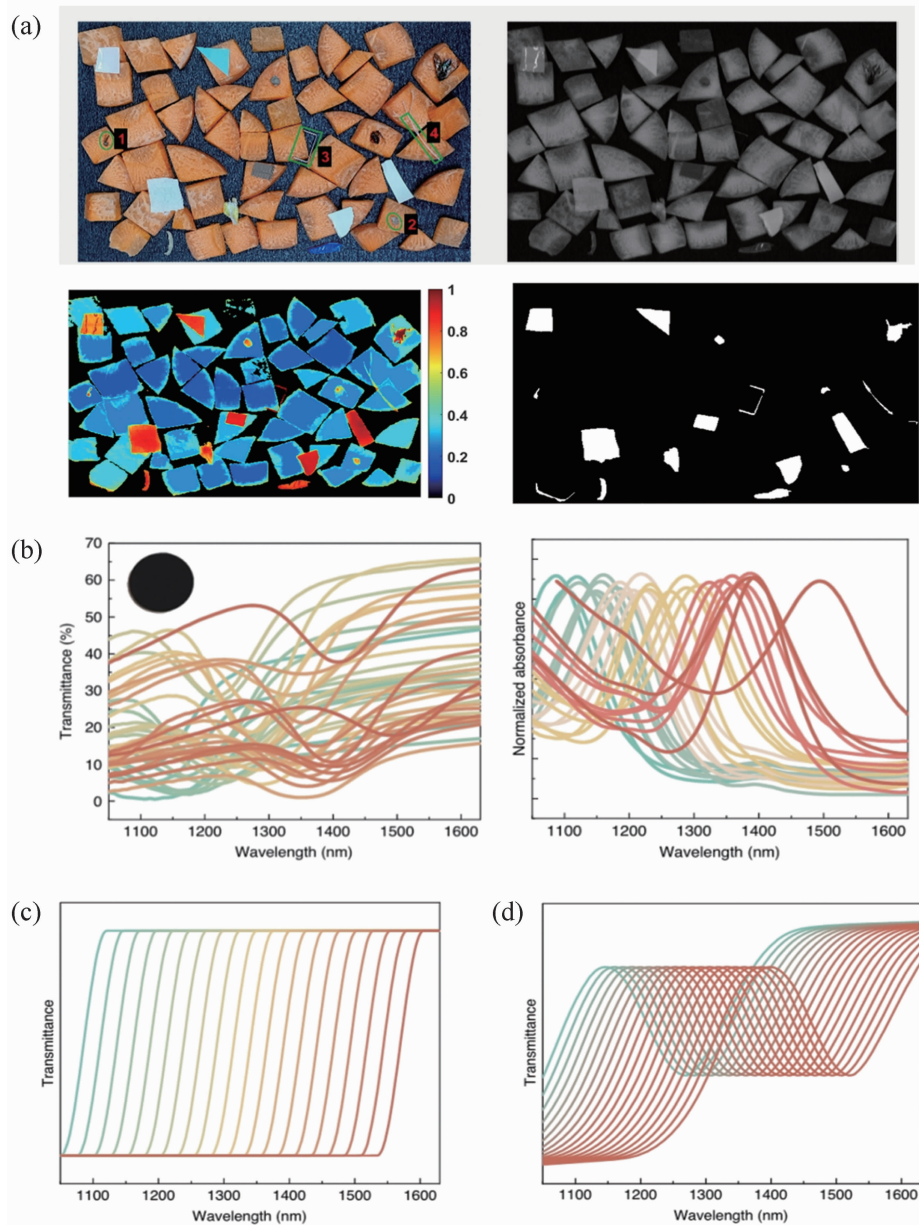


图 5 (a)新鲜切片胡萝卜中的异物检测^[51]；(b)滤光片的透射光谱以及溶液中硫化铅量子点的吸收光谱；(c)~(d)传统阶梯滤光片与 CQD 滤光片的透射光谱对比

坏作物就可实现大面积、在线的快速监测，大大提升了效率。通过图像算法进行判断，能够准确定位感染区域，减少人为主观经验的影响，使结果更加准确可靠。

未来或许可开发轻量化、低功耗的量子点 SWIR 相机，适配无人机、农业机器人等移动平台；构建农业大数据平台，结合遥感数据与地面检测数据，实现作物生长全周期的动态监测和智能决策。

4 量子点短波红外相机在生物医学领域的应用展望

SWIR 波段属于生物组织的低损耗光学窗口。生物组织对该波段光子的散射与吸收显著降低，让光子可穿透数毫米至数厘米的深层组织，从而实现高对比度的活体成像^[55]。

