

〈综述与评论〉

短波红外技术应用研究进展

陈晟迪^{1,2}, 杨丽^{1,2}, 张艳^{1,2}, 唐利斌^{1,2}, 田品^{1,2}, 杨丽清^{1,2}

(1. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223; 2. 云南省先进光电材料与器件重点实验室, 云南 昆明 650223)

摘要: 短波红外技术 (short-wave infrared, SWIR) 能够在室温下获取大气窗口 0.9~2.5 μm 波段透过的信息, 有效弥补了可见光和热成像的不足, 因而拥有航天遥感、军事与安防、农矿业、医疗与生物等广泛的应用场景。本文首先对短波红外技术作了简单介绍, 分析了该技术的特点和优势, 并详细分层次阐述了该技术的发展现状, 主要包括热门红外探测材料及其工艺的相关研究, 通过光学结构增强器件光电探测能力的设计方法, 以及红外成像系统设计的要点, 其次详细归纳了其在十个重要应用场景 (航天、军事、安防、农业、矿业、环境、医疗、机器视觉、工业检测、考古) 的相关进展, 显示了短波红外技术从航天与军用等高端领域逐渐走向民用市场的发展趋势, 因此展现了新兴的胶体量子点等红外材料作为未来走向高性能、低成本与高硅基兼容性大方向的生力军的潜力, 将成为短波红外技术降低成本并向广阔民用需求转型的关键一环, 为短波红外技术的产业化推广与未来发展方向提供有力参考。

关键词: 短波红外; 光电探测技术; 短波红外成像应用

中图分类号: TN204 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2025)10-1197-18

Research Progress on Applications of Short-wave Infrared Technology

CHEN Shengdi^{1,2}, YANG Li^{1,2}, ZHANG Yan^{1,2}, TANG Libin^{1,2}, TIAN Pin^{1,2}, YANG Liqing^{1,2}

(1. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;

2. Yunnan Key Laboratory of Advanced Photoelectric Materials and Devices, Kunming 650223, China)

Abstract: Short-wave infrared technology (SWIR) can obtain the information transmitted through the atmospheric window of 0.9-2.5 μm at room temperature, effectively making up for the deficiencies of visible light and thermal imaging, resulting in a wide range of application scenarios such as space remote sensing, military and security, agriculture, and mining, medical and biological. This paper provides a brief introduction to short-wave infrared technology, analyzes its characteristics and advantages, and elaborates on its current development status through a hierarchical approach. This discussion primarily covers research on popular infrared detection materials and their manufacturing processes, design methods for improving photoelectric detection capabilities via innovative optical devices, and key considerations in infrared imaging system design. It systematically summarizes advancements in ten critical application fields: aerospace, military, security, agriculture, mining, environmental monitoring, healthcare, machine vision, industrial inspection, and archaeology. The analysis reveals a growing trend in short-wave infrared technology, transitioning from advanced applications, such as aerospace and military, to civilian markets. This evolution highlights emerging materials, such as colloidal quantum dots, as promising candidates for achieving high performance, low cost, and excellent silicon-based compatibility. These innovations will serve as crucial drivers for reducing costs and expanding civilian applications of short-wave infrared technology, providing valuable references for its industrialization and future development directions.

Key words: short-wave infrared, photodetection, short-wave infrared imaging applications

收稿日期: 2025-09-10; 修订日期: 2025-10-09.

作者简介: 陈晟迪 (1999-), 女, 博士研究生, 研究方向是新型量子点光电探测材料与器件。

通信作者: 唐利斌 (1978-), 男, 博士, 正高级工程师, 博士生导师, 主要从事光电材料与器件的研究。E-mail: scitang@163.com.

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFB2203404); 云南省创新团队项目 (2018HC020)。

0 引言

短波红外是被定义为波长在 $0.9\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 范围内的电磁波,处于可见光(visible, VIS)与中长波红外光(middle-wave infrared and long-wave infrared, MWIR & LWIR)之间的过渡波段,因此短波红外光不仅拥有中长波红外的热辐射成像能力,还具备良好的反射光成像能力,因而同时拥有了许多可见光和热成像技术所不具备的独特优势^[1-5],具有广泛的应用领域,如图1所示。物质对于电磁波的散射会随着波长增加而减弱,因此红外光具备良好的穿透性,能够穿透玻璃、烟雾、雾霾、雾气等,在恶劣天气或复杂环境下仍能获得清晰的图像^[3]。但是中长波红外的热成像效果主要由温度分布信息体现,因此缺乏一些光学细节。而在有遮挡物或者烟雾的情况下,短波红外既能凭借良好的穿透能力进行无损探测,又能提供类似于可见光成像的人类视觉的习惯细节,同时其波段覆盖范围($1.55\ \mu\text{m}$)对于人眼相对安全^[6]。此外,由于夜晚的星空(星光和 $400\ \text{K}$ 月光辐射)和大气辉光中充斥着足够的短波红外辐射,短波红外探测器因此拥有了全天候工作的能力,能够同时接收目标和景物反射的短波红外辐射,有利于提供对比度较强的高分辨率图像,并不受周边环境光弱的影响,也不依赖热发射率,在夜间成像效果细节丰富。短波红外的光谱特性还可作为物质识别的“指纹”,不同物质对于短波红外光的不同的吸收和反射特性能够用于成分分析和质量检测^[6-9]。

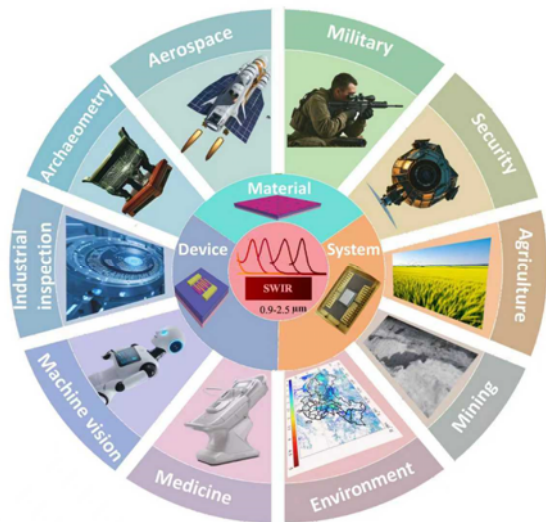


图1 短波红外技术及其应用领域

Fig.1 Short-wave infrared technology and its application fields

1 短波红外技术概要

短波红外技术的基础是各类红外半导体材料,迄今为止主要包括碲镉汞(mercury cadmium telluride,

HgCdTe)、铟镓砷(indium gallium arsenide, InGaAs)、硫化铅胶体量子点(lead sulfide colloidal quantum dots, PbS CQDs)、硒化铅胶体量子点(lead selenium colloidal quantum dots, PbSe CQDs)、锗硅(germanium silicon, GeSi)、锗锡(germanium tin, GeSn)以及各种II类超晶格材料等。其中 HgCdTe、InGaAs 是目前市场主流的红外探测器,量子效率高且性能优异,工艺难度较高,成本昂贵,主要应用在航天军事和高端工业检测方面。而 PbS CQDs 等量子点材料由于其优异的溶液加工性和易于与硅基集成的特性,有望在进一步提升稳定性和量子效率后,大量应用在民用市场包括消费电子、汽车等行业。GeSi 可直接在硅晶圆上生长,与互补型金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)工艺完全兼容,但是暗电流较高等问题还需进一步优化,未来有望用于片上光谱仪、通信、硅光集成。其他材料还包括 GeSn、铂硅(platinum silicide, PtSi)、铟化镓(gallium antimonide, GaSb)等也是科学前沿的研究热点,并且通过匹配以相关的光学结构设计,从而进一步提升红外材料的短波红外探测能力。

衔接短波红外基础材料与应用的关键是相关光学器件与成像系统的综合设计。短波红外成像系统包括焦平面器件、光学元件、光学结构以及成像与算法平台等,其中最核心的部分是红外焦平面器件。通过提升焦平面探测阵列的集成度、探测率、均匀性等,可以大幅度地提高成像系统的分辨率和目标识别能力。另一方面,电路设计方面使用低噪声信号处理技术以抑制系统噪声来提高信噪比,也可以有效提高分辨率。同时,光学设计中的光谱分光方式也至关重要,光栅、棱镜、透光材料以及透镜系统的设计要求获取更多的入射能量,减小光学 F 数^[10]。经过光学成像的相关信息的收集之后,需要对光谱信息进行定量分析并且映射到相应的观测目标,并要求仪器性能通过校验和量化评价。最后的图像输出效果还依赖于图像处理算法技术,能够有效通过深度学习、灰度变化、频域变换等方法对图像进行增强^[11]。

接下来将根据红外探测材料与工艺、器件结构和系统设计 3 方面对短波红外技术发展现状进行相应介绍。

1.1 材料体系与工艺优化

目前国际上主流的短波红外探测器的材料体系是 III-V 族化合物半导体 InGaAs, 其通过合金工程可以调控 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$ 中的组分值 x 的变化,从而实现在 $0.87\ \mu\text{m}$ (GaAs) $\sim 3.5\ \mu\text{m}$ (InAs) 范围内的宽谱响应变化^[12]。InGaAs 材料的优势还在于其超高的量子效率(quantum efficiency, QE)、迁移率、响应率(responsivity,

R)、探测率 (detectivity, D^*) 和室温探测等, 然而其较高的工艺难度限制了在民用领域的广泛应用。为了进一步突破其在工艺加工和大面阵制造方面的难题, II类超晶格 (T2SL) 与量子阱技术能够有效解决 InGaAs 半导体材料的掺杂比调控过程中与基板 InP 失配的缺陷, 其纳米级薄层交叠的功函数导致显著的光学跃迁, 载流子输运出现量子限域效应, 从而建立了厚度与光学带隙的灵活调制关系。Uliel 团队在 2017 年报道了采用 InGaAs 与 GaAsSb 交替纳米层结构的 T2SL 器件^[13], 通过锌扩散 p 型掺杂工艺实现电极接触, 测得其室温短波红外截止波长为 2.4 μm 。为了优化生长参数和加工技术来突破工艺难题, 研究人员使用金属有机物气相化学淀积 (metal organic chemical vapor deposition, MOCVD) 腔在扩散过程中通过裂解 PH_3 或 AsH_3 提供足够的表面保护, 从而提高了扩散过程的可控性、再现性和均匀性, 后续还需要进一步降低应力扩散掩模和优化钝化膜。

HgCdTe 是一类更具有波长拓展优势的红外探测材料, 其和 InGaAs 相似的合金组分调控手段 ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$) 能够将探测波段跨越近红外、短波红外、中长波红外一直延展到甚长波红外, 囊括了 3 个主要的大气窗口, 在制冷条件下具有较高的光敏度和探测率, 可以通过薄膜沉积生长制备红外焦平面器件^[14], 器件结构如图 2(a)~(b)所示, 其超宽探测范围如图 2(c)所示。为了解决 HgCdTe 薄膜大面积、均匀性的问题, 其生长制备工艺从第一代的体材料生长到第二代的液相外延 (liquid phase epitaxy, LPE) 以及第三代分子束外延 (molecular beam epitaxy, MBE) 与 MOCVD 技术, 但是薄膜缺陷控制仍然是难点之一, 不过通过调控外延生长的各项参数, 可针对性解决不同类型的薄膜缺陷问题^[15]。近年来低维材料出色的调控性能引起了研究人员的关注, HgCdTe 三元纳米晶的合成也成为值得探究的方向^[16]。研究者论证了非平衡模式碲镉汞器件的优势: 通过合理组分和掺杂调控, 可以获得吸收层内热载流子的深度耗尽, 有效抑制俄歇复合过程, 更容易获得吸收层低浓度掺杂, 且工艺难度较低, 更具发展潜力^[17]。

胶体量子点 (colloidal quantum dots, CQDs) 是一类零维半导体材料, 主要通过低成本的溶液合成法获得, 并且通过旋涂法、刀片法等溶液加工技术, 无需复杂的键合倒装工艺便可集成在 CMOS 读出电路上^[18]。由于量子限域效应, 零带隙体材料在量子点维度下带隙打开, 理论上其带隙通过尺寸控制可以实现自由调控, 非常适于开发短波红外、中长波红外探测器件, 并且天然具备焦平面阵列集成优势^[19]。然而区