量子点 SWIR 成像技术的持续成熟，不仅突破了传统 SWIR 成像设备的性能与成本瓶颈，更促成了高分辨率、低成本 SWIR 相机的

实用化。这一技术突破恰好契合生物医学对深层、精准成像的核心需求,正推动 SWIR 成像技术从专业实验室场景向癌症研究、组织功能评估、临床诊断等生物医学领域广泛渗透。

4.1 疾病诊断与活体成像

4.1.1 表层血管成像与血流监测

在 SWIR 波段,生物组织具备独特的光学响应特性:血液中水分的 O-H 键在 1450 nm 附近存在强烈的吸收峰,而组织本身在 1300 nm 附近呈现相对透明的光学行为,两者形成天然的吸收对比度^[56]。借助这一特性,SWIR 成像技术无需依赖造影剂,即可直接清晰呈现皮下血管网络的分布与形态,为无侵入式血管观测提供了核心技术支撑。

此外,意法半导体公司在 2021 年国际电子器件会议上展示了一种基于 300 mm 晶圆 CMOS 兼容工艺制造的 PbS 量子点 SWIR 图像传感器^[56]。该技术已成功验证血管成像等应用场景的可行性,且得益于大尺寸晶圆与 CMOS 工艺的兼容性,其制造成本有望降至与标准 CMOS 传感器相当的水平,彻底打破传统 SWIR 成像设备的成本壁垒。

这一技术突破为医疗设备创新提供了全新路径:不仅可开发低成本、手持式静脉查找仪,辅助临床穿刺、输液等操作;而且还能用于皮瓣移植术后的血流监测、烧伤深度评估以及外周血管疾病诊断等场景,为精准医疗提供实时、无侵入式的血流灌注检测方案,推动 SWIR 成像技术在临床诊疗中的规模化应用。

4.1.2 肿瘤与血流的无创温度测量

量子点 SWIR 探测器有潜力用于非侵入式测量肿瘤和血流的温度^[57]。由于肿瘤组织的异常新陈代谢和血管增生,其表面温度通常与周围正常组织存在差异。高灵敏度的量子点红外相机能够捕捉这种由温度辐射引起的微弱红外信号,为肿瘤的早期筛查和诊断提供新的无标记方法。2012 年,Zhang Y 等人^[58]详细介绍了硫化银量子点在近红外二区窗口的应用。该研究团队与斯坦福大学的戴宏杰教授合作,

利用 Ag₂S QDs 实现了对小鼠脑部血管的高分辨率成像,并展示了其在脑肿瘤成像中的应用潜力。

4.2 术中导航与肿瘤边缘界定

生物组织主要由水、脂质(脂肪)和蛋白质组成,它们在 SWIR 波段具有截然不同的光谱吸收特征(比如脂质在 1210 nm 和 1720 nm 附近有吸收峰,而水在 1450 nm 处有强吸收)。外科手术中,低成本量子点 SWIR 探测器的“化学指纹”识别能力,将极大地推动无标记术中导航的发展。

肿瘤的早期诊断与精准切除是提高患者生存率的关键。量子点 SWIR 相机通过靶向成像与深穿透特性,可特异性识别肿瘤细胞,实现微小肿瘤病灶的早期检测。Santos H D A 等人^[59]对硫化银量子点进行飞秒激光处理后,使其量子产率提升 80 倍。在低激发强度(小于 10 mW·cm⁻²)与低剂量(小于 0.5 mg·kg⁻¹)条件下,借助 1200 nm 近红外二区窗口的低散射、低自发荧光优势,实现了小鼠体内 12 mm 深层肿瘤的高对比度成像。结果表明,肿瘤与正常组织的对比度提升 50 倍,可清晰分辨肿瘤新生血管及微小转移灶,成功实现小鼠体内深层肿瘤的高对比度成像。

在术中导航方面,Hwang J 等人^[60]开发的量子点磁导丝系统将硒镉汞量子点嵌入柔性导丝,通过 SWIR 相机实时监测导丝位置,结合磁操纵技术实现外周血管介入治疗的无 X 射线导航。该系统在模拟组织中的成像深度为 10 mm,导丝可在血管分叉处精准转向,避免了 X 射线对医患的辐射伤害,为肿瘤介入治疗提供了安全高效的导航方案。此外,多色 SWIR 成像技术的发展使同时可视化肿瘤血管与淋巴系统成为可能,为肿瘤转移监测提供了新手段。

4.3 细胞治疗的可视化监控

长期以来,细胞疗法的疗效评估多受限于难以稳定实现细胞在体内实时追踪的困境。量子点 SWIR 成像的优势在于兼顾穿透深度与细

胞活性。这种非侵入式追踪模式突破了传统组织活检的局限性,使细胞治疗从“黑箱操作”迈入“透明监控”时代。Chen M 等人^[61]开发的活体细胞追踪系统,以 PbS 量子点为荧光探针标记 M2 巨噬细胞,借助 SWIR 相机的深穿透(12 mm 穿透深度)、高稳定性(28 天信号衰减仅 8.7%)以及低细胞毒性(细胞活性保持 98.3%)优势,实现了肌肉损伤修复中 M2 巨噬细胞治疗的全程可视化追踪,清晰揭示了治疗细胞在损伤部位的动态聚集过程。该系统结合 AI 分析算法,可基于损伤后 72 h 影像数据提前 7 天预判修复效果,准确率达到 89.4%。他们构建了“量子点标记-SWIR 成像追踪-AI 精准分析”一体化技术方案,为细胞治疗的精准化、个体化发展提供了关键技术支撑。

5 量子点短波红外相机在消费电子领域的应用展望

5.1 移动设备与生物识别

智能手机的有机发光二极管屏幕在 SWIR 波段的透明特性,使量子点 SWIR 传感器可集成于屏下,实现真正的屏下摄像头与多模态传感。SWIR 光可被皮肤浅层水分和脂质吸收,清晰成像皮下静脉血管分布,构建比指纹、二维面容更难伪造的静脉识别系统。

例如,基于碲化铟量子点的 1450 nm 波段传感,可实现血管图案、皮肤水分等深度特征检测,符合《限制在电气和电子设备中使用某些有害物质的指令》(Restriction of Hazardous Substances, RoHS)^[62],完美适配手机、穿戴设备的生物识别需求。

在物质识别方面,通过智能手机等设备集成量子点 SWIR 探测器,实现食品新鲜度检测、护肤品成分鉴别等消费需求。碲化银量子点传感器已成功演示塑料瓶内容物检测功能。铋掺杂改性可有效降低其缺陷密度,提升光生载流子的利用率,保障探测的稳定性^[63]。

在增强现实(Augment Reality, AR)与虚拟现实(Virtual Reality, VR)头显设备中,SWIR

相机可实现高精度眼动追踪。与传统的红光或近红外方案相比,采用人眼不可见的 SWIR 光源不会造成视觉干扰或眼部不适^[64],且无铅量子点材料的使用进一步提升了设备的安全性。

在消费级机器视觉领域,集成于智能手机或 AR 眼镜的量子点 SWIR 相机,可利用物质光谱特性实现水果糖分/水分检测、皮肤状态分析、塑料/纺织品分拣等“物质感知”功能^[64]。基于元表面的多光谱设计,还能让设备在单次拍摄中获取多维度、拓展消费级机器视觉的应用场景。

此外,量子点 SWIR 人脸识别不受口罩、墨镜遮挡和环境光的干扰,结合三维传感技术,有望成为下一代移动设备身份验证的主流方案^[66]。光谷实验室已与华为等企业开展 PbS 量子点成像芯片方面的合作,推进手机模组集成测试^[67]。

5.2 汽车电子与自动驾驶

自动驾驶辅助系统对全天候、高可靠环境感知能力的需求日益迫切,SWIR 相机可有效弥补可见光相机在恶劣天气下的性能短板。具体来看,1550 nm 作为人眼安全波段,允许采用更高功率的激光照明方案。结合量子点探测器的高灵敏度特性,可实现更远距离的探测^[68],同时有效穿透雾、烟、雨、尘等恶劣气象条件^[69],显著提升车辆对行人、动物以及路面结冰、积水等关键目标的识别精度与距离。

此外,量子点 SWIR 传感器还可集成于车内驾驶员监控系统,其独特的光谱响应特性能够穿透太阳镜,精准监测驾驶员眼部状态(如眨眼频率、视线方向),并有效抵御强光、眩光干扰,为驾驶安全提供双重保障。同时,此类传感器具备天然的 CMOS 兼容特性,可与车载芯片无缝集成;加之量子点材料本身的稳定性优势,能够满足汽车电子对成本、可靠性和集成度的严苛要求。

目前,华中科技大学开发的 1280×1024 元 HgTe 量子点焦平面阵列已通过 $-40 \sim 105$

℃极端环境可靠性测试,性能衰减控制在 3% 以内^[70],完全满足车载场景的环境适应性要求。该技术可广泛集成于车载前视相机和环视系统,与激光雷达、毫米波雷达形成多模态感知融合,进一步提升自动驾驶系统环境感知的全面性、准确性与冗余度,为高阶自动驾驶的落地提供核心技术支撑。