别于体材料的连续能级, 量子点的零维分立能级结构具有跳跃传输特性, 其器件制备的关键点在于对配体交换工程与表面修饰方法的研究^[20]。Cao 等人报道了 ITO/ZnO/PbS ink/HTL/MoO_x/Ag 的光伏结构^[21], 利用液相交换配置的 PbS CQD 墨水作为光敏层, 空穴传输层则使用了不同尺寸的固相交换后的 PbS CQD 薄膜, 实现了在 1200 nm 下外量子效率 (external quantum efficiency, EQE)、响应率和探测率分别达到 55.74%、0.54 A/W、 5.5×10^{12} Jones。Dong 等人制备的 PbS 量子点的探测截止波长能够到 2600 nm^[22], 完全覆盖短波红外波段探测范围, 并设计了 Al/ZnO/PbS-TBAI/PbS-BDT/NiO_x/ITO 光伏结构, 其在 2.1 μm 波长可以达到 25% 的 EQE, 以及 1.5×10^{11} Jones 的探测率, 器件结构和相应参数如图 2(d)~(f)所示。Peng 等人在 2024 年成功开发了一种合成尺寸可调 InSb CQDs 的方法^[23], 实现超过 128 dB 的宽线性动态范围 (linear dynamic range, LDR)、1240 nm 处最大为 25% 的 EQE、70 ns 的快速光响应时间和高达 4.4×10^{11} Jones 的探测率。

目前对于硅基材料的开发也较为热门, 研究者们通过引入窄带隙的 Ge 材料, 以实现与 CMOS 工艺的兼容性。Spieth 等人在 2025 年报道了基于 Ge/GeSn p-n-i-p 异质结的高性能短波红外光电晶体管^[24]。通过引入 i-GeSn 吸收层, 实现了更高的吸收系数和截止波长红移。在 6.5% Sn 浓度下, 器件在 1310 nm 波长和 4 V 电压下实现了 4.77 A/W 的最高响应率, 未来可通过三端 HPT 设计或引入 GeSn 量子点进一步提升光学增益和响应率, 为硅基光电器件的发展开辟新方向。锗硅 (Ge-on-Si) 单光子探测器 (single photon detector, SPAD) 利用锗作为吸收层与硅倍增层结合^[25], 以克服现有检测技术的缺点。锗的带隙提供了从可见光到近红外的高效吸收, 截止波长约 1600 nm。双温生长技术的发展使得在 Si 上直接生长高质量的外延锗层成为可能, 从而充分利用低成本和成熟的集成 Si 晶圆技术, 具备集成到 Si 基光子和电子层的潜力。Ryckeboer 团队在 2021 年报道了 GaSb 光电探测器^[26], 其 GaSb 本征层通过粘合键合工艺实现在绝缘体硅 (silicon-on-insulator, SOI) 上的外延层转移, 构建了硅基平面凹面光栅, 该探测器在 2.2 μm 波长下探测器响应率为 0.5 A/W。

新兴材料体系包括 II 类超晶格 (T2SL)、量子阱 (MQW) 和柔性合金材料等, 具有带隙可调、暗电流低、均匀性好等优点, 被认为是用于开发新型高性能红外光电探测器的优选材料。Dehzangi 等在 2019 年基于 InAs/AlSb/GaSb 二类超晶格材料体系^[27], 提出了一

种带结构工程的光生载流子提取器 (band structure-engineered photo-generated carrier extractor, BECX)。该设计通过在吸收区域外采用宽带隙窗口层和电子阻挡层,解决了表面复合及高掺杂接触区吸收问题。在 300 K 下, BECX 器件实现了 $4.72 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 的比探测率, 峰值响应率为 0.6 A/W , 对应于 43% 的量子效率, 截止波长为 $2.4 \text{ } \mu\text{m}$, 展示了优异的光电性能。Chen 等人在 2024 年开发了集成介电纳米孔阵列超表面的 GeSn/Ge 量子阱光电探测器^[28], 实现了高检测率、高速和低成本的短波红外光检测。其在 $2 \text{ } \mu\text{m}$ 处达到 0.232 A/W 响应率, 且具有窄线宽 (full

wave at half maximum, FWHM=22 nm) 的响应率峰值, 证明了共振效应。此外, GeSn 的探测波段最长能够拓展到接近 $2.4 \text{ } \mu\text{m}$, 其结构以及吸收光谱如图 2(g)~(i)所示^[29]。He 等人在 2024 年开发了一种基于一维晶体结构 $\text{Te}_{0.7}\text{Se}_{0.3}$ 合金的高性能柔性短波红外光电探测器^[30], 其响应时间仅为 $6 \text{ } \mu\text{s}$, LDR 为 76 dB, D^* 为 $4.8 \times 10^{10} \text{ Jones}$ 。研究者利用柔性 $\text{Te}_{0.7}\text{Se}_{0.3}$ 光电二极管进行短波红外成像实验, 成功识别了被硅片部分覆盖的金属掩模上的字符“T”, 展示了其在物质识别、夜视和工业缺陷检测中的潜在应用。表 1 展示了各类不同的红外材料的光电探测性能对比。

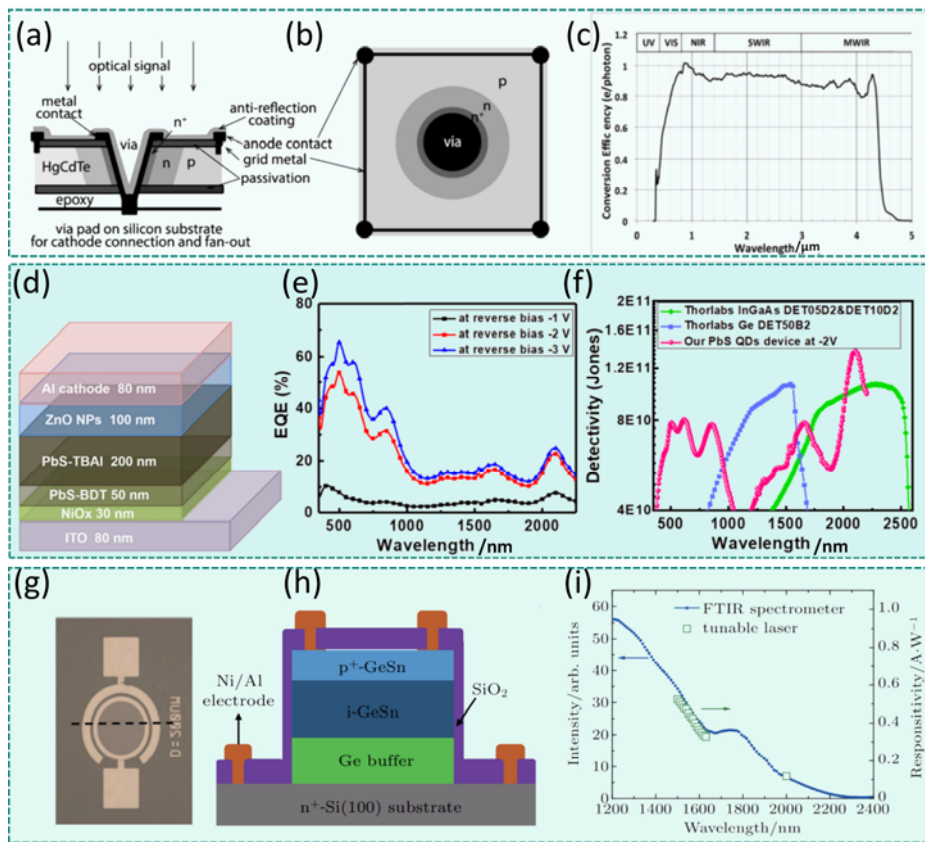


图 2 短波红外技术的材料及其性能介绍: HgCdTe 雪崩光电二极管结构示意图: (a) 侧视图; (b) 俯视图; (c) $4.3 \text{ } \mu\text{m}$ 截止波长的 HgCdTe 雪崩光电二极管光谱响应特性^[14]; (d) 具有 2100 nm 激发峰量子点的异质结光电探测器三维结构示意图; (e) 器件外量子效率测试结果; (f) 器件与部分商用光电探测器的探测性能对比^[22]; (g) GeSn 光电探测器俯视显微图像; (h) 沿 (g) 图中黑色虚线所示方向的顶置式 GeSn 光电探测器结构剖面示意图; (i) GeSn 光电探测器的光学响应与光谱响应随波长变化特性曲线^[29]

Fig.2 Materials and their performance of SWIR technology: Schematic of the HgCdTe APD, (a) Side view; (b) Top view; (c) Spectral response of a $4.3\text{-}\mu\text{m}$ cut-off HgCdTe APD^[14]. (d) 3D structure for the heterojunction photodetector with QDs of 2100 nm excitation peak; (e) EQE of QDs device; (f) Detectivity of QDs device and some commercial photodetectors^[22]; (g) Top-view microscopic image of the GeSn photodetector. The mesa size is $200 \text{ } \mu\text{m}$ in diameter. (h) Cross-sectional schematic of the top-illuminated GeSn photodetector structure along the black dash line shown in (g); (i) Optical responsivity and spectrum response of GeSn photodetector as a function of wavelength^[29]

表 1 不同短波红外材料的器件探测性能对比

Table 1 Comparison for detection performance of different SWIR materials

SWIR material	Response wavelength / μm	Working temperature /K	Responsivity /(A/W)	Detectivity /Jones	External quantum efficiency /%	Response time/ μs	Ref.
InGaAs	1.64	300	/	2.2×10^{12}	/	/	[12]
InGaAs /GaAsSb	2	300	/	1.7×10^{10}	40	/	[13]
HgCdTe	1.55	77			92	0.05	[14]
InAs/AlSb/GaSb	1.7	300	0.6	4.72×10^{10}	43	/	[27]
Al/Si/Nano -Structure Al	1.55	300	0.0045	$1.48 \cdot 10^8$	/	/	[31]
PbS/InGa /ZnO	1.31	300	10^4	10^{12}	/	/	[18]
PtSe ₂ /Ge	1550	300	0.766	1.1×10^{11}	61.3	/	[36]
GaSb	2.2	300	0.5	/	/	/	[26]
GeSi	1.55	300	1.2	/	/	/	[32]
GeSn	2	300	0.51	/	84	/	[33]
GeSn/Ge MQW	2	300	0.232	5.34×10^9	/	/	[28]
GeSi	1.55		0.46	3.09×10^{10}	/	/	[37]
ITO/TiO ₂ /InSb-InP CQDs /MoO _x /Au	1.24	300	/	4.4×10^{11}	25	0.07	[23]
Au/Te _{0.7} So _{0.3} /ZnO /ITO	1.3	300	/	4.8×10^{10}	27.2	6	[30]
Al/ZnO/PbS-TBA /PbS-BDT/NiO _x /ITO	2.1	300	/	1.5×10^{11}	25	43	[22]
ITO/ZnO/PbS ink /HTL/MoO _x /Ag	1.2	300	0.54	5.5×10^{12}	55.74	/	[21]
Ge/GeSn	1.31	300	4.77	/	/	/	[24]

1.2 器件结构

新材料的研制固然是探测水平提升的高效方式，但是器件的光学结构设计也是增强器件光探测能力的重要途径。通过内部光电发射效应，可以使金属与半导体界面吸收低于带隙能量的光子并实现光探测。为了提高吸收效率，研究人员开发了多种方案，包括光学波导结构、等离子体吸收器（如天线和光栅阵列）、随机纳米结构、金属薄膜厚度工程以及腔模优化等方法。Frydendahl 团队在 2020 年报道了利用自组织分子形成超表面的策略，即金属渗流膜，实现了硅材料亚带隙光检测^[31]，如图 3(a)~(b)所示，使得宽光谱范围

内的热载流子生成增强，突破了体硅材料在 1.1 μm 后无法探测的限制。在 1550 nm 波长下，器件响应率 R 最高达到 4.5 mA/W(图 3(c))，探测率 D^* 达到 1.48×10^8 Jones。Benedikovic 等人在 2021 年采用渐变耦合和端面耦合方式将 Si-Ge-Si 光电探测器与硅波导集成^[32]，其在 1.55 μm 波长下表现出高达 1.2 A/W 的响应率和 7 GHz 的带宽。这些集成方式不仅减小了有源器件面积，提高灵敏度，还能更好地适应成熟的 Si CMOS 制造工艺。通过优化波导设计，实现了吸收区域的有效控制，减少了重掺杂区域的有害吸收损失。