5.3 安防与消费级夜视

传统夜视技术主要分为微光放大与热成像两类,但它们均存在固有短板:微光放大技术高度依赖环境光,在“零光”场景下无法工作;热成像技术虽能实现无光照探测,但仅能捕捉物体温度差异形成的轮廓图像,难以还原面部特征、物体纹理等细节信息^[65]。而 SWIR 夜视技术通过 1550 nm 波段主动照明方案,完美弥补了上述缺陷。该波段属于人眼不可见的安全波段,主动照明时隐蔽性强,且无需依赖环境光即可在“零光”环境下清晰呈现物体的真实纹理与面部特征^[65]。而量子点 SWIR 探测器在低成本化方面的突破,彻底打破了传统 SWIR 成像设备的价格壁垒,使家庭安防摄像头、便携式夜视仪等消费级产品的规模化落地成为可能。

此外,量子点探测器具备宽光谱响应特性(覆盖 300 nm~2.1 μm ,涵盖可见光、近红外与 SWIR 波段)^[69],可实现昼夜一体化成像:白天依托可见光-近红外波段获取高分辨率彩色图像,夜间切换至 SWIR 波段进行主动照明探测,无需额外切换设备或模式,显著提升了消费级安防产品的实用性与便捷性。

5.4 其他消费延伸应用

SWIR 技术凭借其独特的光学特性与功能优势,除核心应用场景外,还在健康监测、智能家电、户外装备等多个民生领域展现出广泛的应用价值。

在健康监测领域,SWIR 传感技术凭借非侵入式检测优势,可精准实现皮肤水分含量检测、血管健康状态评估等功能^[62];基于微型化、低功耗特性,可与智能手环、健康手表等

可穿戴设备无缝集成,为用户提供实时、便捷的健康数据支持。

在智能家电领域,SWIR 传感器可借助不同衣物纤维材质对 SWIR 波段的特征吸收差异,实现衣物材质的自动精准识别。集成该传感器的洗衣机能基于识别结果智能优化洗涤参数(如水温、转速、洗涤剂用量),在提升清洁效果的同时减少衣物损伤,从而实现精细化护养。

在户外装备领域,搭载量子点 SWIR 模块的运动相机,依托量子点探测器的高灵敏度与抗恶劣环境特性,可在雾、雨、低光等复杂天气条件下捕捉清晰影像,精准满足户外探险、极限运动等场景下的高清拍摄需求,为户外爱好者提供可靠的影像记录解决方案。

6 总结与展望

量子点 SWIR 探测器凭借其光谱可调、成本低廉、可溶液加工以及与 CMOS 工艺兼容等核心优势,为 SWIR 成像技术的大规模普及开辟了全新路径。本文综述表明,该技术已在材料、器件性能以及应用拓展方面取得显著进展,性能指标正逐步逼近甚至在某些应用场景下超越传统 InGaAs 探测器。然而,要实现其全面产业化并满足高端应用需求,仍面临一系列亟待突破的技术瓶颈。

6.1 更低噪声与更高探测灵敏度

噪声是制约微弱信号探测的关键,而暗电流(热激发载流子、表面缺陷泄漏电流等)是噪声的主要来源。当前 PbS 量子点探测器的暗电流密度低至 50 nA/cm²,但面向高精度光谱分析、深层生物组织成像等场景时,仍需进一步降低暗电流。核心在于解决量子点表面缺陷问题(如 PbS 量子点表面的 Pb²⁺ 悬空键、S²⁻ 空位形成的深能级陷阱),减少载流子非辐射复合与泄漏,从而提升比探测率,满足更微弱信号(如低浓度农药残留、微小肿瘤病灶)的探测需求。

6.2 更高载流子迁移率与更快响应速度

量子点薄膜的载流子迁移率较低,主要因

为量子点间的配体阻碍载流子隧穿,且表面缺陷形成载流子陷阱,导致载流子输运效率低,进而影响探测器的响应时间。当前部分器件的响应时间已达 4 ns,但面向半导体高速生产线(帧率大于 1000 fps)、动态高温过程监控等场景时,响应速度仍需提升。未来需通过配体工程(优化量子点表面配体以减少阻碍)、异质结构设计(如梯度能带结构抑制复合)等方式,提高载流子的迁移率,缩短响应时间。

6.3 更优的长期稳定性与极端环境适应性

在实际应用中,探测器需应对复杂的环境:面向车载场景时,需耐受 $-40\sim 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度波动;面向工业高温监控场景时,需抵御数百度甚至上千度的辐射;面向生物医学应用场景时,需具备生物相容性与抗体液腐蚀能力。当前虽有 HgTe 量子点焦平面阵列通过 $-40\sim 105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境测试(性能衰减小于 3%),但更极端环境(如航空航天高温、强辐射)下的稳定性仍待验证;同时,量子点材料的抗氧化、抗老化性能也需进一步优化,以延长器件的使用寿命。