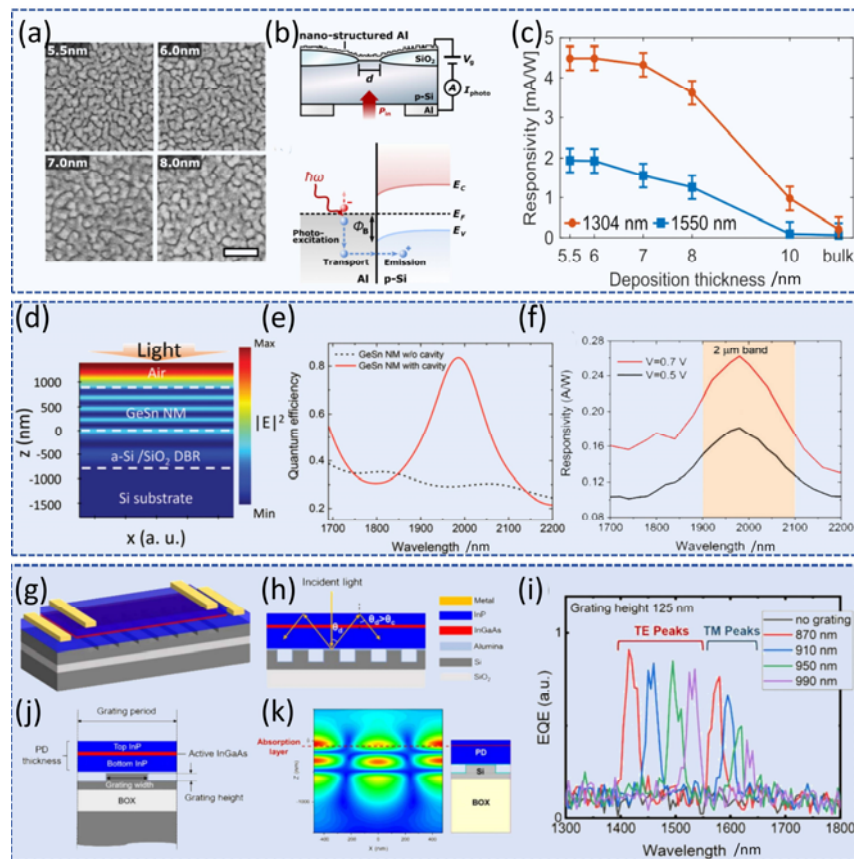


图3 短波红外技术的器件结构介绍: (a) 二极管区域不同金属沉积厚度下制备的纳米结构扫描电镜显微照片; (b) 二极管结构侧视示意图, 展示绝缘氧化层的倾斜侧壁; (c) 两种激发波长对应的铝沉积厚度与响应率关系图^[31]; (d) 器件在共振条件下的模拟光场分布; (e) 设计的 GeSn 纳米结构光电探测器有无腔体时的量子效率光谱模拟; (f) 0.5 V 和 0.7 V 偏置电压下 GeSn 纳米结构共振电光晶体光电探测器的响应光谱^[33]; (g) 光栅共振窄带光电二极管结构示意图; (h) 器件中光的衍射与全内反射过程; (i) 通过单色仪扫描测得的光谱等效量子效率; (j) 器件晶胞横截面及设计参数; (k) 晶胞在共振波长下的典型电场分布^[35]

Fig. 3 Device structures of short-wave infrared technology: (a) SEM micrographs of the nano structures achieved at the diode areas for different metal deposition thicknesses. All images at the same scale, scale bar is 125 nm; (b) Schematic side view of the diode geometry, showing the sloped side walls of the insulating oxide; (c) Responsivity versus Al deposition thickness, for two different wavelengths of excitation^[31]; (d) Simulated optical field distribution in the device under resonance conditions. (e) Simulated quantum efficiency spectra of the designed GeSn photodetector with and without a cavity; (f) Responsivity spectra of the GeSn NM RCE photodetector under bias voltages of 0.5 and 0.7 V^[33]; (g) A schematic of the grating-resonance narrowband photodetector. (h) Diffraction and total internal reflection of the light in the device; (i) Spectral EQEs measured by monochromator scan; (j) Unit cell cross-section and design parameters of the device; (k) Representative electric field distribution in the unit cell at the resonance wavelength^[35]

Chen 等人在 2022 年通过集成谐振腔和高质量 GeSn 纳米膜, 制备出可转移 GeSn 纳米膜谐振腔增强光电探测器^[33], 如图 3(d)所示, 并在 2 μm 波长处实现了量子效率高达 84% (图 3(e)), 响应率也达到 0.51 A/W (图 3(f)), 比之前报道的无腔 GeSn 纳米结构光电探测器提高了两个数量级, 还证明了通过调整 GeSn 纳米膜厚度可以调谐光谱响应。2024 年, Cui 等人通过设计和制备具有超表面结构的 GeSn PD^[34], 维持低

暗电流的同时提高了光响应。相比对照样品, 1630 nm 和 2000 nm 波长下的响应率分别提升了约 0.88 倍和 3.4 倍, 截止波长从 2750 nm 延长至 2950 nm。Jang 等在 2022 年研究提出了一种基于光栅共振的窄带光电探测器, 通过在硅光栅上放置 InGaAs 吸收层实现波长选择性吸收^[35]。其在 1300~1700 nm 波长区域内表现出低暗电流、清晰的窄带光谱。通过仅操纵光栅周期, 可以制造出具有不同检测波长的像素阵列, 如图

3(g)~(i)所示,其物理仿真结果如图3(j)~(k)所示。此外,研究者还会采取构造异质结的策略,通过将窄带隙半导体作为光活性介质吸收 SWIR 光子,并利用二维材料传输光生载流子,展现出优异性能。据 2021 年的报道, Lu Yu 等人构建的多层 PtSe₂/Ge 异质结构光电探测器阵列展示了卓越的光电响应性能和良好的一致性^[36]。在 1550 nm 光照下,无偏置时电流开关比、响应率、外量子效率和探测率分别达到 1.08×10^3 、766 mA/W、61.3%和 1.1×10^{11} Jones。由此光学结构设计对于微纳材料的性能加强和波长扩展也是红外探测技术发展的重要方向,并且可以通过物理模型仿真进行正向设计,以辅助高性能光电探测器件的开发。

1.3 成像系统设计

短波红外成像系统的设计包括焦平面器件、功能电路以及光学元件和结构设计。焦平面器件的性能是探测能力的核心,主要由红外材料的探测水准决定,但是匹配的读出电路设计也至关重要。在焦平面中,读出电路和红外材料进行集成,可收集目标物体和景物的红外辐射信号并将其转换为电压,关键特性包括积分电容、读出模式以及片上功能,对于成像质量而言,其中满阱容量、动态范围和非均匀性校正作用起主要作用。如图4(a)~(f)展示了一个集成了红外材料和读出电路的完整系统及其 SWIR 成像结果^[9],能够穿透晶圆材料进行成像,显示了其在无损检测方面的优势。此外还有信号处理电路,负责将焦平面器件获取的探测信号进行放大、滤波和数模转换等处理,最终传输到图像数据处理的核心区域,实时驱动图像处理算法并控制时序和显示输出^[37]。光学系统方面需要根据性能与应用需求选择合适的透镜结构和光学玻璃材料,通过调整焦距和 F 数能够影响成像放大率和分辨率。最后在系统的集成与封装过程中,需要进行机械结构与热管理的设计,以确保系统的散热与稳定性^[38]。

根据成像数据收集和处理细节的差异,还可以分为单光子探测成像与偏振成像。单光子探测的实现主要基于单个光子到达后都会产生一个离散的、标准的电脉冲信号,比较典型的有 InP/InGaAs 单光子雪崩二极管^[39],其通过半导体热电制冷(TEC)即可达到的工作温度(-40℃左右),应用时方便安装和携带,结合激光雷达和结构光投影方法可进行三维数字成像。偏振成像技术则主要通过探测目标在不同状态下的偏振差异从而进行准确识别,主要分为分时偏振成像技术、分振幅偏振成像技术、分孔径偏振成像技术和分焦平面偏振成像技术等,一种典型的 InGaAs 光栅短波红外偏振探测系统如图4(g)~(i)所示^[40],图4(h)为不同偏振角度下显著的信号差异测试结果,其在军

事目标探测、医学诊断、海洋环境监测和空间碎片探测等领域有着广泛的应用前景。

2 短波红外技术应用

短波红外探测与成像技术凭借着强穿透性、光学细节分辨能力、材料鉴别能力以及全天候工作能力等优越特性,在航天遥感、军事、安防、农矿业、工业检测、机器视觉、消防与灾情监控以及生物医疗等具体场景中有着广泛应用。航天遥感主要通过高光谱成像探测自然表面包括大气、水文、植被、土壤以及矿产资源等,因而在农矿业中有较大的意义;同时还能用于森林火灾、地震、旱涝、火山喷发等灾害实时监控,以协助灾情控制和防灾救助;并且能够用于深空探测。军事上由于其优越的夜视能力和短波红外辐射不可见的特性,能够在伪装识别、激光制导、激光雷达以及夜视探测等方面应用。在民用领域,短波红外可以作为机器视觉的重要补充,其雾霾穿透成像能力使其在车载智能驾驶中拥有极大作用。同时,在工业生产中还可用于半导体芯片缺损、产品质量检测等。另外,该技术还可以应用于医疗生物领域,辅助于疾病诊断和药物监测。甚至在考古与文物鉴别方面,短波红外光谱信息也能做出重要的贡献。接下来将根据细分领域对短波红外技术的应用发展现状作相关介绍。

2.1 SWIR 的航天与遥感应用

我国的高分五号卫星装载了短波红外高光谱成像仪,能够对地进行高质量的遥感探测,如图5(a)所示^[41]。Trondsen 等人在 2024 年利用短波红外(SWIR)成像技术扩展了极光和气辉的研究范围,实现对 900~1700 nm 波段的精确成像^[42],如图5(b)所示,以探索极光、气辉以及中层大气动力学等现象的空间分布和物理特性。这些问题的解决有助于更好地理解地球空间环境,特别是在中高层大气与地磁活动之间的相互作用方面,从而为日地物理学和空间天气研究提供新的视角。美国 NASA 在传感卫星(LCROSS)上装载了 Goodrich 公司的新型短波红外(SWIR)摄像机,通过对月球环形山的观察探测到湿气的存在^[43],获得了月球有水存在的初步数据,这种探测能力可以穿过尘土、烟雾和浓雾,并精确记录火箭撞月过程以便对碎片云进行分析。在星体探测方面,由于短波红外窗口的大气辐射几乎为 0,该波段下可观测到的恒星数量远远高于可见光,因此加载在天文检测系统中的短波红外检测单元通过恒星赤经/赤纬、时间信息、载体经纬度及惯性测量单元的信息,可完成多颗星体的捕获、跟踪和同步测量,从而提高天文导航系统的精度^[44]。