6.4 更高分辨率与大规模量产的一致性

半导体制造向 3 nm 以下先进制程发展,需进行纳米级分辨率的缺陷检测。当前量子点探测器虽能实现 $5\text{ }\mu\text{m}$ 成像分辨率,但需结合近场光学技术突破纳米级分辨率瓶颈。此外,尽管溶液加工工艺有利于规模化生产,但大面积量子点薄膜的均匀性、批量器件的性能一致性(如暗电流、外量子效率的批次差异)仍需提升,以满足消费电子、工业检测等大规模应用对产能与良率的需求。

6.5 无铅化与环保兼容性

当前主流量子点材料含铅、汞等有毒元素,不符合 RoHS 等环保标准,限制了其在消费电子、生物医学等与人体接触场景中的应用。虽有铋化铟、碲化银等无铅量子点的探索,但此类材料的光谱响应范围和探测性能(如外量子效率、暗电流)仍不及 PbS 量子点,因此需进一步优化材料体系与制备工艺,以实

现“环保+高性能”的双重目标。

展望未来,依托材料创新、器件物理深化与工艺工程精进的跨学科协同,量子点 SWIR 探测器的性能有望得到进一步突破。随着性能提升,其与人工智能、柔性电子、片上光谱等前沿技术的融合将更趋深入与高效:借助 AI 算法可优化成像数据解析精度,结合柔性电子可拓展可穿戴、异形场景应用,搭配片上光谱技术可强化物质成分识别能力,进而持续拓展 SWIR 成像的应用边界,最终推动该技术完成从实验室创新到产业变革的关键跨越。

参考文献

- [1] Tillement J, Cervera C, Baylet J, et al. Design and characterization of $5\text{ }\mu\text{m}$ pitch InGaAs photodiodes using in situ doping and shallow mesa architecture for SWIR sensing [J]. *Sensors*, 2023, **23** (22): 9219.
- [2] Xin J Z, Wei W, Bo Z L, et al. Development of a high performance 1280×1024 InGaAs SWIR FPA detector at room temperature [J]. *Frontiers in Physics*, 2021, **9**: 678192.
- [3] 李雪, 龚海梅, 邵秀梅, 等. 短波红外 InGaAs 焦平面研究进展 [J]. *红外与毫米波学报*, 2022, **41**(1): 129–138.
Li X, Gong H M, Shao X M, et al. Recent advances in short wavelength infrared InGaAs focal plane arrays [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2022, **41**(1): 129–138.
- [4] 高家利. 高速近红外 InGaAs/InP 单光子探测器设计 [J]. *光电子·激光*, 2016, **27**(10): 1042–1046.
Gao J L. Design and fabrication of high-speed single-photon detectors using InGaAs/InP avalanche photodiode [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2016, **27**(10): 1042–1046.
- [5] 王凯. InP 基短波红外探测器材料生长和优化设计 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2012.
Wang K. Growth and optimization of InP-based short-wave infrared photodetectors [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012.