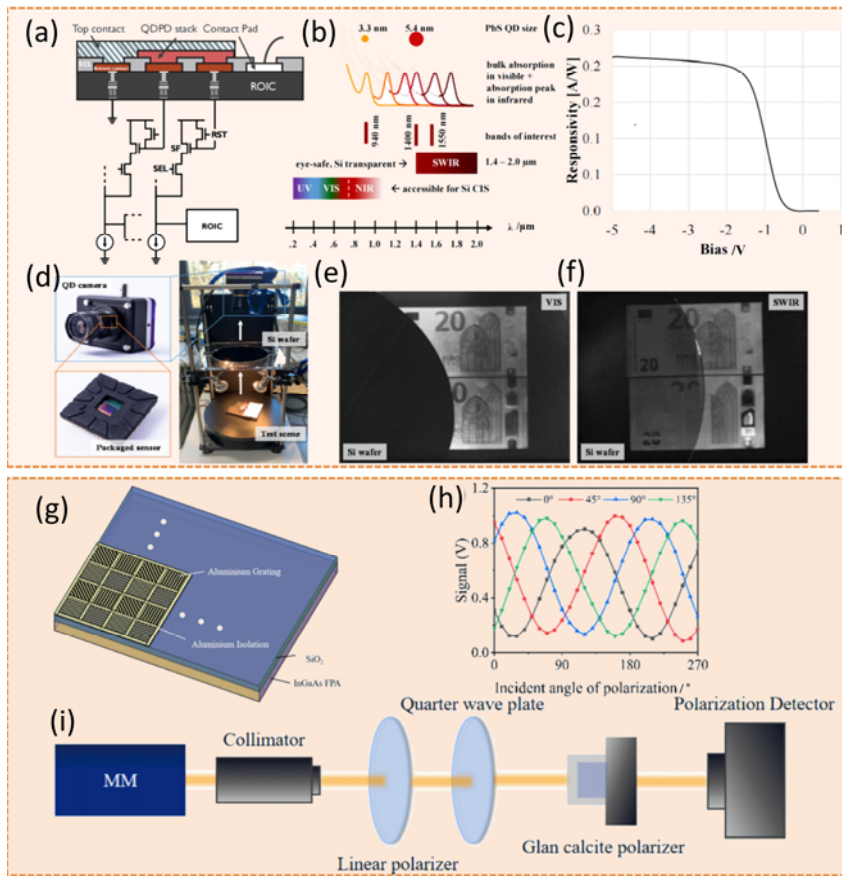


图 4 短波红外技术的系统设计简介: (a) 量子点图像传感器集成示意图; (b) 红外波长光谱及相关的硫化铅量子点尺寸; (c) 响应率与偏置电压的关系; (d) 量子点图像传感器测试装置; 在(e) VIS 和(f) SWIR 中通过硅晶圆获取的图像^[9]; (g) 偏振式 InGaAs FPA 的框图; (h) 1064 nm 波长下不同角度线偏振光的电信号函数关系; (i) 偏振性能测试系统的示意图^[40]

Fig.4 The system of short-wave infrared technology: (a) Quantum dot image sensor integration concept; (b) Infrared wavelength spectra and relevant PbS QD size; (c) responsivity vs.bias voltage; (d) QD image sensor test setup; Images acquired through a Si wafer in (e) VIS and in (f) SWIR^[9]; (g) Block diagram of the polarimetric InGaAs FPA; (h) Electrical signals as a function of different angles of linearly polarized light at 1064 nm; (i) Schematic diagram of polarization performance test system^[40]

近年来红外焦平面阵列技术的发展推动了航空领域在天文导航、天体测量、深空探测等方面的应用，为全球昼夜测星和全天自主导航奠定了技术基础。天文导航具备隐蔽性强、不受电磁干扰、安全可靠等特点，短波红外技术的应用进一步提升了导航精度与设备实用性。该系统已在实际应用中验证了其高效性和可靠性，对导航技术发展具有重要意义。SWIR 成像技术不仅改进了现有仪器和支持设施的诊断测量，还在探索高能粒子沉积分布、识别亚极光现象、研究 Alfvénic 极光以及探索氢夜辉亮度变异性等方面具有广泛应用潜力^[44]。

2.2 SWIR 在军事方面的应用

短波红外技术在军事中较为突出的优势主要体现在以下 3 方面：夜视探测能力、热辐射成像能力以及高光谱遥感的信息获取。首先其全天候工作能力和丰

富的图像信息细节获取等特点^[45]，极大地增强了军事侦察和监视的效果，尤其还可用于夜间辅助驾驶等，利于灵活的战略布局设置^[46]。短波红外对于目标的温度变化也较为敏感，因此可以通过热辐射成像来获取目标的温度分布、形状和运动信息，适用于进行短波红外成像制导和热成像识别，如图 5(c)(d)所示，对于复杂地形和伪装目标都有突出的侦查优势^[47]。此外，短波红外成像技术可用于遥感探测的车载、机载、星载等战场感知部分，能够在任何时间、任何环境中进行侦测，包括但不限于能源供给地标、轻重武器转运地、测试基地以及其他战略要点，对于战局把控有着举足轻重的地位。弹道导弹在各个飞行段的红外辐射特征不同，短波红外成像仪可以装备在反导系统中进行被动探测^[48]。

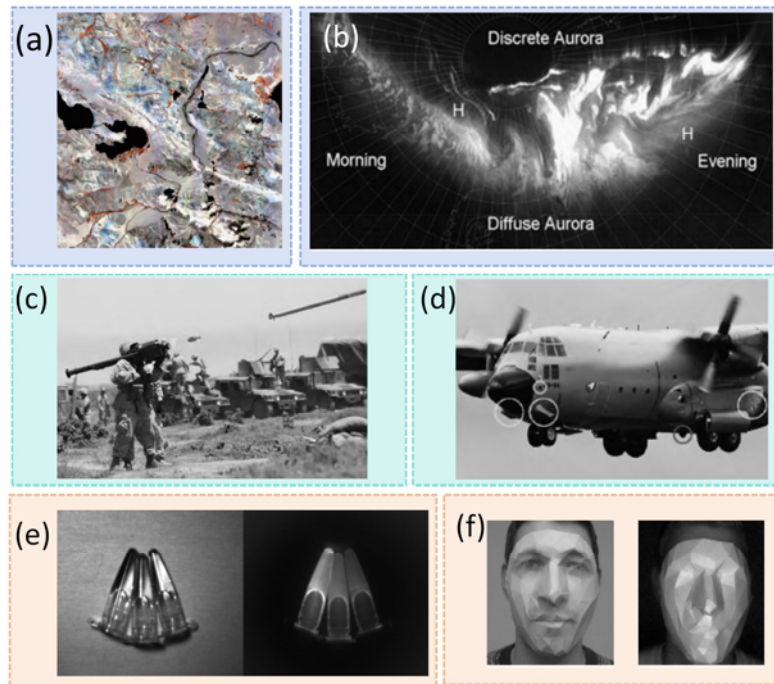


图5 航天、军事和安防应用示例: (a) GF-5/AHSI在轨获取的西藏日喀则短波红外三波段合成图像^[41]; (b) 对称夜空极光图像展示了氢元素发射区(用H标记)与椭圆区域在晨昏时段的相对位置关系^[42]; (c) 红外成像制导导弹; (d) 空中战机的热成像仪^[45]; (e) 可见光与短波红外的稀土掺杂纳米颗粒图像对比^[49]; (f) 面部冒充攻击算法在1450 nm、980 nm和可见光的成像效果^[50]

Fig.5 Aerospace, military and security application examples: (a) Short-wave infrared three-band composite image of Tibet's Shigatse acquired in-orbit by GF-5/AHSI^[41]; (b) Symmetric night sky aurora image illustrating the relative positional relationship between hydrogen emission zones (marked as H) and elliptical regions during twilight hours^[42]; (c) Infrared imaging guided missile; (d) Thermal imager of an aerial combat aircraft^[45]; (e) Comparison image of rare earth-doped nanoparticles in visible and short-wave infrared spectral^[49]; (f) Facial impersonation attack algorithm imaging effects at 1450 nm, 980 nm, and visible light^[50]

2.3 SWIR的安防应用

Ziniuk 等在 2021 年成功实现了短波红外发光寿命的实时成像^[49], 如图 5(e)所示, 为抗伪造应用提供了一种创新手段。防伪和伪造问题在银行、制药、电子和包装等多个行业中日益严重, 传统的防伪技术如水印、激光全息图等虽然有一定效果, 但存在易被复制或破解的问题。研究者基于光致发光 (photoluminescence, PL) 的原理, 使用稀土掺杂纳米颗粒制备了短波红外发光防伪标签, 其隐蔽性强、难以模仿且成本较低。该技术不仅适用于抗伪造领域, 还可在信息存储、生物成像和粒子追踪等领域发挥重要作用。下一步研究可探索更多种类的发光材料及其在复杂环境中的表现, 进一步提升系统的实用性和可靠性。Heusch 等在 2020 年研究了使用 SWIR 和深度学习模型处理面部冒充攻击^[50], 结合动态特征选择方法, 仅需两个 SWIR 差异即可达到最佳性能, 其应用效果如图 5(f)所示。未来研究可进一步探索波长优化、

跨数据库泛化能力以及多模态信息融合策略推动多模态生物识别技术的发展。

短波红外技术凭借“穿透识别”的核心能力, 有效拓展了监控镜头的视觉边界, 在复杂环境和恶劣天气下也能传递清晰的图像, 并且目标识别能力突出, 可以穿透伪装传达真实的目标信息, 为多类应用场景包括交通场所安检、监控、反侦察等需求提供了有效手段。

2.4 SWIR在农业与食品领域的应用

中科院安徽光机所团队于 2018 年研究了一种用于精准农业观测的高数值孔径短波红外成像光谱仪光学系统^[51], 其改进型 Dyson 成像光谱仪提供了高数值孔径、宽波段和高光谱分辨率, 能够精确获取农田复杂要素的细节信息, 提升遥感监测精度。张键等于 2019 年验证了短波红外成像光谱技术在小麦赤霉病检测中的可行性^[52], 特别是 1350~1600 nm 波段内光谱特征差异显著, 可用于快速识别和分选感染小麦。

这一技术突破了传统检测方法的局限性,实现了快速、无损的在线检测,为小麦赤霉病的早期筛查和防控提供了技术支持,有助于保障粮食安全和人类健康。刘国良等研制了一种便携式短波近红外漫透射玉米成分快速分析仪^[53],能够准确、快速地检测玉米中的水分、蛋白质、脂肪和淀粉含量。其独特的设计和校正模型使其在各种环境下都能保持良好的性能,为玉米仓储、深加工及市场交易提供了强有力的检测保障。Bonifazi等在2024年研究并成功开发了一种基于可见至短波红外光谱的非破坏性方法^[54],用于快速评估橄榄果实的水分含量。该方法在预测水分含量、果实重量和重量损失方面表现出良好的准确性,为橄榄油生产提供了实时监测手段。此外,研究者们还提出了短波红外光谱技术在农业和土地管理中具有广泛的应用潜力,

如监测橄榄树健康状况、优化灌溉管理和提高橄榄油质量。Wakholi等在2018年成功开发了一种基于短波红外高光谱成像技术的分类系统^[55],能够快速、无损地评估玉米种子的活性状态,如图6(a)所示。Emmanuel团队在2023年对比了可见、近红外以及短波红外对于石榴果实瘀伤的成像效果^[56],如图6(b)所示,发现短波红外高光谱对于其信息提取最为精简准确,并且图像可视化和数据分析过程中,其处理速度和效率都远超可见光近红外技术。唐江团队在2022年使用PbS CQDs集成的短波红外成像仪对苹果进行了探伤实验^[57],如图6(c)所示,与左图的可见光图像相比,右图的短波红外成像包含了更加丰富的细节,能够清晰探查到苹果的瘀伤。

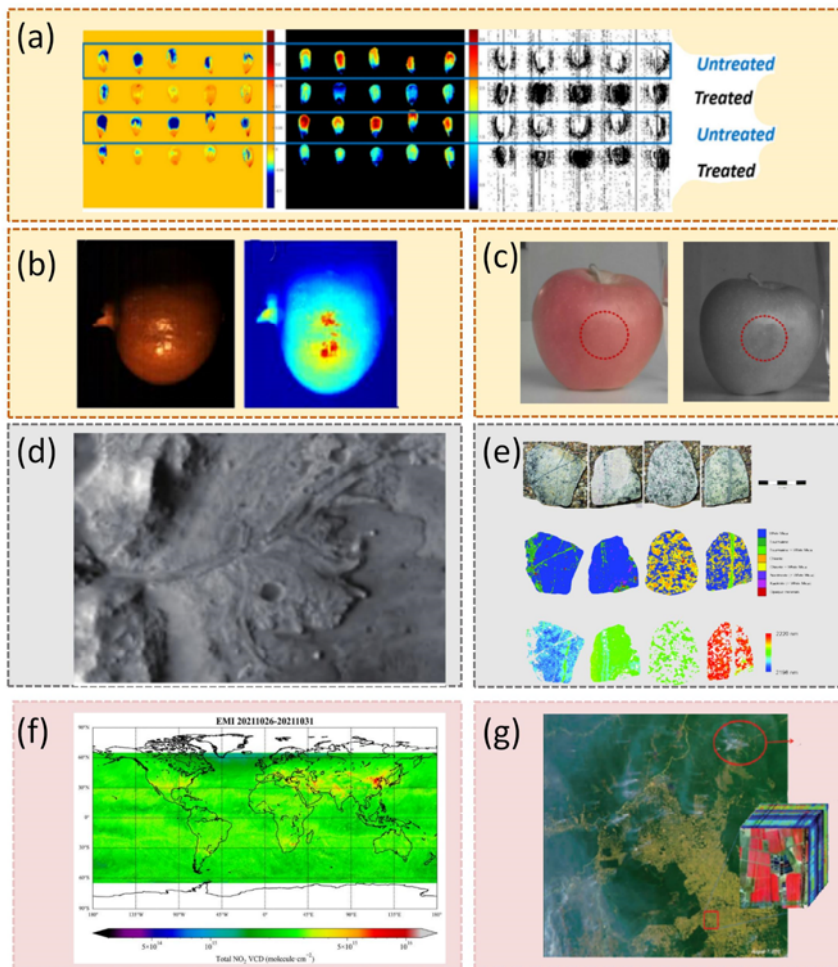


图6 农业、矿业与环境应用示例: (a) 利用短波红外成像评估玉米种子活性^[55]。(b) 石榴果实坠落形成瘀伤的短波红外成像图及效果处理图^[56];(c) 苹果探伤实验的可见光(左)与短波红外图像(右)对比^[57];(d) 勘查矿山储区图示^[59];(e) 从选定的短波红外高光谱图像中进行矿物学映射的结果^[62];(f) 全球NO₂监视示意图^[63];(g) 陆表环境综合观测应用^[64]

Fig.6 Agricultural, mining and environmental applications : (a) Evaluation of corn seed viability using short-wave infrared imaging^[55]; (b) Short-wave infrared images and post-processing results of pomegranate fruit bruising caused by fall^[56]; (c) Comparison between visible light (left) and short-wave infrared images (right) from apple flaw detection experiments^[57]; (d) Schematic diagram of mine storage area investigation^[59]; (e) Mineral mapping results from selected short-wave infrared hyperspectral images^[62]; (f) Global NO₂ monitoring schematic diagram^[63]; (g) Comprehensive observation applications for terrestrial environment^[64]

短波红外技术在农业与食品领域的推广将有助于实现联合国可持续发展目标,推动精准农业的发展。SWIR 相机收集食品的全光谱数据,揭示其化学成分和分子结构,未来可通过扩展样本范围和优化技术参数,进一步提升检测精度,推动短波红外技术在农业、食品检测等领域的广泛应用,为现代农业生产和食品安全提供重要保障。另一方面,还可结合遥感技术应用于农作物长势监测与分析、农作物病虫害预测以及农作物估产等,为现代农业生产和食品安全提供重要保障。

2.5 SWIR 的矿业应用

成都理工大学的团队在 2015 年利用短波红外光谱仪对西藏铁格隆南矿床进行蚀变矿物研究^[58],识别多种矿物并建立分带模型,表明短波红外技术能够细致划分蚀变矿物类型,还能通过矿物标型特征指示成矿热液的运移方向,为矿床成矿机制研究和找矿预测提供重要依据。陈亚萍等在 2022 年研究发现短波红外技术在覆盖区深部找矿勘探中表现出显著优势^[59],通过测定结晶度、设定光谱层级、构建峰值结构和重叠覆盖模型等步骤对于复杂环境下的矿山进行勘测,如图 6(d)所示。张志新等在 2019 年通过短波红外技术对伊利石结晶度进行分析^[60],探讨了新疆白杨河铀矿床的矿化/热液中心位置,为矿床外围勘查提供关键参考,从而提高铀矿勘探效率,推动矿产资源开发。陈华勇等在 2019 年利用短波红外光谱技术^[61],对鄂东南矿集区典型矽卡岩-斑岩型矿床的蚀变矿物进行研究,揭示了主要蚀变矿物短波红外特征值的变化规律,并提取了各矿床的有效勘查标志,研究过程中主要利用了短波红外光谱技术可以识别出许多肉眼和光学显微镜不易识别的细小矿物的特性,通过短波红外光谱参数的空间变化特征有效追踪热液矿化中心,进行了 1500 多个光薄片的显微岩相学观察,以识别不含水的蚀变矿物如石榴子石、透辉石等。Dalm 等在 2017 年应用短波红外高光谱成像技术在斑岩铜矿床中区分矿石与废料^[62],如图 6(e)所示,短波红外光谱能够显著提取不同矿物的特征区别。

短波红外技术具有较高的安全性和稳定性,非接触式和强穿透性能够最大程度保障施工人员的安全,同时减少对矿区的影响与损坏,若结合互联网大数据技术,可智能化、数字化地获取矿山数据,进一步完善矿山定位勘测结构,识别岩性、构造、矿化蚀变、矿山开采面、矿山开发占地变化、地质灾害类型、规模及分布位置等信息,为研究者与管理部门提供多类地质空间信息支撑。

2.6 SWIR 在环境领域的应用

短波红外技术在环境方面的应用主要分为两类,一种是利用遥感技术进行环境监测,对于空气、水文、林业等生态环境状况进行数据收集,并且还可用于灾害预警与调查等;另一种是利用短波红外光谱对于物质“指纹”识别的能力,可进行废弃物与垃圾回收分类的工作。

首先是应用于生态环境的监测,遥感数据可以涵盖大气、土地、水体以及森林等大面积的自然环境,不仅可以实时监测其面积范围的动态变化,还可以对各类污染物进行识别,针对一系列环境问题包括大气污染(图 6(f))、温室效应、雾霾、水体富营养化、城市热岛、土壤重金属污染等提供关键信息和治理反馈^[63]。同时,针对各类自然灾害包括森林草原火灾、冰凌、沙尘暴、病虫害、地震、山体滑坡、洪涝、旱灾等,也能做到受灾情况跟进与实时监控,如图 6(g)所示,以便及时有效地发布救灾决策^[64]。此外还可应用于深海探测,并且对于动植物的保护与监测工作也十分有帮助。在环保回收方面,例如塑料分选,SWIR 相机利用不同塑料材料在短波红外范围内的独特吸收特性,实现自动化分选,辅助以相关算法可通过多次筛选提高回收质量和效率。未来结合人工智能算法技术将进一步增强其智能决策、环境治理、防灾救灾能力,实现高效有力的环境规划与保护策略。

2.7 SWIR 的医疗生物相关应用

Jakob 的研究团队开发了一种短波红外线扫描共聚焦显微镜(short wave infrared linear scanning confocal microscope, SWIR LSCM),能够实现深层组织成像^[65]。该系统使用 InGaAs 线探测器,对短波红外光发射的荧光物质敏感。通过调整扫描角度和校正背景与平整度,实现了高像素速率成像。该研究团队使用 SWIR LSCM 对静脉注射 200 μL 的 0.05 mg/mL 临床批准的近红外染料吲哚菁绿(ICG)标记的小鼠脑血管进行成像,如图 7(a)~(c)所示。注射剂量为 0.5 mg/kg,与人类推荐剂量一致。成像结果显示密集的血管结构靠近脑表面,随着深度增加,毛细血管变得可见。Zhixi Yu 等在 2020 年报道了利用短波红外图像处理与分析技术成功实现了对小鼠血管病变的非侵入性精准识别^[66],如图 7(d)所示。这种具有各向异性表面电荷的金纳米簇与改进型短波红外成像设备的结合,使得活体动物血管网络的高分辨率精密测绘成为可能,并帮助研究者们深入理解其组织结构,充分彰显了结合高亮度造影剂与图像处理分析技术的显著优势,为提升 SWIR 成像在先进生物医学领域的应用灵敏度提供了重要支撑。Jessica 等人在 2016 年探讨了短波红外光在医学耳镜中的应用^[67],展示了其在耳

病理诊断中的潜力，特别是通过提高组织穿透深度和对比度，改进了对中耳结构的可视化效果，如图 7(e)~(f)所示，并有助于检测中耳积液，从而改善中耳炎的诊断。Diana 在 2017 年解决了如何利用短波红外光谱技术改善对乳腺癌、前列腺癌、骨骼等组织的成像和诊断^[68]。通过对不同组织在第二、第三和第四红外窗口的吸收和散射特性进行研究，探索这些窗口在生物医学成像中的潜力，从而为癌症和骨骼组织的有效评估提供新工具。

研究表明，SWIR 医疗成像仪能够显著提高病理组织的可视化效果，特别是在检测深层解剖结构和病变部位显示方面表现优异。与传统可见光设备相比，SWIR 医疗成像仪在成像深度、对比度和分辨率方面均具有明显优势。此外，SWIR 医疗成像仪的便携性和易用性使其易于在临床环境中推广^[69-72]。SWIR 医

疗成像仪的开发不仅为疾病的诊断提供了新工具，还为解决抗生素耐药性和过度治疗问题提供了潜在解决方案。通过提高诊断的客观性，SWIR 医疗成像仪有望减少误诊率，优化治疗方案。

未来的研究可以进一步探索短波红外技术在皮肤癌评估、脑部研究、动脉粥样硬化和易损斑块、动脉瘤以及骨病（如佩吉特病和骨生成不全）中的应用，并继续改进探测器和激光源技术以提升短波红外窗口的生物医学成像效果。同时，随着临床应用的不断扩展，对尖端机器学习模型的需求也将增长，这将开创一个前所未有的个性化生物仪器时代^[73]，能够根据每位患者的具体需求定制医疗护理。短波红外技术和机器学习的融合不仅将带来变革，还将改善全球个人的医疗保健结果。

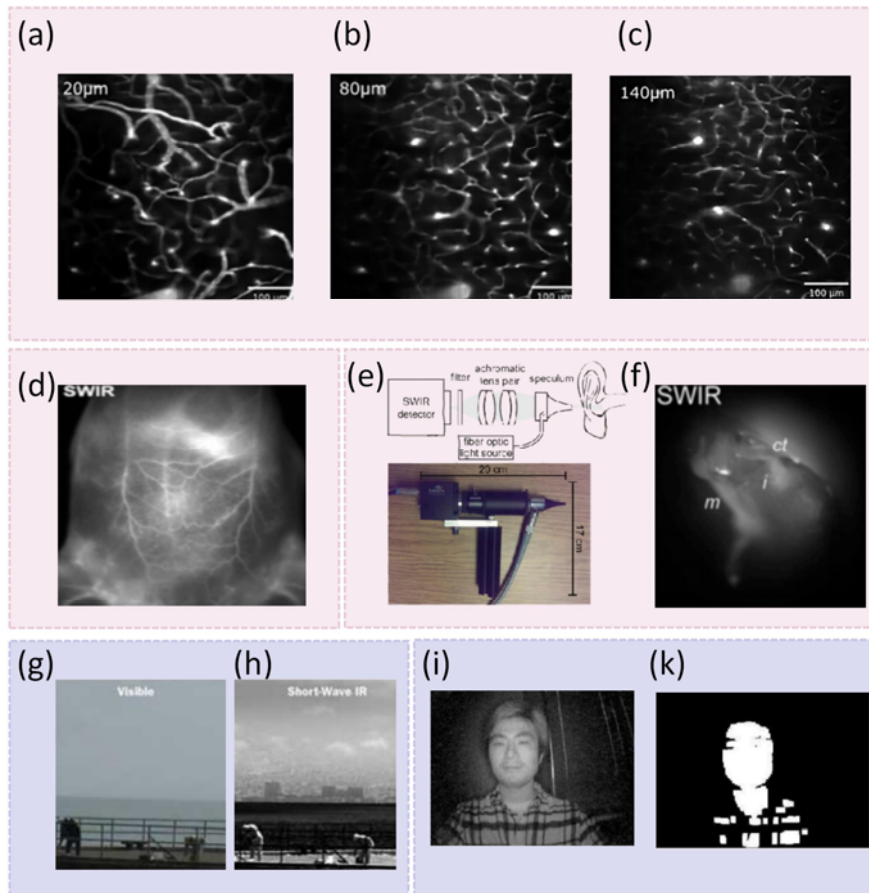


图 7 医疗与机器视觉应用示例：小鼠脑组织在(a) 20 μm 、(b) 80 μm 和(c)140 μm 深度的成像^[65]；(d) 短波红外成像技术用于血管疾病分辨^[66]；中耳病的短波红外成像(e)原理与(f)结果^[67]；(g) 可见光相机和(h) 短波红外相机拍摄的霾照片^[74]；(i) 短波红外原始图像与(j) 对应的二进制图像^[75]