- [6] Cao P, Wang T, Peng H, et al. Growth and dark current analysis of GaSb- and InP-based metamorphic $\text{In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ photodetectors [J]. *Materials*, 2023, **16**(13): 4538.
- [7] 王力鸣, 张小秋, 李晋闽, 等. 超高真空条件下 NEA III-V 族半导体光电阴极的工艺与性能的研究 [J]. *真空科学与技术*, 1992, **12**(5): 390–396.
- Wang L M, Zhang X Q, Li J M, et al. Study on the technology and performance of NEA III-V semiconductor photocathodes under ultra-high vacuum conditions [J]. *Vacuum Science and Technology*, 1992, **12**(5): 390–396.
- [8] 唐恒敬. 台面型 InGaAs 短波红外线列探测器技术研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2008.
- Tang H J. Technical study on mesa structure InGaAs linear SWIR focal plane arrays [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [9] Ahn D, Hong C Y, Liu J F, et al. High performance, waveguide integrated Ge photodetectors [J]. *Optic Express*, 2007, **15**(7): 3916–3921.
- [10] 刘道群, 李志华, 冯俊波, 等. 高性能波导集成型锗 pin 光电探测器的制备 [J]. *微纳电子技术*, 2018, **55**(5): 305–311.
- Liu D Q, Li Z H, Feng J B, et al. Fabrication of a high-performance waveguide-integrated germanium pin photodetector [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2018, **55**(5): 305–311.
- [11] 汪建元, 王尘, 李成, 等. 硅基锗薄膜选区外延生长研究 [J]. *物理学报*, 2015, **64**(12): 411–415.
- Wang J Y, Wang C, Li C, et al. Selective area growth of Ge film on Si [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(12): 128102.
- [12] 何盛泉, 柯海鹏, 严莲, 等. Ge/Si 异质键合半/绝接触界面态对异质结光电输运特性的影响研究 [J]. *光学学报*, 2020, **40**(19): 209–218.
- He S Q, Ke H P, Yan L, et al. Effect of Interface State at Semiconductor-Insulator Contact Interface in Ge/Si Heterogeneous Bonding on Photoelectric Transport Characteristics of Heterojunction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, **40**(19): 1924001.
- [13] Ionel S, Constantin L, Taha M S, et al. SiGe nanocrystals in SiO_2 with high photosensitivity from visible to short-wave infrared [J]. *Scientific Reports*, 2020, **10**(1): 3252.
- [14] Deng Y H, Pang C, Kheradmand E, et al. Short-Wave infrared colloidal QD photodetector with nanosecond response times enabled by ultrathin absorber layers [J]. *Advanced Materials*, 2024, **36**(28): 2402002.
- [15] 刘艳红, 张东旭, 毛宝东, 等. 从量子点的角度审视碳点的研究进展 [J]. *化学学报*, 2020, **78**(12): 1349–1365.
- Liu Y H, Zhang D X, Mao B D, et al. Progress in Carbon Dots from the Perspective of Quantum Dots [J]. *Acta Chimica Sinica*, 2020, **78**(12): 1349–1365.
- [16] Arquer D G P F, Armin A, Meredith P, et al. Solution-processed semiconductors for next-generation photodetectors [J]. *Nature Reviews Materials*, 2017, **2**(3): 13424–13431.
- [17] Zhou S, Wang Y, Deng C, et al. Highly sensitive SWIR photodetector using carbon nanotube thin film transistor gated by quantum dots heterojunction [J]. *Applied Physics Letters*, 2022, **120**(19): 193103.
- [18] Mir W J, Sheikh T, Nematulloev S, et al. One-Pot Colloidal Synthesis Enables Highly Tunable InSb Short-Wave Infrared Quantum Dots Exhibiting Carrier Multiplication [J]. *Small*, 2023, **20**(19): 2306535.
- [19] Khatei J, Nanda K K. Various quantum mechanical concepts for confinements in semiconductor nanocrystals [J]. *Resonance*, 2013, **18**(8): 771–776.
- [20] Blanco C, Essig R, Fernandez-Serra M, et al. Dark matter direct detection with quantum dots [J]. *Physical Review D*, 2023, **107**(9): 095037.
- [21] Weidman M C, Beck M E, Hoffman R S, et al. Monodisperse, air-stable PbS nanocrystals via precursor stoichiometry control [J]. *ACS Nano*, 2014, **8**(6): 6363–6371.

- [22] Wang Q, You C, Yan Q, et al. Size-controllable fabrication of PbS quantum dots for NIR-SWIR photodetectors with extended wavelengths [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2024, **12** (48): 19595–19602.
- [23] Chen C, Huang W, Peng J, et al. Research progress on surface ligand engineering and size distribution control of PbS CQDs used in optoelectronic devices [J]. *Journal of Power Sources*, 2025, **640**: 236762.
- [24] Zhang Y, Vafaie M, Xu J, et al. Electron-Transport Layers Employing Strongly Bound Ligands Enhance Stability in Colloidal Quantum Dot Infrared Photodetectors [J]. *Advanced Materials*, 2022, **34**(47): 2206884.
- [25] Chen J, Wang J, Li X, et al. Recent Progress in Improving the Performance of Infrared Photodetectors via Optical Field Manipulations [J]. *Sensors*, 2022, **22**(2): 677.
- [26] Chehaibou B, Izquierdo E, Chu A, et al. The complex optical index of PbS nanocrystal thin films and their use for short wave infrared sensor design [J]. *Nanoscale*, 2022, **14**(7): 2711–2721.
- [27] Gao Y, Chen B. Lead-Free $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{Br}_9$ Perovskite Quantum Dots for Detection of Heavy Metal Cu^{2+} Ions in Seawater [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, **11**(5): 1001.
- [28] Chen J, Cui X, Hu L, et al. Preparation and performance optimization of bromine-based perovskite quantum dot light-emitting diodes [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2023, **40**(6): 688–95.
- [29] Zainal Abidin N A, Arith F, Nooraid N S, et al. Dopant engineering for ZnO electron transport layer towards efficient perovskite solar cells [J]. *RSC Advances*, 2023, **13**(48): 33797–33819.
- [30] Xing Y, Yazdani N, Lin W M M, et al. Effect of Positional Disorders on Charge Transport in Nanocrystal Quantum Dot Thin Films [J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2022, **4**(2): 631–642.
- [31] Kwan D, Kesaria M, Anyebe E A, et al. Recent trends in 8–14 μm type-II superlattice infrared detectors [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2021, **116**: 103756.
- [32] Kumar H, Lin C H. High-Performance Lateral Metal-Germanium-Metal SWIR Photodetectors Using a-Si:H Interlayer for Dark Current Reduction [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2023, **15**(1): 1–8.
- [33] 刘欢, 张宝晖, 胡志响, 等. 硫化铅胶体量子点表面配体工程研究进展 [J]. *科学通报*, 2021, **66**(36): 4664–4676.
- Liu H, Zhang B H, Hu Z X, et al. Research progress on surface ligand engineering of lead sulfide colloidal quantum dots [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, **66**(36): 4664–4676.
- [34] Fang Y, Armin A, Meredith P, et al. Accurate characterization of next-generation thin-film photodetectors [J]. *Nature Photonics*, 2018, **13**(1): 1–4.
- [35] Chen S, Zhu H, Cheng S, et al. Self-assembled monolayer-modified hole transport layers for high-performance CMOS-compatible PbS quantum dot photodetectors [J]. *Nano Research*, 2025, **18** (9): 94907796.
- [36] Wang B, Xing Y, Dong S, et al. Ultra-high photoresponsive photodetector based on $\text{ReS}_2/\text{SnS}_2$ heterostructure [J]. *Chinese Physics B*, 2023, **32** (9): 098504.
- [37] 袁柳, 张玮奇, 王家棋, 等. 短波红外有机光探测材料的发展 [J]. *电子科技大学学报*, 2024, **53**(5): 655–671.
- Yuan L, Zhang W Q, Wang J Q, et al. Development of Short-Wave Infrared Organic Photodetection Materials [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2024, **53**(5): 655–671.
- [38] Chen S, Zhong H, Wang X, et al. Hybrid-Size Quantum Dots in Hole Transport Layer Depress Dark Current Density of Short-Wave Infrared Photodetectors [J]. *ACS Photonics*, 2025, **12**(2): 879–888.
- [39] Liu P, Lu S, Liu J, et al. Double-ended passivation enables dark-current-suppressed colloidal quantum dot photodiodes for CMOS-integrated infrared