Fig. 7 Medical and machine vision applications: Brain tissue imaging at (a) 20 μm , (b) 80 μm , and (c) 140 μm depths ^[65]; (d) Short-wave infrared imaging for vascular disease detection ^[66]; (e) Working principle and (f) results of short-wave infrared imaging for middle ear diseases^[67]; Haze images captured by (g) visible light camera and (h) short-wave infrared camera^[74]; (i) Original short-wave infrared image and (j) Corresponding binary image^[75]

2.8 SWIR 在机器视觉方面的应用

在消费级电子行业,短波红外技术对机器视觉应用的革新十分有力。以色列科技公司 TriEye 研发的 SWIR 传感技术用于帮助改进高级驾驶辅助系统(advanced driver assistance system, ADAS)和自动驾驶汽车,在恶劣天气和夜间条件下提高能见度,即使雾霾和烟雾遮挡的环境中也能对前方环境进行细节丰富的探查,与可见光(图 7(g))相比 SWIR 图片(图 7(h))能够穿透烟雾获取远视距信息^[74]。该项技术主要用于低能见度的情况下为自动驾驶汽车提供指导。使用自动驾驶汽车面临的主要问题是此类汽车单纯依赖传感系统,但是当能见度有限时,即使加上雷达、激光雷达和标准摄像头组合的帮助,仍然无法清楚地探测和识别路上的物体。TriEye 将 SWIR 传感技术整合至自动驾驶系统以解决上述问题。

Kang 等人提出了一种基于短波红外成像的低成本、非侵入式的消费级单芯片生物识别系统^[75],用于面部识别和个性化应用,如图 7(i)~(k)所示。这种技术推动了生物识别技术在日常生活中的普及,系统包含三个关键任务:人脸检测、眼睛检测和人脸识别。人脸检测通过聚类分析判断输入视频是否包含人脸;眼睛检测则利用边界分析提取眼睛坐标,确保识别精度;最后,基于预处理后的图像进行身份识别。为进一步提升系统性能,还可以通过提高眼睛检测和正脸姿态检测的准确性,并探索如何应对光照、表情和遮挡等其他变量的影响。该系统展示了在无风险安全场景中的潜力,如个性化娱乐设备、广告定向投放和汽车座椅调整等,为人机交互提供了新的可能性^[76-80]。

2.9 SWIR 的工业检测应用

Bonifazi 等研究者在 2025 年对于便携式 Vis-SWIR 光谱仪结合机器学习技术在现场检测石棉及相关材料方面进行了研究^[81],并提出建立广泛的光谱库以提高方法的鲁棒性和通用性,涵盖更多地理区域和工业场所的样品,引入实时处理能力进一步提升该方法在工业应用中的可扩展性和效率。Yunfei Li 等在 2025 年开发了一种新型的短波红外生物组织光谱检测系统^[82],结合改进的蒙特卡罗模拟和查表法,实现了在 1150~2200 nm 波段对生物组织的空间、时间及光谱域的高通量光学检测,并提取关键光学参数,为生物分子定量分析和生理监测提供了新的解决方案,有助于在畜牧业相关的生产流程中对产品进行质量检测。近期, Xia 等人利用 PbSe CQDs 短波红外成像仪对不同溶液以及高温电烙铁进行了成像^[83],与可见光(图 8(a))相比,图 8(b)展示了多种透明溶液的 SWIR 图像,彰显了短波红外成像下的溶液能够显示

出鲜明的色选特征,可以用于工业试剂的种类、纯度检测相关,同时在硅片遮挡下 SWIR 相机也能够清晰地观察到溶液色谱特征;而图 8(c)的可见光图像对比图 8(d)中电烙铁高温探头的 SWIR 差异信息十分显著,展示了其在工业检测中高温敏感的优势。Juntunen 等人在 2023 年报道了在短波红外波长范围内利用数字全息断层扫描技术进行光谱显微断层成像的方法^[84],能够对厚微观样本实现 4D 成像(3D 结构和 1D 化学信息),可以应用于检测微塑料、药物粉末等领域,并在深组织成像中准确建模光-皮肤相互作用,进一步结合光束旋转和样品旋转可以获得接近各向同性的分辨率。在半导体行业中,SWIR 相机能够检测硅晶体和晶圆中的杂质、晶圆表面、底部以及双层晶圆之间的颗粒污染物,无损穿透硅材料,到达内部从而识别断面或者缺陷,并确保封装工艺中的层间对准。随着工业化需求的增长,SWIR 相机正逐步扩展工业视觉应用,但是为了配合工业强度,需要进一步对其持续运行、高温环境和振动条件下的需求进行研究^[85]。在工业级的生产要求中,短波红外相机的物选光谱特性和热成像感应也有着非常广泛的应用需求,可以控制物品的温度均匀性和冷却速率以提高良品率,并且实时监测产品质量。

2.10 SWIR 在考古与鉴定领域的应用

研究人员在 2019 年运用短波红外高光谱成像技术(SWIR HSI)对赫库兰尼姆纸莎草卷其中一卷(PHerc. 1691/1021)进行检测^[86],成功揭示了首次发现 220 多年后仍隐藏在背面的希腊文残片,如图 8(e)所示,使得这部珍贵古籍新版的原始文献得以重见天日。SWIR HSI 技术显著提升了正面大面积文字的对比度与辨识度,对文本复原效果产生重大影响,在揭示和增强古文献方面展现了巨大潜力,尤其是对于难以直接接触的脆弱文物,如图 8(f)~(h)所示, Radpour 研究团队在 2019 年设计了一种基于扫描反射光谱技术的高光谱系统对考古壁画^[87]中的女性画像进行图像立方体重构。这些突破性成果为后续数百份同类文献的深度解析开辟了新路径,这些发现对于古代哲学、历史、文学、古文字学和古典语言学的研究具有重要意义。通过新技术的应用,不仅可以重构更多的文本内容,还能纠正先前的错误解读,为相关领域的学术研究提供新的视角和依据。Catelli 等在 2020 年报道了一种新型微型短波红外光谱仪的开发及其在文化遗产样品分析中的应用,展示了其在现场考古、电影胶片和青铜表面锈蚀研究中的潜力。新型微型短波红外光谱仪结合多变量数据分析,为文化遗产材料的现场无损分析提供了有力工具。该技术能够区分电影胶片基

材、评估骨骼中的胶原蛋白含量以及识别青铜雕塑表面的腐蚀产物^[88]。研究成果在文化遗产保护领域具有重要意义,例如通过快速识别胶片基材优化存储策略、通过胶原蛋白含量筛选骨骼样本以及通过腐蚀产物分析评估青铜雕塑的保存状态。该技术凭借低成本、便携性和易用性,有望被广泛应用于文物保护实践。在2024年,Casana等利用无人机获取的高分辨率SWIR影像来定位和识别地表文物的方法,如图8(i)所示,

能够更高效地记录和分析大范围的考古遗址分布^[89]。

未来大规模应用 SWIR HSI 技术至更多古代文献、文物、遗址的考察和研究,将进一步推动文化遗产科学的发展,并为解锁人类历史中的宝贵信息提供强有力的技术支持。未来研究将进一步开发自动化数据处理和解释的化学计量学方法,以提高分析效率和准确性,从而更好地支持文化遗产的保护工作。

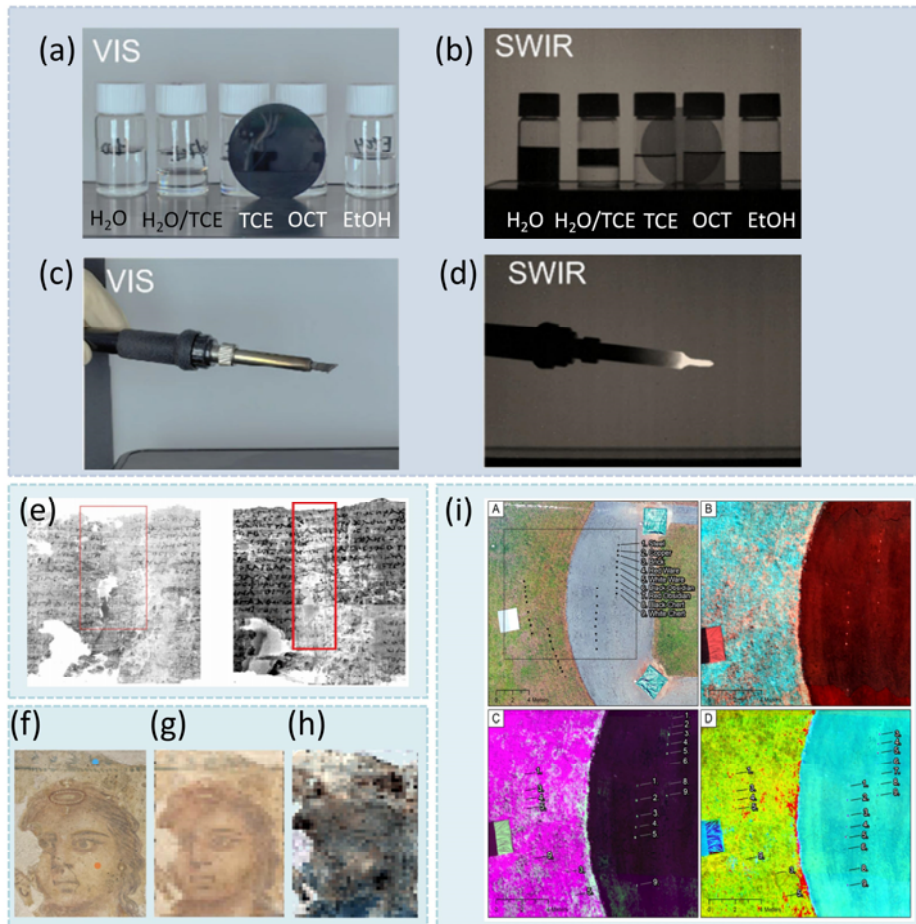


图8 工业检测与考古鉴定应用示例:由(a)智能手机的可见光相机和(b)HgTe CQD SWIR相机拍摄的水(H₂O)、四氯乙烯-水混合物(H₂O/TCE)、四氯乙烯(TCE)、辛烷(OCT)及乙醇(EtOH)的照片^[83]; (c)可见光与(d)短波红外相机拍摄的高温电烙铁图像对比^[83]; (e)利用短波红外成像显示赫库兰尼姆纸莎草卷背后的希腊文残片^[86]; (f)《女子肖像》画作中面部的彩色照片; (g)基于反射率图像立方体重建的精确彩色图像; (h)伪彩色SWIR图像^[87]; (i)实验性SWIR成像无人机拍摄的伪影按有序排列线性分布,图中数字对应伪影类型。A为可见光正射影像拼接图; B、C为两种不同波段组合的SWIR成像; D为使用萨维吉-戈莱滤波器进行平滑处理的一阶导数^[89]

Fig.8 Industrial inspection and archaeological authentication applications: photographs of water (H₂O), a mixture of tetrachloroethylene and water (H₂O/TCE), tetrachloroethylene (TCE), octane (OCT) and ethanol (EtOH) captured by (a) smartphone's visible camera and (b) the HgTe CQD SWIR camera^[83]; Comparison of (c) visible light and (d) high temperature soldering iron image taken by short-wave infrared camera^[83]; (e) Short-wave infrared imaging reveals Greek fragments beneath the papyrus scroll of Heraklion^[86]; (f) Color photograph of the face in Painting of a woman; (g) Reconstructed accurate color image from the reflectance image cube; (h) False-color SWIR image^[87]; (i) Experimental drone SWIR imaging with artifacts laid out in ordered lines, with numbers in the figure corresponding to artifact type. A is a Visible light orthomosaic; B and C are SWIR imagery in two different band combinations; D is a smoothed, first-derivative using a Savijky-Golay filter^[89].