- imagers [J]. *InfoMat*, 2023, **6**(1): e12497.
- [40] Chang J. Correlation between Capping Ligands and Photovoltaic Properties in PbS Quantum Dot Solar Cells [C]. Nagoya: 76th JSAP Autumn Meeting, 2015.
- [41] Vafaie M, Fan J Z, Morteza N A, et al. Colloidal quantum dot photodetectors with 10-ns response time and 80% quantum efficiency at 1550 nm [J]. *Matter*, 2021, **4**(3): 1042–1053.
- [42] Saran R, Curry J R. Lead sulphide nanocrystal photodetector technologies [J]. *Nature Photonics*, 2016, **10**(2): 81–92.
- [43] 谭伊玫, 张硕, 罗宇宇, 等. 640×512 规模碲化汞量子点中波红外焦平面阵列 [J]. *红外与激光工程*, 2023, **52**(7): 9–15.
- Tan Y M, Zhang S, Luo Y N, et al. 640×512 HgTe quantum dot-based mid-wave infrared focal plane array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, **52**(7): 9–15.
- [44] Liu Y, Liu J, Deng C, et al. Planar Cation Passivation on Colloidal Quantum Dots Enables High-performance 0.35–1.8 μm Broadband TFT Imager [J]. *Advanced Materials*, 2024, **36** (21): e2313811.
- [45] Liu L, Wang R X, Sun Y W, et al. Fluorescence enhancement of PbS colloidal quantum dots from silicon metasurfaces sustaining bound states in the continuum [J]. *Nanophotonics*, 2023, **12**(15): 3159–3164.
- [46] Deng H Y, Pang C, Kheradmand E, et al. Short-Wave Infrared Colloidal QDs Photodetector with Nanosecond Response Times Enabled by Ultrathin Absorber Layers [J]. *Advanced Materials*, 2024, **36**(28): e2402002.
- [47] 张盼, 闫柯, 朱永生, 等. 面向旋转部件监测的耐高温量子点传感器研究 [J]. *机械工程学报*, 2020, **56**(10): 12–18.
- Zhang P, Yan K, Zhu Y S, et al. Research on the Heat Resistant Quantum Dots Sensor for Rotating Components Monitoring [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, **56**(10): 12–18.
- [48] Kong D, Yu X, Chen Z, et al. CQD-Based Sensors for Large Format SWIR Imaging [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2024, **55**(1): 471–474.
- [49] Meng H Y, Gao Y, Wang X H, et al. Quantum dot-enabled infrared hyperspectral imaging with single-pixel detection [J]. *Light: Science & Applications*, 2024, **13**(1): 121–125.
- [50] 陈亨业, 刘瑞, 付海燕, 等. 量子点及其在食品安全快速检测中的应用进展 [J]. *化学通报*, 2020, **83**(5): 418–426.
- Chen H Y, Liu R, Fu H Y, et al. Quantum dots and their applications in rapid food safety detection [J]. *Chemistry Bulletin*, 2020, **83**(5): 418–426.
- [51] Sultana S T, Hary K, Hanim Z A, et al. Hyperspectral imaging techniques for detection of foreign materials from fresh-cut vegetables [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, **201**: 112373.
- [52] Meng H Y, Gao Y, Wang X H, et al. Quantum dot-enabled infrared hyperspectral imaging with single-pixel detection [J]. *Light: Science & Applications*, 2024, **13**(1): 121.
- [53] 万亮. 面向植物生长评估的近端反射图谱解析方法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- Wan L. Assessment of plant growth traits based on proximal reflectance spectral imaging [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.
- [54] Sandhya M, Senthilraja G, Priyadharshini E, et al. Early detection of plant diseases and their management using quantum dots: status and strategies [J]. *Journal of Fluorescence*, 2025, **35**: 10945–10960.
- [55] Hong G, Antaris A, Dai L H. Near-infrared-II (NIR-II) in vivo small animal imaging [J]. *Nature Biomedical Engineering*, 2017, **1**(1): 0010.
- [56] He J T. Overview of Quantum Dot Image Sensor [J]. *International Journal of Trend in Research and Development*, 2024, **11**(6): 119–122.
- [57] Hafiz S B, Scimeca M, Sahu A, et al. Colloidal quantum dots for thermal infrared sensing and imaging [J]. *Nano Convergence*, 2019, **6**(1): 7.
- [58] Zhang Y, Hong G, Zhang Y, et al. Ag₂S Quantum Dot: A Bright and Biocompatible Fluorescent Nanoprobe in the Second Near-Infrared Window

- [J]. *ACS Nano*, 2012, **6**(5): 3695–3702.
- [59] Santos H D A, Zabala Gutiérrez I, Shen Y, et al. Ultrafast photochemistry produces superbright short-wave infrared dots for low-dose in vivo imaging [J]. *Nature Communications*, 2020, **11**(1): 2933.
- [60] Hwang J, Kim B, Jin C, et al. Shortwave infrared imaging of a quantum dot-based magnetic guide-wire toward non-fluoroscopic peripheral vascular interventions [J]. *Small*, 2025, **21**(3): 2404251.
- [61] Chen M, Chen Y, Feng S, et al. SWIR Fluorescence imaging in vivo monitoring and evaluating implanted M2 macrophages in skeletal muscle regeneration [J]. *Engineering*, 2024, **33**: 283–294.
- [62] Wu D, Xu G, Tan J, et al. Nanophotonic structures energized short-wave infrared quantum dot photodetectors and their advancements in imaging and large-scale fabrication techniques [J]. *Nanoscale*, 2025, **17**(14): 8239–8269.
- [63] Dai P, Wang Z, Tang Z, et al. Bismuth-doped Ag₂Te colloidal quantum dots for high-performance shortwave-infrared photodetectors [J]. *Inorganic Chemistry*, 2025, **64**(28): 14637–14643.
- [64] Malinowski P E, Pejović V, Siddik A B, et al. New perspectives for infrared imaging enabled by colloidal quantum dots [J]. *ITE Technical Report*, 2024, **48**(38): 38–42.
- [65] Fu L C, He Y M, Zheng J J, et al. Te_xSe_{1-x} photodiode shortwave infrared detection and imaging [J]. *Advanced Materials*, 2023, **35**(24): 2211522.
- [66] Zhao J, Wang Y, Ma W. Colloidal quantum dot short-wave infrared photodetectors: from materials and devices to applications [J]. *Science China Chemistry*, 2022, **65**: 1269–1287.
- [67] Liang X, Liu Y, Liu P, et al. Large-area flexible colloidal-quantum-dot infrared photodiodes for photoplethysmogram signal measurements [J]. *Science Bulletin*, 2023, **68**(7): 698–705.
- [68] Chatterjee S, Nemoto K, Ghosh B, et al. Solution-Processed InSb Quantum Dots Photodiodes for Short-Wave Infrared Sensing [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2023, **6**: 15540–15550.
- [69] Hinds S, Klem E, Gregory C, et al. Extended SWIR high performance and high definition colloidal quantum dot imagers [C]. *SPIE*, 2020, **11407**: 1140707.
- [70] Hu H, Liu J, Liu J, et al. Double-heterojunction-based HgTe colloidal quantum dot imagers [J]. *ACS Nano*, 2025, **19**(9): 8974–8984.