3 总结与展望

短波红外技术在多元多维的信息获取和物质数据网构建过程中具有不可替代的作用,从材料与工艺、器件结构再到系统设计的整体创新突破是该技术的基石,结合重要应用领域的针对性研究和深入纵向分析则是其未来发展的推动力。本文总结了目前热门的短波红外材料的性能与工艺,相关光电探测器的结构,以及概述了系统级短波红外成像技术的关键组成与要点,并通过短波红外技术的各类特点细分介绍了在各个应用领域的重要或潜在贡献。未来的发展趋势将从高端的航天、军事应用逐步向消费级的电子、智驾等市场延伸。实现这一转型的关键在于:在持续开发高性能焦平面阵列的同时显著降低成本,而胶体量子点的研发,有望成为推动其成本指数级下降、进而迈向消费市场的核心途径。另一方面,开发大面阵、小像元、高帧频、低噪声的焦平面探测器始终是技术稳步推进的追求,短波红外单元探测器也需与多功能芯片深度集成,以实现光谱识别与分析功能的并行运行,再结合智能算法,即可达成端侧的实时分析与决策。整体技术路径正朝着“智能化、集成化、高性能”方向突破,不断拓展视觉范围与感知边界。

参考文献:

- [1] CAO F, LIU L, LI L. Short-wave infrared photodetector[J]. *Materials Today*, 2023, **62**: 327-349.
- [2] Tsai Y T, Huang Y K, Jiang Z F, et al. Cation substitution-induced partial inversion to pervade short-wave infrared light for improving the accuracy of artificial intelligence image recognition system[J]. *ACS Materials Letters*, 2023, **5**(3): 738-743.
- [3] YAN Y, LIU H Y, BIAN L, et al. Origin and suppression of dark current for high-performance colloidal quantum dot short-wave infrared photodetectors[J]. *Materials Horizons*, 2024, **11**(24): 6192-6221.
- [4] YU L, TIAN P, LIANG K. Advancements and challenges in colloidal quantum dot infrared photodetectors: strategies for short-wave infrared, mid-wave infrared, and long-wave infrared applications[J]. *Quantum Beam Science*, 2025, **9**(1): 9. doi.10.3390/qbs9010009
- [5] HUANG X, LIU Y, LIU G, et al. Short-wave infrared synaptic phototransistor with ambient light adaptability for flexible artificial night visual system[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, **33**(1): 2208836.
- [6] Steckel J S. 1.62 μm global shutter quantum dot image sensor optimized for near and shortwave infrared[C]// 2021 IEEE Int Electron Devices Meeting (IEDM). 2021, **23**(4): 1-4.
- [7] Rastogi P, CHU A, DANG T H, et al. Complex optical index of HgTe nanocrystal infrared thin films and its use for short wave infrared photodiode design[J]. *Advanced Optical Materials*, 2021, **9**(10): 2002066.
- [8] Lee J, Georgitzikis E, LI Y, et al. Imaging in short-wave infrared with 1.82 μm pixel pitch quantum dot image sensor[C]//2020 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2020, **16**(5): 1-4.
- [9] WEN M, WEI L, ZHUANG X, et al. High-sensitivity short-wave infrared technology for thermal imaging[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, **95**: 93-99.
- [10] 郑志忠, 杨忠, 修连存. 高衍射效率短波红外凸面闪耀光栅的研制与应用[J]. *光学学报*, 2020, **40**(12): 59-67.
- [11] ZHENG Z Z, YANG Z, XIU L C, et al. Development and application of high-reflectivity convex short-wavelength infrared grating with high refractive efficiency [J]. *Journal of Optics*, 2020, **40**(12): 59-67.
- [12] 张艺, 胡健钊, 朱尤攀, 等. 短波红外成像系统设计及应用的研究进展[J]. *红外技术*, 2024, **46**(3): 246-255.
- [13] ZHANG Y, HU J C, ZHU Y P, et al. Research advances in the design and application of short-wavelength infrared imaging systems [J]. *Infrared Technology*, 2024, **46**(3): 246-255.
- [14] CAO J, YU Y, LI T, et al. Lightly doped $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ SWIR photodetectors with diffusion barrier structure[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2024, **137**: 105112.
- [15] Uliel Y, Cohen-Elias D, Sicron N, et al. InGaAs/GaAsSb Type-II superlattice based photodiodes for short wave infrared detection[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, **84**: 63-71.
- [16] SUN X, Abshire J B, Beck J D, et al. HgCdTe avalanche photodiode detectors for airborne and spaceborne lidar at infrared wavelengths[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(14): 16589-16602.
- [17] 起文斌, 丛树仁, 宋林伟, 等. 液相外延碲镉汞薄膜缺陷综述[J]. *红外与激光工程*, 2023, **52**(7): 294-309.
- [18] QI W B, CONG S R, SONG L W, et al. A review of defects in liquid-phase epitaxial cadmium telluride-Hg film [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, **52**(7): 294-309.
- [19] Balakrishnan J, Sreeshma D, Siddesh B M, et al. Ternary alloyed HgCdTe nanocrystals for short-wave and mid-wave infrared region optoelectronic applications[J]. *Nano Express*, 2020, **1**(2): 020015.
- [20] 覃钢, 吉凤强, 夏丽昆, 等. 碲镉汞高工作温度红外探测器[J]. *红外与激光工程*, 2021, **50**(4): 18-28.
- [21] TAN G, JI F Q, XIA L K, et al. High-temperature infrared detector for cadmium telluride mercury[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, **50**(4): 18-28.
- [22] Choi H T, Kang J H, Ahn J, et al. Zero-dimensional PbS quantum dot-InGaZnO film heterostructure for short-wave infrared flat-panel imager[J]. *ACS Photonics*, 2020, **7**(8): 1932-1941.
- [23] ZHANG H, Alchaar R, Prado Y, et al. Material perspective on HgTe nanocrystal-based short-wave infrared focal plane arrays[J]. *Chemistry of Materials*, 2022, **34**(24): 10964-10972.
- [24] Gréboval C, Darson D, Parahyba V, et al. Photoconductive focal plane array based on HgTe quantum dots for fast and cost-effective short-wave infrared imaging[J]. *Nanoscale*, 2022, **14**(26): 9359-9368.
- [25] CAO T, CHEN S, FANG F, et al. Size effects of 1, 2-Ethanedithiol-treated PbS quantum dots on short-wave infrared photodetector hole transport layers[J]. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2025, **16**(19): 4607-4614.
- [26] DONG C, LIU S, Barange N, et al. Long-wavelength lead sulfide quantum dots sensing up to 2600 nm for short-wavelength infrared photodetectors[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, **11**(47): 44451-44457.
- [27] PENG L, WANG Y, REN Y, et al. InSb/InP core-shell colloidal quantum dots for sensitive and fast short-wave infrared photodetectors[J]. *ACS*

- nano*, 2024, **18**(6): 5113-5121.
- [24] Spieth C, Oehme M, Schäfer S, et al. Ge/GeSn pnp heterojunction phototransistor for short-wave infrared applications[J]. *Optics Express*, 2025, **33**(16): 34124-34137.
- [25] Thorburn F, Yi X, Greener Z M, et al. Ge-on-Si single-photon avalanche diode detectors for short-wave infrared wavelengths[J]. *Journal of Physics: Photonics*, 2021, **4**(1): 012001.
- [26] Ryckeboer E, Gassenq A, Hattasan N, et al. Integrated spectrometer and integrated detectors on Silicon-on-Insulator for short-wave infrared applications[C]//2012 *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*. *IEEE*, 2012: 1-2.
- [27] Dehzangi A, McClintock R, Haddadi A, et al. Type-II superlattices base visible/extended short-wavelength infrared photodetectors with a bandstructure-engineered photo-generated carrier extractor[J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**(1): 5003. doi.10.1038/s41598-019-41494-6
- [28] CHEN Q, ZHOU H, XU S, et al. A route toward high-detectivity and low-cost short-wave infrared photodetection: GeSn/Ge multiple-quantum-well photodetectors with a dielectric nanohole array metasurface[J]. *ACS Nano*, 2023, **17**(13): 12151-12159.
- [29] ZHAO Y, WANG N, YU K, et al. High performance silicon-based GeSn p-i-n photodetectors for short-wave infrared application[J]. *Chinese Physics B*, 2019, **28**(12): 128501. doi 10.1088/1674-1056/ab4e84.
- [30] HE Y, HU Y, PENG M, et al. One-dimensional crystal-structure Te-Se alloy for flexible shortwave infrared photodetector and imaging[J]. *Nano Letters*, 2024, **24**(19): 5774-5782.
- [31] Frydendahl C, Grajower M, Bar-David J, et al. Giant enhancement of silicon plasmonic shortwave infrared photodetection using nanoscale self-organized metallic films[J]. *Optica*, 2020, **7**(5): 371-379.
- [32] Benedikovic D, Virost L, Aubin G, et al. Silicon-germanium receivers for short-wave-infrared optoelectronics and communications: high-speed silicon-germanium receivers (invited review)[J]. *Nanophotonics*, 2021, **10**(3): 1059-1079.
- [33] CHEN Q, WU S, ZHANG L, et al. Transferable single-layer GeSn nanomembrane resonant-cavity-enhanced photodetectors for 2 μm band optical communication and multi-spectral short-wave infrared sensing[J]. *Nanoscale*, 2022, **14**(19): 7341-7349.
- [34] CUI J, FANG R, LIU X, et al. Comprehensive investigation of GeSn metasurface photodetector for short-wave infrared application[J]. *ACS Photonics*, 2024, **11**(10): 4126-4133.
- [35] JANG J, Shim J, Lim J, et al. Grating-resonance InGaAs narrowband photodetector for multispectral detection in NIR-SWIR region[C]//2022 *International Electron Devices Meeting (IEDM)*. *IEEE*, 2022: **19**(4): 1-4.
- [36] LU Y, WANG Y, XU C, et al. Construction of PtSe₂/Ge heterostructure-based short-wavelength infrared photodetector array for image sensing and optical communication applications[J]. *Nanoscale*, 2021, **13**(16): 7606-7612.
- [37] CAO L, JI R, WU S, et al. Low dark current lateral Ge PIN photodetector array with resonant cavity effect for short wave infrared imaging[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2024, **57**(16): 165103.
- [38] 宣斌, 赵泽宇, 罗曜伟, 等. 宽光谱可见-短波红外成像光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2023, **52**(4): 210-217.
- XUAN B, ZHAO Z Y, LUO Y W, et al. Design of a broad-spectrum visible-shortwave infrared imaging optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, **52**(4): 210-217.
- [39] 史衍丽, 李云雪, 白容, 等. 短波红外单光子探测器的发展(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2023, **52**(3): 35-50.
- SHI Y L, LI Y X, BAI R, et al. Development of sShort-wavelength infrared single-photon detectors (Special Issue) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, **52**(3): 35-50.
- [40] SUN C, SUN D, BO Y, et al. Fabrication and performance analysis of infrared InGaAs polarimetric detector with complete coverage of superpixel-structured grating[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, **123**: 104066.
- [41] 刘银年, 孙德新, 胡晓宁, 等. 可见短波红外高光谱相机有效载荷观测能力及应用前景[J]. *上海航天*, 2019, **36**(S2): 99-105.
- LIU Y N, SUN D X, HU X N, et al. It is evident that the short-wave infrared hyperspectral camera payload demonstrates effective observation capabilities and application potential [J]. *Shanghai Aerospace*, 2019, **36**(S2): 99-105.
- [42] Trondsen T S, Meriwether J, Unick C, et al. Short wave infrared imaging for auroral physics and aeronomy studies[J]. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 2024, **41**(2): 121-138.
- [43] 吴双卿, 杨光, 龙华保. 短波红外成像技术及其空间应用[C]//上海市红外与遥感学会第十九届学术年会论文集, 2014: 71-76.
- WU S Q, YANG G, LONG H B, et al. Short-wave infrared imaging technology and its space applications [C]//*Proceedings of the 19th Annual Conference of the Shanghai Society of Infrared and Remote Sensing*, 2014: 71-76.
- [44] 牛雷. 基于短波红外的天文检测系统研究与应用[J]. *现代导航*, 2019, **10**(6): 427-431.
- NIU L. Research and application of astronomical detection system based on short-wavelength infrared[J]. *Modern Navigation*, 2019, **10**(6): 427-431.
- [45] 张远利. 短波红外成像技术在军事上的应用进展[J]. *应用激光*, 2024, **44**(4): 171-177.
- ZHANG Y L. Advances in military applications of short-wavelength infrared imaging technology[J]. *Application of Laser Technology*, 2024, **44**(4): 171-177.
- [46] 蔡毅, 胡旭. 短波红外成像技术及其军事应用[J]. *红外与激光工程*, 2006(6): 643-647.
- CAI Y, HU X. Short-wave infrared imaging technology and its military applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006(6): 643-647.
- [47] 郭晖, 彭岔霞, 焦岗成, 等. 向短波红外延伸的微光夜视技术及其应用[J]. *应用光学*, 2014, **35**(3): 478-483.
- GUO H, PENG C X, JIAO G C, et al. Micro-light night vision technology extending to short-wave infrared and its applications [J]. *Applied Optics*, 2014, **35**(3): 478-483.
- [48] 杨爱粉. 短波红外激光在光电侦察与反侦察中的应用[J]. *应用光学*, 2019, **40**(6): 937-943.
- YANG A F. Application of short-wavelength infrared laser in photoelectric reconnaissance and counter-reconnaissance [J]. *Applied Optics*, 2019, **40**(6): 937-943.
- [49] Ziniuk R, Yakovlev A, LI H, et al. Real-time imaging of short-wave infrared luminescence lifetimes for anti-counterfeiting applications[J]. *Frontiers in Chemistry*, 2021, **9**: 659553.
- [50] Heusch G, George A, Geissbühler D, et al. Deep models and shortwave infrared information to detect face presentation attacks[J]. *IEEE Transactions on Biometrics, Behavior, and Identity Science*, 2020, **2**(4):

- 399-409.
- [51] 于磊, 陈素娟, 陈结祥, 等. 精准农业观测高数值孔径短波红外成像光谱仪光学系统[J]. *红外与激光工程*, 2018, **47**(12): 262-268.
YU L, CHEN S J, CHEN J X, et al. Optical system for high-resolution infrared imaging spectrometer in precision agricultural observation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, **47**(12): 262-268.
- [52] 张健, 崔继承, 刘晓梅, 等. 短波红外成像光谱技术在小麦赤霉病检测中的应用[J]. *光学技术*, 2019, **45**(5): 552-556.
ZHANG J, CUI J C, LIU X M, et al. Application of short-wavelength infrared imaging spectroscopy in detection of fusarium head blight in wheat [J]. *Optical Technology*, 2019, **45**(5): 552-556.
- [53] 刘国良, 张涛, 曹彦波, 等. 便携式短波近红外漫透射玉米成分快速分析仪的研制和应用[J]. *现代科学仪器*, 2006(6): 37-39.
LIU G L, ZHANG T, CAO Y B, et al. Development and application of a portable shortwave near-infrared transmittance rapid analyzer for corn components [J]. *Modern Scientific Instruments*, 2006(6): 37-39.
- [54] Bonifazi G, Gasbarrone R, Gattabria D, et al. Early study on visible (Vis) and short-wave infrared (SWIR) spectroscopy for assessing water content in olive fruits: towards sustainable land and agricultural practices[J]. *Land*, 2024, **13**(12): 2231.
- [55] Wakholi C, Kandpal L M, Lee H, et al. Rapid assessment of corn seed viability using short wave infrared line-scan hyperspectral imaging and chemometrics[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, **255**: 498-507.
- [56] Okere E E, Ambaw A, Perold W J, et al. Vis-NIR and SWIR hyperspectral imaging method to detect bruises in pomegranate fruit[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, **14**: 1151697.
- [57] LIU J, LIU P, CHEN D, et al. A near-infrared colloidal quantum dot imager with monolithically integrated readout circuitry[J]. *Nature Electronics*, 2022, **5**(7): 443-451.
- [58] 唐楠, 唐菊兴, 郭娜, 等. 短波红外光谱仪在矿床蚀变带研究中的应用——以西藏铁格隆南斑岩-浅成低温热液矿床为例[J]. *矿物学报*, 2015, **35**(S1): 925-926.
TANG N, TANG J X, GUO N, et al. Application of short-wave infrared spectroscopy in the study of alteration zoning in mineral deposits —— taking the Xizang Tegelong South porphyry-miscible low-temperature hydrothermal deposit as an example [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2015, **35**(S1): 925-926.
- [59] 陈亚萍, 李英芹, 马文婷. 短波红外勘查技术在覆盖区深部找矿勘探中的应用分析[J]. *中国新技术新产品*, 2022 (8): 143-145.
CHEN Y P, LI Y Q, MA W T. Application analysis of shortwave infrared exploration technology in deep mineral exploration in covered areas [J]. *China New Technologies and Products*, 2022(8): 143-145.
- [60] 张志新, 徐清俊, 白小虎, 等. 短波红外伊利石结晶度在新疆白杨河铀矿床勘查中的应用[J]. *科学技术与工程*, 2019, **19**(6): 32-37.
ZHANG Z X, XU Q J, BAI X H, et al. Application of short-wave infrared ilmenite crystallinity in uranium deposit exploration at Baiyanghe, Xinjiang [J]. *Science and Technology & Engineering*, 2019, **19**(6): 32-37.
- [61] 陈华勇, 张世涛, 初高彬, 等. 鄂东南矿集区典型矽卡岩-斑岩矿床蚀变矿物短波红外(SWIR)光谱研究与勘查应用[J]. *岩石学报*, 2019, **35**(12): 3629-3643.
CHEN H Y, ZHANG S T, CHU G B, et al. Study on short-wave infrared (SWIR) spectral analysis of alteration minerals in typical sphalerite-brucite deposits in southeast Hubei mineralized areas: exploration and application [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, **35**(12): 3629-3643.
- [62] Dalm M, Buxton M W N, Van Ruitenbeek F J A. Discriminating ore and waste in a porphyry copper deposit using short-wavelength infrared (SWIR) hyperspectral imagery[J]. *Minerals Engineering*, 2017, **105**: 10-18.
- [63] 张苗苗, 温渊, 叶翔, 等. 高光谱观测卫星概述及大气环境要素应用示例[C]//第二十六届大气污染防治技术研讨会论文集, 2022: 166-179.
ZHANG M M, WEN Y, YE X, et al. Overview of high-spectral observation satellites and application examples of atmospheric environmental elements [C]//26th Symposium on Air Pollution Prevention and Control, 2022: 166-179.
- [64] 孙允珠, 蒋光伟, 李云端, 等. 高光谱观测卫星及应用前景[J]. *上海航天*, 2017, **34**(3): 1-13.
SUN Y Z, JIANG G W, LI Y D, et al. High spectral observation satellite and its application prospects [J]. *Shanghai Aerospace*, 2017, **34**(3): 1-13.
- [65] Lingg J G P, Bischof T S, Arús B A, et al. Shortwave-infrared line-scan confocal microscope for deep tissue imaging in intact organs[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, **17**(11): 2300292.
- [66] YU Z, Musnier B, Wegner K D, et al. High-resolution shortwave infrared imaging of vascular disorders using gold nanoclusters[J]. *ACS Nano*, 2020, **14**(4): 4973-4981.
- [67] Carr J A, Valdez T A, Bruns O T, et al. Using the shortwave infrared to image middle ear pathologies[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, **113**(36): 9989-9994.
- [68] Sordillo D C, Sordillo L A, Sordillo P P, et al. Short wavelength infrared optical windows for evaluation of benign and malignant tissues[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2017, **22**(4): 045002-045002.
- [69] 杨景发, 刘玉颖, 李同锴. 中红外与短波红光综合治疗仪的临床应用与实验研究[J]. *红外技术*, 2002(3): 56-58.
YANG J F, LIU Y Y, LI T K. Clinical application and experimental study of combined treatment device for medium-infrared and short-wavelength red light [J]. *Infrared Technology*, 2002(3): 56-58.
- [70] Golovynskiy S, Golovynska I, Stepanova L I, et al. Optical windows for head tissues in near-infrared and short-wave infrared regions: approaching transcranial light applications[J]. *Journal of Biophotonics*, 2018, **11**(12): e201800141.
- [71] QI J, SUN C, Zebibula A, et al. Real-time and high-resolution bioimaging with bright aggregation-induced emission dots in short-wave infrared region[J]. *Advanced materials*, 2018, **30**(12): 1706856.
- [72] Thimsen E, Sadtler B, Berezin M Y. Shortwave-infrared (SWIR) emitters for biological imaging: a review of challenges and opportunities[J]. *Nanophotonics*, 2017, **6**(5): 1043-1054.
- [73] Salimi M, Roshanfar M, Tabatabaei N, et al. Machine Learning-assisted short-wave infrared (SWIR) techniques for biomedical applications: towards personalized medicine[J]. *Journal of Personalized Medicine*, 2023, **14**(1): 33.
- [74] Hank Hogan. With Infrared, Military Owns More Than the Night [EB/OL].[2013-4-1][2025-9-10]. <https://www.photonics.com/Article.aspx?AID=53438>.
- [75] Kang J, Borkar A, Yeung A, et al. Short wavelength infrared face recognition for personalization[C]//2006 International Conference on Image Processing. IEEE, 2006: 2757-2760.
- [76] SONG H, Yeo S, JIN Y, et al. Short-wave infrared (SWIR) imaging for

- robust material classification: overcoming limitations of visible spectrum data[J]. *Applied Sciences*, 2024, **14**(23): 2076-3417.
- [77] Valme D, Rassölkin A, Liyanage D C. From ADAS to material-informed inspection: review of hyperspectral imaging applications on mobile ground robots[J]. *Sensors*, 2025, **25**(8): 2346.
- [78] Pavlović M, Banjac Z, Kovačević B. Object tracking in SWIR imaging based on both correlation and robust Kalman filters[J]. *IEEE Access*, 2023, **11**: 63834-63851.
- [79] Miron A D. Multi-modal, multi-domain pedestrian detection and classification: proposals and explorations in visible over stereovision, FIR and SWIR[D]. *INSA de Rouen; Universitatea Babeş-Bolyai (Cluj-Napoca, Roumanie)*, 2014.
- [80] Hanson N, Lvov G, Rautela V, et al. PROSPECT: Precision Robot Spectroscopy Exploration and Characterization Tool[C]//2024 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. *IEEE*, 2024: 5244-5251.
- [81] Bonifazi G, Gasbarrone R, Palmieri R, et al. A characterization approach for end-of-life textile recovery based on short-wave infrared spectroscopy[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2024, **15**(3): 1725-1738.
- [82] LI Y, HU Q, CAI F, et al. Short wave infrared band spatial-temporal-spectral resolved sensing system and its application in bio-samples measurement[J]. *Optics Communications*, 2025, **583**: 131674.
- [83] XIA H, LIU J, YUAN M, et al. Uncooled and broadband PbSe colloidal-quantum-dot short-wave infrared photodetectors[J]. *Nano Letters*, 2025 **25**(36): 13689-13696.
- [84] Juntunen C, Abramczyk A R, Shea P, et al. Spectroscopic microtomography in the short-wave infrared wavelength range[J]. *Sensors*, 2023, **23**(11): 5164.
- [85] Hashagen J. Seeing beyond the visible: short-wave infrared (SWIR) cameras offer new application fields in machine vision[J]. *Optik & Photonik*, 2015, **10**(3): 34-37.
- [86] Tournié A, Fleischer K, Bukreeva I, et al. Ancient Greek text concealed on the back of unrolled papyrus revealed through shortwave-infrared hyperspectral imaging[J]. *Science advances*, 2019, **5**(10): eaav8936. DOI: 10.1126/sciadv.aav8936.
- [87] Radpour R, Delaney J K, Kakoulli I. Acquisition of high spectral resolution diffuse reflectance image cubes (350–2500 nm) from archaeological wall paintings and other immovable heritage using a field-deployable spatial scanning reflectance spectrometry hyperspectral system[J]. *Sensors*, 2022, **22**(5): 1915.
- [88] Catelli E, Scitutto G, Prati S, et al. A new miniaturised short-wave infrared (SWIR) spectrometer for on-site cultural heritage investigations[J]. *Talanta*, 2020, **218**: 121112.
- [89] Casana J, Ferwerda C. Drone-acquired short-wave infrared (SWIR) imagery in landscape archaeology: an experimental approach[J]. *Remote Sensing*, 2024, **16**(10): 1671.